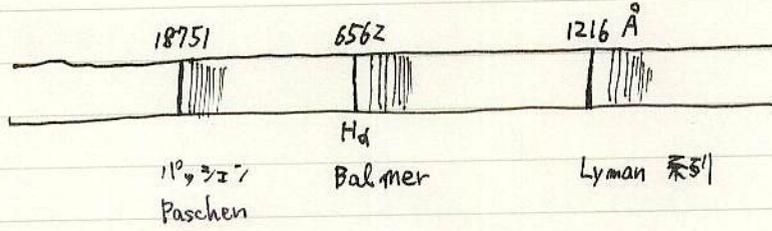
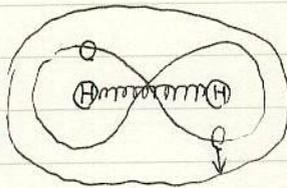
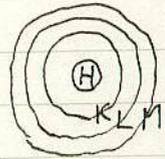
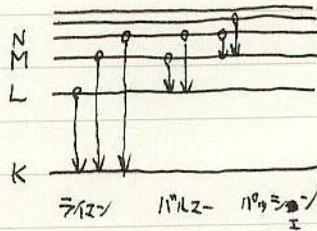


1978.10.8, 日. 理大 127.



$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$R$  — リーマン定数  
 $(109667.581 \text{ cm}^{-1})$



分子の回転  
 原子間の振動  
 電子の励起

## ANALYSIS OF THE SPECTRA OF LEONID METEORS

By

Ko NAGASAWA\*

(Received January 19, 1978)

## Abstract

Physical and chemical properties of meteor plasma are investigated in an attempt to obtain the chemical composition of meteoroids from their spectra. In this analysis, the effective thermal equilibrium state is assumed for the meteor plasma by defining an effective excitation temperature. For calculating the diffusion of the meteor column, two kinds of models, (i) an elastic sphere model and (ii) a pressure-balance model, are considered.

The theory is applied to the spectra of two Leonid meteors observed on November 16, 1965 and their physical conditions and chemical compositions are determined. The following results are obtained:

- (1) Elements of sodium, magnesium, calcium, manganese, iron and cobalt are found in the meteoroids.
- (2) Magnesium, iron and cobalt constitute a group of large abundance.
- (3) Sodium, calcium and manganese belong to a group of small abundance.

## 1. Introduction

It is now widely accepted that almost all meteors originate from comets while meteorites are from asteroids. Therefore, acquiring the knowledge about the chemical composition of meteoric substance is quite important for studying the origin and the evolution of the solar system. It may be expected that the composition can be determined by chemical analysis of meteoroids collected in the space. However, the collection of meteoroids in the space is an extremely difficult task.

At present, the determination of the chemical composition can be done only through analyses of meteor spectra except in the case of meteorites. However, it is not easy to obtain the composition of the meteoroids from the spectral analysis. The main reason is that the meteor radiation originates from a very complicated phenomenon and contains many physical processes which are still not well known. Moreover, there are several unknown parameters which are necessary in calculating the physical condition of the meteor plasma. As a result, the knowledge about the chemical composition of the meteoroids has remained rather incomplete.

The theoretical approaches to the analysis of the meteor radiation may be divided into two ways at present. One approach is based on the detailed investigation about the collision processes between the atoms evaporated from the meteoroid (Fe, Mg, Ca, Na, Al, etc.) and air molecules ( $N_2$  and  $O_2$ ) because the meteor radiation comes essentially from their collisions. This approach seems to be most reasonable. However, the main current of research in this line is only experimental (Boitnott and Savage 1970, 1971; Savage and Boitnott 1971, 1972, 1973). This is because the theory of inelastic collisions between heavy particles is quite complicated and it is difficult to obtain practical solutions. No rigorous theory is available which can be applied to the investigation of the meteor composition.

\* Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

An alternative approach is an application of the theory of the thermal equilibrium to the meteor radiation. This application is not always possible because the meteor radiation is not generated in thermal equilibrium state. It is, however, thought that the application is useful within a limited condition after giving some modifications to the theory. Though the method is conventional and the reliability of the result is rather limited, almost all the results about the meteor composition have been obtained by this method (Harvey 1973a, 1973b; Cepelcha 1964). This is because calculations are considerably simplified. Details of the method, however, have never been reported.

In this paper, an attempt is made to present the relations which lead to the determination of the physical condition in the meteor plasma and the chemical composition of the meteoroid. In Section 2, relations concerned with the meteor radiation are given under the assumption of effective thermal equilibrium. Ionizations and dissociations in the meteor plasma are taken into account. The diffusion of the meteor plasma is treated by adopting two models, an elastic sphere model and a pressure-blance model. The mean radius of the ionized column of the meteor together with its electron density are estimated for each model. The duration time of the meteor radiation is also calculated by using the elastic sphere model. In Section 3, the theory is applied to two spectra of meteors which belong to Leonid meteor shower and which were observed by the author on November 16, 1965, and their compositions are calculated. From the results, relative advantages of the two models are discussed.

## 2. Theoretical Treatment

### 2.1. Meteor Plasma

The meteor phenomenon occurs in the case when a small particle moving in the interplanetary space plunges into the atmosphere of the earth at a high speed. The particle is called a meteoroid. The meteoroid is heated rapidly by the collisions to air molecules and evaporates little by little from the surface. Meteoric gas thus produced forms a meteor plasma through dissociations and ionizations of gas particles by mutual collisions or collisions to air molecules. The plasma decelerates and is left behind the meteoroid as a slender column along the meteor path. Though the plasma is initially hot and dense, it diffuses gradually into the surrounding air and becomes cold.

A meteor is usually observed by its light. The light of meteor originates chiefly from the column of meteor plasma in an early stage of the diffusion. The duration time of the meteor radiation is very short and is supposed to be not more than 1 millisecond at any point of the meteor path except in the case of meteor train.

A meteor appears in a height range from 100 km to 80 km in an ordinary case. Here, the mean free path of air molecules varies from 7 cm to 0.5 cm. On the other hand, the initial mass of any meteoroid dose not exceed 1 g and its diameter is less than 1 cm even in the case of bright meteors. Because the diameter of the meteoroid decreases according as the meteoroid penetrates into the air, the diameter is always smaller than the mean free path of surrounding air molecules in the process of the meteor ablation. Then, no compressed air cap is formed in front of the meteoroid and no shock wave is generated. In this case, the kinetic theory of gases is useful for considering the interaction between the meteoroid and air molecules or for calculating the diffusion of the meteor plasma. For example, the total effect given to the meteoroid by the collision to the air molecules can be calculated by summing up the effect of the collision to an individual air molecule. Then, we assume that the state of the meteor plasma can be considered by inte-

grating the motion of an individual plasma particle in the elastic sphere model.

From the standpoint of meteor observations, there is little clue for considering the structure of the plasma column. Observational data have not been given for the density distribution and for the temperature distribution in the meteor plasma. Data also have not been known for the structural change with time in the plasma except for the diffusion of the ionized column observed by radio method (Greenhow and Neufeld 1955).

According to the above mentioned reason, it is inevitable to take some simplified assumptions for the meteor plasma in the analysis of meteor spectra. In this paper, we assume that the plasma is homogeneous and has a constant effective temperature, a constant chemical composition, a constant density and a constant radiation density during the time of the meteor radiation. By this assumption, the calculation of the meteor composition becomes possible if only one value is given for each parameter by an appropriate way.

## 2.2. Effective Excitation Temperature 有效励起温度

Meteor spectra are composed of a number of emission lines which are produced mainly by the collisional processes between meteor atoms and air molecules. As will be shown later, the relative intensities of the spectral lines can be interpreted by a single temperature. This temperature is called the "effective excitation temperature", and the meteor plasma is considered to be almost in thermal equilibrium at this temperature (Cepiecha 1964; Millman 1932). This effective excitation temperature is supposed to be the average value of excitation temperatures with respect to the radiating time and volume of the plasma column. The relations in effective thermal equilibrium were extended and applied for calculating the ionization of the meteor atoms and the dissociation of the molecules evaporated from the meteoroid (Harvey 1973b).

The effective excitation temperature is defined in the following way.

In a volume of gas in thermal equilibrium, the emission rate of radiation to a spectral line is given by the equation;

$$I_r = hcg'AN \cdot \exp(-\chi/kT)/4\pi\lambda B(T), \quad (1)$$

- where  $N$  : the number of atoms or ions considered in the column along the line of sight,  
 $T$  : excitation temperature,  
 $B(T)$  : partition function as a function of  $T$ ,  
 $g'$  : statistical weight of the upper level,  
 $A$  : probability of the spontaneous emission,  
 $\lambda$  : wavelength of the spectral line,  
 $\chi$  : excitation potential of the upper level,  
 $h$  : Planck's constant,  
 $c$  : speed of light  
 and  $k$  : Boltzmann's constant.

$$2.997925 \times 10^8 \text{ m sec}^{-1}$$

$$1.38054 \times 10^{-23} \text{ J deg}^{-1}$$

The spontaneous emission probability  $A$  relates to the absorption oscillator strength  $f$  by the following equation;

$$g'A = \frac{8\pi^2 e^2}{mc\lambda^2} gf, \quad (2)$$

- where  $e$  : charge of the electron,  $1.60210 \times 10^{-19} \text{ C}$   
 $m$  : mass of the electron,  $9.10908 \times 10^{-31} \text{ kg}$   
 $g$  : statistical weight of the lower level,  
 and  $f$  : absorption oscillator strength.

(160)

By assuming that the radiation continues for the time  $t$  without changing the state, the integrated intensity  $I$  emitted in each line is proportional to the product of  $I_r$  and  $t$ . That is, the relation is written as

$$I = tI_r. \quad (3)$$

Put

$$C = t \frac{N}{B(T)} \cdot \frac{2\pi\epsilon^2 h}{m}, \quad (4)$$

then, equation (3) becomes

$$I = C \frac{gf}{\lambda^3} \cdot \exp(-\chi/kT). \quad (5)$$

From equation (5), the excitation potential  $\chi$  of the upper level is written as

$$\chi = kT \cdot \ln C + kT \cdot \ln (gf/I\lambda^3), \quad (6)$$

then, a linear relationship between  $\chi$  and  $\ln (gf/I\lambda^3)$  holds.

Though equation (6) is valid only for the state of thermal equilibrium, experimental plots of  $\ln (gf/I\lambda^3)$  versus  $\chi$  yield approximately a linear relation for the data obtained from meteor spectra. Then, the value of  $T$  will be obtained from the most probable value of the coefficient. This temperature is called the effective excitation temperature  $T_e$  of the meteor plasma.

In general, the effective excitation temperature thus obtained differs from element to element and its standard deviation often amounts to some hundred degrees. This rather large difference has to be studied in future; in the followings, however, the effective excitation temperature  $T_e$  obtained from FeI will be taken as the standard because there are a number of FeI lines in the meteor spectra and the temperature is well determined for FeI.

For example, fourteen spectral lines which are free from blending and for which good measurements could be done are selected for FeI lines in the meteor spectrum No. 56 observed by the author. Their relative magnitudes  $M$ , wavelengths  $\lambda$ , the values of  $\log (gf)$ , the excitation potentials  $\chi$  and the values of  $\log (gf/I\lambda^3)$  are listed in Table 1. Here, the relative intensity  $I$  is obtained by the relation;

$$M = -2.5 \cdot \log (I). \quad (7)$$

As illustrated in Figure 1, the plot of the excitation potentials versus  $\log (gf/I\lambda^3)$  shows apparently a linear relation. Evidently from equation (6), the gradient of the line is proportional to the effective excitation temperature  $T_e$ . By applying the least squares method, the effective excitation temperature for the meteor spectrum No. 56 is determined as

$$T_e = 3184^\circ\text{K} \pm 356^\circ\text{K (s.d.)}. \quad (8)$$

Similarly for the other meteor spectrum No. 59 (Figure 2), the effective excitation temperature of

$$T_e = 3195^\circ\text{K} \pm 689^\circ\text{K (s.d.)}. \quad (9)$$

is obtained. Both temperatures coincide with each other though the standard deviations are large.

### 2.3. Atomic Abundance in the Meteor Plasma

If the radiating plasma is physically homogeneous in the meteor trail, the ratio in number of two radiating elements  $A$  and  $B$  would be given by (Harvey 1973a)

$$\frac{N_a}{N_b} = \frac{I_a B_a(T_e)}{I_b B_b(T_e)} \cdot \frac{g_b f_b \lambda_a^3}{g_a f_a \lambda_b^3} \cdot \exp \{(\chi_a - \chi_b)/kT_e\}, \quad (10)$$

Table 1. Intensities of FeI Lines (Spectrum No. 56).

| Identification*<br>number | Relative<br>magnitude | Wavelength | $\log(gf)$ | Excitation<br>potential       | $\log \frac{gf}{I\lambda^3}$ | $\log J_b$ |
|---------------------------|-----------------------|------------|------------|-------------------------------|------------------------------|------------|
| 4                         | -1.08 <sup>m</sup>    | 4046Å      | 0.43       | $\times 10^{-12}$ erg<br>7.26 | 13.18                        | -4.67      |
| 6                         | -1.14                 | 4132       | -0.68      | 7.35                          | 12.01                        | -3.40      |
| 6'                        | -1.31                 | 4202       | -0.55      | 7.08                          | 12.06                        | -3.72      |
| 8                         | -1.44                 | 4272       | 0.02       | 7.00                          | 12.56                        | -4.30      |
| 9                         | -1.29                 | 4326       | -0.14      | 7.13                          | 12.44                        | -4.05      |
| 10                        | -1.48                 | 4384       | -0.32      | 6.87                          | 12.16                        | -4.03      |
| 11                        | -1.37                 | 4427       | -2.89      | 4.55                          | 9.62                         | -3.77      |
| 12                        | -1.43                 | 4482       | -2.85      | 4.58                          | 9.63                         | -3.75      |
| 18                        | -1.09                 | 4921       | -0.09      | 8.54                          | 12.40                        | -2.63      |
| 19                        | -0.98                 | 4958       | 0.26       | 8.48                          | 12.78                        | -3.07      |
| 22                        | -1.14                 | 5110       | -3.34      | 3.86                          | 9.07                         | -3.90      |
| 24                        | -1.49                 | 5227       | -0.84      | 6.26                          | 11.41                        | -3.88      |
| 27                        | -1.25                 | 5371       | -1.54      | 5.21                          | 10.77                        | -4.28      |
| 31                        | -0.96                 | 5498       | -2.49      | 5.21                          | 9.91                         | -3.42      |

$\log B (3184^\circ\text{K})=1.37$

$\log J_b = -3.78 \pm 0.53$

\* See Table 7.

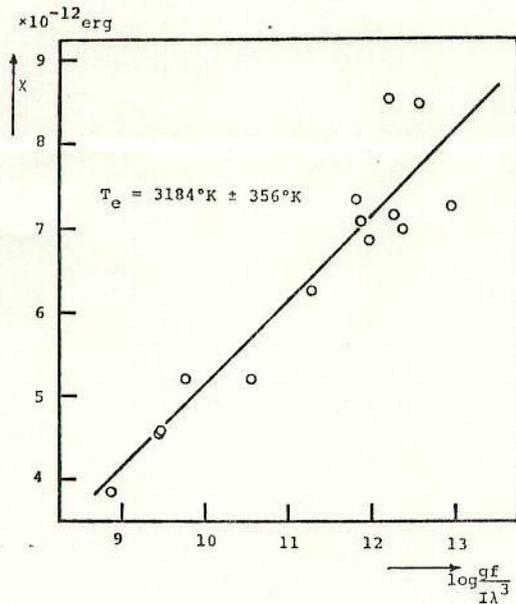


Fig. 1. The relation between excitation potentials  $\chi$  and  $\log(gf/I\lambda^3)$  for the lines of FeI in the meteor spectrum No. 56.

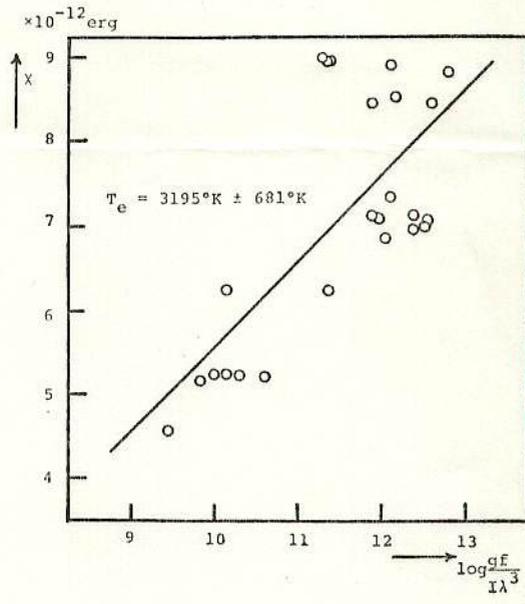


Fig. 2. The relation between excitation potentials  $\chi$  and  $\log(gf/I\lambda^3)$  for the lines of FeI in the meteor spectrum No. 59.

where suffix "a" is appended to the symbols corresponding to the element A, and "b" to the element B.

Equation (10) should be satisfied for any combination of A and B if the meteor plasma were in thermal equilibrium. The experimentally deduced value of  $N_a/N_b$ , however, depends considerably on the choice of spectral lines. To minimize observational errors as far as possible, the value  $J_a$  is defined for each line of element A by

(162)

$$J_a = \frac{I_a B_a(T_e) \lambda_a^3}{g_a f_a} \exp(\chi_a/kT_e). \tag{11}$$

When there are  $n$  lines available for the element  $A$ , the mean value of  $J_a$  is given by

$$\bar{J}_a = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (J_{a_i})}. \tag{12}$$

In a similar way,  $\bar{J}_b$  is obtained for the spectral lines of element  $B$ , and the number ratio can be represented by

$$\frac{N_a}{N_b} = \frac{\bar{J}_a}{\bar{J}_b}. \tag{13}$$

In actual calculations, FeI was adopted as the element  $B$ . Then, the amount of the other element was always given in the ratio relative to FeI.

2.4. Ionization and Dissociation

The number ratio obtained in Subsection 2.3 must be corrected for ionization and dissociation to reduce it to the real abundance ratio of the elements in the meteoroid.

The decomposition of the meteoroid occurs through several stages of dissociations and ionizations in the air. In early phases of the decomposition, the processes are certainly irreversible; the recombinations cannot compete with the dissociations. In the meteor plasma, however, it seems appropriate to assume that atoms and molecules are in both ionization and dissociation equilibrium. In this case, the degree of the ionization and the dissociation are determined solely by the temperature. If the equilibrium is not attained, they depend upon the cross section of all elementary processes whose values are not well known yet. In this paper, the corrections for the ionization and the dissociation are calculated under the assumption of thermal equilibrium.

As will be shown later, these correction factors are less than 2 for most of neutral atoms. Therefore, the correction factors calculated under the assumption of thermal equilibrium would not lead to a serious error in the final results.

When the ionization temperature is equal to the effective excitation temperature, the Saha's ionization formula holds;

$$\frac{N_1 N_e}{N_0} = \left\{ \frac{2B_1(T_e)}{B_0(T_e)} \cdot \frac{2\pi m k T_e}{h^2} \right\}^{3/2} \cdot \exp(-\chi_0/kT_e), \tag{14}$$

where  $N_0, N_1, N_e$ : number densities of neutral atoms, singly ionized atoms, and free electrons, respectively,

$B_0(T_e), B_1(T_e)$ : partition functions of neutral atoms and singly ionized atoms, respectively, and  $\chi_0$ : ionization potential of the atom.

For  $T_e \leq 4000^\circ\text{K}$ , it is unnecessary to take into account the ionization stages higher than the first. In actual calculations, the partition functions after Aller (1963) can be adopted.

It is known that a large energy is required for removing oxygen from the oxide of metal but a relatively small energy is sufficient for the other stages of the dissociation. Hence, as the first approximation, only the dissociation stages of oxides are taken into consideration for the decomposition of the meteoroid. Other stages of the dissociation or the dissociation other than the oxides are neglected here.

(1) Diatomic molecule (type AB)

There are several elements which compose of this type of molecules in the meteoroid. They are, for example, CaO, MgO, FeO, CoO, and MnO. For the diatomic molecule  $AB$ , the dissociation

論文の(1)式の説明

熱平衡のガスから出る光の中で、特定の輝線(波長 $\lambda$ )の強度 $I_\nu$ と1213  
この式は次のように4つの部分にわけて考える

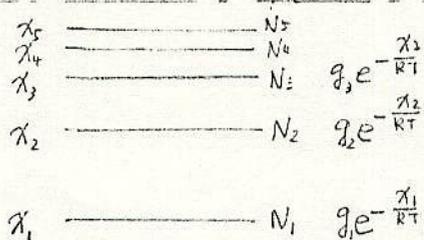
$$I_\nu = \underbrace{\frac{hc}{\lambda}}_{(1)} \cdot \underbrace{A}_{(2)} \cdot \underbrace{\frac{N}{B(\tau)}}_{(3)} g_i e^{-\frac{\chi}{RT}} \cdot \underbrace{\frac{1}{4\pi}}_{(4)}$$

(1) ... 1個の光子のエネルギー (波長 $\lambda$ の光子1個のエネルギーが  $\frac{hc}{\lambda}$ )

(2) ... 実際の遷移確率

(3) ...  $\chi$  だけ上の準位にある原子の数

(4) ... 単位立体角あたりの量への換算 (球の表面積は  $4\pi r^2$ )

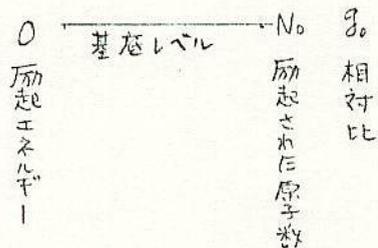


全数の原子数  $N = N_0 + N_1 + N_2 + \dots$

$i$  番目の準位にある原子数は

$$N_i = N \times \frac{g_i e^{-\frac{\chi_i}{RT}}}{g_0 + g_1 e^{-\frac{\chi_1}{RT}} + g_2 e^{-\frac{\chi_2}{RT}} + \dots}$$

この分母の合計が  
分配関数  $B(T)$



$$\therefore N_i = \frac{N}{B(T)} g_i e^{-\chi_i/RT}$$

== (3) と一致する

統計的重み  $g_i$  は、この準位が実は  $g_i$  個の重なったものであることを意味し (磁場をかけると

準位が  $g_i$  個のちがった高さにわかれる、ゼーマン効果)  $g_i = 2J+1$  であらわされる

$J$  は 原子の全角運動量に対する数である (正整数には  $\frac{h}{2\pi} J$ )

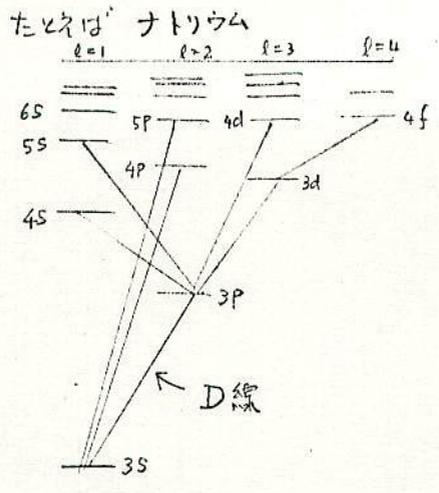
- 一般にある準位は
- 主量子数  $m = 1, 2, 3, \dots$
  - 方位量子数  $l = 0, 1, 2, \dots, m-1$
  - 磁気量子数  $m = l, l-1, l-2, \dots, 0, -1, -2, \dots, -l$
  - スピ量子数  $s = \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

できる。

個電子が1個なら  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$

2個以上なら

$$\begin{cases} \vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \dots \\ \vec{L} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2 + \dots \\ \vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \end{cases}$$



$l \quad 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad \dots$   
 $s \quad p \quad d \quad f \quad \dots$

D線の上のレベルは 3P

つまり  $m=3$   
 $l=1$

$l=1$  と  $s=\frac{1}{2}$  との組み合わせで

$J=\frac{1}{2}$  or  $J=\frac{3}{2}$        $g=2$  or  $4$

D線の下レベルは 3S

$m=3$   
 $l=0$

$l=0$  と  $s=\frac{1}{2}$  で  $J=\frac{1}{2}$        $g=2$

価電子 2 個以上のときは省略

遷移確率 A



上のレベルに電子があったとき、1秒間のあいだにその電子が下のレベルに落ちているという確率を遷移確率 A という。確率だから 1より小さいと思うかも知れないが、遷移という現象に比べて 1秒というのは非常に長い時間なので、この値は非常に大きい数になる

たとえば上の Na 3s-3p で  $A=6.2 \times 10^7 / s$

H の H $\alpha$  で  $A=4.39 \times 10^7 / s$

これを逆に考えると、Na では上のレベルに電子があると、平均して  $1/6.2 \times 10^7$  秒で下のレベルに落ちるようになる。

オシレーター ストレングス  $f$  (振動子強度) は 遷移確率 A に代るものとしてよく使われて、普通は遷移の下準位の値で示されることが多い。導き出し方は省略するが (2) 式で示される。この関係で書き直すとするのは、単に下のレベルの  $gf$  の値が表に載っているという便宜上のことだけである。  $g$  と  $f$  を切りはなさずにまとめて  $\log(gf)$  の形で示されていることが多い。論文のスペクトル線の表のところにそれぞれの数値が示されている。値の書いてあるのは測定値が文献にないためである。

$gf$  の値が大きいほど遷移はおこりやすい。

禁制線と呼ばれているスペクトル線は、通常の線 (Allowed lines) に比べて A あるいは  $gf$  が非常に小さい。たとえば OI 5577 A の線を OI 7775 A の線と比べると

|               | A                     | gf                 |
|---------------|-----------------------|--------------------|
| OI 5577       | 1.7/s                 | $8 \times 10^{-9}$ |
| OI 7775 (近赤外) | $4.0 \times 10^7 / s$ | 1.8                |

である。熱平衡の状態を考えると流星の 5577 A 線を説明するのは非常に困難なことがわかるであろう。

IONIZATION POTENTIALS OF ATOMS OF ASTROPHYSICAL INTEREST  
 (National Bureau of Standards Circular No. 467, C. E. Moore)

| 電子を右側の数だけとるエネルギー |    |            | I        | II    | III   | IV     |
|------------------|----|------------|----------|-------|-------|--------|
| 1                | H  | hydrogen   | 13.60 eV |       |       |        |
| 2                | He | helium     | 24.58    | 54.40 |       |        |
| 3                | Li | lithium    | 5.39     | 75.62 |       |        |
| 4                | Be | beryllium  | 9.32     | 18.21 |       |        |
| 5                | B  | boron      | 8.30     | 25.15 |       |        |
| 6                | C  | carbon     | 11.26    | 24.38 | 47.87 | 64.48  |
| 7                | N  | nitrogen   | 14.53    | 29.59 | 47.43 | 77.45  |
| 8                | O  | oxygen     | 13.61    | 35.11 | 54.89 | 77.39  |
| 9                | F  | fluorine   | 17.42    | 34.98 | 62.65 | 87.14  |
| 10               | Ne | neon       | 21.56    | 41.07 | 63.50 | 97.02  |
| 11               | Na | sodium     | 5.14     | 47.29 | 71.65 | 98.88  |
| 12               | Mg | magnesium  | 7.64     | 15.03 | 80.12 | 109.29 |
| 13               | Al | aluminum   | 5.98     | 18.82 | 28.44 | 119.96 |
| 14               | Si | silicon    | 8.15     | 16.34 | 33.46 | 45.13  |
| 15               | P  | phosphorus | 10.48    | 19.72 | 30.16 | 51.35  |
| 16               | S  | sulphur    | 10.36    | 23.40 | 35.00 | 47.29  |
| 17               | Cl | chlorine   | 13.01    | 23.80 | 39.90 | 53.50  |
| 18               | Ar | argon      | 15.76    | 27.62 | 40.90 | 59.79  |
| 19               | K  | potassium  | 4.34     | 31.81 | 46.00 | 60.90  |
| 20               | Ca | calcium    | 6.11     | 11.87 | 51.21 | 67.00  |
| 21               | Sc | scandium   | 6.54     | 12.80 | 24.75 | 73.90  |
| 22               | Ti | titanium   | 6.82     | 13.57 | 27.47 | 43.24  |
| 23               | V  | vanadium   | 6.74     | 14.65 | 29.31 | 48.00  |
| 24               | Cr | chromium   | 6.76     | 16.49 | 30.95 |        |
| 25               | Mn | manganese  | 7.43     | 15.64 | 33.69 |        |
| 26               | Fe | iron       | 7.87     | 16.18 | 30.64 |        |
| 27               | Co | cobalt     | 7.86     | 17.05 | 33.49 |        |
| 28               | Ni | nickel     | 7.63     | 18.15 | 35.16 |        |
| 29               | Cu | copper     | 7.72     | 20.29 | 36.83 |        |
| 30               | Zn | zinc       | 9.39     | 17.96 | 39.70 |        |
| 31               | Ga | gallium    | 6.00     | 20.51 | 30.70 |        |
| 32               | Ge | germanium  | 7.88     | 15.93 | 34.21 |        |
| 33               | As | arsenic    | 9.81     | 18.63 | 28.34 |        |
| 34               | Se | selenium   | 9.75     | 21.50 | 32.00 |        |
| 35               | Br | bromine    | 11.84    | 21.60 | 35.90 |        |
| 36               | Kr | krypton    | 14.00    | 24.56 | 36.90 |        |
| 37               | Rb | rubidium   | 4.18     | 27.50 |       |        |
| 38               | Sr | strontium  | 5.69     | 11.03 |       |        |
| 39               | Y  | yttrium    | 6.38     | 12.23 |       |        |
| 40               | Zr | zirconium  | 6.84     | 13.13 |       |        |
| 41               | Nb | niobium    | 6.88     | 14.32 |       |        |
| 42               | Mo | molybdenum | 7.10     | 16.15 |       |        |
| 43               | Tc | technetium | 7.28     | 15.26 |       |        |
| 44               | Ru | ruthenium  | 7.36     | 16.76 |       |        |
| 45               | Rh | rhodium    | 7.46     | 18.07 |       |        |
| 46               | Pd | palladium  | 8.33     | 19.42 |       |        |
| 47               | Ag | silver     | 7.57     | 21.48 |       |        |
| 48               | Cd | cadmium    | 8.99     | 16.90 |       |        |
| 49               | In | indium     | 5.78     | 18.86 |       |        |
| 50               | Sn | tin        | 7.34     | 14.63 |       |        |
| 51               | Sb | antimony   | 8.64     | 16.50 |       |        |
| 52               | Te | tellurium  | 9.01     | 18.60 |       |        |
| 53               | I  | iodine     | 10.45    | 19.09 |       |        |
| 54               | Xe | xenon      | 12.13    | 21.20 |       |        |
| 55               | Cs | caesium    | 3.89     | 25.10 |       |        |
| 56               | Ba | barium     | 5.21     | 10.00 |       |        |
| 57               | La | lanthanum  | 5.61     | 11.40 |       |        |
| 72               | Hf | hafnium    | 7.00     | 14.90 |       |        |
| 73               | Ta | tantalum   | 7.88     | 16.20 |       |        |
| 74               | W  | tungsten   | 7.98     | 17.70 |       |        |
| 75               | Re | rhenium    | 7.87     | 16.60 |       |        |
| 76               | Os | osmium     | 8.70     | 17.00 |       |        |
| 77               | Ir | iridium    | 9.00     |       |       |        |
| 78               | Pt | platinum   | 9.00     | 18.56 |       |        |
| 79               | Au | gold       | 9.22     | 20.50 |       |        |
| 80               | Hg | mercury    | 10.43    | 18.75 |       |        |
| 81               | Tl | thallium   | 6.11     | 20.4  |       |        |
| 82               | Pb | lead       | 7.42     | 15.03 |       |        |
| 83               | Bi | bismuth    | 7.29     | 16.68 |       |        |

TABLE 3-2A  
PARTITION FUNCTIONS  
(Temperatures in degrees Kelvin)

|       | 3600 | 5700 | 8000  | 10,000 |        | 3600 | 5700 | 8000 | 10,000 |
|-------|------|------|-------|--------|--------|------|------|------|--------|
| Li I  | 2.0  | 2.4  | 3.0   | 3.6    | Cu I   | 20.4 | 25.2 | 32.4 | 41     |
| Be I  | 1.0  | 1.05 | 1.15  | 1.41   | Cu II  | 1.0  | 1.05 | 1.29 | 1.74   |
| C     | 9.1  | 9.3  | 9.5   | 9.8    | Ga I   | 6.0  | 6.0  | 6.2  | 6.5    |
| N     | 1.0  | 1.08 | 1.35  | 1.70   | Ge I   | 7.6  | 8.5  | 9.8  | 10.3   |
| O     | 8.5  | 8.9  | 9.1   | 9.4    | Ge II  | 3.8  | 4.37 | 4.8  | 5.0    |
| Na I  | 2.00 | 2.40 | 3.17  | 4.3    | Rb I   | 2.2  | 2.4  | 8.3  |        |
| Mg I  | 1.0  | 1.05 | 1.20  | 1.48   | Sr I   | 1.05 | 1.41 | 2.9  | 5.25   |
| Mg II |      |      |       | 2.0    | Sr II  | 2.04 | 2.30 | 2.82 | 3.46   |
| Al I  | 5.76 | 5.90 | 6.2   | 6.6    | Y I    | 11.0 | 14.1 | 21.8 | 25.0   |
| Al II |      |      |       | 1.0    | Y II   | 14.8 | 17.4 | 21.4 | 25.7   |
| Si I  | 8.9  | 9.5  | 10.45 | 11.2   | Y III  |      |      | 10.5 | 10.7   |
| Si II | 5.60 | 5.70 | 5.75  | 5.9    | Zr I   | 23.4 | 40.8 | 67.5 | 98     |
| P I   | 4.0  | 4.5  | 5.75  |        | Zr II  | 41.7 | 51.2 | 67.5 | 89     |
| P II  | 8.0  | 8.1  | 8.9   | 10     | Zr III |      |      | 25   | 27.6   |
| S     | 8.5  | 8.5  | 8.7   | 9.0    | Nb I   | 40   | 60   | 91   | 129    |
| K I   | 3.5  | 4.1  | 7.8   | 15.5   | Nb II  | 33   | 52.5 | 78   | 98     |
| Ca I  | 1.05 | 1.32 | 2.62  | 4.7    | Mo I   | 7.4  | 10.7 | 19   | 34     |
| Ca II | 2.04 | 2.30 | 2.82  | 3.55   | Mo II  | 5.35 | 8.1  | 15.1 | 25     |
| Sc I  | 11.0 | 13.8 | 21.0  | 30     | Ru I   | 25.7 | 38   | 56   | 79     |
| Sc II | 20.9 | 24.0 | 29.5  | 33.2   | Ru II  | 19.5 | 26   | 35.5 | 47     |
| Ti I  | 23.0 | 34.0 | 54.0  | 81.2   | Pd I   | 1.95 | 3.9  | 6.18 | 8.3    |
| Ti II | 48.0 | 56.2 | 72.5  | 85.0   | Pd II  | 6.9  | 7.6  | 8.5  | 9.3    |
| V I   | 38.0 | 54.0 | 76    | 107    | Ag I   | 2.0  | 2.0  | 2.14 | 2.3    |
| V II  | 35.5 | 49   | 58    | 69     | Ag II  | 1.0  | 1.0  | 1.0  | 1.0    |
| Cr I  | 8.35 | 12.0 | 18.6  | 25.8   | Cd I   | 1.0  | 1.0  | 1.05 | 1.12   |
| Cr II | 6.2  | 8.1  | 11.7  | 17.4   | In I   | 3.6  | 4.3  | 5.0  | 5.8    |

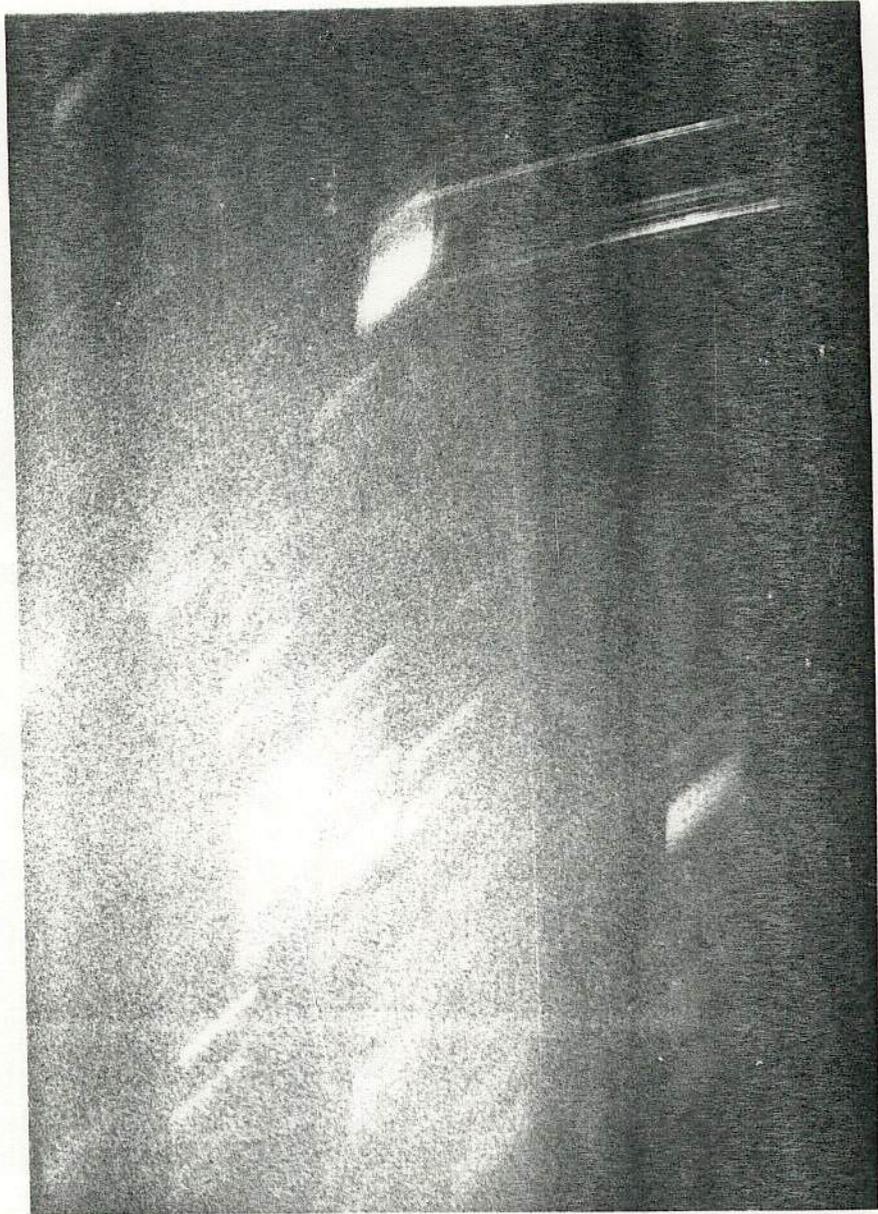
|        | 3600 | 5700 | 8000 | 10,000 |       | 3600 | 5700 | 8000 | 10,000 |
|--------|------|------|------|--------|-------|------|------|------|--------|
| Mn I   | 6.0  | 7.1  | 9.3  | 13.2   | In II | 2.6  | 4.1  | 5.1  | 5.9    |
| Mn II  | 7.2  | 8.3  | 9.5  | 10.8   | Sn I  | 4.1  | 5.9  | 7.2  | 8.3    |
| Fe I   | 24   | 31   | 44.6 | 60.1   | Sn II | 2.76 | 3.4  | 3.9  | 4.2    |
| Fe II  | 37   | 47   | 56   | 67.5   | Sb I  | 4.3  | 5.1  | 6.3  | 7.4    |
| Fe III |      |      | 25   | 29     | Sb II | 2.46 | 3.8  | 5.0  | 6.0    |
| Co I   | 24.6 | 35   | 46.7 | 60     | Ba I  | 1.52 | 3.55 | 8.1  | 14.1   |
| Co II  | 22   | 31   | 40   | 47     | Ba II | 3.24 | 4.7  | 6.0  | 7.1    |
| Co III |      |      | 25.7 | 28.2   | La I  | 19   | 22   | 31   |        |
| Ni I   | 28   | 32.3 | 37   | 41.7   | La II | 28   | 33   | 42   |        |
| Ni II  | 9    | 12.0 | 16.6 | 22     | Pb I  | 1.20 | 1.82 | 2.63 | 3.56   |
| Ni III |      |      | 18   | 19     | Pb II | 2.0  | 2.14 | 2.34 | 2.50   |

東海大学 1979年12月15日 23h35m35s -4等 Gem 群  
 FISIR コイル9-1aL D-19 5分

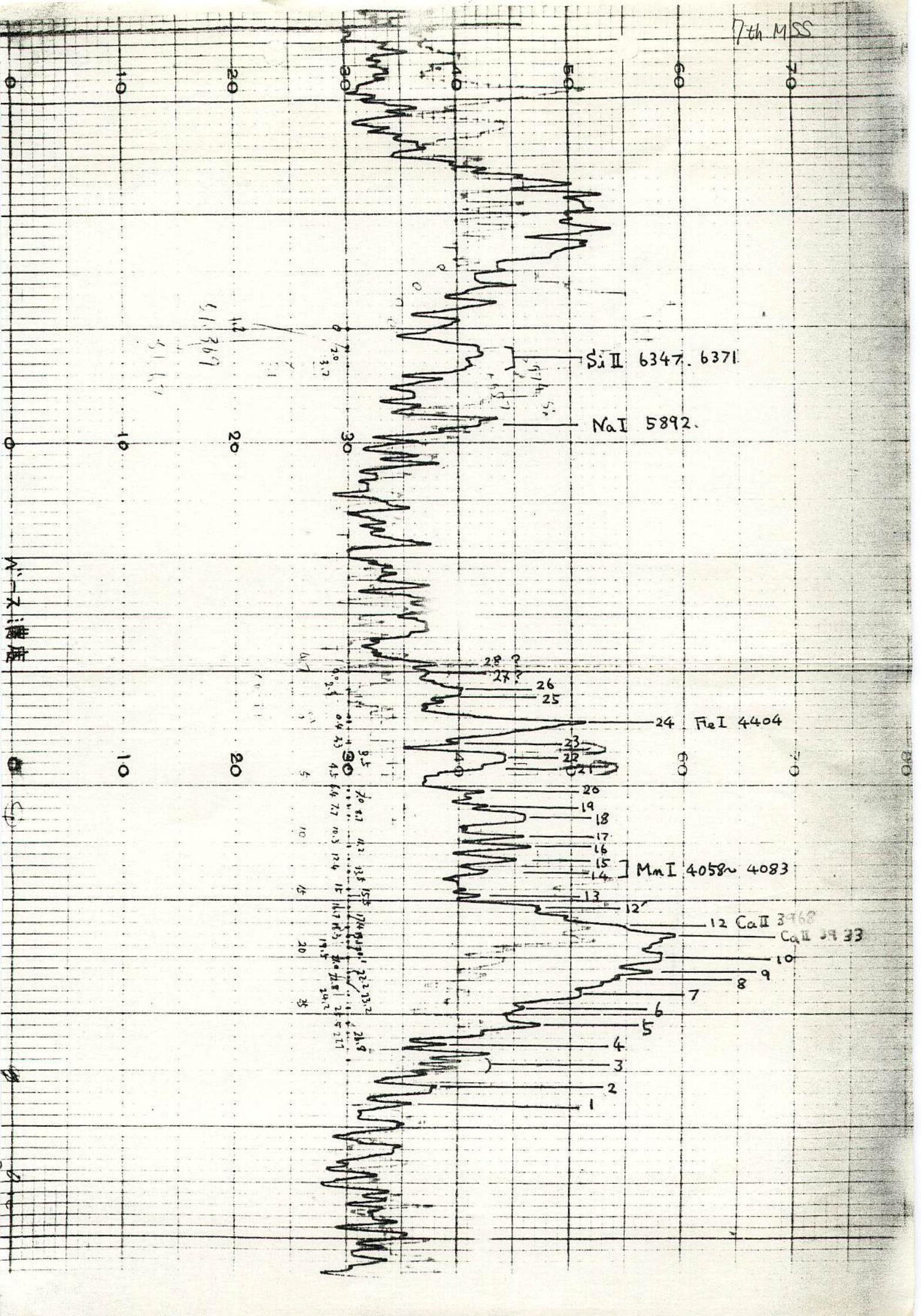
| NO. | $\lambda(\text{\AA})$ measured | $\lambda(\text{\AA})$ identified | multiplet No          | Remarks  |
|-----|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------|
| 1   | 3760                           | 3746<br>3749<br>3759             | 5 Fe<br>5 Fe<br>21 Fe |          |
| 2   | 3860*                          | —                                | 4 Fe                  | ] Strong |
| 3   | 3870                           | 3873<br>3879                     | 20 Fe<br>4 Fe         |          |
| 4   | 3900                           | 3900                             | 4 Fe                  | ] Strong |
| 5   | 3934*                          | —                                | 1 Ca II               |          |
| 6   | 3968*                          | —                                | 1 Ca II               |          |
| 7   | 4000                           | 4005                             | 43 Fe                 |          |
| 8   | 4010                           | 4010                             | 72 Fe                 |          |
| 9   | 4050                           | 4046                             | 43 Fe                 |          |
| 10  | 4110                           | 4101                             | 18 Fe                 |          |
| 11  | 4200                           | 4202                             | 3 Fe                  | Strong   |
| 12  | 4230                           | 4234                             | 152 Fe                |          |
| 13  | 4280                           | 4272                             | 42 Fe                 |          |
| 14  | 4380                           | 4376                             | 2 Fe                  | Strong   |
| 15  | 4420                           | 4427                             | 2 Fe                  |          |
| 16  | 5200                           | 5167<br>5172<br>5173             | 2 Mg                  |          |
| 17  | 4450                           | 4455<br>4462                     | 4 Ca<br>2 Fe          |          |
| 18  | 5890*                          | —                                | 1 Na                  |          |
| 19  | 7520                           | 7442<br>7468                     | 3 N                   |          |
| 20  | 7774*                          | —                                | 1 O                   | ] Strong |
| 21  | ~8400                          | 8446                             | 4 O                   |          |
| 22  | ~8800                          | 8662<br>8542<br>8680             | 2 Ca II<br>1 N        |          |

(注) \*印は分散曲線を作るために用いられた波長  
 Strong: 光線線の強度が強くなったもの

MSS-007



7th MISS



Si II 6347. 6371

Na I 5892.

24 Fe I 4404

] Mn I 4058~ 4083

12 Ca II 3968  
Ca II 3933

51.369  
51.67

28  
27  
26  
25  
23  
22  
21  
20  
19  
18  
17  
16  
15  
14  
13  
12  
11  
10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1

ハース: 観測

赤外域の流星スペクトル

昨年撮影された Leo 群と Gem 群の流星スペクトルは H.S.I.P. フィルムにより、可視部と赤外部のスペクトルが同時に得られているので、両方の特徴を比べることが出来る。写真が小さい大きな特徴は光度変化の様子である。Leo 群の流星は、かなり大さな形が写っているが、赤外部は可視部に比較して発光が減少して一様に発光し、光度変化が少ない。これは Gem 群の流星に比べている結論をたけまめると

- 1) 赤外部のスペクトルは流星群によらずよく似ている。
- 2) 赤外部の輝線は可視部に比べ光度変化が少ない。
- 3) 赤外部の輝線は発光時の立ち上がりが早い。

以下に示した表は Gem 群の流星(東海)の赤外部の元素波長、相対等級、励起エネルギー、鉄に対する組成比等の表で組成比は鉄に対する比で可視域と同じ方法、同じフラスコ状態から求めた値である、この  $N_A/N_B$  は  $10^7$  を越える大きな値であり、実際 = 10 だけ大量に  $N+B$  はたりので、同じフラスコ状態を考慮することはできないことになる。結局、NI, OI は大気中の  $N_2, O_2$  であり、固体の流星体より蒸発して形成される流星フラスコとは根本的な違いがある。流星体の持つ運動エネルギーは Leo 群では 1500 eV Gem 群では 350 eV 程度であり、NI, OI は 11 eV 程度の励起エネルギーであるので、流星体前面との直接衝突により十分解離性励起するものと考えられる。

| No. | Wavelength  | Relative magnitude | Excitation potential          | log(gf) | log( $J_b$ ) | $N_A/N_B$             |
|-----|-------------|--------------------|-------------------------------|---------|--------------|-----------------------|
| 21  | 7452.2 (NI) | 6.58               | $1.91 \times 10^{-11}$<br>erg | 0.025   | 3.58         | $9.12 \times 10^7$    |
| 22  | 7773.4 (OI) | 3.76               | 1.71                          | 0.664   | 3.10         | $3.02 \times 10^7$    |
| 23  | 8226.8 (OI) | 5.034              | 2.24                          | 0.691   | 7.81         | $1.55 \times 10^{12}$ |
|     | 8211.8 (NI) |                    | 1.89                          | 0.443   | 3.71         | $1.23 \times 10^8$    |
| 24  | 8446.5 (OI) | 5.44               | 1.75                          | 0.430   | 3.17         | $3.55 \times 10^7$    |
| 25  | 8579.1 (OI) | 5.21               | $5.03 \times 10^{-12}$        | -0.143  | -9.35        | $1.07 \times 10^{-5}$ |

16th MSS

1981.4.30. 小笠原利入手

# 太陽系内小天体シンポジウム

## 集 録

主催者 特定研究「太陽系惑星環境」

第5班 太陽系内小天体の

起源と力学的進化

古在 由秀

日 時 1980年11月5日 - 7日

場 所 埼玉県越生町

埼玉厚生年金休暇センター



# 流星とそのスペクトル

長沢 工 (東京大学地震研究所)

K. Nagasawa

## ABSTRACT

Meteors and their spectra : The research of meteors made rapid progress through some large scale observation projects. They are The Arizona Expedition, The Harvard Photographic Meteor Programme, The Prairie Meteorites Network and The NASA LRC Faint Meteor Spectral Patrol. As the results of these observations, the following understandings about the origin, structure and composition of meteoroids are obtained.

- (1) Most of Meteoroids and meteorites have their origins in the solar system.
- (2) The meteoroids generated from comets are generally light, porous and fragile, while meteorites are dense, compact and hard.
- (3) The composition of the meteoroids became gradually clear by the analysis of meteor spectra. Although several papers have been published, the quantitative results are not always satisfactory. It seems especially important to find the way which estimates the amount of silicon in meteoroids.

## 1. はじめに

ここでは、流星物質の起源、構造、組成について、今までの研究の大略を述べ、さらに、現在わかっていること、問題点などについても述べる。

流星を理解するには、日常の研究の積み重ねが重要であることは勿論であるが、過去の例では、いくつかの大規模な流星観測プロジェクトが行われたのを契機として、そこで得られた観測データを土台に、飛躍的に理解が進むということが多かった。今までに実施された、この種のプロジェクトとしては、たとえば、次の4つを挙げることができる。

- 1931~33年 The Arizona Meteor Expedition ---- 眼視による大規模な流星観測で、  
(10/3) (7/31) 流星の速度決定に特に努力がなされた。366日間で26000個
- 1952年~ The Harvard Photographic Meteor Programme ---- スーパー・シュミット・カメラによる、4等級までの流星の写真観測。
- 1963~75年 The Prairie Meteorites Network ---- 隕石発見を主目的とした、自動カメラによる火球観測システム。
- 1968年~ The NASA LRC Faint Meteor Spectral Patrol ---- 特別設計の明る



分光カメラによる、流星スペクトル撮影。  
これらのプロジェクトを簡単に紹介しながら、流星の問題について述べていく。

## 2. 流星物質の起源

### 2.1 大要

流星群が彗星と関係をもつことは以前から推定され、流星物質は彗星を母体として生まれることはかなり前から想像されていた。しかし、彗星との関連が直接にははっきりしない散在流星も多く、流星一般の起源は必ずしも明確であるとはいえなかった。

流星物質が生まれた場所としては、大別して次の3つが考えられる。

- A. 地球あるいはその近く
- B. 太陽系内
- C. 太陽系外

これを区別するには、地球に突入する前の流星物質の軌道を知ればよい。もし流星物質が地球起源なら、それは地球を焦点とする楕円軌道であろうし、太陽系内に起源をもつなら、太陽を焦点とする楕円軌道であろう。そして太陽系外起源なら、太陽を焦点とする放物線または双曲線軌道であるはずである。実際に観測できるのは地球近くでの接触軌道だけであること、いろいろの摂動力が作用していることを考えれば、この分類は厳密に個々の流星物質の起源を示すとはいえないが、極端に長いタイム・スケールを考慮するのでなければ、統計的には、この結論が容認できるものと思われる。現実には軌道を決めるには、離れた2点からの観測をもとに、流星物質の位置、速度を決定するだけで十分である。実際には、流星速度を精度よく決めるのが困難で、そのためにいろいろの努力がなされた。

### 2.2 The Arizona Meteor Expeditionの結果

この観測では、10回/sで振動する鏡面(Rocking Mirror System)にうつした流星の反射像を眼視で観測することによって、流星の速度決定を試みた。その結果

流星の半数以上は、太陽を焦点とする双曲線軌道をもつ

ことが結論された(Öpik 1934)。つまり、太陽系外に起源をもつ流星が多いということである。しかし、この速度決定はかなりの系統誤差を含んでいて、この結論が誤りであったことが、このあとわかってくる。

### 2.3 The Harvard Photographic Meteor Programmeの結果

このプロジェクトでは、4等級の流星まで撮影できる、スーパー・シュミット・カメラを使用して、写真による流星観測を組織的に実施した。このカメラは、 $f:0.65$ ,  $\phi:31\text{cm}$  視野 $55^\circ \times 55^\circ$ 、回転シャッターを装備し、流星像を一定の時間間隔で切断することにより、速度決定の精度向上を意図していた。有効に撮影できる流星はいわゆる眼視域の普通の流星で、その質量は $10^{-3} \sim 10^3$ 程度のものであると考えられる。

このカメラによって撮影された流星は数万個に達したが、その中から413個を選んで、精密な解析処理を行なった結果、次の軌道が求められた(Jacchia, Whipple, 1961)

|              |     |
|--------------|-----|
| 太陽を焦点とする楕円軌道 | 403 |
| 〃 放物線軌道      | 2   |

平均密度:  $0.26 \text{ g/cm}^3$

太陽を焦点とする双曲線軌道 7

その他 1

放物、双曲線軌道をもつ9個の流星のうち8個までが、観測誤差の多少大きいものであった。このことから、次のことが結論された。

双曲線軌道の流星は、存在するにしても1%以下。軌道が確実に双曲線であるという流星は発見できなかった。

なお、上記の流星には、母彗星が既知である群流星が268個含まれていたが、その速度は、いずれも母彗星にほぼ等しいことも確認され、群流星物質が彗星から生じたことは、一層確実であると考えられるようになった。後にも述べるが、流星スペクトルで、CN, OHなどの分子による放射も見出されたことは、流星物質が彗星起源であることを、成分的に傍証するものと思われる。こうして、流星物質の起源の問題は、一応の解決をみた。

#### 2.4 The Prairie Meteorites Networkの結果

この観測プログラムは、スミソニアン天体物理研究所がNASAの支援によって実施したもので、新しい隕石を発見することを第一の目的とし、アメリカ中央部に16ヶ所の観測所を設置、それぞれに4台の自動カメラを置いて、火球を監視するものであった。このシステムは1963年開始以来12年間稼働、1970年にLost city隕石を発見している。このカメラで有効に観測できる火球の質量は、 $10^2 \sim 10^6$ g程度と考えられる。

このネットワークは、群流星を別に、約2700の流星、火球を、2ヶ所以上の観測所で同時に写真撮影した。そのうち、発光継続時間が3秒以上の明るい火球334個の軌道リストが発表されている (McCrosky, Shao, Posen, 1976)。そこでは、

楕円軌道 323

放物線軌道 3

双曲線軌道 8

が決定されている。速度決定誤差が約2%であること、求められた軌道の離心率が最大でも1.07であることを考えると、この場合も、確実に双曲線軌道のもつが存在するかどうかは疑問であり、この質量範囲でも、太陽系内起源の物質が大部分であることが証明されたと思われる。

なお、隕石となったもの、また隕石の発見はできなかったが、隕石状の緊密な構造をもつと考えられるものは、軌道の離心率が小さく、円に近い軌道を描いていることが認められた。これは、群流星の場合とは違って、隕石が、小惑星に類似したものであると考えさせるひとつの証拠となっている。

### 3. 流星物質の構造

#### 3.1 大要

ここで考えるものは、流星物質の具体的な構造ではなく、大ざっぱに考えた構造である。たとえば、緻密な石状のものか、石でも軽石のように多孔質のものであるか。あるいは、もっとこわれやすい、乾いた土くれのようなものか、さらには、形も変形しやすい綿くずのようなものか、その程度のことを考えようというのである。

構造の見当をつけるには、密度を知ることが第一歩となる。流星物質の密度は、流星が大気中を通過する経路に沿つての速さや明るさを解析することで知ることができる。その大略の筋道は次のようである。

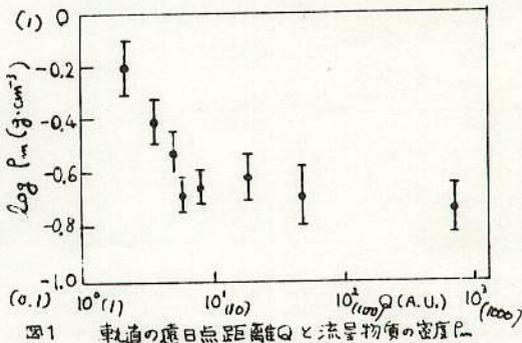
流星の明るさは、流星物質の質量減少に比例すると考えられ、適当な比例係数を与えることができれば、経路に沿って明るさを積分することで大気突入前の質量がわかり、また、経路各点においての質量も知ることができる。一方、大気抵抗による流星の減速は、大気密度および流星物質の飛行方向の断面積に關係する。減速は観測できるので、大気の密度を既知とすれば、流星物質の断面積、つまり大きさがわかる。こうして、流星物質の質量と大きさから、密度の推定が可能となる。

このような密度の推定方法は、抵抗係数など、いくつかの不確定な数値を使用するので、計算する人の考え方によつて、その結果はかなりのばらつきができる。しかし、相対的に密度の大小を決めるには非常に有効である。また、観測、拾集された隕石によるデータを使つて係数を決定するといった方法によつて、最近では、絶対的にも、その結果の信頼性が高まってきている。

### 3.2 The Harvard Photographic Meteor Programmeの結果 (Jacchia 他 1967)

精密解析を行つた413個の流星から得られた流星物質の平均密度は、 $0.26 \text{ g cm}^{-3}$ であり、想像されていたものよりかなり小さい値であつた。しかし、そのばらつきはやや大きく、流星群によつて、系統的に密度に差の認められる場合もあり、たとえば、「ふたご群」の流星では、平均密度は約  $1 \text{ g cm}^{-3}$  にも達した。また、流星軌道の大きさや密度との間に相関も認められている (Verniani 1969)。また、密度が  $3 \text{ g cm}^{-3}$  を超える隕石的な流星も1個だけ含まれていた。

一方、流星が発光中、その経路途中で何回も増光する場合がしばしばあり、これは、流星物質がこわれて、瞬間的に実効的な断面積が増したためと推測される。したがつて、流星物質は、もろく、さわめてこわれやすいものと想像される。その結果、流星物質のモデルとして、ダスト状のものが、さわめて弱い力で結合している、ダストボールが考えられるようになった。



これは、たとえばススのようなものであるかもしれない。結論として、

通常の流星をつくっている物質は、平均して  $0.2 \sim 0.3 \text{ g cm}^{-3}$  の密度をもつ、もろく、こわれやすいものである

ということができよう。

### 3.3 The Prairie Meteorites Networkの結果

このプロジェクトでは、対象となる流星物質の質量範囲が、上記のスーパー・シュミット・カメラによる流星撮影プログラムに比べてずっと大きいため、ダストボールとは考えることができない高密度の物質の割合が多くなっている。Ceplecha, McCrosky (1976)によつて、高密度の物質は2種に分類でき、密度が、

$\rho > 3g\text{ cm}^{-3}$  のもの

$\rho \sim 2g\text{ cm}^{-3}$  のもの

があるという。前者はコンドライト、後者は炭素質コンドライトに相当するものと推測される。炭素質コンドライトと考えられるものは、落下時に大気中で非常に明るく輝やくが途中の質量減少がはげしく、よほどの好条件に恵まれないと、現実に隕石として地上まで達することはできない。コンドライトと推定されるものは、これに比べると明るさの変化がゆるやかで、発光継続時間が長く、発光の末端高度が低いという特徴がある。そして、炭素質コンドライトよりは、隕石として地表にまで到達する確率が大きい。

3. 4 流星物質の分類

以上に述べたような観測結果をもとにして、Cepicka (1977) は、下に示した流星物質の分類を行なった。

表 1 Meteoroid Populations プリナー・ネット

|                |                   | Super-Schmat<br>$10^{-3} \sim 10g$ | Small Camera<br>$10^{-1} \sim 10^3g$ | P-N fireball<br>$10^2 \sim 10^6g$ | Assumed<br>density     | Composition                    |
|----------------|-------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Asteroidal     | I                 | < 1 %                              | 5 %                                  | 32 %                              | $3.7 g\text{ cm}^{-3}$ | Ordinary<br>Chondrites         |
| A              | II                | 54                                 | 37                                   | 37                                | 2.1                    | Carbonaceous<br>Chondrites     |
| B              |                   | 6                                  | 7                                    | —                                 | 1                      | dense cometary<br>material     |
| C <sub>1</sub> | III <sub>A</sub>  | 9                                  | 16                                   | 9                                 | 0.6                    | } regular cometary<br>material |
| C <sub>2</sub> | III <sub>Ai</sub> | 31                                 | 30                                   | 9                                 | 0.6                    |                                |
| D              | III <sub>B</sub>  | < 1                                | 5                                    | 13                                | 0.2                    | soft cometary<br>material      |

C<sub>1</sub>: short period, ecliptic concentration.

C<sub>2</sub>: long period, random.

この表で、Bに分類されているものは、「ふたご群」の流星物質に対応し、また、DあるいはIII<sub>B</sub>と分類されたものは、1946年のジャコビニ群で観測された、特別に低密度の流星物質を示している。なお、Vermiani (1969) によると、この分類表で与えているC<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, Dの密度の見極りは過大で

C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> :  $0.2 \sim 0.3 g\text{ cm}^{-3}$

D :  $< 0.01 g\text{ cm}^{-3}$

であるという。

こうしたことから考えると、彗星起源と考えられる流星物質でも、必ずしも一様な密度構造をもつものではないことがわかる。流星物質の密度は、軌道の大きさ、あるいは母彗星の年齢と、かなり相関があるらしい。たとえば、上記分類表のDで示されているジャコビニ群の流星物質は、非常に若い彗星から生じたものと考えられている。また、ごく少数ではあるが、群流星のほかに、一般のものと有意な差をもって密度の高い流星が観測されることがある。これは、彗星核の中心部分にさらに核構造があり、そこから生まれたものではないかという想像もされている。さらに、小規模の流星群ではあるが、ある一群の流星群の物質が、ほとんどすべてコンドライトではないだろうかと思われるような観測結果

も出はじめていて、流星物質の密度、構造については、解決を要する問題がいくつも残されている。

#### 4. 流星物質の組成

##### 4.1 大要

流星物質の組成は、たとえば、次のような方法で、直接、あるいは間接に求められている。

##### 隕石

スカイラブ、U2などにより高空で採取した微粒子

深海底堆積物から採取した流星塵、宇宙塵

##### 流星スペクトルの解析

} 直接に化学分析

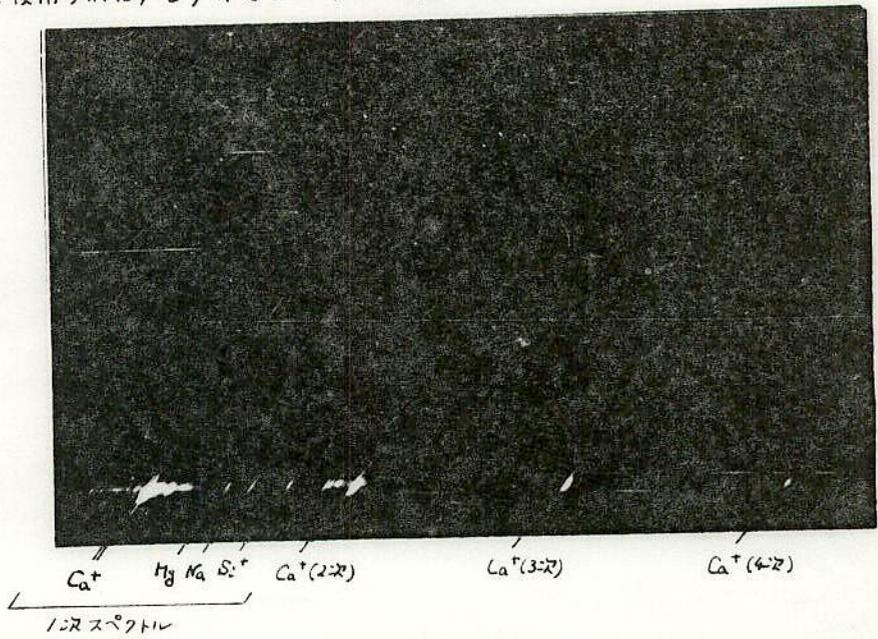
ここでは、流星スペクトルの解析を中心に述べる。

##### 4.2 流星の分光観測

流星の分光観測とは、今のところ、流星の分光写真撮影とほとんど同義である。これは、カナダの Millman、チェコの Cepicka などによって精力的に実施され、質のよい流星スペクトルも得られて、いくつかの解析結果が発表されている。ソビエトでも流星の分光観測を実施しているとのことであるが、結果の発表は少ない。日本では、1963年以降、東京天文台堂平観測所を中心として、活発な流星群の出現時に観測をつづけ、今までに約100個の流星スペクトルを得ている。

流星のスペクトルは、ほとんどすべてが金属の輝線から構成されていて、Na, Ca, Feなどが特徴的にあらわれる。スペクトル写真は、下に示すように、一見、光の平行線として撮影され、急激に増光した部分で、たくさんの輝線があらわれる。近赤外帯まで感度のあるフィルムを使用すれば、O, Nなどのガスの輝線も見ることができる。

図2  
流星スペクトル



現在までの観測を総合して、流星スペクトルからは、下記の表に示した原子、イオン、分子が同定されている。

表2 流星スペクトル中の原子、イオン、分子

|             | Atom |    |    | Ion             |                 |                 | Molecule       |    |    |
|-------------|------|----|----|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----|----|
| 確<br>認      | H    | N  | O  | N <sup>+</sup>  | O <sup>+</sup>  |                 | N <sub>2</sub> | OH | CN |
|             | Na   | Mg | Al | Mg <sup>+</sup> | Si <sup>+</sup> | Ca <sup>+</sup> |                |    |    |
|             | Si   | Ca | Ti | Ti <sup>+</sup> | Fe <sup>+</sup> | Sr <sup>+</sup> |                |    |    |
|             | Cr   | Mn | Fe |                 |                 |                 |                |    |    |
|             | Co   | Ni |    |                 |                 |                 |                |    |    |
| 可<br>能<br>性 | Li   | K  | Ba |                 |                 |                 | FeO            | CH |    |

4.3 The NASA LRC Faint Meteor Spectral Patrol (Harvey, 1971)

NASAは、特別設計の無スリット流星スペクトル・カメラを開発し、1968年から、ニューメキシコで、組織的な流星のスペクトル観測を開始した。このカメラは全部で20台あまりあり、機能の異なるいくつかのタイプがあるが、 $f$  0.83~1.3,  $\phi$  12.5~20cm のもので、一台の視野直径が21°, 全部のカメラで、高度35°以上のほぼ全天をカバーしている。分散は、カメラにより1800~123Å/mmである。このシステムでは、0等より明るい流星が視野に入ると、0.1秒で開く特殊の光電シャッターを使用している。

このプロジェクトでは、最初の2年間で319個の流星スペクトル撮影に成功している。これは、カメラ一台あたり40時間の観測で1個の流星スペクトルを撮影した割合となる。東京天文台が100個の流星スペクトルを得るのに15年を要したことを考えると、これは画期的な能率である。

4.4 スペクトル解析による流星物質の組成

今までの流星スペクトル解析による流星物質の組成比は、たとえば次のようである。まず、上記のNASAのプロジェクトによる結果は(Harvey 1973),

表3 流星の組成

|    | Sporadic | Taurid | Gemimid | Perseid | Leonid |
|----|----------|--------|---------|---------|--------|
| Fe | 28       | 28     | 28      | 28      | 28     |
| Ni | 4.1      | 3.4    | 3.7     |         |        |
| Mn | 0.50     | 0.01   | 0.01    | 0.01    |        |
| Cr | 0.06     | 0.01   | 0.01    | 0.03    |        |
| Ca | (0.32)   | 0.82   | 0.62    | 4.9     | 2.1    |
| Mg | (36)     | 6.9    | 1.9     | 1.8     | 4.9    |
| Na | (2.6)    | 0.19   | 0.17    | 0.22    | 1.3    |

この表は、Feを28として、他の元素の相対存在比を示している。( )で示したものは、や

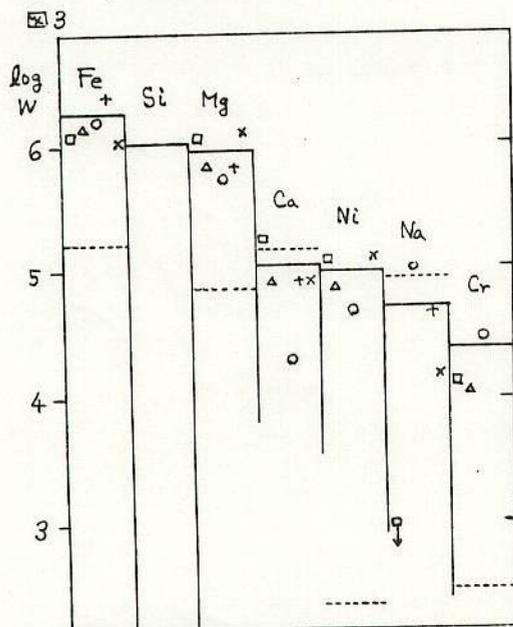
や古い励起断面積のデータを使った結果である。

また、Millman (1972), Nagasawa (1978)による組成比は次のようである

| 表4 | Millman    |         | Nagasawa |      |
|----|------------|---------|----------|------|
|    | Giacobinid | Perscid | Leonid   |      |
| Fe | 29.3 ± 0.5 | 25      | 28       | 28   |
| Mn |            |         |          | 0.01 |
| Co |            |         | 426      | 129  |
| Ca | 1.2 ± 0.1  | 5.0     | 0.03     | 0.02 |
| Mg | 13.2 ± 0.6 | 14.5    | 305      | 99   |
| Na | 1.3 ± 0.1  | 0.5     | 0.12     | —    |

Millmanの結果は、合計を45となるようにしてある。Nagasawaの結果はFeを28として表記してあるが、数値のバラツキが大きく、まだ問題がある。

このようにして得られた流星物質の組成比を、関係のありそうな他の各種の組成比と比較すると、Millman (1977)によると、次の図のようになる。



The relative abundances, by weight, of seven element commonly found in cometary meteoroids. Values are plotted as log weight and normalized to Si at 6.00. Since Si Values for meteor spectra are not available, normalization in this case was to the mean of Fe and Mg.

- Solar system, Cameron, 1973, also true for carbonaceous chondrites, type C1.
- earth's crust, Ahrens, 1965.
- micrometeoroid, Brownlee et al. 1967.
- △ microcrater residue, Brownlee et al. 1974.
- E-region ions, Goldberg and Aikin, 1973.
- + 12 meteor spectra, Millman, 1972.
- x 4 meteor spectra, Harvey, 1973.

#### 4.5 流星スペクトルの解析法と問題点

現在の流星スペクトルの解析法は、研究者によって細部にはいろいろと差があるが、大筋はほぼ同様である。それは、スペクトルの強度分布から実効的な励起温度を求め、その温度に対する局部熱平衡を仮定して、スペクトルのそれぞれの輝線の強度から、各元素の存在比を求めていくものである。しかし、この方法にはいろいろと問題がある。その最大のもは、この方法では、Siの組成比の計算ができないことである。もし、この方法で強引にSiの量を計算すると、現実とかけ離れた非常に大きな値が得られてしまうからである。これは、流星スペクトルに現われるSi<sup>+</sup>の輝線(6347, 6371A)の励起ポテンシャル

が10eV以上の大きい値であるにもかかわらず、この輝線が相対的に非常に明るいことに原因している。この輝線の同定に誤りがないとすれば、計算法に問題があるか、あるいはSiの励起に何か特別のメカニズムが働いているかのどちらかであろう。いずれにしても、Siの定量のできない計算法は、その他の元素に対しても、どの程度正しい値を与えているのか、うたがわしい。

流星の発光は、熱せられた流星物質そのものによるのではなく、進行していく流星物質がそのあとに残していった、流星から気化した物質と大気との混合した、流星プラズマからである。その状態を正しく知るためには、流星物質からの気化、解離、励起、電離、大気中への拡散など、いろいろの過程を知らなければならない。しかし、現在の流星発光過程についての理解は、まだまだ十分のものとはいえない。流星の組成を正しく計算するためには、発光メカニズムを正しく解明することがぜひとも必要であり、その面の研究も、今後、大いに望まれる。

### 5. 結論と問題点

いままでの説明をもとに、流星物質の起源、構造、組成についての理解をまとめると、次のようになる。

起源---- 軌道からみて、流星物質は、太陽系内に起源をもつものが大部分である。しかし、双曲線軌道をもつ流星物質があるか、ないかについては、いずれとも断定できない。そして

通常の流星、特に群流星---- 軌道、組成からみて、彗星から生まれた。

隕石、あるいは隕石状の堅い物質---- 軌道からみて小惑星的。

という形に分けて考えるのが、一応妥当であろう。

構造---- 先に表に分類したように、各種のものがある。特に彗星起源と考えられるものは、密度が小さく、多孔質のもろいものと考えられる。一方、質量の大きいものでは、密度がそれぞれ、 $3.7 \text{ g cm}^{-3}$ 、 $2.1 \text{ g cm}^{-3}$  程度と考えられる。コンドライト、炭素質コンドライトと推定されるものの割合が増えてくる。

組成---- 流星スペクトルの解析から、定性的には、かなりの元素の存在がわがっている。元素の存在比を定量的に求める試みは、かなり成功をしているが、まだ十分のものではなく、特にSiの存在比をどのように決めるかについては、問題が残されている。また、構成鉱物が何であるかという点は、全く手つかずの状態である。今後、発光メカニズムの解明とあわせて、流星物質の組成に関して、一段の研究が望まれる。

### 参 考 文 献

Cepplecha, Z. and McCrosky, R.E., 1976, Center for Astrophysics, Reprint Series No. 442.

Cepplecha, Z., 1977, in "Comets, Asteroids, Meteorites-Interrelations, Evolution and Origins", p143.

- Harvey, G.A., 1971, NASA Technical Note D-6298, 1.
- Harvey, G.A., 1973, J. Geophys. Res. 78, 3913.
- Jacchia, L.G. and Whipple, F.L., 1961, Smithsonian Contrib. Astrophys., 4, 97.
- Jacchia, L.G., Verniani, F. and Briggs, R.E., 1967, Smithsonian Contrib. Astrophys., 10, 1.
- McCrosky, R.E., Shao, C.Y. and Posen, A., 1976, Center for Astrophysics, Reprint Series No. 665.
- Millman, P.M., 1972, in "From Plasma to Planet", Nobel Symposium 21, p157.
- Millman, P.M., 1977, in "Comets, Asteroids, Meteorites-Interrelations, Evolution and Origins" P.127.
- Nagasawa, K., 1978, Ann. Tokyo Astr. Obs., 2nd series 16, 157.
- Öpik, E.J., 1934, Circ. Harv. Coll. Obs. No. 391.
- Verniani, F., 1969, Space Science Reviews 10, 230.

### 討 論

田村: 流星のスペクトルというものは、地球大気による影響を受けているのではないが、つまり、地球大気起源の Atom Ion と、流星起源のものとの区別がはっきりしないのではないか。

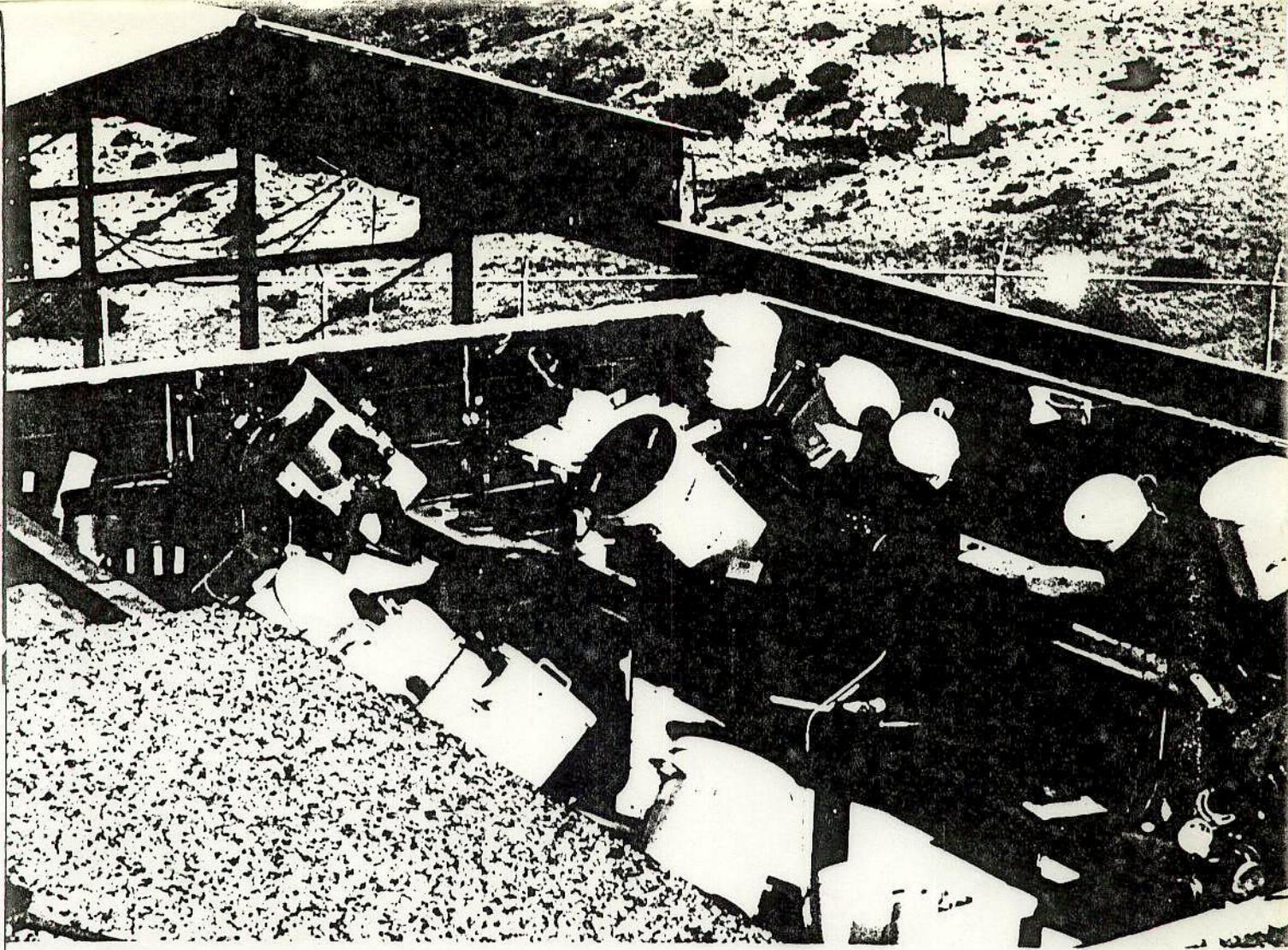
長沢: その通りである。近赤外域では、酸素、窒素などの輝線がみられるが、厳密には、その起源が、大気、流星のどちらであるかを確定することはできない。しかし、現在は、これらの輝線は、一応、大気によるものと解釈している。

田鍋: 流星の組成表では、ペルセウス群のカルシウム組成比が、他の群に比べて異常に大きい。母彗星に何か特徴的な違いがあるのか。

長沢: ペルセウス群の流星のスペクトルは、カルシウムの輝線が非常に特徴的であって、それが表の結果にあらわれたものと思う。しかし、これを母彗星の違いによると結論するのは、今のところ無理ではないだろうか。ペルセウス群のように高速の流星では、その速度の影響によってカルシウム輝線が強くあらわれるが、その速度の影響をきちんと補正する解析法がまだできないためといった方がいだろう。

榮池: 流星スペクトルから求められた組成と隕石の組成との関係はどうか。

長沢: 解析から得られた主要成分は、ある種のコンドライト隕石と、大まかには一致しているといえる。ただ、隕石にはたくさんある成分で、流星からは検出されていないものも多い。それは、流星スペクトルでは、観測波長域(3700~9000Å)内に輝線をもつ元素しかとらえることができないためである。また、今の解析法では、珪素の定量ができないので、これと隕石のものと比較することができない。酸素も、大気酸素の影響を大きく受けるので、比較は困難である。



The east room of the NASA-Langley Research Center meteor observatory at Organ Pass, New Mexico, contains this battery of meteor spectrographs that provides almost complete sky coverage above an altitude of 30 degrees. The small tubes on the camera barrels hold photoelectric detectors that open the spectrograph shutters when a meteor appears. This photograph by the author looks toward the southeast, with White Sands Proving Ground in the far distance.

## 4年間の Four Years of Meteor Spectra Patrol

GALE A. HARVEY, NASA-Langley Research Center

佐々木

17th MSS

**D**URING the initial development of the space program, a major engineering uncertainty was the risk of damage to spacecraft from meteoroids. The Langley Research Center's studies and photographic patrol of meteor spectra were originally part of the NASA program to investigate this potential hazard. These studies were directed toward determining meteoroid masses in the range from 0.001 to 10 grams, for such particles were thought to present the greatest danger.

When a meteoroid enters the earth's upper atmosphere, air resistance causes the body's high kinetic energy to be transformed into heat, which vaporizes the meteoroid and produces a short-lived luminous plasma (ionized gas) that we see as a meteor trail. The radiation emitted by this plasma can be recorded on a spectrogram to be analyzed for meteoroid composition and radiation processes.

To obtain a large sample of meteor spectra in the mass range of interest, an automatic patrol was developed, directed, and supported by the Langley Research Center. The patrol was operated by personnel of the Smithsonian Astrophysical Observatory from 1968 through 1972.

After the immediate aims of the spectral studies were accomplished, the research was redirected to the more basic problem of the relative abundances of the chemical elements in specific meteors and groups of meteors. Our current research is directly concerned with cosmogony (the origin and evolution of the solar system and the universe), and has two primary objectives.

The first is to provide information about the more abundant nonvolatile elements in certain comets, and thus, indirectly, in the early solar-system plasma. Most meteors are produced by material associated with comets, which are generally believed to con-

sist of primordial material whose major nonvolatile elements have not been significantly separated by gravity or melting.

Although the evolution of comets is poorly understood, the association of certain comets with meteoroid streams is firmly established. The chemical composition of the particulate material of comets — the meteoroids — is probably much more representative of the comets than terrestrial surface material is representative of the earth as a whole.

The second objective of this research is to determine typical orbits for different kinds of meteorites, which are meteoroids that survive passage through the atmosphere. Our present understanding of the origin and evolution of the solar system has come mostly from the study of meteorites. Some of them, along with some lunar rocks, are the oldest materials available for laboratory analysis of age, chemical composition, and

流星物質が宇宙船に与える損害の調査  
0.001 ~ 10g の物質のものが危険だ。

自動パトロール → スミソニアン Obs. へ。

彗星物質との関係。地球物質よりは  
彗星に似ている。

physical conditions of the primordial solar plasma.

However, the orbits of most meteorites are not accurately determined, since they are deduced from visual observations by untrained observers. Highly precise orbits are known for only two meteorites: Pribram in Czechoslovakia and Lost City in Oklahoma (SKY AND TELESCOPE, March, 1970, page 154). This was because quite complete photographic observations were made as these two meteors passed through the atmosphere. Except for these two, the orbits of meteoroids before capture by the earth are still largely unknown, hence their source within the solar system remains uncertain. It is hoped to determine representative orbits by correlating the chemical compositions of meteors with meteorite compositions, and then relating the latter to the corresponding meteor orbits.

軌道と  
成分の  
関係

合用

### THE PATROL INSTRUMENTS

Although the total duration of a meteor is typically one second, the effective exposure time on film is extremely brief, usually less than 0.01 second, because of the image's rapid motion. Hence, a very fast optical system is necessary to record faint meteor spectra. The unpredictability of a meteor's occurrence and sky location requires wide-field optics and long observation times, with attendant problems of discriminating the images from the sky background illumination. However, during the mid-1960's three improvements in optical and photographic technology made possible the recording of meteors 100 times fainter than had been possible with earlier spectrographs.

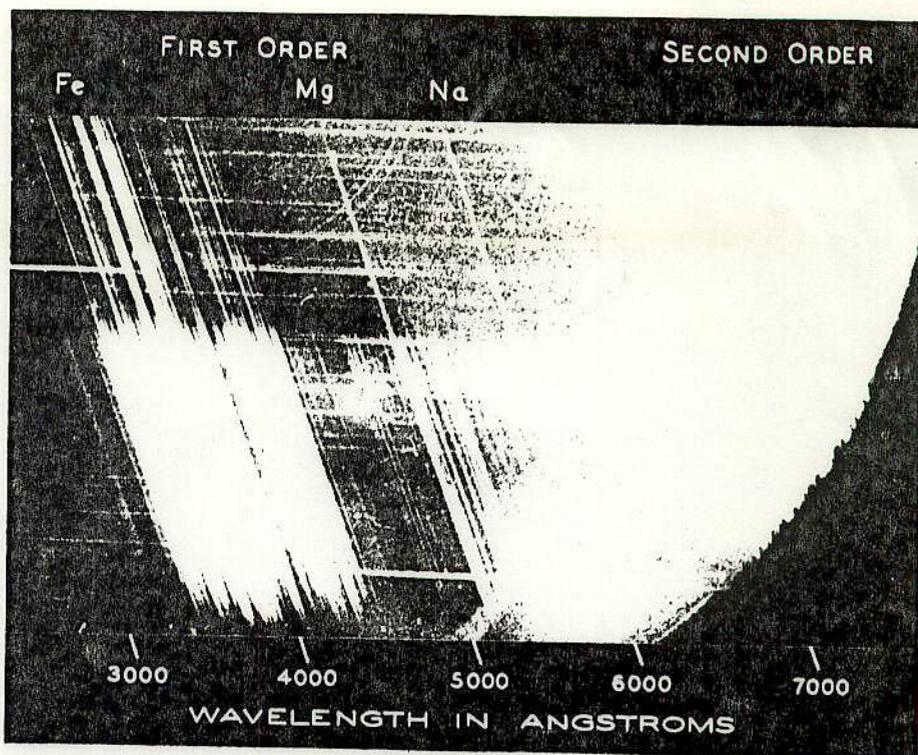
First, optical-grade fused silica became available at modest cost; this lens material has high transmission in the near-ultraviolet spectral region. Second, large transmission gratings with high blaze efficiency, concentrating the light into selected spectral orders, could be obtained.

Thus, we could set up a battery of 21 Maksutov slitless spectrographs at a fraction of the cost of a single Baker super-Schmidt meteor camera, the previous major instrumental advance in meteor optics. Our spectrographs have apertures of 5, 6, and 8 inches and focal ratios of f/1 and f/1.3. They combine high transmission in the near ultraviolet (where meteor radiation is strongest) with fast optical systems, and make use of the more sensitive extended-red panchromatic emulsion.

The third improvement was a method to avoid plate fogging from background skylight. We incorporated a photoelectric meteor detector that actuated the spectrograph shutter when a meteor occurred in the field. The battery of spectrographs, pictured opposite, and their electronics were built at Langley Research Center.

In the summer of 1968, seven spectrographs and related equipment were taken to New Mexico and placed in routine operation. More units were added over the next 18 months, while special equipment and

21台のマスクトフカメラが安価で作成できた様になった。



This high-definition spectrum (No. 106 in the NASA-LRC library) of a Taurid meteor was obtained on November 4, 1969. It is representative of most meteors, with iron (Fe) lines dominating the near ultraviolet and blue, magnesium (Mg) the green, and sodium (Na) the yellow. The second-order spectrum at right has twice the dispersion of the first order, originally 123 angstroms per millimeter. Star spectra appear as horizontal streaks.

procedures were developed for cutting, processing, and searching the film and for recording the data. In all, 764 meteor spectra were obtained.

During 1971 and 1972, a pair of direct-photography stations were added to the patrol to obtain meteor trajectory and orbit data. The photographs, which recorded 288 meteors in 1972, were taken with modified K-24 aerial cameras that were equipped with chopping shutters, time displays, and programmers.

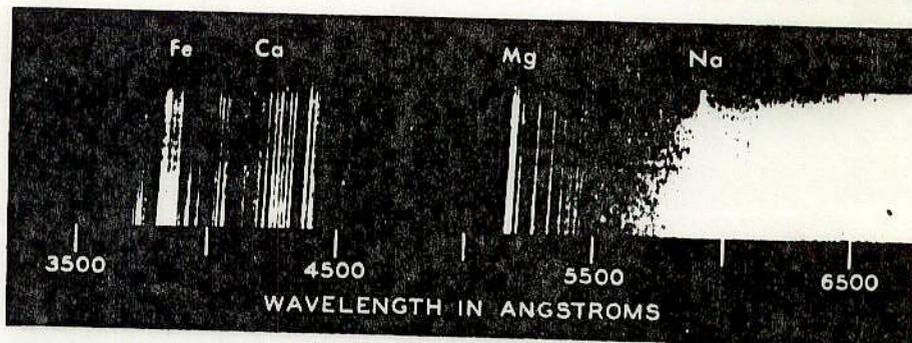
### OBSERVATIONAL ASPECTS

The NASA-LRC faint meteor spectra patrol was operated at a site originally established for the super-Schmidt meteor patrol of the 1950's and later used for Baker-Nunn satellite tracking and laser ranging. It is at Organ Pass, New Mexico,

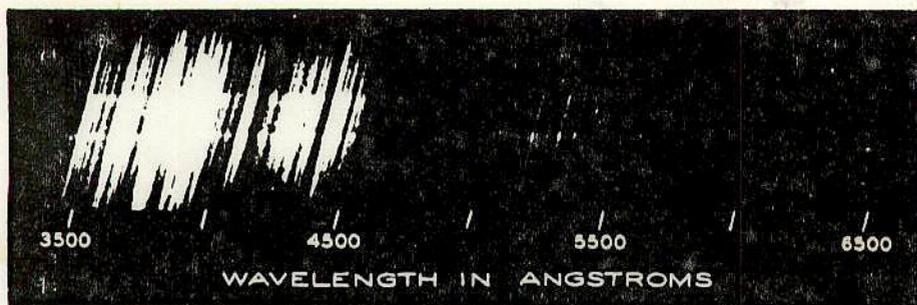
about 12 miles east of Las Cruces, 5,280 feet above sea level and with ready access to U. S. Route 70. The observing station's longitude is 106° 33' 09" west, latitude 32° 25' 24" north.

This location was chosen primarily for its high percentage of clear nights. The number of useful observing hours is about four times greater than on the East Coast. The dry climate generally favors observing, but dust, high winds, and scattered ultraviolet radiation from lightning in summertime reduce observing efficiency.

An important feature of the patrol was its regular schedule of observations, with nightly operation except for five or six days each month around full moon. The Langley library of meteor spectra — currently the world's largest — contains essentially all of the meteor spectra obtained anywhere dur-



The laboratory spectrum of the Allende meteorite, a carbonaceous chondrite, resembles the typical meteor spectrum above. The bright features at extreme right are due to incandescent glow from the spectrograph's electrodes. All spectra are from NASA's Langley Research Center, Hampton, Virginia.



A nickel-iron meteor produced spectrum No. 432 on January 26, 1971. The absence of a line just short of 6000 angstroms indicates that it was sodium poor.

This object was similar in composition to a hexahedrite meteorite.

鉄とニッケルばかりの流星体

ing January, February, and March. This is because of the scarcity of meteor showers during this period and the fact that late winter observing conditions are poor in Europe, where another patrol operates regularly.

### STATISTICAL RESULTS

大西

The 764 spectra obtained by our patrol can be compared with only 94 known to have been recorded in the United States before 1967. A classification scheme for meteor spectra has been developed by the Canadian astronomer Peter M. Millman, an early pioneer in meteor spectroscopy. His system is based on the number of features in a spectrum (quality class) and the identification of the strongest features (spectral type).

The NASA-LRC spectra and Millman's classification in 1963 of 259 spectra in the World List are summarized in the tables seen below. In general, all of the spectra are useful for qualitative purposes, but only those of classes *a* and *b* are valuable for studying radiation processes and determining the relative abundances of the chemical elements.

| Class | No. of Features | NASA | World |
|-------|-----------------|------|-------|
| a     | More than 49    | 30   | 16    |
| b     | 20 - 49         | 81   | 54    |
| c     | 10 - 19         | 139  | 68    |
| d     | 1 - 9           | 514  | 121   |

| Type | Strongest Features | NASA | World |
|------|--------------------|------|-------|
| x    | Mg or Na           | 167  | 82    |
| y    | Ionized Ca         | 13   | 148   |
| z    | Fe or Cr           | 504  | 28    |
| w    | Not x, y, or z     | 80   | 6     |

The spectral types are shown in the second table. Iron is the major radiating element in most NASA-LRC spectra, whereas those in the World List are mostly dominated by the H and K lines of singly ionized calcium. Strong radiation from this and other ions is an anomalous characteristic of bright, fast meteors. Since the NASA-LRC patrol used superior optical systems, it could record the spectra of much fainter but more typical meteors.

### CHEMICAL COMPOSITION

As far as the major nonvolatile heavy elements are concerned, the composition of most meteors is similar to the sun's, said to be *undifferentiated* with respect to these elements. This is particularly true of meteors associated with comets, such as the Leonids, Perseids, Taurids (see spectrum No. 106 at the top of page 379), and Giacobinids. This similarity also holds for the Geminids, which are not known to be associated with a comet.

The undifferentiated meteoroids are by weight typically about 30 percent iron, 15 magnesium, 3 nickel, 2 each of calcium and aluminum, and 1 sodium. Most of these elements are probably combined with oxygen in the form of ferro-magnesium silicates such as olivine and pyroxene.

The spectra of these meteors strongly resemble low-excitation laboratory spectra of most chondritic meteorites, such as Allende (SKY AND TELESCOPE, May, 1969, page 272), in which iron lines dominate the near-ultraviolet spectral region, magnesium the green, and sodium the yellow.

However, some meteors are strongly

differentiated with respect to the major non-volatile elements. One type of differentiation is evident in the high-definition meteor spectrum No. 432, shown opposite, in which only iron, nickel, manganese, chromium, and cobalt were identified among the 123 lines. The nonmetallic elements have been separated from the original material.

Another type of heavy-element differentiation is revealed by spectrum No. 299 reproduced below, which shows primarily calcium and magnesium, with weaker lines of silicon, aluminum, nitrogen, and oxygen. Thus, the material that produced this spectrum was severely depleted in iron and sodium; it may have been similar to that of the rare enstatite achondrite meteorites.

These spectra reaffirm that the meteoroidal particles in space are not all similar in composition. This, in turn, may indicate that there have been several sources of such particles.

スペクトルがたまごまのほ、クレストの素性が違う。

太陽系創成の30分位の割合の、その様な流星体あり。太陽系創成の30%がわかる。



This unusual spectrum, No. 299, is most notable for the absence of iron or sodium lines. It was produced on August 29, 1970, by a very-high-velocity object in retrograde orbit. The strongest feature is the multiplet of neutral magnesium at about 3830 angstroms. Note the H and K lines of singly ionized calcium at 3968 and 3933 angstroms, respectively. Also present are lines of silicon, aluminum, atomic oxygen, and atomic nitrogen.

逆行軌道

— Geminid Spectrum —

20th MSS 1982 Mar. 2

M. Ogasahara

DATE

Suzuki No. 80021

Geminid

1980 Dec. 14 01h 32m 10s

-5 ~ -6 mag Neopan 400

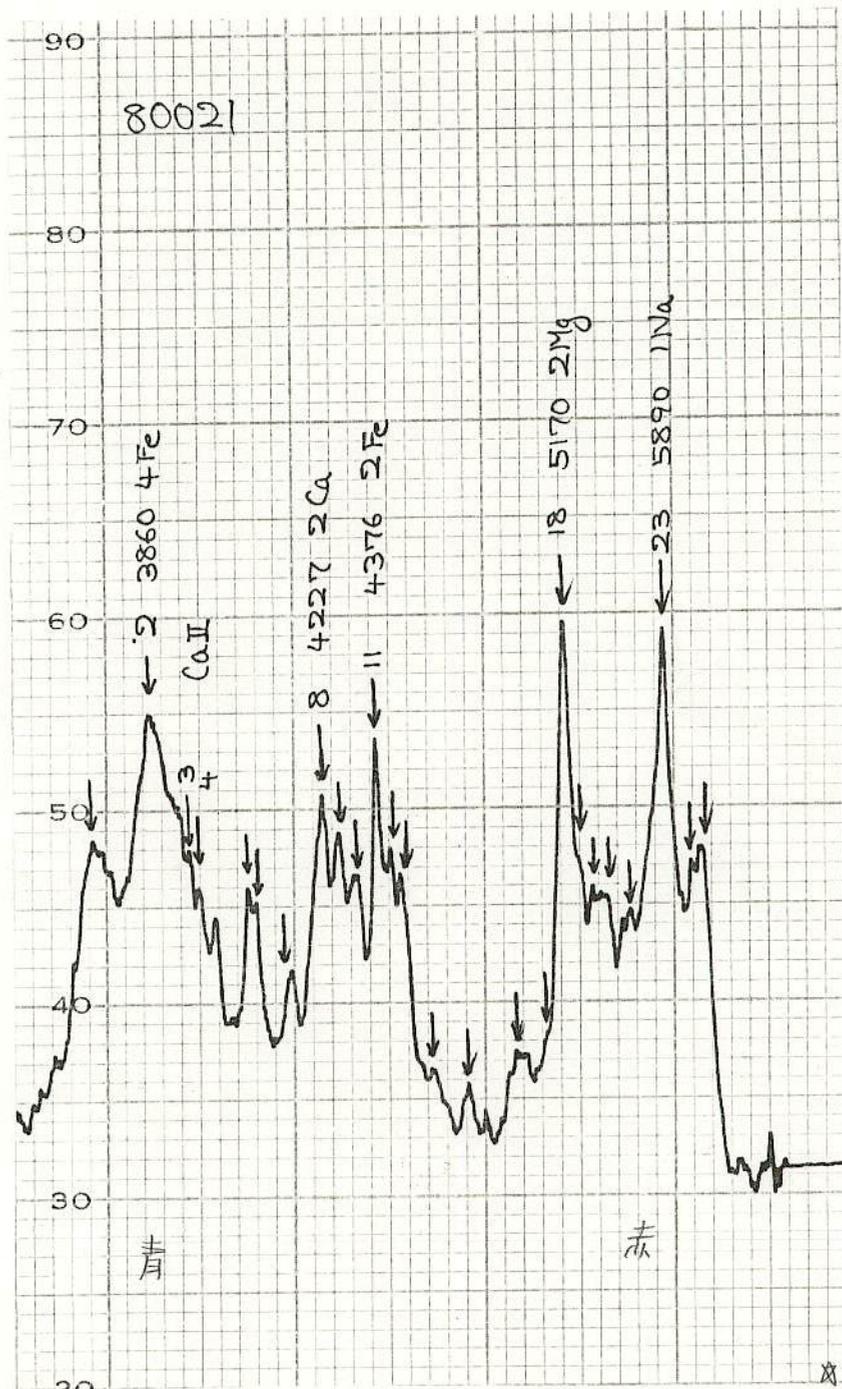
| No. | $\lambda_c$<br>Calculated | $\lambda$<br>Identified | Mul.<br>No. | Density |
|-----|---------------------------|-------------------------|-------------|---------|
| 1   | 3767                      | 3764                    | 21 Fe       | 1.22    |
| 2   | 3860 * (4Fe)              | 3860                    | 4 Fe        | 1.37    |
| 3   | 3932                      | 3934                    | 1 Ca II     | 1.15    |
| 4   | 3958                      | 3968                    | 1 Ca II     | 1.11    |
| 5   | 4055                      | 4064                    | 43 Fe       | 1.15    |
| 6   | 4076                      | 4072                    | 43 Fe       | 1.13    |
| 7   | 4161                      | 4173                    | 19 Fe       | 1.04    |
| 8   | 4233                      | 4227                    | 2 Ca        | 1.27    |
| 9   | 4279                      | 4272                    | 42 Fe       | 1.22    |
| 10  | 4327                      | 4326                    | 42 Fe       | 1.17    |
| 11  | 4376                      | 4376                    | 2 Fe        | 1.34    |
| 12  | 4437                      | 4436                    | 4 Ca        | 1.20    |
| 13  | 4468                      | 4462                    | 2 Fe        | 1.17    |
| 14  | 4566                      | 4571                    | 1 Mg        | 0.92    |
| 15  | 4704                      | 4703                    | 11 Mg       | 0.90    |
| 16  | 4921                      | 4921                    | 318 Fe      | 0.93    |
| 17  | 5085                      | 5083                    | 16 Fe       | 0.96    |
| 18  | 5170 * (2Mg)              | 5170                    | 2 Mg        | 1.49    |
| 19  | 5271                      | 5270                    | 15 Fe       | 1.18    |
| 20  | 5343                      | 5328                    | 15 Fe       | 1.15    |
| 21  | 5431                      | 5430                    | 15 Fe       | 1.13    |
| 22  | 5623                      |                         | ?           | 1.12    |
| 23  | 5890 * (1Na)              | 5890                    | 1 Na        | 1.48    |
| 24  | 6183                      | 6161                    | 5 Na        | 1.18    |
| 25  | 6243                      |                         | ?           | 1.20    |

\* 3つを仮定して  
計算し、比較した

Back Fog 0.80

下地濃度

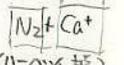
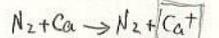
Density



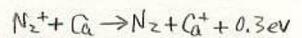
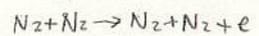
Harvey, Ap. J. 165  
P669-671

1232 (木下) 議

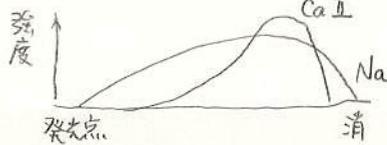
Direct excitation



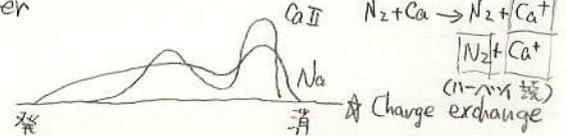
Charge exchange



Direct excitation x) Charge exchange の  
10倍 明るいはずである。



Per



$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\sum_{i=1}^s k_i x_i}{\sum_{i=1}^s k_i} \\ \bar{y} &= \frac{\sum_{i=1}^s k_i y_i}{\sum_{i=1}^s k_i} \end{aligned} \right\} (1)'$$

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{\sum k_i - 2} \sum_{i=1}^s k_i (x_i - \bar{x})^2 \\ a_{22} &= \frac{1}{\sum k_i - 2} \sum_{i=1}^s k_i (y_i - \bar{y})^2 \\ a_{12} = a_{21} &= \frac{1}{\sum k_i - 2} \sum_{i=1}^s k_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \end{aligned} \right\} (2)'$$

さて 求める誤差楕円は、重み 1 に対する大きさである  
直線から求める場合に重みを考えるときにはどうすればよいか、答えて  
考えていただきたい。

空間で点を求める場合もこのやり方を拡張すると容易にできる。

この場合には分散, 共分散行列は 3行3列で

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} a_{12} &= a_{21} \\ a_{13} &= a_{31} \\ a_{23} &= a_{32} \end{aligned}$$

の形であり、固有方程式は

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

の 3次方程式となる。求められる固有ベクトルはすべて互いに直交する。

正規方程式

$$\begin{aligned} 1.5\bar{x} - 0.3\bar{y} &= -0.6 \\ -0.3\bar{x} + 1.5\bar{y} &= -0.6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \bar{x} &= -0.5 \\ \bar{y} &= -0.5 \end{aligned}$$

分散, 共分散行列

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \frac{1}{3-2} \begin{pmatrix} 1.5 & -0.3 \\ -0.3 & 1.5 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{25}{36} & \frac{5}{36} \\ \frac{5}{36} & \frac{25}{36} \end{pmatrix}$$

固有方程式

$$\begin{vmatrix} \frac{25}{36} - \lambda & \frac{5}{36} \\ \frac{5}{36} & \frac{25}{36} - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

$$\left(\lambda - \frac{25}{36}\right)^2 - \left(\frac{5}{36}\right)^2 = 0$$

固有値

$$\lambda_1 = \frac{5}{6} \quad \sqrt{\lambda_1} = 0.9129$$

正

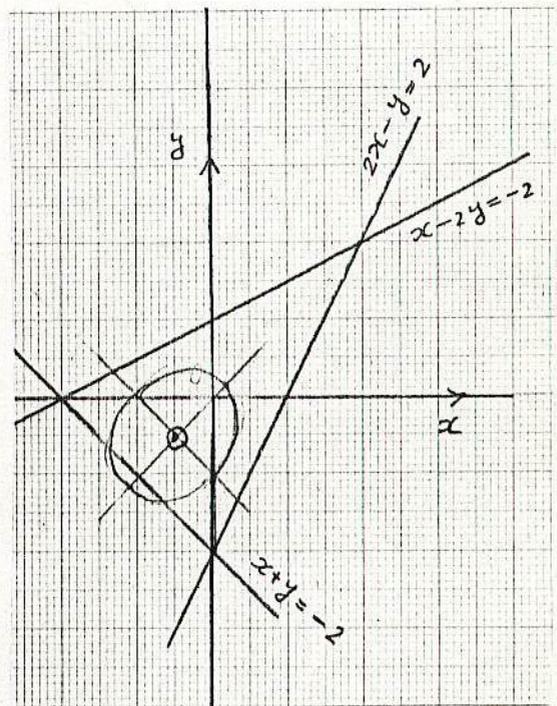
$$\lambda_2 = \frac{5}{9} \quad \sqrt{\lambda_2} = 0.7454$$

固有ベクトル

$$\tan \theta_1 = 1 \quad \theta_1 = 45^\circ$$

$$\tan \theta_2 = -1 \quad \theta_2 = -45^\circ$$

したがって誤差楕円は右の図のようになる



このように誤差楕円を画くことにより、その大きさから決定された点の確からしさがわかり、また、その軸の向きにより、どの方向に決まり方がよく、どの方向に悪いかがすぐわかる。単に  $x, y$  両方向の標準偏差を示すだけでは、こういうことは表現できない。

各点での重みが異なる場合も、ほぼこの方法にならって計算ができる。 $(x_i, y_i)$  の点の重みが  $R_i$  であったとすると、(1), (2) 式はつぎのようになる

Suzuki No. 80023 Geminid

1980 Dec. 14 02h23m00s

-1 mag Neopan 400

| No. | $\lambda$<br>Calculated | $\lambda$<br>Identified | Mul.<br>No. | Density |
|-----|-------------------------|-------------------------|-------------|---------|
| 1   | 3759                    | 3764                    | 21 Fe       | 1.17    |
| 2   | *                       | 3860                    | 4 Fe        | 1.24    |
| 3   | 3879                    | 3885                    | 4 Fe        | 1.22    |
| 4   | 4077                    | 4072                    | 43 Fe       | 1.13    |
| 5   | 4229                    | 4227                    | 2 Ca        | 1.15    |
| 6   | 4388                    | 4376                    | 2 Fe        | 1.15    |
| 7   | *                       | 5170                    | 2 Mg        | 1.21    |
| 8   | 5254                    | 5269                    | 15 Fe       | 1.16    |
| 9   | 5491                    | 5498                    | 15 Fe       | 1.14    |
| 10  | *                       | 5890                    | 1 Na        | 1.23    |
| 11  | 6220                    |                         | ?           | 1.17    |

Back Fog 1.10

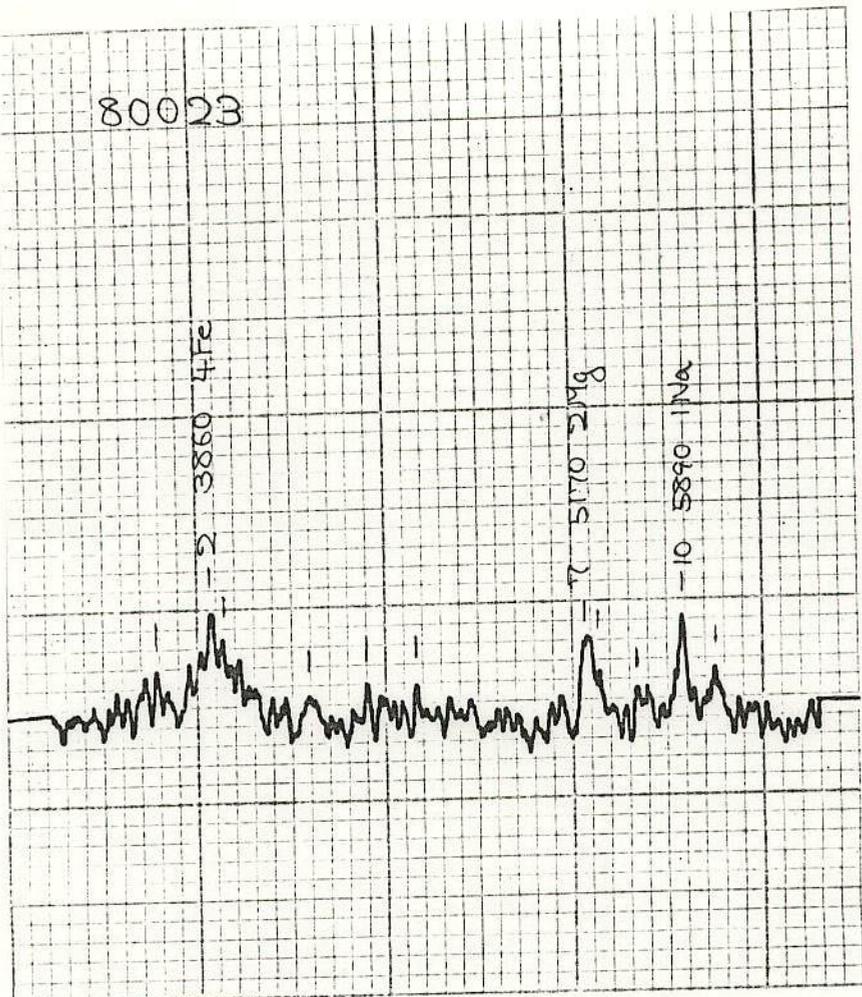
Suzuki No. 80024 Geminid

1980 Dec. 14 02h50m - 03h00m

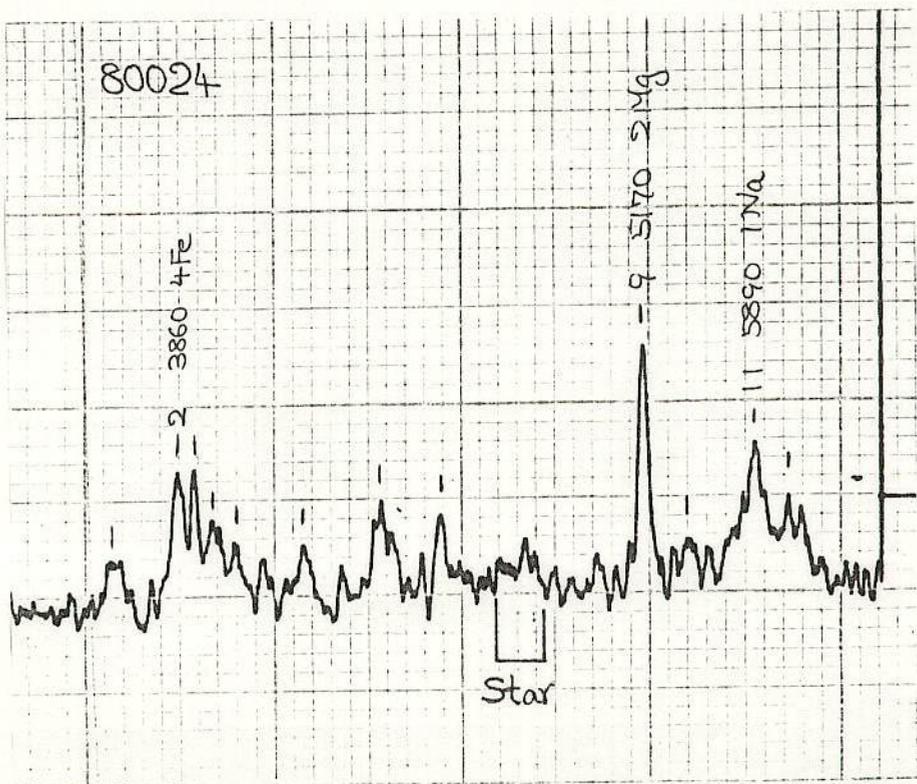
Neopan 400

|    |      |      |         |      |
|----|------|------|---------|------|
| 1  | 3769 | 3764 | 21 Fe   | 1.05 |
| 2  | *    | 3860 | 4 Fe    | 1.17 |
| 3  | 3885 | 3886 | 4 Fe    | 1.17 |
| 4  | 3915 | 3922 | 4 Fe    | 1.10 |
| 5  | 3952 | 3968 | 1 Ca II | 1.07 |
| 6  | 4070 | 4064 | 43 Fe   | 1.07 |
| 7  | 4243 | 4251 | 42 Fe   | 1.13 |
| 8  | 4392 | 4384 | 41 Fe   | 1.11 |
| 9  | *    | 5170 | 2 Mg    | 1.33 |
| 10 | 5422 | 5429 | 15 Fe   | 1.07 |
| 11 | *    | 5890 | 1 Na    | 1.19 |
| 12 | 6183 | 6154 | 5 Na    | 1.13 |

80023



80024



# 初等 流星のスペクトル分析 中島 理大神楽

★ 流星はなぜ光る?  $\Rightarrow$  流星体中の原子と空気分子との衝突・原子が励起されプラズマ状態を成す。

★ 流星の発光スペクトル  $\Rightarrow$  輝線により構成

各輝線の相対強度は: 温度 によって一義的に決まる。

有効励起温度 (effective excitation temperature)

[仮定] 流星体を、その径路に沿ったプラズマ柱と考え、有効励起温度で熱平衡状態にあるとする。

相対強度  $I_r$

$$I_r = \frac{h\nu AN}{4\pi} \cdot \frac{g_r e^{-\frac{\chi}{kT}}}{B(T) \sim \sum_r g_r e^{-\frac{\chi}{kT}}} \quad (1)$$

$h$ : プランク定数  $\nu$ : 光の振動数  $A$ : 遷移確率  $N$ : 全粒子数

$g_r$ :  $r$ -stateの統計的重率  $R$ : ボルツマン定数  $T$ : 励起温度  $\chi$ : 励起ポテンシャル  $B(T)$ : 分配関数

遷移確率  $A$  と吸収振動子強度  $f$  の関係

$$g_r A = \frac{8\pi^2 \epsilon^2}{mc \lambda^2} g f \quad (2)$$

$$I = I_r \cdot t$$

$t$ : 発光時間

(3)

(1)(2)(3)より.  $\therefore I = C \frac{g f}{\lambda^3} e^{-\frac{\chi}{kT}} \quad \left( C = t \cdot \frac{N}{B(T)} \cdot \frac{2\pi\epsilon^2 h}{m} \right)$

自然対数をとる.

$$\chi = \boxed{kT} \ln \left( \frac{g f}{I \lambda^3} \right) + kT \ln C$$

$\chi$  と  $\ln(gf/I\lambda^3)$  は直線関係, よして  $kT$  は上式の傾き.

$k(T) \leftarrow$  有効励起温度  $T_e$

✧ 組成比の決定

流星体の発光の式  $I_r = \frac{h\nu AN^i}{4\pi} \cdot \frac{g_r e^{-\frac{\chi}{kT}}}{B(T)}$  より、  
 線強度と比較し、組成比を定める。

$$\therefore \frac{Na}{Ne} = \frac{I_a B_a(T_e)}{I_e B_e(T_e)} \cdot \frac{\lambda_a^3 g_e f_e}{\lambda_e^3 g_a f_a} \exp\{(\chi_a - \chi_e)/kT_e\}$$

But, 同一元素のどの光線を選べいかによって、結果が異なる。そこで、同一元素の各々の光線において、相乗平均をとると。

$$J_a = \frac{I_a B_a(T_e) \lambda_a^3}{g_a f_a} \exp(\chi_a/kT_e)$$

$$\bar{J}_a = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (J_{a_i})}$$

n は光線の本数

$$\therefore \frac{Na}{Ne} = \frac{\bar{J}_a}{\bar{J}_e}$$

実際、FeI を元素 B にとり、すべて FeI に対して、どれだけの組成比であるかを算出。

- FeI : Fe
- FeII : Fe<sup>+</sup>
- FeIII : Fe<sup>2+</sup>

↓  
 解離度・電離度の補正

✧ 電離性による組成比の補正

電離性平衡を仮定し、Saha の公式を適用。

$$\frac{N_i N_e}{N_0} = \left\{ \frac{2B_i(T_e)}{B_0(T_e)} \cdot \frac{2\pi m k T_e}{h^2} \right\}^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\chi_e}{kT_e}\right)$$

例 CaI 温度 T<sub>e</sub> での分配関数

電離密度 N<sub>e</sub> を既知とすれば、イオン化の場合 N<sub>i</sub>/N<sub>0</sub> が求まり、補正可能。

- ・ 中性原子に対して correction factor 1 + N<sub>i</sub>/N<sub>0</sub> をかける。
- ・ イオン化した原子 " 1 + N<sub>0</sub>/N<sub>i</sub> をかける。

N<sub>e</sub> を求める。  $M_2 = 33.1 - 2.5 \log(g)$

$$N_e = g / \pi r_m^2$$

よって、補正係数を知るには、流星プラズマ柱の半径 r<sub>m</sub> を求めればよい。

## モデルの想定

- (i) Elastic Sphere Model (弾性体球モデル)
- (ii) Pressure - Balance Model (圧力バランスモデル)

## (i) E-S Model

流星プラズマの形成・拡散過程を、流星体原子と空気分子との弾性衝突により単純化するもの。

長沢工氏による実験式 (1個のFe原子と、多数の空気分子との弾性衝突により、プラズマ半径を推定)

$$\log(t/\lambda) = 0.237(r_m/\lambda) - 4.251 - 0.234/(r_m/\lambda)$$

$t$ : 経過時間     $r_m$ : プラズマ柱の平均半径     $\lambda$ : Fe原子の平均自由行程

## (ii) P-B Model

E-S Model  $\Rightarrow$  1つの流星原子の大気中でのひるまひを追ったにすぎず、また、衝突数の相当数であろうと思われる原子間相互の衝突を無視している。

P-B Model  $\Rightarrow$  流星プラズマ柱の温度が一定で、その圧力が外圧力(大気)とバランスを保っているという仮定にもとづく。

$$N_m T_m = N_{air} T_{air}$$

$N_m$ : 流星原子の数密度

$N_{air}$ : 空気分子の数密度

$T_m$ : 流星体の絶対温度

$T_{air}$ : 空気の絶対温度

※ 実際の測定

分光写真からわかること

(i) 輝線同士の位置関係 (ii) 輝線スペクトルの濃度

(i) 波長同定

流星スペクトルに、比較スペクトルを入れることができない。

3つ以上の輝線の波長を仮定  $\Rightarrow$  Haultmanの分散式

$\lambda_{1234}$   $\nearrow$

$\searrow$

波長を求める。

(ii) 濃度測定と光量の決定

- ・ウェッジの焼込み
- ・濃度の測定

写真濃度と光の強度の関係は線型に表わせる。

$\downarrow$

濃度と強度の特性曲線によって濃度を強度に変換。

・ 強度の決定

- ① 周辺減光補正
- ② 大気吸収減光補正
- ③ 分光感度補正 (mag- $\lambda$ )

(iii) 組成比とその補正

補正係数を求める  $\Rightarrow$  流星プラズマ柱の半径

E-S. P-B Model

半径の決定

$\downarrow$

電子密度  $N_e$  の決定

$\downarrow$

補正係数  $N_0/N_1$  の決定 //

参考文献 「ANALYSIS OF THE SPECTRA OF

LEONID METEORS」 長沢工

# ① 分子分光学の基礎 — 流星スペクトルはどんなものか —

23-MSS

## ・ 流星スペクトルの特徴

太田 (電通大) 発表

- 1) 発光スペクトルである。
- 2) 輝線スペクトルである。
- 3) 原子スペクトルが主である。
- 4) "リン光"をみ出すことがある。

## ・ 発光のメカニズム (励起と遷移)

現在観測されている領域 (赤外 ~ 可視 ~ 紫外) の発光スペクトルは、電子状態の遷移である。微細構造まで考慮に入れる時は、振動状態、回転状態を取り扱う必要がある。

- 1) 電子状態の遷移 (電子の軌道の変化: S軌道 → P軌道 などの遷移)  
可視, 紫外レベルの波長 数 eV のエネルギー ( $10^6 \text{cm}^{-1} \sim 10^8 \text{cm}^{-1}$ )
- 2) 振動状態の遷移 (振動状態  $v$  の変化)  
赤外 ~ 遠赤外の波長  $10^3 \text{cm}^{-1} \sim 10^6 \text{cm}^{-1}$
- 3) 回転状態の遷移 (回転状態  $J$  の変化)  
マイクロ波の波長  $10 \text{cm} \sim 100 \text{cm}$

## ・ 選択律

最初の電子の波動関数  $\psi_s = \psi_s C_s e^{-i \frac{E_s}{\hbar} t}$   
 遷移後の波動関数  $\psi_x = \psi_x C_x e^{-i \frac{E_x}{\hbar} t}$   
 調和振動子のハミルトニアン  $\partial_t = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \frac{1}{2} k x^2$

[ Schrödinger 方程式  $\partial_t \psi_s = E_s \psi_s, \partial_t \psi_x = E_x \psi_x$  を  
 満たす  $\psi_s, \psi_x$  は Hermite 多項式  $H_n(\xi)$  を使って  
 $\psi_s(x) = N_n e^{-\frac{\xi^2}{2}} H_n(\xi)$  ( $\xi = \sqrt{\alpha} x$ ) と表わせる。 ]

$\psi_s \rightarrow \psi_x$  の遷移確率は  $\langle \psi_s | x | \psi_x \rangle, \langle \psi_s | y | \psi_x \rangle$  である

注:  $\langle \psi_s | x | \psi_x \rangle = \int \psi_s x \psi_x^* dx$   $x, y, z$  は  $x$  偏光,  $y$  偏光,  $z$  偏光を表わす。

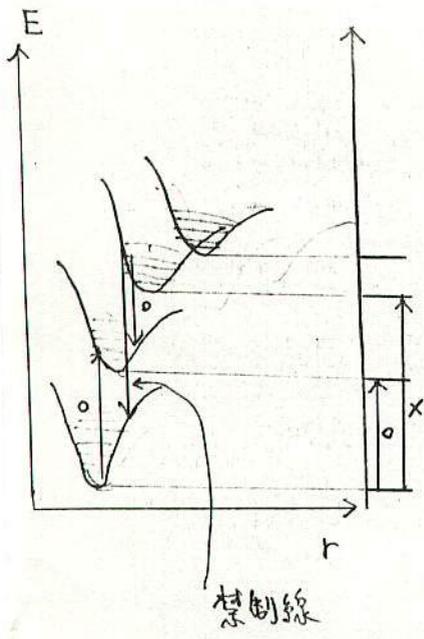
結論: 面倒な計算の結果は非常にきれいな結果となる。

・ 電子は隣接した電子状態にしか遷移しない。

$$1s \rightleftharpoons 2s \rightleftharpoons 2p \rightleftharpoons 3s \rightleftharpoons 3p \dots$$

$$\Delta v = \pm 1 \quad \Delta J = \pm 1$$

\* 選択律を破るような遷移 → 禁制線



- 電子状態の遷移に関する選択律はあまり破れない。
- 振動, 回転はこの限りではない。

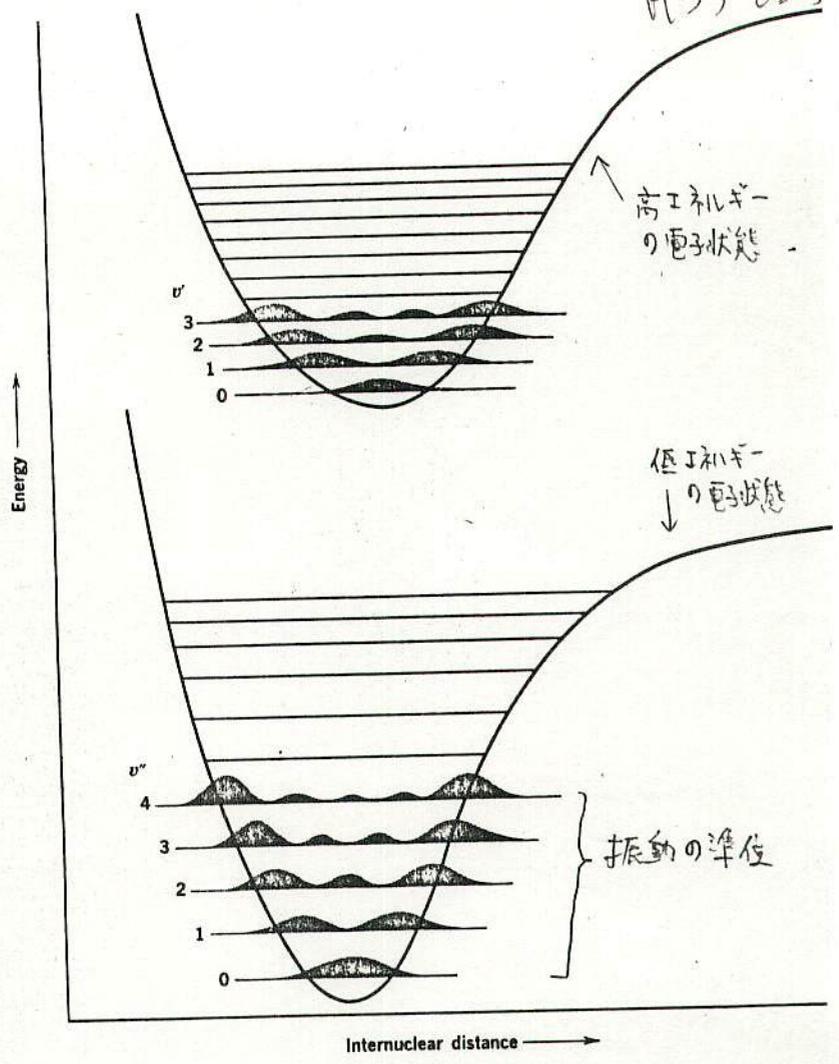
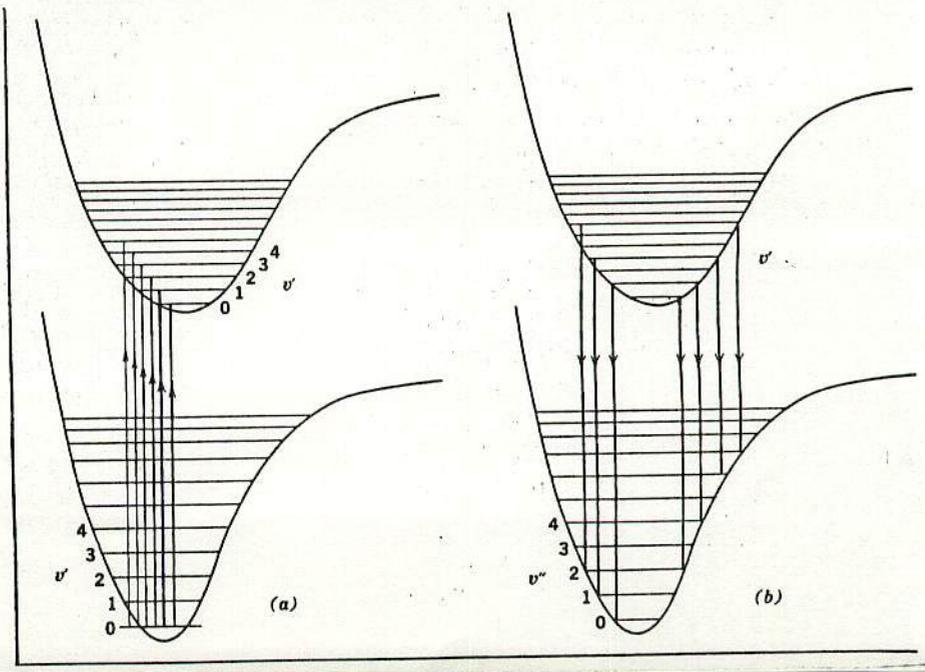


FIG. 10-2 (a) Some of the most probable transitions, for an absorption experiment at a relatively low temperature, for the potential-energy curves of Fig. 10-1. (b) Examples of the most probable emission transitions between vibrational levels of two electronic states. (Note, as Table 10-1 shows, that for a given value of  $v$  transitions to states with two different values of  $v$  are preferred.)



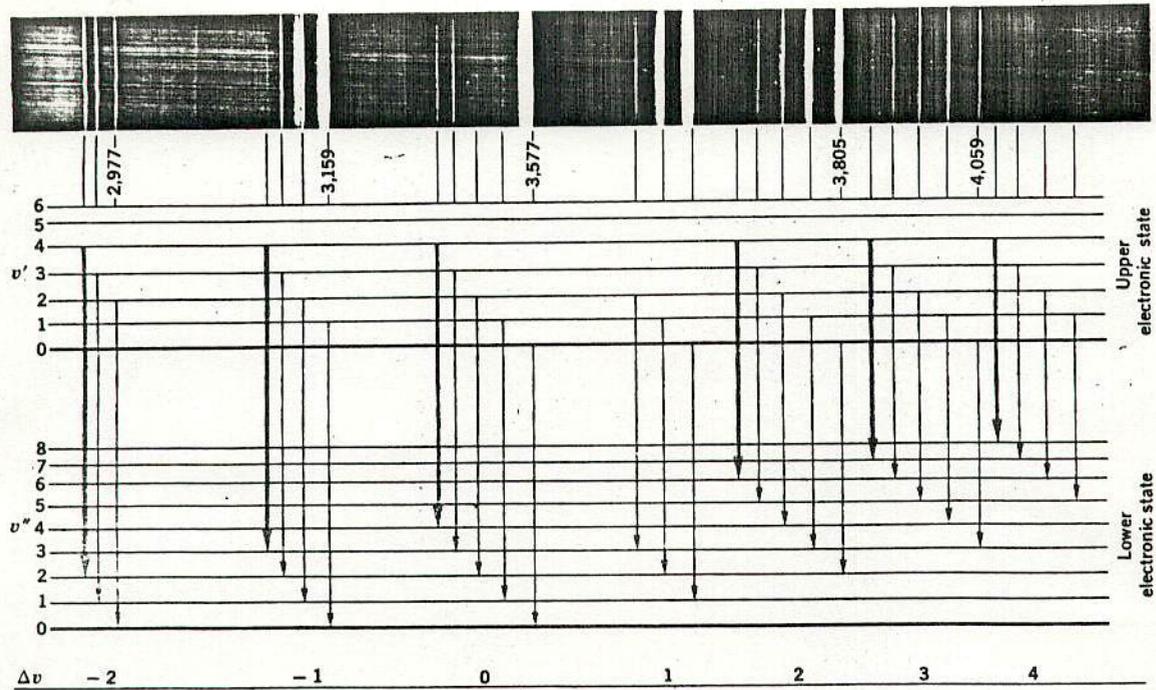


FIG. 10-4 Part of the emission spectrum of  $N_2$ . The assignment of the components of the band to the vibrational levels of the two electronic states shown below the spectrum has been worked out with the aid of a treatment like that illustrated in Table 10-1. The heavy arrows are drawn to call attention to the series of transitions that occur from a given  $v'$  level to various  $v''$  levels. (Courtesy of J. A. Marquisee, Case Institute of Technology, Cleveland, Ohio.)

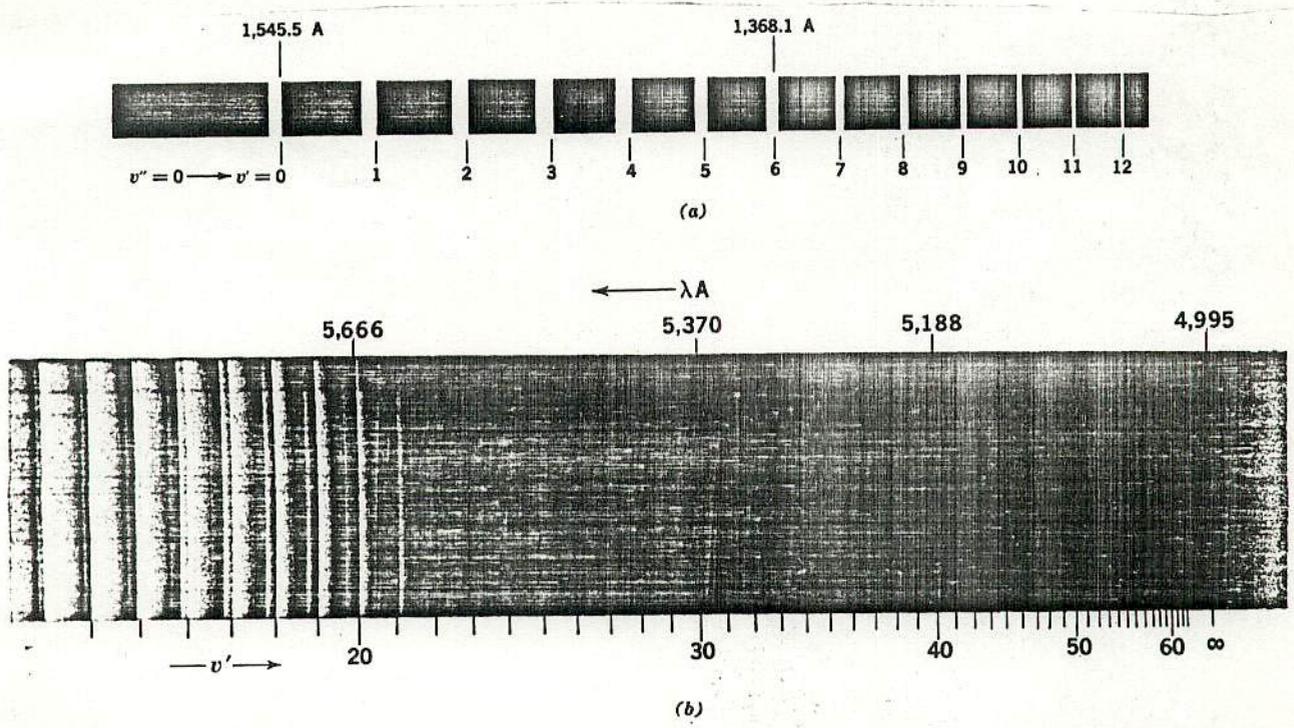
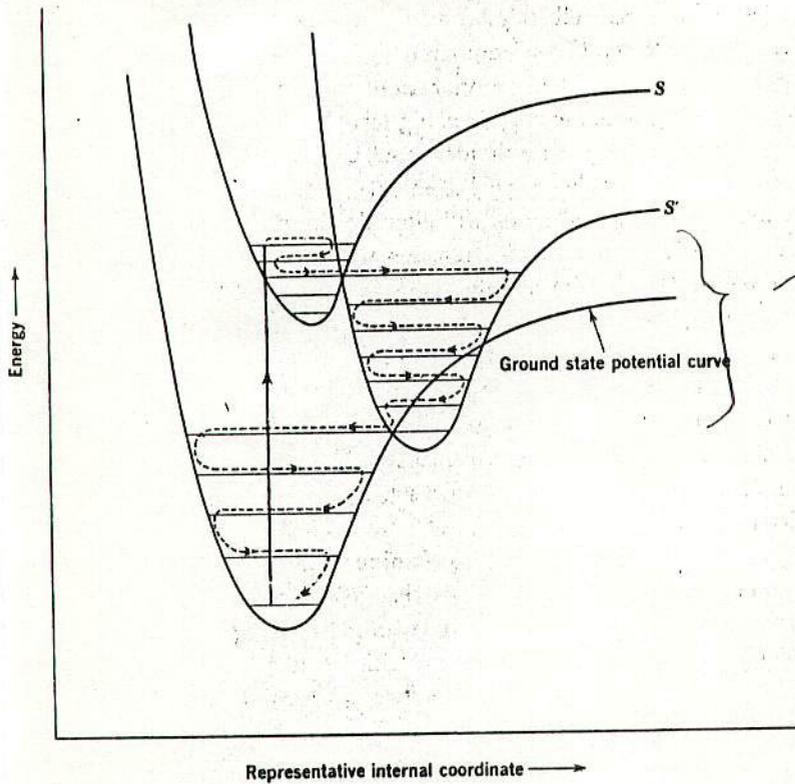
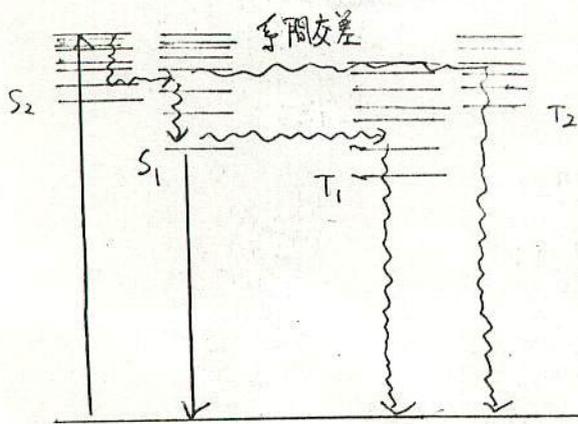


FIG. 10-3 Absorption bands due to electronic transition showing vibrational structure. (a) The absorption band of CO at about 1,400 Å. (Adapted from G. Herzberg, "Spectra of Diatomic Molecules," D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, N.J., 1950.) (b) The absorption band of  $I_2$  in the visible spectral region. The indicated values of  $v'$  are for the series of transitions that start from  $v'' = 0$ . (Courtesy of J. A. Marquisee, Case Institute of Technology, Cleveland, Ohio.)

FIG. 11-21 Energy dissipation by vibrational deactivation and internal conversion. (The dashed curve suggests the course of these nonradiative processes.)



Frank-Condon 状態



蛍光  
( $10^{-6}$  sec <)

リン光 ( $10^{-6} \sim 10^3$  sec)

T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> はスピンが  
S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> と逆向き

◎ 流星のこゝんは一種のリン光と考えられる。ESRが測定できるほど良いのが全く不可能に近い。せめて高分解能のこゝんのスペクトル(振動線が分離できる位)がとれれば---

流星物理セミナー 1983.3.13  
 場五、橋川西高 鈴木文二

33人参加  
 40後36人

No. 1

1. 基本式

$$I = \frac{N_0}{N_s} \frac{1}{R(Te)} \frac{2\pi E k g_i f_i}{m \lambda^3} \exp(-\chi_i/kTe)$$

2. 補正

- ・「アラリング」(輝線がほぼ正根分布型になる)  
 $I\lambda = F \cdot I \cdot \exp\{-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{p^2}\}$
- ・「ブレンド」(隣の輝線と混る)  
 $\sum I\lambda$
- ・分光感度(フィルムの特性)  
 2次回帰分析

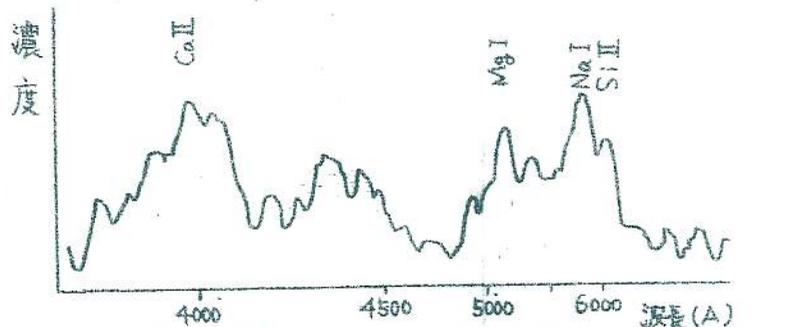


図1. 流星スパクトルのマイクロフォトメータースキャン

3. 器械

Canon CX-1  
 RAM 96K  
 (FDOS-BASIC)  
 14桁

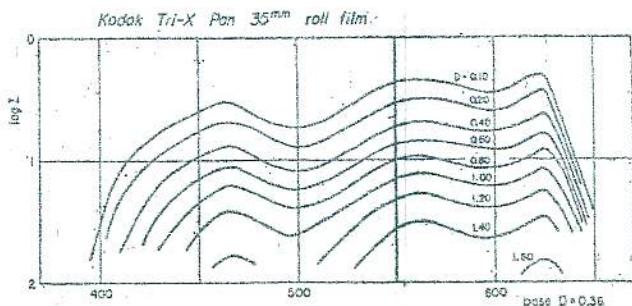


図2. 感光乳剤、コダックトライXパンフィルム(35mmロール)  
 分光感度曲線(東京天文台)

4. 問題点

- ・Siの相対数
- ・Caの電離度

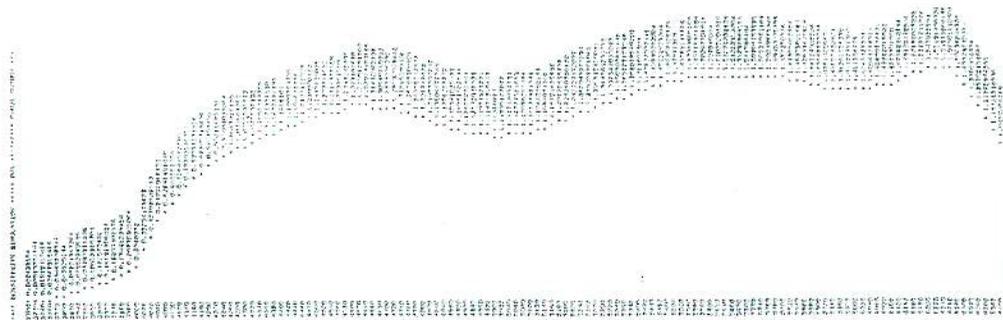
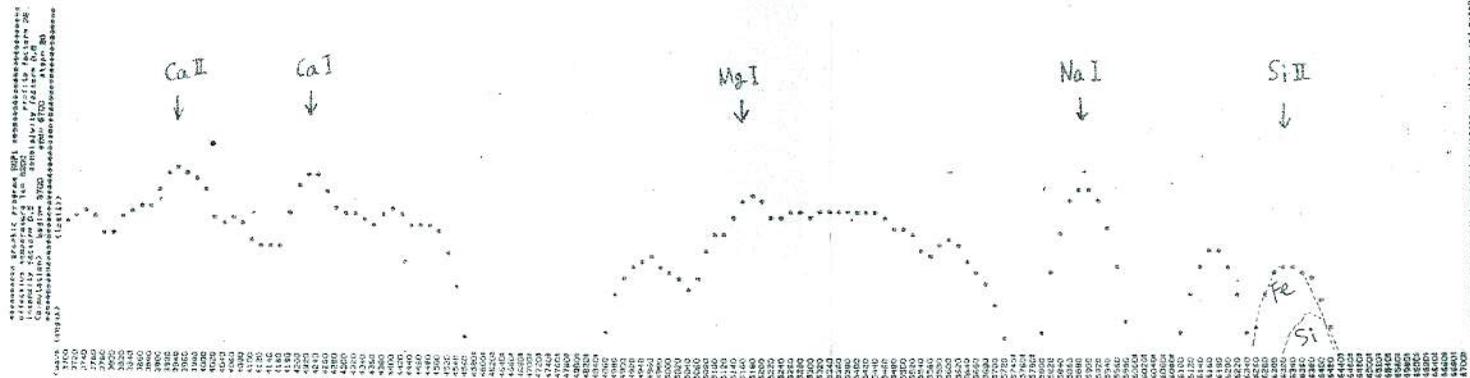


図3. 分光感度の2次回帰分析曲線

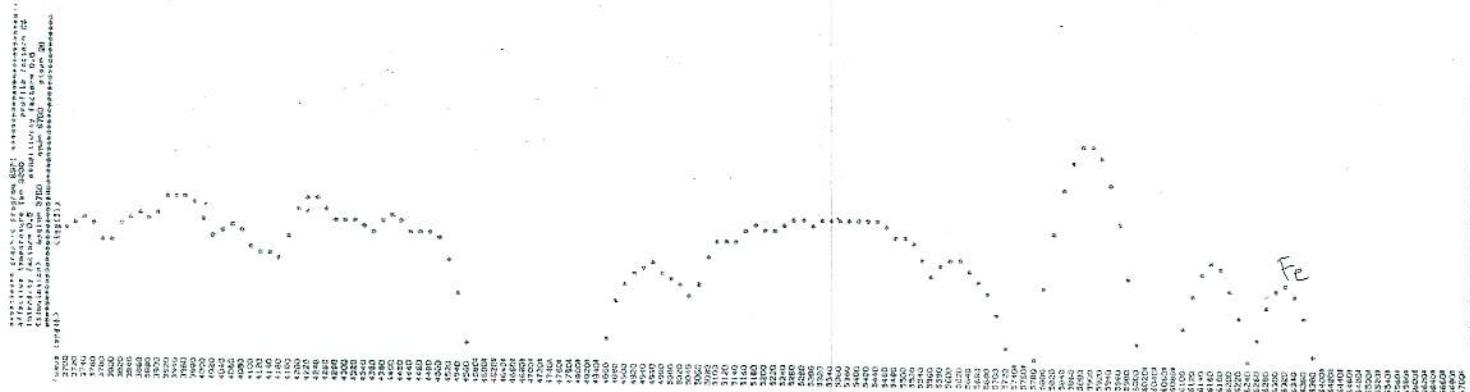
```

***SIMULATION PROGRAM SSP1*****BURLI SUZUKI*****
effective temperature Te= 3200
(partition function calculation)
element Fe I Ca II Mg I Na I Si I Si II
log B(Te) 1.3703 0.016466 0.30332 0 0.28116 0.9453 0.00000
B(Te) 23.46 1.0386 2.0106 1 1.9521 8.2366 9.151
(Abundance)
element Fe Ca Mg Na Si
data I 0.23 5.71 3.000251 5470000
data/Fs 1 0.23 5.71 0.000251 5470000
(ionization)
Ca I 0.037419245 Ca II 0.2225806 Si I 5.47 Si II 5470000
basic spectra data for SSP1 program
multi No. intensity wave length potential x log(Y)
[Fe I]
5 22419.47 3705.557 3.38 -1.27
5 23081.7 3722.564 3.4 -1.22
5 3273.46 3737.133 3.35 -0.37
5 33291.96 3748.264 3.4 -0.56
4 44195.03 3924.464 3.23 -1.17
4 177754 3929.918 3.2 -0.6
43 1542.764 4003.266 4.83 -0.37
43 13553.3 4048.818 4.83 0.43
43 7450.817 4059.537 4.52 0.27
43 5051.461 4071.74 4.83 0.17
43 1260.19 4132.06 4.59 -0.48
42 1994.743 4202.031 4.42 -0.32
42 1671.696 4220.79 4.45 -0.34
42 7394.496 4271.764 4.35 -0.65
41 1159.777 4294.128 4.35 0.17
42 7635.095 4307.626 4.42 0.33
42 3264.553 4325.765 4.45 -0.14
41 175.3638 4337.045 4.4 -1.57
41 4559.157 4353.847 4.29 -0.32
41 7476.196 4404.702 4.35 0
2 2217.669 4427.312 2.84 -0.89
2 1514.05 4461.604 2.85 -0.52
2 2180.052 4492.171 2.86 -2.85
318 126.4742 4520.595 5.53 -0.09
318 319.6663 4597.602 5.29 0.26
318 79.85064 5005.125 5.29 -0.33
318 4.096391 5044.221 5.29 -1.61
1 2418.392 5110.414 2.41 -0.34
552 2521.95 5167.451 3.97 -1
57 7.539637 5203.601 5.6 -0.8
57 3168.887 5227.192 3.91 -0.64
523 7.107919 5233.475 5.62 -0.8
13 12425.2 5259.241 3.2 -1.35
13 1963.348 5270.55 3.94 -0.95
13 9211.572 5299.146 3.23 -1.4
37 705.2054 5328.534 3.23 -1.5
13 6321.607 5371.493 3.25 -1.34
13 9112.169 5397.121 3.3 -1.62
13 5170.781 5405.779 3.27 -1.6
13 1407.874 5434.327 3.25 -2.12
13 2969.337 5446.32 3.25 -1.25
13 1816.377 5455.613 3.27 -2.03
13 661.6256 5487.515 3.25 -2.49
18 733.9329 5504.782 3.23 -0.6
686 9.483762 5559.825 5.62 -0.38
686 17.62959 5572.846 5.62 -0.86
686 5.109808 5576.057 5.62 -0.86
686 33.5533 5595.763 5.56 -0.19
686 170.3147 5615.692 5.52 0.31
686 31.83222 5636.825 5.56 -0.16
106 58.24548 6318.022 4.4 -1.56
[Ca I] Ca II]
1 2977010 3333.644 3.14 0.14
2 1612005 3368.47 3.11 -0.162
2 434510.4 4226.782 2.92 0.249
21 261.3301 5596.757 4.25 0.21
21 143.1996 5594.466 4.72 -0.05
21 100.1599 5596.467 4.71 -0.22
20 72.11205 6169.053 4.51 -0.55
20 209.9572 6169.939 4.52 -0.07
[Mg I]
2 5552.381 3167.322 5.09 -0.657
2 17787.3 3172.664 5.05 -0.36
2 29485.29 3183.608 5.09 -0.158
9 57.22451 3323.405 5.58 -0.49
[Na I]
1 41795.94 5699.593 2.1 0.117
1 21581.73 5695.923 2.09 -0.154
3 0.3609916 6154.226 4.1 -1.56
1 1.119206 6160.747 4.1 -1.361
[Si I] Si II]
2 77.06163 6347.091 10.03 0.283
2 37.03964 6371.355 10.02 -0.074
    
```

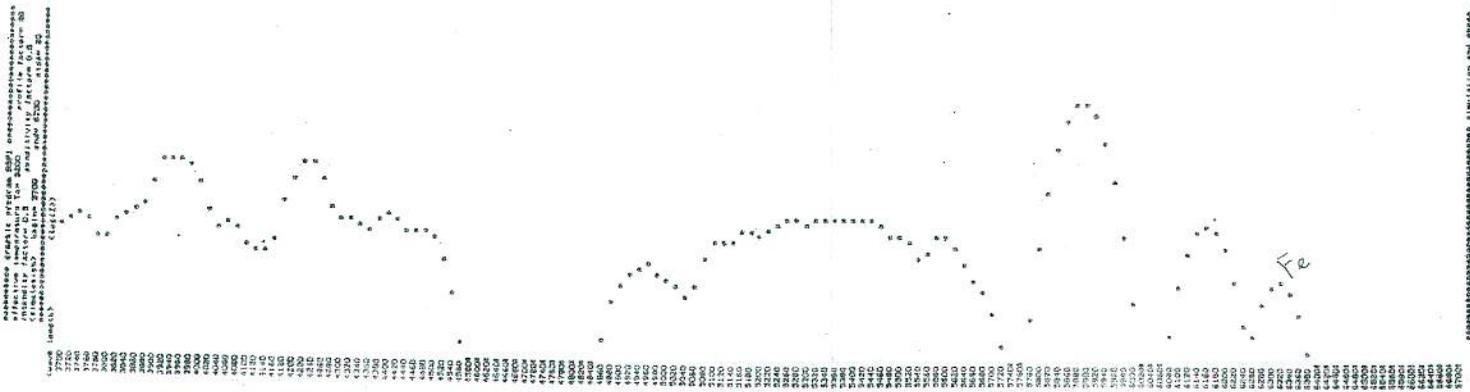
表1. スパクトル線の基礎データ



☑ 4-1  
 Fe = 1  
 Ca = 0.23  
 Mg = 5.71  
 Na = 0.000251  
 Si = 5470000  
 Te = 3200K 温度



☑ 4-2 (コンクリート)  
 Fe = 1  
 Ca = 0.047  
 Mg = 0.53  
 Na = 0.024  
 Si = 0.63  
 Te = 3200K



☑ 4-3 (地盤)  
 Fe = 1  
 Ca = 0.73  
 Mg = 0.42  
 Na = 0.57  
 Si = 5.54  
 Te = 3200K

26th MSS, 1983 May 8

論文紹介: Air Radiation in Photographic Meteor Spectra

G. A. Harvey (1977)

J. Geophysical Research 82 No.1 p.15-22

小笠原 雅弘

対地速度の速い3つの流星スペクトルにかつた量の空気の発光 (Air Radiation) N, O, N<sub>2</sub> から成る。このうちの流星スペクトルにガラス管で作られたN<sub>2</sub>の発光を比較することによりN<sub>2</sub>の1st positive band 強度を計算した。その結果 'effective vibrational temperature' は約20000°Kであり、この結果は NASA/Langley Research Center (LRC) の流星スペクトルパトロールから得られたものである。(17th MSS 文献 Four Years of Meteor Spectra Patrol 参照)

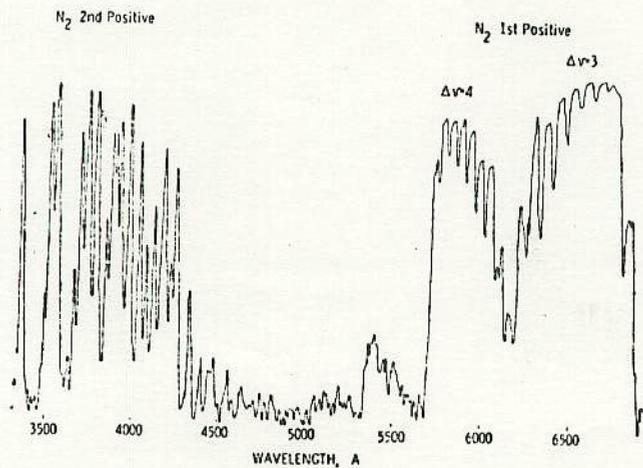


Fig. 8. Densitometer tracing of the N<sub>2</sub> first-positive band radiation from a Geissler tube.

TABLE 1. Wavelength Identifications of Air Radiation in Three Meteors

| $\lambda$ Measured | $\lambda$ Identified | Multiplet Number | Element            | $E_1$ , eV | $E_2$ , eV | Spectrum* |
|--------------------|----------------------|------------------|--------------------|------------|------------|-----------|
| 3692               | 3692.44              | 7                | O                  | 9.48       | 12.82      | P         |
| 3755               | 3755.4               | 3, 1             | N <sub>2</sub> 2 P | 8.00       | 11.28      | C         |
| 3806               | 3804.9               | 2, 0             | N <sub>2</sub> 2 P | 7.79       | 11.04      | C         |
| 3942               | 3943.                | 5, 2             | N <sub>2</sub> 2 P | 8.39       | 11.52      | C         |
| 3947               | 3947.30              | 3                | O                  | 9.11       | 12.23      | P         |
|                    | 3947.49              | 3                | O                  | 9.11       | 12.23      | P         |
|                    | 3947.69              | 3                | O                  | 9.11       | 12.23      | P         |
| 3998               | 3998.4               | 4, 1             | N <sub>2</sub> 2 P | 8.20       | 11.28      | C         |
| 4099               | 4099.95              | 10               | N                  | 10.63      | 13.64      | C, P      |
| 4110               | 4109.98              | 10               | N                  | 10.64      | 13.65      | L, C, P   |
| 4113               | 4114.00              | 10               | N                  | 10.64      | 13.65      | C, P      |
| 4140               | 4141.8               | 7, 3             | N <sub>2</sub> 2 P | 8.77       | 11.76      | C         |
| 4152               | 4151.46              | 6                | N                  | 10.29      | 13.26      | L, P      |
| 4199               | 4200.5               | 6, 2             | N <sub>2</sub> 2 P | 8.58       | 11.52      | C, P      |
| 4215               | 4214.73              | 5                | N                  | 10.29      | 13.21      | C, P      |
|                    | 4215.92              | 5                | N                  | 10.28      | 13.21      | C, P      |
| 4226               | 4223.04              | 5                | N                  | 10.29      | 13.21      | L, C, P   |
|                    | 4224.74              | 5                | N                  | 10.29      | 13.21      | L, C, P   |
|                    | 4230.35              | 5                | N                  | 10.29      | 13.21      | L, C, P   |
| 4369               | 4368.30              | 5                | O                  | 9.48       | 12.31      | L, C, P   |
| 4654               | 4654.23              | 18               | O                  | 10.69      | 13.35      | L, C, P   |
|                    | 4654.56              | 18               | O                  | 10.69      | 13.35      | L, C, P   |
|                    | 4655.36              | 18               | O                  | 10.69      | 13.35      | L, C, P   |
| 4768               | 4772.54              | 16               | O                  | 10.69      | 13.28      | L         |
|                    | 4772.89              | 16               | O                  | 10.69      | 13.28      | L         |
|                    | 4773.76              | 16               | O                  | 10.69      | 13.28      | L         |
| 5020               | 5018.78              | 13               | O                  | 10.69      | 13.15      | P         |
|                    | 5019.34              | 13               | O                  | 10.69      | 13.15      | P         |
|                    | 5020.13              | 13               | O                  | 10.69      | 13.15      | P         |
| 5332               | 5328.98              | 12               | O                  | 10.69      | 13.01      | C, P      |
|                    | 5329.59              | 12               | O                  | 10.69      | 13.01      | C, P      |
|                    | 5330.66              | 12               | O                  | 10.69      | 13.01      | C, P      |
| 5433               | 5435.16              | 11               | O                  | 10.69      | 12.96      | L, C, P   |
|                    | 5435.76              | 11               | O                  | 10.69      | 12.96      | L, C, P   |
|                    | 5436.83              | 11               | O                  | 10.69      | 12.96      | L, C, P   |
| 5577               | 5577.4               | 3F               | O                  | 1.96       | 4.17       | L, C, P   |
| 5755               | 5755.2               | 12, 8            | N <sub>2</sub> 1 P | 7.52       | 9.67       | L, C, P   |
| 5804               | 5804.3               | 11, 7            | N <sub>2</sub> 1 P | 7.37       | 9.49       | L, P      |
| 5956               | 5854.4               | 10, 6            | N <sub>2</sub> 1 P | 7.21       | 9.32       | P         |
| 5910               | 5906.0               | 9, 5             | N <sub>2</sub> 1 P | 7.05       | 9.14       | P         |
| 5960               | 5956.0               | 8, 4             | N <sub>2</sub> 1 P | 6.89       | 8.86       | L, C, P   |
| 6010               | 6013.6               | 7, 3             | N <sub>2</sub> 1 P | 6.72       | 8.78       | C, P      |
| 6070               | 6069.7               | 6, 2             | N <sub>2</sub> 1 P | 6.55       | 8.58       | L, C, P   |
| 6160               | 6155.99              | 10               | O                  | 10.69      | 12.70      | L, C, P   |
|                    | 6156.78              | 10               | O                  | 10.69      | 12.70      | L, C, P   |
|                    | 6158.19              | 10               | O                  | 10.69      | 12.70      | L, C, P   |
| 6245               | 6252.9               | 11, 8            | N <sub>2</sub> 1 P | 7.52       | 9.49       | L, C, P   |
| 6320               | 6322.9               | 10, 7            | N <sub>2</sub> 1 P | 7.37       | 9.32       | L, C, P   |
| 6454               | 6453.64              | 9                | O                  | 10.69      | 12.61      | L, P      |
|                    | 6454.49              | 9                | O                  | 10.69      | 12.61      | L, P      |
|                    | 6456.01              | 9                | O                  | 10.69      | 12.61      | L, P      |
| 6472               | 6468.5               | 8, 5             | N <sub>2</sub> 1 P | 7.05       | 8.96       | C, P      |
| 6484               | 6482.74              | 21               | N                  | 11.71      | 13.62      | L, C, P   |
|                    | 6484.88              | 21               | N                  | 11.71      | 13.62      | L, C, P   |
| 6545               | 6544.8               | 7, 4             | N <sub>2</sub> 1 P | 6.89       | 8.78       | P         |
| 6562               | 6562.82              | 1                | H                  | 10.15      | 12.04      | P         |
| 6623               | 6623.6               | 6, 3             | N <sub>2</sub> 1 P | 6.72       | 8.58       | C, P      |
| 6702               | 6704.8               | 5, 2             | N <sub>2</sub> 1 P | 6.55       | 8.39       | C, P      |
| 6728               | 6726.25              | 2                | O                  | 9.11       | 10.94      | P         |
|                    | 6726.50              | 2                | O                  | 9.11       | 10.94      | P         |
| 6794               | 6788.6               | 4, 1             | N <sub>2</sub> 1 P | 6.37       | 8.20       | C, P      |
| 6870               | 6875.0               | 3, 0             | N <sub>2</sub> 1 P | 6.20       | 7.99       | P         |

\*P, Perseid; C, Coma Berenecid; and L, Leonid.

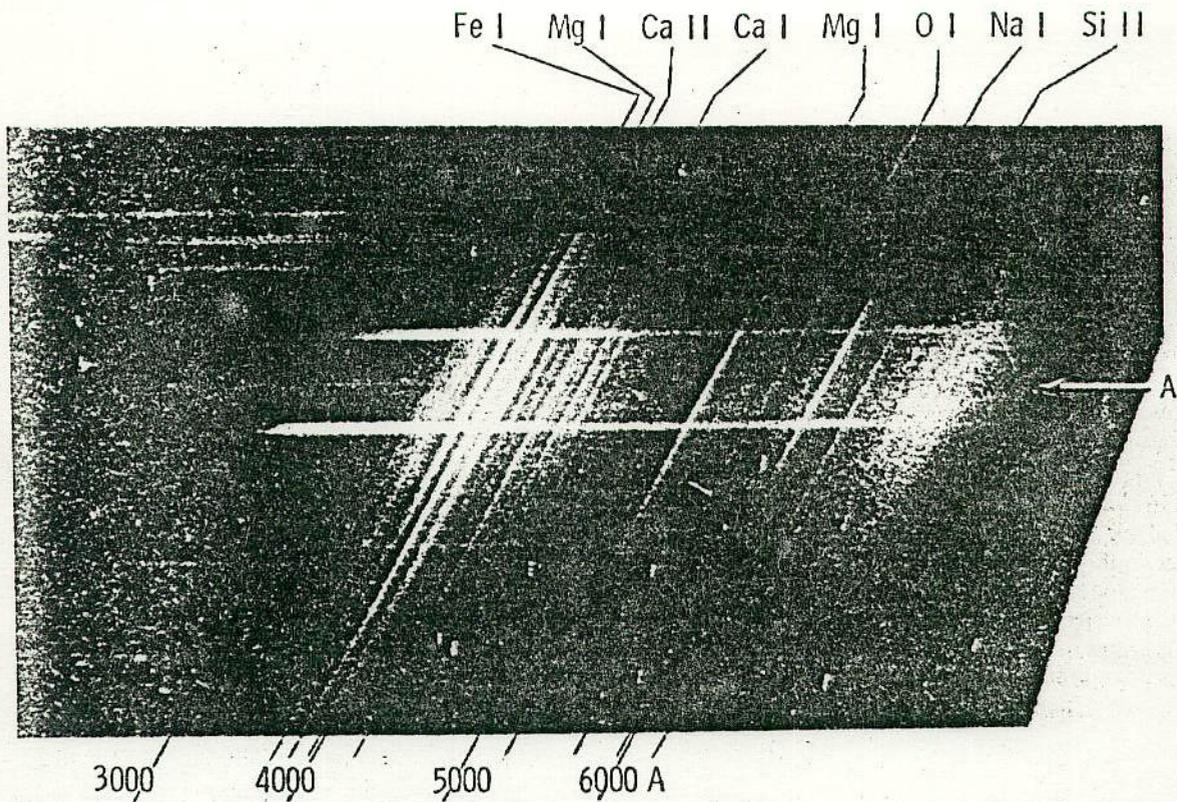


Fig. 1. Meteor spectrum 8. This spectrum of a probable Leonid meteor was recorded during the night of November 20-21, 1968. The spectrum was recorded on a  $f/0.83$  Maksutov-Schmidt slitless spectrograph of 150-mm aperture. The inverse dispersion of the spectrograph is  $500 \text{ \AA/mm}$ .

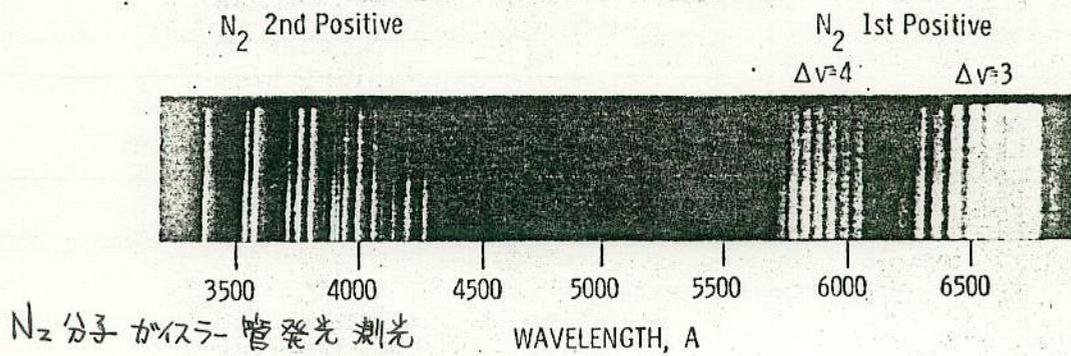


Fig. 7. Spectrum of  $N_2$  first-positive band radiation from a  $N_2$ -filled Geissler tube. This spectrum was recorded on a  $f/1.65$  Schmidt slitless spectrograph of 140-mm aperture. The inverse dispersion of the spectrograph is  $165 \text{ \AA/mm}$ .

$$Q_3 \doteq 1.4 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (13)$$

$$I \doteq 10^{23} \text{ eV s}^{-1} \doteq 2 \times 10^{11} \text{ ergs s}^{-1} \quad (17)$$

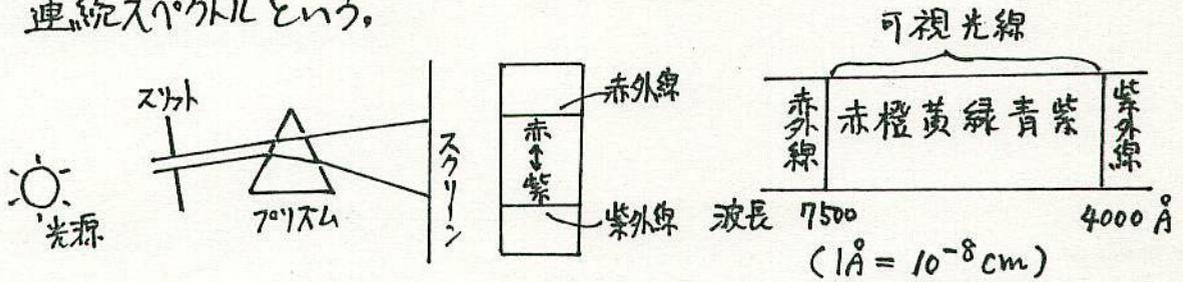
The corresponding production rate for  $N_2 B^3 \pi_g$  by electron This is radiated over the spectral interval  $\lambda\lambda 6000-9000$ , giving

# 「流星の発光とスペクトル」

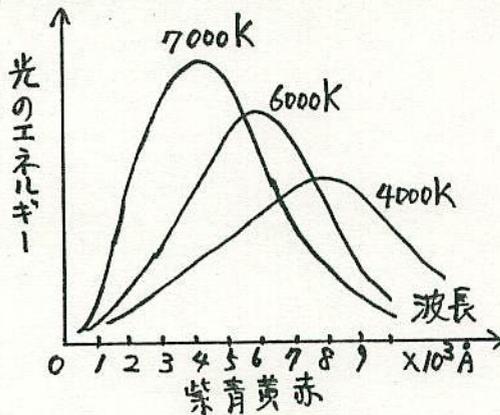
理大神楽 手計昌之

## 連続スペクトル

太陽の光をプリズムに通すと七色の光にわかれる。白熱電燈の光をプリズムにかけても同じように七色にわかれてみえる。七色といってもけ、きりとわかれているのではなくて、色が赤から紫まで次第に変わっていく。このプリズムで光を分離したものをスペクトルといい、太陽光のスペクトルのように連続しているものを連続スペクトルという。



次に真黒な物体を考えよう。もちろん常温では光らないで黒いままである。これを次第に熱していくとどうなるか。はじめ、にぶい赤色になり。次に赤になり黄色になり。しまいには白や青白くみえたりするようになる。その良い例は鉄である。ではなぜ色が温度によって変わるのか。それは高温になるにつれて、青い光(短波長の光)が多く放射されるようになるからである。それを図にしてみよう。横軸は光の波長である。なお色のちがいは波長のちがいによって起こる。



| 色 | 波長 (Å)      |
|---|-------------|
| 赤 | 7500 ~ 6100 |
| 橙 | 6100 ~ 5900 |
| 黄 | 5900 ~ 5700 |
| 緑 | 5700 ~ 5000 |
| 青 | 5000 ~ 4500 |
| 紫 | 4500 ~ 4000 |

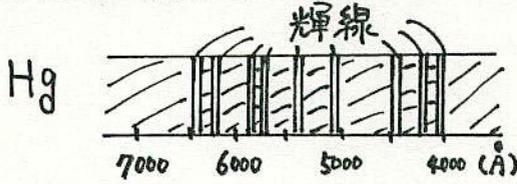
ちなみに極大値を与える波長を  $\lambda_m$  (m) とし 温度を  $T$  (K) とすると  

$$\lambda_m \cdot T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ (m}\cdot\text{K)}$$
 という関係がある。これをウーインの変位則という。

この連続スペクトルは、一般に輝くものにはほぼ見られるが、流星に関してはあまり見られない。流星では次にあげる輝線スペクトルが主に見られる。

・輝線スペクトル

高速道路にあるナトリウム灯は黄色い色を出す。水銀灯は、だいたい色の光を出す。この光をプリズムで分けると連続スペクトルは見えないが、かわりに、どこどこ強く光る線(輝線)がみられる。

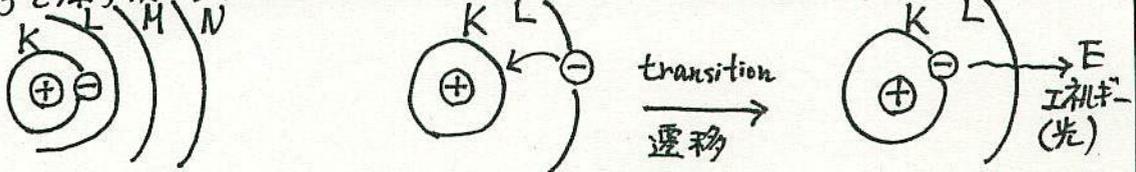


このように原子はその元素特有の輝線を出す。逆に輝線によって元素がわかる。

なぜなら輝線が放射されるのか。

原子内には K, L, M, N... という電子殻があり、電子はそれぞれ決まった電子殻内にある。(HはK殻に1個, NeはK殻に2個, L殻に8個というように)

しかし時には水素原子の1個の電子がL殻やM殻、あるいは原子の外にあるときもある。このとき水素原子はいつもより多くのエネルギーを持つ。なぜなら電子を原子核から引き放すときには仕事をしてやらなければいけないからである。



電子が電子殻を移動(遷移)するとエネルギーが出入りする。このときのエネルギーは主に光の形で出入りする。つまり電子が内側の殻へうつるときそのエネルギーのみを光として出し、逆に外側の殻へうつるとき、同じ光を吸収するのである。

ちなみにエネルギー(E)と光の振動数( $\nu$ )の間には

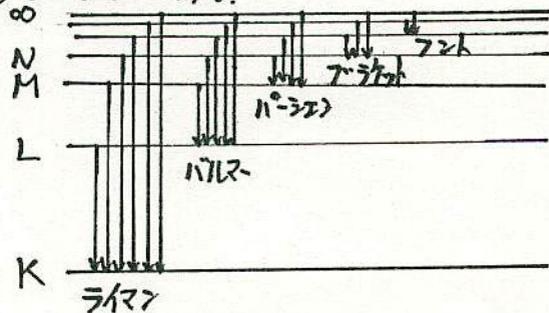
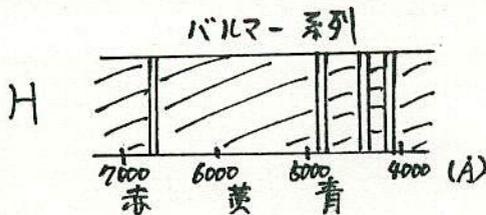
$$E = h \cdot \nu \quad \text{あるいは} \quad E = hc/\lambda$$

$h$ : プランク定数  $6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$   
 $\nu = c/\lambda$       $c$ : 光速

の関係がある。

元素によって、電子殻によって、電子が遷移するときのエネルギーは決まっている。そのため元素によって輝線スペクトルは決まっているのである。

例として水素の輝線スペクトルを示す。



今まで元素を励起して輝線を出すことはわりと話してきたが、

原子の温度が低い(エネルギーが低い)ときは、逆に光(輝線と同じ波長)を吸収して暗線(吸収線)を生じさせる。

## 1. 流星の発光

流星が発光するときは連続スペクトルと輝線スペクトルが一緒にみえます。(ほとんど輝線スペクトルですが。) このときの光のエネルギーはどこから供給されるのでしょうか。その原因は2つ考えられます。

- ・原子同士の非弾性衝突
  - ・イオンと電子の結合、解離の際の化学エネルギー
- しかし実際は前者の影響の方が大きいのです。

## 2. 発光物質

発光しているのは Fe, Mg, Na, Ca, Ni, Si, Al, Co, Cr, Mn などです。ほとんどは流星体から蒸発したものです。つまり発光しているのは流星体であって、まわりの大気ではないのです。それはスペクトルの中に、 $N_2$  や  $O_2$  の出すスペクトルがごく少ないことからわかります。

また発光している物質はほとんどが中性原子です。これは1で述べたことと一致します。

## 3. 発光場所

2でわかるように発光は「コマ」の中で起きています。「コマ」とは流星体から蒸発した物質と大気が混ざっている、つまり流星体をおおっている外皮です。

## 4. 発光過程

コマの中で流星体蒸気もなす原子同士が非弾性衝突をおこし、その解放されるエネルギーで原子内の電子がエネルギーをもらい(励起)、そのエネルギーを放出して元にもどるとき光を出すのです。

コマの中の電子密度は低いため、イオンと電子の結合、解離によるエネルギーではほとんど光っていません。

## 5. なぜ連続スペクトルが観測できないのか。

スペクトルには連続スペクトルと輝線スペクトルが混ざって見えたりですが、写真をとってみても輝線スペクトルしかみえません。

原子同士の衝突によって原子が励起され、輝線を出します。またそれに比べると少ないのですが、イオンと電子の結合、解離の際にも輝線及び連続スペクトルが出ます。この反応においてエネルギーの割合は輝線が87%、連続スペクトルが13%です。それたがでさえ弱い連続スペクトルが全波長域に広がるのですから、我々の機械では観測できないのです。

## 6. 発光の解析

まずモデルも高度に希薄な「コマ」とする。この中では第2の種類 of 衝突は無視できる。このような条件下では励起の過程と自発的な放射の過程とは平衡に達しているでしょう。

流星の速さを  $v$ 、質量欠損を  $\Delta M$ 、それを持つ運動エネルギーを  $\Delta E_t$  とすると

$$\Delta E_t = \Delta M \cdot \frac{v^2}{2}$$

これだけのエネルギーが、この反応のおこる時間  $\Delta t$  (約  $10^{-6}$  秒) よりもはるかに長い時間  $\delta t$  ( $10^{-4}$  秒 (30)) のうちに消滅するので、

この  $\delta t$  の間に  $\Delta E_t$  のうち  $\phi_x$  が  $X$  という粒子の励起に使われて、 $T_x$  が同時に、放射エネルギーにかかったとすると、第2の衝突がないとせば  $T_x = \phi_x$  となる。そのため  $T_x$  を粒子  $X$  についての放射能率とよぼう。

(例. Ca II, K線  $T_x = 8.4 \times 10^{-3}$ , Na I, D線  $T_x = 6.4 \times 10^{-3}$  ただし  $v = 70 \text{ km/s}$ )

単位体積あたりの、大気中の原子数に対する流星体の原子数の割合はコマの中の希釈定数  $\delta$  として定義される。

以上

参考文献

キヤロト「化学」  
・物理学

キヤロト著  
小出昭一著

MSS-063

63rd MSS #

## SPECTRAL-HEIGHT RELATIONS IN PERSEID METEORS

JOHN A. RUSSELL

Department of Astronomy, University of Southern California, Los Angeles

Received 1980 April 4; accepted 1980 July 16

### ABSTRACT

Data from the 1977 and 1978 Perseid meteor showers indicate that meteors whose spectra contain the H and K lines of ionized calcium appear and disappear at altitudes about 6 km below those that do not. This is the inverse of what the earliest spectra revealed. The changing nature of the meteoroid sample made available by more powerful instrumentation is responsible.

Although the Perseid meteoroids were randomly distributed in 1978, evidence is presented that in 1974 a nonrandom cluster of meteoroids with unusual spectral properties was observed.

*Subject heading:* meteors and meteorites

### I. INTRODUCTION

In the second of his landmark studies on the analysis of meteor spectra, Millman (1935) divided the spectra then available into two main classes, Y and Z. The former exhibited the H and K lines of ionized calcium as their most prominent features; the latter lacked the H and K lines and consisted principally of iron lines.

In discussing his data, Millman first called attention to the fact that meteors exhibiting spectra of type Y have heights in excess of 80 km, whereas those with spectra of type Z appear definitely below the 80 km level. Although only eight meteors were involved, he felt that the correlation was probably not due to chance. Two possible explanations were suggested. First, type Z spectra may be produced by iron meteoroids which would suffer less air resistance per unit mass than stony objects and would be able to penetrate the atmosphere more deeply. Millman noted as an objection to this explanation that among the first 14 sporadic meteor spectra, 64% were of type Z, whereas only 5.4% of meteorites with known dates of fall are irons. The second suggested explanation was that differences in the type or degree of the physical processes of radiation are responsible. At the time, Millman concluded that Maltzev's (1930) height-geocentric-velocity relationship was probably of much greater importance than compositional factors in explaining differences in the heights of meteors. Four decades later, the stockpile of meteor spectra is perhaps 2 orders of magnitude greater, but the question of the relative importance of what might be called internal versus external factors in explaining spectral variations has not been completely resolved.

### II. RECENT SPECTRAL-HEIGHT STUDIES

Halliday's (1958) identification in meteor spectra of the forbidden neutral oxygen line at 25577, henceforth to be referred to as the green line, provided a basis for additional studies of meteor heights. He found the line to be weak or absent in the spectra of slow meteors, but even in the spectra of a given shower, where the geocentric

velocity is constant, the strength of the green line was variable. In a recent study of meteor heights confined to the Perseid showers of 1977 and 1978 (Russell 1980), the strength of the green line appeared to be significantly related to the heights of appearance and disappearance. Table 1 contains the data on the eight best spectra. The column headings are self-explanatory except for the last two, where the strengths of the green line and the H and K lines are compared to the strength of the sodium D-line. The following arbitrary scale was used: (1) not visible, (2) discernible but much fainter than the D-line, (3) easily visible but fainter than the D-line, (4) stronger than the D-line outside of bursts, and (5) strongest spectral feature. The figures indicate that the meteors in whose spectra the green line has a strength of 4 or 5 appear and disappear at heights averaging 9 km greater than those with weaker green lines. The average height of appearance for the four meteors with green lines of strength 4 or 5 is 105.3 km, in reassuring agreement with Millman, Cook, and Hemenway's (1971) image orthicon data which indicated maximum green-line activity near 106 km. Variations in velocity can not be invoked to explain these differences as only Perseids of constant velocity are being considered. Although such factors as solar and geomagnetic activity, radiant altitude, and even atmospheric tides may play a greater or lesser role in green-line strength, the effect of structural or compositional differences or both receives support from two sources. First, Ceplecha (1968) has shown that the beginning heights of meteors tend to cluster around two or three values. Cook (1973) finds that similar discrete levels exist for the beginning heights of shower meteors. Both attribute this effect to compositional or structural differences in the meteoroids. Second, in 1972, two Perseid spectra were photographed on the same 10 minute exposure (Russell 1973). The stronger spectrum shows no green line, whereas in the fainter spectrum it is prominent. It is difficult to understand how the environmental factors could change with such rapidity.

In an earlier paper (Russell 1963), an inverse relationship was found between the maximum strengths of the

TABLE 1  
HEIGHT AND SPECTRAL DATA ON PERSEID METEORS

| Meteor Designation | Height of Appearance (km) | Height of Disappearance (km) | Strength of $\lambda 5577$ | Strength of H and K |
|--------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------|
| 1977 A 104 .....   | 107.8                     | 92.3                         | 5                          | 1                   |
| 1977 A 106 .....   | 98.9                      | 81.6                         | 1.5                        | 1                   |
| 1977 A 108 .....   | 95.1                      | 75.6                         | 2                          | 3                   |
| 1978 A 31a .....   | 107.4                     | 84.4                         | 4                          | 2                   |
| 1978 A 31b .....   | 105.0                     | 85.1                         | 5                          | 1                   |
| 1978 A 37a .....   | 97.3                      | 76.4                         | 3                          | 3                   |
| 1978 A 37b .....   | 91.3                      | 76.1                         | 3                          | 2                   |
| 1978 A 38 .....    | 101.0                     | 81.9                         | 4                          | 1                   |

green line and those of the H and K lines. If this inverse relation and the direct height versus green-line relation just discussed are both valid, it follows that the strength of the H and K lines should vary inversely with both beginning and terminal meteor heights. The spectra of the eight meteors in Table 1 are shown in Figure 1. Spectra 31b, 38, and 104 all lack H and K lines and appeared at heights above 100 km. Spectra 37a, 37b, and 108 all contain H and K lines and appeared below 100 km. Weak H and K lines in high-altitude meteor 31a appear only because of its high luminosity. Low-altitude meteor 106 might have had visible H and K lines had it been brighter. Despite the diluting effect of 31a and 106, meteors with H and K radiation appear and disappear about 6 km lower than those without.

The existence of meteors with the H and K lines occurring at lower altitudes than those without appears to be at variance with Millman's original finding. The reversal of the spectral-altitude relation can be attributed to the changing nature of the sample of meteoroids whose spectra have been recorded by increasingly powerful instrumentation over the years. All but one of the earliest type Y spectra of meteors of known altitude were of bright, fast shower meteors in which H and K are invariably strong. It was not until the Giacobinid shower of 1946 that any spectra of shower meteors failed to show the H and K lines. Harvey (1973) found that among the first 500 spectra obtained in the NASA Langley Research Center Faint Meteor Spectra Patrol, only 2% were of

type Y. To account for Millman's original three low-altitude type Z spectra, we note that two had low geocentric velocities and may have been produced by iron meteoroids totally lacking in calcium. The third was a weak, poorly oriented spectrum to which Millman gave low weight.

To explain the behavior of the H and K lines in general, Rajchl (1963), utilizing Baker's (1959) theory, concluded that ionized calcium emission appears when  $B$ , the ratio of meteor diameter to mean free path of the emitted molecules, is about 10, on the boundary between the transition flow and slip flow regimes. This is a condition that may not be met by most faint meteors before their extinction.

III. DISTRIBUTION OF PERSEID METEORS

In 1978, meteors on the night of August 11-12 were clearly much more numerous than on the previous and following nights. Spectra obtained with one spectrograph during the 3 nights, including sporadics, numbered 4-21-2. The  $4^h 40^m$  of exposure time on the middle night was divided into eight 35 minute periods. The top quarter of Table 2 compares the number of Perseid spectra per 35 minute unit predicted by a Poisson distribution with the number observed. The fit suggests a random distribution.

In 1974, however, the situation was significantly different. No spectra were obtained on the night of August 10-11, but 5 and 6 were recorded on the following nights, respectively. After the elimination of four sporadic

TABLE 2  
POISSON PROBABILITIES OF METEOROID CONCENTRATION

|   |                         | 0      | 1     | 2     | 3         | 4   | 5   |
|---|-------------------------|--------|-------|-------|-----------|-----|-----|
| 1978 All Perseids .....                                   | Spectra/35 min interval | 0      | 1     | 2     | 3         | 4   | 5   |
|   | Observed                | 1      | 2     | 3     | 0         | 1   | 1   |
|   | Predicted               | 1.0    | 2.1   | 2.2   | 1.5       | 0.8 | 0.3 |
| 1974 All Perseids .....                                   | Spectra/40 min interval | 0      | 1     | 2     | 3 or more | ... | ... |
|   | Observed                | 12     | 4     | 0     | 1         | ... | ... |
|   | Predicted               | 11.25  | 4.64  | 0.95  | 0.16      | ... | ... |
| 1974 All Perseids with green lines .....                  | Spectra/40 min interval | 0      | 1     | 2     | 3 or more | ... | ... |
|   | Observed                | 15     | 1     | 0     | 1         | ... | ... |
|   | Predicted               | 13.44  | 3.16  | 0.37  | 0.03      | ... | ... |
| 1974 All Perseids with strong green lines and $N_2$ bands | Spectra/40 min interval | 0      | 1     | 2     | 3 or more | ... | ... |
|   | Observed                | 16     | 0     | 0     | 1         | ... | ... |
|   | Predicted               | 14.249 | 2.514 | 0.223 | 0.014     | ... | ... |

MSS-063

meteors, the counts were 3 and 4. If the 11<sup>h</sup>20<sup>m</sup> of observing time the last 2 nights is divided into seventeen 40 minute periods, the observed and predicted numbers of spectra per period appear in the second quarter of Table 2. The probability of obtaining three or more Perseid spectra in any of seventeen 40 minute exposures is 0.16. In one 40 minute period it is 1:106.

However, only four of the seven Perseid spectra contain green lines, and three of the four occurred in one of the 40 minute intervals. The third quarter of Table 2 applies to these four spectra. The probability of obtaining three or more spectra with green lines in one 40 minute interval is thus 1:566.

Finally, it is notable that the three spectra obtained within one 40 minute interval (actually within 14-35 minutes) were, as shown in Figure 2, remarkably similar in appearance. The fourth spectrum with a green line, photographed the previous night, left the field just as the remainder of the radiation was appearing. It could not, therefore, be compared in other details with meteors 75, 77, and 78, which share in common the  $\Delta v = 3$  and 4 diagonal sequences of the first positive group of the neutral nitrogen molecule, strong green lines, but weak atomic radiation, the last limited in general to the magnesium triplet at  $\lambda 5176$  and some D-line radiation superposed on the  $\Delta v = 4$  sequence. If only these three similar spectra are considered, one obtains the figures in the last quarter of Table 2. The probability of these three spectra occurring in one 40 minute interval is 1:1214.

It may not be immediately obvious that meteors 75, 77, and 78 are really different from some of the meteors in Figure 1. The most pronounced difference is in the ratios of the length of the green line to the length of the nitrogen bands immediately to the red of it. For the low-altitude meteors 106, 108, 37a, and 37b, the average value of this ratio is 42%. For the high-altitude meteors 104, 31a, 31b, and 38 it is 76%. For meteors 75, 77, and 78 it is 123%. Spectral differences of this sort could, of course, result

from unusual atmospheric conditions. It would seem extraordinary, however, for an unusual cluster of similar meteoroids to appear conveniently when these unusual conditions prevailed.

The suggestion that the Earth encountered a concentration of meteoroids of a particular structure for 35 minutes implies that the diameter of the concentration was nearly an order of magnitude larger than that of the Earth. Obviously similar meteors should have been recorded by other observers working at the same time. Ian Halliday of the National Research Council of Canada, Gayle Harvey of the Langley Research Center, and Richard McCrosky of the Smithsonian Astrophysical Observatory graciously replied that for one reason or another none had obtained any spectral data at or close to that time. As it would have been daylight in Europe, no queries were directed to European observers.

I regret that for these three meteors there are no heights available which might enhance the similarity of their nature, although the ratios of line lengths previously mentioned suggest even greater heights of appearance for these meteors. It is tempting to conclude that we are viewing here three samples from a particular, limited region of the parent comet.

IV. CONCLUSIONS

Within the time and instrumental constraints of this study:

- 1) Perseid meteors with strong green lines appear and disappear about 9 km higher than those with weak or no green lines.
- 2) Perseid meteors with strong green lines tend to have weak or no H and K lines of ionized calcium.
- 3) Perseid meteors with H and K lines of ionized calcium appear and disappear about 6 km lower than those without H and K lines.
- 4) Nonrandom concentrations of Perseid meteoroids with similar spectral features may occasionally occur.

REFERENCES

Baker, R. M. L. 1959, *Ap. J.*, 129, 826.  
 Ceplecha, Z. 1968, *Smithsonian Ap. Obs. Spec. Rept.*, No. 279.  
 Cook, A. F. 1973, *Smithsonian Contr. to Ap.*, No. 14.  
 Halliday, I. 1958, *Ap. J.*, 128, 441.  
 Harvey, G. 1973, *NASA Pub. Sp-319*, 131.  
 Maltzev, V. A. 1930, *M.N.R.A.S.*, 90, 568.  
 Millman, P. M. 1935, *Harvard Ann.*, 82, 149.  
 Millman, P. M., Cook, A. F., and Hemenway, C. L. 1971, *Canadian Journ. of Phys.*, 49, 1365.  
 Rajchl, J. 1963, *Smithsonian Contr. Ap.*, 7, 155.  
 Russell, J. A. 1963, *Smithsonian Contr. Ap.*, 7, 171.  
 ———. 1973, *Ap. J.*, 184, 1017.  
 ———. 1980, in *IAU Symposium 90, Solid Particles in the Solar System*, ed. I. Halliday and B. McIntosh (Dordrecht: Reidel), in press.

JOHN A. RUSSELL: Dept. of Astronomy, University of Southern California Los Angeles, CA 90007

MSS-063

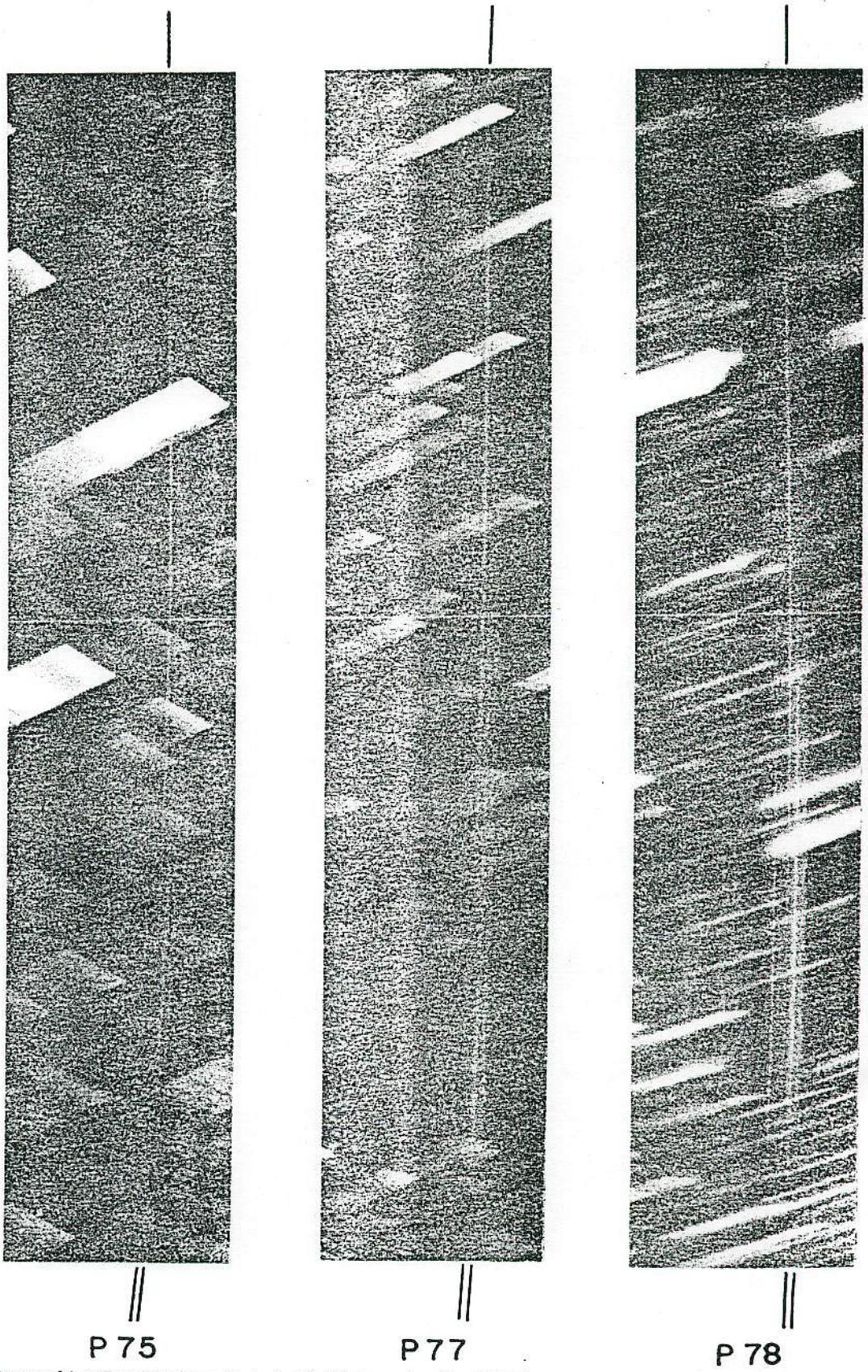


FIG. 2.—Spectra of three Perseid meteors obtained within 35 minutes the night of 1974 August 12–13. Lines above the prints indicate the position of the forbidden oxygen line at  $\lambda 5577$ . Double lines show the location of the  $\Delta v = 3$  and 4 diagonal sequences of the first positive group of the neutral nitrogen molecule. All motion is downward.

MSS. 063

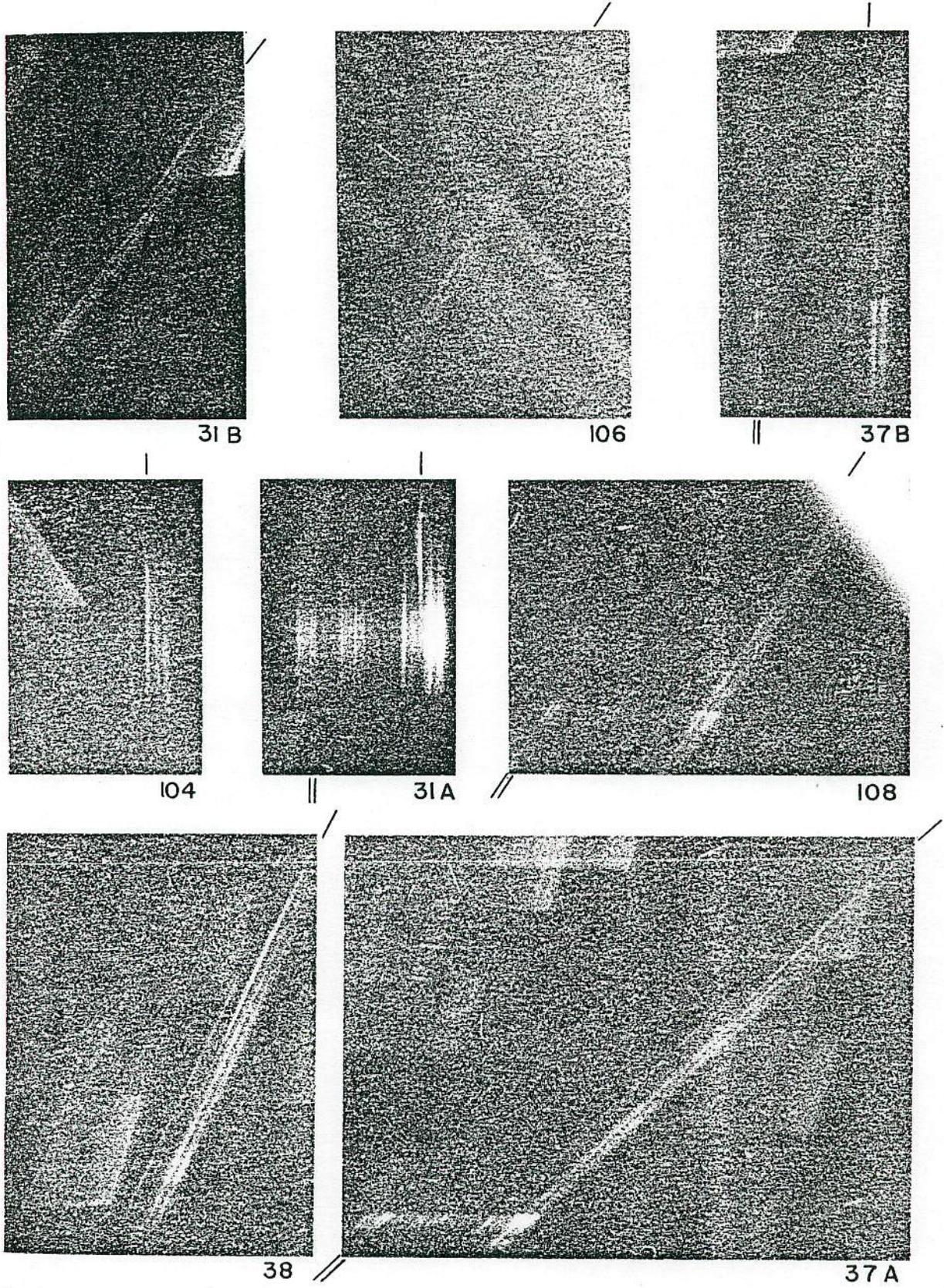


FIG. 1.—Spectra of the eight Perseid meteors listed in Table 1. Single lines around the margins of the prints indicate the position of the forbidden oxygen line at  $\lambda 25577$ . Double lines are similarly employed for the H and K lines of ionized calcium. All motion is downward.

# しし群火球の紫外分光観測

阿部新助、矢野創 (宇宙研)、海老塚昇 (理研)、春日敏測 (名大)  
 杉本 雅俊 (日流研)、藤野宣知 (東理大)、渡部潤一 (国立天文台)  
 小笠原隆亮、布施哲治 (国立天文台・ハワイ)

## 1 概要

しし座流星群は、テンペル・タットル彗星を母天体とする彗星ダストがもたらす現象である。彗星本体の主成分は  $H_2O$  であり H や OH は彗星コマ中で最も多く存在する分子である。また、ハレー彗星探査からは、彗星ダストの 25% が CHON といった軽元素を多量に含むことが明らかにされており、流星には難揮発性の有機物炭素 (CN, CH,  $C_2$ ,  $C_2H$ ) や  $H_2$ , OH が豊富に含まれていると考えられる。これまで我々が行った近紫外域の流星スペクトル中からは有意な CN 分子発光 (388nm) は検出されていない。一方、OH ラジカルは 310nm 付近に強いバンドヘッドを持つこと、300-350nm には未知輝線が多数存在することなどから、今回我々は、紫外線領域を重点的に観測するための紫外線レンズ (f=30mm, F/1.2, 250-1,000nm) を開発し、反射型対物分光器とイメージ・インテンシファイア (I.I.) 付のハイビジョン (UV-II-HDTV) ないしは高感度ビデオカメラ (UV-II-CCTV) を組み合わせたシステムで、可視-紫外域 (300-700nm) の分光観測を行った。観測は 2001 年 11 月 18-19 日に国立天文台野辺山観測所で、16-19 日に国立天文台ハワイ観測所マウナケア山頂 (すばる望遠鏡サイト; 標高 4139m) でそれぞれ遂行され、マウナケアでは国立天文台ハワイ観測所のサポートのもと、オゾン吸収と主にエアロゾル散乱により地上観測が困難であった 300-350nm 領域を、標高を稼いだ観測により成功させることができた。

本日は、ハワイ島上空に現れた -6 等級のしし座流星群火球本体とこれに伴う永続痕の分光観測 (UV-II-CCTV) の暫定解析結果について報告する。

## 2 まとめ

### < 観測データ >

Date; 04:21:14(LST), 15:21:14(UT) Nov. 19, 2001.

Place; Mt. Mauna Kea, 155.48 W, +19.83 N, h=4,139 m

Instruments; UV-VIS-II-WATEC system

Radiant elevation; 57deg

画像取り込み; Matrox Corona-II + original software with MIL  
 frame rate; 29.97 frames/sec = 33.36 ms/frame

### (1) High altitude phase

流星発光 (0 次) からスペクトルが出現するまで; 0.400 秒  
 バースト発光高度と永続痕持続高度 (90km と仮定) がほぼ  
 一致していることから、少なくとも 140km 以上の高度から  
 発光を開始した高高度流星に属する。

### (2) Meteor phase

流星スペクトル；0.500秒

350 nm以下では急激にスペクトルが弱くなる

発光直後-1；330nm 輝線

発光直後-2；370-400nm 輝線、CN分子は難しい (HDTVの方で要調査)

その後；360,320,310nm 輝線 あり

### (3) Burst pahse

流星発光開始後 0.900 秒後にバースト

0.133秒間のバーストで飽和状態となる

飽和ギリギリのスペクトルプロファイルから熱温度が求まらないか？

### (4) Afterglow phase

酸素禁制線強度が半値に落ちるまでの時間；約1.00秒

557.7nm 輝線最強。

Mg@518nm, Na@589nm, Mg&Fe@450nm 付近, Fe&Mg@400nm 付近

310-320nm と 330nm に弱輝線 あり

### (5) Persistent train phase

永続痕 約12秒 (0次は約35秒まで)

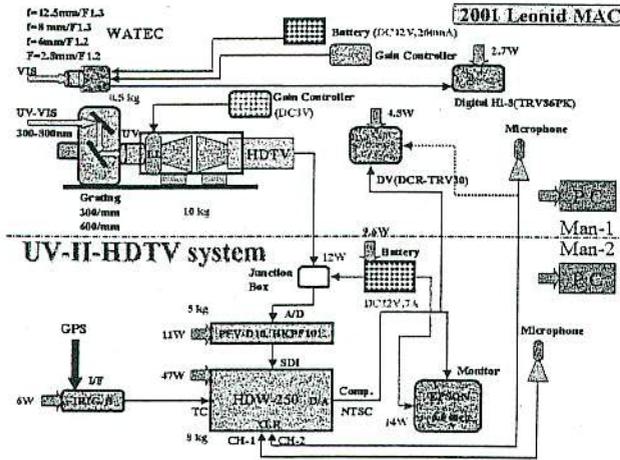
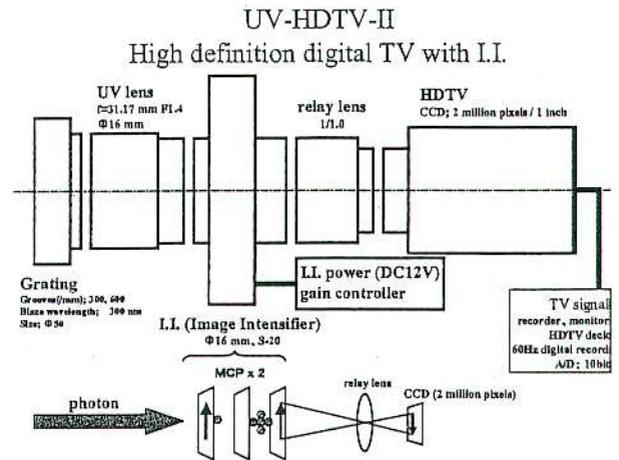
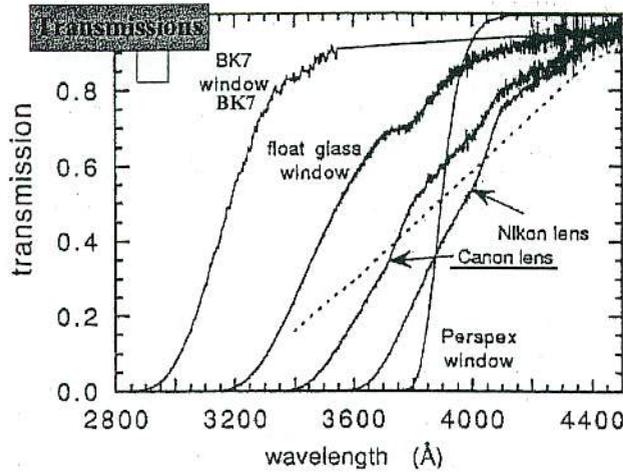
ナトリウムと鉄 (特に近紫外域) が強い。

紫外領域 (320,340nm) に輝線があるようだ。

紫外の鉄輝線の可能性。

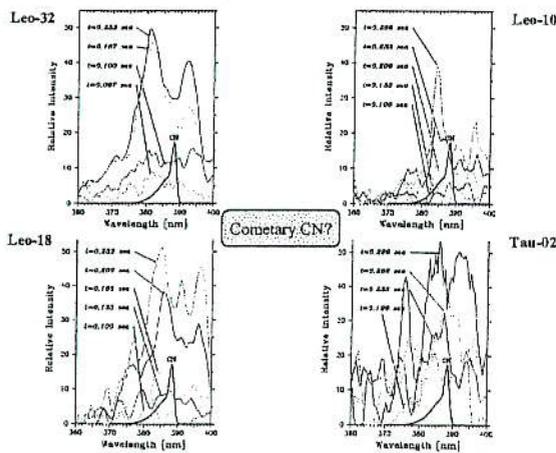
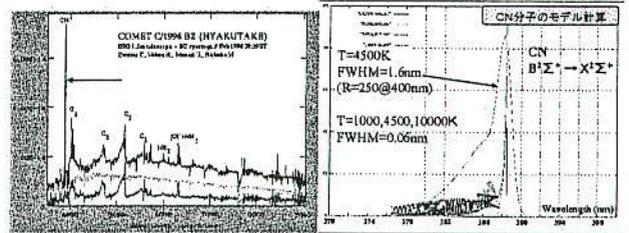
(4) (5) から少なくとも、Peter Jenniskens et al. (2000) らが言うような永続痕中の酸素禁制線は、本当の永続痕の永続性物質ではなく、after glow スペクトルであることが明らかになりそうである。海老塚さんらが観測に成功した野辺山での永続痕の解析と合わせれば、発光メカニズム解明の大きな手がかりとなるであろう。

以上、発光現象で総計約千フレームの取り込みを行い、流星消滅約12秒後までの流星および永続痕スペクトルの暫定解析を行った。12秒後以降は、永続痕の1次像が画面から出ていってしまった。その後慌てて、電源ケーブルも切断した。この12秒というのは、1998年の永続痕スペクトルの露出開始時刻でもあり、火球から永続痕へ至る部分のスペクトルが未解明だった空白領域を埋めるものである。今後は、紫外線物質の同定 (OHと仮定したアバundance見積り) と、各種物理パラメータを導出し、永続痕に関して明らかにしていきたい。



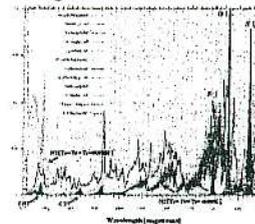
生命の起源、宇宙から降り注ぐ有機物を流星嵐から探す  
Search for CN Emission in meteors during meteor storm!

- CN emission @ 388.0 nm
- Most easily observed volatile species in comets!

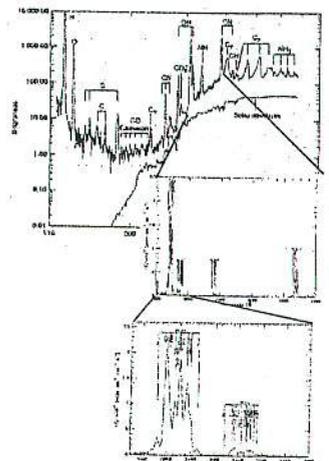


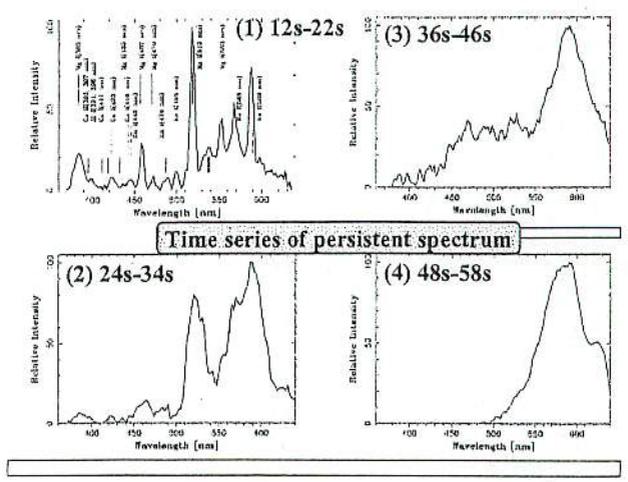
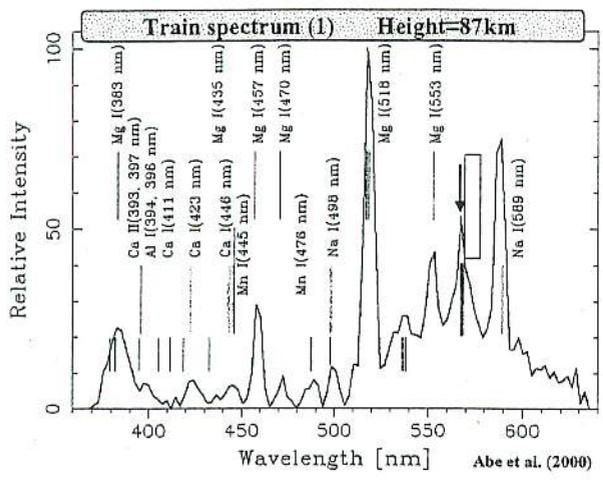
紫外域で彗星起源物質を探す!

- O @ 297.2 nm
- OH @ 308.5 nm
- S<sub>2</sub> @ 282.9 - 305.5 nm
- CS @ 257.6 nm
- CO<sub>2</sub><sup>+</sup> @ 289.0 nm
- CN<sup>+</sup> @ 318.5 nm

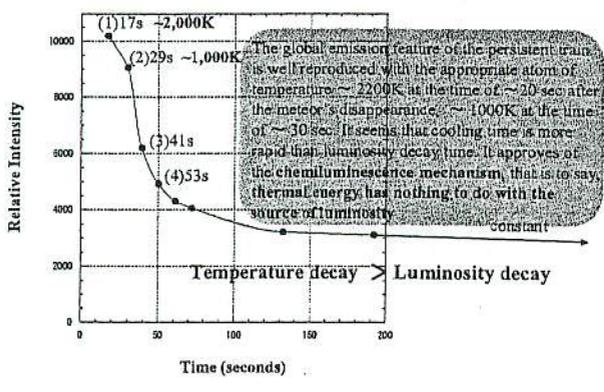


Herzberg band @ 300 - 350 nm  
U-lines @ 332, 345, 355 nm

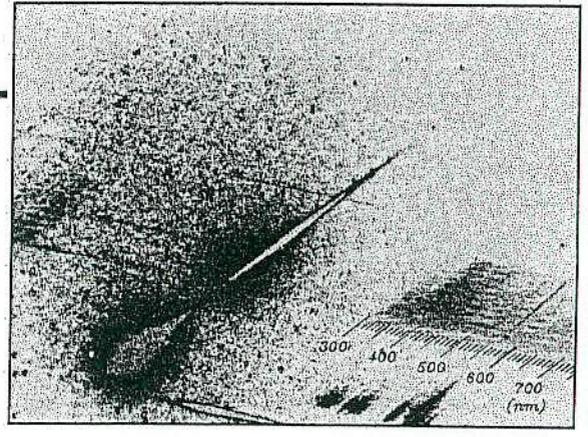
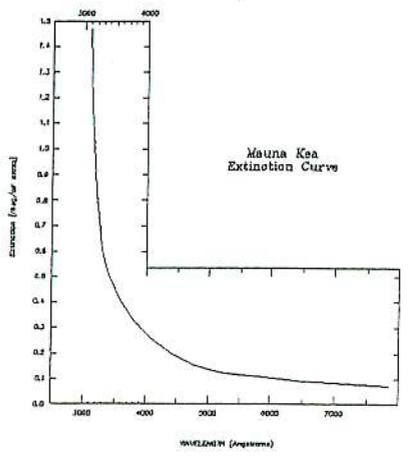
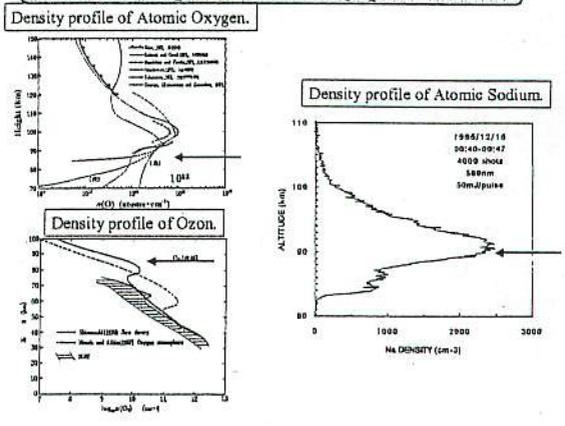


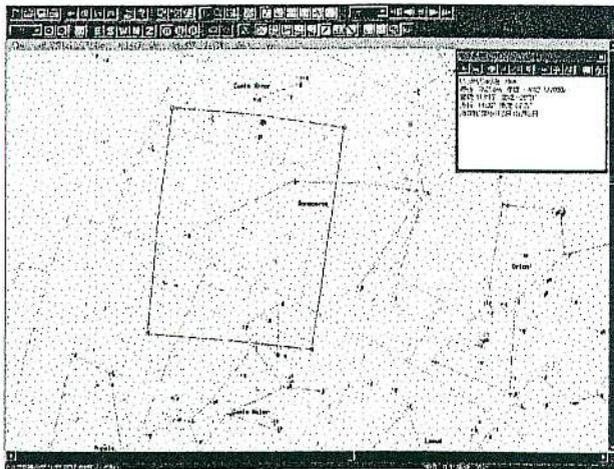


Luminosity decay curve of persistent train

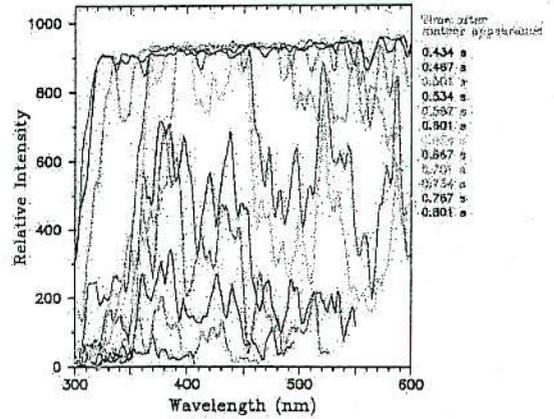


Atmospheric density profile

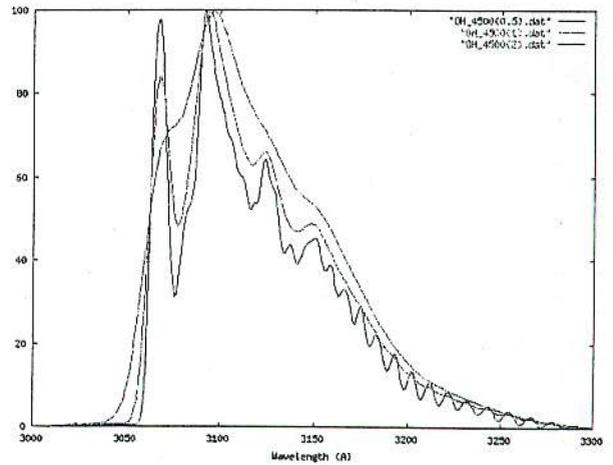
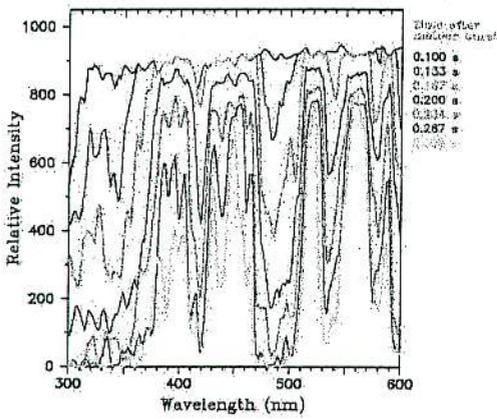




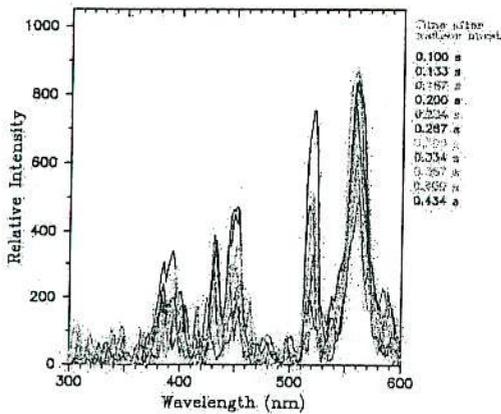
Leonid Fireball UV Spectra



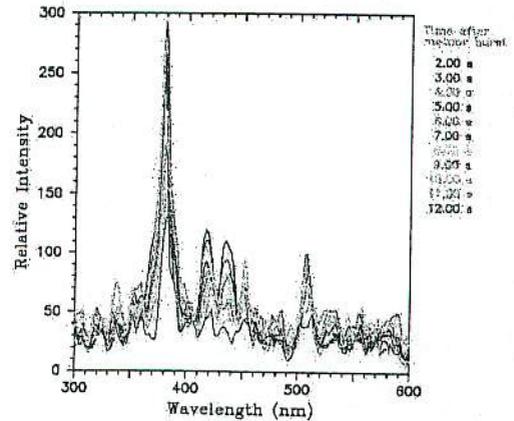
Leonid Afterglow UV Spectra



Leonid Afterglow UV Spectra



Leonid Persistent Train UV Spectra

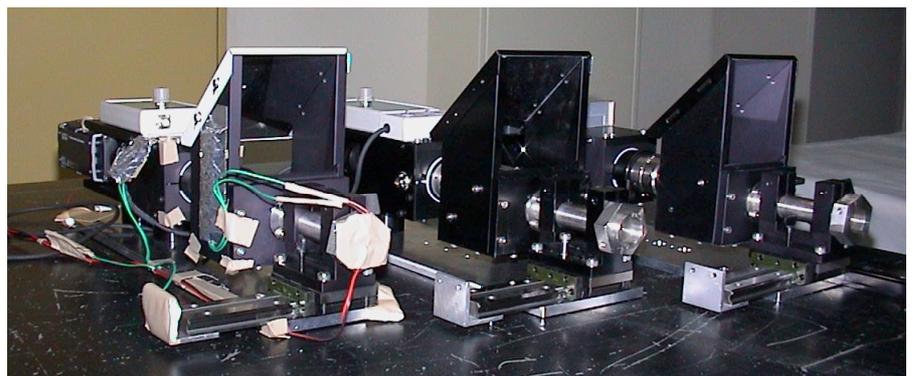


# 流星および流星痕の分光観測

海老塚 昇(甲南大/理研)・羽根坂 円彩・唯野 歩・  
新山 陽子・小舘 香椎子(日本女子大)・川手 俊憲・  
下寄 ゆり・大西 浩次(長野高専)・矢野 創(JAXA)・  
阿部 新助(神戸大)・杉本 雅俊(日流研)・春日敏測・  
渡部 潤一(国立天文台)・前田 幸治(宮崎大/日流研)・  
大塚 勝仁(東京流星ネットワーク)・  
流星分光ネットワーク



各種対物分光器  
(左上)、紫外線高  
感度ハイビジョンシ  
ステム(右上)およ  
び紫外線分光シス  
テム(右下)



# 2001, 2002年の流星群観測



2001年しし座流星群：野辺山、ハワイ、オーストラリア



2002年しし座流星群：野辺山, カナリア諸島, 大西洋上空 (NASA航空機)

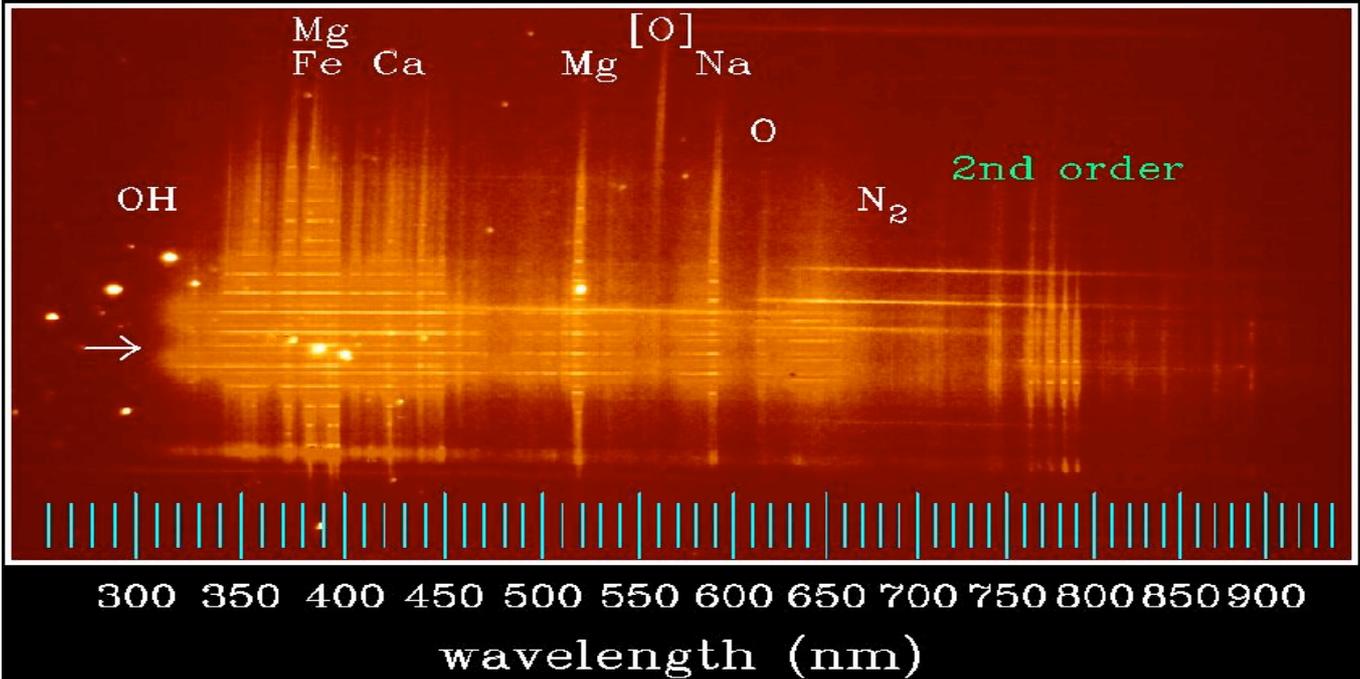
## しし座流星群の紫外線-可視光スペクトル

TCR 03:59:24:13

2001年11月18日午前3時59分

野辺山電波観測所

## HDTV Spectrum of 2001 Leonid Meteor



ハイビジョンカメラによる流星の紫外線-可視光スペクトル  
波長310nm近傍のOHスペクトルを確認。

## ペルセウス座流星群の可視光スペクトル



2004年 8月14日01時23分

長野県富士見市

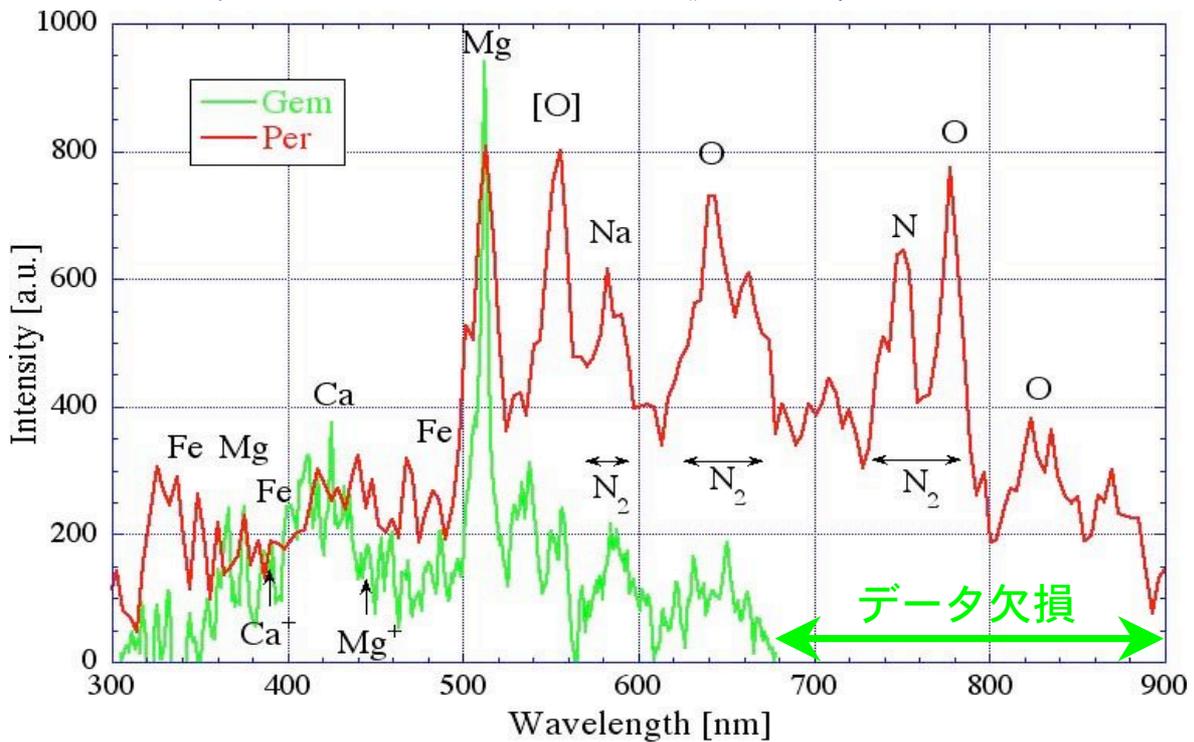
# ふたご座流星群の可視光スペクトル



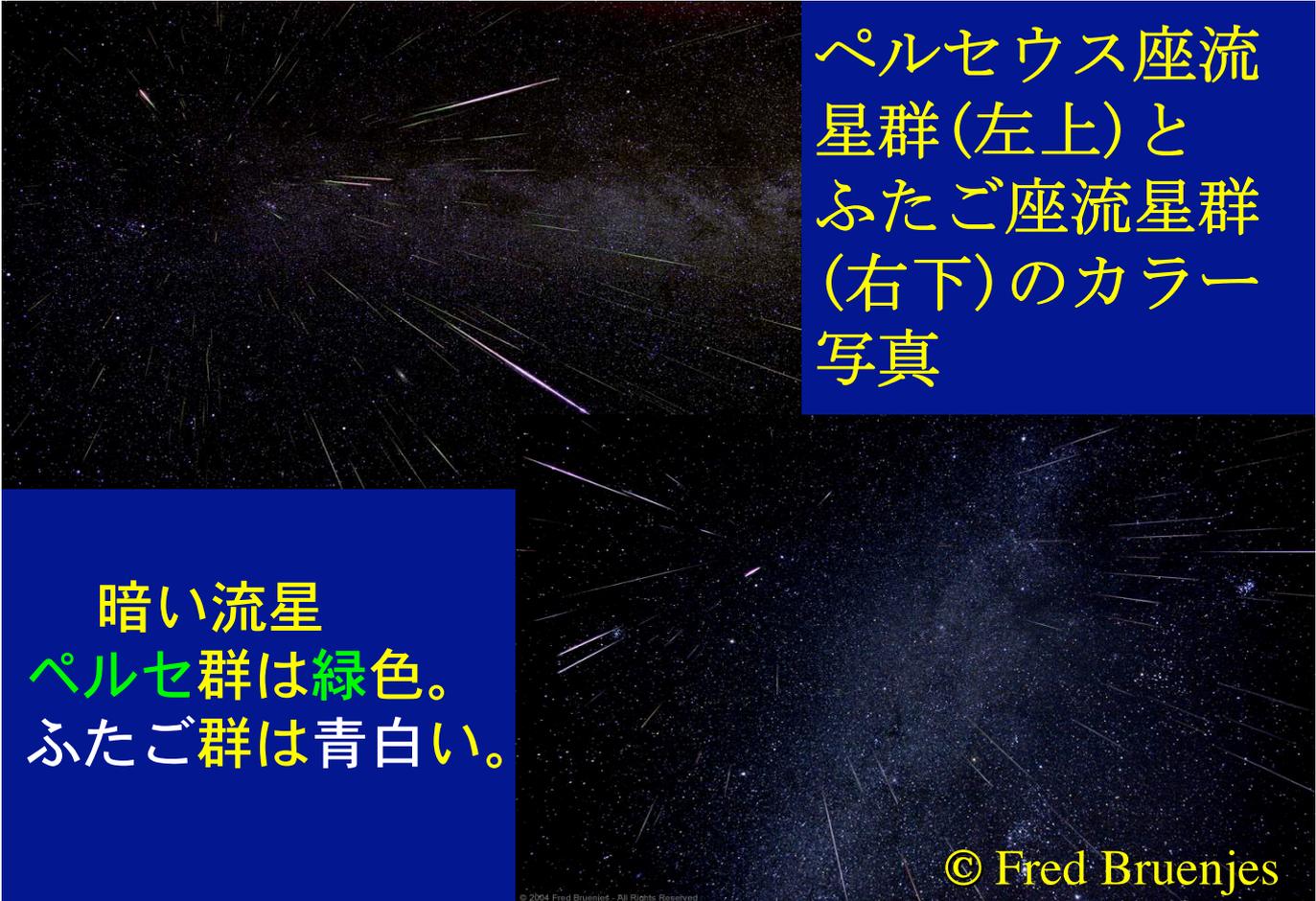
2004年 12月 14日 11時39分

野辺山電波観測所

## ペルセウス座とふたご座流星群のスペクトル



ペルセ群 (60Km/s) は酸素輝線や窒素分子バンドが強い。  
ふたご群 (35Km/s) は紫外線から青側の金属輝線が強い。



ペルセウス座流星群(左上)と  
ふたご座流星群(右下)のカラー  
写真

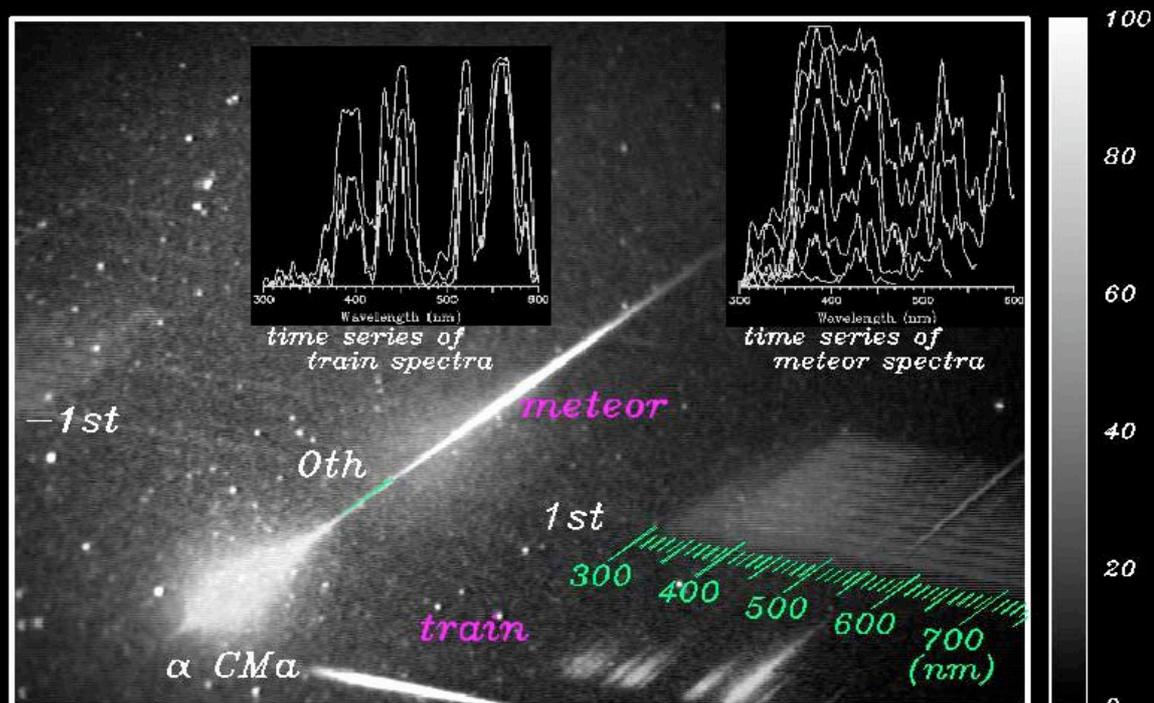
暗い流星  
ペルセ群は緑色。  
ふたご群は青白い。

© Fred Bruenjes

流星から痕に推移するしし座流星群のスペクトル

2001年11月 ハワイすばる望遠鏡サイト

## UV Spectra of Leonid Meteor & Train



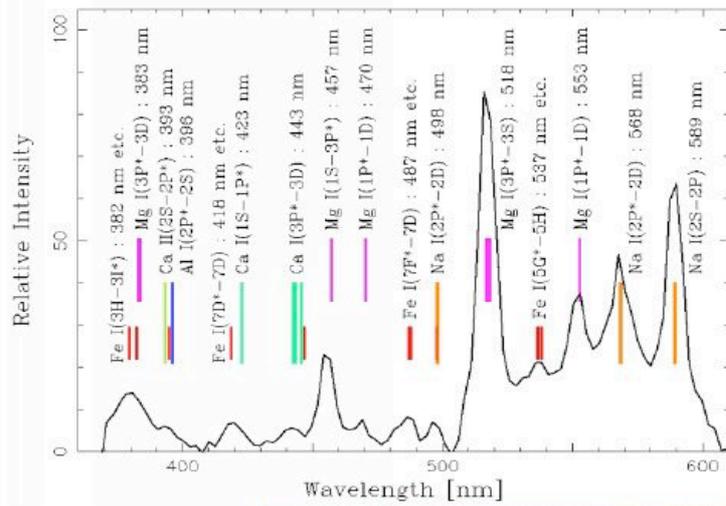
S.Abe, N.Ebizuka, H.Yano, T.Kasuga, M.Sugimoto, N.Fujino, J.Watanabe (2001)

流星本体およびアフターグローのスペクトル。  
波長300nm付近までの紫外線輝線を確認。

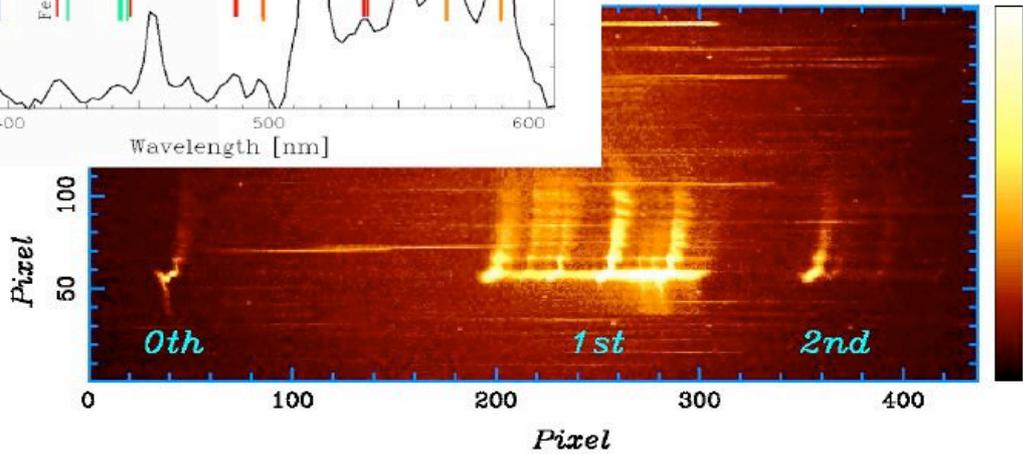
## 伊豆上空に出現した1998年しし座流星群の大火球



NHKハイビジョンスペシャル 1999年1月3日放送  
「宇宙からのメッセンジャー・しし座流星群」

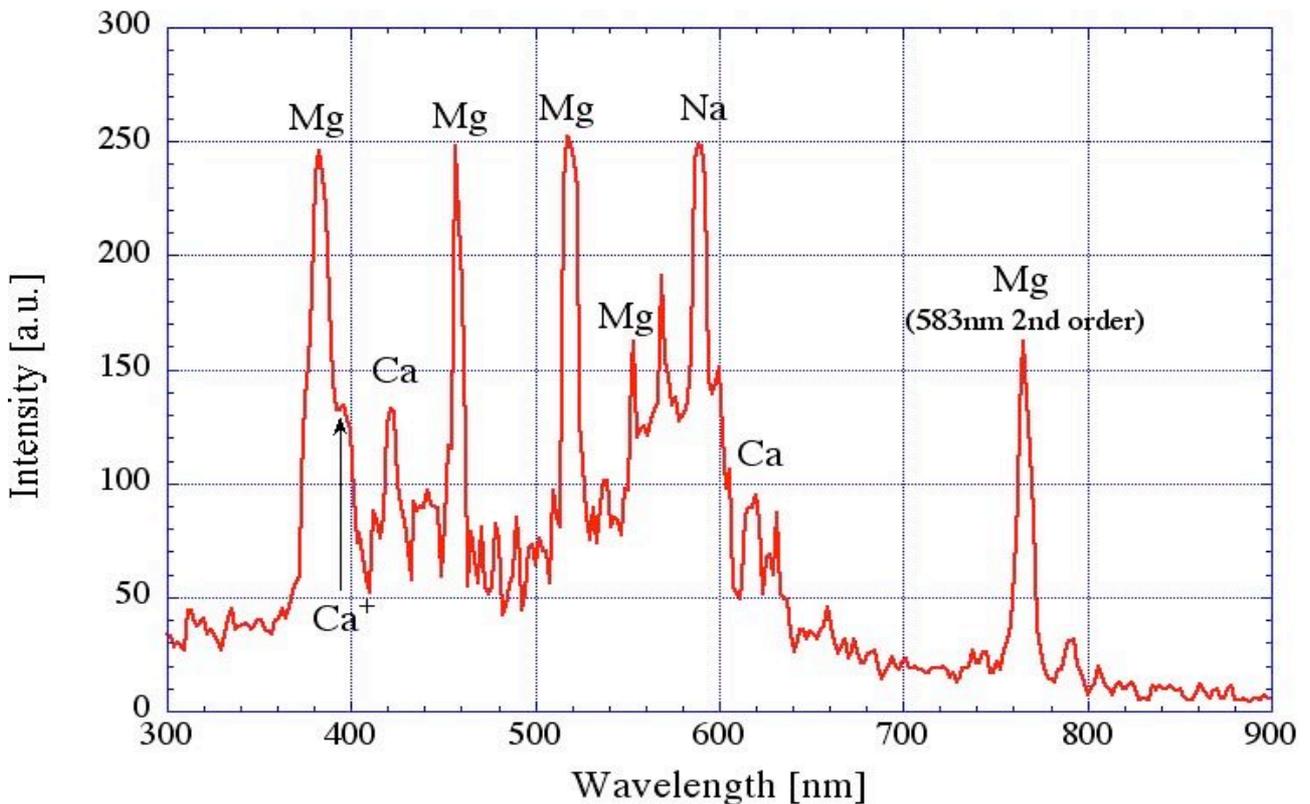


## Spectrum of Persistent Train (Leonids 1998)



伊豆上空に出現した大火球に伴う流星痕のスペクトル  
(撮影：村山氏@日本火球ネットワーク、長野県臼田町)

## しし座流星群の流星痕スペクトル



# アフターグロー、永続痕の発光

「アフターグロー」の発光高度120-86km

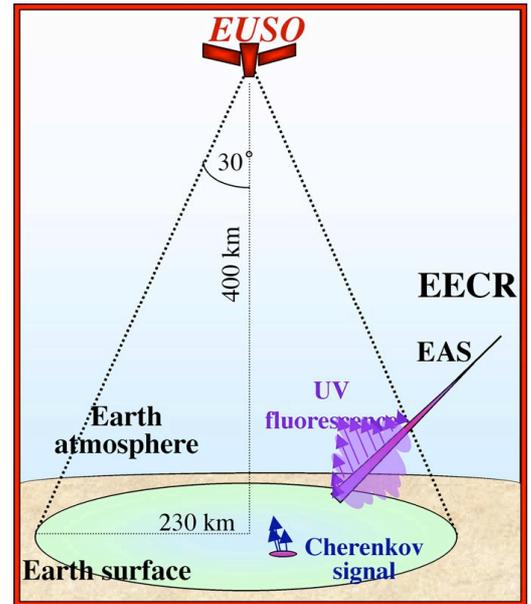
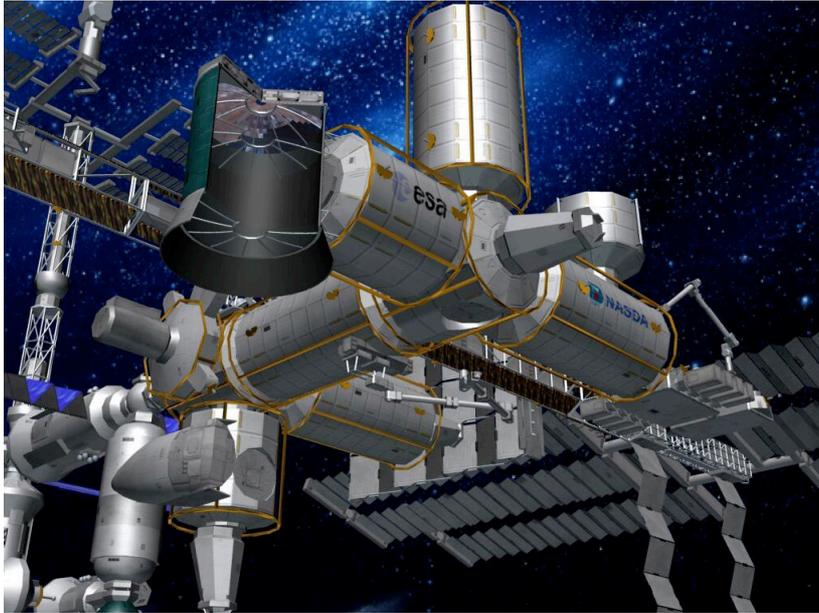
「永続痕」の発光高度95-86km

- 1.5秒後の「アフターグロー」  
高度110km以上が短痕と同じ[O I] (緑色)  
高度105km近傍、Fe I, Fe II (368-546nm), Ca I (423nm) やCa II (394, 397nm) 等が強い。(青色)  
高度95km近傍、Na I (589nm)やN<sub>2</sub> (610-670nm)?の発光が強い。  
(赤色)
- 10-20秒の「アフターグロー」はMg I (517nm)が最も強く、Mg I (457nm), Fe I (537nm), Mg I (553nm), FeO? (568nm), Na I (589nm)などが見られる。(黄色)
- 30秒以降の「永続痕」は、Na I (589nm)とFeO? (568nm)の輝線が支配的。(橙色)

## まとめ

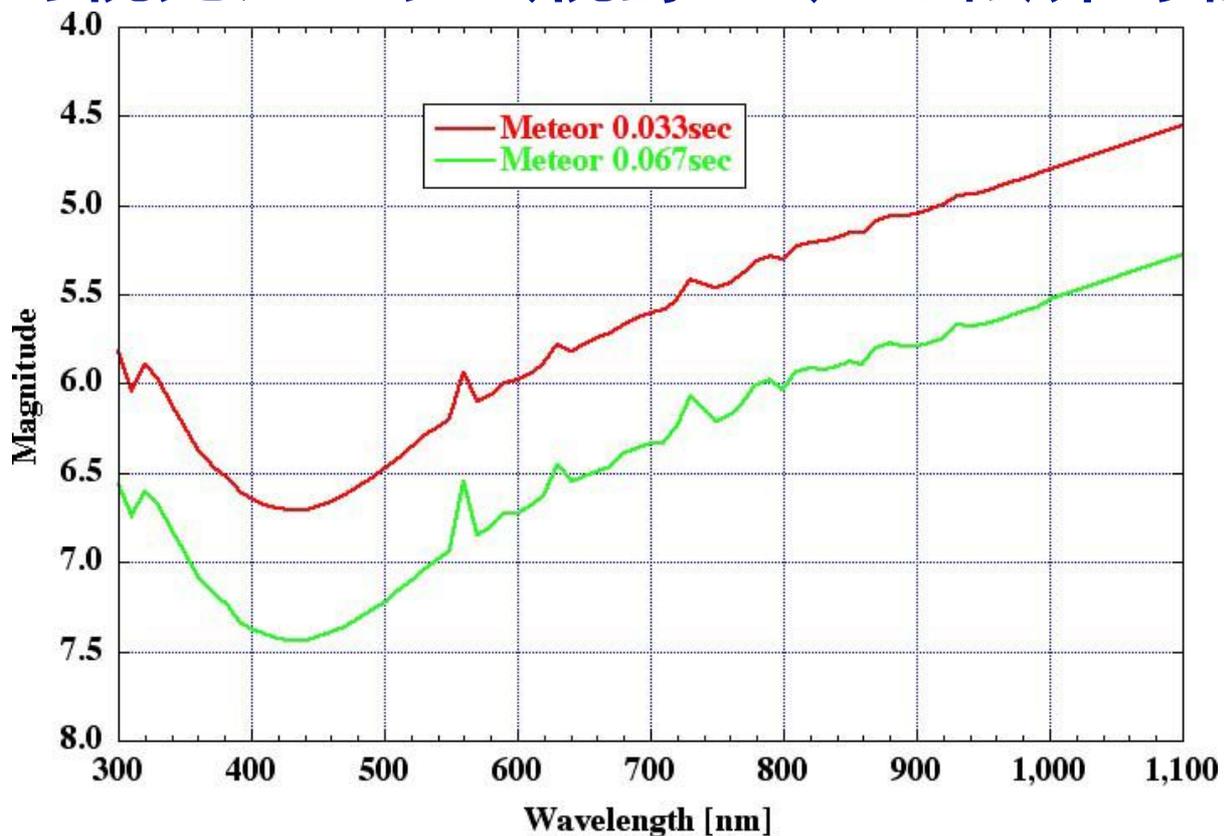
- 高速の流星（ペルセ群：60Km/s）は高々度から発光開始。  
酸素輝線や窒素分子バンドが優位。
- 中速、低速の流星（ふたご群：30Km/s）は比較的低高度（110Km以下）で発光。  
紫外線から青側の金属輝線が優位。  
短痕を伴う流星が少ない。
- アフターグローは発光高度86～120Km、金属および金属酸化物（FeO）?の発光。
- 永続痕は発光高度86～95Km、ナトリウムおよび金属酸化物（FeO）?の発光。

# EUSO (Extreme Universe Space Observatory)

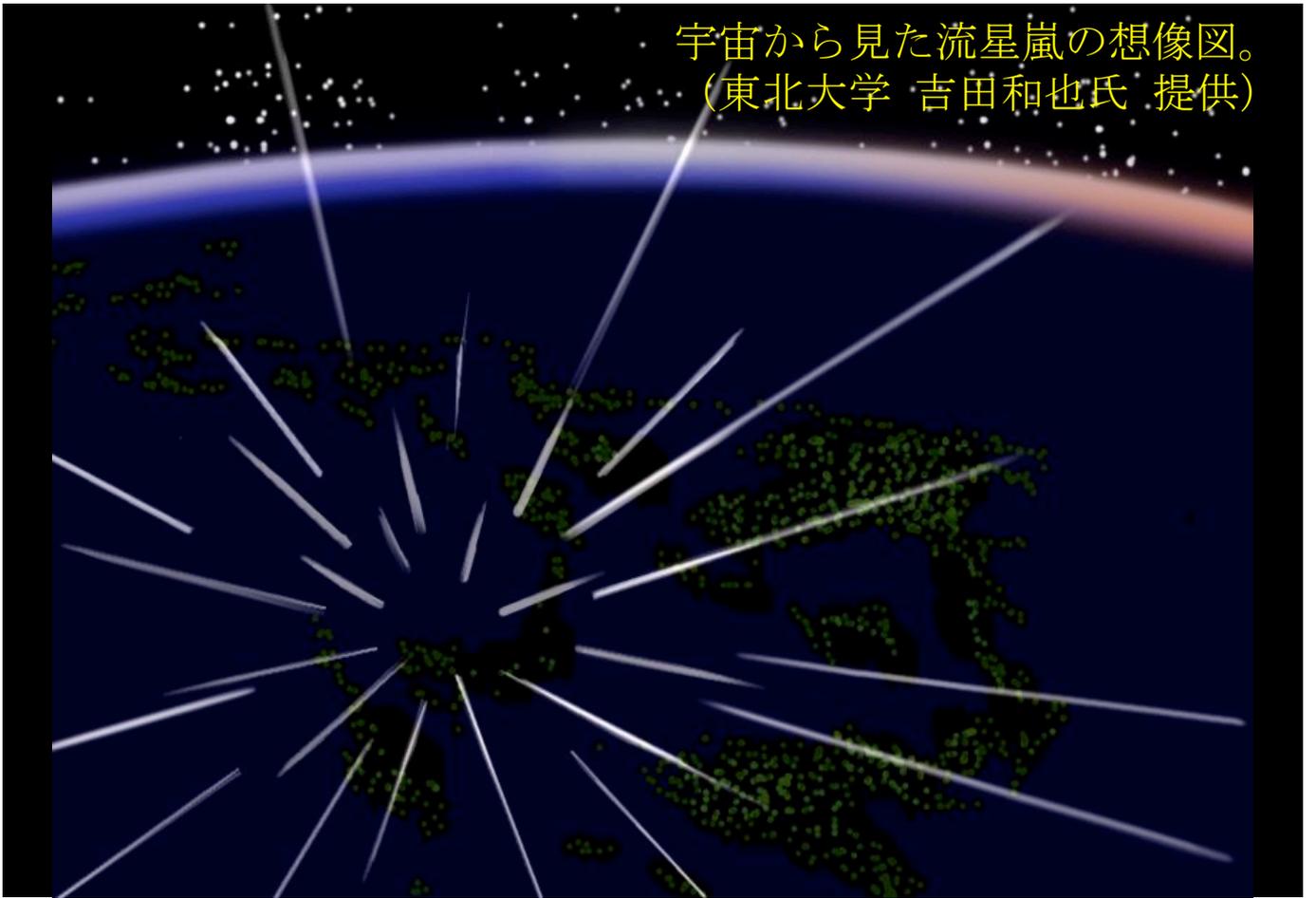


国際宇宙ステーションに装着されるEUSO（理研・高幣氏提供）。波長300～400nmで $>10^{20}$ eVの宇宙線による大気発光現象を検出。

## 可視光カメラ（視野60°）の限界等級



宇宙から見た流星嵐の想像図。  
(東北大学 吉田和也氏 提供)



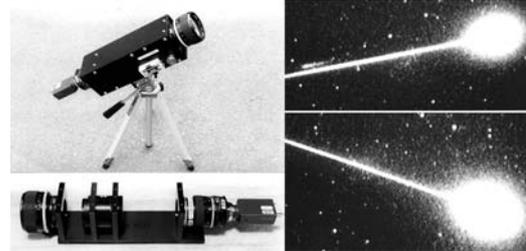
## 流星のTV等級と眼視等級の比較 (第1報)

重野好彦 戸田雅之

### 1. はじめに

2001年のしし群のTV観測で図1の火球が得られた(Shigeno et al., 2003)。絶対等級: -7.3と求められたが、残念ながら眼視では見ていない。当日は大出現日だったため、多くの観測者が観測を行っていた。しかしこのように明るい流星は目撃されていない。本当に-7等の流星だったのだろうか。

Figure 1 The figure on the left shows the TV observation equipment. The device with the Image Intensifier (Delft High Tech XX1470 etc.). The figure on the right shows an example of a double station TV meteor. ID: MSSJCJ on Nov 18 2001 at 19:25:37 (UT). Bright -7.3 absolute magnitude.



流星の等級は流星物質の質量を表すための重要な指標であり、従来、眼視等級や写真等級を指標としてきた(Opic, 1958)。ところで流星は赤外線を多く含むため(Borovicka et al., 1999)、赤外線に感度のある新しい観測機材(IIやCCD)で撮影すると、より明るく写ると言われている。従来の等級と新しい等級の差異を正確に求めることにより、従来の観測と新しい観測の正しい比較が可能となる。しかし文献を調査した範囲では、今まで検討が行われていないようだ。そこでTVと眼視で比較観測を行ったので報告する。

### 2. TV等級と眼視等級の比較

重野と戸田は2004年4月に1回、8月に2回、TV(II)と眼視で流星等級を求める観測を行った。21流星が得られ、どの流星もTV等級の方が0.2等~2.6等明るく、平均で1.2等明るかった。IIが赤外線にも感度を持つため、赤外線の多い流星が明るく写るためであろう。

TV等級と眼視等級の差(Mtv-Mv)が他の要因で変化するか調べた。図2に眼視等級(Mv)、角速度(Va)、観測速度(V0)との関係を示すが特に傾向ははっきりしない。

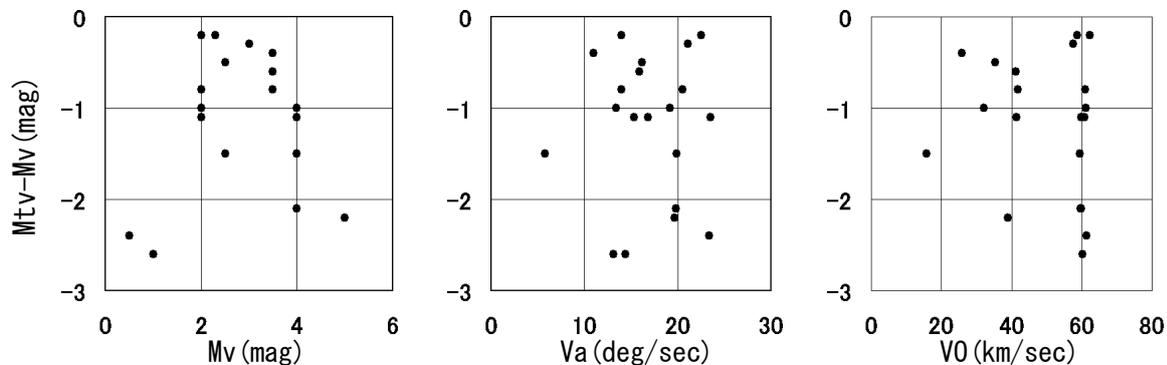


Figure 2 Comparison between deviation(TV magnitude - Visual magnitude) (Mtv-Mv) and Visual magnitude(Mv), Angular velocity(Va), Observed velocity(V0).

### 3. IIに眼視分光感度フィルターを付けた観測

上記の観測方法では正しい眼視等級が分らない。そこで、1) IIに暗視時の眼視の分光感度を持つフィルターを付けた場合、2) フィルターを付けない場合、3) 眼視の3種類の方法で流星等級を求める観測を行った。流星の等級は、恒星画像の輝度、サイズと等級との関係から求め、さらに角速度補正を行った。2007年8月11~13日に観測された明治大学天文部31人の91流星を表1に示す。

#### 3.1. [フィルター無しII等級(Mi)] と [フィルター有りII等級(Mif)] の比較

差異が大きいマイナス等級の流星を除き、86流星について集計した結果、平均(Mi-Mif) : -0.4等、標準偏差: ±0.5等であった。つまりフィルター有りよりも無しの方が0.4等明るく写ることが分った。

#### 3.2. [眼視等級(Mv)] と [フィルター有りII等級(Mif)] の比較

差異が大きいマイナス等級の流星を除いて集計した結果を表2に示す。マイナスは明るく、プラスは暗く見積っていることになる。約1等明るく見積る人と、暗く見積る人がいることが

分った。そして全観測者の集計結果から、平均 Mv と平均 Mif は差がないと言う結果が得られた。ただし標準偏差 (SD) は ±0.8 等と大きい。

表 2. [観測者毎の眼視等級 (Mv)] - [フィルター有り I I 等級 (Mif)] の平均と標準偏差 (SD)

| 観測者 | 個数 | 平均   | SD  | 観測者 | 個数 | 平均   | SD  | 観測者 | 個数 | 平均   | SD  | 観測者 | 個数  | 平均   | SD  |
|-----|----|------|-----|-----|----|------|-----|-----|----|------|-----|-----|-----|------|-----|
| 奥山  | 5  | -0.3 | 0.7 | 細木  | 4  | -0.3 | 1.4 | 松崎  | 6  | -0.3 | 0.6 | 飯野  | 9   | -0.3 | 0.9 |
| 加藤俊 | 3  | 0.3  | 0.7 | 坂口  | 2  | -0.6 | 1.1 | 松田  | 3  | -0.1 | 0.9 | 方波見 | 3   | -0.9 | 0.4 |
| 加藤嵩 | 8  | -0.2 | 0.7 | 山下  | 5  | -0.2 | 0.7 | 新舎  | 2  | -0.3 | 0.4 | 北川  | 2   | 0.6  | 1.5 |
| 金谷  | 16 | -0.2 | 0.7 | 山田  | 1  | -1.1 | 0.0 | 斉藤由 | 5  | -0.7 | 0.6 | 北村  | 4   | -0.3 | 1.0 |
| 戸田  | 18 | 0.6  | 1.1 | 若狭  | 18 | 0.0  | 0.6 | 斉藤翔 | 1  | -1.1 | 0.0 | 木下  | 19  | -0.2 | 0.9 |
| 荒井  | 28 | 0.1  | 0.7 | 重野  | 30 | 1.0  | 0.6 | 大島  | 12 | -0.2 | 0.5 | 由利谷 | 37  | -0.2 | 0.6 |
| 黒崎  | 6  | 0.4  | 0.3 | 小川宏 | 1  | 0.6  | 0.0 | 土井  | 6  | 0.0  | 0.5 | 廣田  | 4   | 0.4  | 0.7 |
| 佐藤  | 14 | -0.4 | 0.8 | 小川由 | 32 | -0.2 | 0.8 | 能登  | 3  | -0.6 | 1.7 | 全観測 | 307 | 0.0  | 0.8 |

3.3. 重野、戸田が4等とした場合に、他の観測者、及びフィルター有り I I との差異が見られる。

3.4. 明るい流星 (No. 40, No. 78) は、眼視とフィルター有り I I との差異が大きい。

1) TV 観測の等級は瞬間的な一番明るいところを測定している。一方、2) 眼視は平均的な等級を取る。よって光度変化の大きい流星の場合、TV は眼視よりも明るく見積ってしまう。

3.5. 上記2つの流星は眼視とフィルター無し I I の差異が非常に大きい。

マイナス等級の明るい流星は赤外線を多く含む場合があり、眼視に比べて I I は非常に明るく写ることが分った。図3に示すとおり、眼視では0~-1等だが、I I では-7~-9等に写っている。

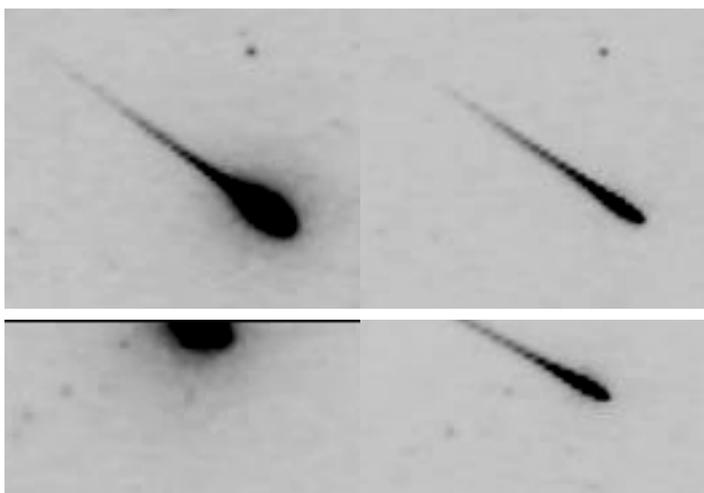
図3.

左上 フィルター無し：-7.3等  
 右上 フィルター有り：-2.9等  
 眼視等級：-0.5等  
 No. 40 2007. 8. 12 17:07:50 (UT) Per.

左下 フィルター無し：-9.7等  
 右下 フィルター有り：-2.2等  
 眼視等級：0.0等  
 No. 78 2007. 8. 13 17:24:00 (UT) Per.  
 (視野の端のため半分欠けている)

フィルター：SCHOTT BG18 2mm  
 (暗視時の眼視の分光感度相当)

I I の分光感度は350~900nm。暗視時の眼視の分光感度は400nm~600nm。



4. まとめ 注：マイナス等級は暫定値です。

本研究により、はじめに述べた疑問を解明できたと考えている。おそらく-7等の流星は出現しておらず、眼視等級0~-2等ぐらいの流星だったのであろう。ペルセウス群の赤外スペクトル観測で、630~670nm及び730~780nmの窒素分子バンド、加えて777nmの酸素原子輝線を初めとする多くの原子輝線が得られている (N. Ebizuka, pers. comm.)。TV 観測ではこれらの赤外光が明るく写る。よって高速流星の場合にはTV等級の方が眼視等級より明るくなり、特に眼視でマイナス等級の高速流星の場合には大きく異なる可能性があるため、注意が必要だ。

0等より暗い流星の場合、眼視よりもI I は平均0.4等明るく写ることが分った。ただし眼視等級は個人差が非常に大きく、全観測者の標準偏差は±0.8等もばらつきがあることが分った。

流星の等級と質量の関係に関しては寺田充氏に、赤外スペクトルに関しては海老塚昇氏に貴重な意見をいただきました。感謝いたします。

#### References

Opic E. J., PHYSICS OF METEOR FLIGHT IN THE ATMOSPHERE, INTERSCIENCE PUBLISHERS, INC, 1958, p.148.  
 Shigeno Y., Shioi H., Shigeno T., Radiants and orbits of the 2001 Leonids, The Institute of Space and Astronautical Science Report SP No. 15, 2003, pp.55-62.  
 Borovicka J., Stork R., Bocek J., First results from video spectroscopy of 1998 Leonid meteors, Meteoritics & Planetary Science, 34, 1999, pp.987-994.

表1. I. I. と眼視の等級比較 2007年8月 新潟妙高高原【マイス等級は暫定値です】  
 フィルター: SCHOTT BG18 2mm (暗視時眼視分光感度) フィルター無: No4-02デルト暗 フィルター有: No5-06デルト

| No | 時刻(JST)  | 群   | フィルター |      | 個人目測 (等級) (明治大学天文部夏合宿) |     |     |     |     |   |   |    |      |
|----|----------|-----|-------|------|------------------------|-----|-----|-----|-----|---|---|----|------|
|    |          |     | 無し    | 有り   | 1                      | 2   | 3   | 4   | 5   | 6 | 7 | 8  |      |
|    | 08.11/12 |     | 等級    | 等級   | 奥山                     | 松崎  | 由利谷 | 廣田  | 小川宏 |   |   |    |      |
| 1  | 23 13 49 | sp  | 1.2   | 1.4  | 1                      | 2   | 1   |     | 2   |   |   |    |      |
| 2  | 23 30 38 | sp  | 3.0   | 3.3  | 3                      |     | 3   |     |     |   |   |    |      |
|    | 08.12/13 |     |       |      | 由利谷                    | 金谷  | 松田  | 齊藤翔 | 山田  |   |   |    |      |
| 3  | 22 16 16 | sp  | 1.4   | 2.5  |                        | 2   | 3   |     |     |   |   |    |      |
| 4  | 22 17 03 | sp  | 2.8   | 2.8  | 2                      |     | 3   |     |     |   |   |    |      |
| 5  | 22 42 22 | sp  | 1.4   | 2.1  | 1                      | 1   | 1   | 1   | 1   |   |   |    |      |
|    | 08.12/13 |     |       |      | 小川由                    | 木下  | 土井  | 奥山  | 新舎  |   |   |    |      |
| 6  | 23 09 15 | Per | 1.0   | 2.0  | 1                      | 1   | 2   | 1   | 2   |   |   |    |      |
| 7  | 23 43 33 | Per | 2.4   | 2.2  | 3                      |     |     | 3   |     |   |   |    |      |
| 8  | 23 45 05 | Per | 0.7   | 0.6  | 0                      | 0   | 0   | 0   | 0   |   |   |    |      |
|    | 08.12/13 |     |       |      | 荒井                     | 金谷  | 佐藤  | 加藤嵩 | 大島  |   |   | 重野 | 戸田   |
| 9  | 00 04 00 | Per | 1.7   | 1.8  |                        | 1   | 1   |     | 2   |   |   |    |      |
| 10 | 00 14 15 | Per | 1.1   | 1.6  | 1                      |     |     | 1   | 1   |   |   |    |      |
| 11 | 00 24 53 | Per | 2.4   | 2.1  | 2                      | 2   |     |     |     |   |   | 4  |      |
| 12 | 00 27 20 | sp  | 1.4   | 1.8  |                        |     |     | 2   | 1   |   |   |    |      |
| 13 | 00 27 53 | sp  | 2.8   | 2.7  |                        |     | 1   |     |     |   |   | 4  |      |
| 14 | 00 29 08 | sp  | 2.6   | 2.7  | 3                      | 3   | 2   | 3   |     |   |   | 3  |      |
| 15 | 00 33 58 | sp  | 2.7   | 2.8  | 3                      | 3   |     | 2   |     |   |   |    |      |
| 16 | 00 52 32 | sp  | -2.3  | -0.2 |                        |     |     |     |     |   |   | 0  | 0    |
|    | 08.12/13 |     |       |      | 由利谷                    | 小川由 | 木下  | 若狭  | 土井  |   |   | 重野 | 戸田   |
| 17 | 01 00 36 | sp  | 1.4   | 2.5  | 3                      | 3   | 3   | 3   |     |   |   |    | 2    |
| 18 | 01 01 04 | sp  | 1.4   | 2.1  | 2                      | 3   |     |     |     |   |   |    |      |
| 19 | 01 07 12 | Per | 2.8   | 3.0  | 3                      | 3   | 3   | 3   |     |   |   |    |      |
| 20 | 01 07 21 | Per | 1.6   | 2.2  | 2                      | 3   | 2   | 2   |     |   |   |    | 4    |
| 21 | 01 10 23 | Per | 1.6   | 2.2  | 1                      | 1   | 1   | 2   |     |   |   |    |      |
| 22 | 01 10 32 | Per | 1.1   | 2.2  | 1                      | 1   |     | 2   |     |   |   | 2  | 1    |
| 23 | 01 13 59 | Per | 1.9   | 2.4  | 3                      |     | 3   |     |     |   |   | 4  |      |
| 24 | 01 17 19 | sp  | 1.5   | 2.2  | 2                      | 2   | 2   | 2   |     |   |   | 3  |      |
| 25 | 01 20 43 | Per | 1.9   | 2.5  | 2                      | 3   | 3   | 2   |     |   |   | 4  |      |
| 26 | 01 21 08 | sp  | 0.7   | 1.0  | 1                      | 2   | 2   | 2   | 2   |   |   | 2  | 1    |
| 27 | 01 26 19 | sp  | 0.3   | 1.2  | 1                      | 1   | 1   | 1   | 1   |   |   | 2  | 2    |
| 28 | 01 29 29 | sp  | 1.9   | 1.9  | 2                      | 2   |     | 2   | 2   |   |   | 4  |      |
| 29 | 01 29 34 | sp  | 1.5   | 2.3  |                        |     |     | 2   |     |   |   | 4  | 4    |
| 30 | 01 33 14 | Per | 2.3   | 2.4  | 2                      | 2   | 2   | 2   |     |   |   |    |      |
| 31 | 01 33 29 | Per | 0.8   | 2.1  | 1                      | 1   | 1   | 1   | 2   |   |   | 2  | 1    |
| 32 | 01 34 14 | sp  | 2.6   | 2.9  | 2                      | 1   |     |     |     |   |   |    |      |
| 33 | 01 35 35 | sp  | 0.7   | 2.3  | 3                      | 3   | 3   | 3   |     |   |   | 3  |      |
| 34 | 01 37 58 | Per | 1.7   | 2.0  | 2                      |     | 3   | 3   |     |   |   |    |      |
| 35 | 01 38 47 | sp  | 3.0   | 3.0  | 3                      | 3   | 2   | 3   |     |   |   |    |      |
| 36 | 01 40 50 | Per | 2.3   | 2.4  | 3                      |     |     | 3   |     |   |   |    |      |
| 37 | 01 42 14 | Per | 1.5   | 1.7  | 1                      | 1   | 1   | 1   |     |   |   |    | 3.5  |
| 38 | 01 52 36 | Per | 1.8   | 2.1  |                        |     |     |     |     |   |   |    | 4    |
|    | 08.12/13 |     |       |      | 飯野                     | 小川由 | 佐藤  | 金谷  | 荒井  |   |   | 重野 | 戸田   |
| 39 | 02 01 03 | Per | 1.0   | 2.4  |                        | 2   | 2   | 2   | 2   |   |   | 4  |      |
| 40 | 02 07 50 | Per | -7.3  | -2.9 | 0                      | 0   | -1  | -1  | -1  |   |   | 0  | -0.5 |
| 41 | 02 08 53 | Per | 0.9   | 2.0  | 1                      | 1   |     |     | 1   |   |   | 2  | 2    |
| 42 | 02 22 03 | sp  | 1.5   | 2.5  | 1                      | 1   |     | 1   | 1   |   |   | 3  |      |
| 43 | 02 26 04 | sp  | 2.0   | 2.1  |                        |     | 1   |     | 2   |   |   | 4  |      |
| 44 | 02 26 09 | sp  | 1.8   | 2.6  |                        |     |     |     | 3   |   |   | 4  |      |

|    |          |     |      |      |     |     |    |     |     |     |    |    |
|----|----------|-----|------|------|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|
| 45 | 02 31 40 | Per | 0.5  | 1.7  | 3   | 1   | 2  | 2   | 3   |     | 3  |    |
| 46 | 02 42 00 | Per | 1.8  | 2.2  | 2   | 3   |    |     | 3   |     | 3  |    |
| 47 | 02 42 26 | Per | 2.6  | 2.5  | 3   | 3   | 3  |     | 3   |     | 4  |    |
| 48 | 02 42 55 | Per | 0.8  | 1.8  | 1   | 1   |    |     | 1   |     |    | 3  |
| 49 | 02 42 57 | Per | 2.9  | 2.8  |     |     |    |     | 2   |     |    |    |
| 50 | 02 44 22 | Per | 0.9  | 1.8  | 1   | 1   |    |     |     |     | 3  | 1  |
| 51 | 02 44 27 | Per | 0.8  | 1.4  | 1   | 1   | 1  |     | 1   |     |    | 3  |
| 52 | 02 48 50 | sp  | 2.9  | 2.6  | 3   | 3   | 3  | 3   | 3   |     |    |    |
|    | 08.12/13 |     |      |      | 荒井  | 由利谷 | 黒崎 | 大島  | 加藤嵩 |     | 重野 | 戸田 |
| 53 | 03 02 52 | sp  | 3.1  | 3.0  | 3   | 2   | 3  | 2   | 2   |     |    | 2  |
| 54 | 03 06 35 | sp  | 2.8  | 2.7  |     | 3   |    |     |     |     |    |    |
| 55 | 03 15 22 | Per | 2.0  | 2.2  | 3   |     | 3  | 3   |     |     |    |    |
| 56 | 03 15 29 | Per | 2.2  | 2.9  | 3   | 2   |    | 3   |     |     | 4  | 4  |
| 57 | 03 23 16 | Per | 2.0  | 2.2  | 3   |     |    |     | 3   |     | 4  |    |
| 58 | 03 23 47 | Per | 0.4  | 1.4  | 2   | 1   |    | 1   |     |     | 2  |    |
| 59 | 03 24 10 | Per | 1.7  | 1.9  | 3   | 2   | 2  | 2   |     |     | 3  |    |
| 60 | 03 26 57 | Per | 2.9  | 2.7  |     | 3   |    |     |     |     |    |    |
| 61 | 03 27 16 | Per | 2.8  | 2.8  |     | 3   |    |     |     |     |    |    |
| 62 | 03 29 49 | sp  | 1.4  | 2.2  |     | 2   |    |     |     |     | 3  |    |
| 63 | 03 31 20 | sp  | 2.7  | 2.7  | 3   | 3   | 3  | 3   | 2   |     | 3  | 4  |
| 64 | 03 31 40 | sp  | 0.9  | 1.7  | 2   | 2   | 2  | 2   | 2   |     | 3  |    |
| 65 | 03 43 08 | Per | 1.9  | 1.7  | 1   | 1   |    | 1   |     |     |    | 2  |
| 66 | 03 44 49 | Per | 2.4  | 2.3  |     | 3   | 3  |     |     |     |    |    |
| 67 | 03 45 32 | sp  | -2.0 | -1.0 | 0   | 0   | 0  | 0   | 0   |     | 0  | 0  |
| 68 | 03 52 51 | Per | 0.4  | 0.6  |     |     |    |     |     |     | 1  | 2  |
|    | 08.13/14 |     |      |      | 茨木  | 由利谷 | 大島 | 佐藤  | 金谷  |     |    |    |
| 69 | 22 43 54 | sp  | 2.4  | 2.6  |     | 3   |    |     |     |     |    |    |
|    | 08.13/14 |     |      |      | 方波見 | 木下  | 佐藤 | 坂口  | 齊藤由 |     |    |    |
| 70 | 23 14 38 | Per | 1.3  | 1.8  |     | 2   | 2  | 2   | 2   |     |    |    |
| 71 | 23 25 44 | sp  | 2.4  | 2.4  | 1   | 0   | 1  | 1   | 1   |     |    |    |
| 72 | 23 27 25 | Per | 0.5  | -0.2 | -1  | -1  | -1 | -1  | 0   |     |    |    |
|    | 08.13/14 |     |      |      | 金谷  | 加藤俊 | 北川 | 小川由 | 荒井  |     |    |    |
| 73 | 01 28 24 | Per | 1.3  | 1.5  |     | 1   | 1  |     | 1   |     |    |    |
| 74 | 01 37 11 | sp  | 0.9  | 1.4  | 2   | 2   | 3  | 1   | 1   |     |    |    |
| 75 | 01 47 52 | Per | 2.1  | 2.2  | 3   | 3   |    | 3   | 3   |     |    |    |
|    | 08.13/14 |     |      |      | 松崎  | 能登  | 北村 | 廣田  | 大島  | 方波見 |    |    |
| 76 | 02 03 49 | Per | 1.8  | 2.0  |     | 3   | 3  | 3   |     |     |    |    |
| 77 | 02 16 48 | sp  | 2.8  | 3.3  |     |     | 2  |     |     |     |    |    |
| 78 | 02 24 00 | Per | -9.7 | -2.2 | 0   | 0   | 0  | 0   | 0   |     |    |    |
| 79 | 02 25 21 | sp  | 2.5  | 2.5  | 2   |     | 2  | 3   |     |     |    |    |
| 80 | 02 27 26 | sp  | 2.7  | 2.7  |     |     |    |     |     |     | 2  |    |
| 81 | 02 30 33 | Per | 2.3  | 2.6  | 2   |     |    |     |     |     |    |    |
| 82 | 02 41 45 | sp  | 2.9  | 3.0  | 3   |     |    |     |     |     |    |    |
| 83 | 02 41 49 | sp  | 2.2  | 2.2  | 2   |     | 2  | 3   | 2   |     |    |    |
| 84 | 02 46 40 | Per | 2.7  | 2.6  |     |     |    |     |     |     | 2  |    |
| 85 | 02 49 38 | Per | 1.4  | 2.5  |     | 2   |    | 2   |     |     |    |    |
| 86 | 02 50 02 | Per | 1.3  | 2.3  | 1   | 0   |    |     |     |     |    |    |
|    | 08.13/14 |     |      |      | 齊藤由 | 金谷  | 細木 | 佐藤  | 山下  |     |    |    |
| 87 | 03 07 55 | Per | 1.2  | 2.7  | 2   |     | 1  |     | 2   |     |    |    |
| 88 | 03 08 29 | Per | 1.1  | 2.1  |     | 1   | 1  | 1   | 1   |     |    |    |
| 89 | 03 18 22 | sp  | 0.9  | 2.1  | 1   | 1   |    |     | 2   |     |    |    |
| 90 | 03 21 13 | sp  | 2.3  | 2.7  | 2   | 3   | 3  | 3   | 3   |     |    |    |
| 91 | 03 30 43 | sp  | 2.0  | 2.5  |     | 3   | 4  | 3   | 3   |     |    |    |

## 流星のTV等級と眼視等級の比較 (第2報)

重野好彦 戸田雅之

### 1. はじめに

流星の等級は流星物質の質量を表すための重要な指標であり、従来、眼視等級や写真等級を指標としてきた(Opic, 1958)。ところで流星は赤外線を多く含むため(Borovicka et al., 1999)、赤外線に感度のある新しい観測機材(IIやCCD)で撮影すると、より明るく写ると言われている。従来の等級と新しい等級の差異を正確に求めることにより、従来の観測と新しい観測の正しい比較が可能となる。しかし今まで十分な検討が行われていないようだ。そこでTVと眼視で比較観測を行ったので報告する。

### 2. TV等級と眼視等級の比較

重野と戸田は2004年4月に1回、8月に2回、TV(II)と眼視で流星等級を求める観測を行った。21流星が得られ、どの流星もTV等級の方が0.2等~2.6等明るく、平均で1.2等明るかった。IIが赤外線にも感度を持つため、赤外線の多い流星が明るく写るためであろう。

TV等級と眼視等級の差(Mtv-Mv)が他の要因で変化するか調べた。図1に眼視等級(Mv)、角速度(Va)、観測速度(V0)との関係を示すが特に傾向ははっきりしない。(Shigeno & Toda, 2005)

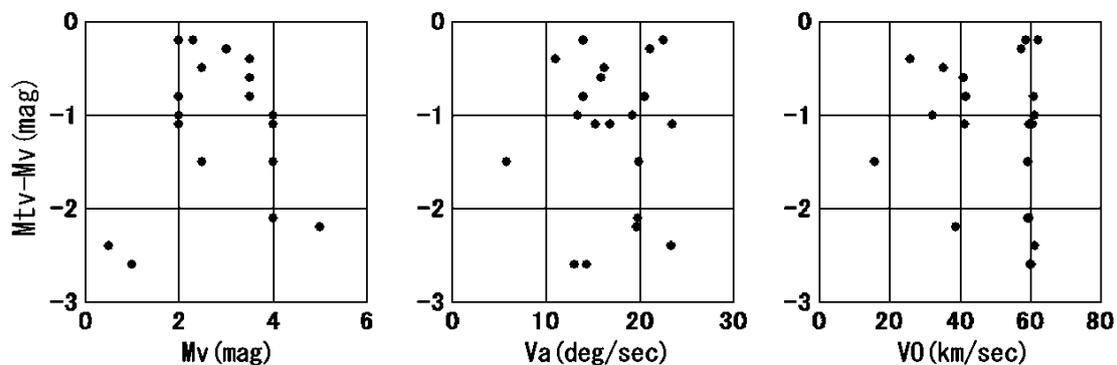


Figure 1 Comparison between deviation(TV magnitude - Visual magnitude) (Mtv-Mv) and Visual magnitude(Mv), Angular velocity(Va), Observed velocity(V0).

### 3. IIに眼視分光感度フィルターを付けた観測

上記の観測方法では正しい眼視等級が分らない。そこで、1) IIに暗視時の眼視の分光感度を持つフィルターを付けた場合(MtvF)、2) フィルターを付けない場合(Mtv)、3) 眼視(Mv)の3種類の方法で流星等級を求める観測を行った。TV流星の等級は、恒星画像の輝度・サイズと等級との関係から求め、さらに角速度補正を行った。明治大学天文部の31名が観測した2007年8月11~13日のペルセウス群50流星、12月14日のふたご群19流星、散在44流星の結果を表1~3に示す。また表4にIIと眼視の等級比較に関する個人別集計結果を示す。

#### 3.1. MtvとMtvFの比較

表4の「TV比較」に示すとおり、ペルセウス群:-0.5等、ふたご群:-1.0等、散在:-0.5等であった。つまりフィルター有りよりも無しの方が0.5~1.0等明るく写ることが分った。SDはデータのばらつきを表したものであり、±0.6~0.7等となっている。

#### 3.2. MvとMtvFの比較

各個人ごとに集計した結果を表4に示す。マイナスは明るく、プラスは暗く見積っていることになる。約1等明るく見積る人と、暗く見積る人がいることが分った。そして全観測者の集計結果(表4の全眼視)から、平均Mvと平均MtvFの差は0.0~0.2等であり、ほとんど差がないと言う結果が得られた。つまり本報告のMtvFはおおよそMvを表していることになる。ただし観測者ごとのばらつきは±0.8~0.9等と大きい。

#### 3.3. マイナス等級の明るい流星は、眼視に比べてTV等級が明るく写る。代表的なマイナス等級の流星を図2に示す。眼視等級は約-1等だが、1)MtvFは約1等明るく、2)Mtvはさらに約2等明るい。

1)の理由としては、TV観測の等級は瞬間的な一番明るいところを測定している。一方、眼視は平均的な等級を取る。よって明るい流星の場合、瞬間的な増光が発生しやすいため、TVは眼視よりも明るく見積ってしまうものと思われる。

2)の理由としては、マイナス等級の明るい流星は赤外線を多く含む場合があり、より明るく写るためであろう。

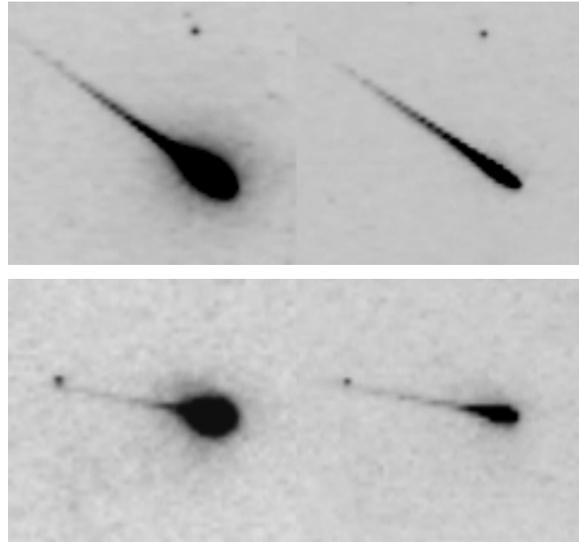
図 2.

左上 フィルター無し (Mtv) : -4.0 等  
右上 フィルター有り (MtvF) : -1.7 等  
眼視等級 (Mv) : -0.5 等  
No. P40 2007. 8. 12 17:07:50 (UT) Per.

左下 フィルター無し (Mtv) : -4.8 等  
右下 フィルター有り (MtvF) : -2.2 等  
眼視等級 (Mv) : -1.4 等  
No. G05 2007. 12. 14 13:42:39 (UT) Gem.

フィルター : SCHOTT BG18 2mm  
(暗視時の眼視の分光感度相当)

II の分光感度は 350~900nm。暗視時の眼視の分光感度は 400nm~600nm。



#### 4. まとめ

ペルセウス群の赤外スペクトル観測で、630~670nm及び730~780nmの窒素分子バンド、加えて777nmの酸素原子輝線を初めとする多くの原子輝線が得られている (Ebizuka N., pers. comm.)。TV観測ではこれらの赤外光により0.5~1.0等明るく写り、特にマイナス等級の流星の場合にはさらに光度差が大きくなることが分かった。一方、IIに暗視時の眼視の分光感度を持つフィルターを付けた場合、ほぼ眼視と同じ等級が得られることが分かった。

流星の等級と質量の関係に関しては寺田充氏に、赤外スペクトルに関しては海老塚昇氏に貴重な意見をいただきました。

#### 5. 補足 (等級と画像サイズの関係)

流星の等級を正確に求めるため、恒星の等級と画像サイズの関係調べた。よく使用する対物レンズ85mm/F1.2、24mm/F1.4の観測結果を図3に示す。0等より暗い恒星の等級と画像サイズの関係はほぼ直線で近似できる。しかし0等より明るくなると急激にサイズが大きくなることが分かった。これはIIの特性であろう。そこで0等より暗いところでは直線近似、0等より明るいところでは2次関数で近似させ、図3上で直線及び曲線で示した。

図4は2001年のしし群のTV観測による火球である (Shigeno et al., 2003)。本方法で等級を求め直したところ Mtv : -7.6 となった。この流星は残念ながら眼視では見ていない。当日は大出現日だったため、多くの観測者が観測を行っていた。しかしこのように明るい流星は目撃されていない。図2で示したとおり、Mv と Mtv は約3.5等の差があることから、実際の眼視等級 (Mv) は-4等程度だったと思われる。

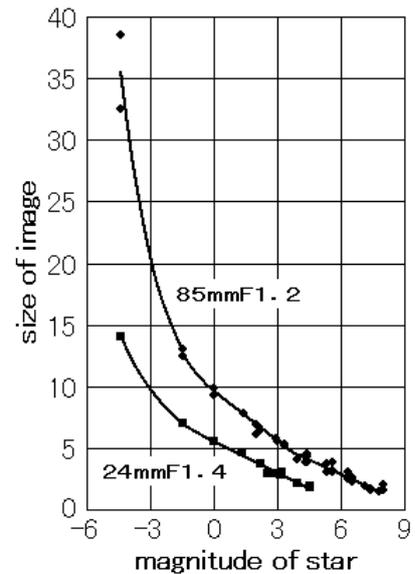
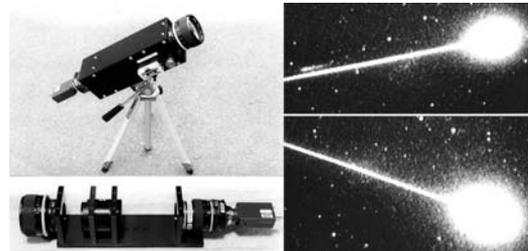


Figure 3 Comparison between magnitude of star and size of image.

Figure 4 The figure on the left shows the TV observation equipment. The device with the Image Intensifier (Delft High Tech XX1470 etc.). The figure on the right shows an example of a double station TV meteor. ID: MSSJBZ on Nov 18 2001 at 18:19:34 (UT). TV magnitude (Mtv) = -7.6.



#### References

Opic E. J., PHYSICS OF METEOR FLIGHT IN THE ATMOSPHERE, INTERSCIENCE PUBLISHERS, INC, 1958, p.148.  
Borovicka J., Stork R., Bocek J., First results from video spectroscopy of 1998 Leonid meteors, Meteoritics & Planetary Science, 34, 1999, pp.987-994.  
Shigeno Y., Toda M., Double-station TV meteor observations (2004.08.11/12, 12/13), Nippon Meteor Society, Apr, 2005.  
Shigeno Y., Shioi H., Shigeno T., Radiants and orbits of the 2001 Leonids, The Institute of Space and Astronautical Science Report SP No. 15, 2003, pp.55-62.

2007. 12. 15  
02:06:00/  
02:06:38

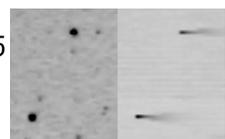


表 1. I. I. と眼視の等級比較(ペルセウス群) 2007年 8月 妙高高原(明治大学天文部)

フィルター: SCHOTT BG18 2mm (暗視時眼視分光感度) (フィルター無: No4-02デマルチ暗 フィルター有: No5-06デマルチ)

| No  | 時刻(JST)   | 群   | I. I. 等級 |      | 眼視等級 |     |    |     |     |   |   |    |      |
|-----|-----------|-----|----------|------|------|-----|----|-----|-----|---|---|----|------|
|     |           |     | フィルター    |      | 1    | 2   | 3  | 4   | 5   | 6 | 7 | 8  |      |
|     |           |     | 無し       | 有り   |      |     |    |     |     |   |   |    |      |
|     | 08. 12/13 |     |          |      | 小川由  | 木下  | 土井 | 奥山  | 新舎  |   |   |    |      |
| P06 | 23 09 15  | Per | 1.0      | 2.0  | 1    | 1   | 2  | 1   | 2   |   |   |    |      |
| P07 | 23 43 33  | Per | 2.4      | 2.2  | 3    |     |    | 3   |     |   |   |    |      |
| P08 | 23 45 05  | Per | 0.7      | 0.6  | 0    | 0   | 0  | 0   | 0   |   |   |    |      |
|     | 08. 12/13 |     |          |      | 荒井   | 金谷  | 佐藤 | 加藤嵩 | 大島  |   |   | 重野 | 戸田   |
| P09 | 00 04 00  | Per | 1.7      | 1.8  |      | 1   | 1  |     | 2   |   |   |    |      |
| P10 | 00 14 15  | Per | 1.1      | 1.6  | 1    |     |    | 1   | 1   |   |   |    |      |
| P11 | 00 24 53  | Per | 2.4      | 2.1  | 2    | 2   |    |     |     |   |   | 4  |      |
|     | 08. 12/13 |     |          |      | 由利谷  | 小川由 | 木下 | 若狭  | 土井  |   |   | 重野 | 戸田   |
| P19 | 01 07 12  | Per | 2.8      | 3.0  | 3    | 3   | 3  | 3   |     |   |   |    |      |
| P20 | 01 07 21  | Per | 1.6      | 2.2  | 2    | 3   | 2  | 2   |     |   |   |    | 4    |
| P21 | 01 10 23  | Per | 1.6      | 2.2  | 1    | 1   | 1  | 2   |     |   |   |    |      |
| P22 | 01 10 32  | Per | 1.1      | 2.2  | 1    | 1   |    | 2   |     |   |   | 2  | 1    |
| P23 | 01 13 59  | Per | 1.9      | 2.4  | 3    |     | 3  |     |     |   |   | 4  |      |
| P25 | 01 20 43  | Per | 1.9      | 2.5  | 2    | 3   | 3  | 2   |     |   |   | 4  |      |
| P30 | 01 33 14  | Per | 2.3      | 2.4  | 2    | 2   | 2  | 2   |     |   |   |    |      |
| P31 | 01 33 29  | Per | 0.8      | 2.1  | 1    | 1   | 1  | 1   | 2   |   |   | 2  | 1    |
| P34 | 01 37 58  | Per | 1.7      | 2.0  | 2    |     | 3  | 3   |     |   |   |    |      |
| P36 | 01 40 50  | Per | 2.3      | 2.4  | 3    |     |    | 3   |     |   |   |    |      |
| P37 | 01 42 14  | Per | 1.5      | 1.7  | 1    | 1   | 1  | 1   |     |   |   |    | 3.5  |
| P38 | 01 52 36  | Per | 1.8      | 2.1  |      |     |    |     |     |   |   |    | 4    |
|     | 08. 12/13 |     |          |      | 飯野   | 小川由 | 佐藤 | 金谷  | 荒井  |   |   | 重野 | 戸田   |
| P39 | 02 01 03  | Per | 1.0      | 2.4  |      | 2   | 2  | 2   | 2   |   |   | 4  |      |
| P40 | 02 07 50  | Per | -4.0     | -1.7 | 0    | 0   | -1 | -1  | -1  |   |   | 0  | -0.5 |
| P41 | 02 08 53  | Per | 0.9      | 2.0  | 1    | 1   |    |     | 1   |   |   | 2  | 2    |
| P45 | 02 31 40  | Per | 0.5      | 1.7  | 3    | 1   | 2  | 2   | 3   |   |   | 3  |      |
| P46 | 02 42 00  | Per | 1.8      | 2.2  | 2    | 3   |    |     | 3   |   |   | 3  |      |
| P47 | 02 42 26  | Per | 2.6      | 2.5  | 3    | 3   | 3  |     | 3   |   |   | 4  |      |
| P48 | 02 42 55  | Per | 0.8      | 1.8  | 1    | 1   |    |     | 1   |   |   |    | 3    |
| P49 | 02 42 57  | Per | 2.9      | 2.8  |      |     |    |     | 2   |   |   |    |      |
| P50 | 02 44 22  | Per | 0.9      | 1.8  | 1    | 1   |    |     |     |   |   | 3  | 1    |
| P51 | 02 44 27  | Per | 0.8      | 1.4  | 1    | 1   | 1  |     | 1   |   |   |    | 3    |
|     | 08. 12/13 |     |          |      | 荒井   | 由利谷 | 黒崎 | 大島  | 加藤嵩 |   |   | 重野 | 戸田   |
| P55 | 03 15 22  | Per | 2.0      | 2.2  | 3    |     | 3  | 3   |     |   |   |    |      |
| P56 | 03 15 29  | Per | 2.2      | 2.9  | 3    | 2   |    | 3   |     |   |   | 4  | 4    |
| P57 | 03 23 16  | Per | 2.0      | 2.2  | 3    |     |    |     | 3   |   |   | 4  |      |
| P58 | 03 23 47  | Per | 0.4      | 1.4  | 2    | 1   |    | 1   |     |   |   | 2  |      |
| P59 | 03 24 10  | Per | 1.7      | 1.9  | 3    | 2   | 2  | 2   |     |   |   | 3  |      |
| P60 | 03 26 57  | Per | 2.9      | 2.7  |      | 3   |    |     |     |   |   |    |      |
| P61 | 03 27 16  | Per | 2.8      | 2.8  |      | 3   |    |     |     |   |   |    |      |
| P65 | 03 43 08  | Per | 1.9      | 1.7  | 1    | 1   |    | 1   |     |   |   |    | 2    |
| P66 | 03 44 49  | Per | 2.4      | 2.3  |      | 3   | 3  |     |     |   |   |    |      |
| P68 | 03 52 51  | Per | 0.4      | 0.6  |      |     |    |     |     |   |   | 1  | 2    |
|     | 08. 13/14 |     |          |      | 方波見  | 木下  | 佐藤 | 坂口  | 齊藤由 |   |   |    |      |
| P70 | 23 14 38  | Per | 1.3      | 1.8  |      | 2   | 2  | 2   | 2   |   |   |    |      |
| P72 | 23 27 25  | Per | 0.5      | -0.2 | -1   | -1  | -1 | -1  | 0   |   |   |    |      |
|     | 08. 13/14 |     |          |      | 金谷   | 加藤俊 | 北川 | 小川由 | 荒井  |   |   |    |      |
| P73 | 01 28 24  | Per | 1.3      | 1.5  |      | 1   | 1  |     | 1   |   |   |    |      |
| P75 | 01 47 52  | Per | 2.1      | 2.2  | 3    | 3   |    | 3   | 3   |   |   |    |      |

|     |          |     |      |      |     |    |    |    |    |     |  |  |
|-----|----------|-----|------|------|-----|----|----|----|----|-----|--|--|
|     | 08.13/14 |     |      |      | 松崎  | 能登 | 北村 | 廣田 | 大島 | 方波見 |  |  |
| P76 | 02 03 49 | Per | 1.8  | 2.0  |     | 3  | 3  | 3  |    |     |  |  |
| P78 | 02 24 00 | Per | -4.6 | -1.4 | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  |     |  |  |
| P81 | 02 30 33 | Per | 2.3  | 2.6  | 2   |    |    |    |    |     |  |  |
| P84 | 02 46 40 | Per | 2.7  | 2.6  |     |    |    |    |    | 2   |  |  |
| P85 | 02 49 38 | Per | 1.4  | 2.5  |     | 2  |    | 2  |    |     |  |  |
| P86 | 02 50 02 | Per | 1.3  | 2.3  | 1   | 0  |    |    |    |     |  |  |
|     | 08.13/14 |     |      |      | 齊藤由 | 金谷 | 細木 | 佐藤 | 山下 |     |  |  |
| P87 | 03 07 55 | Per | 1.2  | 2.7  | 2   |    | 1  |    | 2  |     |  |  |
| P88 | 03 08 29 | Per | 1.1  | 2.1  |     | 1  | 1  | 1  | 1  |     |  |  |

表2. I. I. と眼視の等級比較(ふたご群) 2007年12月 足柄観測所(明治大学天文部)

| No  | 時刻(JST)  | 群   | I. I. 等級 |      | 眼視等級 |     |     |     |     |   |    |    |  |
|-----|----------|-----|----------|------|------|-----|-----|-----|-----|---|----|----|--|
|     |          |     | フィルター    |      | 1    | 2   | 3   | 4   | 5   | 6 | 7  | 8  |  |
|     |          |     | 無し       | 有り   |      |     |     |     |     |   |    |    |  |
|     |          |     |          |      | 松田   | 山田  | 齊藤由 | 若狭  | 北村  |   |    |    |  |
| G01 | 22 06 49 | Gem | 2.2      | 2.5  | 3    |     |     |     |     |   |    |    |  |
| G03 | 22 16 56 | Gem | 1.4      | 1.5  |      |     | 4   | 3   | 3   |   |    |    |  |
| G04 | 22 35 43 | Gem | -0.4     | -0.3 | 1    | 1   | 1   | 0   | 1   |   |    |    |  |
| G05 | 22 42 39 | Gem | -4.8     | -2.2 | -1   | -2  | -1  | -2  | -1  |   |    |    |  |
|     |          |     |          |      | 山下   | 松田  | 荒井  | 松崎  | 小川宏 |   |    |    |  |
| G06 | 23 06 13 | Gem | 0.0      | 1.4  | 1    | 1   | 1   |     | 1   |   |    |    |  |
| G07 | 23 44 02 | Gem | 0.7      | 2.0  | 2    | 2   |     | 2   | 2   |   |    |    |  |
|     |          |     |          |      | 若狭   | 齊藤由 | 大島  | 細木  | 廣田  |   |    |    |  |
| G08 | 00 32 53 | Gem | -0.7     | 1.1  | 0    |     | 1   |     | 0   |   |    |    |  |
| G09 | 00 48 24 | Gem | 0.9      | 2.3  |      |     |     |     | 2   |   |    |    |  |
|     |          |     |          |      | 小川由  | 木下  | 金谷  | 由利谷 | 北村  |   | 重野 | 戸田 |  |
| G10 | 01 01 22 | Gem | 3.0      | 3.7  |      | 4   |     |     |     |   |    |    |  |
| G12 | 01 21 41 | Gem | 1.3      | 2.5  | 2    |     |     | 3   | 2   |   |    |    |  |
| G13 | 01 24 26 | Gem | 0.2      | 0.7  | 2    | 1   | 1   |     |     |   |    |    |  |
| G14 | 01 37 15 | Gem | 0.6      | 1.9  | 2    | 1   | 2   | 1   | 2   |   |    |    |  |
| G15 | 01 51 36 | Gem | 1.3      | 1.9  | 3    |     |     |     |     |   |    | 3  |  |
| G16 | 01 55 39 | Gem | -1.1     | -0.6 | 0    |     |     |     |     |   |    | 0  |  |
| G17 | 01 59 35 | Gem | 1.2      | 2.1  |      |     |     |     |     |   |    | 2  |  |
|     |          |     |          |      | 小川由  | 木下  | 佐藤  | 金谷  | 大島  |   |    |    |  |
| G18 | 02 01 58 | Gem | 1.7      | 2.1  | 2    |     | 2   |     |     |   |    |    |  |
| G20 | 02 13 20 | Gem | -0.1     | 1.2  | 2    | 2   | 1   | 1   | 2   |   |    |    |  |
| G21 | 02 16 37 | Gem | 0.4      | 1.3  | 0    | 0   | -1  | 0   | -1  |   |    |    |  |
| G22 | 02 22 02 | Gem | 1.3      | 2.4  | 3    | 3   |     |     |     |   |    |    |  |

表3. I. I. と眼視の等級比較(散在流星) 2007年8月及び12月 (明治大学天文部)

| No  | 時刻(JST)  | 群  | I. I. 等級 |     | 眼視等級 |    |     |     |     |   |   |   |  |
|-----|----------|----|----------|-----|------|----|-----|-----|-----|---|---|---|--|
|     |          |    | フィルター    |     | 1    | 2  | 3   | 4   | 5   | 6 | 7 | 8 |  |
|     |          |    | 無し       | 有り  |      |    |     |     |     |   |   |   |  |
|     | 08.11/12 |    | 等級       | 等級  | 奥山   | 松崎 | 由利谷 | 廣田  | 小川宏 |   |   |   |  |
| P01 | 23 13 49 | sp | 1.2      | 1.4 | 1    | 2  | 1   |     | 2   |   |   |   |  |
| P02 | 23 30 38 | sp | 3.0      | 3.3 | 3    |    | 3   |     |     |   |   |   |  |
|     | 08.12/13 |    |          |     | 由利谷  | 金谷 | 松田  | 齊藤翔 | 山田  |   |   |   |  |
| P03 | 22 16 16 | sp | 1.4      | 2.5 |      | 2  | 3   |     |     |   |   |   |  |
| P04 | 22 17 03 | sp | 2.8      | 2.8 | 2    |    | 3   |     |     |   |   |   |  |
| P05 | 22 42 22 | sp | 1.4      | 2.1 | 1    | 1  | 1   | 1   | 1   |   |   |   |  |

|     |          |    |      |      |     |     |     |     |     |     |    |    |
|-----|----------|----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
|     | 08.12/13 |    |      |      | 荒井  | 金谷  | 佐藤  | 加藤嵩 | 大島  |     | 重野 | 戸田 |
| P12 | 00 27 20 | sp | 1.4  | 1.8  |     |     |     | 2   | 1   |     |    |    |
| P13 | 00 27 53 | sp | 2.8  | 2.7  |     |     | 1   |     |     |     | 4  |    |
| P14 | 00 29 08 | sp | 2.6  | 2.7  | 3   | 3   | 2   | 3   |     |     | 3  |    |
| P15 | 00 33 58 | sp | 2.7  | 2.8  | 3   | 3   |     | 2   |     |     |    |    |
| P16 | 00 52 32 | sp | -2.1 | -0.2 |     |     |     |     |     |     | 0  | 0  |
|     | 08.12/13 |    |      |      | 由利谷 | 小川由 | 木下  | 若狭  | 土井  |     | 重野 | 戸田 |
| P17 | 01 00 36 | sp | 1.4  | 2.5  | 3   | 3   | 3   | 3   |     |     |    | 2  |
| P18 | 01 01 04 | sp | 1.4  | 2.1  | 2   | 3   |     |     |     |     |    |    |
| P24 | 01 17 19 | sp | 1.5  | 2.2  | 2   | 2   | 2   | 2   |     |     | 3  |    |
| P26 | 01 21 08 | sp | 0.7  | 1.0  | 1   | 2   | 2   | 2   | 2   |     | 2  | 1  |
| P27 | 01 26 19 | sp | 0.3  | 1.2  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |     | 2  | 2  |
| P28 | 01 29 29 | sp | 1.9  | 1.9  | 2   | 2   |     | 2   | 2   |     | 4  |    |
| P29 | 01 29 34 | sp | 1.5  | 2.3  |     |     |     | 2   |     |     | 4  | 4  |
| P32 | 01 34 14 | sp | 2.6  | 2.9  | 2   | 1   |     |     |     |     |    |    |
| P33 | 01 35 35 | sp | 0.7  | 2.3  | 3   | 3   | 3   | 3   |     |     | 3  |    |
| P35 | 01 38 47 | sp | 3.0  | 3.0  | 3   | 3   | 2   | 3   |     |     |    |    |
|     | 08.12/13 |    |      |      | 飯野  | 小川由 | 佐藤  | 金谷  | 荒井  |     | 重野 | 戸田 |
| P42 | 02 22 03 | sp | 1.5  | 2.5  | 1   | 1   |     | 1   | 1   |     | 3  |    |
| P43 | 02 26 04 | sp | 2.0  | 2.1  |     |     | 1   |     | 2   |     | 4  |    |
| P44 | 02 26 09 | sp | 1.8  | 2.6  |     |     |     |     | 3   |     | 4  |    |
| P52 | 02 48 50 | sp | 2.9  | 2.6  | 3   | 3   | 3   | 3   | 3   |     |    |    |
|     | 08.12/13 |    |      |      | 荒井  | 由利谷 | 黒崎  | 大島  | 加藤嵩 |     | 重野 | 戸田 |
| P53 | 03 02 52 | sp | 3.1  | 3.0  | 3   | 2   | 3   | 2   | 2   |     |    | 2  |
| P54 | 03 06 35 | sp | 2.8  | 2.7  |     | 3   |     |     |     |     |    |    |
| P62 | 03 29 49 | sp | 1.4  | 2.2  |     | 2   |     |     |     |     | 3  |    |
| P63 | 03 31 20 | sp | 2.7  | 2.7  | 3   | 3   | 3   | 3   | 2   |     | 3  | 4  |
| P64 | 03 31 40 | sp | 0.9  | 1.7  | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   |     | 3  |    |
| P67 | 03 45 32 | sp | -1.8 | -0.9 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     | 0  | 0  |
|     | 08.13/14 |    |      |      | 茨木  | 由利谷 | 大島  | 佐藤  | 金谷  |     |    |    |
| P69 | 22 43 54 | sp | 2.4  | 2.6  |     | 3   |     |     |     |     |    |    |
|     | 08.13/14 |    |      |      | 方波見 | 木下  | 佐藤  | 坂口  | 齊藤由 |     |    |    |
| P71 | 23 25 44 | sp | 2.4  | 2.4  | 1   | 0   | 1   | 1   | 1   |     |    |    |
|     | 08.13/14 |    |      |      | 金谷  | 加藤俊 | 北川  | 小川由 | 荒井  |     |    |    |
| P74 | 01 37 11 | sp | 0.9  | 1.4  | 2   | 2   | 3   | 1   | 1   |     |    |    |
|     | 08.13/14 |    |      |      | 松崎  | 能登  | 北村  | 廣田  | 大島  | 方波見 |    |    |
| P77 | 02 16 48 | sp | 2.8  | 3.3  |     |     | 2   |     |     |     |    |    |
| P79 | 02 25 21 | sp | 2.5  | 2.5  | 2   |     | 2   | 3   |     |     |    |    |
| P80 | 02 27 26 | sp | 2.7  | 2.7  |     |     |     |     |     | 2   |    |    |
| P82 | 02 41 45 | sp | 2.9  | 3.0  | 3   |     |     |     |     |     |    |    |
| P83 | 02 41 49 | sp | 2.2  | 2.2  | 2   |     | 2   | 3   | 2   |     |    |    |
|     | 08.13/14 |    |      |      | 齊藤由 | 金谷  | 細木  | 佐藤  | 山下  |     |    |    |
| P89 | 03 18 22 | sp | 0.9  | 2.1  | 1   | 1   |     |     | 2   |     |    |    |
| P90 | 03 21 13 | sp | 2.3  | 2.7  | 2   | 3   | 3   | 3   | 3   |     |    |    |
| P91 | 03 30 43 | sp | 2.0  | 2.5  |     | 3   | 4   | 3   | 3   |     |    |    |
|     | 12.14/15 |    |      |      | 松田  | 山田  | 齊藤由 | 若狭  | 北村  |     |    |    |
| G02 | 22 16 00 | sp | 2.8  | 3.0  | 3   | 3   |     | 2   | 3   |     |    |    |
|     | 12.14/15 |    |      |      | 小川由 | 木下  | 金谷  | 由利谷 | 北村  |     |    |    |
| G11 | 01 16 59 | sp | -1.9 | 0.0  | -1  | 0   | -1  | 0   | 0   |     |    |    |
|     | 12.14/15 |    |      |      | 小川由 | 木下  | 佐藤  | 金谷  | 大島  |     | 重野 | 戸田 |
| G19 | 02 06 38 | sp | -1.3 | 1.2  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |     | 1  | 2  |

表4. I I と眼視の等級比較に関する個人別集計結果

・TV比較：Mtv-MtvF の平均とデータのばらつき(SD)

マイナスは Mtv が MtvF よりも明るいことを意味する

・各個人：Mv-MtvF の平均とデータのばらつき(SD)

マイナスは Mv が MtvF よりも明るく見積もっていることを意味する

| ペルセウス群 |     |      |     | ふたご群 |    |      |     | 散在   |     |      |     |
|--------|-----|------|-----|------|----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 観測者    | 個数  | 平均   | SD  | 観測者  | 個数 | 平均   | SD  | 観測者  | 個数  | 平均   | SD  |
| TV比較   | 50  | -0.5 | 0.7 | TV比較 | 19 | -1.0 | 0.6 | TV比較 | 44  | -0.5 | 0.6 |
| 細木     | 2   | -1.4 | 0.4 | 佐藤   | 3  | -0.9 | 1.2 | 坂口   | 1   | -1.4 | 0.0 |
| 山下     | 2   | -0.9 | 0.3 | 廣田   | 2  | -0.7 | 0.6 | 齊藤由  | 3   | -1.1 | 0.4 |
| 方波見    | 2   | -0.7 | 0.1 | 大島   | 3  | -0.5 | 1.6 | 齊藤翔  | 1   | -1.1 | 0.0 |
| 北川     | 1   | -0.5 | 0.0 | 荒井   | 1  | -0.4 | 0.0 | 方波見  | 2   | -1.0 | 0.5 |
| 奥山     | 3   | -0.3 | 0.9 | 金谷   | 4  | -0.3 | 0.7 | 山田   | 2   | -0.6 | 0.8 |
| 坂口     | 2   | -0.3 | 0.7 | 山下   | 2  | -0.2 | 0.3 | 飯野   | 2   | -0.6 | 1.3 |
| 新舎     | 2   | -0.3 | 0.4 | 小川宏  | 2  | -0.2 | 0.3 | 佐藤   | 8   | -0.5 | 0.9 |
| 木下     | 13  | -0.3 | 0.7 | 由利谷  | 2  | -0.2 | 1.0 | 奥山   | 2   | -0.4 | 0.1 |
| 由利谷    | 18  | -0.3 | 0.6 | 松崎   | 1  | 0.0  | 0.0 | 北村   | 5   | -0.4 | 0.5 |
| 佐藤     | 9   | -0.2 | 0.6 | 木下   | 6  | 0.0  | 0.9 | 金谷   | 12  | -0.3 | 0.7 |
| 若狭     | 10  | -0.2 | 0.6 | 若狭   | 4  | 0.2  | 1.1 | 木下   | 9   | -0.2 | 1.0 |
| 小川由    | 21  | -0.2 | 0.8 | 小川由  | 9  | 0.3  | 0.8 | 加藤嵩  | 7   | -0.1 | 0.7 |
| 松崎     | 3   | -0.2 | 1.4 | 重野   | 3  | 0.5  | 0.6 | 小川由  | 15  | -0.1 | 0.9 |
| 土井     | 3   | -0.2 | 0.3 | 松田   | 5  | 0.5  | 0.7 | 松田   | 4   | -0.1 | 0.7 |
| 金谷     | 7   | -0.1 | 0.7 | 北村   | 5  | 0.7  | 0.9 | 大島   | 7   | -0.1 | 0.7 |
| 齊藤由    | 3   | -0.1 | 0.5 | 山田   | 2  | 0.8  | 0.8 | 由利谷  | 21  | -0.1 | 0.5 |
| 能登     | 4   | -0.1 | 1.7 | 齊藤由  | 3  | 1.7  | 0.7 | 松崎   | 4   | 0.0  | 0.5 |
| 荒井     | 20  | 0.0  | 0.8 |      |    |      |     | 荒井   | 11  | 0.1  | 0.6 |
| 飯野     | 8   | 0.0  | 1.0 |      |    |      |     | 若狭   | 9   | 0.1  | 0.6 |
| 加藤嵩    | 2   | 0.1  | 1.0 |      |    |      |     | 山下   | 3   | 0.2  | 0.3 |
| 大島     | 8   | 0.1  | 0.7 |      |    |      |     | 土井   | 3   | 0.3  | 0.6 |
| 加藤俊    | 2   | 0.2  | 0.9 |      |    |      |     | 黒崎   | 4   | 0.4  | 0.4 |
| 黒崎     | 3   | 0.5  | 0.4 |      |    |      |     | 戸田   | 9   | 0.5  | 0.9 |
| 廣田     | 3   | 0.6  | 1.0 |      |    |      |     | 加藤俊  | 1   | 0.6  | 0.0 |
| 戸田     | 13  | 0.7  | 1.1 |      |    |      |     | 廣田   | 2   | 0.6  | 0.2 |
| 重野     | 17  | 1.0  | 0.7 |      |    |      |     | 細木   | 2   | 0.9  | 0.8 |
| 北村     | 2   | 1.2  | 0.3 |      |    |      |     | 重野   | 17  | 0.9  | 0.6 |
|        |     |      |     |      |    |      |     | 北川   | 1   | 1.6  | 0.0 |
| 全眼視    | 183 | 0.0  | 0.9 | 全眼視  | 57 | 0.2  | 0.9 | 全眼視  | 167 | 0.0  | 0.8 |

# Comparison of TV Magnitudes and Visual Magnitudes of Meteors

Yoshihiko Shigeno and Masayuki Toda

The generally accepted belief is that a meteor, with a large amount of infrared rays, can be captured brighter than it actually is by infrared-sensitive image intensifiers (I.I.) or CCD. We conducted observations of meteors using three methodologies: 1) I.I. attached with a filter that has visual magnitude equivalent to human eye spectrum sensitivity at night vision, 2) I.I. without the filter and 3) visually to determine meteor magnitudes. A total of 31 members of the astronomical club at Meiji University observed 50 meteors in Perseids, 19 meteors in Geminids as well as 44 sporadic meteors and the results were tabulated. The results helped us understand that on average I.I. can capture meteors brighter than visual observation by the magnitude equivalent of 0.5 for Perseids, 1.0 for Geminids and 0.5 for sporadic meteors.

For I.I. with a filter that has equivalent spectrum magnitude with the human eye at night vision, it turned out that we could obtain almost the same magnitude with observation by the human eye.

We learned that a bright meteor with negative magnitude can be observed by I.I. brighter than the human eye. From several examples, we found I.I. could capture a meteor with about -1 visual magnitude brighter by about three magnitudes. We could probably do so because a bright meteor with negative magnitude may contain more infrared rays and the brightness could be amplified.

## 1 Introduction

Magnitudes are important yardsticks to express the mass of meteoric materials and conventionally visual magnitude or photographic magnitude have been used as the index (Opic, 1958; Verniani, 1967). Since a meteor contains more infrared rays (Borovicka et al., 1999), the generally accepted belief is that meteors can look brighter when photographed by new observation instruments such as I.I. or CCD with more sensitivity to infrared rays. By obtaining precisely the difference between conventional and new magnitudes of the same meteors, we are able to compare the conventional and new observation in a correct manner. However, it appears that this comparison has not yet been implemented in a full scale. We would like to report the results of the comparison of I.I. and visual observations.

## 2 Comparison between TV Magnitudes and Visual Magnitudes

Shigeno and Toda conducted a series of observations to determine meteor magnitudes by both I.I. and visual observations: one time in April and two times in August 2004. During the observations, we found a total of 21 meteors; for each meteor, its TV magnitudes were brighter than visual magnitude by 0.2 to 2.6 magnitude or 1.2 magnitude on average. It will be attributed to I.I. that is also sensitive to infrared rays and capture brighter image of meteors as they contain more infrared rays.

We studied between TV magnitudes and visual magnitudes ( $M_{TV}-M_V$ ) could be changed or not by other factors. Figure 1 shows the relation between visual magnitude ( $M_V$ ), angular velocity ( $V_a$ ) and velocity of observation ( $V_O$ ) where the trend is not clear yet (Shigeno and Toda, 2005).

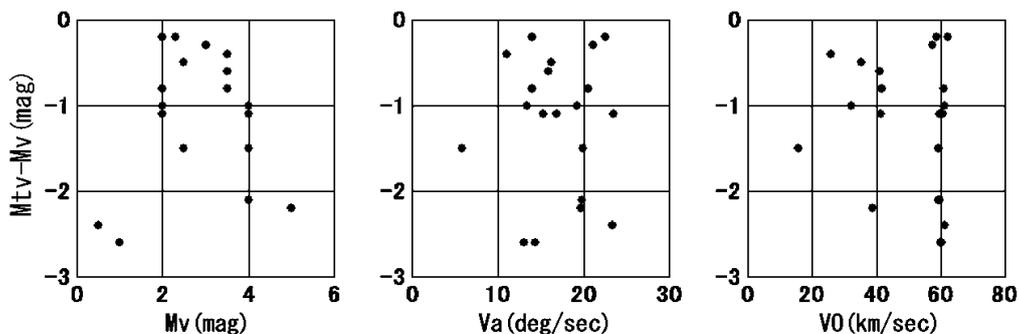


Figure 1 - Comparison between deviation(TV magnitude - Visual magnitude)( $M_{TV}-M_V$ ) and Visual magnitude( $M_V$ ), Angular velocity( $V_a$ ), Observed velocity( $V_O$ ).

### 3 Observation by I.I. with Filter for Spectrum Magnitude Equivalent of Visual Magnitude

The above observation method cannot determine the correct visual magnitude. We, therefore, observed to determine meteor magnitudes by three other methods: 1) I.I. with a filter that has the same amount of spectrum magnitude with visual magnitude at night vision (MtvF), 2) I.I. without the filter (Mtv) and 3) visually. Magnitudes of TV meteors were obtained from the relations between brightness, size and magnitudes of fixed stars and corrected by angular velocity. A total of 31 members of Meiji University's astronomical club observed 50 meteors in Perseids, from August 11 to August 13, 2007, 19 meteors in Geminids on December 14 of the same year and 44 sporadic meteors. The results are shown in Table 1 as tabulations by observers for comparison of magnitudes by I.I. and visual observation.

#### 3.1 Comparison of Mtv with MtvF

As shown by the upper column titled "Mtv-MtvF" of Table 1, we obtained the following data: -0.5 magnitude for Perseids, -1.0 magnitude for Geminids and -0.5 magnitude for sporadic meteors. These results suggest that without filter observation shows brighter than the observation with filter by 0.5 to 1.0 magnitude. In the table, SD indicates the dispersion of data as standard deviation and the results ranged from  $\pm 0.6$  to 0.7 magnitude, meaning they were the variation of data but not errors in the average values.

#### 3.2 Comparison of Mv with MtvF

The middle column of Table 1 shows the tabulated results by observers. Negative values mean that the observers had estimated brighter than actual while positive values mean they had estimated darker. We learned that some observers had estimated brighter by almost one magnitude while others had estimated darker. However, from the total results of all the observers, i.e., "All Visual Observation Data" in the bottom column of Table 1, it turned out that the difference between the average of Mv and the average of MtvF was somewhere between 0.0 to 0.2 magnitude and the difference was minimal. That means MtvF in this report was almost meant to be Mv. However, we also learned data variation by the observers was rather large at  $\pm 0.8$  to 0.9 magnitude.

#### 3.3 A bright meteor with negative magnitude

A bright meteor with negative magnitude can be caught by I.I. brighter than visual observation. Figure 2 is a list of typical examples of meteors with negative magnitudes. They are classified as approximately -1 magnitude by visual observation whereas 1) MtvF are brighter by approximately 1 magnitude and 2) Mtv are further brighter by approximately 2 magnitudes.

We assume the reason for the above item 1 is due to the fact that the magnitude by TV observation is to determine the brightest spot instantaneously while visual observation determines averaged magnitude. Therefore, as a brighter meteor may likely generate more light instantaneously, TV observation may estimate the magnitude brighter than visual observation.

For the reason noted in item 2, we assume that brighter meteors with negative magnitude may be caught brighter as they may contain a large amount of infrared rays.

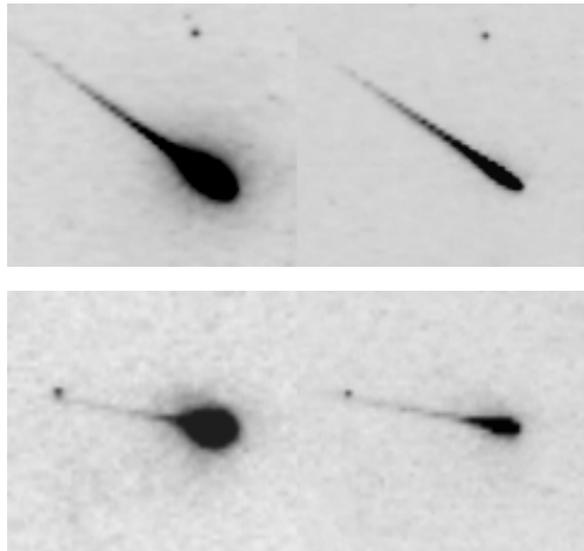


Figure 2- Bright meteors with negative magnitude.

Upper photo. : No.P40 Aug.12,2007 17:07:50(UT) Per.

Upper left : Mtv = -4.0mag.

Upper right : MtvF = -1.7mag.

Mv = -0.5mag.

Lower photo. : No.G05 Dec.14,2007 13:42:39(UT) Gem.

Lower left : Mtv = -4.8mag.

Lower right : MtvF = -2.2mag.

Mv = -1.4mag.

Filter : SCHOTT BG18 2mm (Filter that has equivalent spectrum magnitude with the human eye at night vision (400nm-600nm).)

Spectrum sensitivity of I.I. : 350nm-900nm.

Table 1 - Tabulations by observers for comparison of magnitudes by I.I. and visual observation.

Mtv-MtvF : Comparison of magnitudes by without a filter(Mtv) and with a filter(MtvF).

Mv-MtvF : Comparison of magnitudes by Visual magnitude(Mv) and with a filter(MtvF).

| Perseids   |     |      |     | Geminids   |     |      |     | Sporadic   |     |      |     |
|------------|-----|------|-----|------------|-----|------|-----|------------|-----|------|-----|
| Observer   | No. | Mean | SD  | Observer   | No. | Mean | SD  | Observer   | No. | Mean | SD  |
| Mtv-MtvF   | 50  | -0.5 | 0.7 | Mtv-MtvF   | 19  | -1.0 | 0.6 | Mtv-MtvF   | 44  | -0.5 | 0.6 |
| Mv-MtvF    |     |      |     | Mv-MtvF    |     |      |     | Mv-MtvF    |     |      |     |
| Hosogi     | 2   | -1.4 | 0.4 | Sato       | 3   | -0.9 | 1.2 | Sakaguchi  | 1   | -1.4 | 0.0 |
| Yamashita  | 2   | -0.9 | 0.3 | Hirota     | 2   | -0.7 | 0.6 | Saito.Y    | 3   | -1.1 | 0.4 |
| Katabami   | 2   | -0.7 | 0.1 | Oshima     | 3   | -0.5 | 1.6 | Saito.S    | 1   | -1.1 | 0.0 |
| Kitagawa   | 1   | -0.5 | 0.0 | Arai       | 1   | -0.4 | 0.0 | Katabami   | 2   | -1.0 | 0.5 |
| Okuyama    | 3   | -0.3 | 0.9 | Kanaya     | 4   | -0.3 | 0.7 | Yamada     | 2   | -0.6 | 0.8 |
| Sakaguchi  | 2   | -0.3 | 0.7 | Yamashita  | 2   | -0.2 | 0.3 | Iino       | 2   | -0.6 | 1.3 |
| Shinsha    | 2   | -0.3 | 0.4 | Ogawa.H    | 2   | -0.2 | 0.3 | Sato       | 8   | -0.5 | 0.9 |
| Kinoshita  | 13  | -0.3 | 0.7 | Yuriya     | 2   | -0.2 | 1.0 | Okuyama    | 2   | -0.4 | 0.1 |
| Yuriya     | 18  | -0.3 | 0.6 | Matsuzaki  | 1   | 0.0  | 0.0 | Kitamura   | 5   | -0.4 | 0.5 |
| Sato       | 9   | -0.2 | 0.6 | Kinoshita  | 6   | 0.0  | 0.9 | Kanaya     | 12  | -0.3 | 0.7 |
| Wakasa     | 10  | -0.2 | 0.6 | Wakasa     | 4   | 0.2  | 1.1 | Kinoshita  | 9   | -0.2 | 1.0 |
| Ogawa.Y    | 21  | -0.2 | 0.8 | Ogawa.Y    | 9   | 0.3  | 0.8 | Kato.T     | 7   | -0.1 | 0.7 |
| Matsuzaki  | 3   | -0.2 | 1.4 | Shigeno    | 3   | 0.5  | 0.6 | Ogawa.Y    | 15  | -0.1 | 0.9 |
| Doi        | 3   | -0.2 | 0.3 | Matsuda    | 5   | 0.5  | 0.7 | Matsuda    | 4   | -0.1 | 0.7 |
| Kanaya     | 7   | -0.1 | 0.7 | Kitamura   | 5   | 0.7  | 0.9 | Oshima     | 7   | -0.1 | 0.7 |
| Saito.Y    | 3   | -0.1 | 0.5 | Yamada     | 2   | 0.8  | 0.8 | Yuriya     | 21  | -0.1 | 0.5 |
| Noto       | 4   | -0.1 | 1.7 | Saito.Y    | 3   | 1.7  | 0.7 | Matsuzaki  | 4   | 0.0  | 0.5 |
| Arai       | 20  | 0.0  | 0.8 |            |     |      |     | Arai       | 11  | 0.1  | 0.6 |
| Iino       | 8   | 0.0  | 1.0 |            |     |      |     | Wakasa     | 9   | 0.1  | 0.6 |
| Kato.T     | 2   | 0.1  | 1.0 |            |     |      |     | Yamashita  | 3   | 0.2  | 0.3 |
| Oshima     | 8   | 0.1  | 0.7 |            |     |      |     | Doi        | 3   | 0.3  | 0.6 |
| Kato.S     | 2   | 0.2  | 0.9 |            |     |      |     | Kurosaki   | 4   | 0.4  | 0.4 |
| Kurosaki   | 3   | 0.5  | 0.4 |            |     |      |     | Toda       | 9   | 0.5  | 0.9 |
| Hirota     | 3   | 0.6  | 1.0 |            |     |      |     | Kato.S     | 1   | 0.6  | 0.0 |
| Toda       | 13  | 0.7  | 1.1 |            |     |      |     | Hirota     | 2   | 0.6  | 0.2 |
| Shigeno    | 17  | 1.0  | 0.7 |            |     |      |     | Hosogi     | 2   | 0.9  | 0.8 |
| Kitamura   | 2   | 1.2  | 0.3 |            |     |      |     | Shigeno    | 17  | 0.9  | 0.6 |
|            |     |      |     |            |     |      |     | Kitagawa   | 1   | 1.6  | 0.0 |
| All Visual | 183 | 0.0  | 0.9 | All Visual | 57  | 0.2  | 0.9 | All Visual | 167 | 0.0  | 0.8 |

## 4 Conclusion

Previous infrared spectrum observation of Perseids had discovered several molecular bands such as 630-670nm and 730-780nm nitrogen molecular bands as well as many kinds of atomic luminescent lines such as 777nm oxygen atomic luminescent lines (Ebizuka, N., personal communication). We learned that these infrared rays make meteors look brighter by 0.5 to 1.0 magnitude; especially meteors of negative magnitudes can make the difference of brightness larger. Meanwhile, we also learned that I.I. with the filter that has the same amount of spectrum magnitude with visual magnitude at night vision can observe meteors with almost identical magnitude of visual observation.

We would like to express our gratitude for valuable advice from Mr. Mitsuru Terada for the relations between magnitude and mass of meteors and from Mr. Noboru Ebizuka for the infrared spectrum.

## 5 Supplementary Notes

We studied the relation between magnitudes and image sizes of fixed stars in order to precisely obtain magnitudes of meteors. Figure 3 shows the results of observations from two types of often-used objective lenses: 85mm/F1.2 and 24mm/F1.4, respectively. The relation between magnitudes of fixed stars darker than 0 magnitude and the size of image can be approximated into an almost straight-line. However, we learned that fixed stars brighter than 0 magnitude may make the image size bigger rapidly. This would be because of the characteristics of I.I. Then, we chose straight-line approximation at an area darker than 0 magnitude while we used quadratic functional approximation at another area brighter than 0 magnitude in Figure 3 by

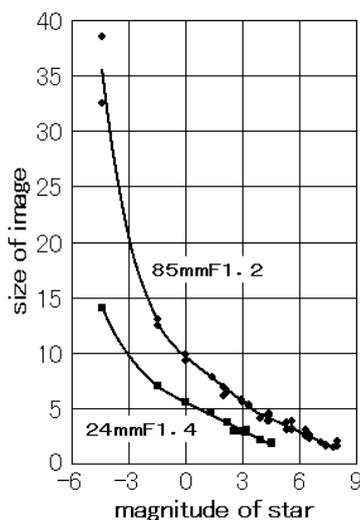


Figure 3 - Comparison between magnitude of star and size of image.

straight-line and curved line. Figure 3 shows the case of observation without the filter and the approximation is different in the case of observation with the filter.

Figure 4 shows a fire ball discovered at TV observation of a Leonids meteor swarm in 2001 (Shigeno et al., 2003). The original data was recomputed by the methodologies in this report and the magnitude turned out to be Mtv: -7.6. Unfortunately, however, we did not observe this meteor visually. That particular day happened to be a meteor storm occasion and a large number of people were observing but there was no report of such a bright meteor. The actual magnitude of visual observation of the meteor is assumed to be about -4 as there is a difference of approximately 3.5 magnitudes between Mv and Mtv as shown in Figure 2.

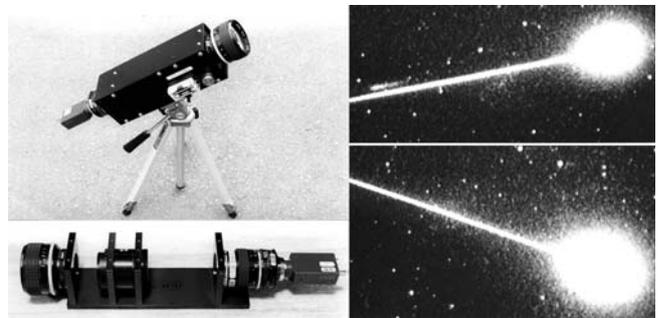


Figure 4 - The figure on the left shows the TV observation equipment. The device with the Image Intensifier (Delft High Tech XX1470 etc.). The figure on the right shows an example of a double station TV meteor. ID: MSSJBZ on Nov 18 2001 at 18:19:34 (UT). TV magnitude (Mtv) = -7.6.

## References

- Opic E. J. (1958). "Physics of meteor flight in the atmosphere", Interscience Publishers, Inc, 148.
  - Verniani F. (1967). "Meteor Masses and Luminosity", Smithsonian Contributions to Astrophysics, Vol.10, 181-195.
  - Borovicka J., Stork R., Bocek J. (1999). "First results from video spectroscopy of 1998 Leonid meteors", Meteoritics & Planetary Science, 34, 987-994.
  - Shigeno Y., Toda M. (2005). "Double-station TV meteor observations(2004.08.11-12)", Nippon Meteor Society, Apr,2005.
  - Shigeno Y., Shioi H., Shigeno T. (2003). "Radiants and orbits of the 2001 Leonids", The Institute of Space and Astronautical Science Report SP No.15, 55-62.
- All meteors have been opened to the public.  
<http://www.imo.net/files/data/msswg/>

# 太陽系外からの流星の分光観測

海老塚 昇<sup>1</sup>、前田 幸治<sup>2</sup>、中村 卓司<sup>3</sup>

1. 名古屋大学 理学研究科 2. 宮崎大学 工学部 3. 京都大学生存圏研究所

## 1. はじめに

MARS (Meteor Automatic Radio System、ウクライナ)、AMOR (Advanced Meteor Orbital Radar、ニュージーランド)、Arecibo (プルトリコ) 等の電波観測やパイオニア 10 号、11 号、Ulysses (太陽極軌道探査機)、ガリレオ (木星探査機) 等に搭載された粒子検出器 (検出感度  $10^{-19}$ - $10^{-11}$  kg) および、写真やビデオ観測により放物線や双曲線 (離心率:  $e \geq 1$ ) の日心軌道\*を持つ多くの粒子が検出されている [1-7]。

MARS (31.1 MHz) において 1972-1978 年の 7 年間に軌道が決定された 250,000 個の流星 ( $10^{-8}$ - $10^{-6}$  kg) のうち 7,911 個 (3.2%) が  $e \geq 1$  であった。そのうち 1102 個が太陽向点方向から到来して  $1 < e < 1.1$  であった (図 1)。  $1 < e < 1.1$  の流星は  $0.9 < e < 1$  の楕円軌道とは分布が本質的に異なる (軌道傾斜角が大きく、逆行が多い?) [5]。Arecibo の口径 300 m の電波望遠鏡 (430 MHz) において 1997 年と 1998 年の 11 月にそれぞれ 6 日間の観測によって軌道が決定された 3000 個の流星 ( $10^{-14}$ - $10^{-9}$  kg) のうち 143 個 (4.8%) が  $e > 1$  であった [4]。AMOR (26.2 MHz) では 350,000 個の流星 ( $10^{-10}$ - $10^{-7}$  kg) のうち 1,600 個 (0.46%) が日心速度 70km/s 以上であり、200 km/s を超える微粒子も検出されている [3, 4]。数 100 km/s にも達する高速の星間粒子の放出メカニズムとして前主系列の巨星による光圧や原始惑星系円盤における惑星による力学的な相互作用が有力である。

国際天文連盟 (IAU) の Meteor Data Center (MDC) カタログの銀塩写真の観測 [2]において 4,581 個の流星 ( $10^{-4}$ - $10^{-1}$  kg) のうち 59 個 (1.3%) が、カナダのビデオ観測 [6, 7]においても 160 個の流星 ( $10^{-9}$ - $10^{-4}$  kg) のうち 2 個 (1-2%) が日心速度 46.4 km/s\*\*を超えていた。

## 2. 星間粒子の光度と流量

図 2 は 1AU における  $e > 1$  の星間粒子の流量を  $10^{-19}$ - $10^{-3}$  kg のレンジにわたってプロットしたものである。太い実線は  $e > 1$  の星間粒子、細い実線と破線は惑星間粒子の流量を 2 次の多項式でフィッティングしたものである。  $10^{-11}$ - $10^{-10}$  kg 近傍で傾きが -1 を超えて  $10^{-5}$  kg 近傍では傾きが -2 程度である [2]。しかし、 $e > 1$  と判定された粒子には速度の誤差がある。そこで、太陽系脱出速度に近い 5 流星群 (ペルセウス座、オリオン座、しし座、こと座、みずがめ座  $\eta$ ) について、最も速度精度が良いと考えられる MDC カタログの銀塩写真データから日心速度の分布を調べてみると図 3 のように  $e > 1$  と判定された流星が多く見られた。ペルセウス座流星群 (41.7km/s) を例に挙げると 835 流星中 224 流星が 42.1km/s ( $e > 1$ ,  $-0.2 \sigma$ ) であり、5 流星が 46.6 km/s ( $e > 1.45$ ,  $-2.5 \sigma$ ) であった。

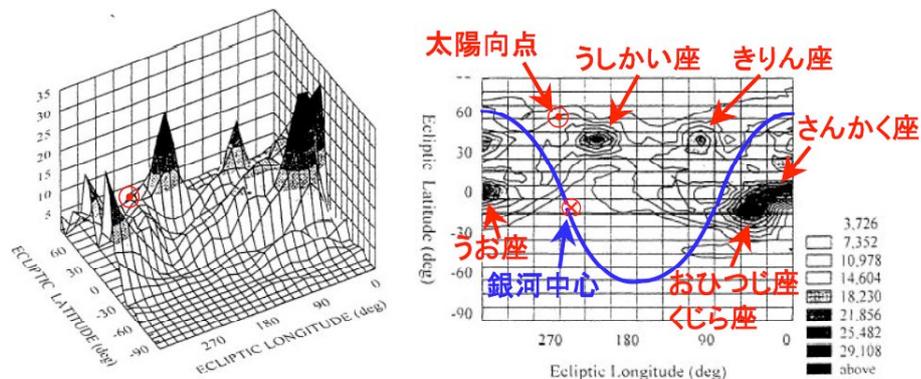


Fig. 2.  $N=N(\beta', \lambda')$  of 1102 hyperbolic orbits with  $1 < e < 1.1$  (1972-1978) in Kharkiv

図 1 Kharkiv における  $1 < e < 1.1$  の双曲線軌道の流星の到来方向分布。 [5]

\* 1AU (天文単位) における  $e = 1.0$  の天体の日心速度 (太陽系の脱出速度) は平均 42.1 km/s。

\*\*近傍星に対する太陽の平均速度 (標準太陽運動: 19.5 km/s [8]) で太陽系に流入する星間粒子の 1AU における日心速度は 46.4 km/s ( $e = 1.45$ ) 。

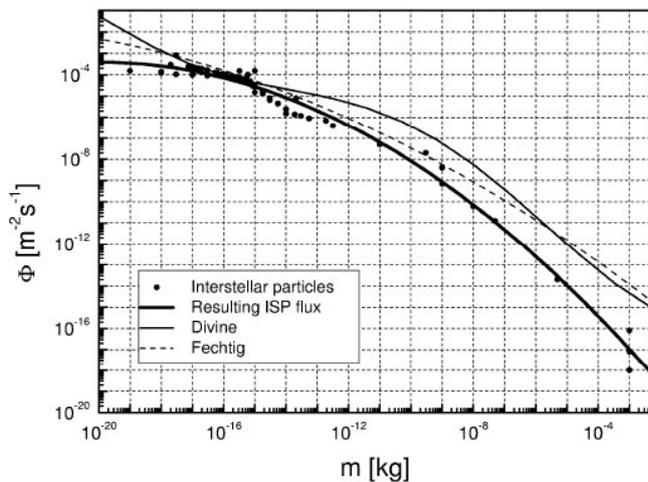


図2 星間粒子の1AUにおける流量（点と太い実線）。細い実線と破線は惑星間粒子の流量。[2]

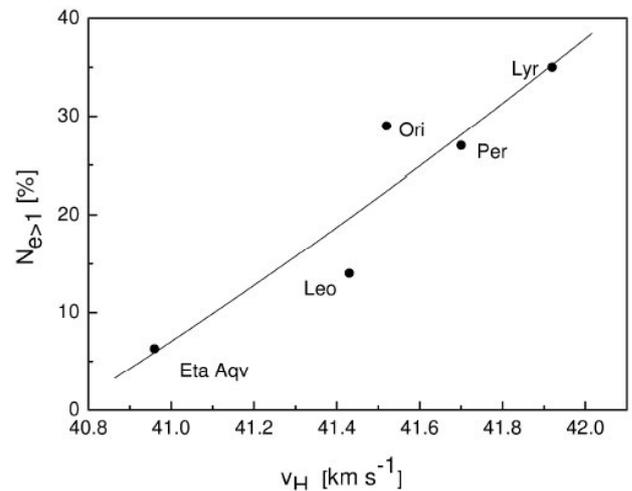


図3 太陽系脱出速度に近い流星群の日心速度と銀塩写真データから求めた流星軌道が離心率1を超える割合。[2]

この結果から  $e=1.0$  の流星が  $e>1.45$  と判定される確率は1%程度 ( $2.3\sigma$ ) と考えられる。MDC カタログの銀塩写真データの全4,581流星中59流星が  $e>1.45$  なので、銀塩写真データにおける星間粒子の流星の全流星に対する割合の上限値を1.3% ( $59/4,581$ ) と仮定する [2]。

表1は図2の流量から見積もられた、星間粒子の流量が標準レンズの視野に検出される数を示す。質量から等級の換算は図4から読み取った。表1の流星数 ( $N_{is}$ ) と前述の星間粒子の上限値1.3%から検出される全流星数 ( $N_{all} = N_{is}/0.013$ ) を計算すると標準レンズの視野において1時間あたり4.5等級が600~920個、2等級が36~54個、観測されるはずである。しかし、実際には表2(表3の観測データを使用)の高感度ビデオ観測 [9, 10] のように標準レンズのビデオ観測によって検出される流星数は4~5等級の群流星(しし座流星群は除外)が1時間に2~6個、散在流星が1~20個であり、2等級の流星数は群流星(同)が1~5個、散在流星が0.2~3個である。このことから実際の  $N_{is}$  は表1より1~2桁少ない値であると思われる。 $N_{is}$  が表1の1/50の値であると仮定すると、星間粒子の流星は標準レンズの視野に、4.5等級が4~6時間に1個程度、2.0等級が70~100時間すなわち7~10日に1個程度が検出できることになる。

### 3. 流星のスペクトル観測

前田等はワテック社製の高感度ビデオカメラ(視野:  $30^\circ \times 22.8^\circ$ )とグリズム(直視回折格子)および動体検出ソフト(UFO Capture)のシステムにより、流星等の自動検出観測を行っている。2006年10月下旬にはオリオン座流星群が突発出現して、600本/mmのグリズム(分解能:  $R = \lambda/\Delta\lambda \sim 200$ 、限界等級: -0.5等)によって9日間に19個のスペクトルを取得した。その後も普段は200本/mmのグリズム( $R \sim 70$ 、限界等級: 0.5等)によって多くの散在流星群や小流星群のスペクトルを取得している [11, 12]。

表1 星間粒子の1AUにおける流量および空間密度と太陽向点が天頂にある場合の流星出現数

| 質量(等級)<br>[kg]           | 流量<br>[N/(m <sup>2</sup> s)] | 空間密度*<br>[N/km <sup>3</sup> ] | 出現数 [N/Hour/4,000km <sup>2</sup> ]** |            | 備考 |
|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------|----|
|                          |                              |                               | 50 km/s***                           | 75 km/s*** |    |
| 10 <sup>-10</sup> (12.0) | 9.0 × 10 <sup>-10</sup>      | 1.9 × 10 <sup>-5</sup>        | 14,000                               | 21,000     |    |
| 10 <sup>-9</sup> (9.5)   | 1.0 × 10 <sup>-10</sup>      | 2.1 × 10 <sup>-6</sup>        | 1,600                                | 2,300      |    |
| 10 <sup>-8</sup> (7.0)   | 8.0 × 10 <sup>-12</sup>      | 1.7 × 10 <sup>-7</sup>        | 120                                  | 190        |    |
| 10 <sup>-7</sup> (4.5)   | 5.0 × 10 <sup>-13</sup>      | 1.1 × 10 <sup>-8</sup>        | 7.8                                  | 12         |    |
| 10 <sup>-6</sup> (2.0)   | 3.0 × 10 <sup>-14</sup>      | 6.4 × 10 <sup>-10</sup>       | 0.47                                 | 0.70       |    |

\*  $e=1.45$  の場合。

\*\* 4,000 km<sup>2</sup>は標準レンズの視野 ( $37^\circ \times 28^\circ$ ) の高度110 kmにおける面積。

\*\*\* 50 km/s: 太陽向点が反太陽方向付近にある場合の  $e=1.45$  の粒子の地心速度。

75 km/s: 太陽向点が地球向点付近にある場合の  $e=1.45$  の粒子の地心速度。

表2 標準レンズの視野\*内における1時間あたりの流星出現数 (表3のデータを使用)

| 等級群              | -2   | -1   | 0    | 1    | 2    | 3    | 4   | 5   | 6   | 7    | 備考 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|----|
| しぶんぎ<br>下段：散在    | 0    | 0.47 | 0.47 | 0.63 | 1.7  | 2.2  | 2.8 | 6.3 | 5.6 | 1.2  |    |
|                  | 0.16 | 0    | 0.16 | 0    | 0.47 | 0.31 | 1.7 | 5.0 | 5.5 | 1.6  |    |
| ペルセウス<br>下段：散在   | 1.1  | 1.1  | 1.1  | 0    | 1.1  | 4.3  | 2.1 | 4.3 | 8.5 | 19   |    |
|                  | 0    | 0    | 0    | 0    | 1.1  | 1.1  | 3.2 | 1.1 | 7.5 | 20   |    |
| オリオン **<br>下段：散在 | 0    | 0    | 0    | 2.4  | 4.8  | 12   | 4.8 | 4.8 | 9.5 | 26   |    |
|                  | 2.4  | 0    | 0    | 2.4  | 2.4  | 4.8  | 21  | 7.1 | 17  | 64   |    |
| しし **<br>下段：散在   | 4.8  | 8.4  | 25   | 67   | 53   | 77   | 67  | 43  | 7.2 | -    |    |
|                  | 0    | 0    | 0.60 | 0    | 3.0  | 6.0  | 11  | 13  | 4.8 | -    |    |
| ふたご<br>下段：散在     | 0    | 0.19 | 0.39 | 0.78 | 1.2  | 0.58 | 3.1 | 3.7 | 4.1 | 0.39 |    |
|                  | 0    | 0    | 0.19 | 0    | 0.19 | 0.58 | 1.6 | 3.5 | 2.1 | 0.58 |    |

\* 4,000 km<sup>2</sup>.

\*\* おうし座流星群が同時期に活動しており、散在流星数に含まれている。

波長 400~600nm における R=200 の流星分光観測によってカルシウムやマグネシウム、ナトリウム等の存在比率を求めることができる。しかし、この波長帯に数多く現れる鉄のスペクトルを分離して存在比率を決定するためには R>500 の分光観測が望ましい。イメージ・インテンシファイアを組み合わせた高感度ビデオカメラ (I.I.- CCTV) は標準レンズ (視野: 37°×28°) の撮像の限界等級が 9 等級程度、R=200 の分光が 4 等級程度である。ただし、分光観測の場合には限界等級より 2 等級以上明るいことが望ましい。ハイビジョンは従来のビデオカメラ (NTSC) の約 6 倍の画素数であるために背景雑音が増加した場合に視野が同じであっても限界等級が約 1 等級暗くなる。

星間粒子に含水鉱物や有機物が存在する場合、その粒子が高温環境を経験していない証拠であり、原始惑星系円盤から放出された可能性が高い。すなわち、太陽系の彗星と同様に原始惑星系円盤が属する分子雲 (暗黒星雲) の元素組成比の情報が得られる可能性がある。流星スペクトルにおいて含水鉱物や有機物の証拠として CN や OH の輝線の検出が有望であり、紫外線における R >500 の分光観測が有効である。

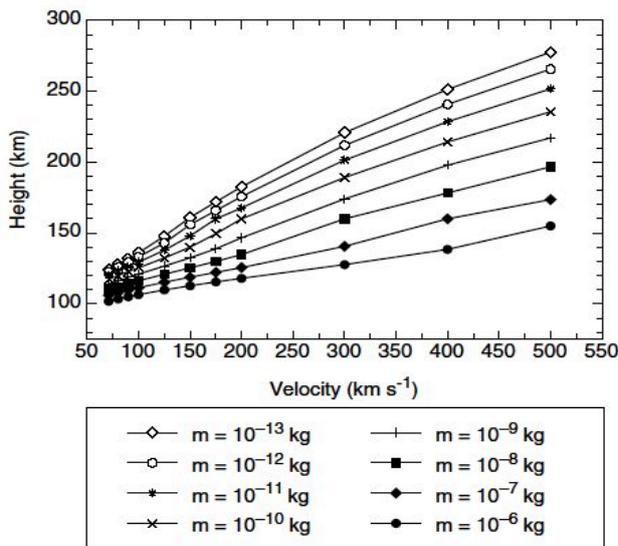


Fig. 4. Meteor heights at the point of peak light intensity ( $H_{max}$ ) for cometary structure meteoroids.

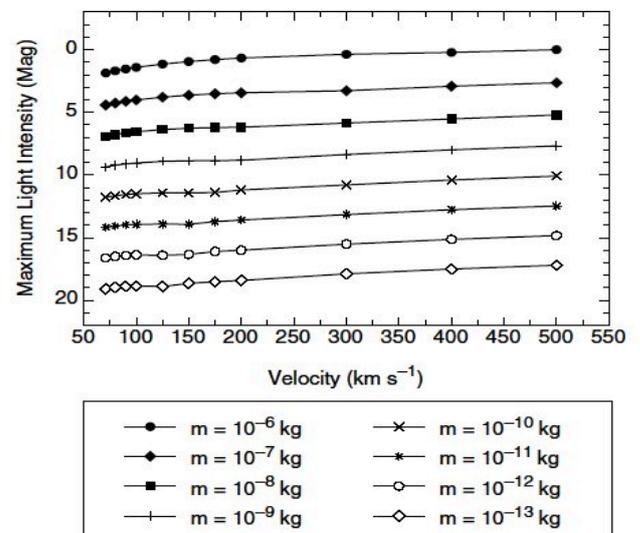


Fig. 10. The maximum light intensity ( $I_{max}$ ) of cometary structure meteoroids expressed in absolute astronomical magnitude.

図4 彗星起源の流星 (密度: 1.0 g/cm<sup>3</sup>) の質量と速度による最大光度の高度 (左図) および最大光度 (右図)。100 km/s 以上の発光効率は速度 60-100 km/s の観測値から得られた曲線を外挿。最大光度の高度は対地速度に依存し、最大光度は対地速度には大きく依存しない。小惑星起源の流星 (密度: 3.3 g/cm<sup>3</sup>) は最大光度の高度が低くなる (70-100 km/s の場合に約 10km 低くなる) が最大光度はほとんど変わらない。[3]

表3 I.I.-CCTV による流星の観測データ

| 等級<br>群            | -2 | -1 | 0  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 観測<br>時間 | 視野面積<br>[km <sup>2</sup> ]* | 観測日                   |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|-----------------------------|-----------------------|
| しぶんぎ [9]<br>下段：散在  | 0  | 3  | 3  | 4  | 11 | 14 | 18 | 40 | 36 | 6  | 309.0    | 5,000<br>(f=24mm)           | 1992 Jan.<br>3/4      |
|                    | 1  | 0  | 1  | 0  | 3  | 2  | 11 | 32 | 35 | 8  |          |                             |                       |
| ペルセウス [9]<br>下段：散在 | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 4  | 2  | 4  | 8  | 18 | 554.5    | 410<br>(f=85mm)             | 1991 Aug.<br>11/12/13 |
|                    | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 3  | 1  | 7  | 19 |          |                             |                       |
| オリオン [9]<br>下段：散在  | 0  | 0  | 0  | 1  | 2  | 5  | 2  | 2  | 4  | 11 | 248.5    | 410<br>(f=85mm)             | 1990 Oct.<br>20/21    |
|                    | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 4  | 9  | 3  | 7  | 27 |          |                             |                       |
| しし [10]<br>下段：散在   | 8  | 14 | 42 | 11 | 89 | 12 | 11 | 72 | 12 | -  | 210.0    | 6,700 **<br>(f=24mm)        | 2002 Nov.<br>19       |
|                    | 0  | 0  | 1  | 0  | 5  | 10 | 18 | 22 | 8  | -  |          |                             |                       |
| ふたご [9]<br>下段：散在   | 0  | 1  | 2  | 4  | 6  | 3  | 16 | 19 | 21 | 2  | 248.0    | 5,000<br>(f=24mm)           | 1990 Dec.<br>11/12/13 |
|                    | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 3  | 8  | 18 | 11 | 3  |          |                             |                       |

\* 高度 110 km における視野面積。

\*\*  $\phi 45.4^\circ$  の円形視野。

しし座流星群の観測のために海老塚等が開発した紫外線-可視光・高感度ハイビジョンカメラ (UV-I.I.-HDTV) は視野が  $28^\circ \times 17^\circ$ 、流星に対する撮像の限界等級が 10.5 等級、 $R=200$  の分光が 5.5 等級、 $R=500$  が 4.5 等級である [13-15]。

この UV-I.I.-HDTV に回折格子の対物分光器を組み合わせたシステム ( $R=500$ ) によって、しし座流星群 (彗星起源) の観測を行い、その流星体に OH (310nm) の輝線の存在を示唆した [16]。また、彗星には CN (388 nm) の強い輝線が観測されている。流星の場合には 388 nm 近傍に鉄等の多くの輝線が発光するために低分散分光観測では CN の分離が困難であり、 $R > 500$  の S/N が充分高いデータが必要であると考えられる。

我々は紫外線高感度ハイビジョンカメラおよび UFO Capture による流星のスペクトルの自動検出システムの構築によって紫外線から可視光の高品位な星間粒子の流星の高分散スペクトルを取得することを目指している。 [17, 18]。

#### 4. 終わりに

星間粒子の流星スペクトルは太陽系と他の恒星系との元素組成比の相違を知る有効な手段である。特に波長 300-400nm には多くの金属輝線以外に、含水鉱物や有機物の存在を示唆する CN や OH の輝線があり、太陽系以外の惑星形成に関する新しい知見が得られる重要な波長帯である。

紫外線に感度を持つイメージ・インテンシファイアが多少高価ではあるが、近年、紫外線用 CCTV レンズが市販されたために比較的容易に紫外線の高感度ビデオカメラを構築できるようになった。また、ハイビジョンのホームビデオが普及したことにより、限界等級が暗くなるばかりでなく、 $R=500$  の分光観測が容易になった。

近年の写真やビデオ観測の結果から、高感度のビデオ観測によって肉眼等級 (4.5-2 等級) に達する 0.1-1mg 程度の星間粒子の流星を数時間から 10 日程度に 1 個の確率で観測できると見積もられる。紫外線-可視光・高感度ハイビジョンカメラおよび UFO Capture の組み合わせによって星間粒子の流星の高品位な高分散スペクトルを取得することは実現可能性が充分高い。

本研究は日本宇宙フォーラムの「宇宙環境利用に関する公募地上研究」、国立天文台の特別研究推進経費および、すばる望遠鏡 R&D 経費、理研の産業界連携制度予算、甲南学園平生太郎基金科学研究奨励助成金等の援助により推進されている。

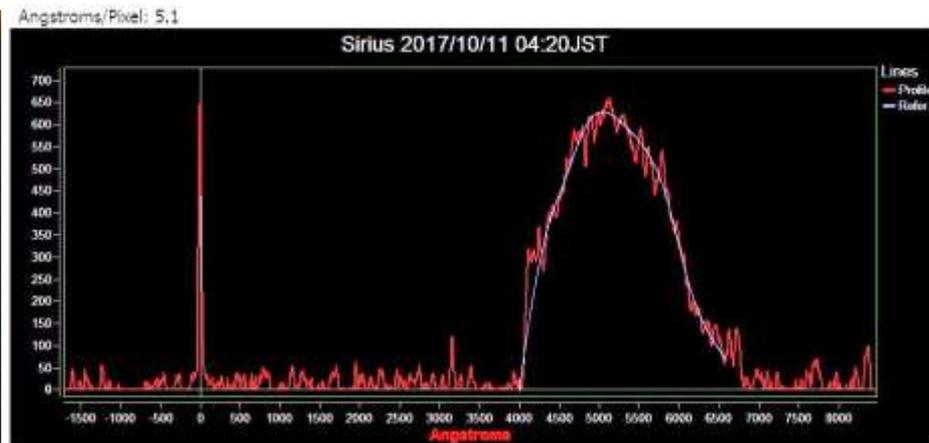
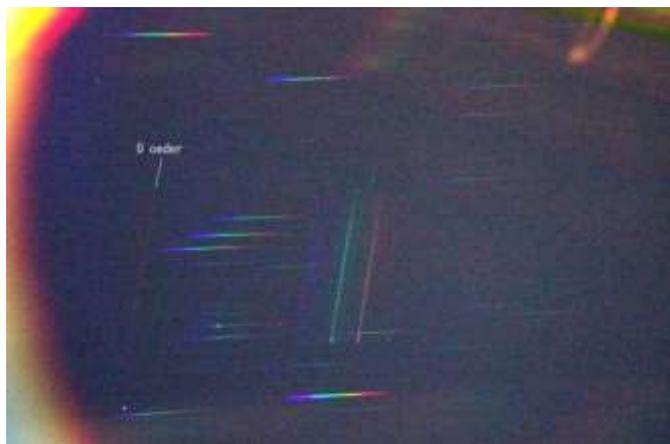
#### 参考文献

- [1] W.J. Baggaley, S.H. Marsh, S. Close, "Interstellar Meteors", *Proc. Dust in Planetary Systems, ESA SP-643*, 27-32 (2007).
- [2] M. Hajduková Jr., A. Hajduk, "Mass Distribution of Interstellar and Interplanetary Particles", *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, **36**, 15 - 25, (2006).

- [3] K.A. Hill, L.A. Rogers, R.L. Hawkes, “High Geocentric Velocity Meteor Ablation”, *A&A* **444**, 615-624 (2005).
- [4] D.D. Meisel, D. Janches, J.D. Mathews, “Extrasolar Micrometeors Radiating from the Vicinity of the Local Interstellar Bubble”, *ApJ*, **567**, 323-341, (2002).
- [5] B.L. Kashcheyev, S.V. Kolomiyets, “Interstellar particle Detection and Selection Criteria of Meteor Streams”, *Proc. the Meteoroids 2001 Conference*, **ESA SP-495**, 643 - 650, (2001).
- [6] R.L. Hawkes, S.C. Woodworth, “Optical detection of two meteoroids from interstellar space”, *J. R. Astron. Soc. Can.*, **91**, 218, (1997)
- [7] S.C. Woodworth, R.L. Hawkes, “Optical Search for High Meteors in Hyperbolic Orbits”, *ASP Conf. Ser.*, **104**, 83, (1996)
- [8] 国立天文台編, “理科年表”, (2008).
- [9] 前田 幸治, “TV観測による光度分布”, *ビデオ流星広報* **13**, 13-15, (1993)
- [10] S. Abe, H. Yano, N. Ebizuka, M. Sugimoto, T. Kasuga, J. Watanabe, “Twin Peaks of the 2002 Leonid Meteor Storm Observed in the Leonid MAC Airbone Mission”, *PASJ.*, **55**, 559-565, (2003)
- [11] 前田幸治, 影山和久, 海老塚昇, “大出現した2006年オリオン群の自動TV観測”, 第3回始原天体研究会, 国立天文台, (2006), [http://www5b.biglobe.ne.jp/~maeda/showers/2006Orion\\_3rd.pdf](http://www5b.biglobe.ne.jp/~maeda/showers/2006Orion_3rd.pdf)
- [12] 前田幸治, 影山和久, 海老塚昇, 阿部新助, “自動観測による流星スペクトルの観測と分類”, 第4回始原天体研究会, 国立天文台, (2007)
- [13] 海老塚 昇, 羽根坂 円彩, 唯野 歩, 新山 陽子, 小館 香椎子, 川手 俊憲, 下寄 ゆり, 大西 浩次, 矢野 創, 阿部 新助, 杉本 雅俊, 渡部 潤一, 前田 幸治, 大塚 勝仁, 流星分光ネットワーク, “流星および流星痕の分光観測”, 第12回天体スペクトル研究会集録, pp.36-41, (2008)
- [14] 海老塚 昇, 矢野 創, 阿部 新助, 杉本 雅俊, 春日 敏測, 富士 航, 平松 正顕, 渡部 潤一, “紫外線高感度ハイビジョンカメラおよび対物分光器の開発へしし座流星群分光観測ネットワーク”, 第8回天体スペクトル研究会集録, pp.45-48, (2003)
- [15] 海老塚 昇, 矢野 創, 阿部 新助, 杉本 雅俊, 春日 敏測, 富士 航, 平松 正顕, 渡部 潤一, “流星分光観測装置の開発”, 第8回レオニード流星群観測小研究会講演集, pp.72 -74, (2003).
- [16] S. Abe, N. Ebizuka, H. Yano, J. Watanabe, J. Borovika, “Search for OH(A X) and detection of N<sub>2</sub><sup>+</sup>(B X) in ultraviolet meteor spectrum”, *Advances in Space Research*, **39**, 538-543, (2007)
- [17] 海老塚 昇, 梶野 文義, 阿部 新助, 中村 卓司, “宇宙から見た流星”, 第2回天文台サイエンス・シンポジウム集録, 梶野 文義 他 編, pp. 239-244, (2008)
- [18] 海老塚 昇, 前田 幸治, 中村 卓司, 流星分光ネットワーク, “太陽系外からの流星の分光観測”, 第13回天体スペクトル研究会集録, in press, (2008)

# RSpecソフトウェアを使った流星スペクトル分類の考察

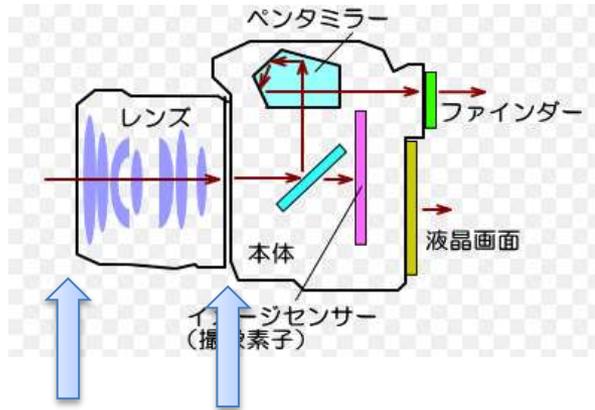
2018年7月1日 流星物理セミナー  
渋谷区立 勤労福祉会館 第1洋室(2階)  
VSOLJ 永井和男





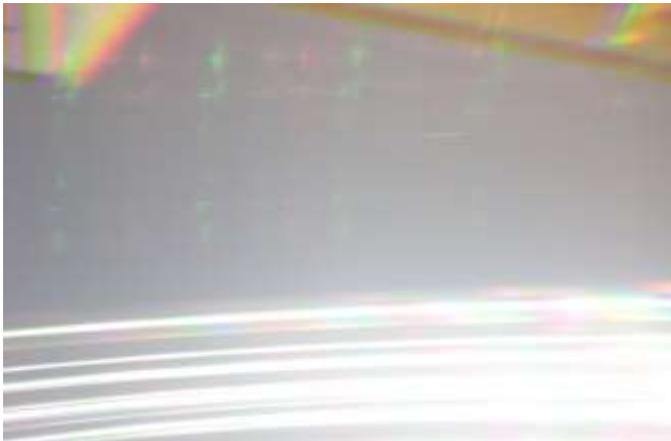
# 回折格子の位置

回折格子の位置



レンズの前    レンズの後ろ

光害地ではレンズの前では街灯が写ってしまう



レンズフードを付ける。ただし、斜めに



これでも良くなければレンズの後ろに付けます。フードも通常品が使えます。

ただし、基本的にフォーカスが合いませんので、推奨は出来ません。

※レンズを外して裏から貼る



# 分光器



- ブレード回折格子(300gr)を用いた対物式分光器です
- CANON EOS Kiss X4, f=28mm ISO6400 3秒露出でインターバル4秒の固定撮影です
- TV観測と同方向に向けて動体検出された時刻の画像をチェックする

# 回折格子

## • グレーティング（レプリカとブレード）



回折格子シート レプリカ500

ケニス

[カスタマーレビューを書きませんか？](#)

価格: ¥ 4,817

在庫あり。在庫状況について

通常配送を利用した場合、最短で5/2~4のお届け予

この商品は、SUZUMORI【4/29~4/30休業】が販  
ATM・ネットバンキング・電子マネー払いが利用で

新品の出品: 4 ¥ 4,374より

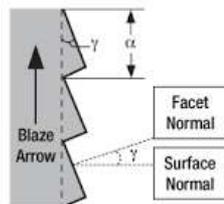
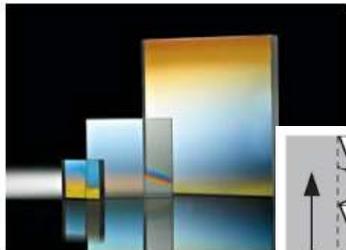
- レプリカ数 500本/mm
- 大きさ 300×150mm

この商品の仕様

最初はこれで

いつかは  
これに

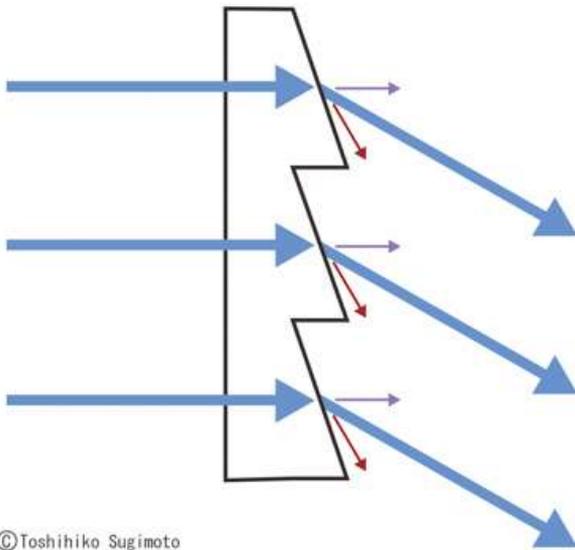
## 透過型ブレード回折格子



| 格子周波数<br>(本/mm) | 波長域 (nm)  | ブレード角度 | 寸法 (mm)     | 商品コード   | 製品価格    | 注文数量別価格 | 購入           |
|-----------------|-----------|--------|-------------|---------|---------|---------|--------------|
| 300             | 400 - 700 | 17.5°  | 12.7 x 12.7 | #49-575 | ¥11,050 | 見様依頼する  | 3-100 Qty 購入 |
| 300             | 400 - 700 | 17.5°  | 25.0 x 25.0 | #49-579 | ¥13,650 | 見様依頼する  | 3-100 Qty 購入 |
| 300             | 400 - 700 | 17.5°  | 50.0 x 50.0 | #49-583 | ¥25,350 | 見様依頼する  | 3-100 Qty 購入 |
| 600             | 400 - 700 | 28.7°  | 12.7 x 12.7 | #49-576 | ¥11,050 | 見様依頼する  | 3-100 Qty 購入 |

# ブレード回折格子

図3 ブレード回折格子

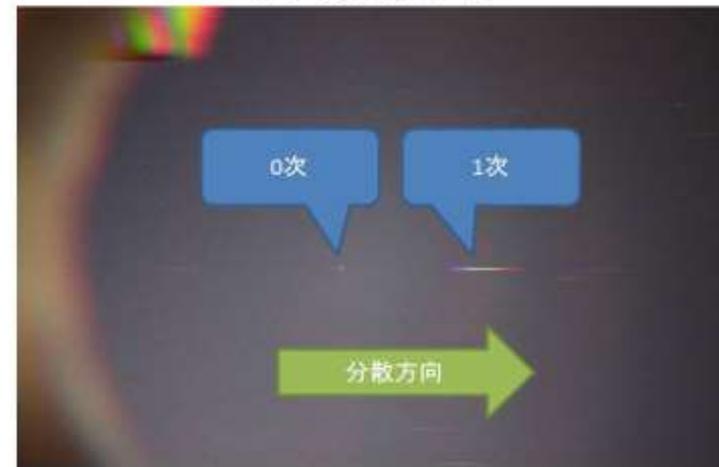


©Toshihiko Sugimoto

- ・ 回折格子の溝の角度を斜めにする事で、ほとんどの光の成分を一つの方向に回折させることができる。
- ・ すべての波長の光を 100% 曲げるのは難しく、一部は他の次数で曲がってしまう。

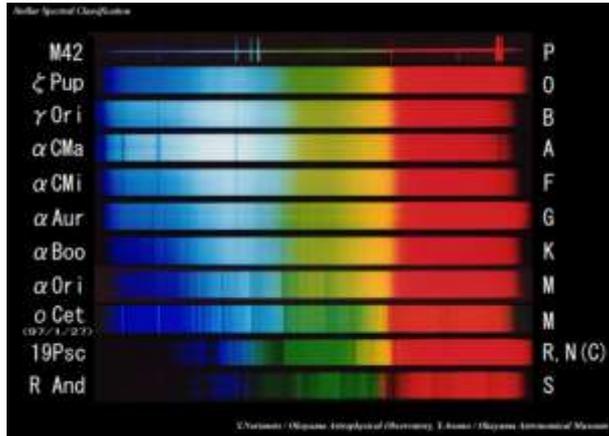
- ・ ブレード回折格子は、特殊な回折格子です。エシェレット格子とも呼ばれます。
- ・ 任意の回折次数において最大回折効率を得られるように最適化されています。
- ・ 要するに最大屈折を望む回折次数に集中され、他の次数は最小となっています。
- ・ 今回の回折格子は1次が最大となる物を使っています。

## 分散方向



流星TV観測用カメラは南側のベランダに設置した。今までの流星の進行方向を見ると上限方向に運動しているものが多く見られた。よって水平に分散するように回折格子を調整し取り付けてある。ブレード回折格子を用いたので右側の1次回折像が最も高い輝度になる。

# スペクトル型



## スペクトル分類法

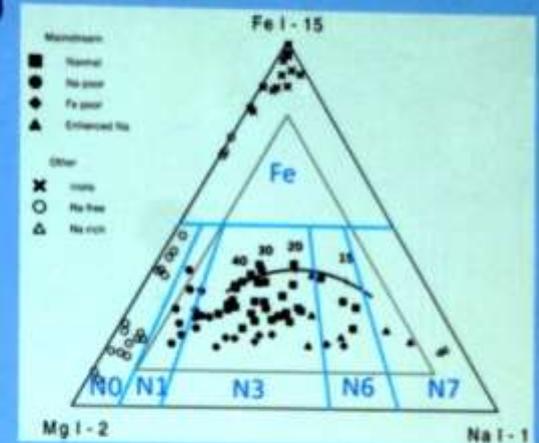
Borovička (\*1) の方法 (右図 黒字)  
Mg(マグネシウム)-Na(ナトリウム)-Fe(鉄)  
の3元素の強度比で、7種類に分類

This work (右図 青字)  
Borovičkaの方法に準じて6種類に分類  
ただし、暗い流星はこれとは別

スペクトルはMg(518.2nm)、  
Na(589.2nm)、Fe(526.9nm)の3本を基  
準に同定

スペクトルの強度比は一部は、強度  
を測定 (\*3) したが、ほとんどのス  
ペクトルは、目視で決めた

Mg-Na-Fe 三角ダイアグラム



\*1 J. Borovička, P. Koten, P. Spurný, J. Boček, R. Štork., Icarus 174, 15 (2005)

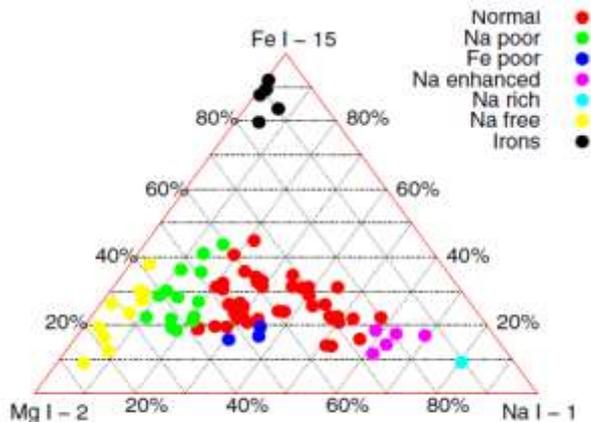


Fig. 8. Classification of meteor spectra. The ternary graph of the Mg I (2), Na I (1), and Fe I (15) multiplet relative intensities. Every group of meteoroids is represented with a different symbol.

恒星のスペクトル分類は波長強度や吸収線の出方で決められ、主に恒星の温度(と組成)に依存する

流星はMg, Na, Feの輝線強度比で分類される(J.Borovička et al., 2005)

宮崎県の前田さんは更に独自の分類法を用いている

# スペクトル分類するには

## 撮影

- 流星スペクトルを撮影する
- 高感度カメラ / 短時間露出 / 撮影画像の確認

## 波長

- 波長較正して輝線の波長を測定する
- 恒星スペクトルを撮影してピクセルと波長の関係(分散)を知っておく

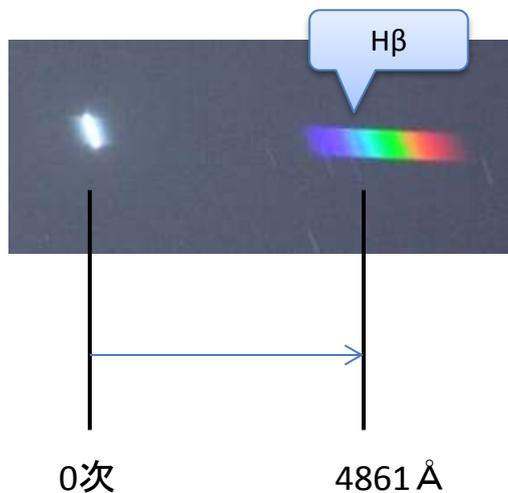
## 強度

- 分光感度補正
- 輝線の強度を分光標準星を使って補正する(機械感度・大気補正する)

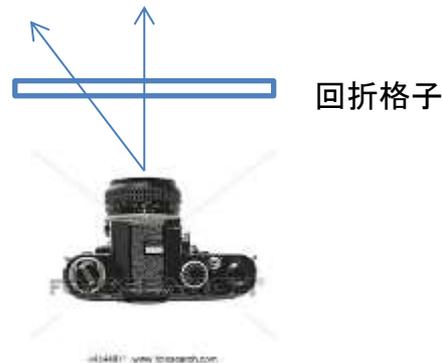
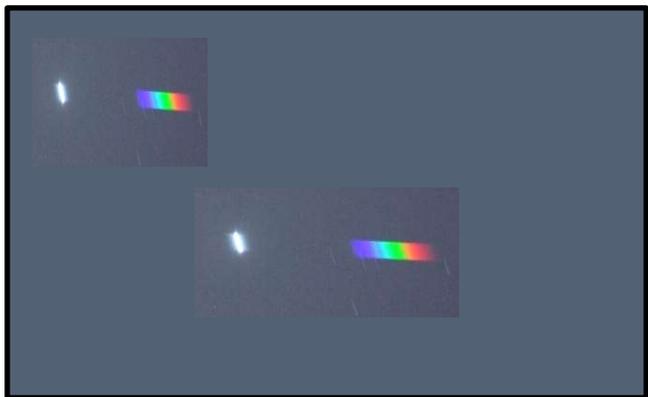
## 組成比

- Mg, Na, Fe の輝線強度測定
- これらの強度比を求めて三角ダイアグラムに当てはめる

# 波長較正

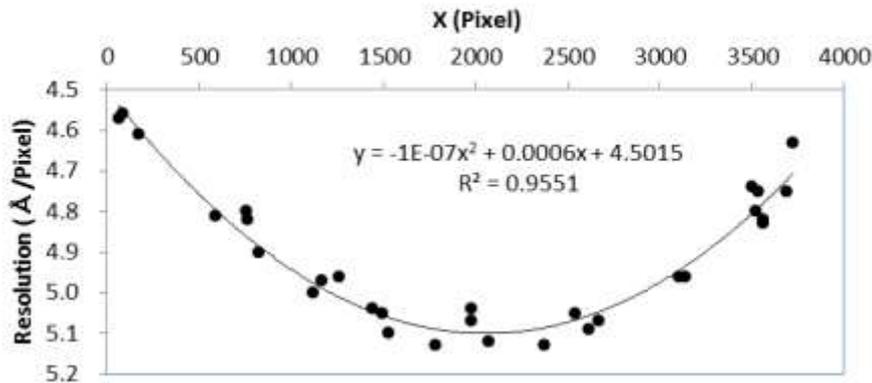


- 分散を求める
  - A型星を撮影
    - 0次からH $\beta$ までのピクセル数を数える
    - 分散=4861/ピクセル数 (Å/pixel)
  - 流星スペクトルの輝線が写ったら
    - 0次からのピクセル数を数える
    - 輝線の波長 = ピクセル数 x 分散
- ところが！
  - 画像の場所によって分散が異なる

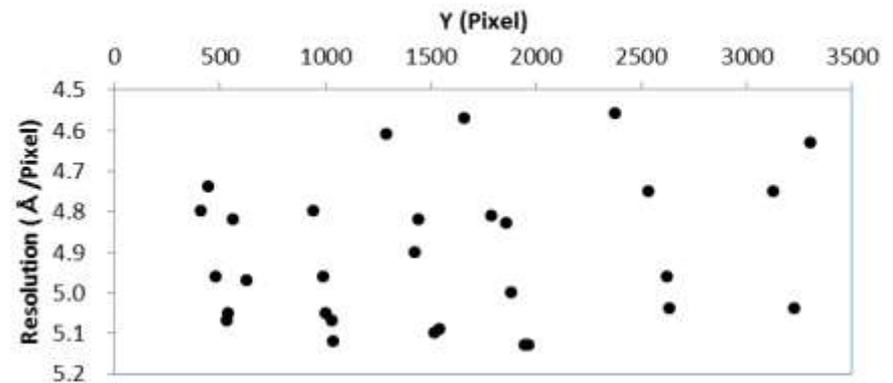


# 軸別の波長分解能

Resolution based on X axis



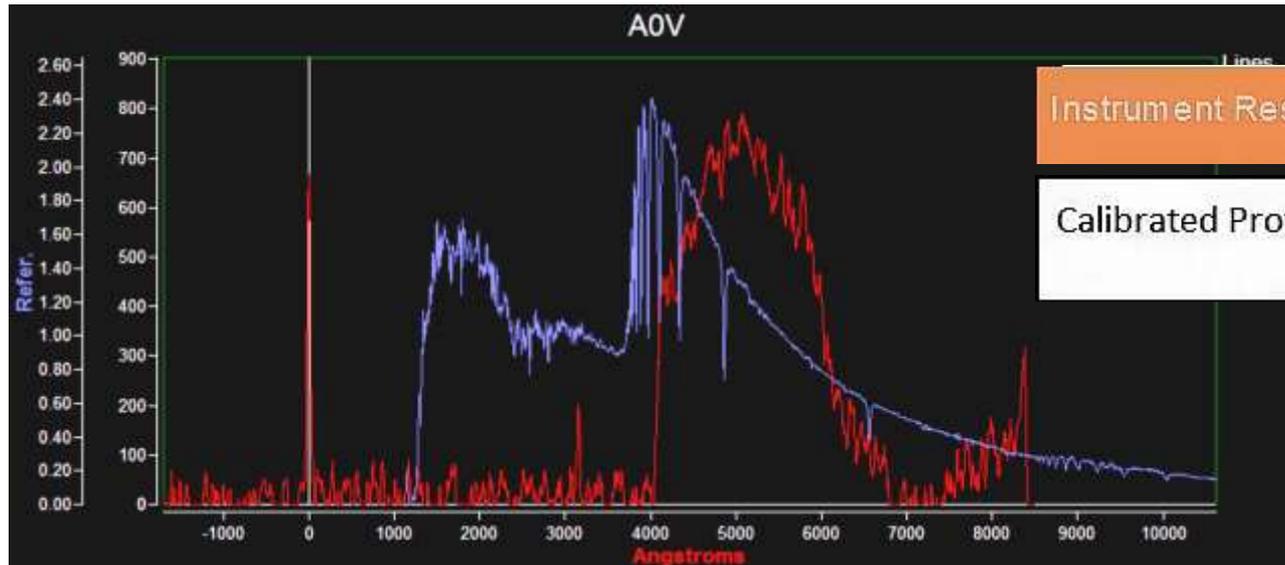
Resolution based on Y axis



- X軸を関数とした波長分解能は二次関数にフィットできた
  - この二次関数からのズレ量の標準偏差を測定誤差と定義出来る
  - 図中の二次関数はエクセルの近似式を用いたもの
- Y軸方向は波長分解能に相関が無かった

# 分光感度補正

- 機械のレスポンスや大気状態など一切合切を含めて分光標準星のレスポンスを使って補正する
- 青はA型星のスペクトル、赤は撮影したA型星のスペクトル



$$\text{Instrument Response} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Library Spectrum}}$$

$$\text{Calibrated Profile} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Instrument Response}}$$

ノイズや吸収線を  
除去して求める

- **機械のレスポンス(周波数特性)**は標準星のスペクトルを使って求めます
  - 撮影したスペクトルをライブラリのスペクトルで割る
- 流星のスペクトルが撮影出来たら**機械のレスポンス**で割ると正しいレスポンスが得られる
- 機械のレスポンスを求める時は標準星と流星は同じ日の同じ高度にする
  - 時刻も同じだとさらに良い
  - 流星観測では難しい(いつ、どこに現れるか分からない)

# 分光解析ソフト

- BeSpec (美星天文台)
  - <http://www.bao.city.ibara.okayama.jp/soft/bespec/index.html>



- 虹星 (やまねこランド)
  - <http://yamaneco.webcrow.jp/nijibosi.html>



- BASS Project
  - すがわらさんが使ってます

- Visual Spec
  - <http://www.astrosurf.com/vdesnoux/>



- ISIS
  - <http://space.mit.edu/asc/isis/>



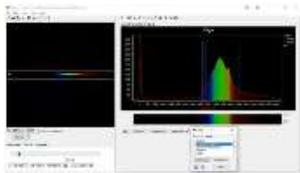
- 全てFree
  - 感想：スリット式に適していると思います



# RSpec

- RSpec / Real-time Spectroscopy

- <https://www.rspec-astro.com/>



## RSPEC ASTRONOMICAL SPECTROSCOPY SOFTWARE

RSpec makes astronomical spectroscopy easy. Our award winning Windows program takes you up a gentle learning curve with a collection of short tutorial videos. You'll be delighted at how quickly you'll be...

**\$109<sup>00</sup>**



## STAR ANALYSER 100 GRATING

The Star Analyser 100 (SA-100) was designed specifically for amateur astronomical spectroscopy. It can be mounted on your telescope just like any other 1.25" filter. It's easy to use, and...

**\$195<sup>00</sup>**

★★★★★ 5 reviews

- すいません 有料です
- グレーティングも売っています
- 0次を基準にあつかうソフト
  - 波長較正
  - 分光感度補正
  - 標準星のライブラリ
  - FTIS以外に Jpeg や AVI も扱える
  - ノイズ・吸収線の除去

Click this link to view a video of RSpec in action.

Measure

- Show Measure lines
- Pixel: 429.1
- Angstrom: 4,976
- Area: 529,265

# 五藤テレスコープ

- 「スペクトル観測キット」を販売開始 ¥48,000-  
- [http://gototelesco.co.jp/spectroscopy\\_kit.html](http://gototelesco.co.jp/spectroscopy_kit.html)



¥4,500-

AD-58(オプション)でデジタル一眼レフに取付

お問い合わせ LINK お問い合わせ

 五藤テレスコープ株式会社

Copyright(C)2013 GOTOTELESCOPE INC. All Rights Reserved

HOME 会社案内 製品 製品情報 認定情報 ブログ ガラリー

スペクトル観測キット(回折格子STARANALYSER100・解析ソフトRSpec日本語版)  
製品チラシもございます(PDFファイル形式) 詳しくは [こちら](#)  
解析ソフトRSpec 紹介ビデオを追加(Windows Media Player形式) 詳しくは [こちら](#)

- ・スペクトル観測入門キット(回折格子・解析ソフト・小冊子) 価格 48,000円(消費税別)
- ・オプション AD-58(回折格子カメラフィルターネジ取付アダプタ) 価格 4,500円(消費税別)  
(58mmフィルター径対応:他のフィルター径に取付する場合 市販のステップUP・DOWNリングが必要です)

※海外製品のため、円相場によって価格を変更する場合がございます

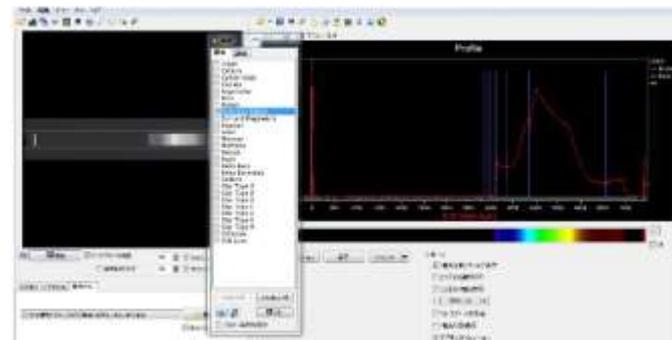


天体用カメラ用取付側

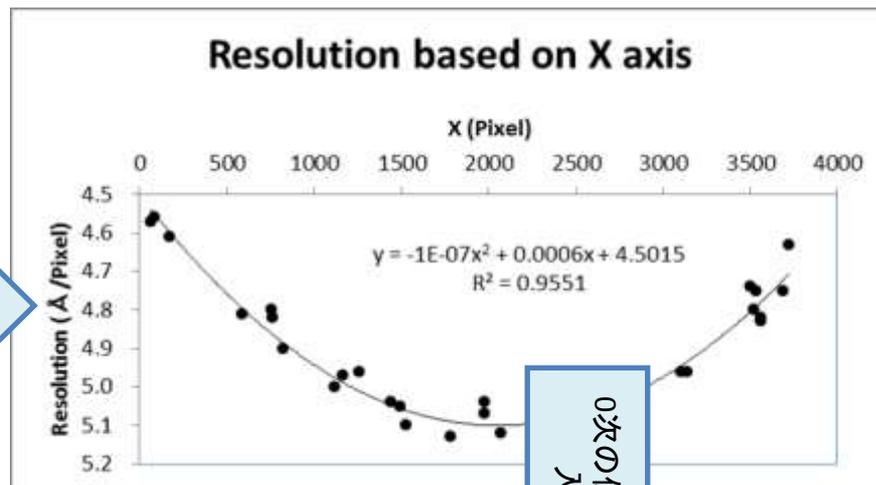


デジタル一眼レフ(58mm標準レンズ使用)で撮影したお星の安定シリウスのスペクトル

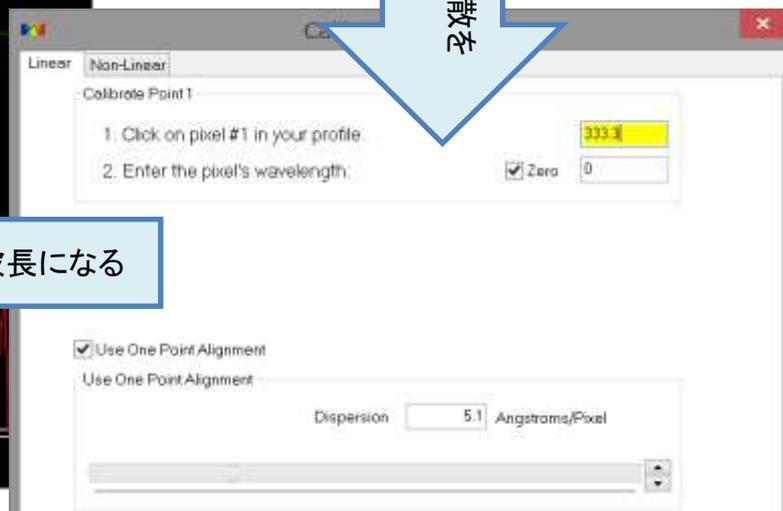
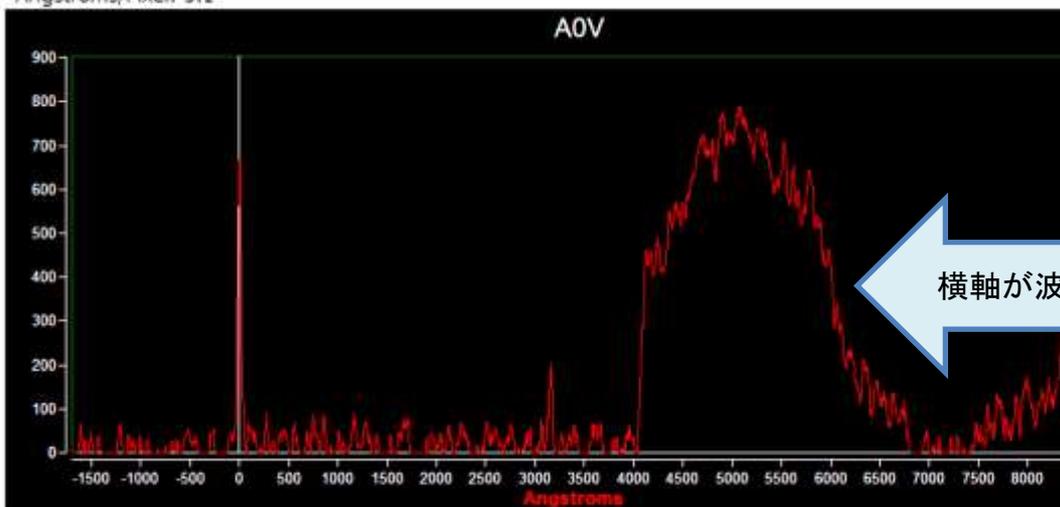
日本語表示



# 波長較正



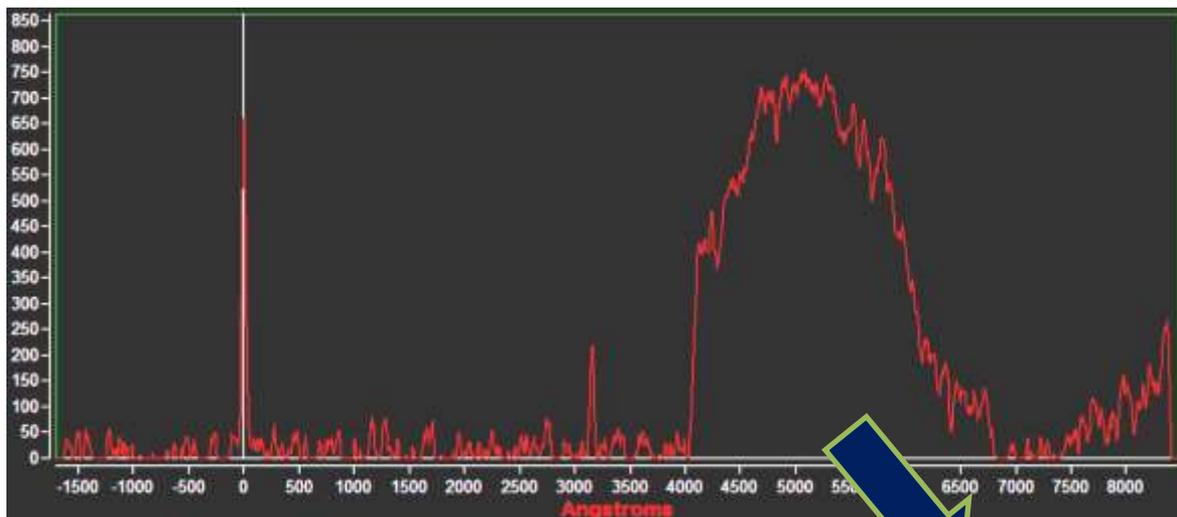
Angstroms/Pixel: 5.1



0次の位置と分散を  
入力する

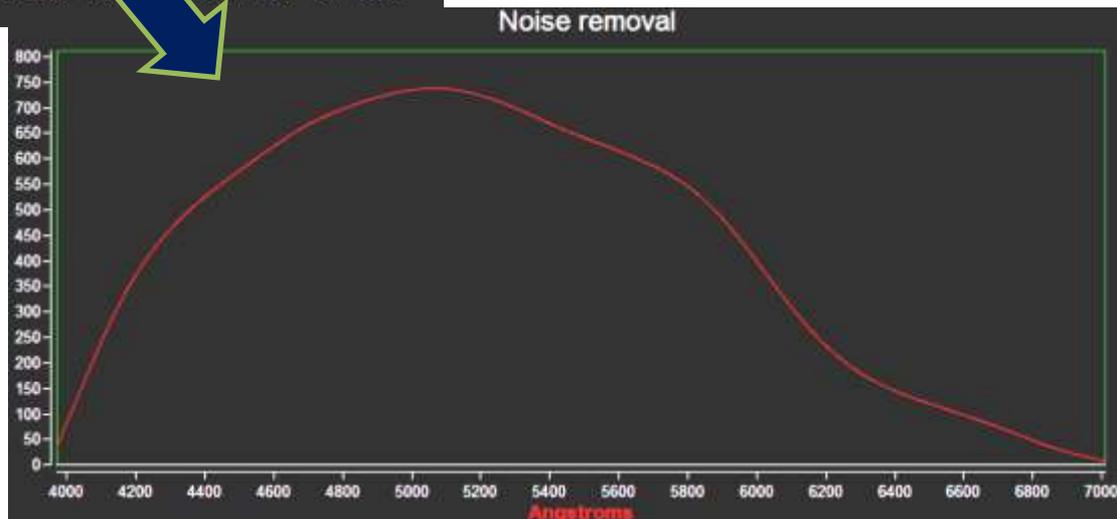
# 分光感度補正 Raw Spectrum

$$\text{Instrument Response} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Library Spectrum}}$$



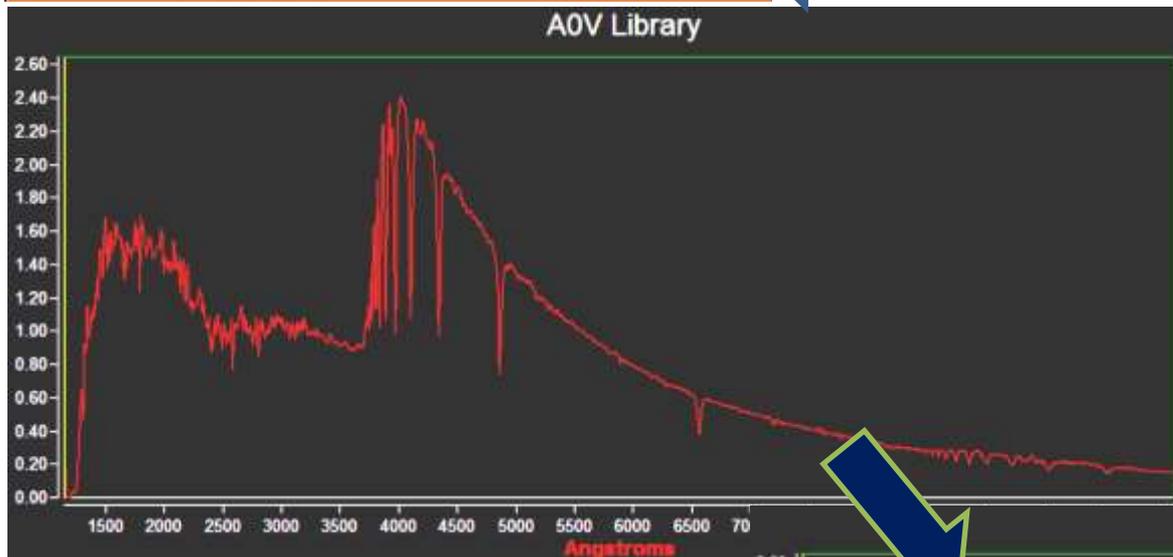
感度のある範囲を抜き取ってノイズを除去する

ノイズ除去はRspecのSpline Smoothing機能を使う



# 分光感度補正 Library Spectrum

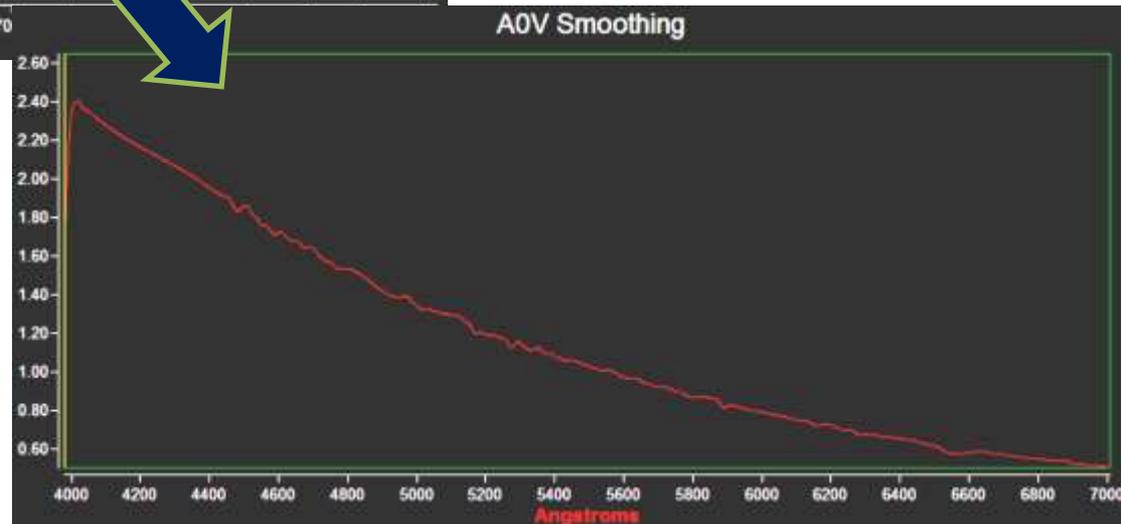
$$\text{Instrument Response} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Library Spectrum}}$$



撮影した星と同じスペクトル型のライブラリを読み込む

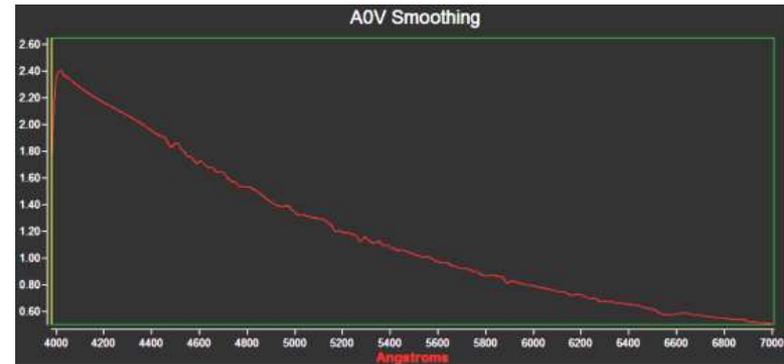
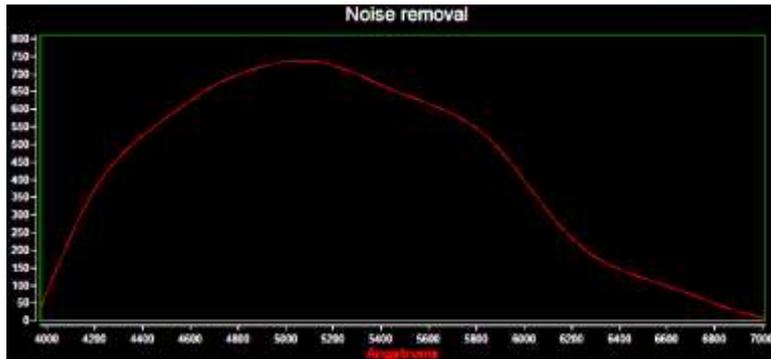
感度のある範囲を抜き取って吸収線を除去する

Rspecには吸収線除去の機能がある

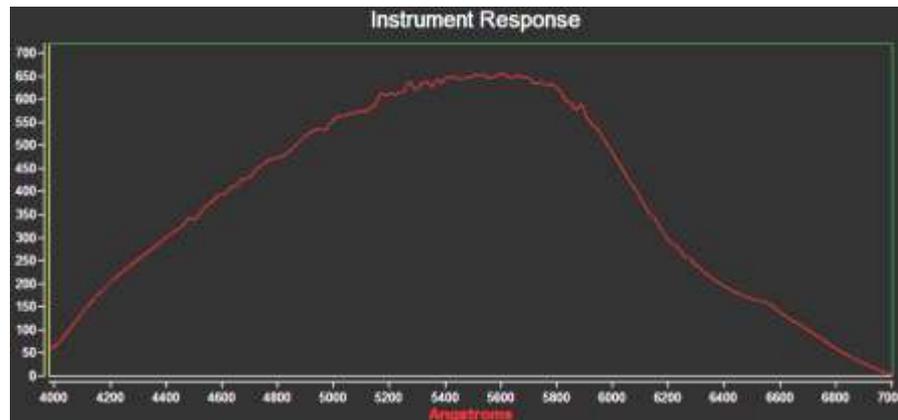


# 分光感度補正 Instrument Response

$$\text{Instrument Response} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Library Spectrum}}$$



÷

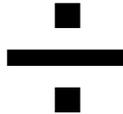
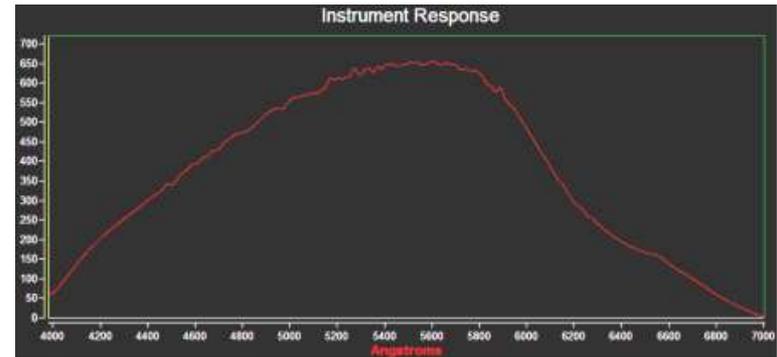
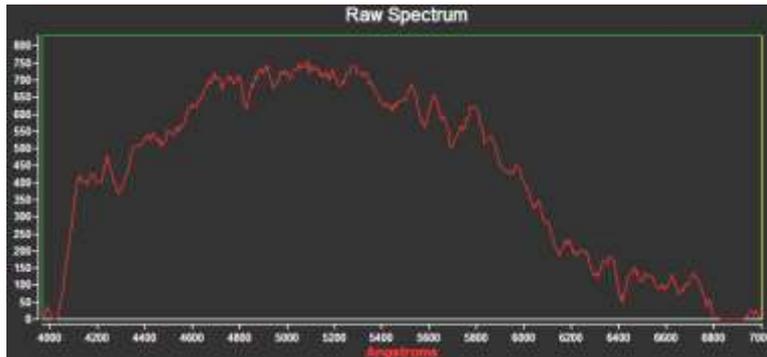


Raw を Library で割り算して Instrument Response を求める

この割り算も Rspec で行います

# 分光感度補正 Calibrated Profile

$$\text{Calibrated Profile} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Instrument Response}}$$



Raw を Inst. で割り算すれば分光感度補正が出来ます

この割り算もRspecで行います

Rawの所を流星スペクトルにすれば輝線の強度補正が行えます

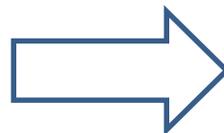
# 流星分光は（恒星との違い）



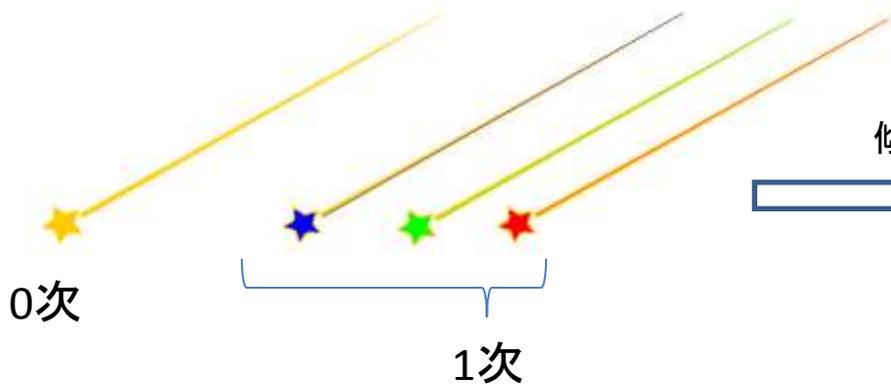
0次



1次



ビンングしてS/Nを上げてから解析する



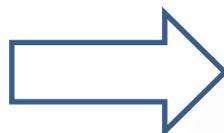
0次

1次

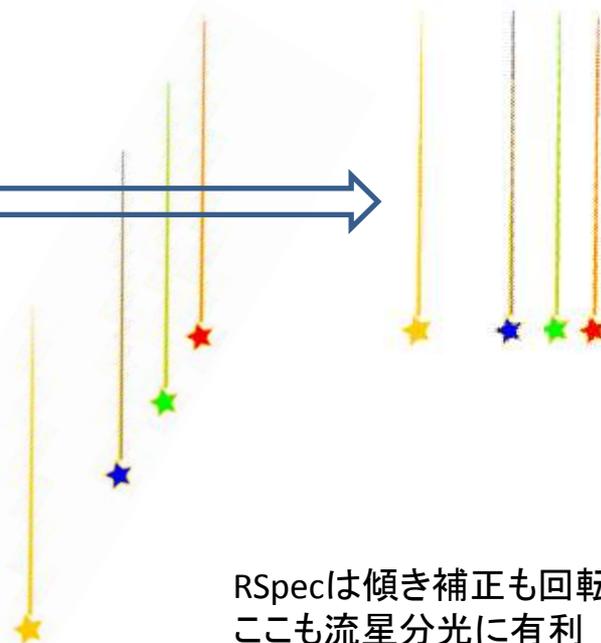
傾き補正



ビンングする前に  
輝線を立てる必要がある

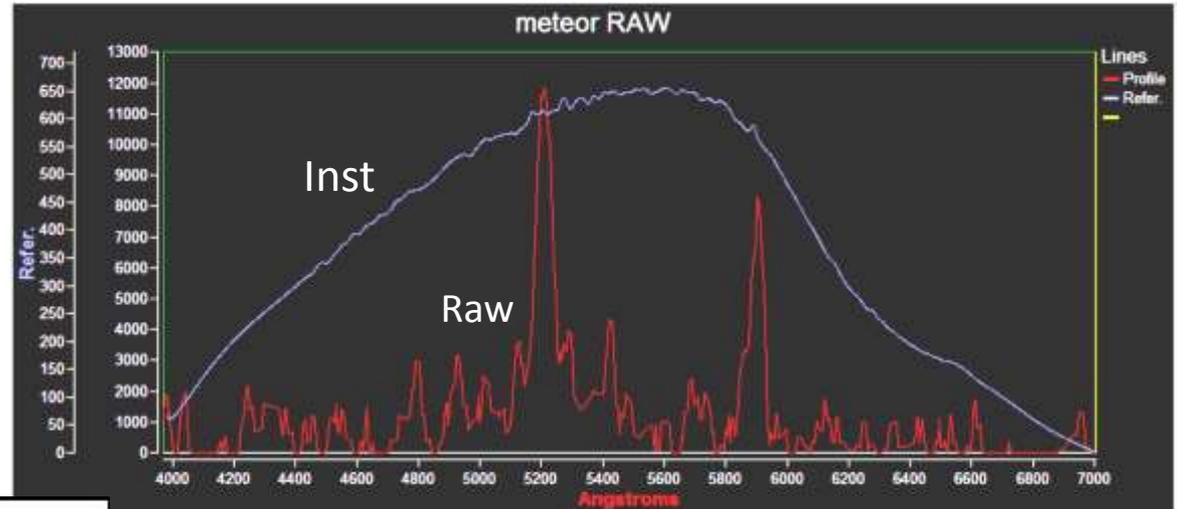
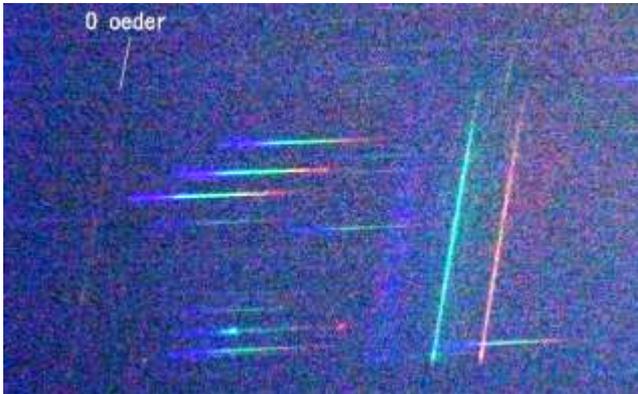


回転ではない



RSpecは傾き補正も回転も出来る  
ここも流星分光に有利

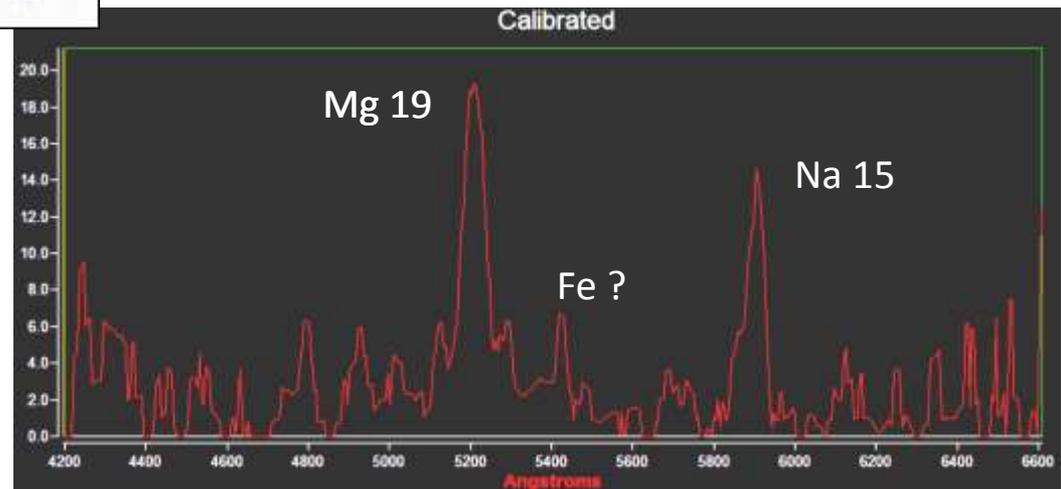
# Mg, Na, Fe の強度



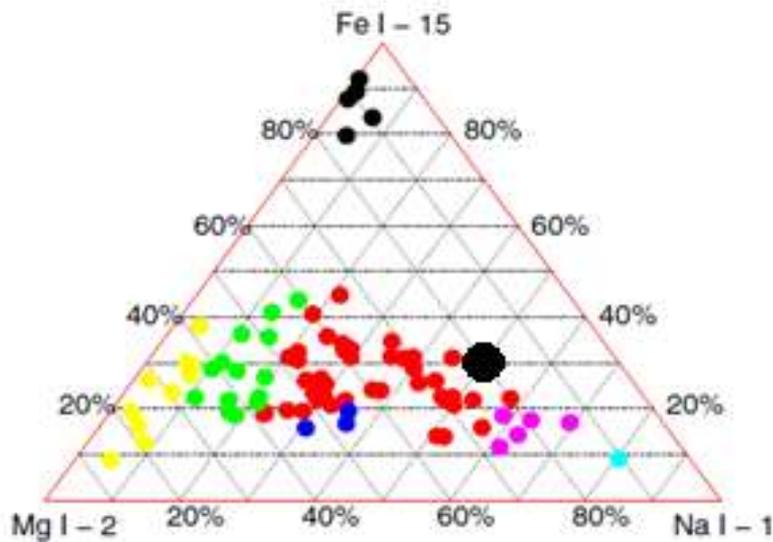
$$\text{Calibrated Profile} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Instrument Response}}$$



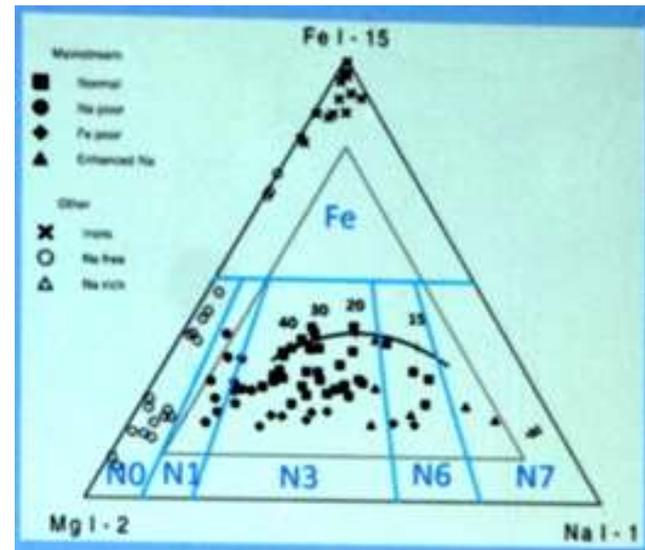
Mg 19, Na 15と  
言う強度を得た  
Fe?をFeとするならば  
6程度



# Na/Mg比 と Fe/Mg比



- Borovika式分類(左図)
  - Mg = 19, Na = 15 なので  $Na/Mg=0.8$
  - Feが6 なので  $Fe/Mg=0.3$
  - 分類はNormalとなる



- 前田さん式分類(右図)
  - N6付近

# まとめ

- 回折格子
  - 回折シート：安い、0次から順に暗くなる
  - ブレード：高い、+1次を明るくする事が出来る
- 対物式分光器
  - レンズの前に回折格子：基本形(お勧め)、外灯が入ってしまう
  - レンズの後ろに回折格子：基本的にピンボケ、光害が避けられる
- 手順
  - 撮影
  - 傾き補正・回転・ビニング
  - 波長較正
  - 分光感度補正
  - 解析はRspecで全て出来ます
- 前準備
  - シリウスやベガなどの明るいA型星で分散量や機械レスポンスを求めておく
- 課題
  - Instrument Responseを作る時のRaw Spectrumは流星と同じ高度・同じ頃の時刻が望ましい

- Rspecは
  - 0次基準で処理・解析できる
  - 傾き補正が出来る

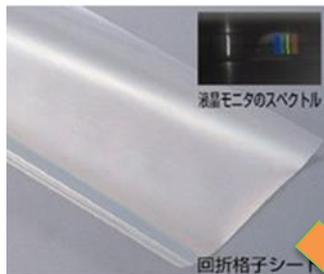
# この夏の流星スペクトルを眺める

2018/10/7 第150回 流星物理セミナー

渋谷区立 勤労福祉会館 第1洋室(2階)

平塚市博物館 天体観察会 流星分科会 永井和男

# 流星スペクトルの撮影方法



レンズの前に回折格子を貼る

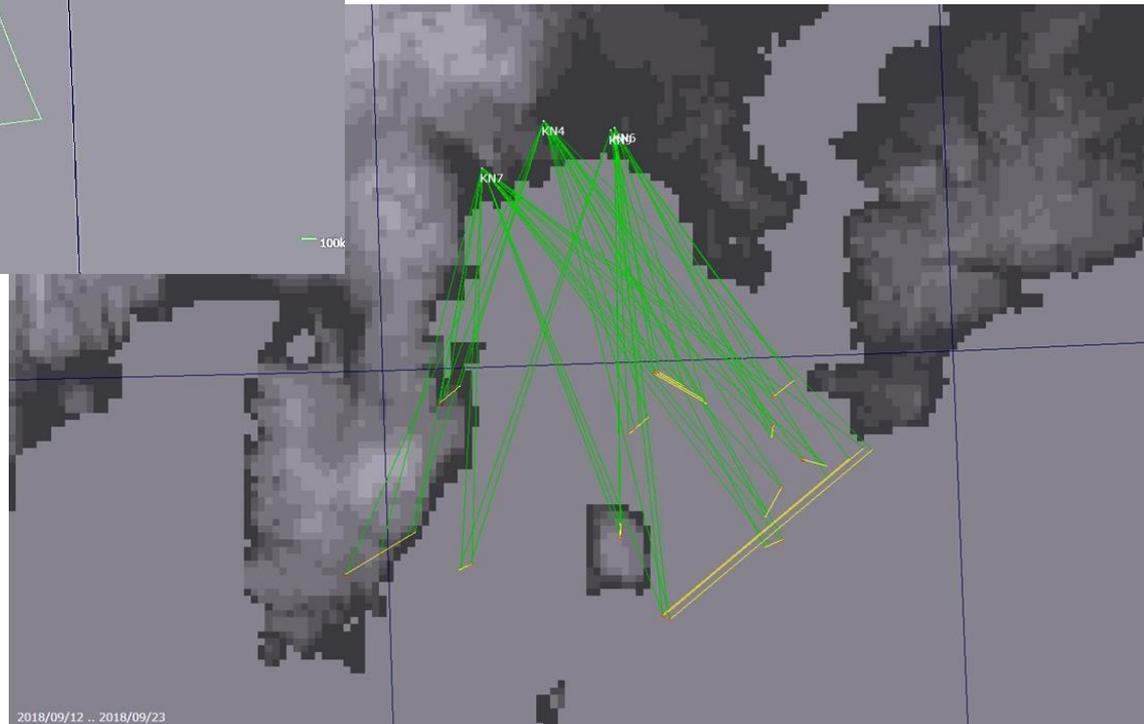
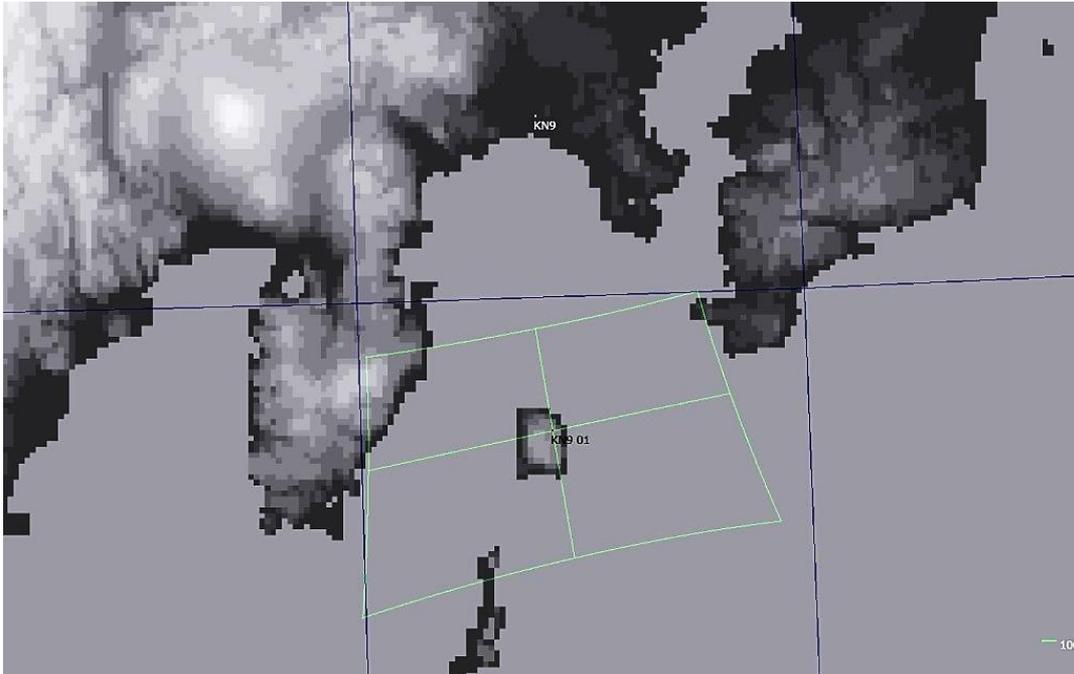


撮影システム  
イメージャー  
レンズ  
FOV  
回折レプリカ  
監視ソフト

SONY IMX225  
f=8mm  
30 × 20deg程度  
140本/mm  
UFO Capture V2

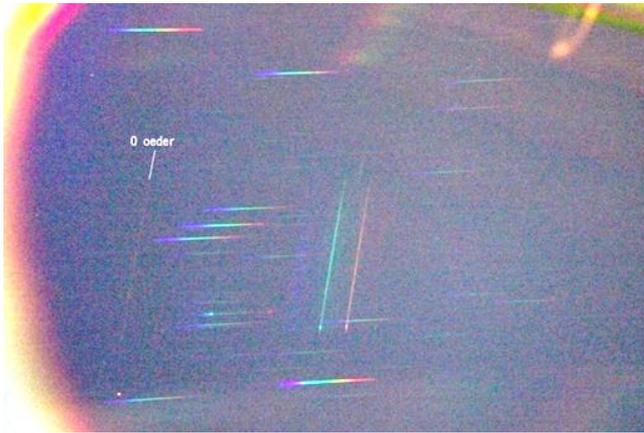
# 監視方向

大島上空 100km



藤井 KN2  
秋山 KN4  
岡澤 KN6  
清水 KN7  
鈴木 KN8  
永井 KN9  
萩原 KNA  
横関 KND

# 撮影システム 過去・現在・未来



## 過去

ブレード回折格子

300本/mm

CANON EOS Kiss X4

f=28mm ISO6400 / 3秒露出



## 現在 2018/5~

回折レプリカ 140本/mm

SONY IMX225

f=8mm, 30 × 20deg程度

UFO Capture V2

1次が暗い



## 未来

ブレード折格子

200本/mm



# 撮影システムの Pros Cons

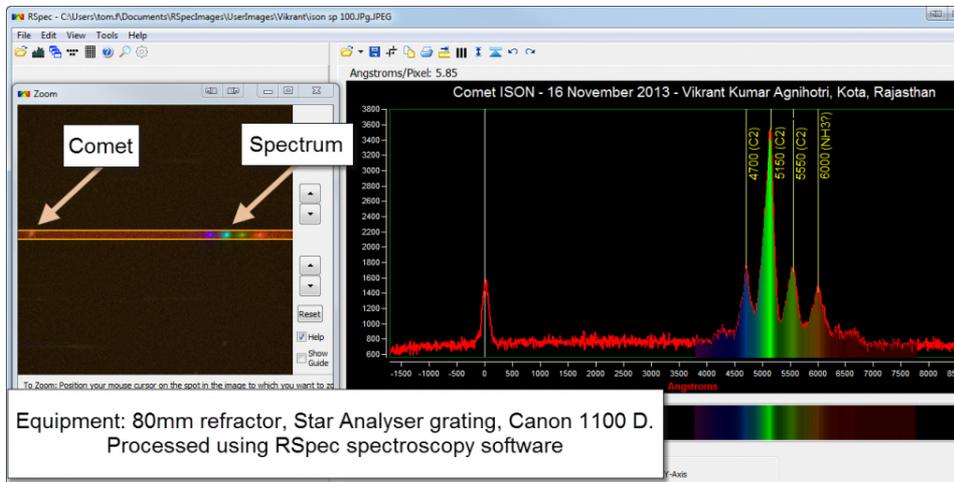
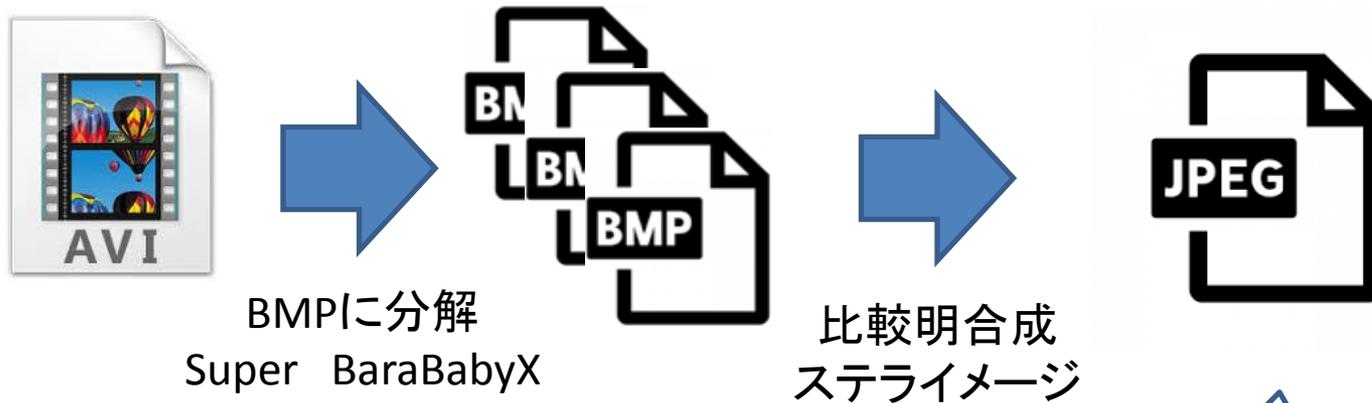
- 回折レプリカ
  - 安価
  - 適正分散を調べる際に優位
  - 0次が明るく、解析したい1次が暗い
  - 結果、流星スペクトルの撮影効率が悪い(写らない)
- ブレード回折格子
  - 高価
  - 1次が明るく、解析しやすい(S/Nが向上する)
  - 撮影の効率も良い(検出数が増やせる)
- EOS Kiss X4からIMX225高感度ビデオカメラ
  - 回折レプリカでもたくさん流星が写るようになった
  - UFO Captureが検出してくれる
  - UA2解析もできる
  - モノクロになってしまった(実は連続スペクトルは解析に都合が良い)
- 最終的には
  - 高感度ビデオカメラにブレード回折格子を付ける事になります
  - SONYの $\alpha$ 7...も最終形

# 検出数

| No | 年月      | localtime        | Wavelength(nm)                    | amag  | a      | q     | e      | p       | peri    | node    | incl    | stream |
|----|---------|------------------|-----------------------------------|-------|--------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 1  | 2018年5月 | M20180523_022840 | 84,106,121,127,144                | -1.31 | 5.417  | 1.003 | 0.815  | 12.613  | 168.509 | 61.325  | 45.832  | spo    |
| 2  | 2018年7月 | M20180718_015903 | 91,104,113,134,148                | -3.88 | -0.085 | 0.949 | 12.113 | 0.000   | 201.753 | 114.819 | 166.073 | spo    |
| 3  |         | M20180729_211540 | 111,130,140                       |       |        |       |        |         |         |         |         |        |
| 4  |         | M20180731_223326 | 70,91,103,112,129,134,141,145,149 | -3.21 | 3.336  | 0.950 | 0.715  | 6.094   | 147.834 | 128.051 | 110.910 | J5_Per |
| 5  | 2018年8月 | M20180801_033809 | 130                               | -1.01 | 1.842  | 0.087 | 0.953  | 2.501   | 150.911 | 308.253 | 25.168  | J5_sdA |
| 6  |         | M20180803_021629 | 137,152                           |       |        |       |        |         |         |         |         |        |
| 7  |         | M20180809_221038 | 131,146                           | 0.47  | 1.127  | 0.777 | 0.310  | 1.196   | 269.231 | 136.653 | 28.574  | spo    |
| 8  |         | M20180810_010321 | 128                               | -0.30 | 0.641  | 0.167 | 0.740  | 0.514   | 344.729 | 136.769 | 45.331  | spo    |
| 9  |         | M20180810_031427 | 106,119,124,139                   | 0.23  | 0.537  | 0.060 | 0.889  | 0.394   | 359.429 | 136.856 | 42.796  | spo    |
| 10 |         | M20180810_033741 | 125,139                           | 0.05  | 0.555  | 0.096 | 0.828  | 0.413   | 0.270   | 136.871 | 25.981  | spo    |
| 11 |         | M20180810_035102 | 131                               | 0.76  | 0.613  | 0.209 | 0.659  | 0.480   | 357.341 | 136.880 | 17.291  | spo    |
| 12 |         | M20180810_234622 | 108,127,139                       | -2.09 | 28.125 | 0.962 | 0.966  | 149.214 | 153.771 | 137.677 | 113.273 | J5_Per |
| 13 |         | M20180811_041718 | 129,144                           | 0.47  | 0.562  | 0.108 | 0.807  | 0.421   | 1.390   | 137.857 | 89.520  | spo    |
| 14 |         | M20180813_040111 | 100,109,125,130,138,000           | -1.90 | 1.145  | 0.857 | 0.251  | 1.225   | 103.497 | 139.767 | 104.789 | J5_Per |
| 15 |         | M20180813_215801 | 126                               | 0.67  | 1.553  | 0.713 | 0.541  | 1.937   | 261.049 | 140.484 | 23.244  | spo    |
| 16 |         | M20180817_203658 | 108,125,130,137,144               | -1.93 | 7.070  | 0.905 | 0.872  | 18.808  | 140.586 | 144.275 | 114.776 | J5_Per |
| 17 |         | M20180819_030951 | 102                               | -0.69 | 2.447  | 1.011 | 0.587  | 3.830   | 183.524 | 145.498 | 26.459  | spo    |
| 18 |         | M20180820_001819 | 85,107,127,141                    | 0.08  | 2.400  | 0.221 | 0.908  | 3.719   | 309.984 | 146.344 | 14.563  | spo    |
| 19 | 2018年9月 | M20180907_200953 |                                   |       |        |       |        |         |         |         |         |        |
| 20 |         | M20180918_221248 |                                   | -2.39 | -8.125 | 0.814 | 1.100  | 0.000   | 230.434 | 175.324 | 135.322 | spo    |
| 21 |         | M20180927_224833 |                                   | 1.29  | 2.248  | 0.978 | 0.565  | 3.372   | 21.126  | 4.153   | 1.738   | spo    |

8月は多くのスペクトルが取得できました  
 ペルセ群よりも散在が多かった

# スペクトル解析手順



これを  
RSpecで解析する



M20180718\_015903 spo



M20180731\_223326 J5\_Per



2018/07/31 22:33:26 [LIT] 0024

000 100 100 100 IMX225 8mmF1.2 KNS 01

# M20180801\_033809 J5\_sdA



# M20180813\_040111 J5\_Per



M20180813\_215801 spo



M20180817\_203658 J5\_Per



# 解析例 M20180523\_022840 spo

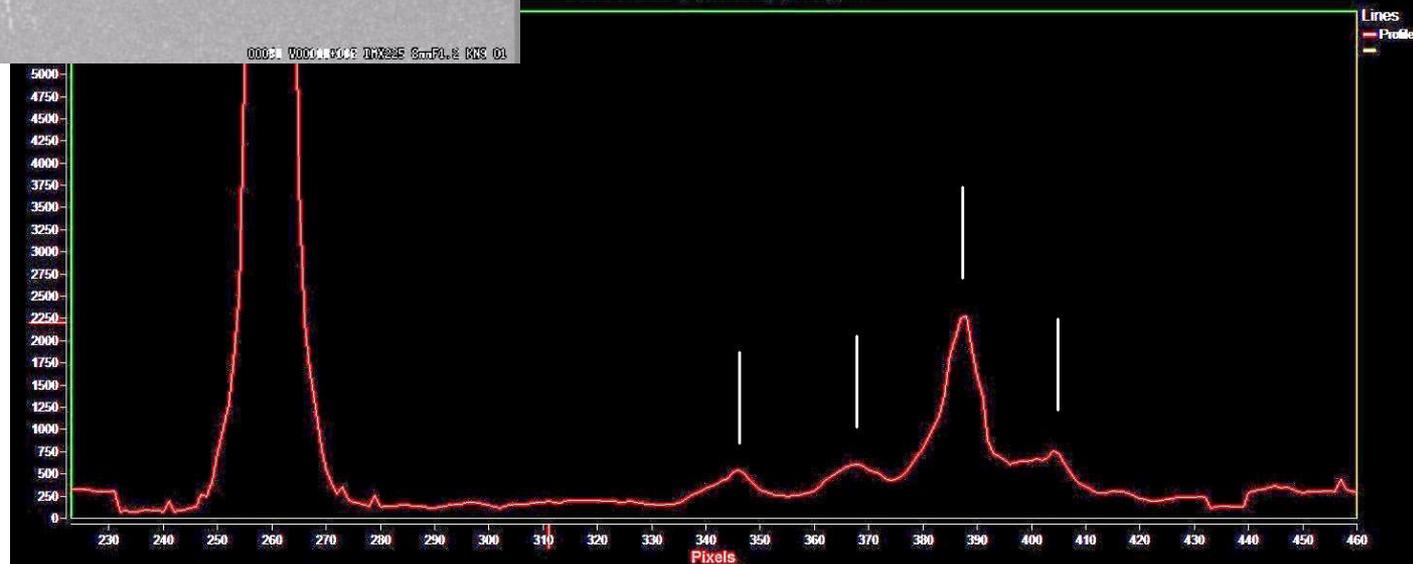


分散は  $4.05 \pm 0.15 \text{ nm/pix}$  とバラツキが大きい

測定の標準偏差は少なく見て  $6.5 \text{ nm}$  程度と見積もっています

輝線のピークがブロードなのが原因

M20180523\_022840\_KN9\_01



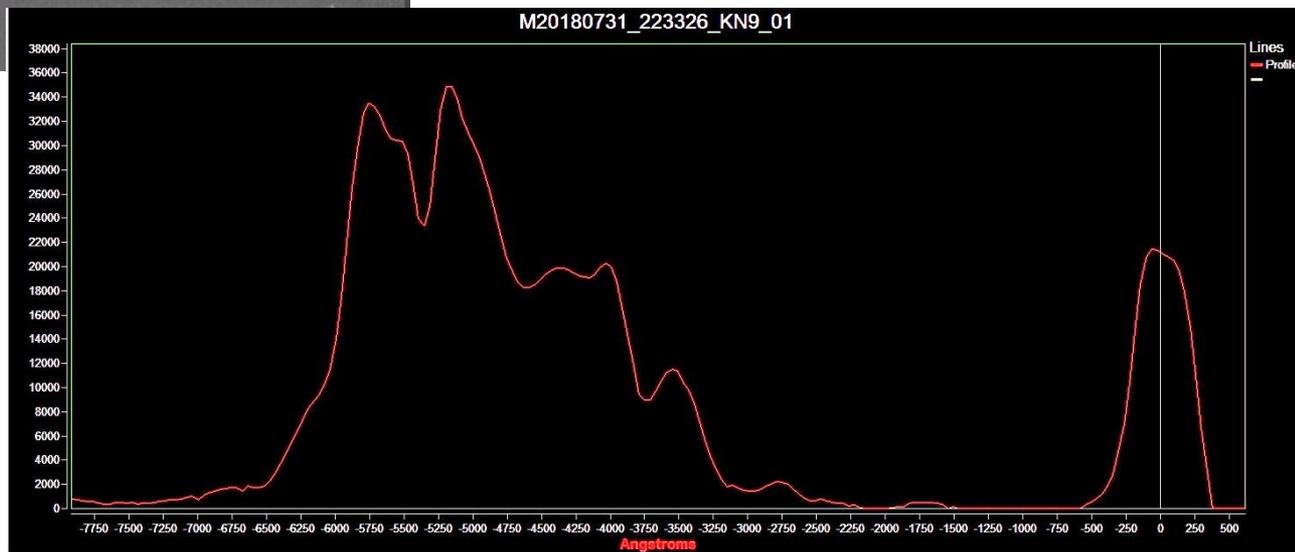
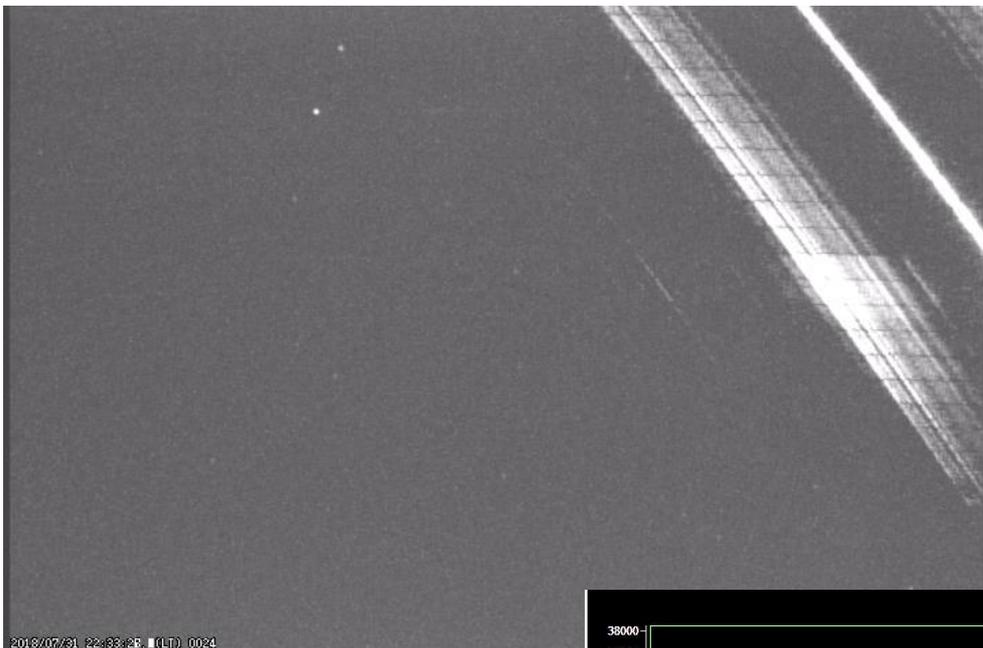
# 解析例 M20180718\_015903 spo



2018/07/18 01:59:03. (LT) 0047



# 解析例 M20180731\_223326 J5\_Per



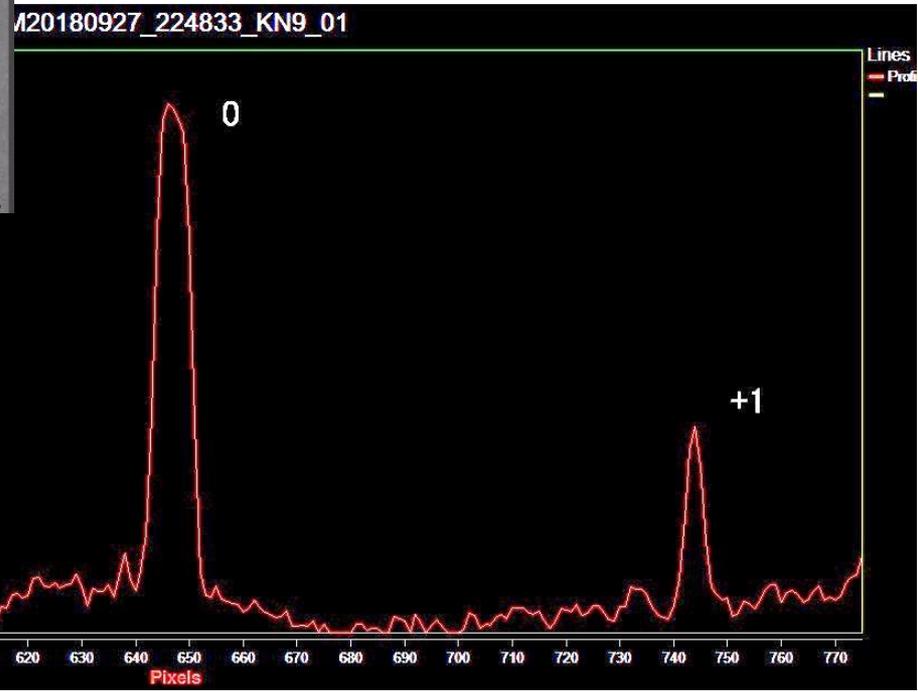
# 解析例 M20180927\_224833



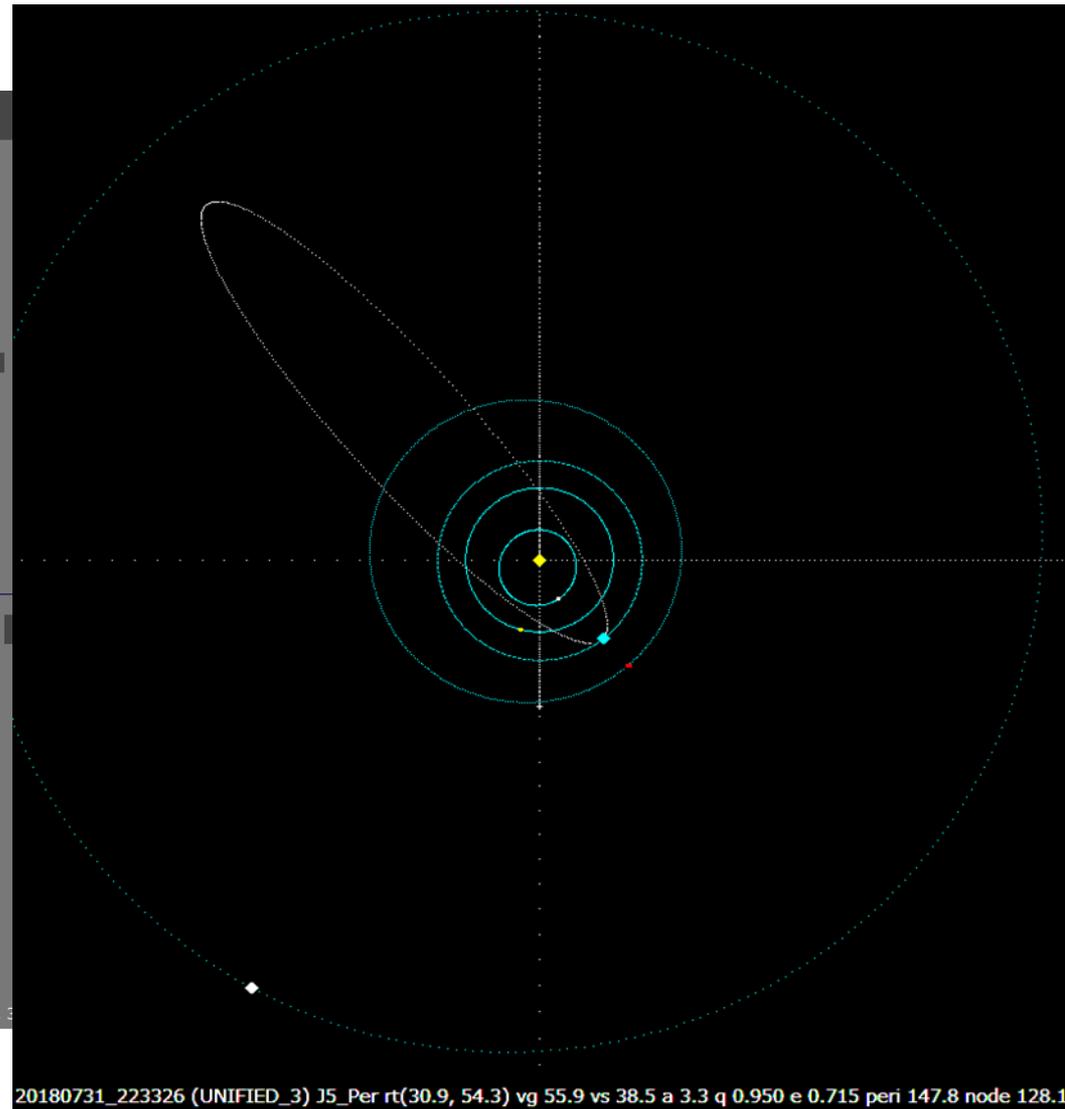
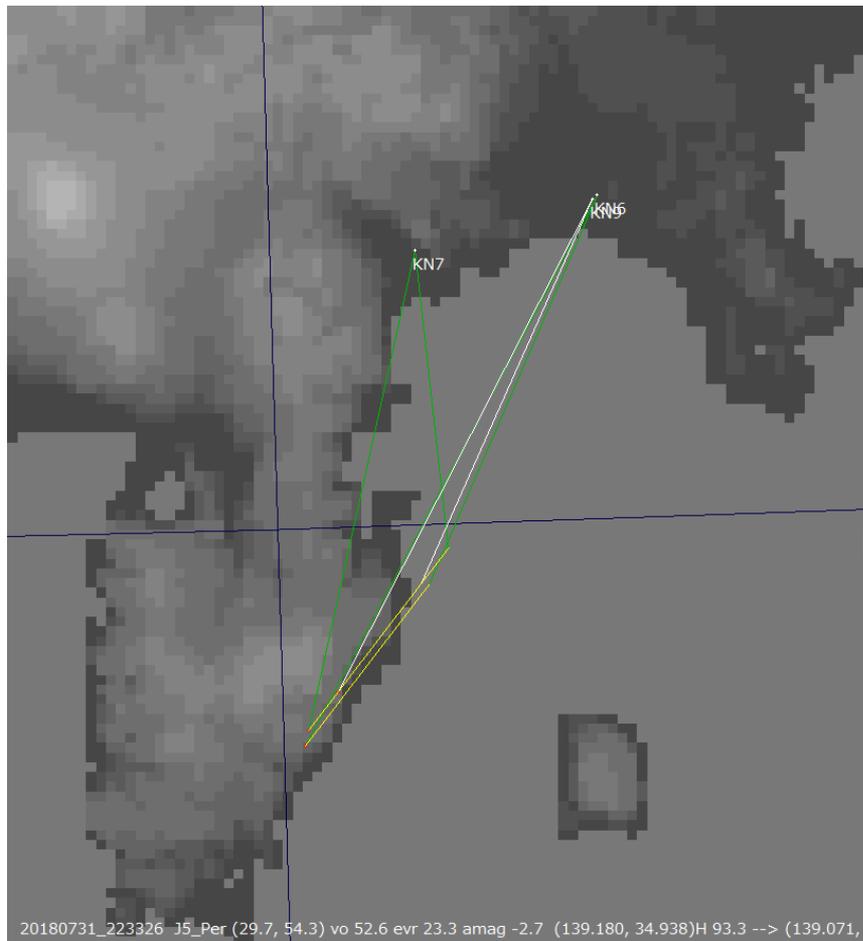
+1次の効率を上げたい  
分散を増やしたい  
基準光が未取得

2018/09/27 22:48:33 (LTD) 0016

00000 V00000+000 IMX225 8mmFL\_2 KN9 01



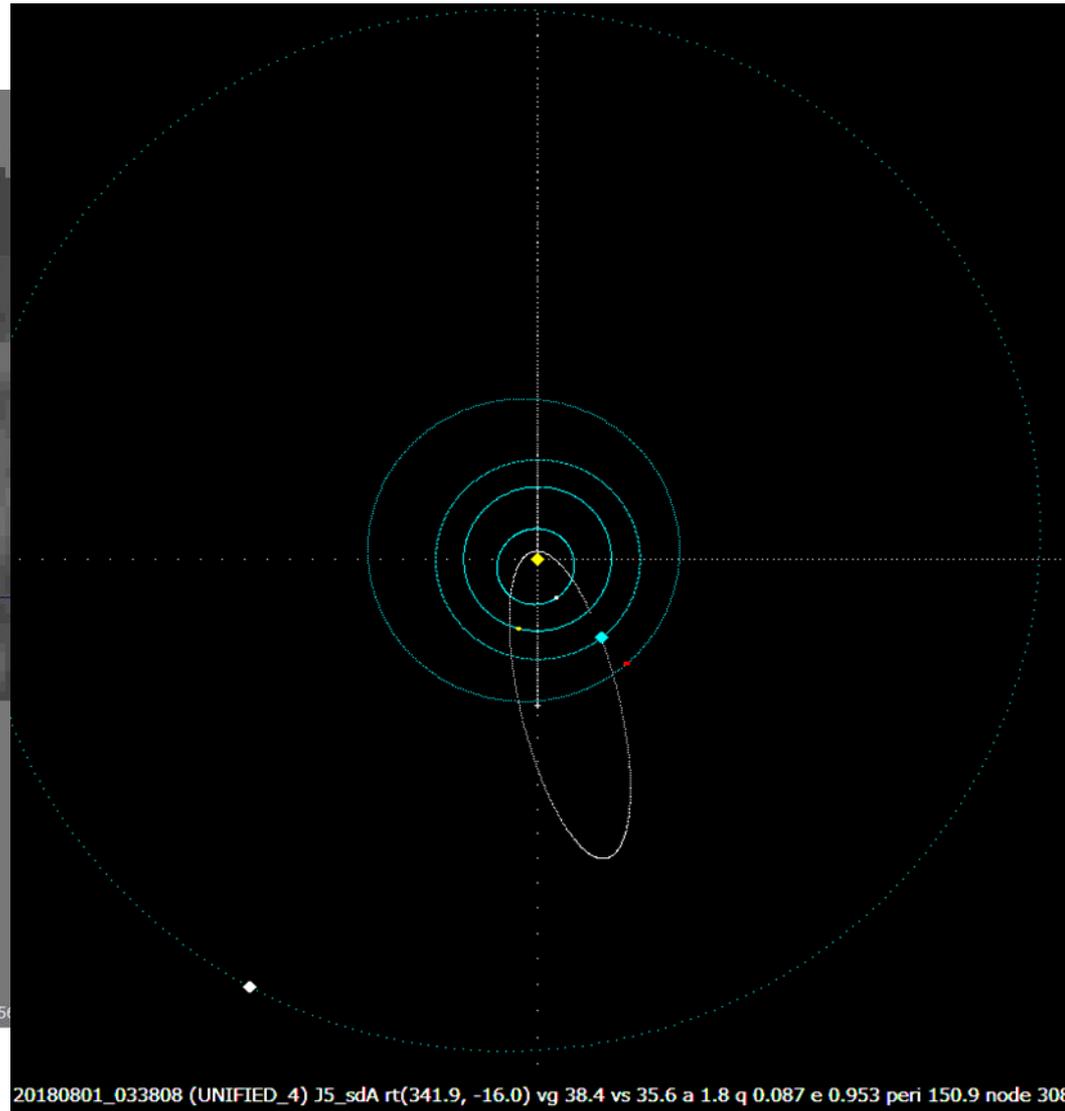
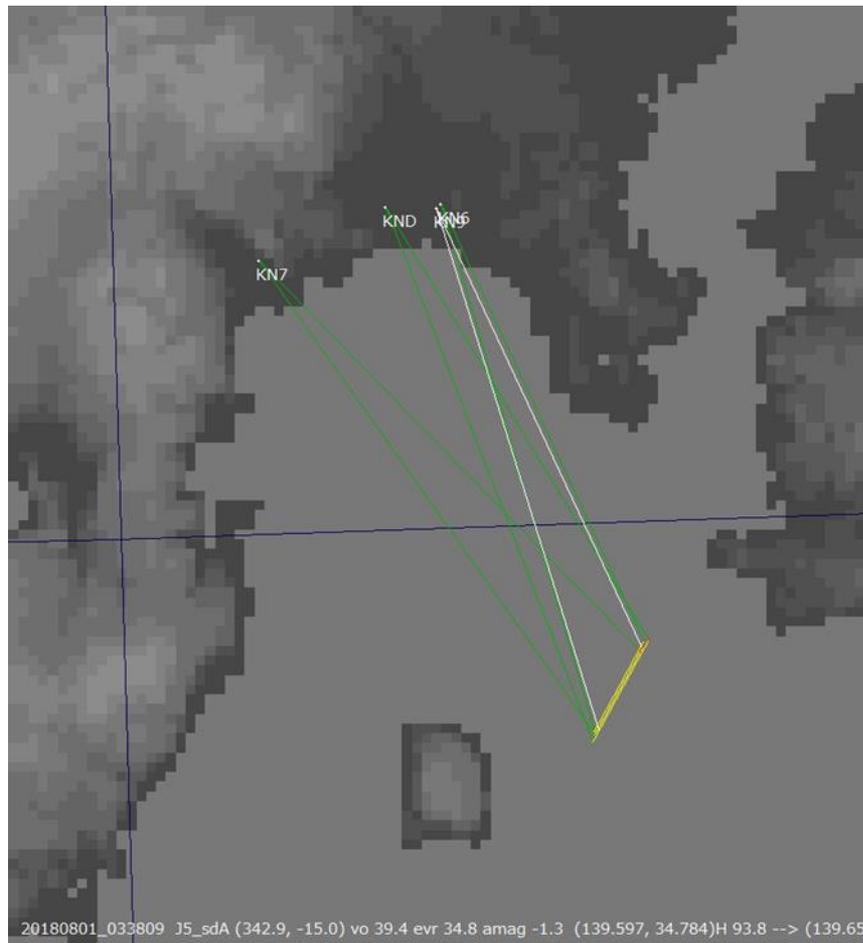
# M20180731\_223326 Perseids



20180731\_223326 J5\_Per (29.7, 54.3) vo 52.6 evr 23.3 amag -2.7 (139.180, 34.938)H 93.3 --> (139.071, 5

20180731\_223326 (UNIFIED\_3) J5\_Per rt(30.9, 54.3) vg 55.9 vs 38.5 a 3.3 q 0.950 e 0.715 peri 147.8 node 128.1

# M20180801\_033809 South. Delta Aquariids



# まとめ

- TV観測のレンズの前に回折格子を置けば分光観測が始められます
- 分散角など確認が出来たらブレード回折格子に変更する
- 解析用に基準光を撮影する、A型星が良いです
- 軌道が求まるので群毎の特徴が比べられます
- 三角ダイアグラムにプロットする

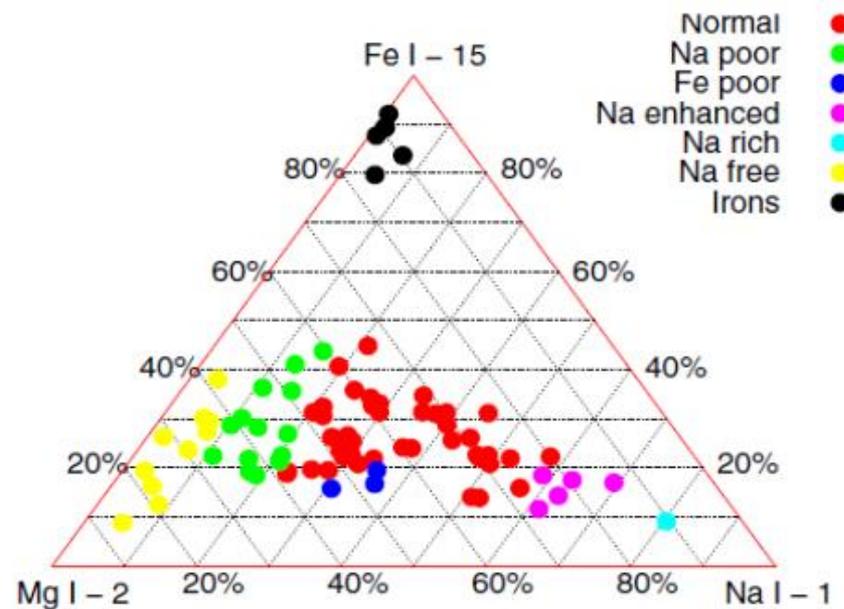


Fig.8. Classification of meteor spectra. The ternary graph of the Mg I (2), Na I (1), and Fe I (15) multiplet relative intensities. Every group of meteoroids is represented with a different symbol.

# モノクロの流星TV分光観測における輝線波長同定とレスポンス補正方法



理由があって基準光源・連続スペクトルを撮影しない場合に流星スペクトルの輝線波長を求める方法

2019年2月3日 流星物理セミナー

渋谷区立 勤労福祉会館 第一洋室(2階)

日本変光星観測者連盟(VSOLJ) 永井和男

# アブストラクト

EOS Kissにグレーチングを付けて流星スペクトルを撮影しているときは色から輝線の波長が推定できました

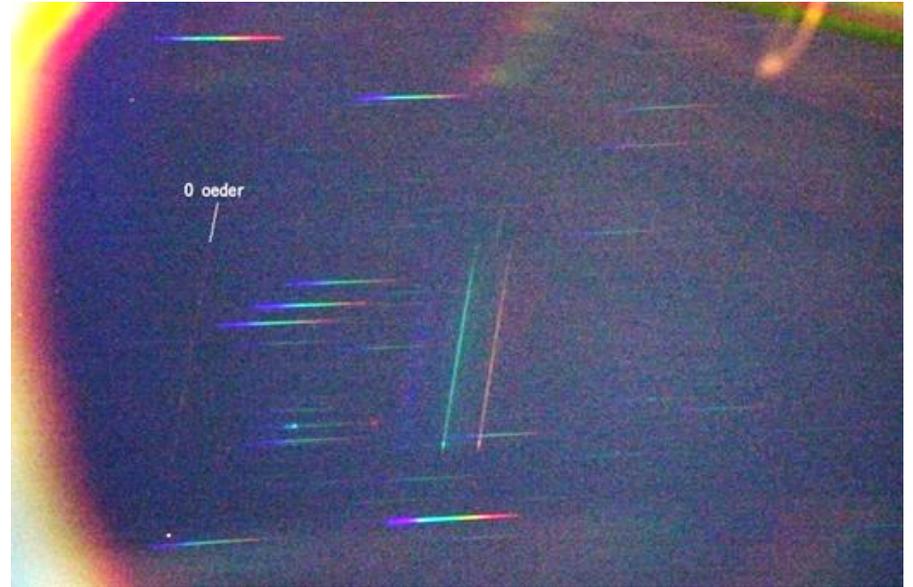
モノクロの流星TV観測にグレーチングを付けてから輝線の波長が判断しにくくなり、変光星の測光観測に使っているV band filter(バンドパスフィルタ)を付けて恒星スペクトルを撮影し、撮影システムの帯域と大凡の分散量を見積もる事ができました

以降はA型星の水素バルマー線が同定できるようになり正確な分散量も求まりました

同時に恒星の連続スペクトルも取得できていますので、これを使ってFlux補正も可能となった事でNa:Fe:Mg比の測定が可能となりました

この手法部分を自身の実施した順にまとめましたので発表します

# カラーカメラの分光は輝線波長が目で見てわかる



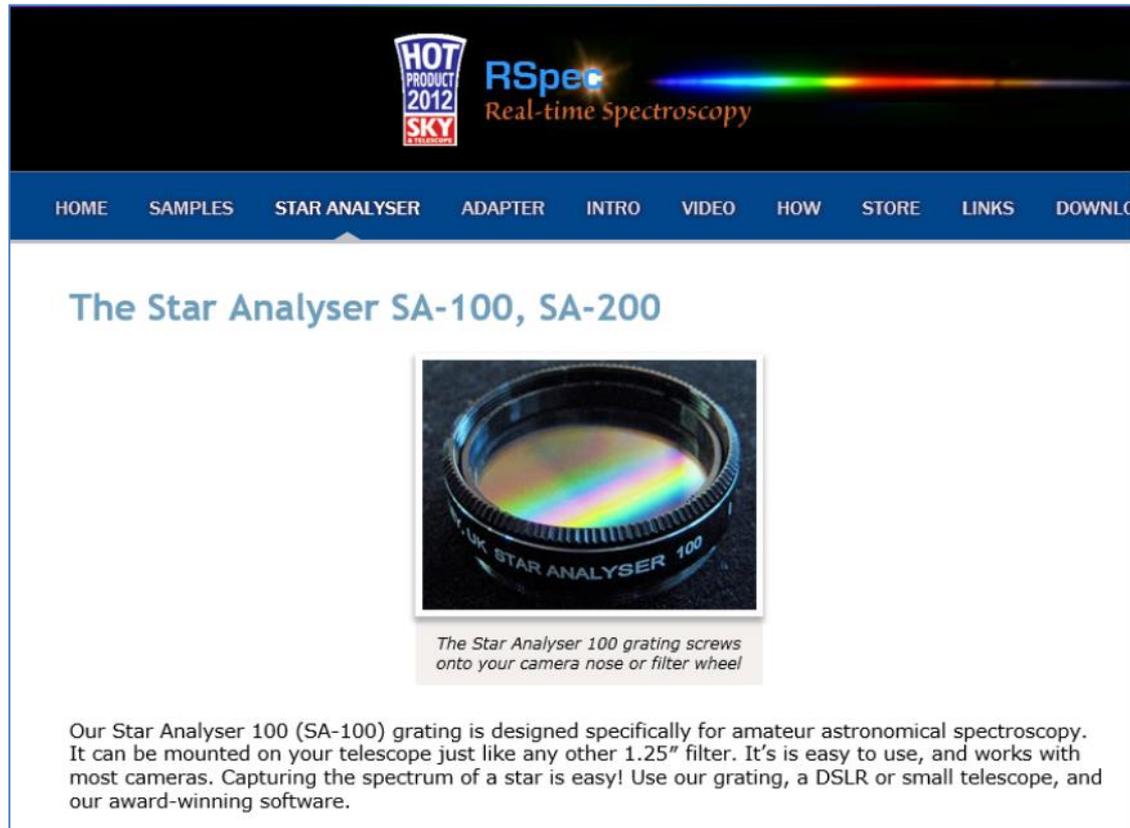
- カラーの流星スペクトル画像は輝線の色から波長がわかる
- しかし、ISO1600では月に1つしか流星スペクトルが取得できない
- より高感度なTV観測にグレーチングを付けた

# モノクロのTV観測では



- SA-200回折格子を $f=8\text{mm}$ レンズ(+IMX225)の前にテープで固定しています
- その結果、流星スペクトルがたくさん写ります
- しかし、色が無いので輝線波長が推定できません
- この例では内側からMg,Na,Oと思われますが確証がありません

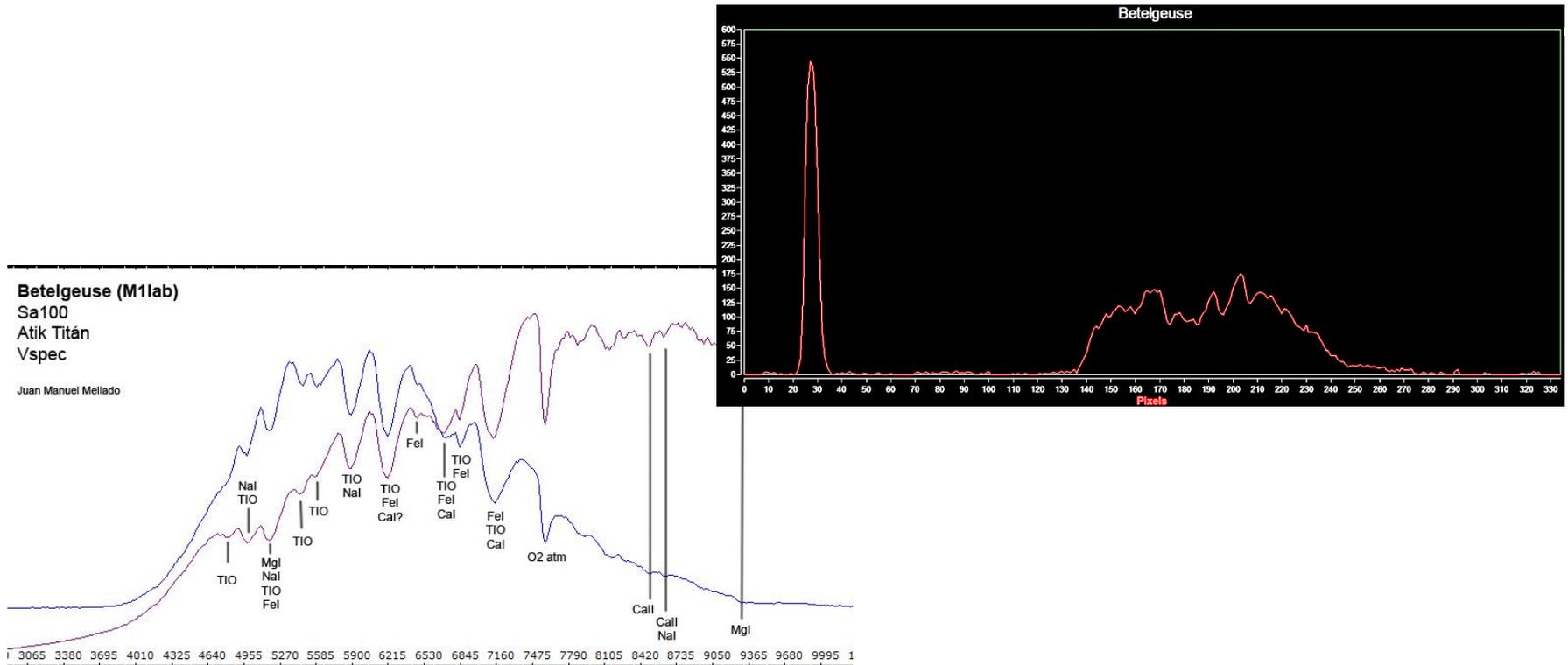
# SA-200回折格子



The screenshot shows the RSpec website header with the 'HOT PRODUCT 2012 SKY' award logo and the 'RSpec Real-time Spectroscopy' logo. The navigation menu includes 'HOME', 'SAMPLES', 'STAR ANALYSER', 'ADAPTER', 'INTRO', 'VIDEO', 'HOW', 'STORE', 'LINKS', and 'DOWNLO'. The main content area features the title 'The Star Analyser SA-100, SA-200' and a photograph of the Star Analyser 100 grating. The grating is a circular metal ring with a rainbow spectrum visible inside. Below the image is the caption: 'The Star Analyser 100 grating screws onto your camera nose or filter wheel'. A paragraph of text describes the product: 'Our Star Analyser 100 (SA-100) grating is designed specifically for amateur astronomical spectroscopy. It can be mounted on your telescope just like any other 1.25" filter. It's is easy to use, and works with most cameras. Capturing the spectrum of a star is easy! Use our grating, a DSLR or small telescope, and our award-winning software.'

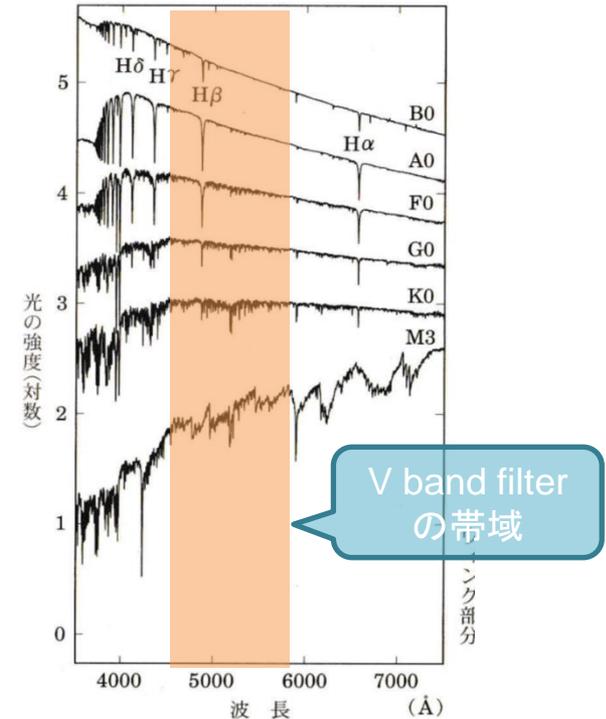
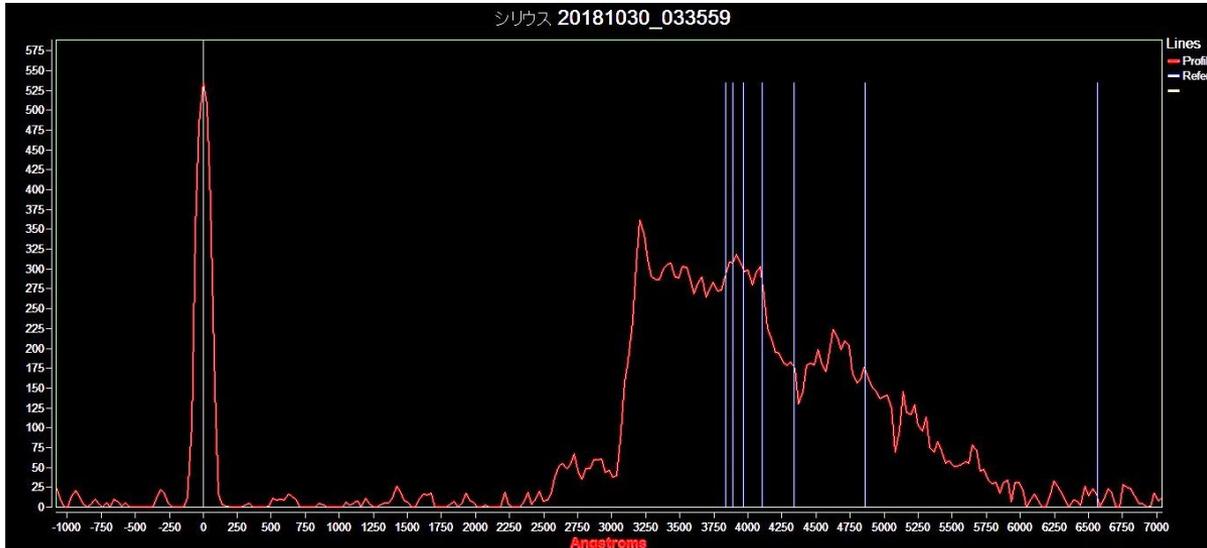
- SA-200は200本/mmのブレード回折格子です
- 1.25インチフィルター枠になっていて冷却CCDカメラにねじ込んで取り付けられます
- +1次の効率が良いです
- 219ドル <https://store.fieldtestedsystems.com/collections/astronomical-spectroscopy>

# 恒星の吸収線から分散量を求める



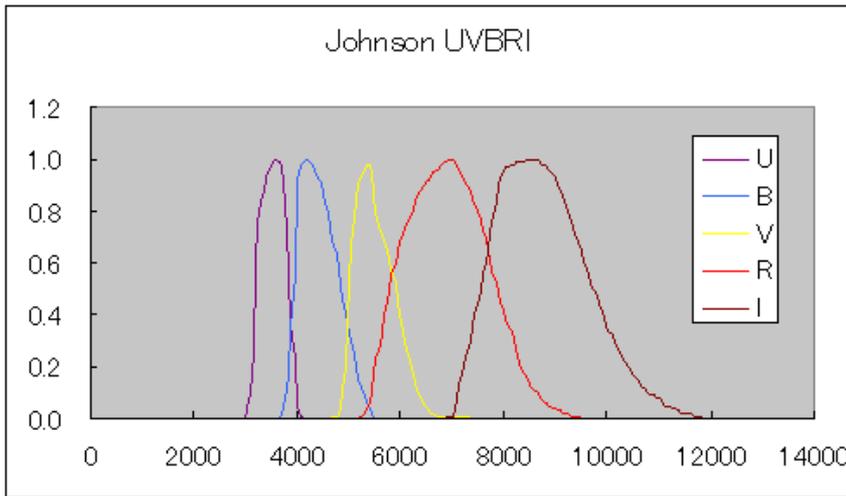
- 上図は $\alpha$ Ori(ベテルギウス)のスペクトルです
- 右が本システムで撮影したもの、左は他の観測者の観測結果
- 本システムの結果は他の観測と似ていますがどの吸収帯が対応するか分からない

# A型星の吸収線から分散量を求める



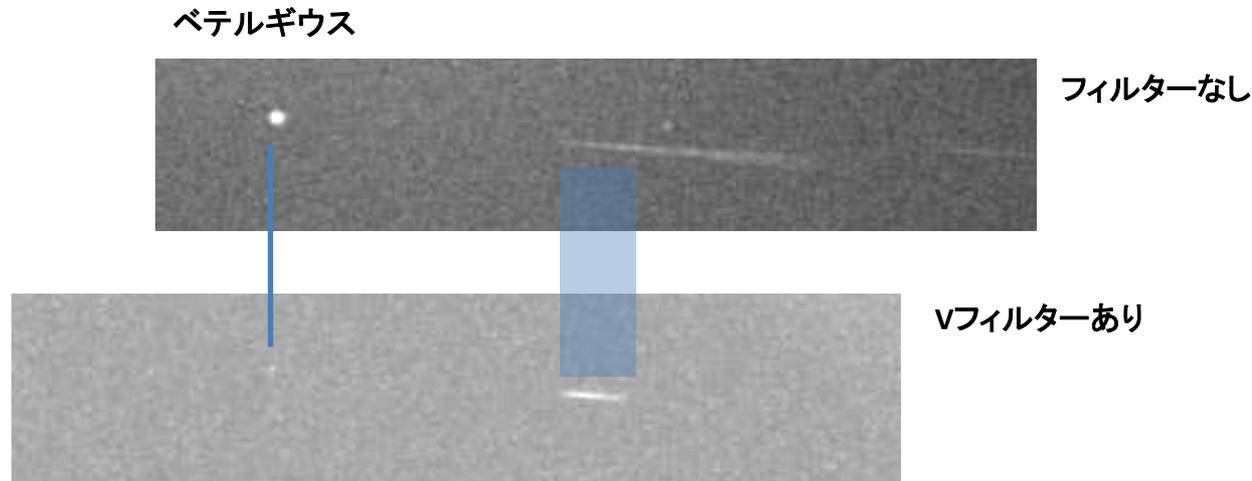
- 水素のバルマー線が卓越しているA型星の $\alpha$ CMa(シリウス)を撮影した
- TVカメラが子午線と赤道の重なる方向に向いていたためカメラの向きを変えないとシリウスは写らないので最初に(カメラの向きを変えなくて良い)ベテルギウスで試した(ベテルギウスは短波長の放射なく目的には不適當)
- 取得されたシリウスのスペクトルは予想に反して、どれがバルマー線か分からなかった
- そこで、測光用のバンドパスフィルターを用いて大凡の分散量を求めた

# 測光用フィルターの応用



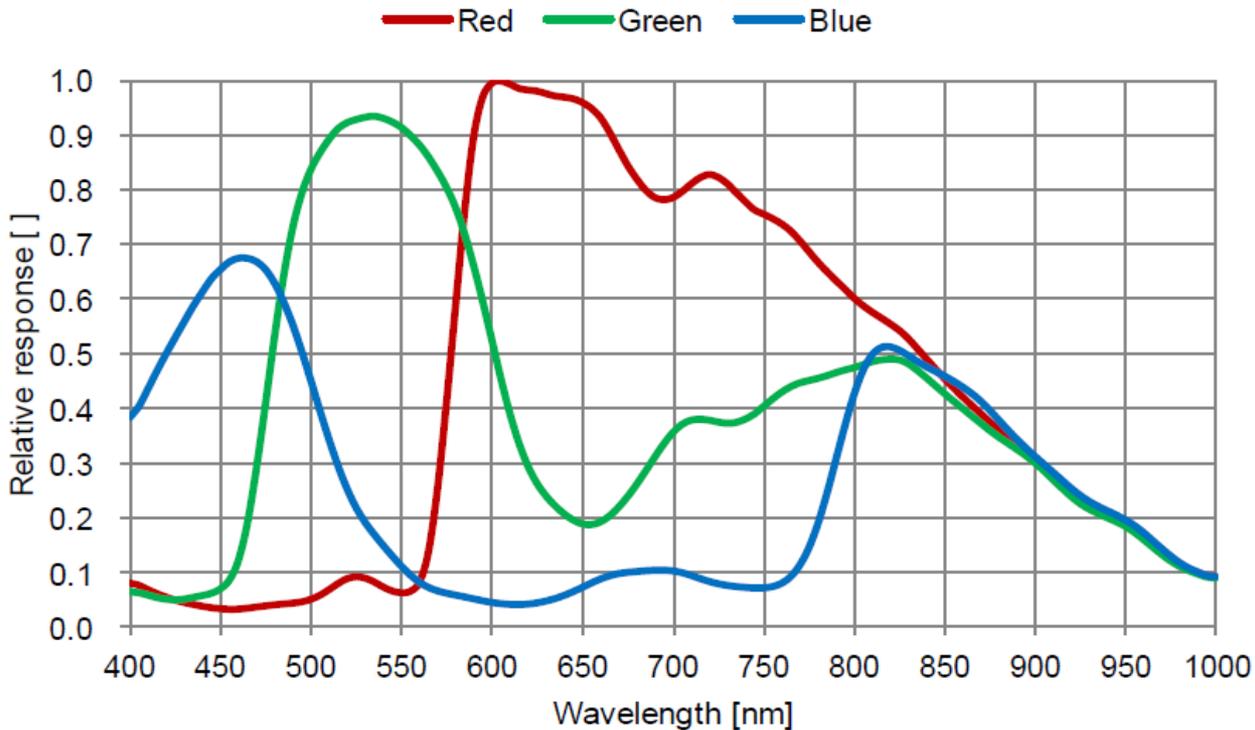
- 測光用のバンドパスフィルターを全面に付ける
- Vバンドフィルターの中心波長は 550nm
- 撮影されるスペクトルはバンドパスの帯域だけとなり、帯域から分散量求まる
- 光路はVフィルター→グレーチング→カメラレンズ→イメージャーの順

# バンドパスフィルターの効果



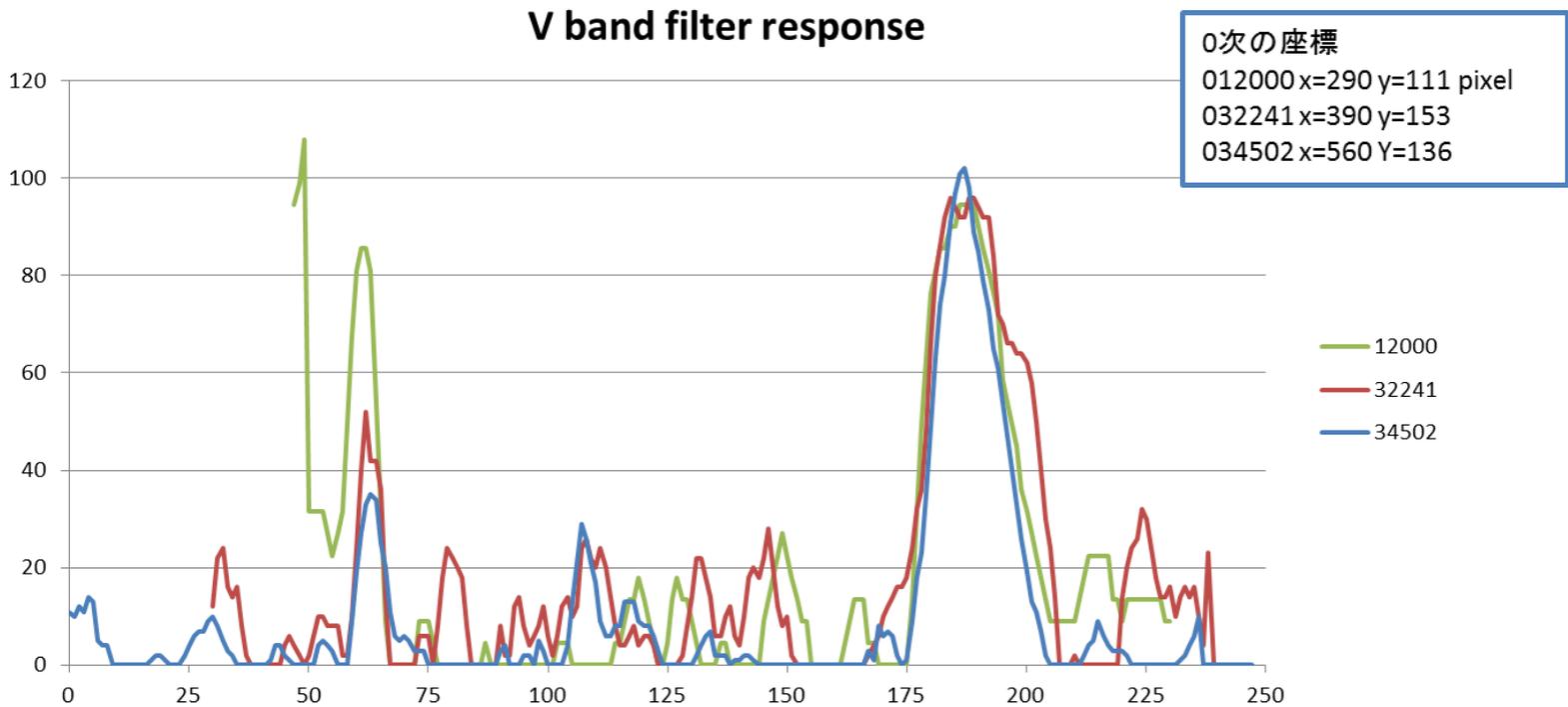
- 観測を再開したいのでカメラを子午線・赤道に戻した
- この状態でフィルターの有無でベテルギウス撮影し違いを検討した
- この撮影システムでは可視光はスペクトル線の短波長の一部分で、かなり広範囲で長波長に感度がある事がわかった
- ベテルギウスはVフィルター帯域より短波長のエミッションが乏しい事にも注意が必要です

# イメージャー感度



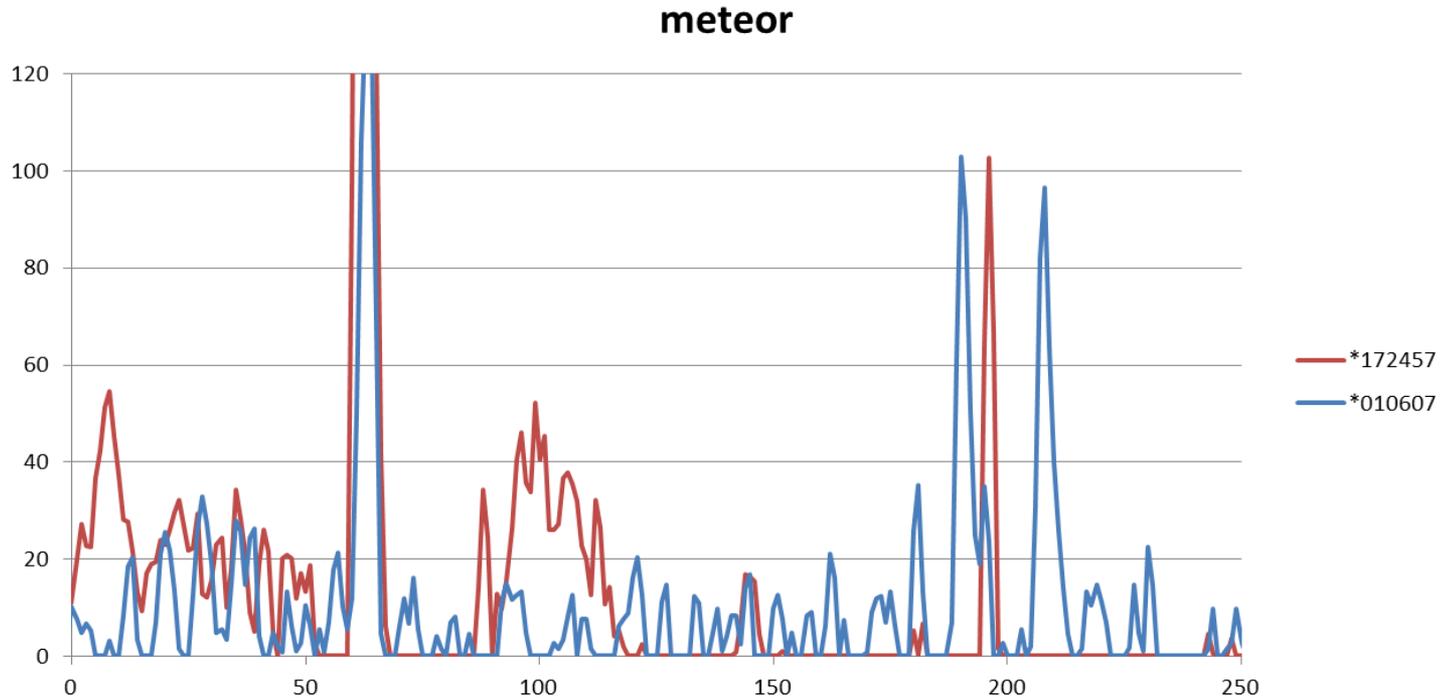
- IMX225の周波数レスポンスはたいへん広く
- 近赤外では1000nm程度までならろうじて感度がある
- たとえば、850nmは0.45しか無いように見えるがRGBそれぞれが0.45ある
- 例)  $Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B$
- 参考) 測光用VバンドフィルターはGreenとレスポンスが似ています

# レスポンスの実測



- Vフィルターをつけてベテルギウスを撮影した
- 画角の3箇所(左端・中央・右端)にベテルギウスを向けて
- それぞれの0オーダーが重なるようにグラフを合わせた
- 分光結果は概ねどれも重なっているので分散量に大きな違いはなさそうです

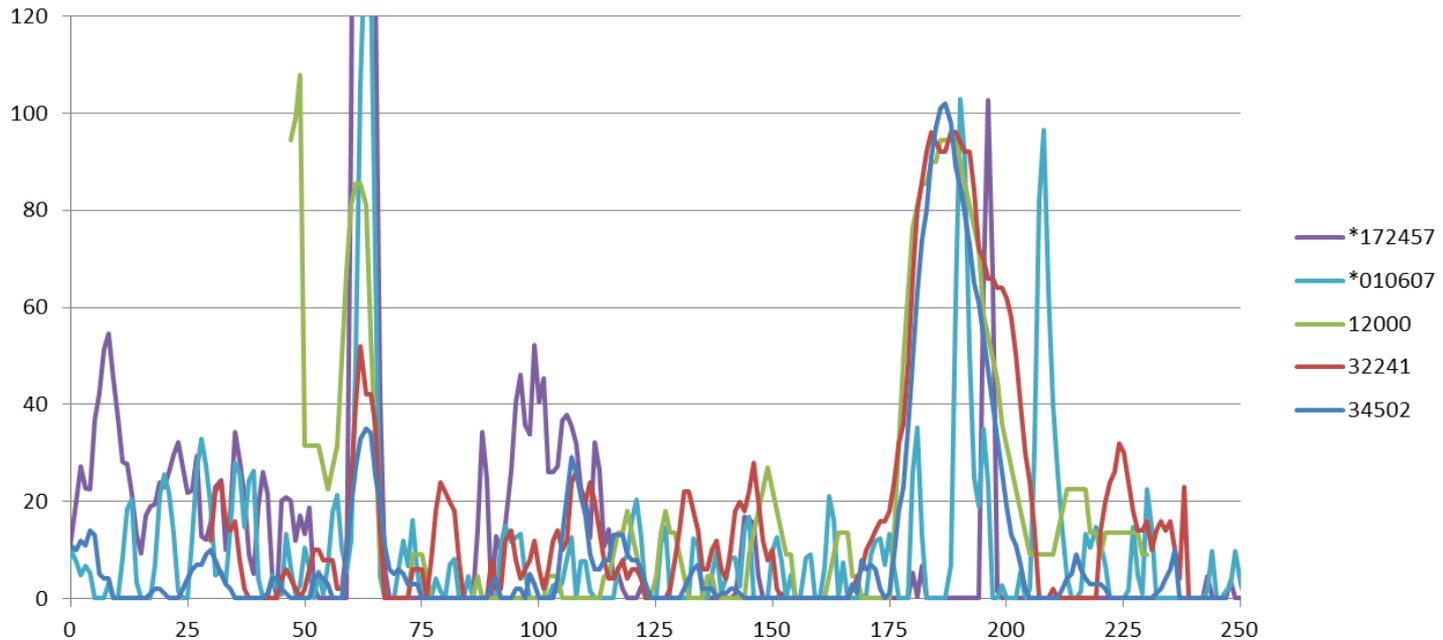
# Vバンドフィルターを付けて流星を撮影



- 二つの流星スペクトル画像の0オーダーを合わせた
- 200ピクセル付近に輝線があるが、重なってないので異なる性質の物とされます

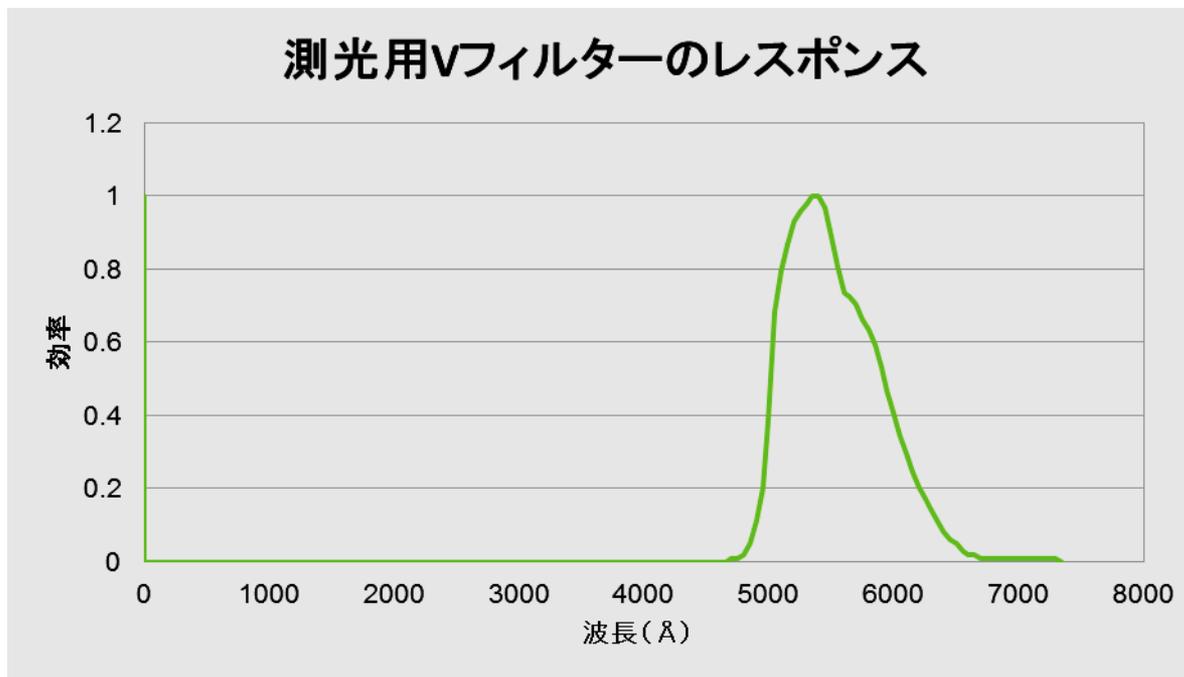
# 二つのグラフを重ねる

V band filter response



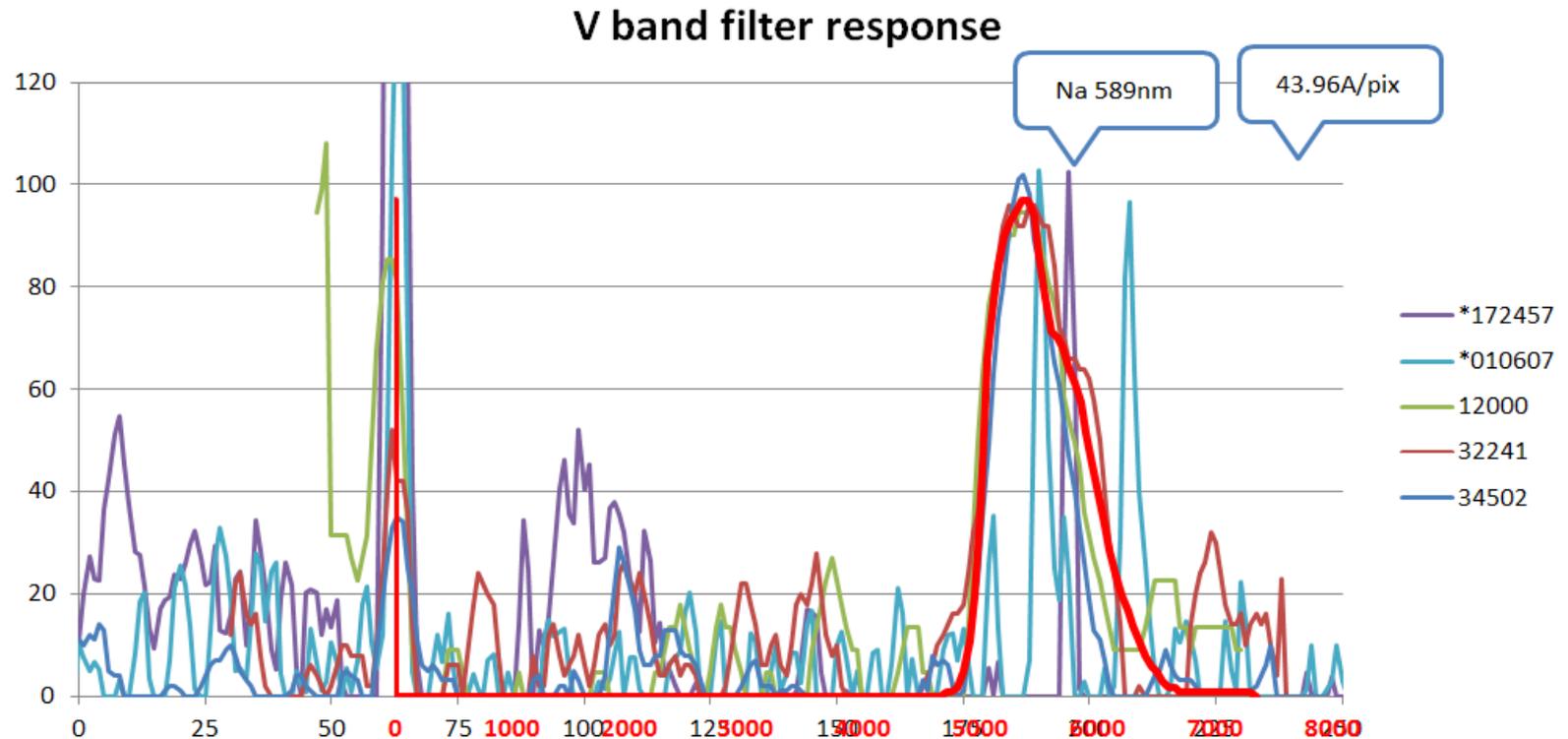
- Vフィルターのレスポンスの長波長側に流星の輝線があります
- このように輝線は赤っぽい物でした
- これだけでは波長は測定できません
- そこで、このグラフにVバンドフィルターのレスポンスを重ねます

# Vバンドフィルターの標準レスポンス



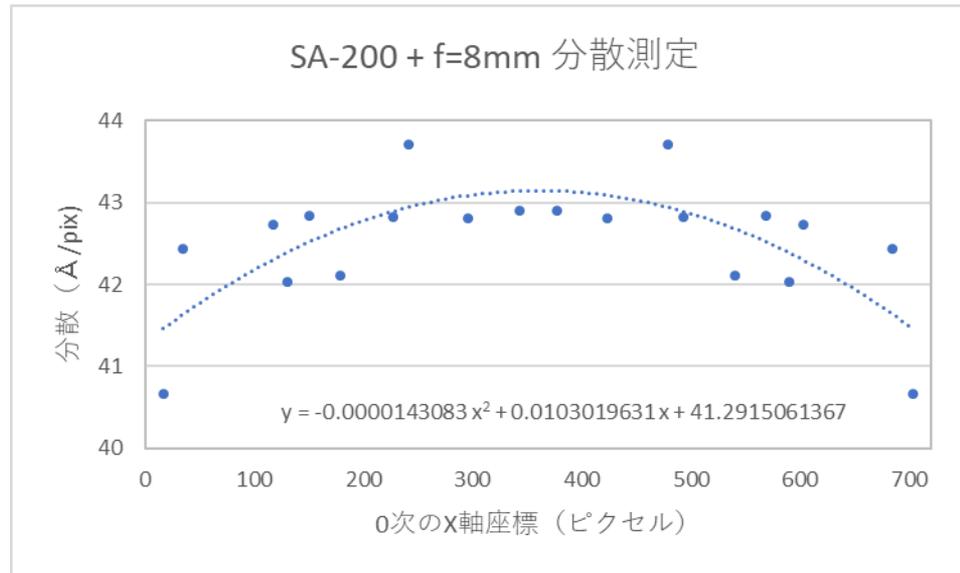
- 上図がVフィルターのレスポンスです (ジョンソンシステム)
- これを測定したレスポンスカーブと重ねます

# 輝線波長の推定



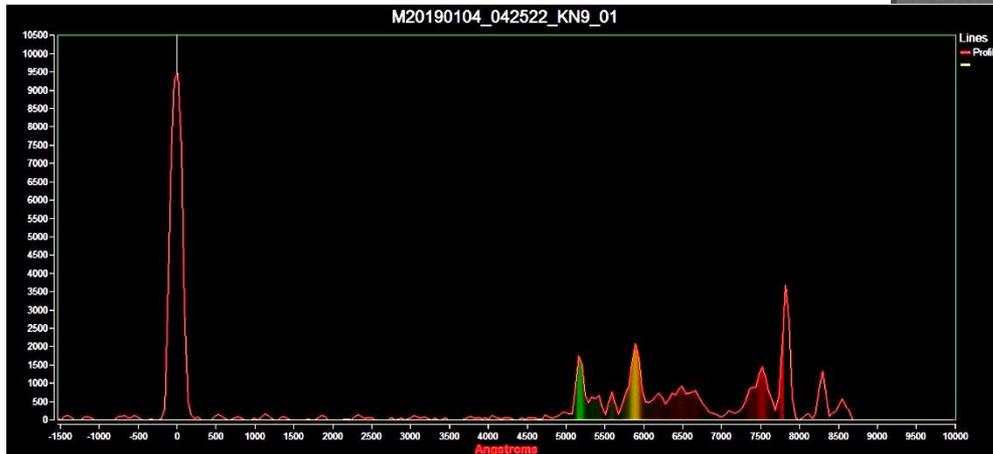
- 赤の太線がVバンドフィルターのレスポンスです
- 赤字は波長(Å)です
- 172457とした流星スペクトルの輝線はNaの589nmとなります
- 0オーダーの位置から大凡43.96 Å /Pixの分散量とわかりました

# 分散量の計測



- 大凡の分散量が分かったので今までに取得した流星スペクトルに写っているMg, Na, Oの輝線を使って分散量の精測をした
- この時、0オーダーの画像上のX軸も測定した
- これらをグラフにしX軸に対する分散量を数式にした
- 以降は0オーダーの位置を知る事で分散量が分かるようになった

# 波長校正された流星スペクトル



- 0次の位置から分散量が求められれば
- 流星スペクトルの波長校正が出来るようになります
- 分光感度補正(Flux補正)をしていないので輝線の強さは測定できません

# Flux補正(感度補正)

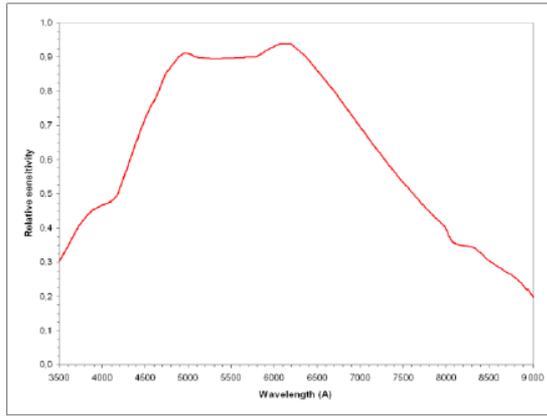
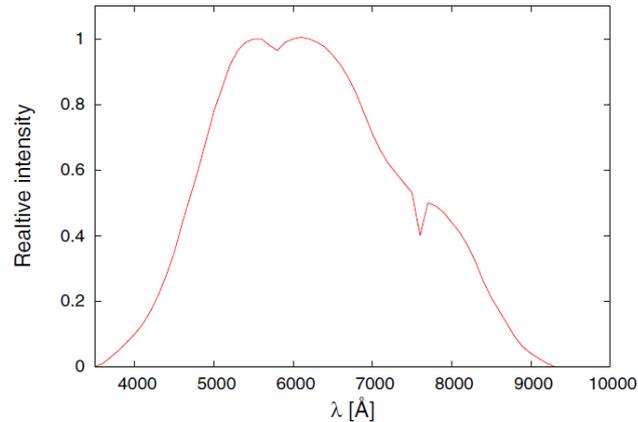


Figure 1 – Relative spectral sensitivity of CCD chip Sony ICX 673AKA.

Calibration of the emission line intensity (y-axis) was performed using a diagram of relative sensitivity CCD Sony ICX 673AKA at a wavelength between 3500 and 9000 Å. For identification of the emission wavelengths of the individual elements revised tables were used (Moore, 1972).

イメージャーの分光感度



恒星で補正  
(どの星かは不明)

木星で補正

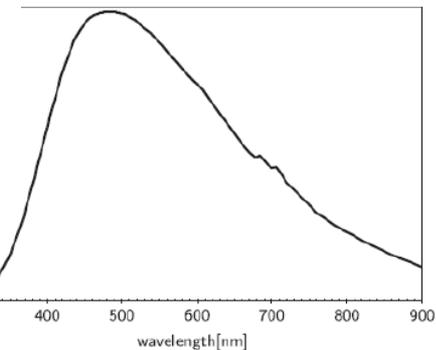


Figure 1: The spectral sensitivity of the AMOS-Spec system. The spectral response curve was determined by measuring the spectrum of Jupiter, and is normalized to unity at 480 nm.

- 流星スペクトル解析ではイメージャーのレスポンスを使ってFlux補正する例がありますがこれでは不十分です(レンズ、グレーティングが除かれている)

# 次はCCDカメラの特性測定です

ICX672  
CCDカメラ

IMX225  
CMOSカメラ



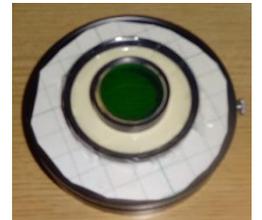
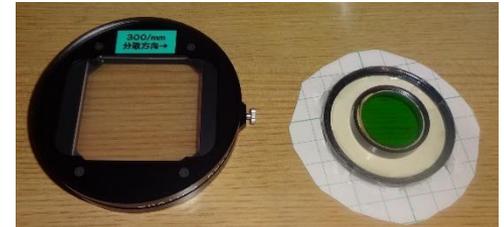
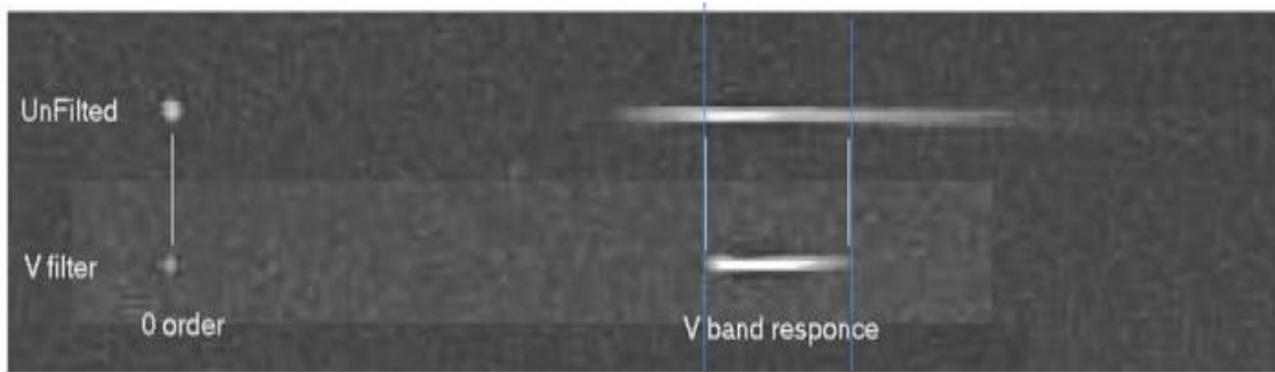
この計測が終わった頃に2台目のカメラの設置を終えた

# 2台のカメラを比較

- 南カメラ KN9\_01 CMOS
  - 大島上空100km
  - IMX225 SONY CMOS イメージャー 3.75x3.75 $\mu$ m 1/3type
  - f=8mm F1.2, 720p
  - グレーチング 200本/mm
  - FOV 30x20deg.
- 南低空カメラ KN9\_02 CCD
  - 御蔵島上空100km
  - ICX672 SONY CCD イメージャー 5.0x7.4 $\mu$ m 1/3type
  - f=6mm F0.95, 720i
  - グレーチング 300本/mm
  - FOV 40x30deg.

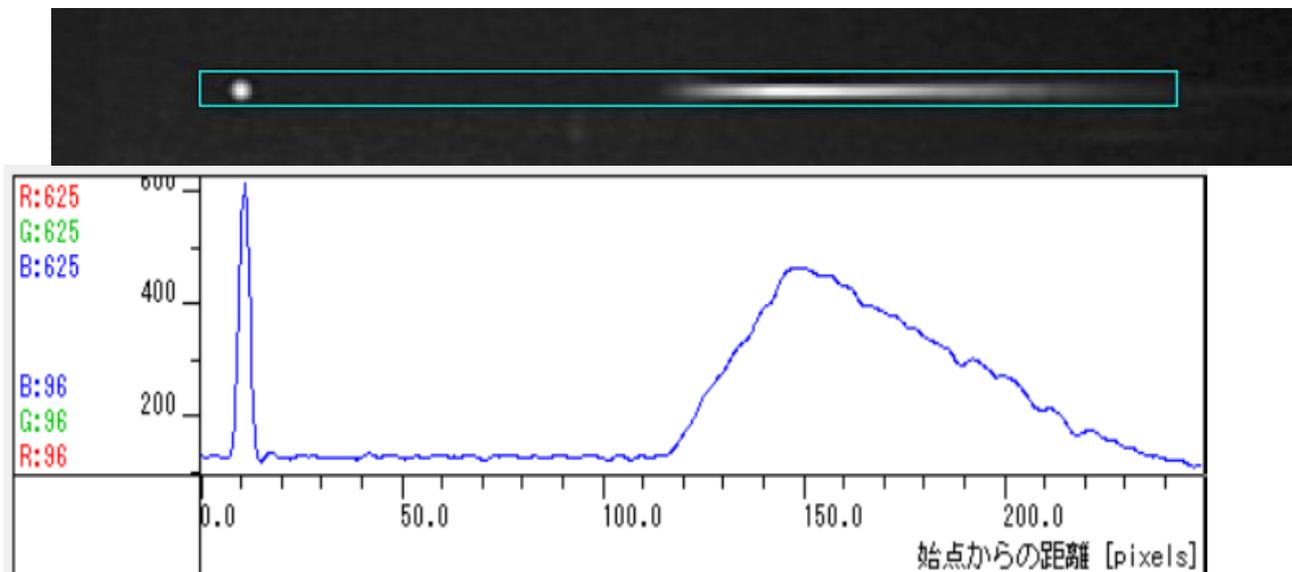


# CCDカメラのレスポンス測定



- CMOSカメラで行った方法と同じようにグレーティングの前に測光用Vフィルタを付け外してシリウスを撮影した(グラフはVfilterのレスポンスカーブ)
- IMX225とはかなり違い、よく見かけるCCDの帯域です。しかし、ピークが緑になっていて、そのあたりがコダックなどと大きく違います。
- IMX225はIRカットが無いとレスポンスが可視光と大きく違ってしまいましたが、ICX672は素の状態でも眼視と割と似ていた。

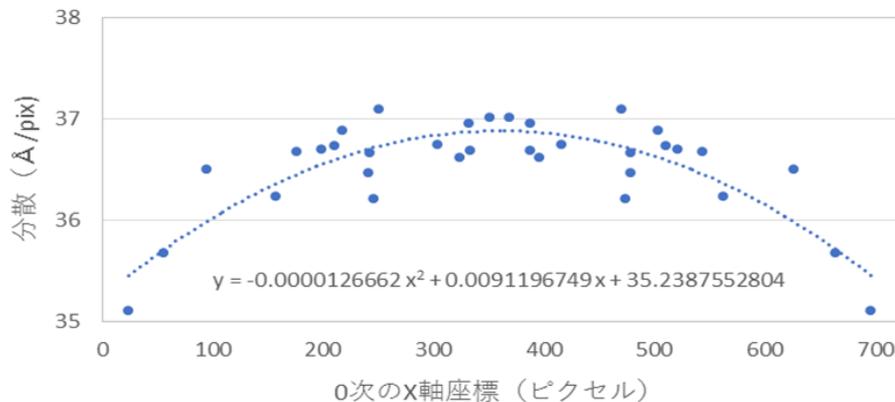
# CCDカメラ、シリウスのスペクトル



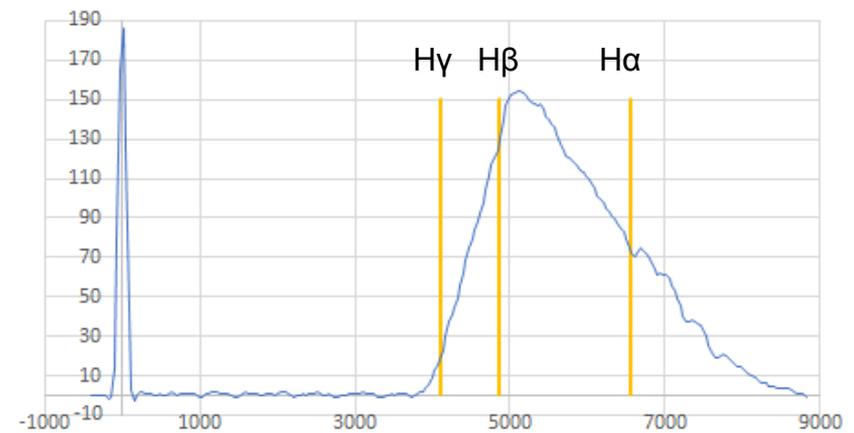
- シリウスのスペクトル画像から飽和していない30枚をコンポジットしてA型星の連続スペクトルを取得しました
- S/Nの良い画像が取得出来、飽和もしていません
- この良好な観測値を用いてFlux補正を行います

# CCDカメラの分散量の計測

300gr + f=6mm 分散測定

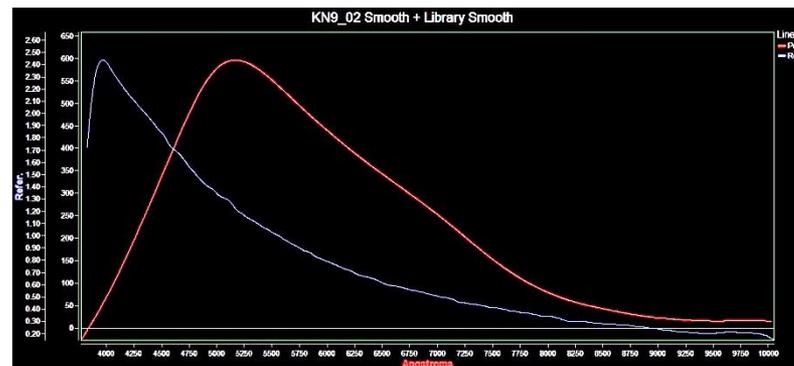
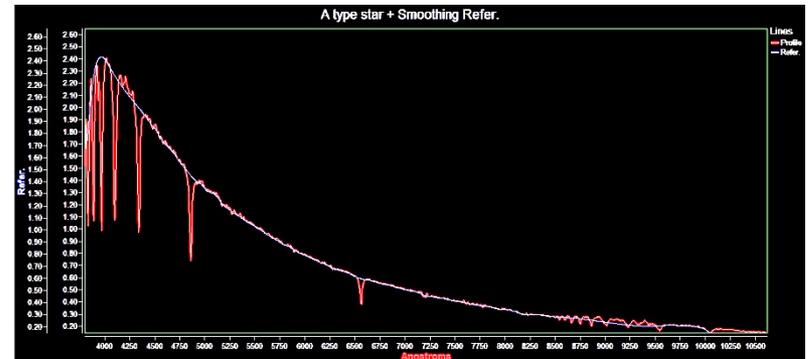
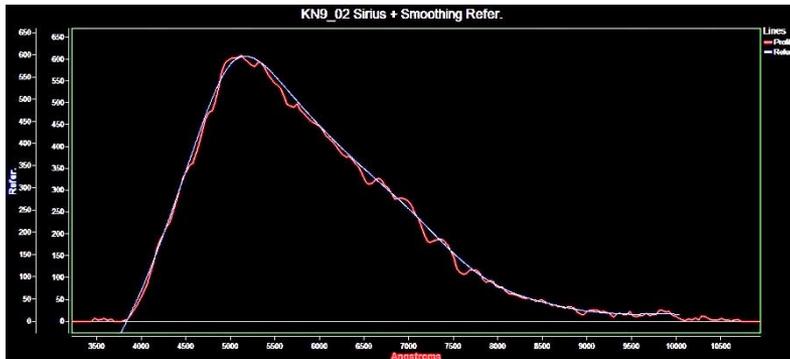


300gr f=6mm CCD / sirius spectrum



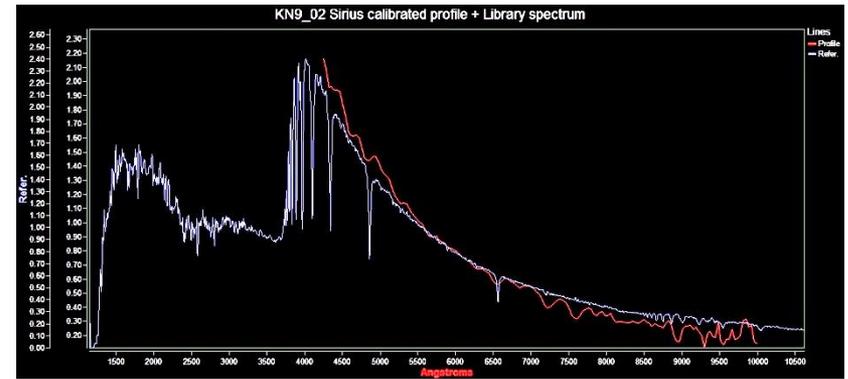
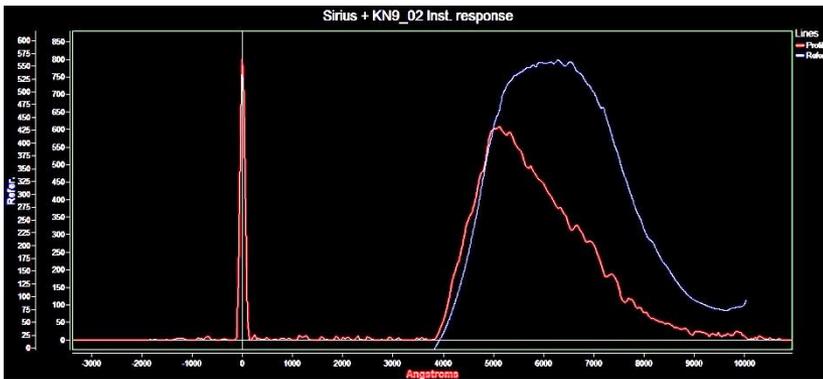
- Vフィルターの応用によって大凡の分散量が分かったので今までに取得した流星スペクトルに写っている Mg, Na, O の輝線を使い分散量の精測をした。この時、0オーダーの画像上のX軸も測定した。
- これらをグラフにしX軸に対する分散量を数式にした
- 以降は0オーダーの位置を知る事で分散量が分かるようになった
- 参考) 左図はシリウスのスペクトルに水素のバルマー線を描いた物

# コンティニウムなラインの作成



- Flux補正(分光感度補正)を行うためにコンティニウムなラインを作ります
- 左上は撮影したシリウスのスペクトル(赤線)、撮影システムのレスポンスです(本来は流星と同じ日に同じ高度の標準星を撮影するが流星では難しい)
- 右上はライブラリのシリウスのスペクトル(赤線)
- 下図はスプライン曲線で作成したコンティニウムなライン(赤は観測・青はライブラリ)、撮影システムの分光感度がフラットならば、この線は重なる

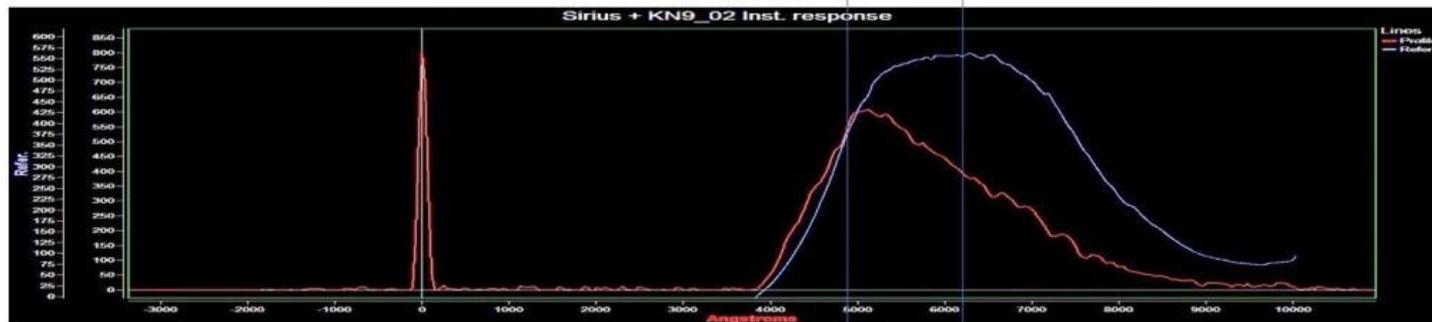
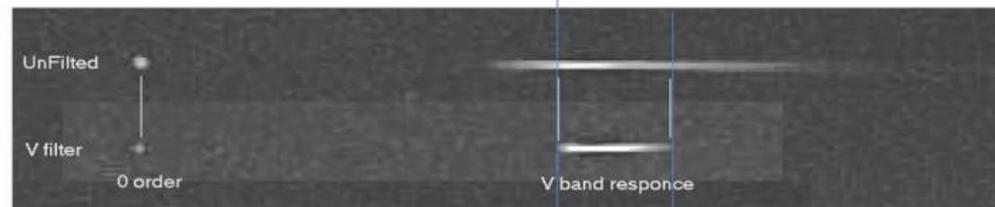
# INST. Responseと補正後のシリウス



- コンティニウムなライン(観測とライブラリ)から撮影システムのFlux補正値を求めた(左上の青線)(Inst. Response)
- シリウスの観測値をInst. Responseで割り算すると真のシリウスのスペクトルが取得できます
- 右図の赤線がFlux補正したシリウスのスペクトル、赤線のライブラリと重なったので補正がうまくできている事になる

# CCDカメラの分光感度と補正值

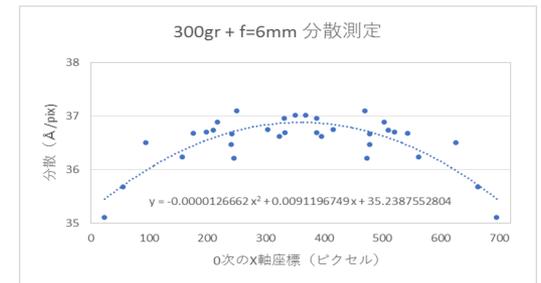
ICX672



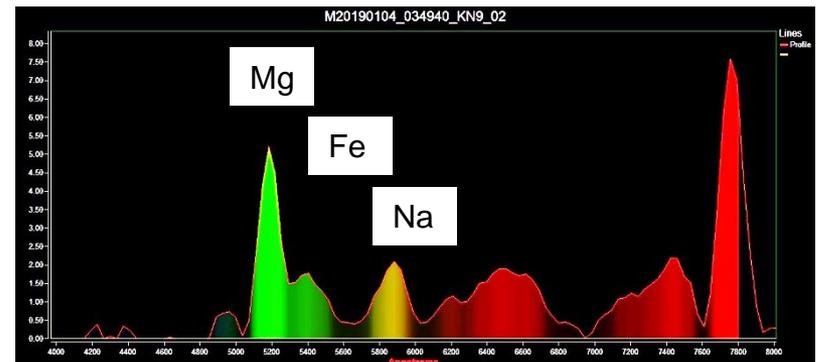
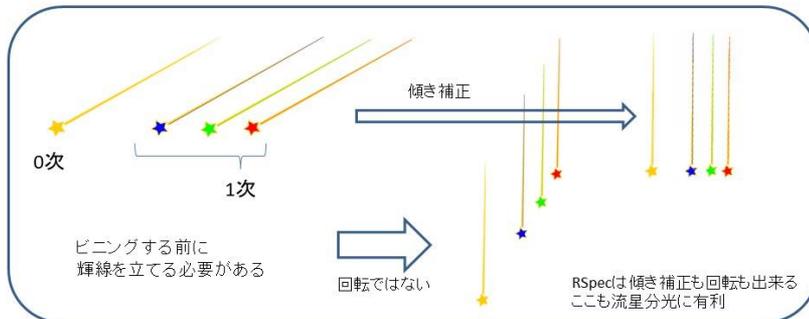
- この様にしてV band filterを用いてイメージャーの帯域を知り、おおよその分散量を求め、ここから複数の流星スペクトルでX軸を変数とした分散量の精測が行える
- 過程の中で得られたシリウスの連続スペクトルを用いてInst. Responseを作成する事で、流星スペクトルのFlux補正(分光感度補正)が出来ます、補正すると輝線強度比が得られるようになります(組成評価が出来ます)

# 流星スペクトルの輝線強度測定手順

1. 0次が写っているスペクトルの選定する
2. 画回転(グレーチングが水平に付いていない)
3. Slant補正と垂直ビンングを行う
4. 0次の位置から分散量を求める
5. 分散量から波長校正する(横軸が波長になる)
6. Inst. Responseと割り算しFlux補正する
7. Mg Fe Na の強度を測定する



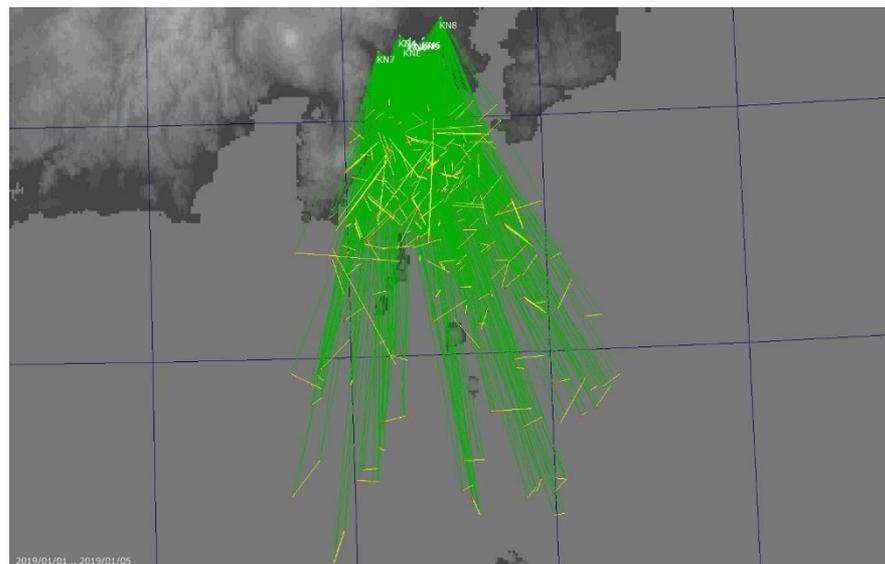
## 流星分光は (恒星との違い)



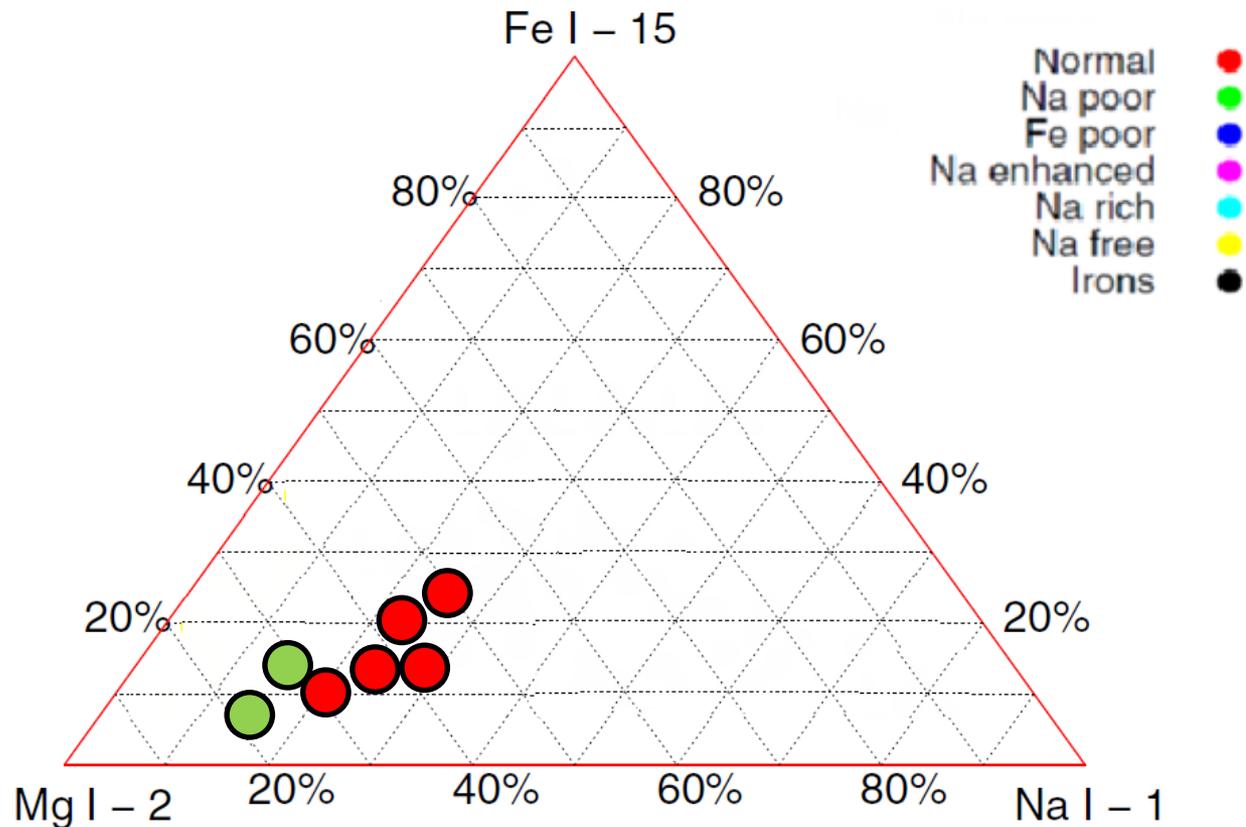
# 2018年のふたご座流星群の組成比

| 日付         | 流星画像                    | Mg(518.2) | Fe 526~545 | Na(589.2) | Mg比  | Fe比  | Na比  |
|------------|-------------------------|-----------|------------|-----------|------|------|------|
| 2018/12/14 | M20181215_024949_KN9_02 | 0.9       | 0.0        | 0.0       | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
|            | M20181215_035542_KN9_02 | 3.0       | 0.5        | 0.9       | 0.68 | 0.11 | 0.20 |
|            | M20181215_040154_KN9_02 | 1.0       | 0.1        | 0.2       | 0.77 | 0.08 | 0.15 |
|            | M20181215_040659_KN9_02 | 4.7       | 1.2        | 1.2       | 0.66 | 0.17 | 0.17 |
|            | M20181215_041713_KN9_02 | 12.0      | 5.2        | 6.5       | 0.51 | 0.22 | 0.27 |
|            | M20181215_044010_KN9_02 | 3.2       | 0.7        | 1.5       | 0.59 | 0.13 | 0.28 |
|            | M20181215_044640_KN9_02 | 23.0      | 14.0       | 15.0      | 0.44 | 0.27 | 0.29 |
| 2018/12/15 | M20181215_220602_KN9_02 | 3.6       | 1.0        | 1.4       | 0.60 | 0.17 | 0.23 |

- 分光感度補正が出来るようになりましたので昨年末のふたご群の組成比を求めてみました
- 平塚市博物館天体観察会流星分科会では小規模な観測ネットワークを作っています(横浜から小田原まで、TV観測13台)
- 日心軌道が「ふたご」と判定されたもので、スペクトルも取得出来た物の輝線強度を測定しました



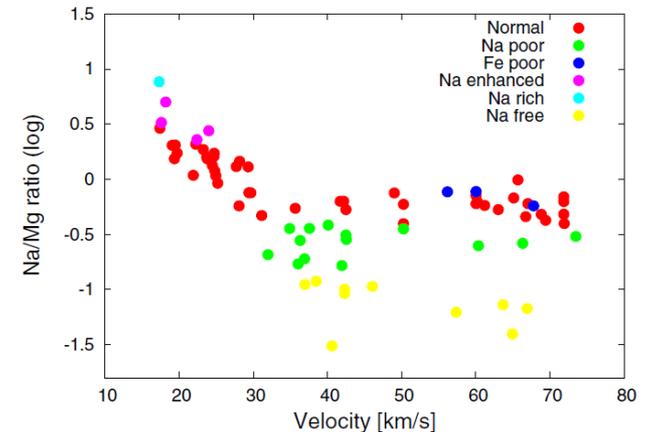
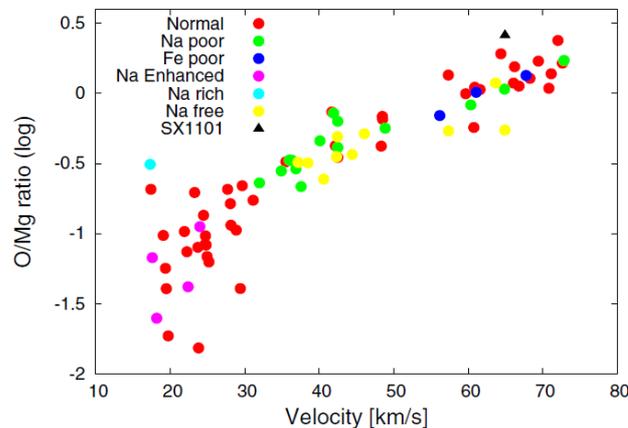
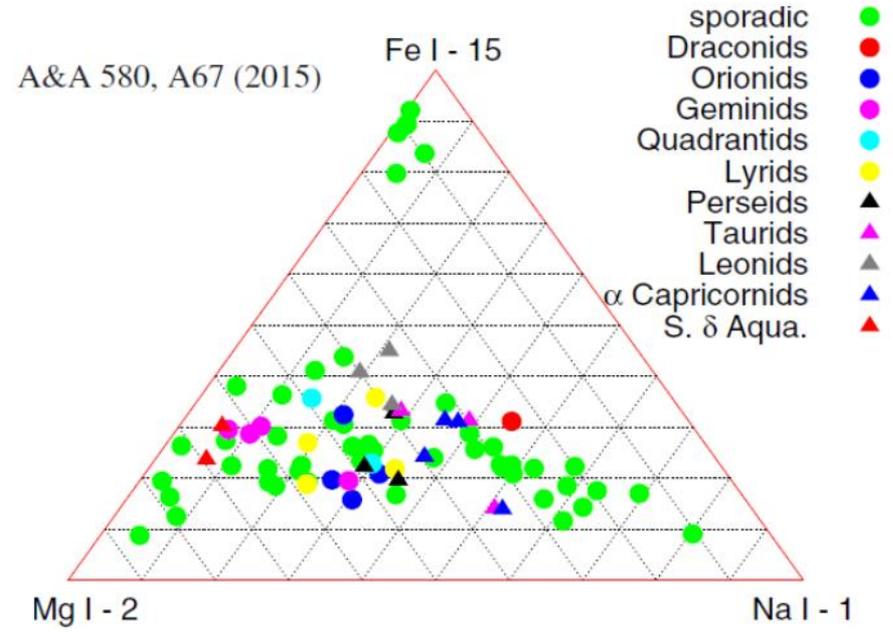
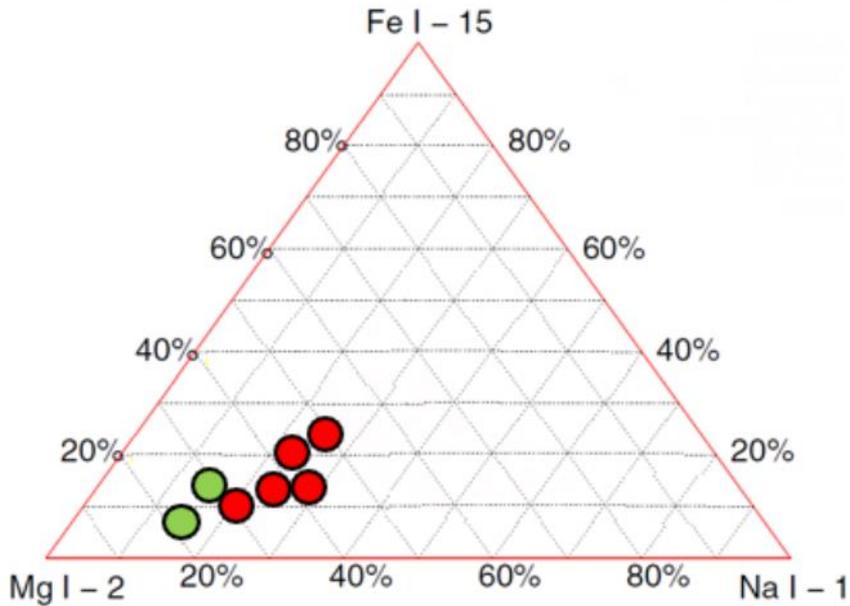
# 2018 ふたご座流星群のTernary graph



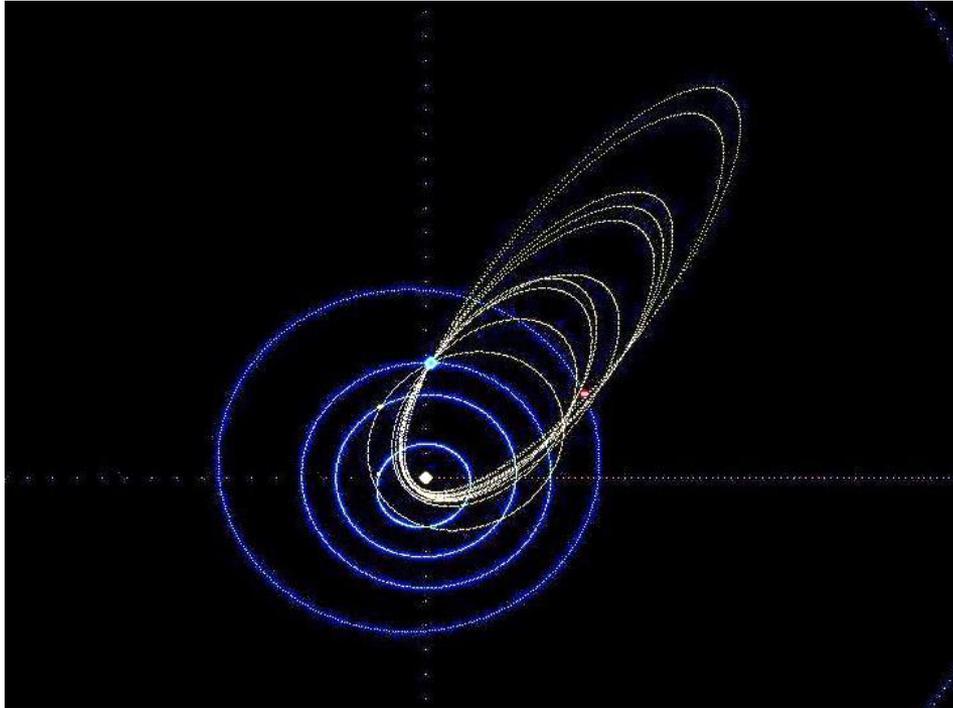
- おおむね、Na poor の傾向となりました
- 観測数が少ないので正しく性質を表しているかは不明とさせていただきます

# Ternary graphの比較

Catalogue of representative meteor spectra  
V. Vojáček et. al., A&A 580, A67 (2015)



# おしまい



平博流星分科会が観測した  
2018年のふたご群の日心軌道



残念な例:0次が撮れなかった



2019/1/21 金星・木星

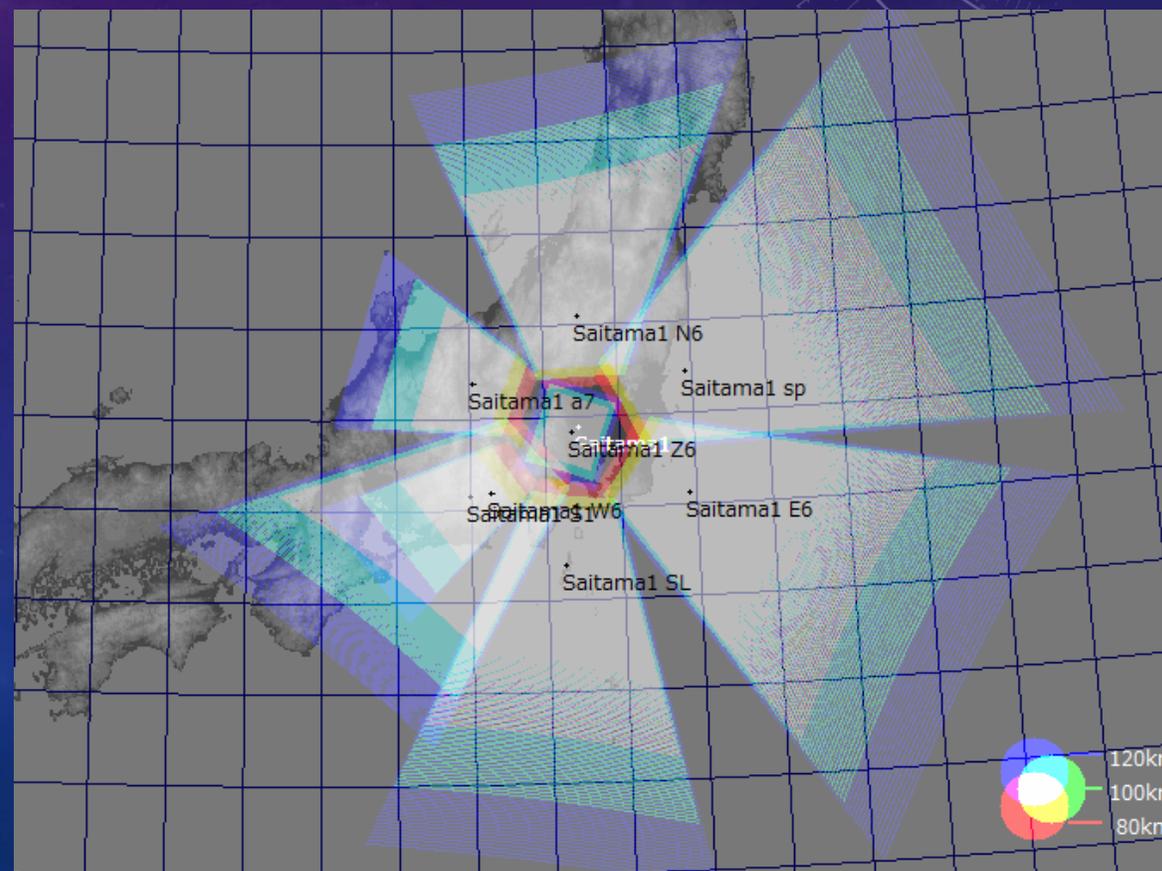
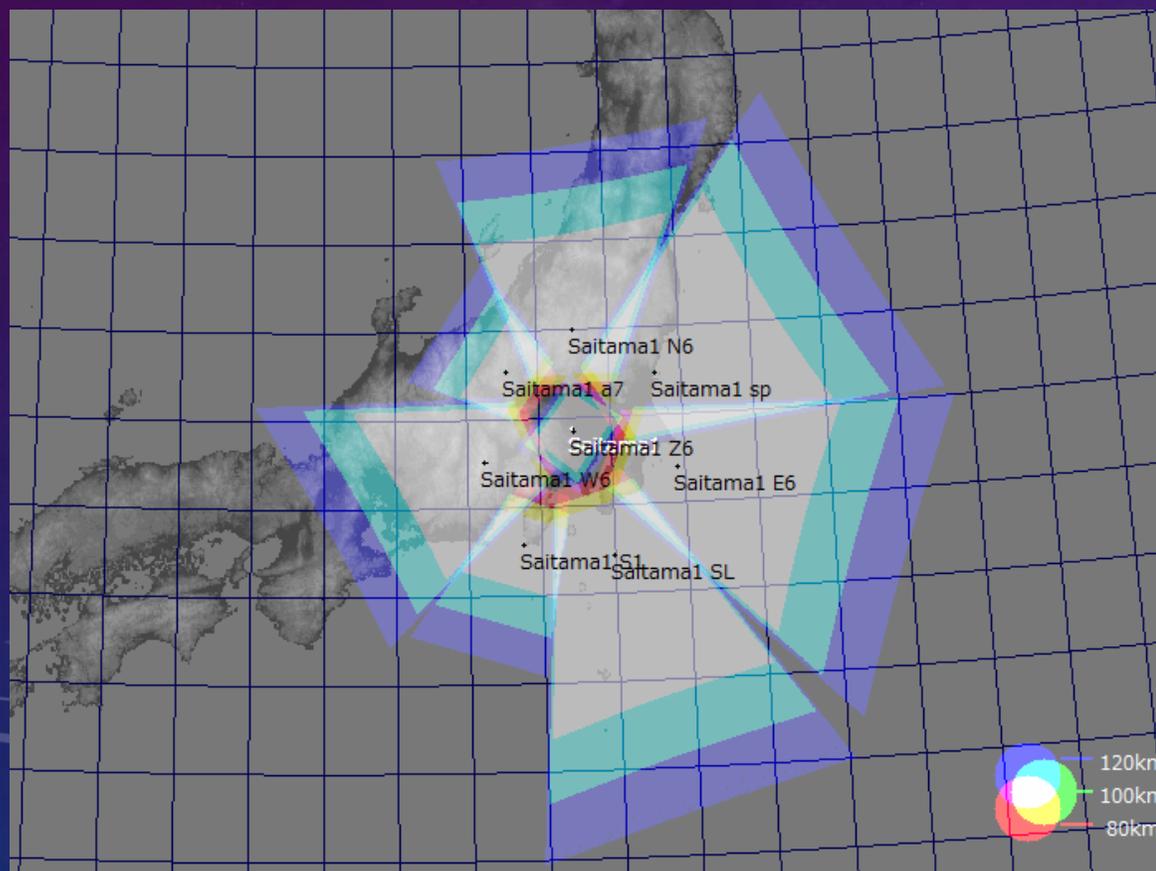
第151回流星物理セミナー 20190203

関口孝志

# 自動観測による 流星スペクトルの観測と分類



- 目的
- 1 流星スペクトルをたくさん撮影できるようにする
  - 2 解析ソフトの習得(RspecとBASSProject)
  - 3 流星スペクトルを分類する



# 1 流星スペクトルをたくさん撮影できるようにする

- ・観測方法の改善 カメラを5台から8台に。観測視野①と②
- ・装置 ビデオカメラ(Watec Neptune 100 + CBCレンズ6mm(4台)と12mm(1台) F0. 8)  
Watec 902H2U + CBCレンズ6mmと8mm F0. 8 + 分光器(グリズム ①と②)

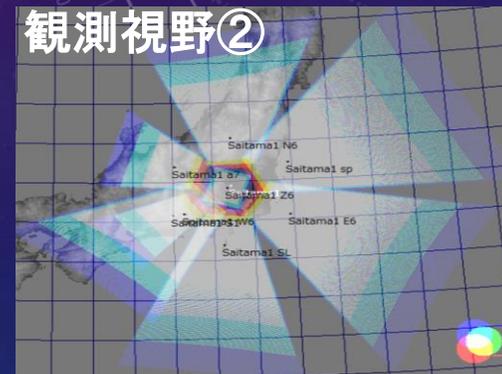
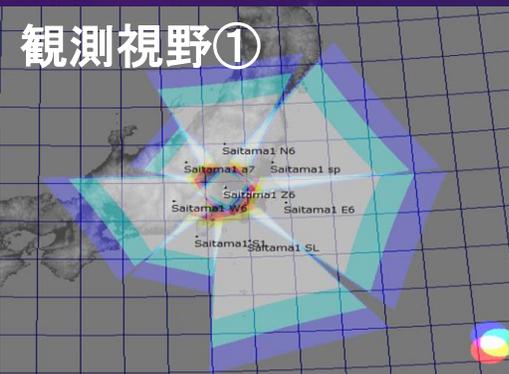
10月12日から 透過型回折格子フィルムで1台(カラー)

12月18日から 透過型回折格子フィルムで8台へ

27日から 透過型ブレード格子を2台に変更

1月 透過型ブレード格子を2台から3台へ

- ・ソフト UFOCaptureV2



①透過型回折格子フィルム

②透過型ブレード格子(600本/mmと200本/mm)



## カメラごとのスペクトル撮影数等

| 方向   | N6  | S12 | W6  | Z6  | E6  | NW50 | NE6 | SE8 | スペクトル |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|
| レンズ  | 6   | 12  | 6   | 6   | 6   | 50   | 6   | 8   | 合計    |
| レンズ  |     |     |     |     |     | 28   |     |     |       |
| 本/mm | 500 | 500 | 600 | 200 | 500 | 500  | 500 | 500 |       |
| 本/mm |     |     |     | 600 |     |      |     |     |       |
| 10月  |     |     |     |     |     | 5    |     |     | 5     |
| 11月  |     |     |     |     |     | 10   |     |     | 10    |
| 12月  | 8   | 7   | 26  | 17  | 9   | 52   | 9   | 14  | 142   |
| 1月   | 13  | 7   | 115 | 69  | 24  | 32   | 24  | 25  | 309   |
| 合計   | 21  | 14  | 141 | 88  | 33  | 99   | 33  | 39  | 468   |

## 2 解析ソフトの習得(Rspecの日本語版)

ファイル 編集 ビュー ツール ヘルプ

オンクストローム/ピクセル: 21.8

M20190109\_222605\_Saitama1\_SLP.jpg

Lines  
Profile  
Refer.

3000  
2750  
2500  
2250  
2000  
1750  
1500  
1250  
1000  
750  
500  
250  
0

オンクストローム(A)

191.0

要素

| 要素                                  | 詳細           |
|-------------------------------------|--------------|
| <input type="checkbox"/>            | Argon        |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Calcium      |
| <input type="checkbox"/>            | Carbon Stars |
| <input type="checkbox"/>            | Comets       |
| <input type="checkbox"/>            | Fraunhofer   |

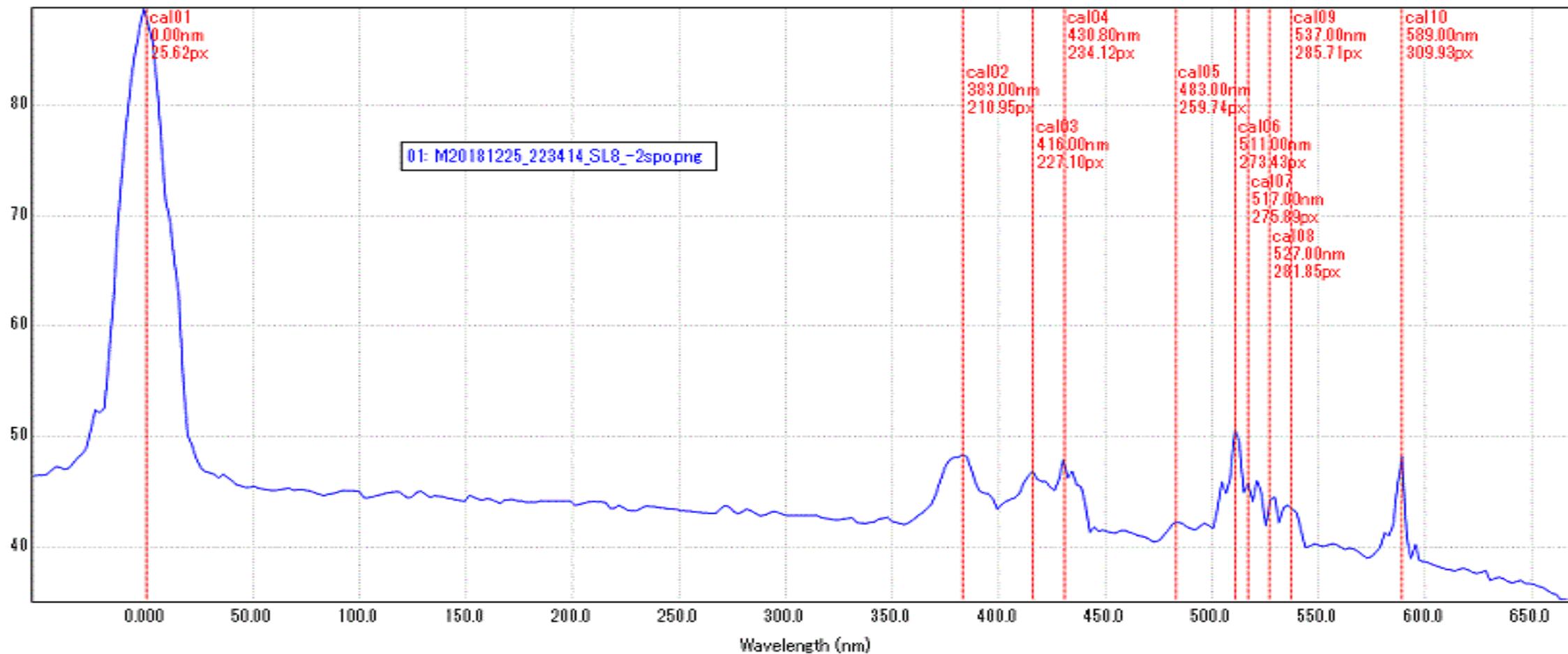
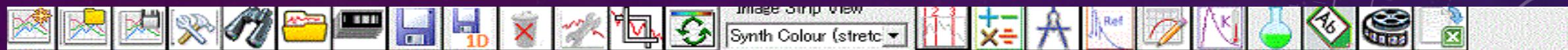
コントロール

ラベル

カスタマイズするラベルを選択

|                       |         |                       |          |                       |          |
|-----------------------|---------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| <input type="radio"/> | Na589   | <input type="radio"/> | Fe       | <input type="radio"/> | Label 13 |
| <input type="radio"/> | Label 2 | <input type="radio"/> | Si       | <input type="radio"/> | Label 14 |
| <input type="radio"/> | Mg      | <input type="radio"/> | Fe       | <input type="radio"/> | Label 15 |
| <input type="radio"/> | Label 4 | <input type="radio"/> | Label 10 | <input type="radio"/> | Label 16 |
| <input type="radio"/> | Si      | <input type="radio"/> | Label 11 | <input type="radio"/> | Label 17 |

## 2 解析ソフトの習得(BASSProject フリーソフト)

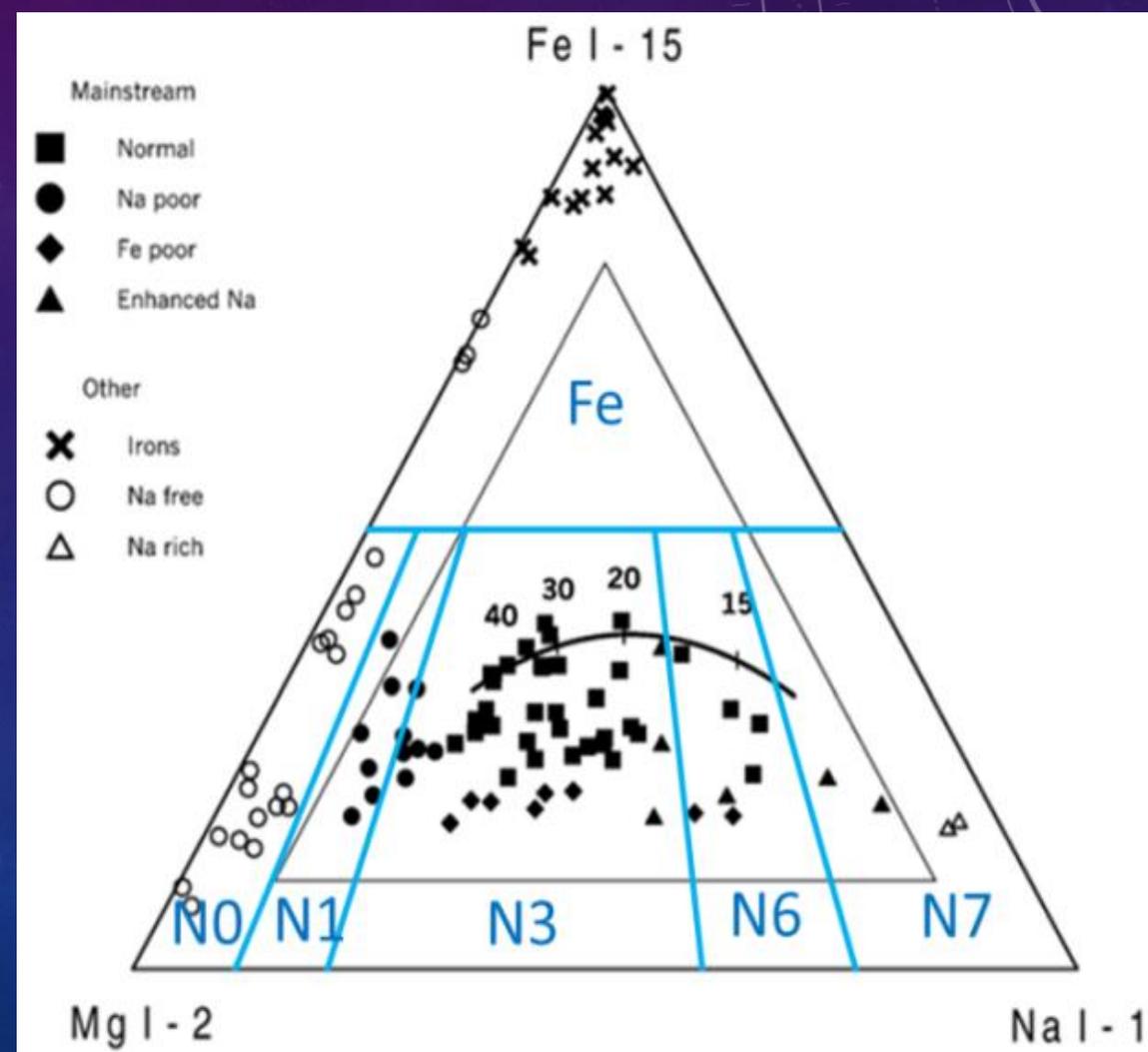
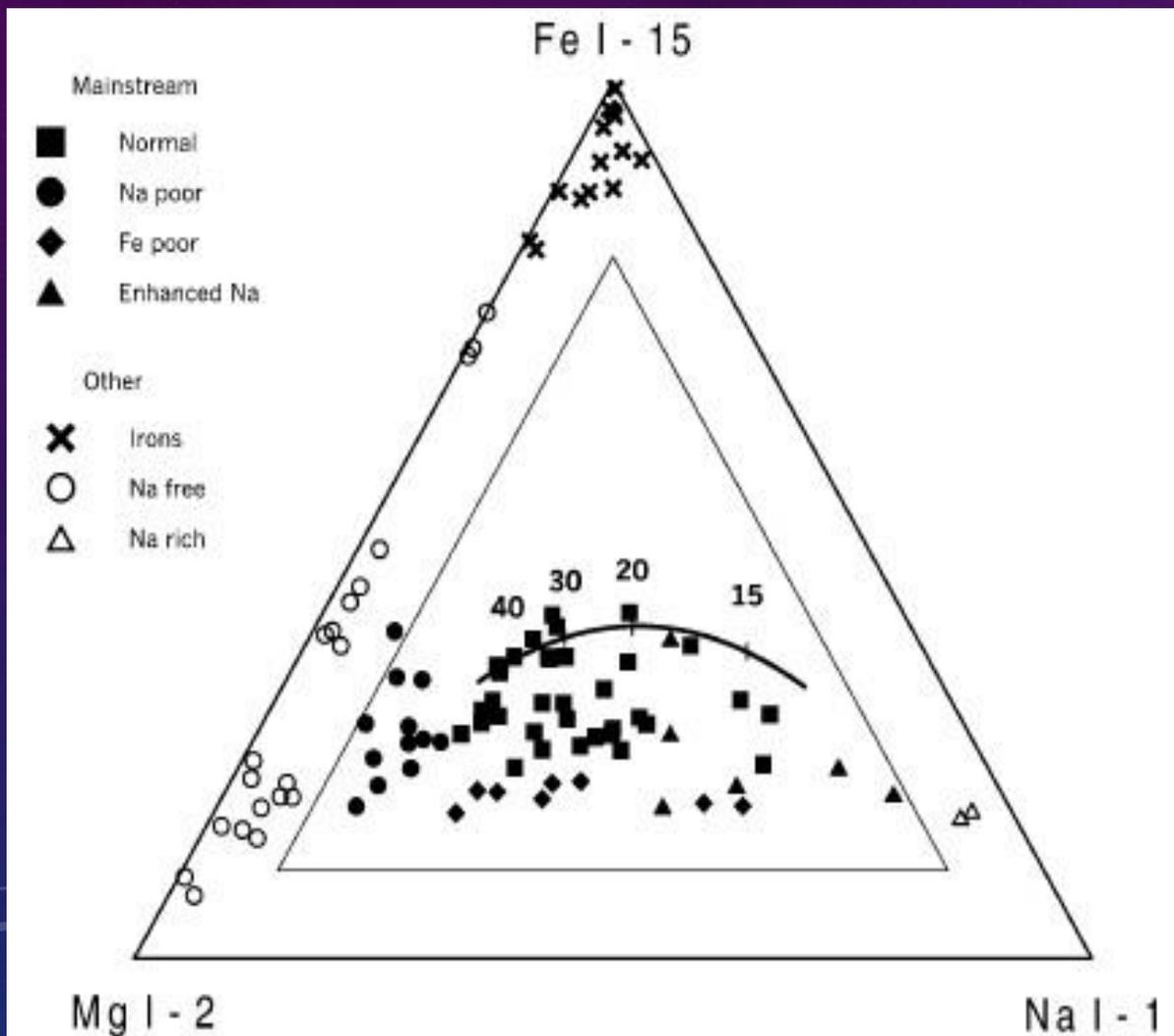


# 3 流星スペクトルを分類する

・ Mg-Na-Feの3種の元素のスペクトルの強度比によって、流星を分類

J. Borovička, et al Icarus 174, 15 (2005) の論文より

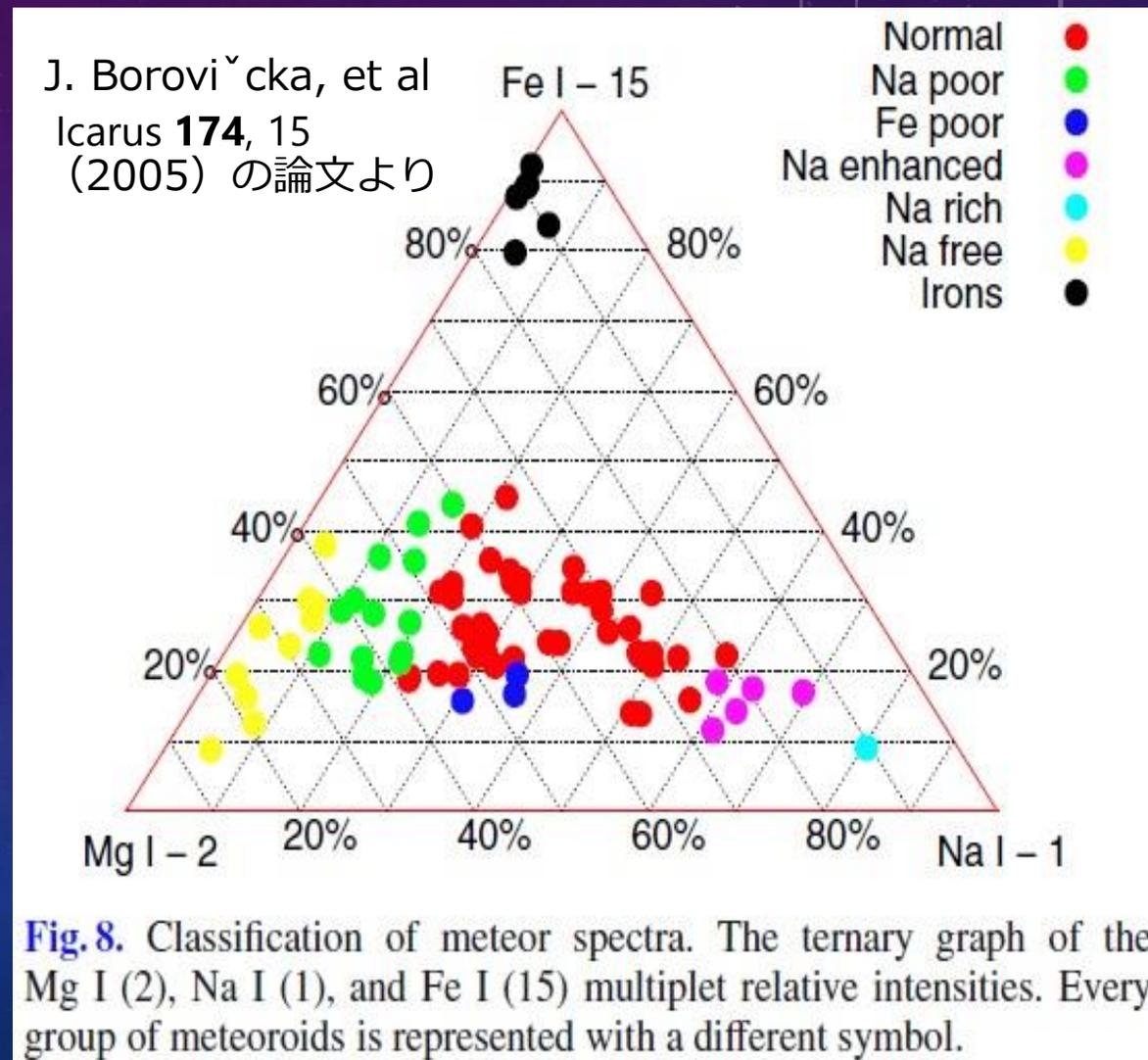
2017年8月26-27日 流星会議 前田氏



# 3 流星スペクトルを分類する

2017年8月26-27日 流星会議資料 前田氏

|    |             | Na/(Mg+Na) |
|----|-------------|------------|
| Fe | irons       | -          |
| N0 | Na free     | <10        |
| N1 | Na poor     | 10-20      |
| N3 | Normal      | 20-60      |
| N6 | Na enhanced | 60-75      |
| N7 | Na rich     | 75>        |
| Fp | Fe poor     | -          |

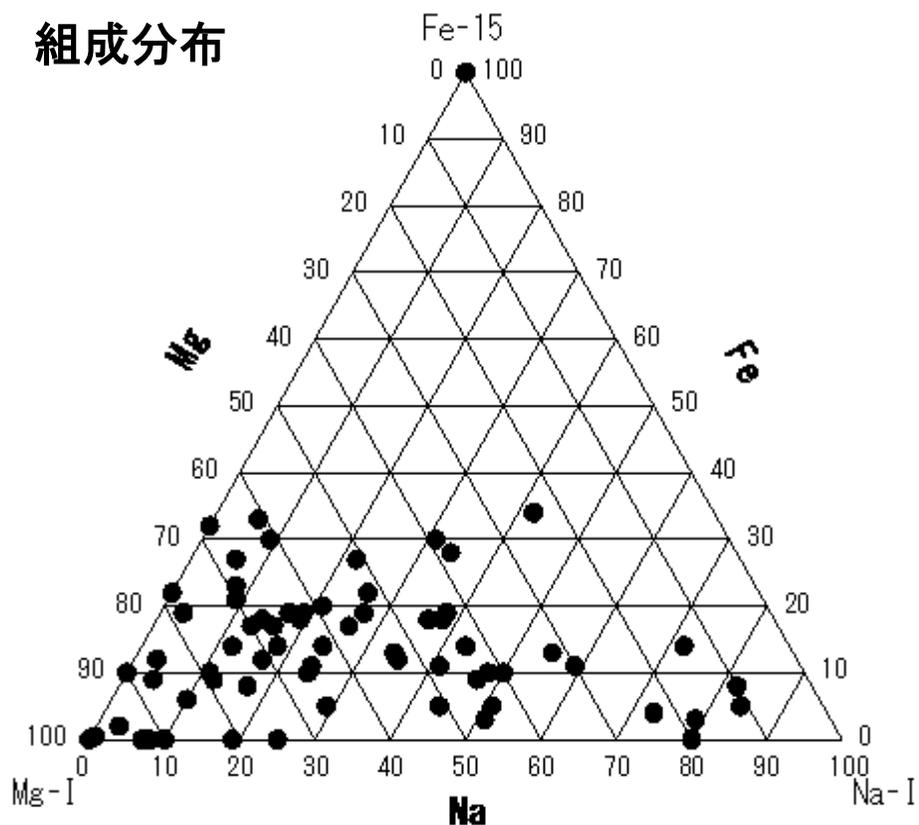


# 流星スペクトルの分類結果(a7sのみの66個)

- ・ Mg(518)-Na(589)-Fe(527)の3種の元素のスペクトルの強度比によって、流星を前田氏の6つに分類。今回は、バックグラウンドと傾斜補正のみで他の補正は、していない。

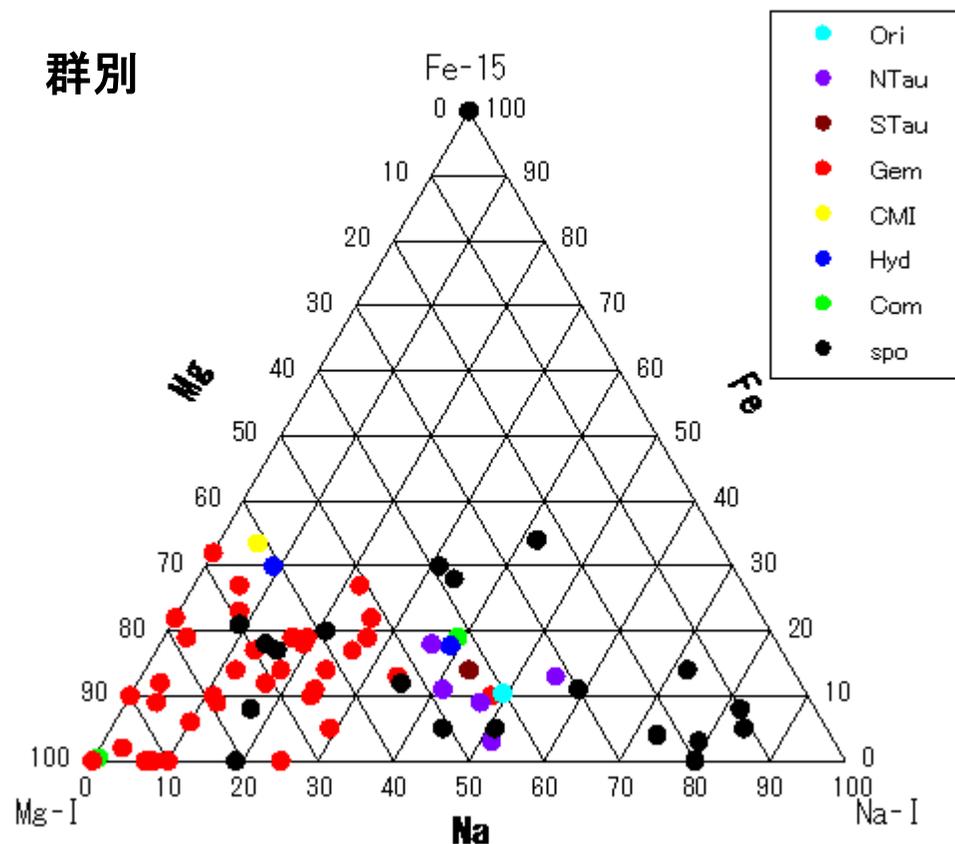
Mg-Na-Fe 三角ダイアグラム  
2018年10月-12月 a7s 50mm 関口

組成分布



2018年10月から12月 a7s 50mm 関口

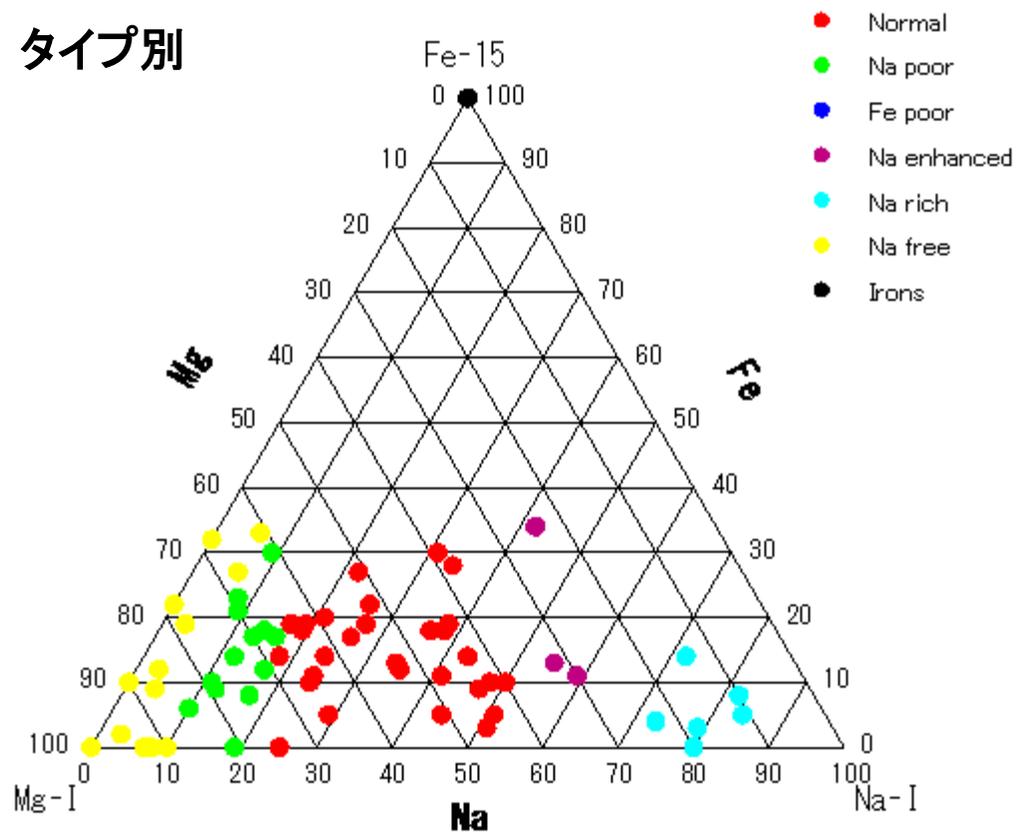
群別



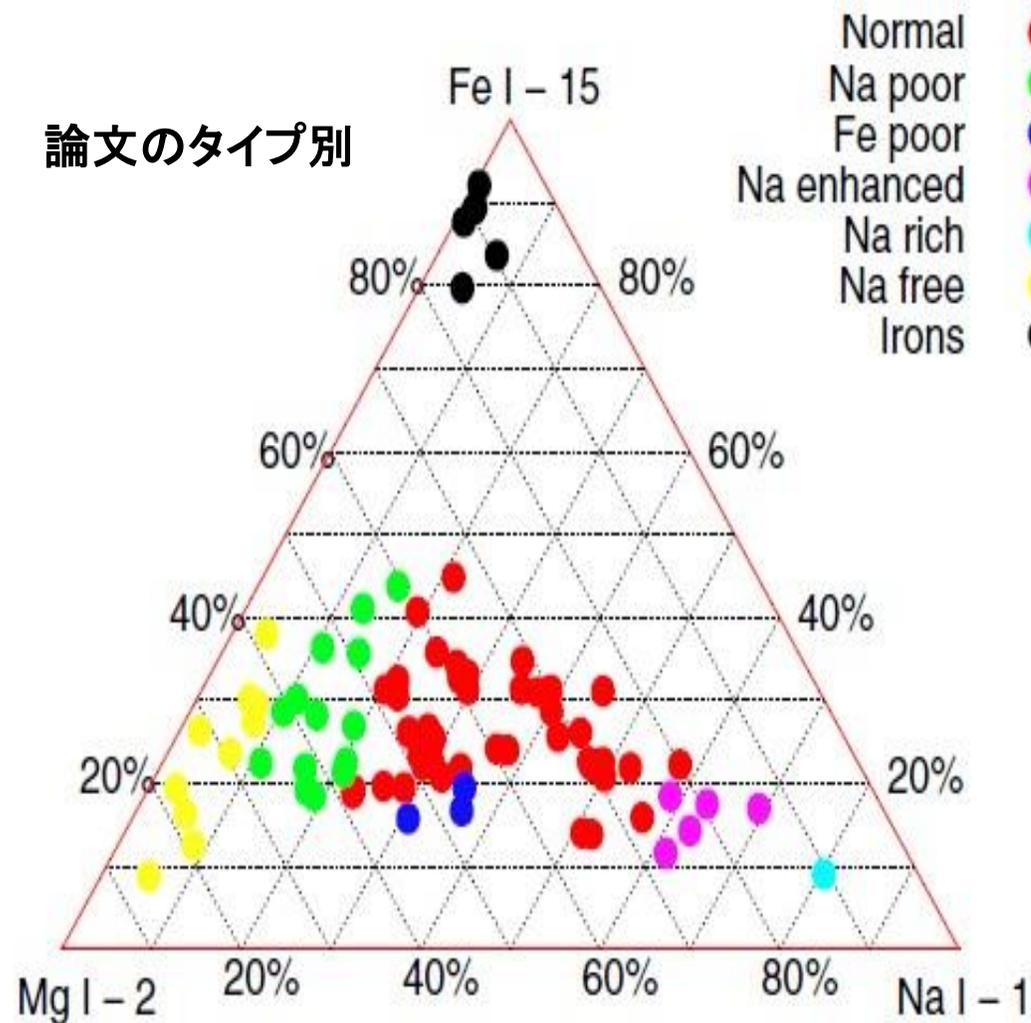
# 流星スペクトルの分類結果の比較

2018年10月-12月 a7s 50mm 関口

タイプ別

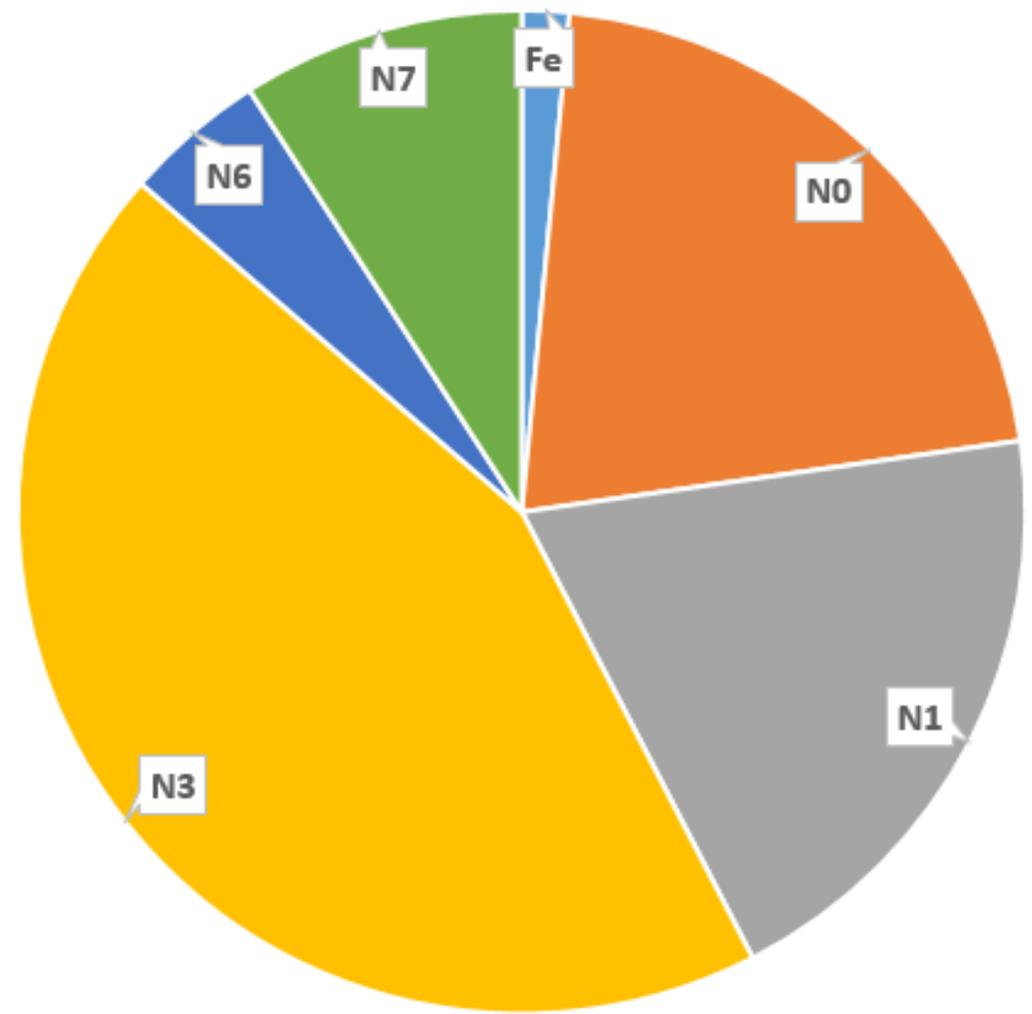


論文のタイプ別

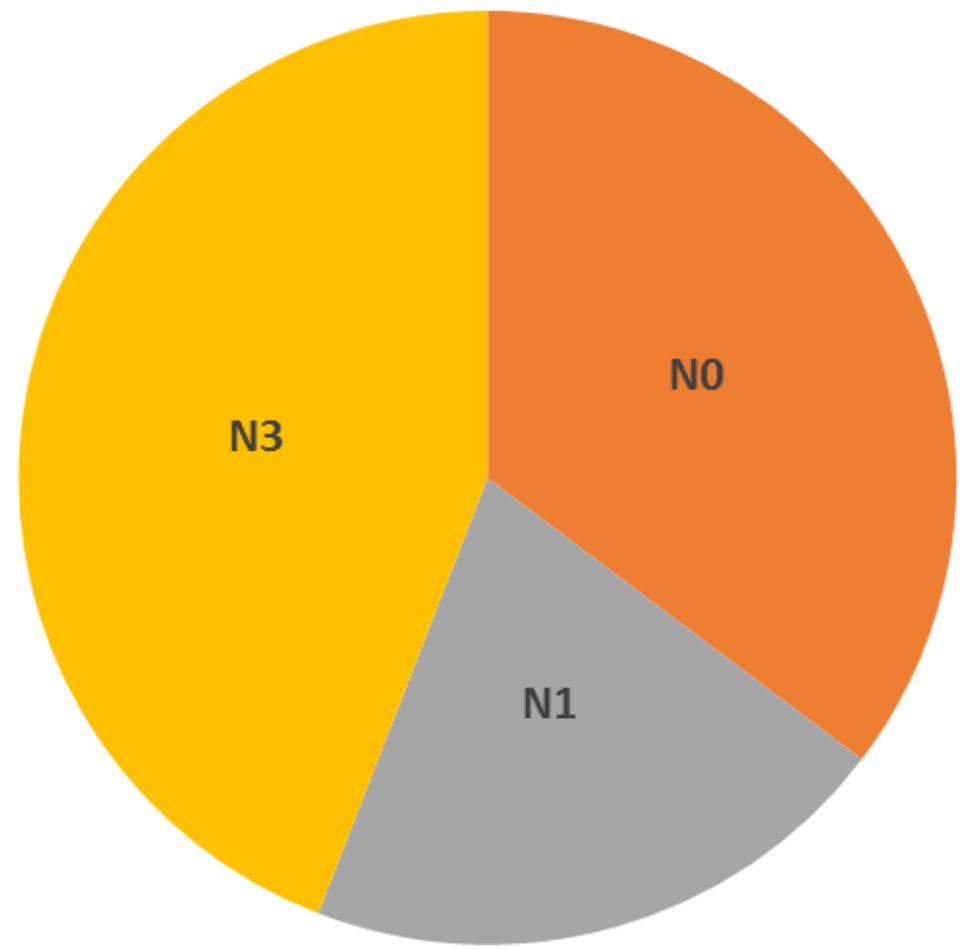


# 流星スペクトルのタイプ別の割合(a7sのみの66個)

タイプ別の割合



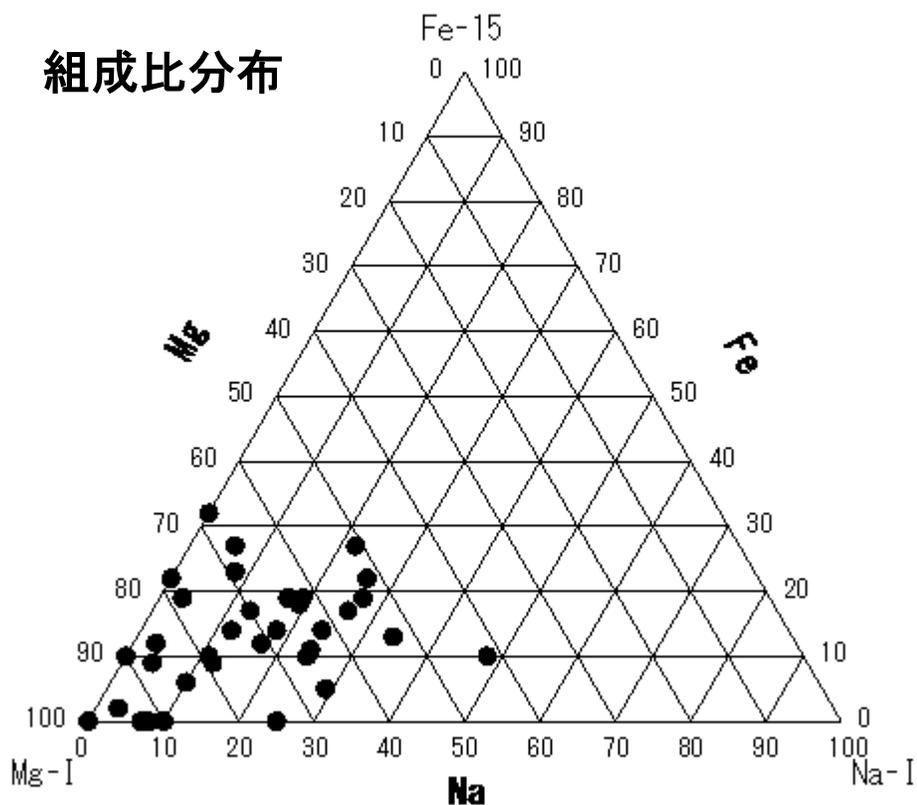
Gem群のタイプ別分布



# 流星スペクトルの分類結果(Gem群のみ)

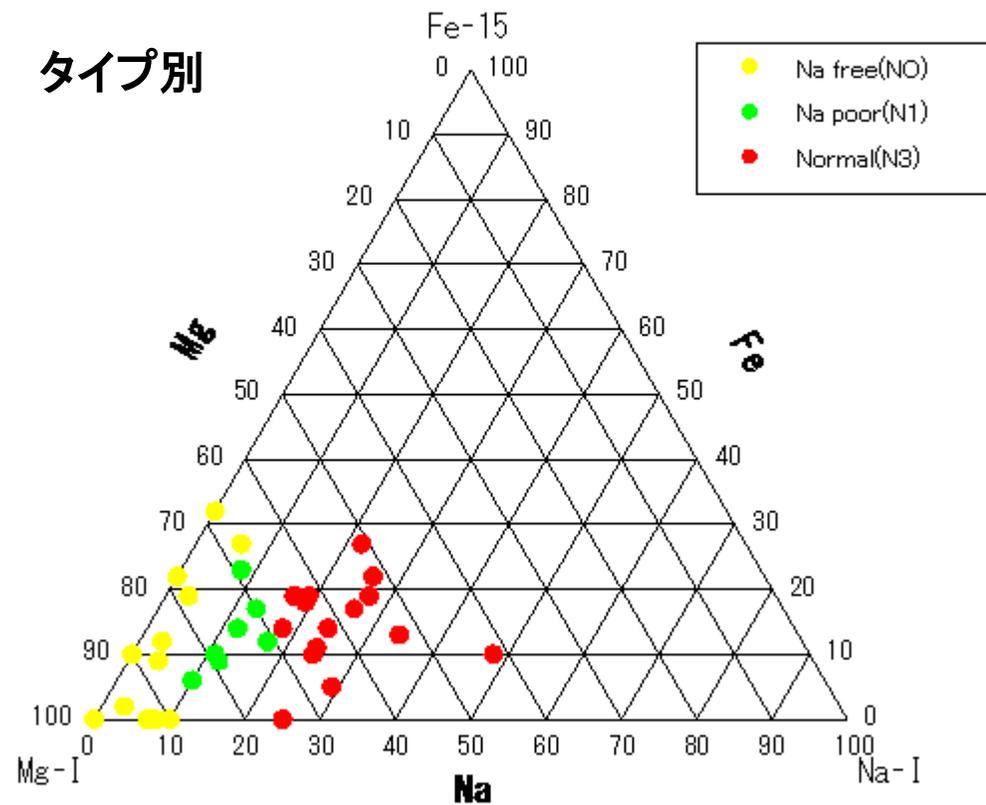
2018年12月 Gem群(34個) a7s 50mm 関口

組成比分布



2018年12月 Gem群(34個) a7s 50mm 関口

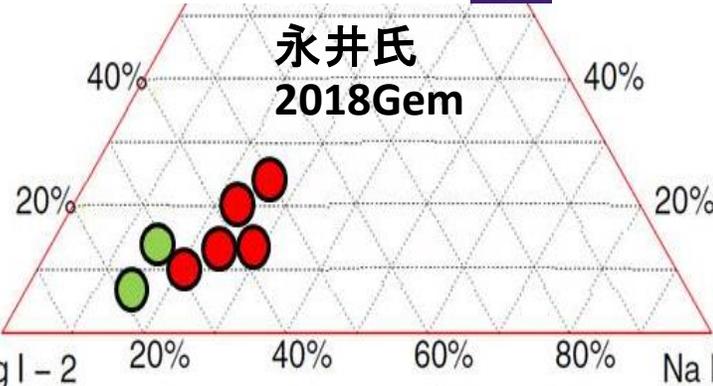
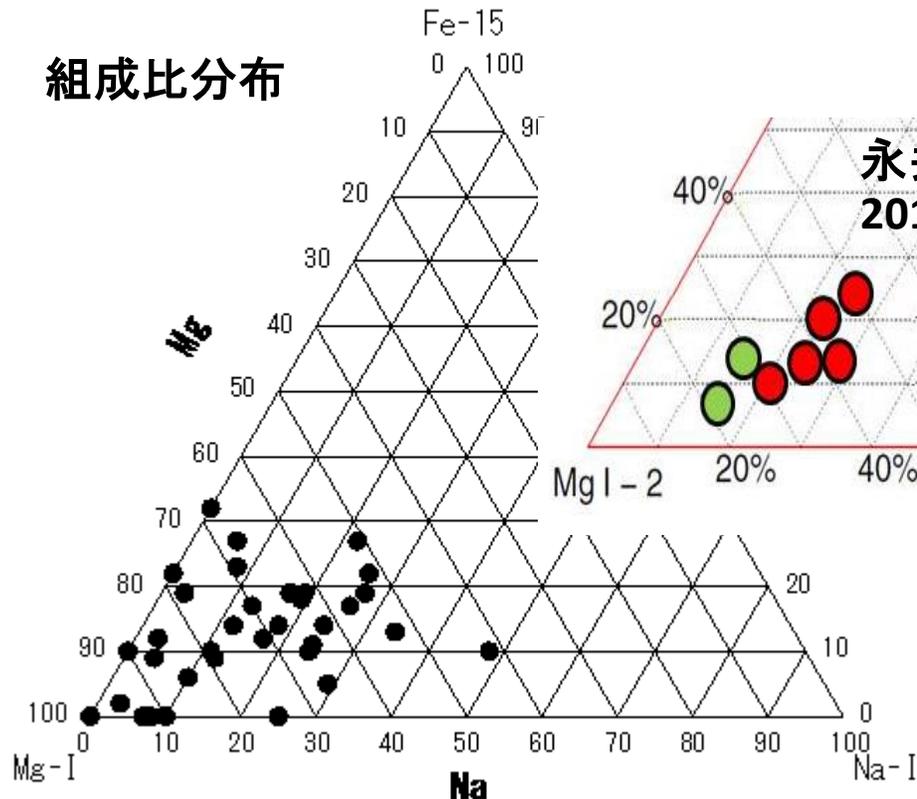
タイプ別



# 流星スペクトルの分類結果の比較(Gem群のみ)

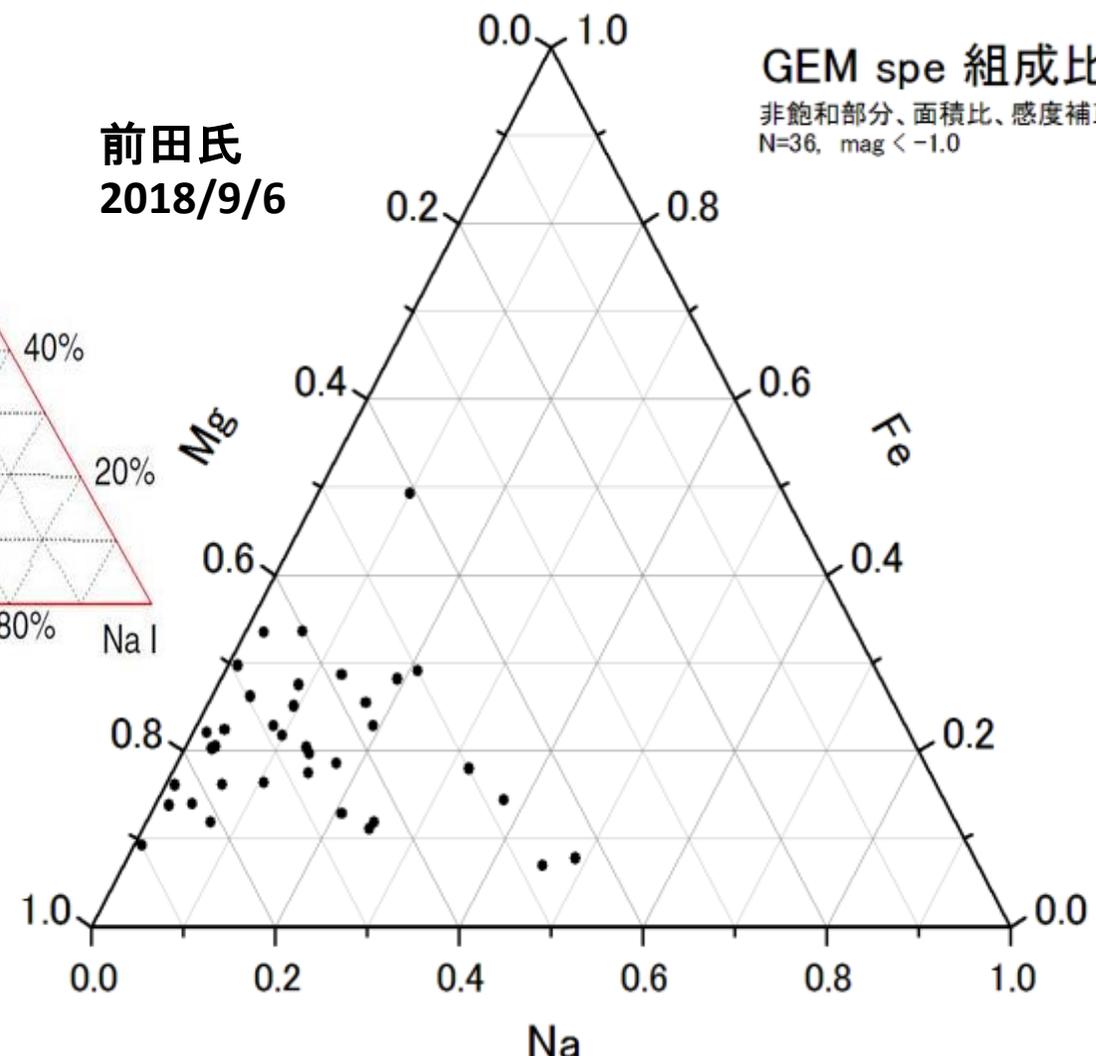
2018年12月 Gem群(34個) a7s 50mm 関口

組成比分布



前田氏  
2018/9/6

GEM spe 組成比  
非飽和部分、面積比、感度補正未  
N=36, mag < -1.0



# スペクトル画像の分類

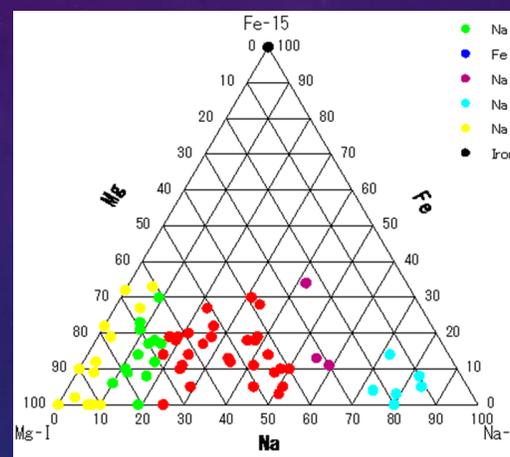
Fe iron

N7 Na rich

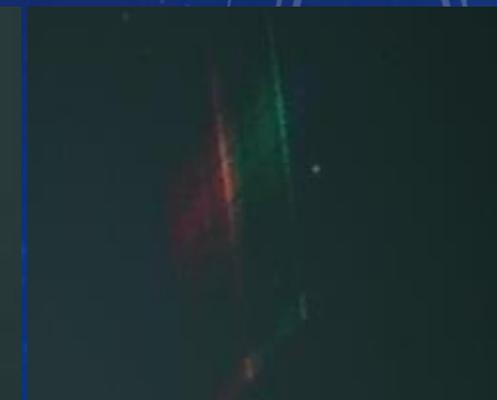
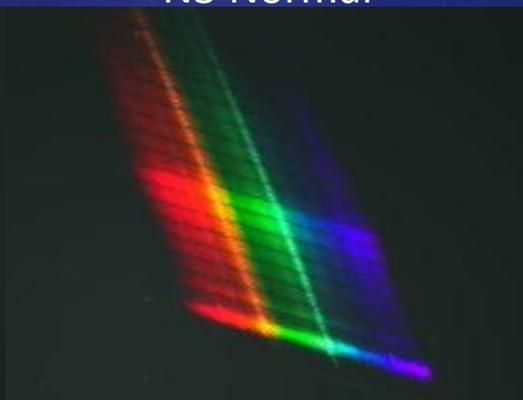
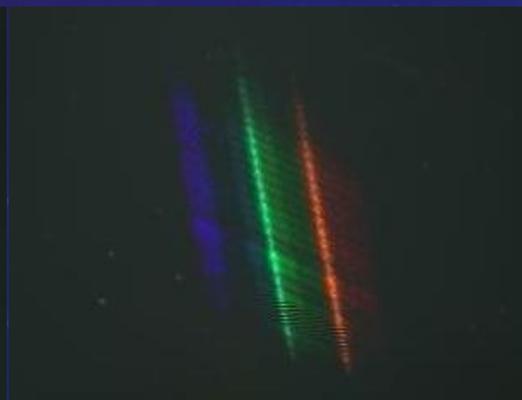
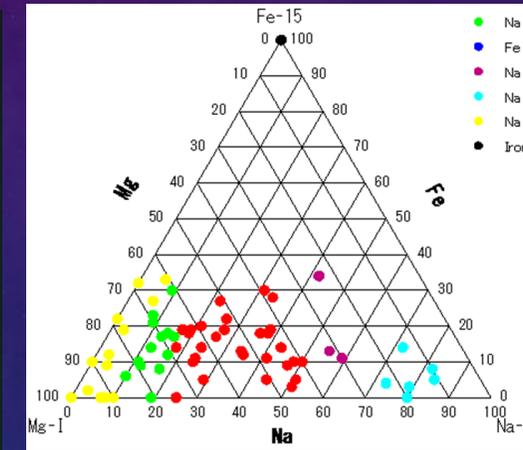
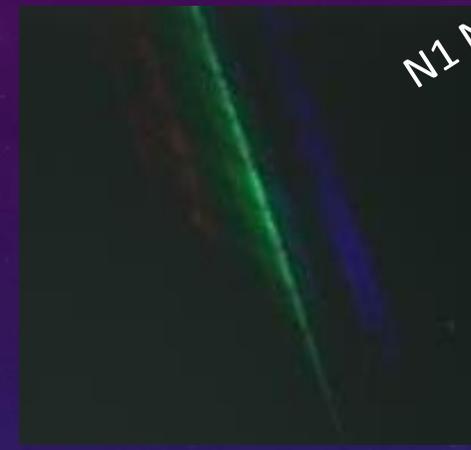
N0 Na Free

N1 Na poor

N6 Enhanced Na



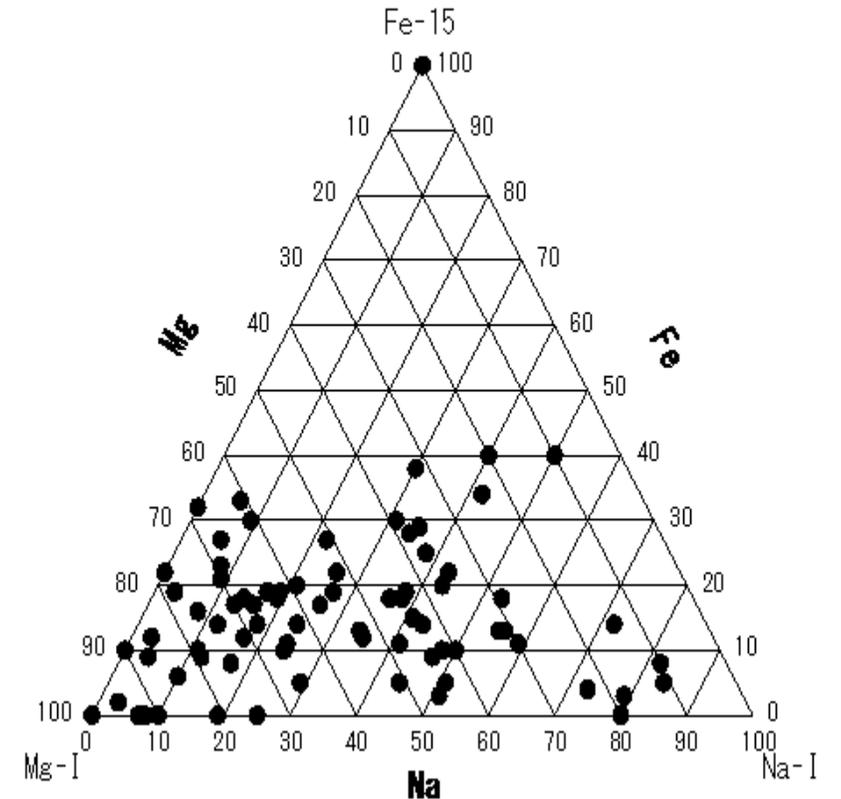
N3 Normal



# 流星スペクトルの分類のまとめと課題

- 8台のカメラの観測で、4か月で450個以上のスペクトルが得られた。今回のデータは、そのうちのカラーの12月までの66個のみを解析した。
- カラーのスペクトルは、輝線の色から波長同定の判定がしやすい。
- ほとんどの流星はNaとMgが主成分だが、NaやMgのどちらかが非常に少ないものや、両方とも無い特殊な物も見られた。鉄流星は、暗くて遅い。
- 暗いものや分散方向が悪いものも結構あった。
- 今回は、鉄を527nmだけで判定したので、組成比の求め方が課題である。どこを測定するのもかも。
- 数が少ないがふたご群以外の群の群別のタイプや速度との関係等も検討したい。

2018年10月-2019年1月 関口



# 流星スペクトル研究集会で出た 課題と解決方法

第152回 流星物理セミナー

7/Jul/2019

渋谷区立 勤労福祉会館 第二洋室

VSOLJ 永井和男

# 流星スペクトル研究集会で出た課題と解決方法

## 3/8 第一回 スペクトル研究集会で出た 輝線強度測定に対する課題

### 1. 周知

1. 飽和を確認してから測定しましょう
2. 分光感度補正をしてから輝線強度測定する

### 2. 研究会で

1. 比較明合成で良いのか(明るいフレームだけ測定される)
2. 回転や傾きでレベルが変わる?
3. 輝線強度測定はガウス関数で近似した複数波の合成で求める(周知)
4.  $\gamma$ の逆補正してから輝線強度測定する
5. ブラックボディーの影響は無いのか?

# 飽和の確認

# 飽和している画像

The screenshot displays the 'すばる画像処理ソフト: マカリ - M20181226\_043703\_KN9\_02P.jpg' application. The main window shows a dark image with a bright horizontal line, indicating saturation. The 'グラフ' (Graph) window is open, showing a histogram for the selected region [115, 304] - [421, 304]. The histogram shows a sharp peak at the maximum value of 255, confirming saturation. The histogram data is as follows:

| Channel | Value |
|---------|-------|
| R       | 259   |
| G       | 259   |
| B       | 259   |

The histogram window also includes controls for the selection range, axes, and display options. The horizontal axis is labeled '起点からの距離 [pixels]' and ranges from 0.0 to 300.0. The vertical axis ranges from 0 to 250. The window title is 'グラフ [ M20181226\_043703\_KN9\_02P.jpg ]'.

マカリのグラフ機能を使うと飽和しているか確認できます

# 飽和していない画像

すばる画像処理ソフト: マリ - M20181218\_012522\_KN9\_02P.jpg

終了 開く 保存 印刷 FITSツグー 切り抜き プラック 測光 位置測定 グラフ エクスポート ヘルプ

カラー 対数 0 255 自動調整 マークの非表示

X: 713 Y: 182 カウント値: 79.0 平均値: 77.4

M20181218\_012522\_KN9\_02P.jpg (1倍) [732x498x3]

グラフ [ M20181218\_012522\_KN9\_02P.jpg ]

X: Y: カウント値:

グラフ選択範囲 [ 469, 186 ]-[ 714, 186 ] 始点からの距離

R:254 G:254 B:254  
R:62 G:62 B:62

200  
150  
100  
0.0 50.0 100.0 150.0 200.0 始点からの距離 [pixels]

水平倍率(M): 2.28 縦軸(V): R, G, B 対数(L) スケール設定(S)

マーク:  すべて表示(G)  別画像のグラフ表示(D)

非表示(D) 全表示(B) 消去(E) 開じる(O) ヘルプ(H)

印刷(P) テキスト出力(T) 分散軸変更(A)

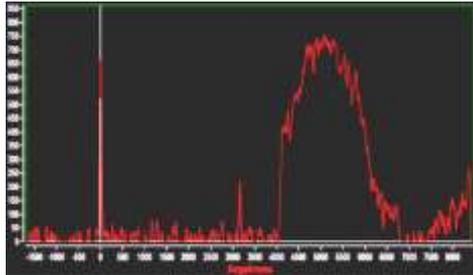
2018/12/18 (1:55:00.4) L1 0362 500005+073 IC1672 6mmF8.95 KN9 02

ImageJを使っている方もいました  
そもそも jpeg を測定して良いのか? → BMPを使うようにしました

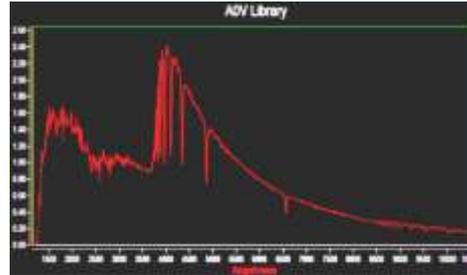
# 分光感度補正

# 分光感度補正の原理

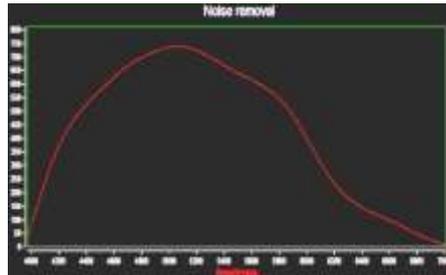
シリウスを撮影



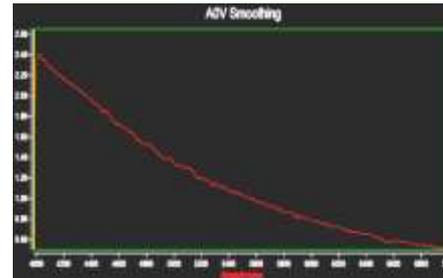
シリウスの  
ライブラリデータ



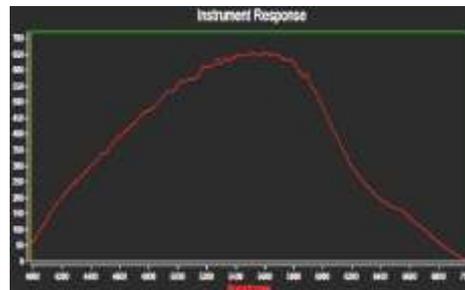
ノイズを除去して  
コンティニウムな  
ラインを作成



ノイズや吸収線を除去して  
コンティニウムなラインを作成



撮影したスペクトル(RAW)をライブラリ  
スペクトル(Library)で割り算すると  
機械レスポンス(Inst.)が得られます



割り算

$$\text{Instrument Response} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Library Spectrum}}$$

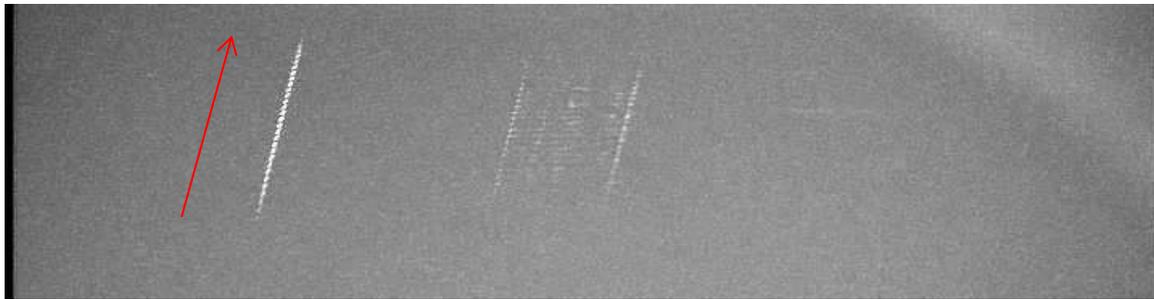
$$\text{Calibrated Profile} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Instrument Response}}$$

流星のスペクトル(RAW)が撮影出来たら機械レスポンス(Inst.)  
で割ると分光感度補正された流星スペクトルが得られます

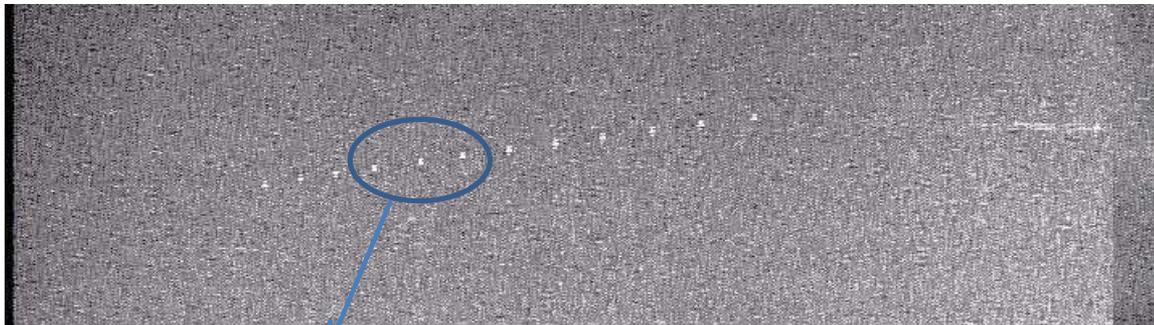
比較明合成で良いの？

# 比較明合成では加算されない？

- 多くの人が UFO capture が出力する比較明合成画像を使っている
- 複数フレームにスペクトルが写っていると比較明合成では加算されない

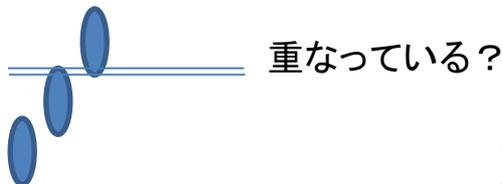


流星は下から上に流れた



各フレームの0次を重ねた

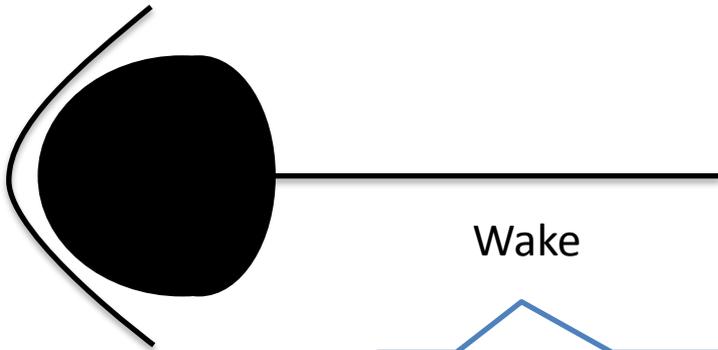
フレーム間で僅かに重なっているようにも見える



どの流星で調べてもあまり変わらない？(ハレーシヨンの類)  
流星は点光源？

# 流星は点と尾

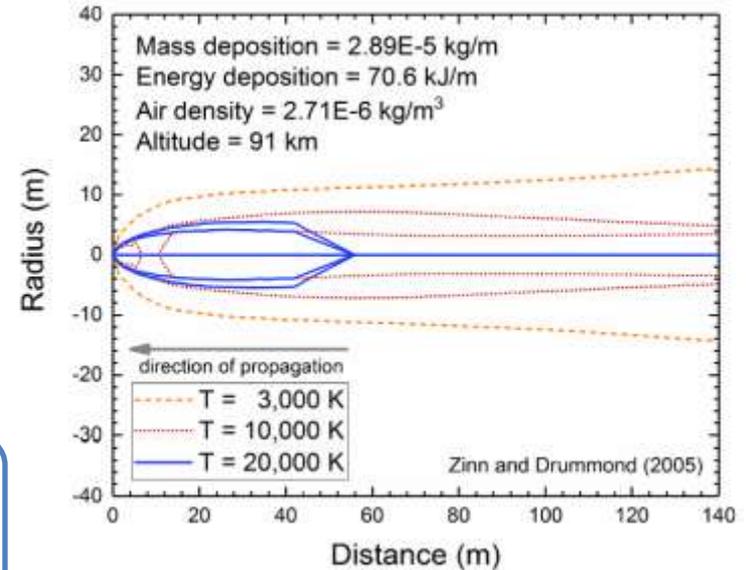
- 日本 阿部先生のお話では「流星は点だが尾がある」
  - 2019/6/1 自然科学カフェ「人工流れ星で何が分かるのか？」



Wake

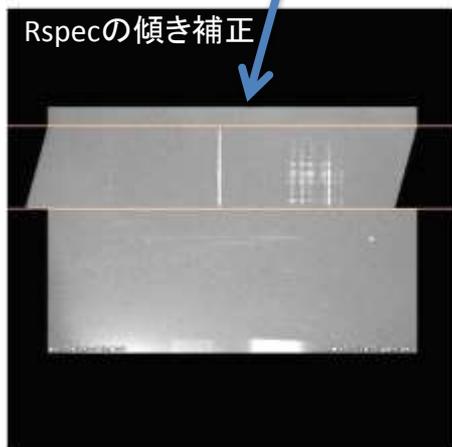
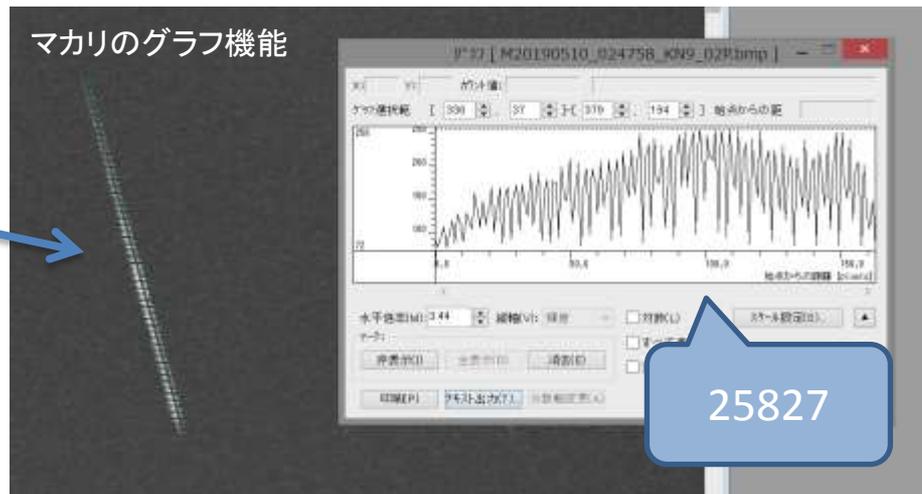
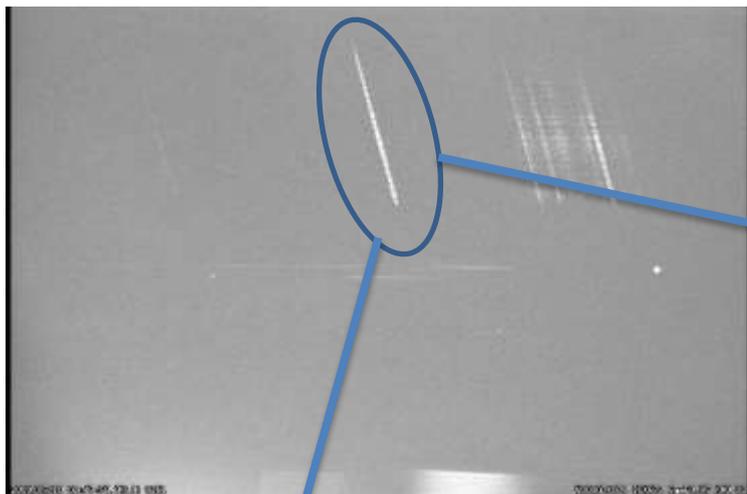
Wakeと言う細長い線がある

細くて暗いので分光出来そうに  
なく比較明合成で良いと思う



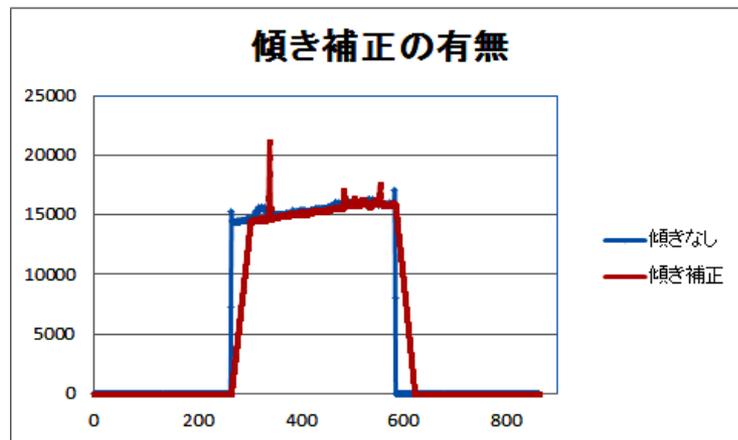
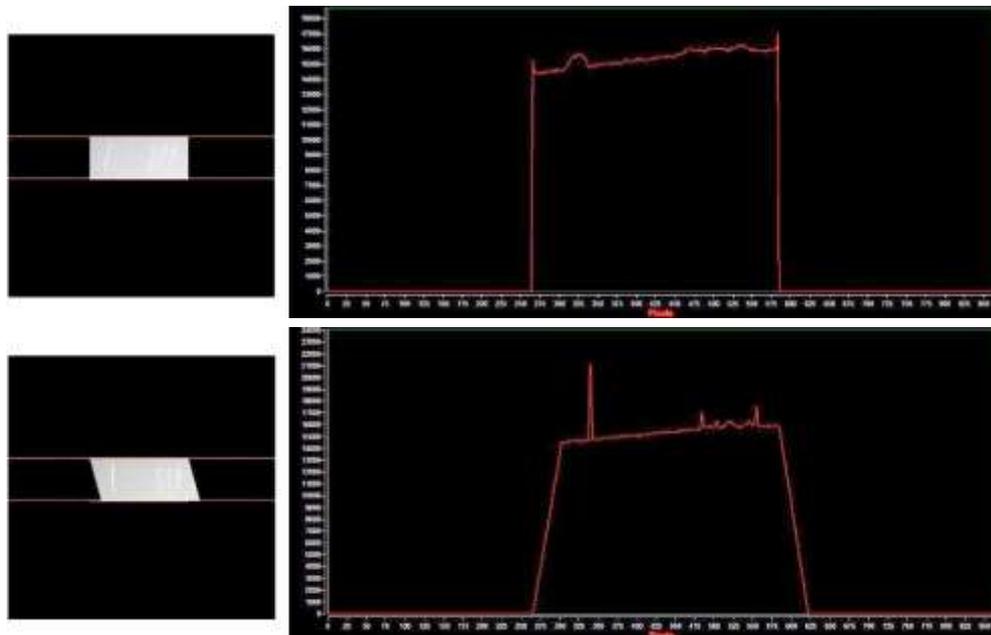
画像の回転や傾きで  
信号レベルが変わるソフトがある

# 回転と傾きでレベルが変わるソフトがある (RSpecを確認)



画像処理ソフトによっては画回転などでカウント値が変わる  
RSpecを確認した、変わっていないようです。

# RSpecの回転と傾き



補正前 = 4924450

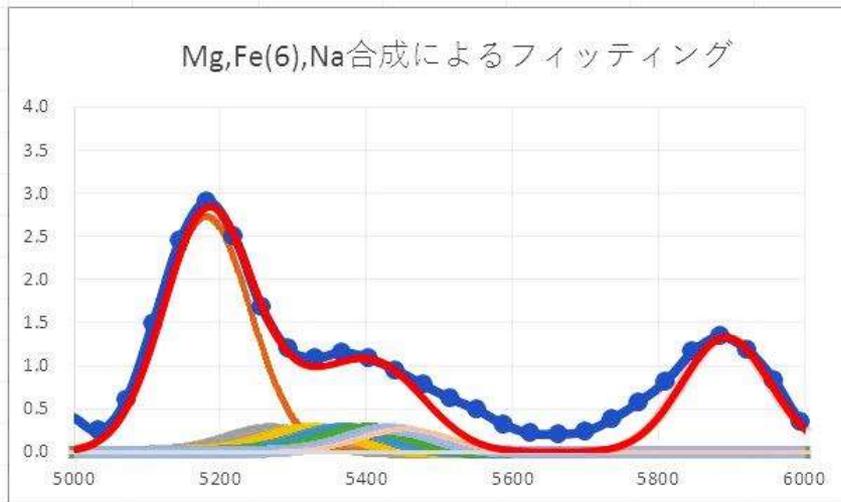
補正後 = 4924450

- 画像処理ソフトによっては画回転などでカウント値が変わる
- RSpecを確認しました
  - 全黒画像に傾いたままの流星スペクトルを張り付けて傾き補正した
  - 傾き補正しても総カウント値は変わりませんでした

スペクトル線は複数が合成されたもの

# 輝線強度は複数波の合成で測る

- スペクトルは複数の輝線の合成なので輝線強度測定をする時も複数の輝線を合成して再現させて測定する
  - 1波で測っては正しい強度が測れない(特に「鉄」)
  - 複数波合成のエクセルシートを作成した  
[http://eclipsingbinary.web.fc2.com/spectrum\\_intensity.htm](http://eclipsingbinary.web.fc2.com/spectrum_intensity.htm)



- 8つの波長の波を合成して流星スペクトルを再現します

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

- この公式で標準偏差を変化させ、さらに波高値を調整し、構成する波の合成が観測値と一致するようにします
- 調整した波高値が輝線強度になります

黄色に数値を入れます

|      | Mg I | Fe I | Na I |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 標準偏差 | 60   | 60   | 60   | 60   | 60   | 60   | 60   | 60   |
| 輝線波長 | 5182 | 5269 | 5328 | 5371 | 5404 | 5431 | 5449 | 5892 |
| 定数   | 410  | 40   | 40   | 40   | 40   | 40   | 40   | 200  |

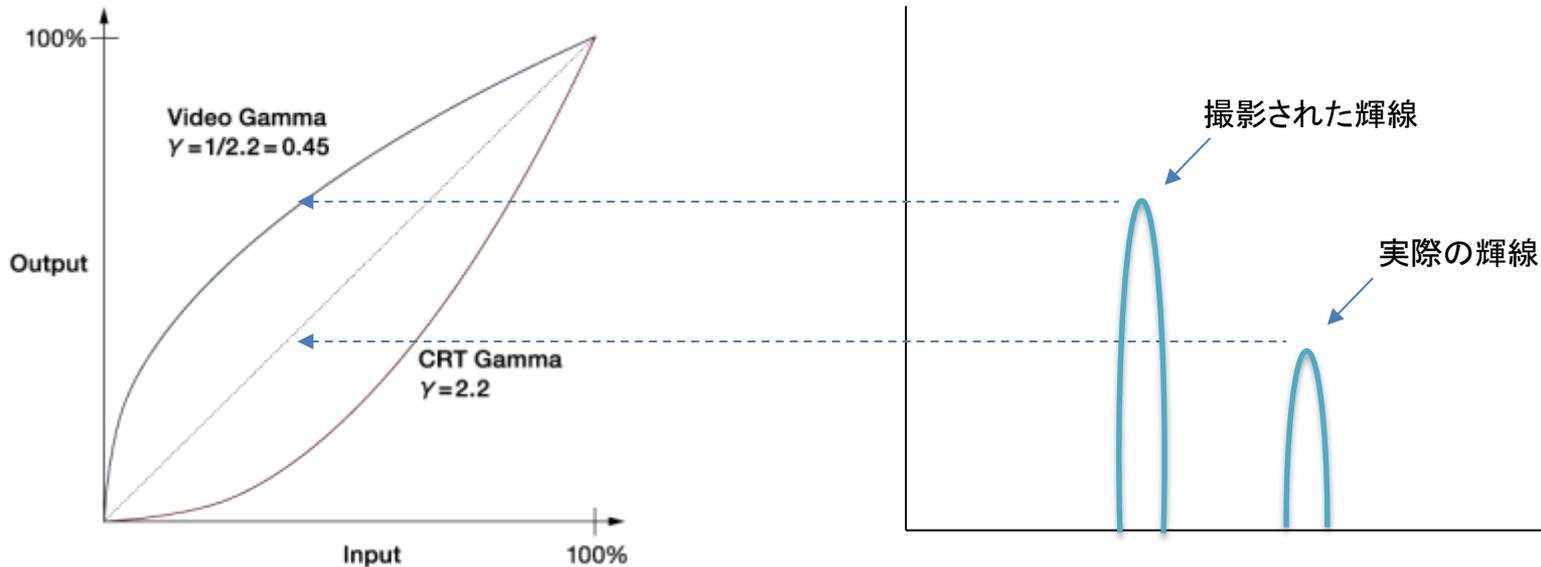
組成比

|    |      |
|----|------|
| Mg | 0.48 |
| Fe | 0.28 |
| Na | 0.24 |

# ガンマ補正

# ビデオカメラは $\gamma$ 補正されています

- ビデオカメラは $\gamma$ 補正されているので輝線の強度によっては高めに記録される
- DSLRでも動画撮影するとRAW画像では無いので $\gamma$ 補正されている
  - しかも、カメラの設定で $\gamma$ 値が変わってしまうカメラもある
- 自身のカメラの $\gamma$ を測定して逆補正しないと輝線強度は測れない



# ガンマ特性測定



画面全体が明るい映像機器は平均輝度を下げようとするのでボール紙で点光源にします  
エクスペリアはガンマ=2.2で画質調整されています

紙の箱で周囲の外光を塞ぐとともにカメラと光源の距離が一定になるようにしました

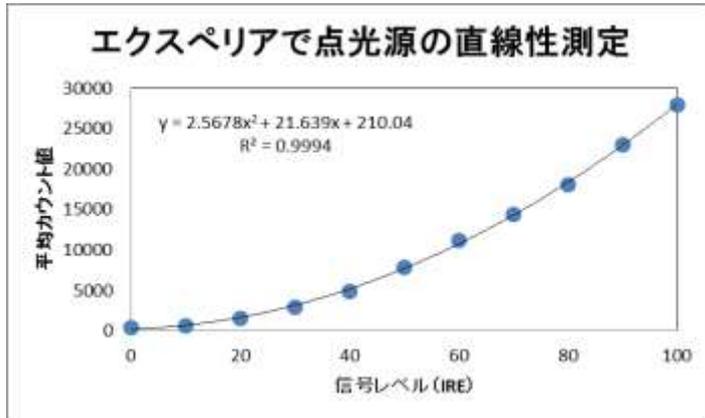


# 測定したカメラ

- 南カメラ KN9\_01 CMOS
  - 大島上空100km
  - IMX225 SONY CMOS イメージャー 3.75x3.75 $\mu$ m 1/3type
  - f=8mm F1.2, 720p
  - グレーチング 200本/mm
  - FOV 30x20deg.
- 南低空カメラ KN9\_02 CCD
  - 御蔵島上空100km
  - ICX672 SONY CCD イメージャー 5.0x7.4 $\mu$ m 1/3type
  - f=6mm F0.95, 720i
  - グレーチング 300本/mm
  - FOV 40x30deg.
- ビデオキャプチャー
  - IO-DATA GV-USB2



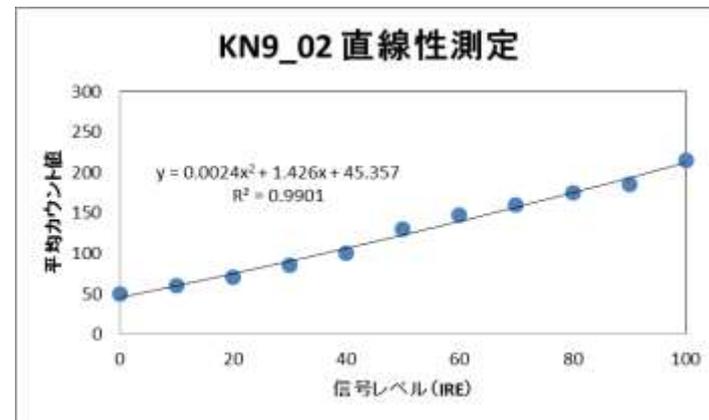
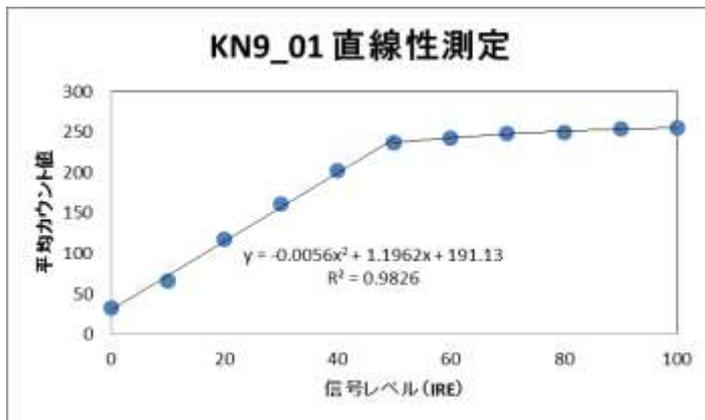
# KN9\_01(CMOS)とKN9\_02(CCD)の $\gamma$ 測定



スマートフォンのエクスペリアZ2で背景を黒にして点状の白を表示させ、白レベルを0から100%まで可変させると左のような明るさで光ました。線形でないのはエクスペリアが $\gamma$ 補正しているからです

下のグラフは、この光をKN9\_01とKN9\_02で撮影して、白レベルと録画されたその白の明るさを測定したものです。飽和するまで直線になりましたので、2台のTVカメラがエクスペリアと同じ $\gamma$ で逆補正をした事になります

KN9\_02が飽和していないのはKN9\_01より総合的な感度が低いからです



# UFO Captureが作るBMPの構造

H size 02D0=720  
V size 01E0=480

SIZE 000FD236 byte

プレーン=1

ファイルの先頭からデータまでの  
オフセットbyte

24色(16771万色)

情報ヘッダ  
のサイズ  
40byte

圧縮形式=0(無圧縮)  
(4byte)

オフセットが36Hなので  
ここからデータ

24色データは3byte単位でB,G,Rの順  
に記録されている(各色1byte)

Jpegは圧縮されているので測定には不向き  
天体測光でも議論されJpegを使う人はいなくなりました

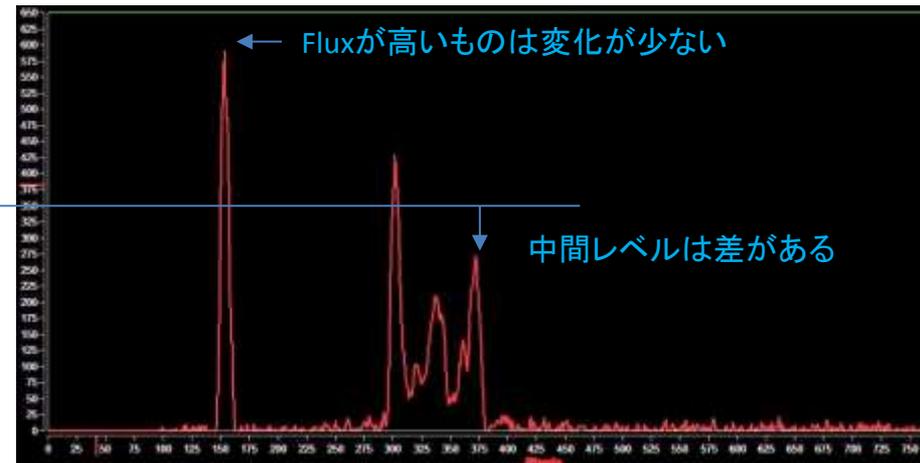
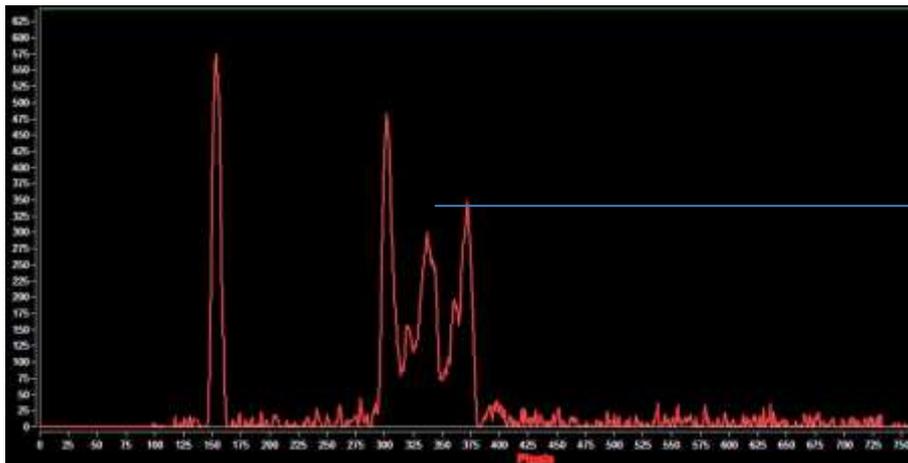
- 構造が分かったのでガンマ補正プログラムを作成して公開しました
- <http://binary.cocolog-nifty.com/blog/2019/05/post-a6d5a3.html>

# $\gamma = -2.2$ で補正したら

未補正

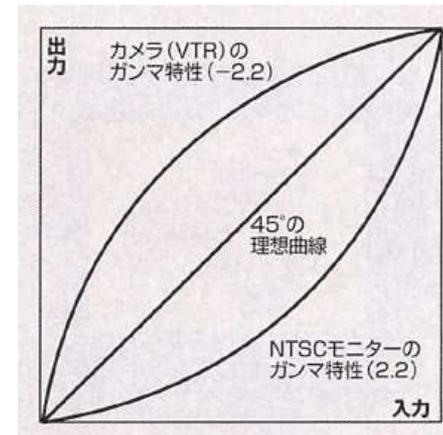
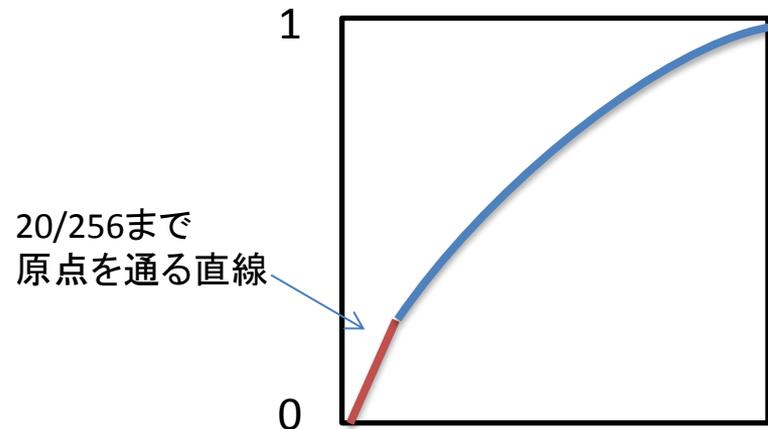


補正



# SONYαシリーズのガンマ補正

- 阿部研学生さんより
  - はじめ原点を通る直線で、あるところから対数に移る。。

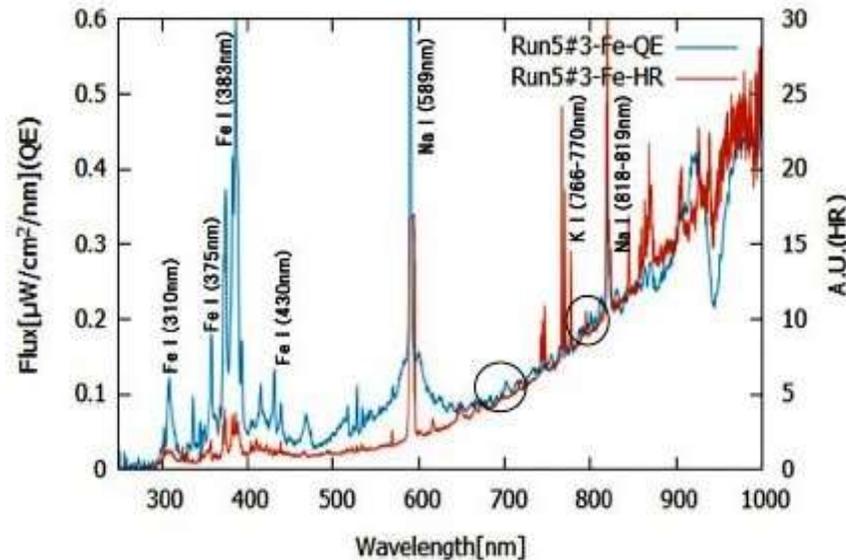


- ソニーα7シリーズのガンマ特性はWebで公開されている
  - <https://helpguide.sony.net/di/pp/v1/ja/contents/TP0000847999.html>
- ソニーのカメラにはたくさんのガンマ特性のモードがあります
  - Movie, Still, Cine1-4, ITU709, ITU709 [800%], S-Log2
- 撮影の際に設定したモードによってガンマが変わってしまう

# ブラックボディーの影響

# ブラックボディーの影響

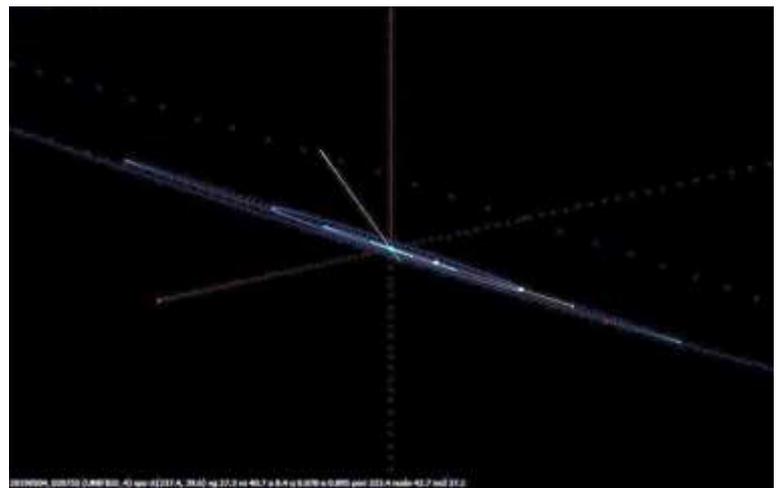
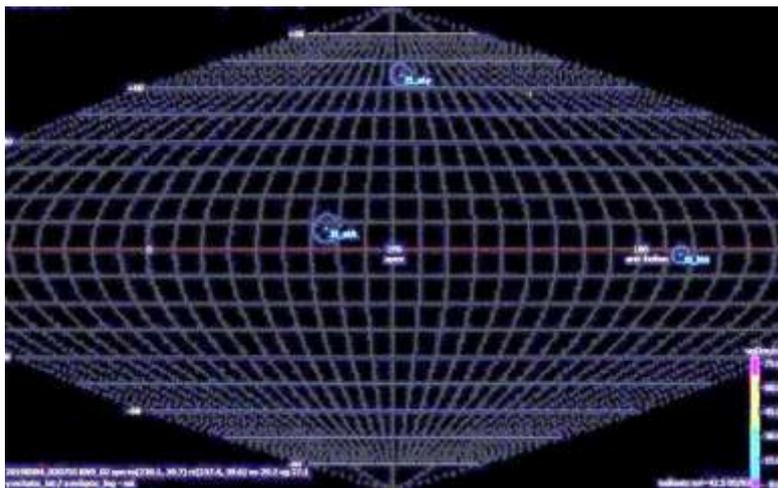
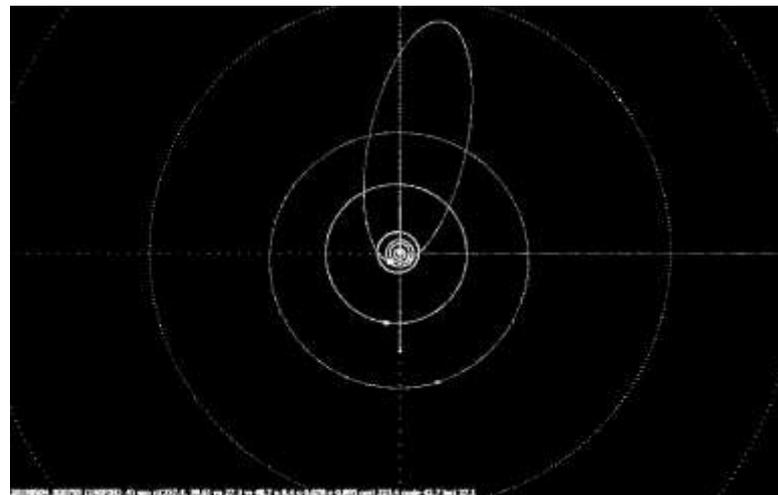
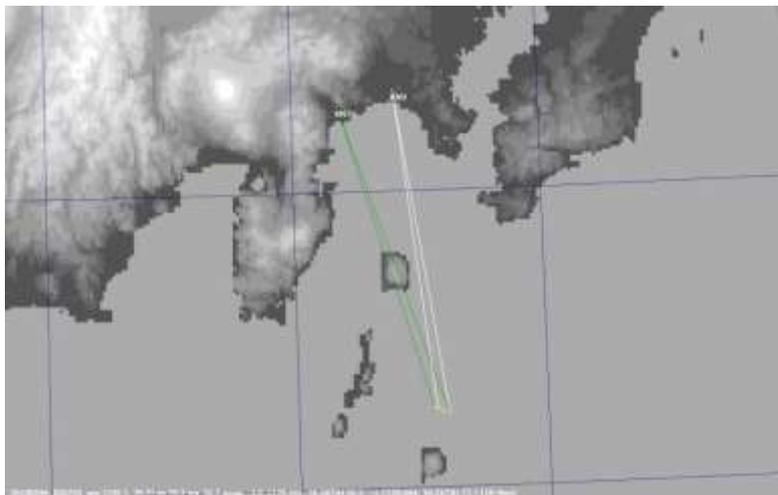
- 恒星分光では連続スペクトル成分を除いてから輝線・吸収線の強度を測ります
- 流星は？



- 上図は実験室で作った流星をスペクトル観測したものです
- 低温の連続スペクトルが見えていますが可視光域ではレベルが一定なので連続スペクトル成分を除かなくても良い
- 実験室(チャンバー内)よりも上空大気は低温なので背景の連続スペクトルはより影響が少ない
- 流星自体も連続光を持っていない

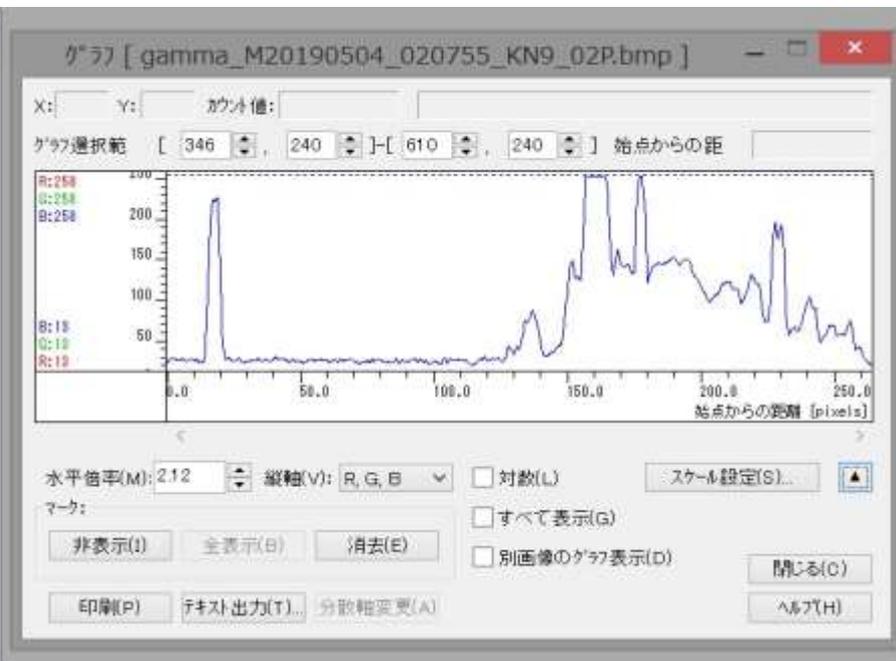
これらを考慮した解析例

# ガンマ補正有無の解析例



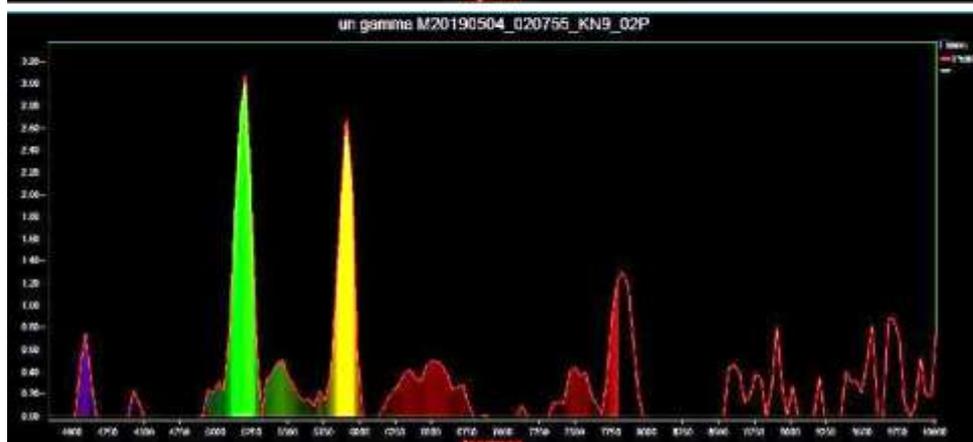
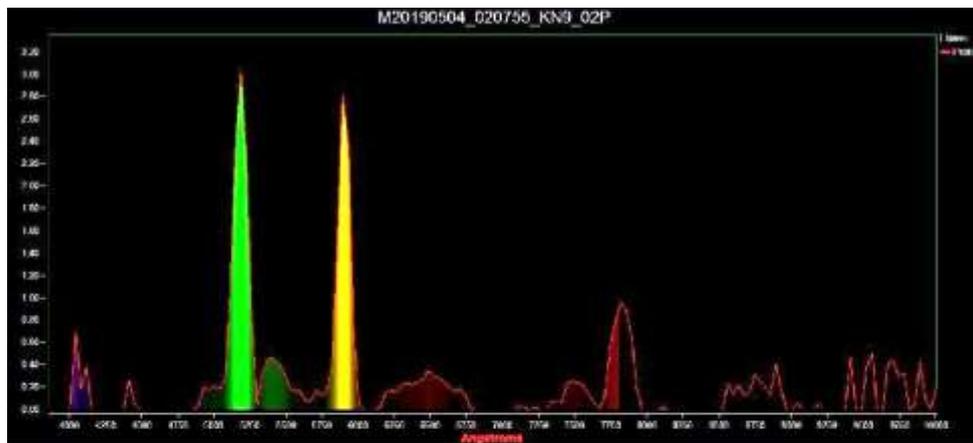
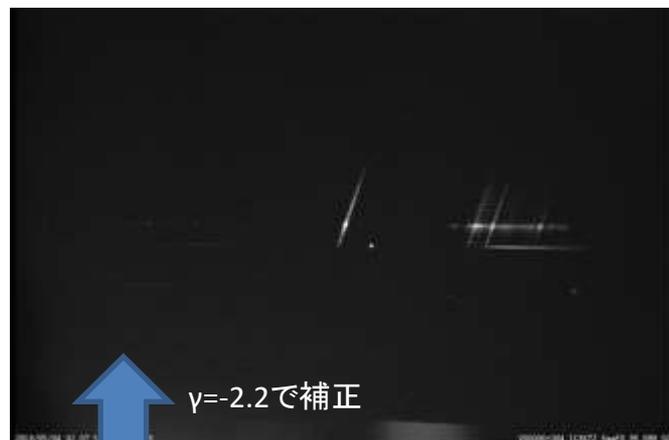
- M20190504\_020755\_KN9\_02 を解析 Sporadic です

# ガンマ補正有無の解析例(飽和)



- ガンマ補正後の画像です
- 増光箇所が飽和しています

# ガンマ補正有無の解析例 ( $\gamma$ 補正)

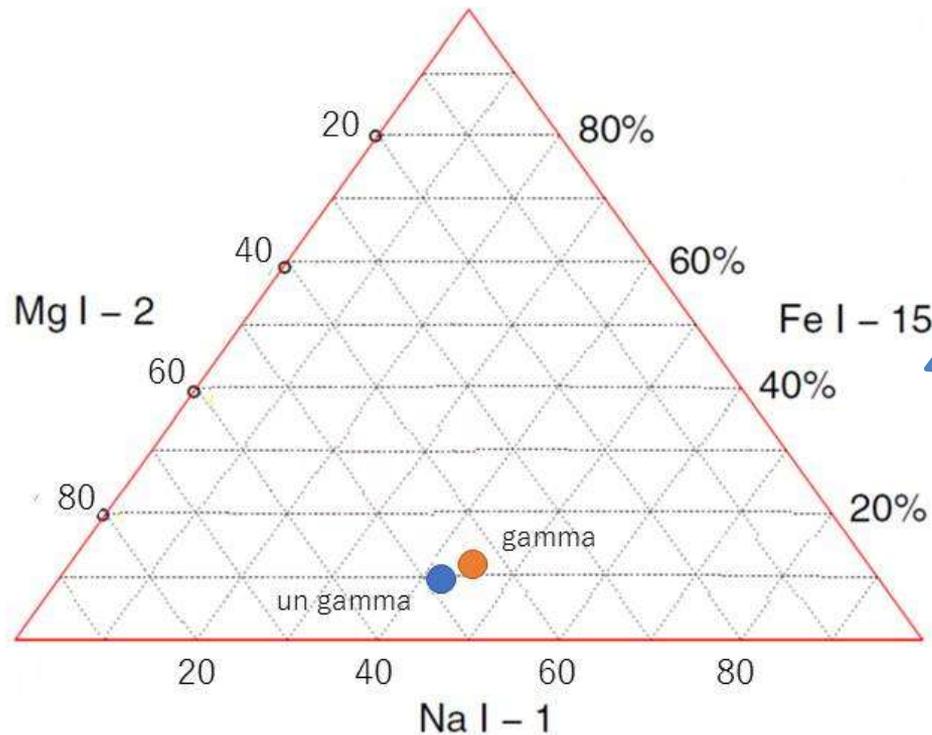


- 波長校正・分光感度補正をしたスペクトル
- 上は $\gamma$ の逆補正をしてから解析したもの、下は今まで行っていた補正なし
- 緑はマグネシウム、オレンジはナトリウム、赤は酸素



# ガンマ補正有無の解析例(組成比)

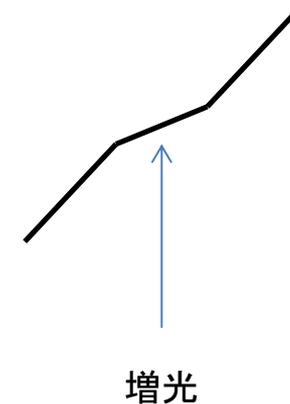
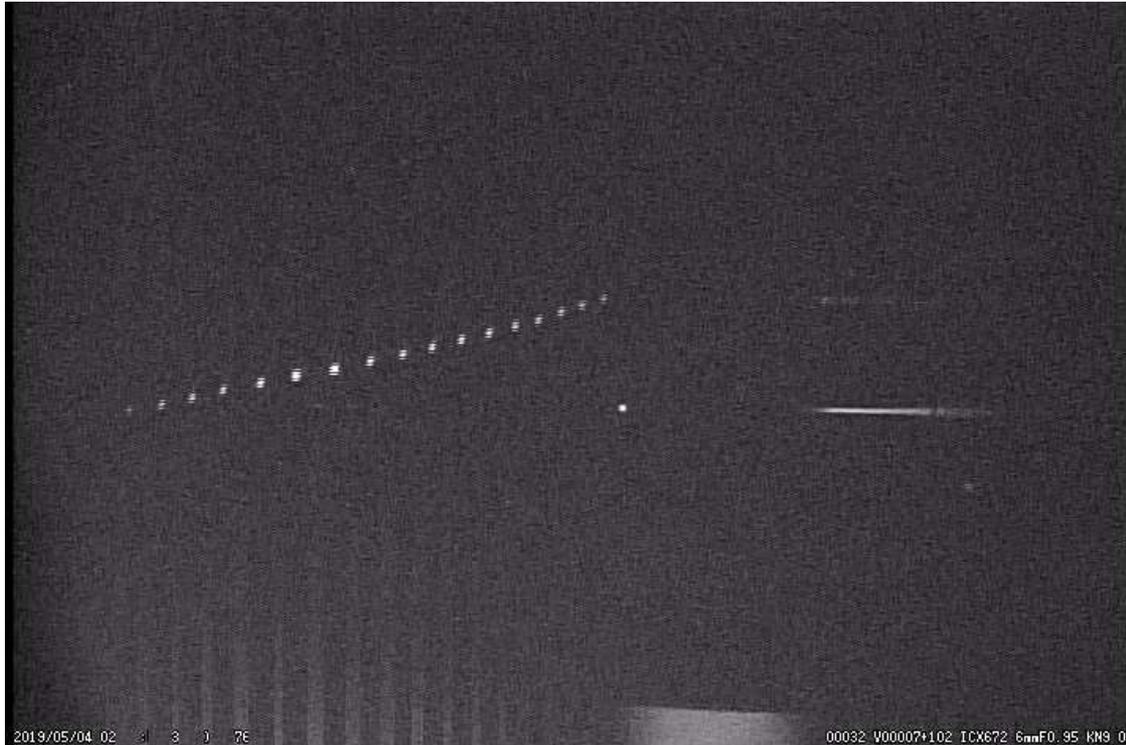
M20190504\_020755\_KN9\_02



この例では差が少なかった組成比に差が大きい場合はガンマのカーブから2倍の差が有る事も予想されます

補正/未補正による最大差を見積もるとガンマ補正無しで測定した結果60%比の物が実際は30%比しか無いと言う物もありえる

# 角速度考察(おまけの考察)

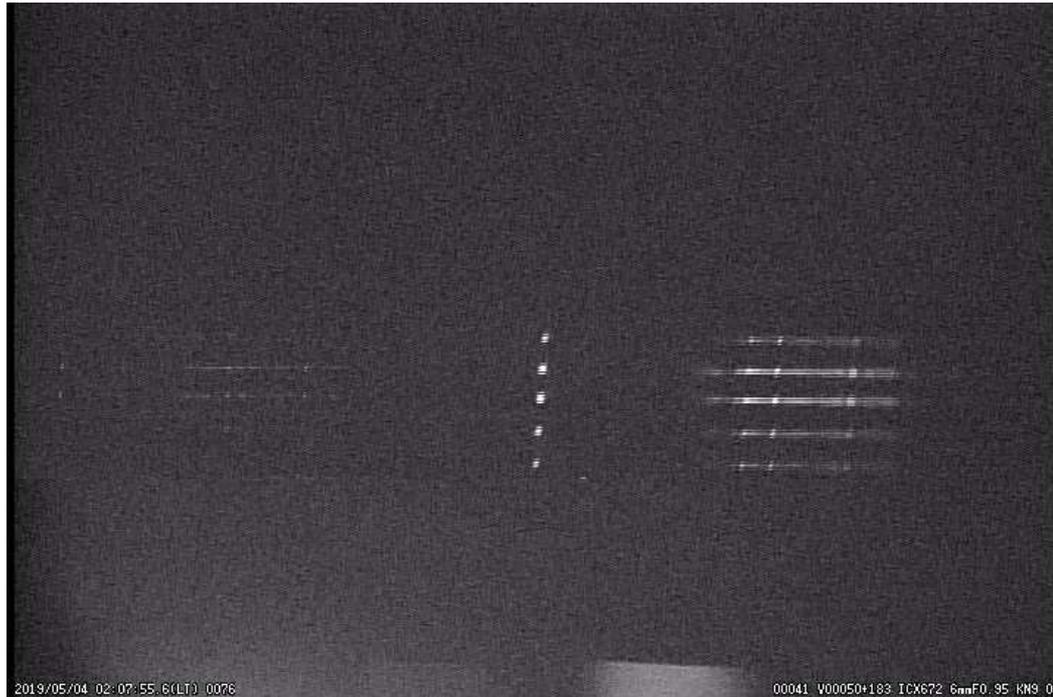


各フレームを抜き取って並べたものです。水平方向の間隔は手作業でなるべく等間隔にしました。垂直方向の間隔は流星の角速度です。

これを見ると増光の前後では同じ速度で、増光時より早く見えます。

そして、増光時は遅く見えますが、増光したと同時に遅くなっているのではなく遅くなってから増光しています。増光のメカニズムに関係するのだろうか？

# 痕はいつできる？（おまけの考察）



- 増光のひとつ前のフレームから5フレームを抜き取って重ねたもの
- ハッキリしませんが、増光したフレームから2フレーム目に流星痕のスペクトルのような物が写っている？ ような感じ
- 阿部先生にお見せしたら、痕では無くアフターグローではないか？との事

# まとめ

- 発表は「おしまい」ですが
  - ようやく、解析の「はじまり」になりました
- まとめ
  - 飽和を確認してから測定する
  - 分光感度補正をしてから輝線強度測定する
  - 比較明合成で良い(と思います)
  - 回転や傾きでレベルが変わらない事を確認する
  - ガンマ補正してから輝線強度測定をする
  - 輝線強度測定はガウス関数で近似した複数波の合成で求める
  - 大気のブラックボディーの影響は無い

第152回流星物理セミナー 20190707

関口孝志

# 自動観測による流星スペクトルの観測結果



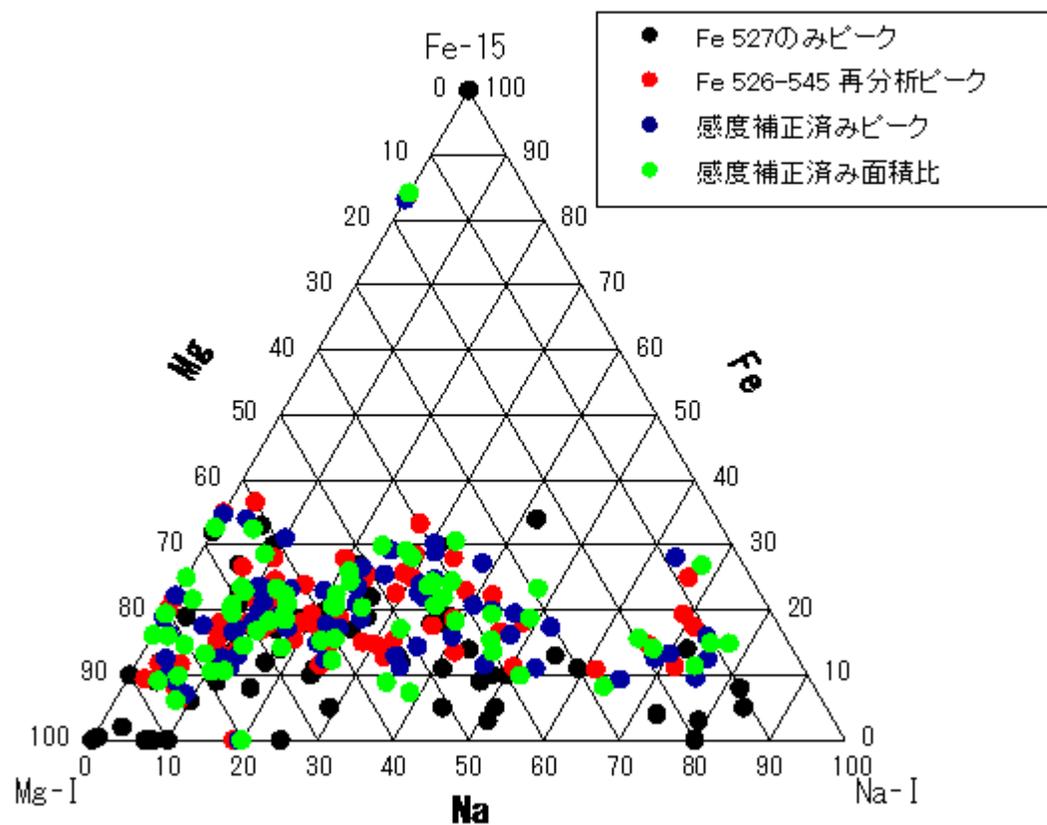
# カメラごとのスペクトル撮影数等

| 方向   | N6  | S12 | W6  | Z6  | E6  | NW50 | NE6 | SE8 |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| レンズ  | 6   | 12  | 6   | 6   | 6   | 50   | 6   | 8   | 合計  |
| レンズ  |     |     |     |     |     | 28   |     |     |     |
| 本/mm | 500 | 500 | 600 | 200 | 500 | 500  | 500 | 500 |     |
| 本/mm |     |     |     | 600 |     | 200  |     |     |     |
| 10月  |     |     |     |     |     | 5    |     |     | 5   |
| 11月  |     |     |     |     |     | 10   |     |     | 10  |
| 12月  | 8   | 7   | 26  | 17  | 9   | 52   | 9   | 14  | 142 |
| 1月   | 13  | 7   | 115 | 71  | 24  | 32   | 24  | 25  | 311 |
| 2月   | 4   | 3   | 28  | 28  | 0   | 8    | 2   | 6   | 79  |
| 3月   | 6   | 5   | 24  | 29  | 6   | 9    | 6   | 7   | 92  |
| 4月   | 4   | 3   | 20  | 15  | 1   | 4    | 5   | 4   | 56  |
| 5月   | 5   | 4   | 22  | 12  | 0   | 15   | 5   | 5   | 68  |
| 6月   | 0   | 0   | 7   | 3   | 0   | 3    | 2   | 1   | 16  |
| 合計   | 40  | 29  | 242 | 175 | 40  | 138  | 53  | 62  | 779 |
| 解析済  | 24  | 20  | 180 | 117 | 36  | 134  | 34  | 44  | 589 |

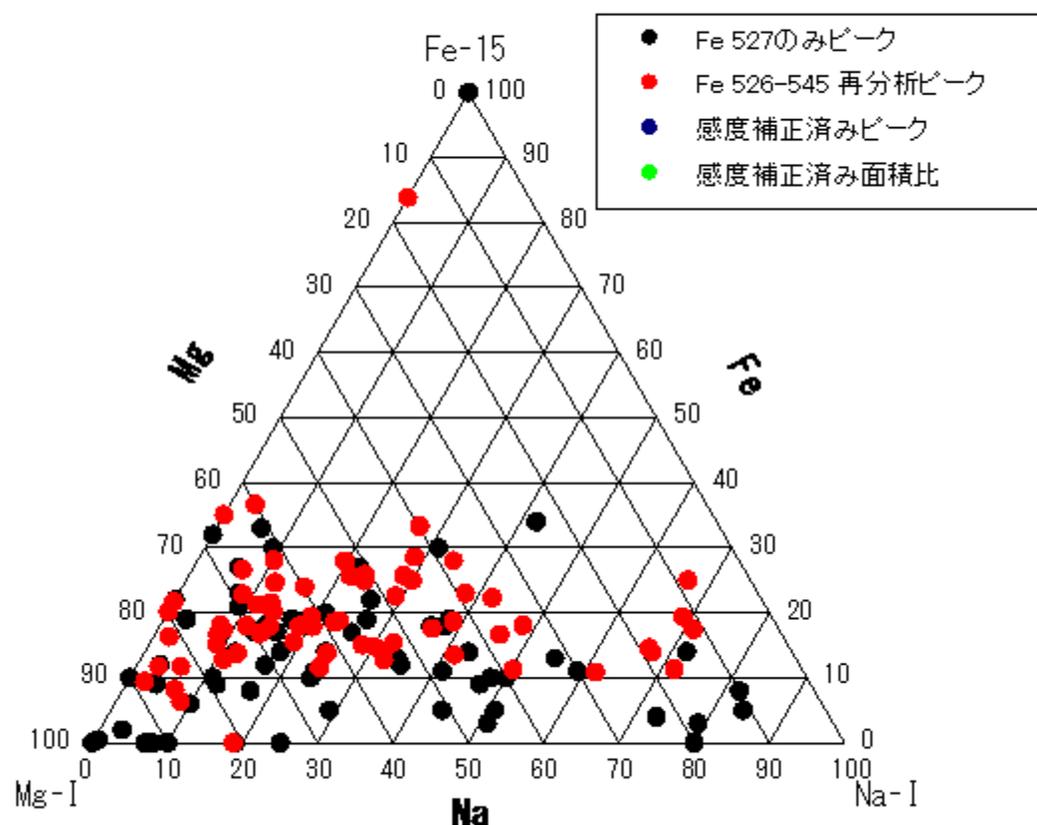
# 流星スペクトルの分類測定の仕事での比較(a7sのみの66個)

・ Mg(518)-Na(589)-Fe(525-545)の3種の元素のスペクトルの強度比によって、流星を前田氏の6つに分類。今回は、4つの場合で面積比までの比較。

2018年10月-12月 a7s 50mm 関口



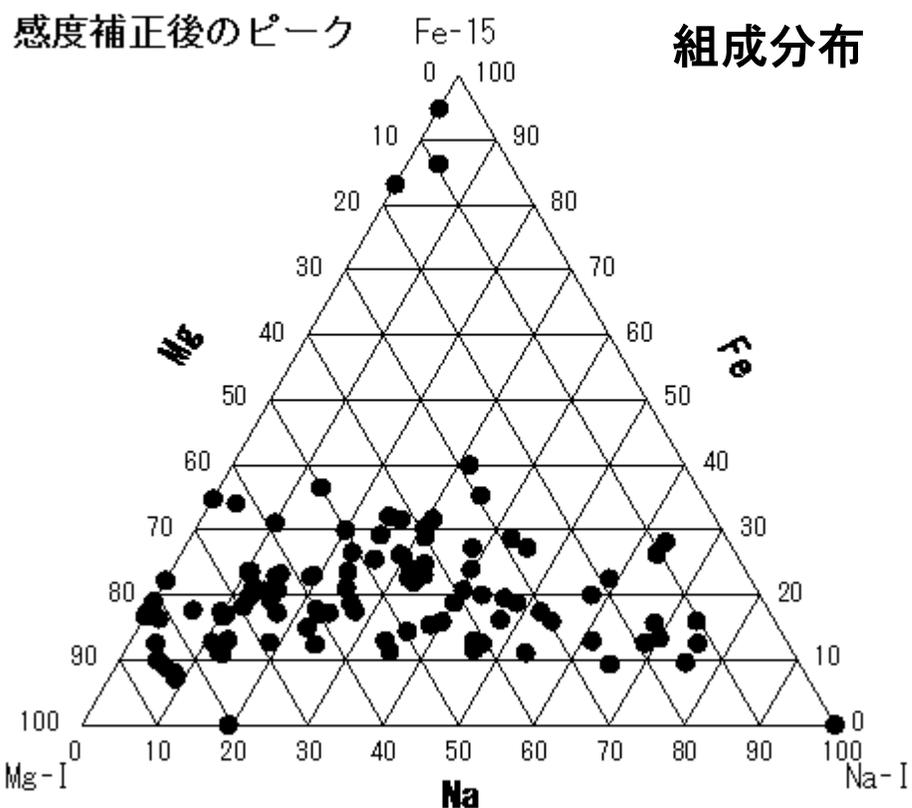
2018年10月-12月 a7s 50mm 関口



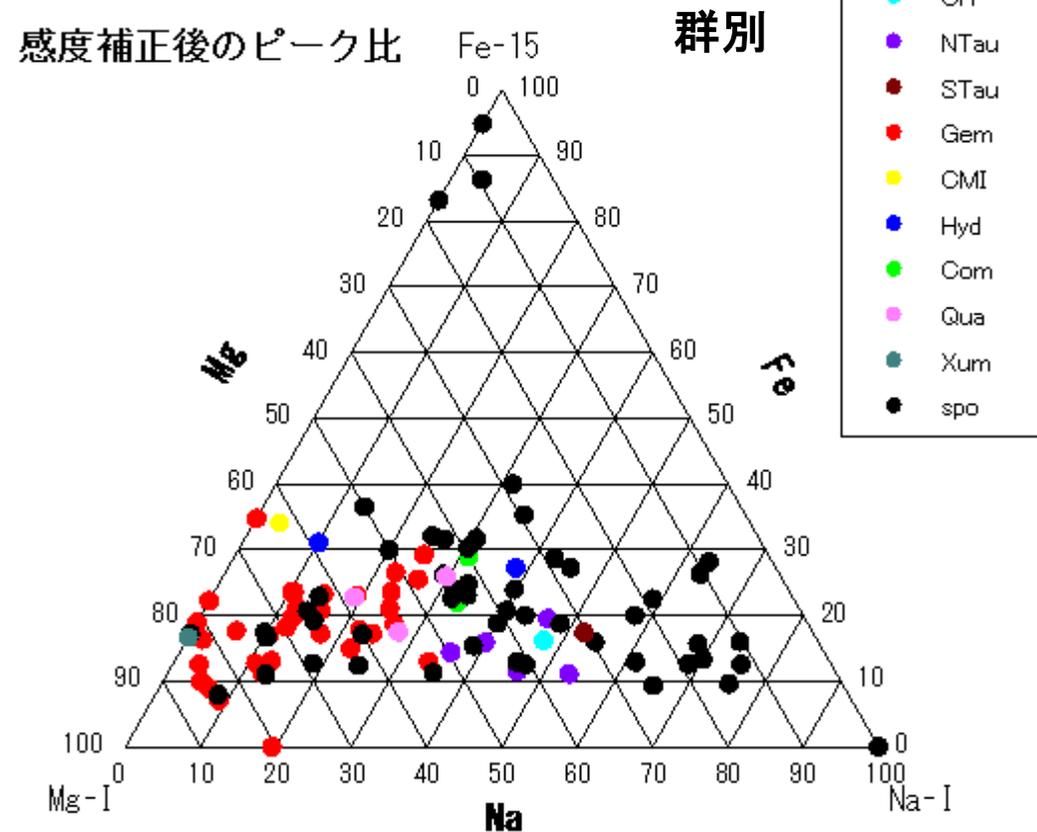
# 流星スペクトルの分類結果(a7sのみの102個)

・ Mg(518)-Na(589)-Fe(525-545)の3種の元素のスペクトルの強度比によって、流星を前田氏の6つに分類。今回は、面積比もしてあるが、感度補正後の輝度強度比で作成。

Mg-Na-Fe 三角ダイアグラム  
2018年10月-2019年2月 a7s 50mm 102個 関口



2018年10月から2019年2月 a7s 50mm 102個 関口



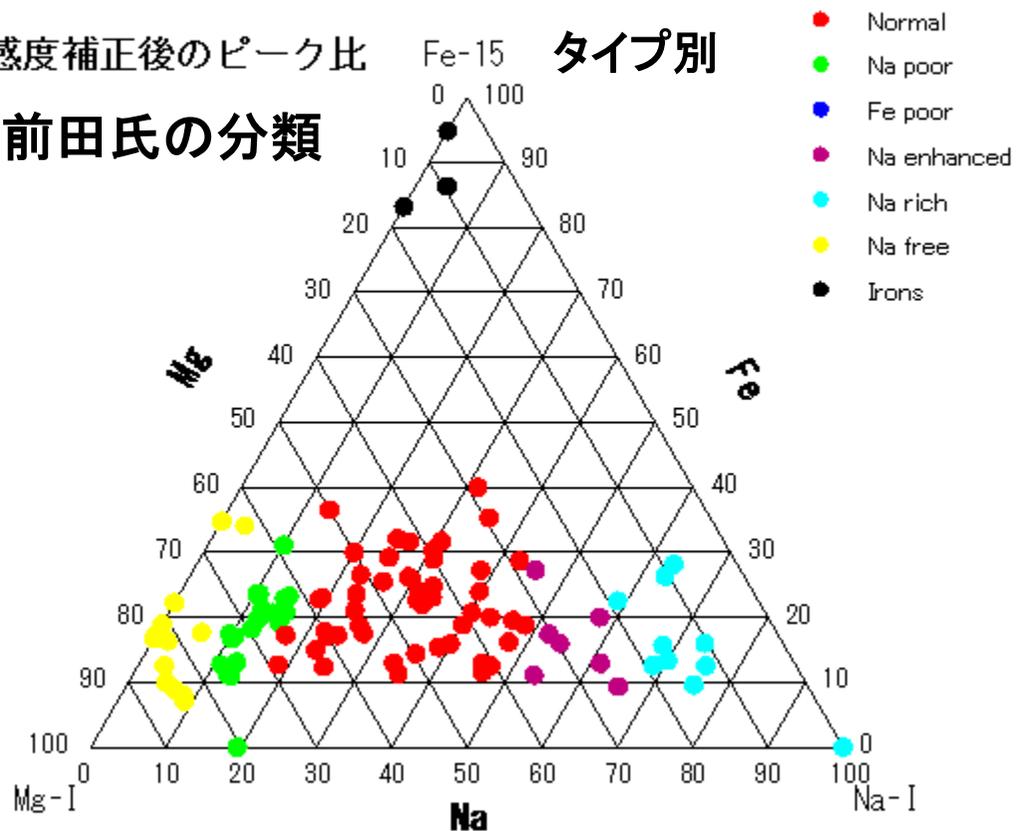
# 流星スペクトルの分類結果の比較

2018年10月-2019年2月 a7s 50mm 102個 関口

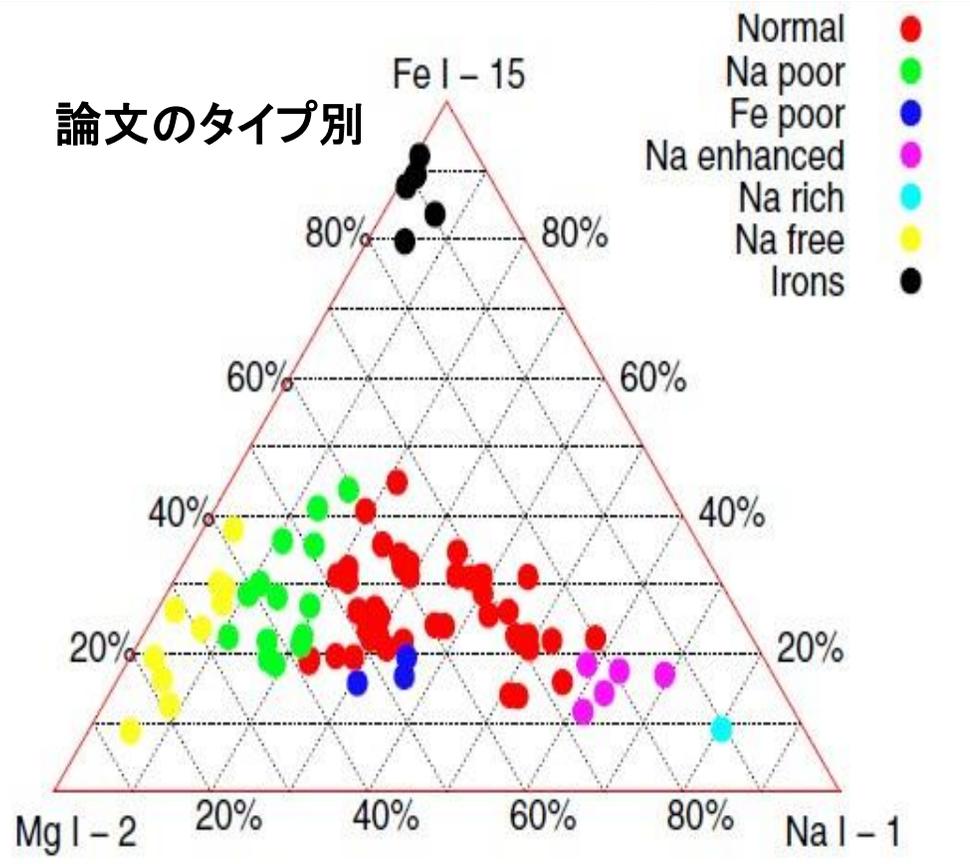
感度補正後のピーク比

Fe-15 タイプ別

前田氏の分類

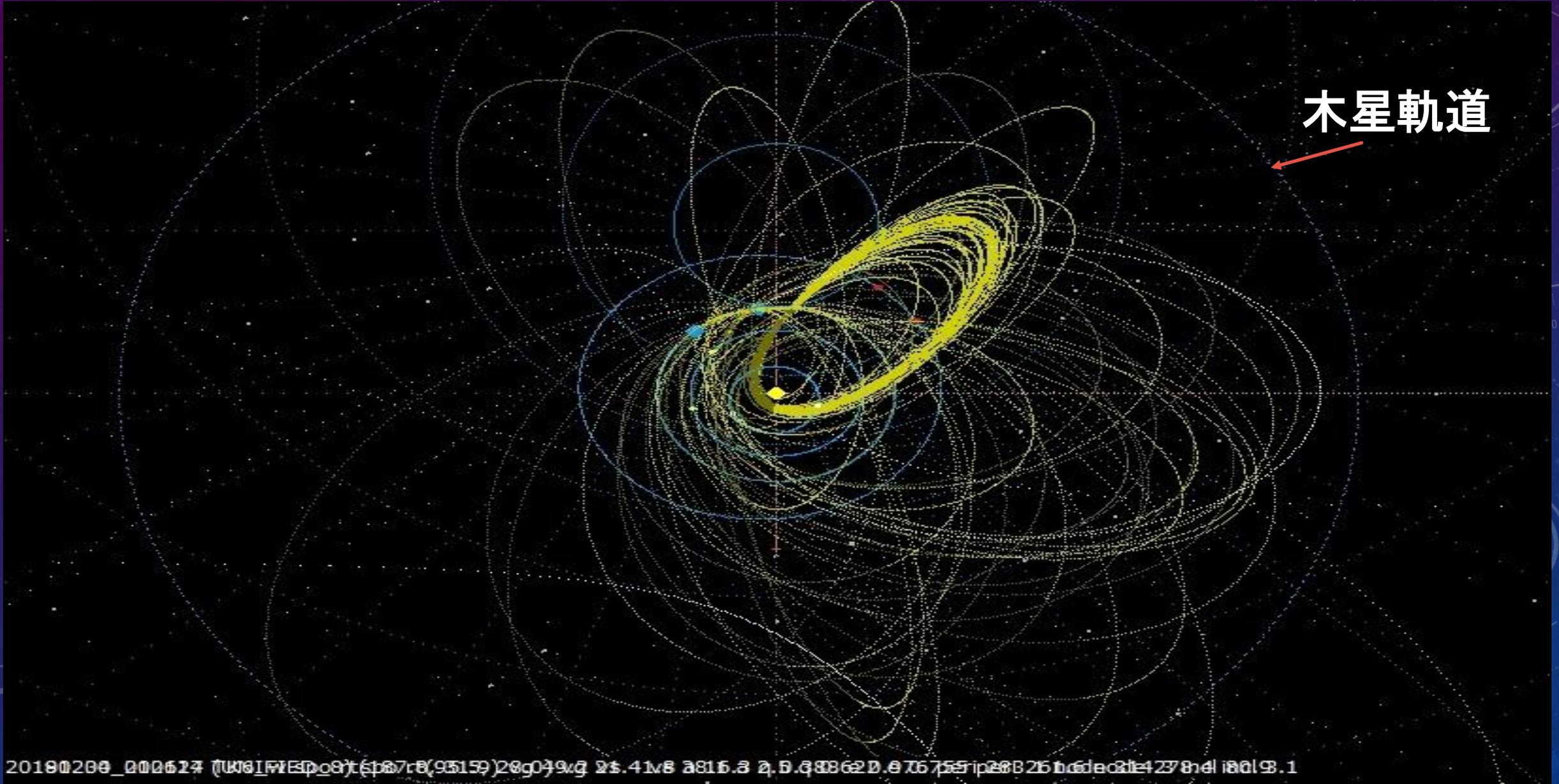


論文のタイプ別



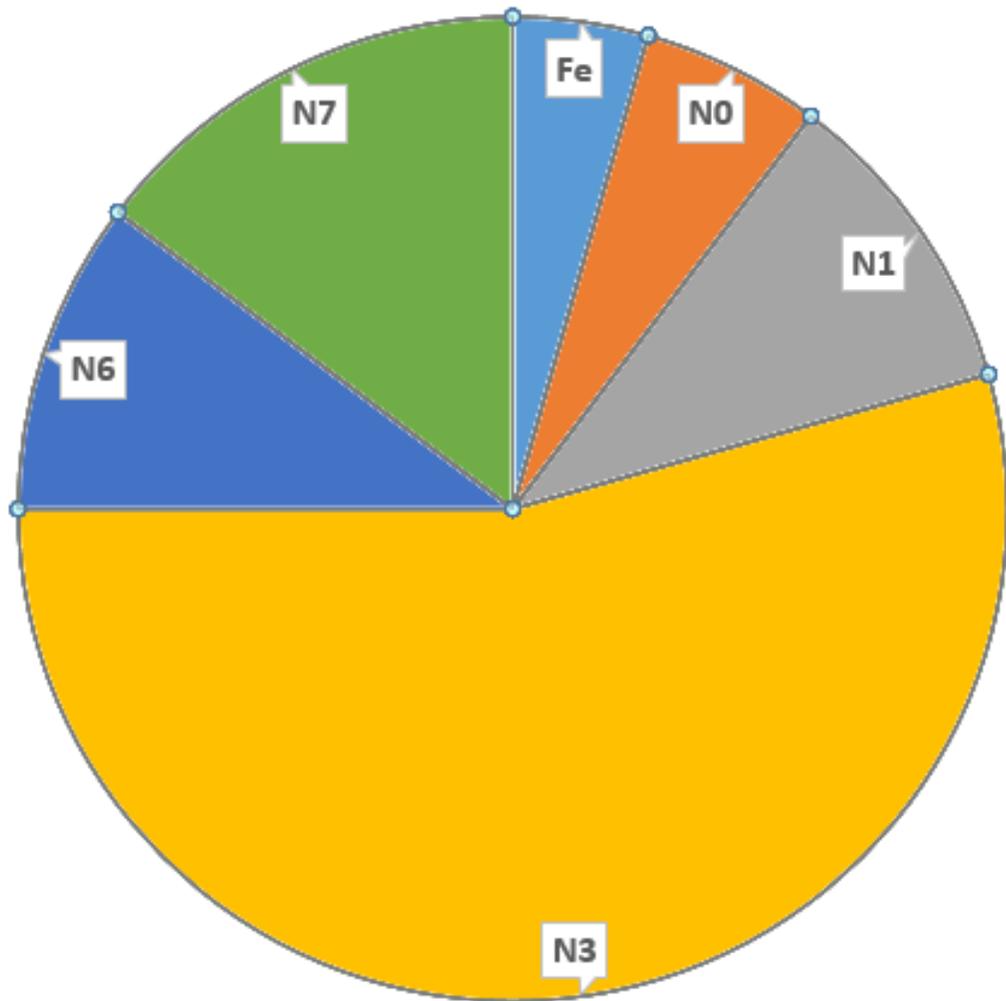
# 流星スペクトルの得られた流星の軌道(カラーのみ)

木星軌道

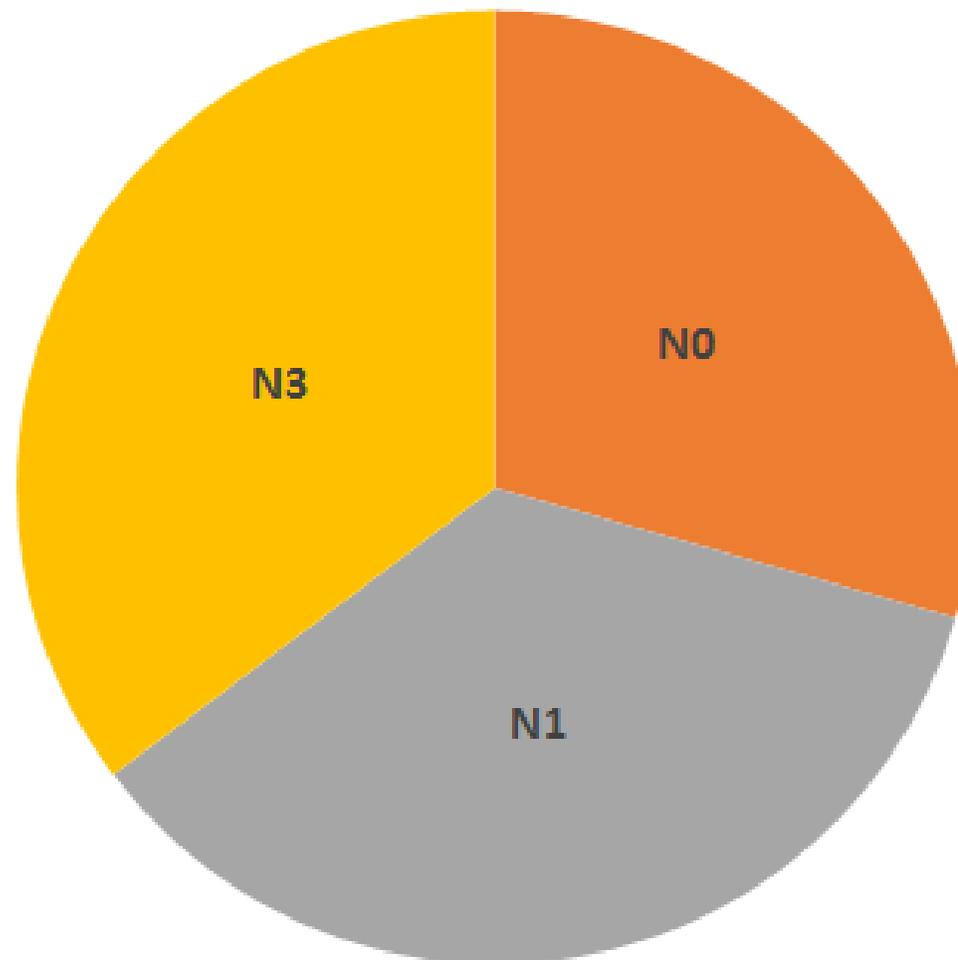


# 流星スペクトルのタイプ別の割合(a7sのみの102個)

タイプ別の割合

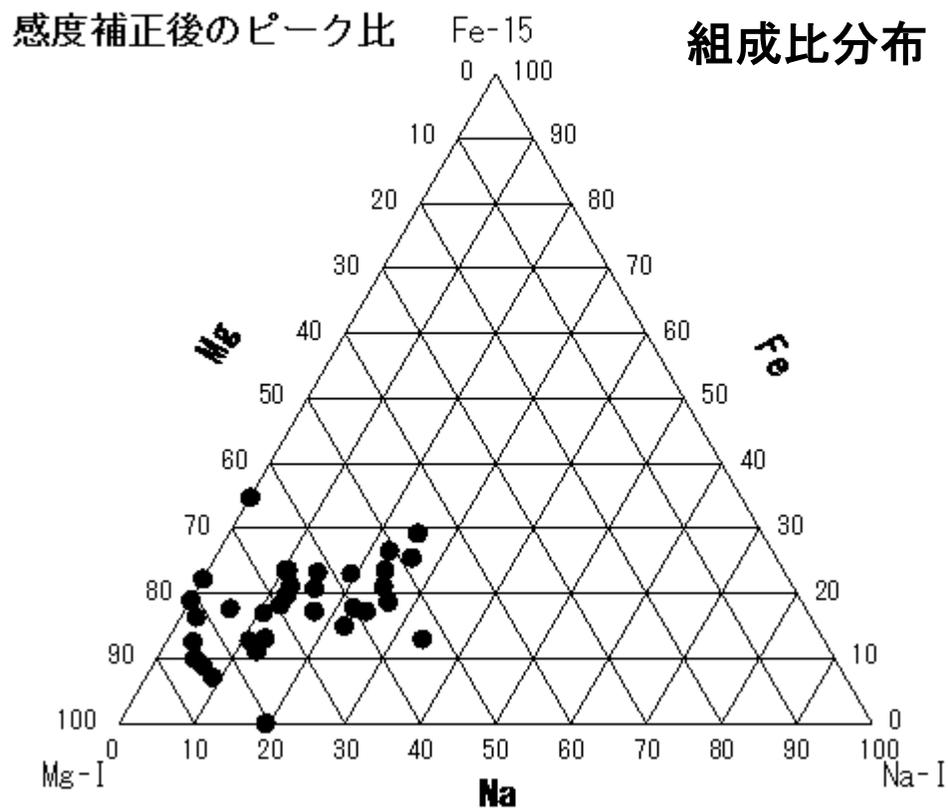


Gem群のタイプ別分布

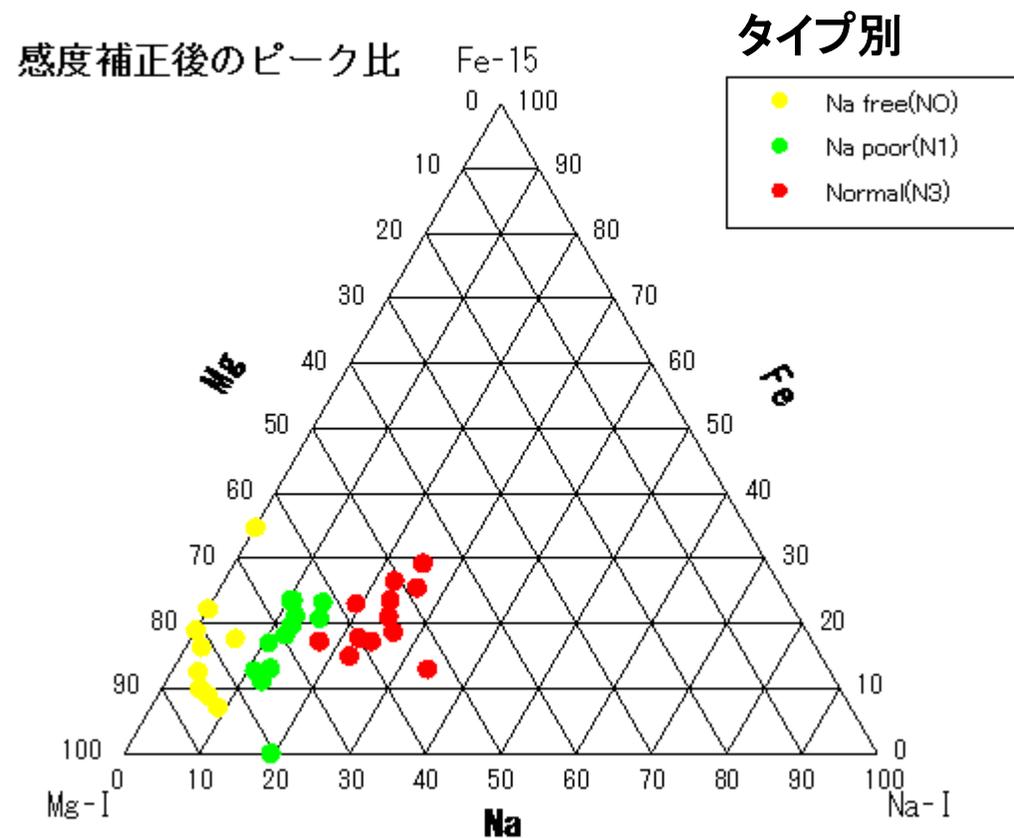


# 流星スペクトルの分類結果(Gem群のみ)

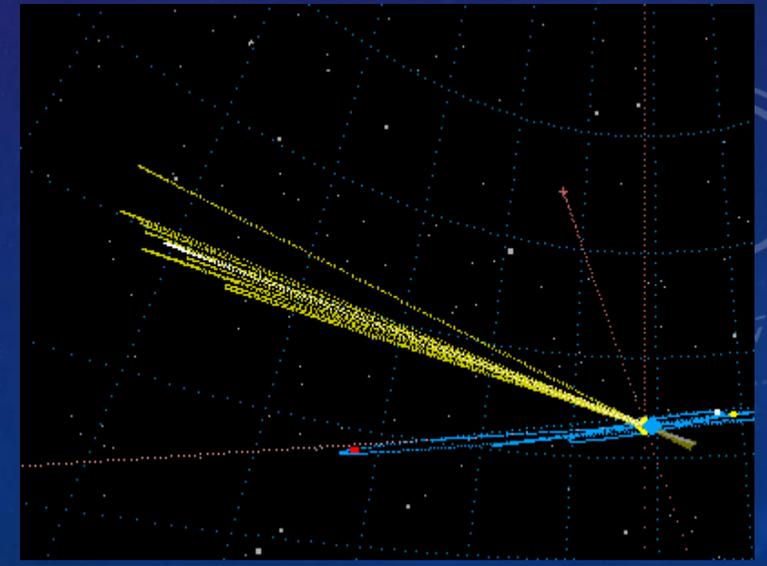
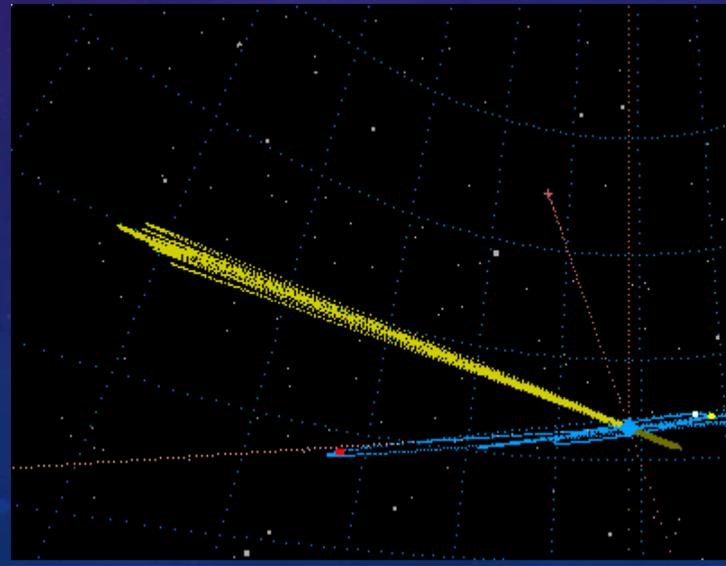
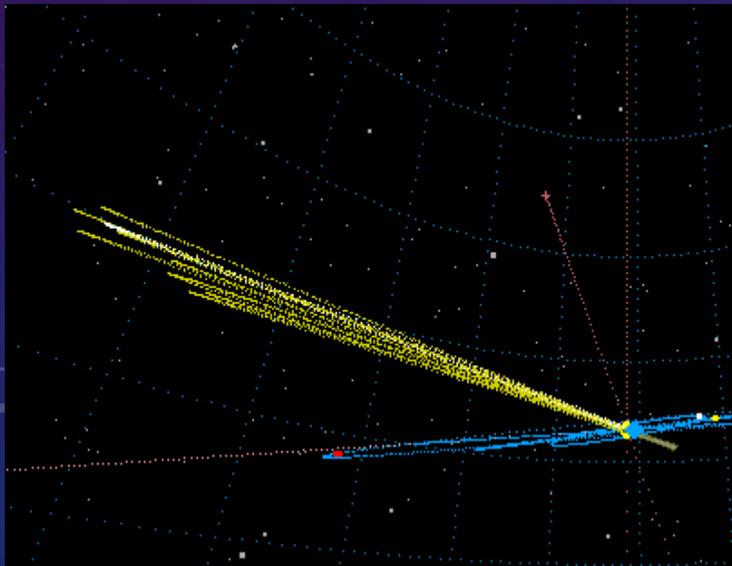
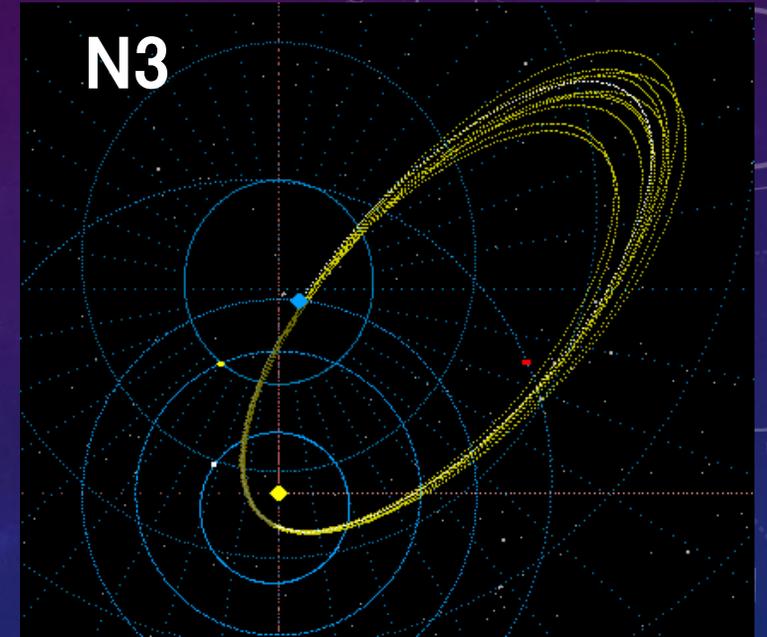
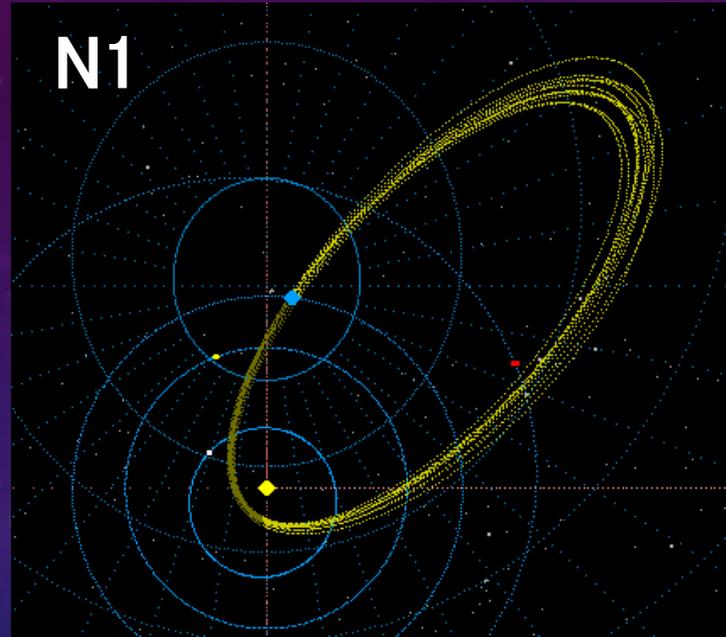
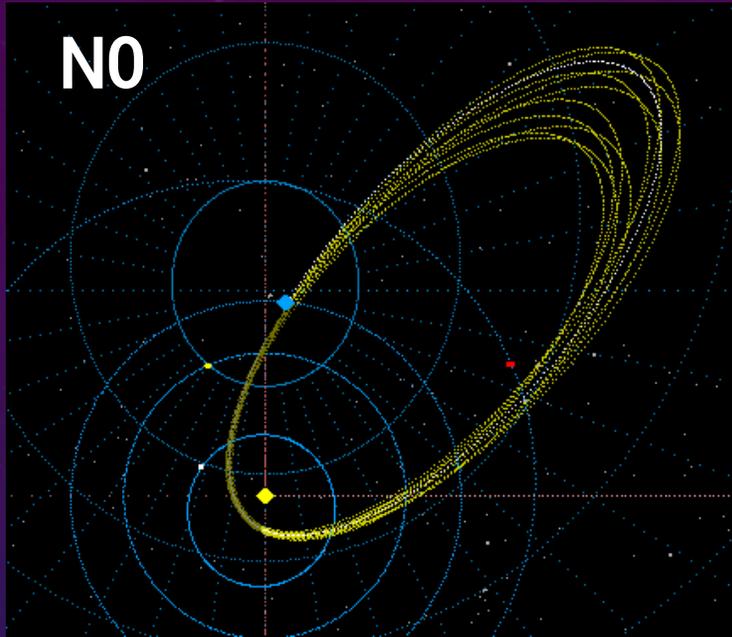
2018年12月 Gem群(34個) a7s 50mm 関口



2018年12月 Gem群(34個) a7s 50mm 関口

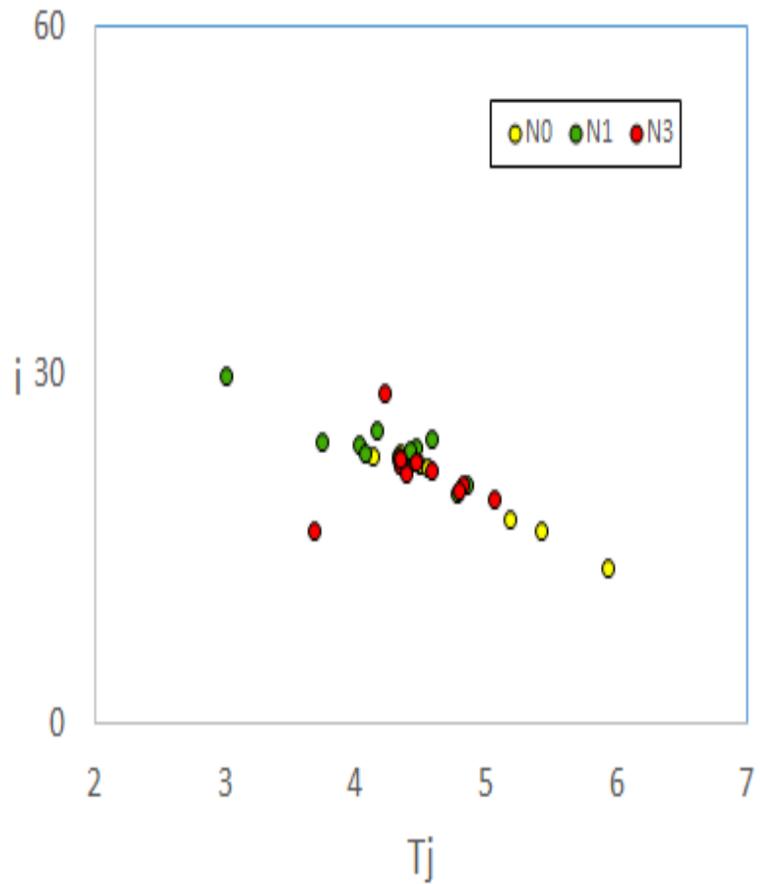


# 流星スペクトルのタイプ別と軌道の比較(Gem群のみ)



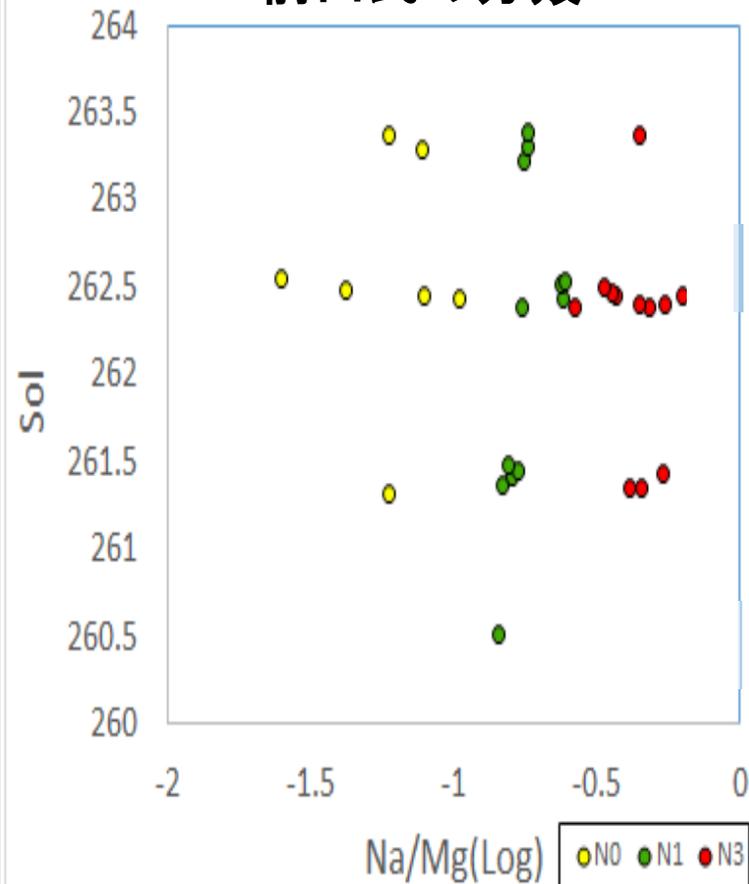
# 流星スペクトルのタイプ別と軌道の比較(Gem群のみ)

Tjとiの関係(Gem)

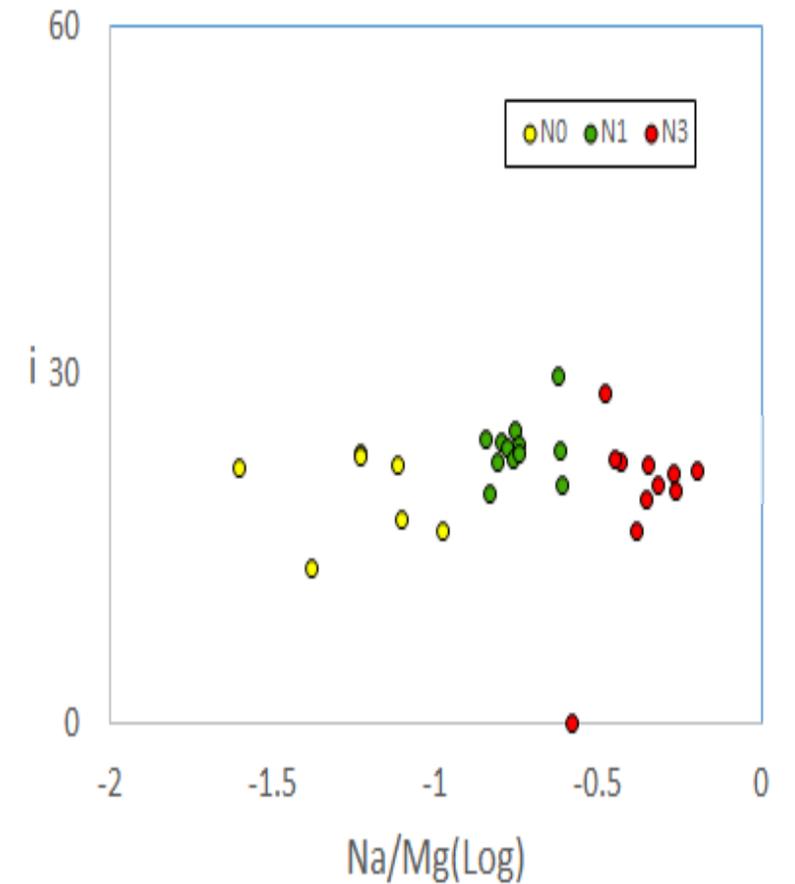


Na/Mg(Log)とSolの関係(Gem)

## 前田氏の分類



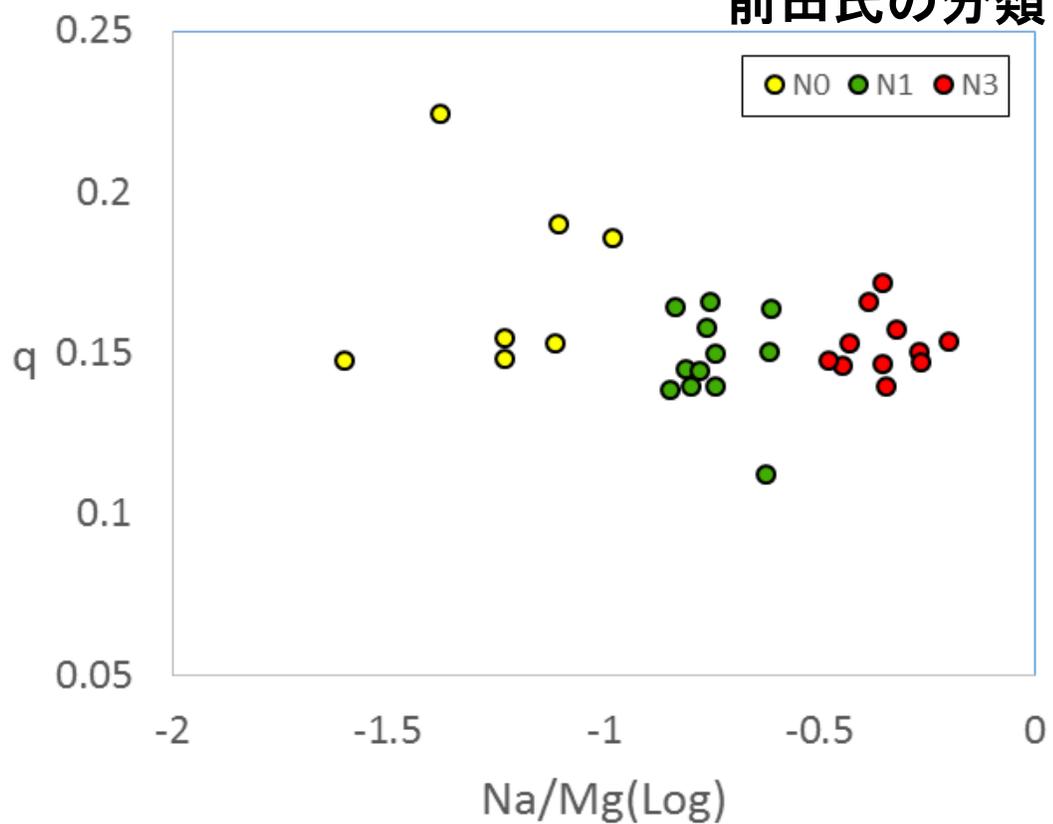
Na/Mg(Log)とiの関係(Gem)



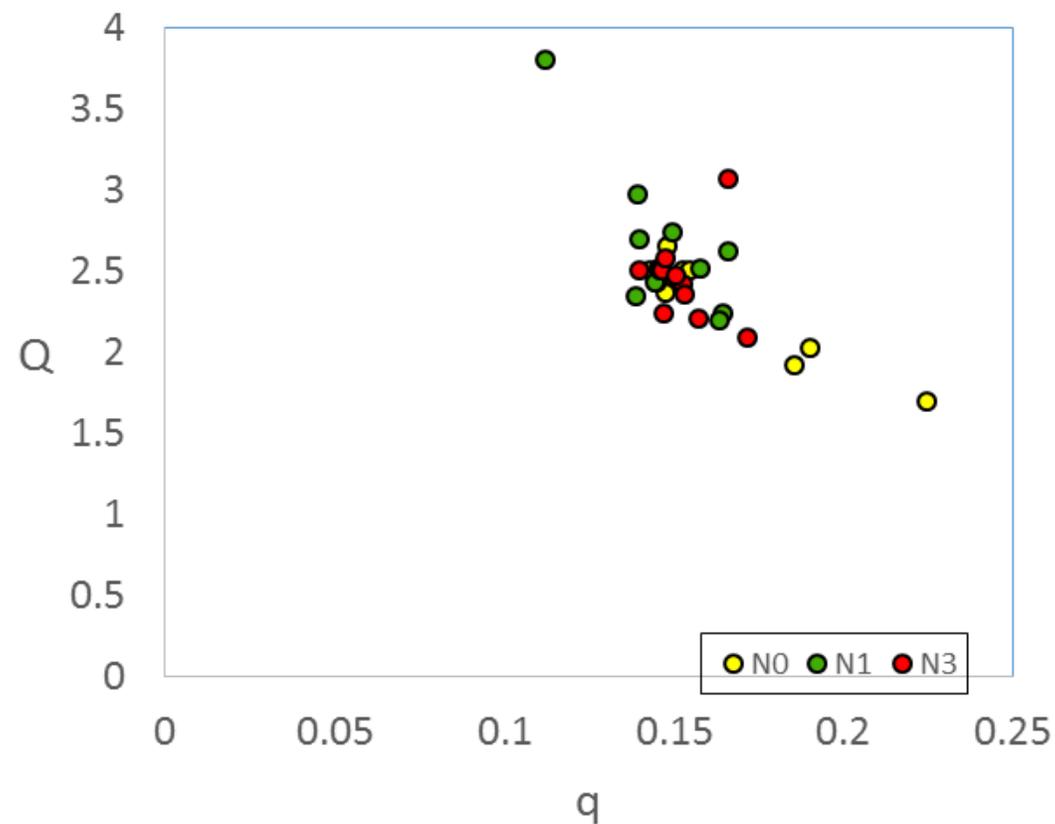
# 流星スペクトルのタイプ別と軌道の比較(Gem群のみ)

Na/Mg(Log)とqの関係(Gem)

前田氏の分類

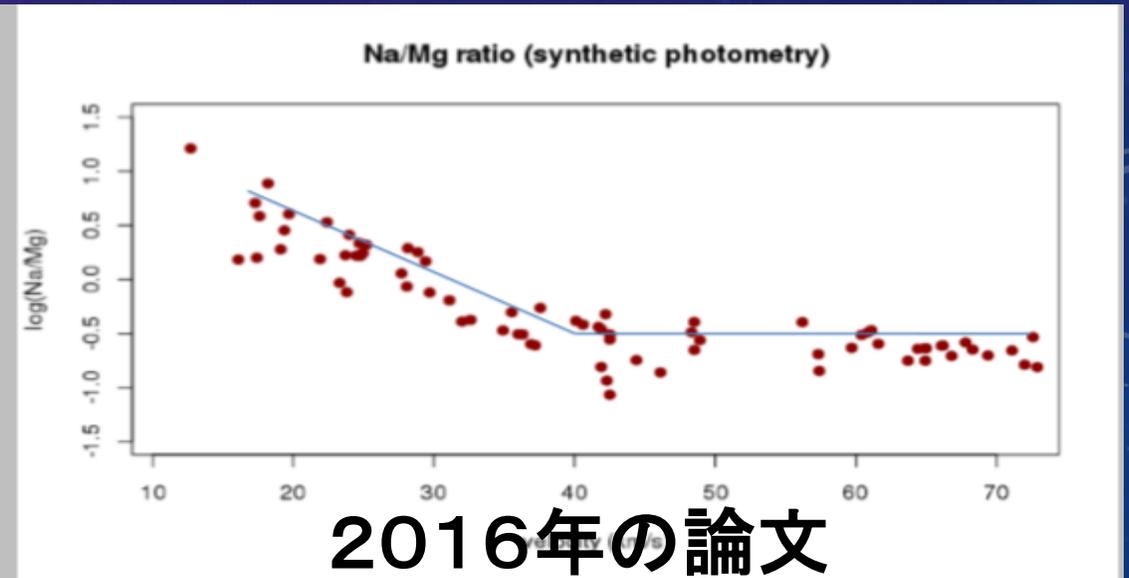
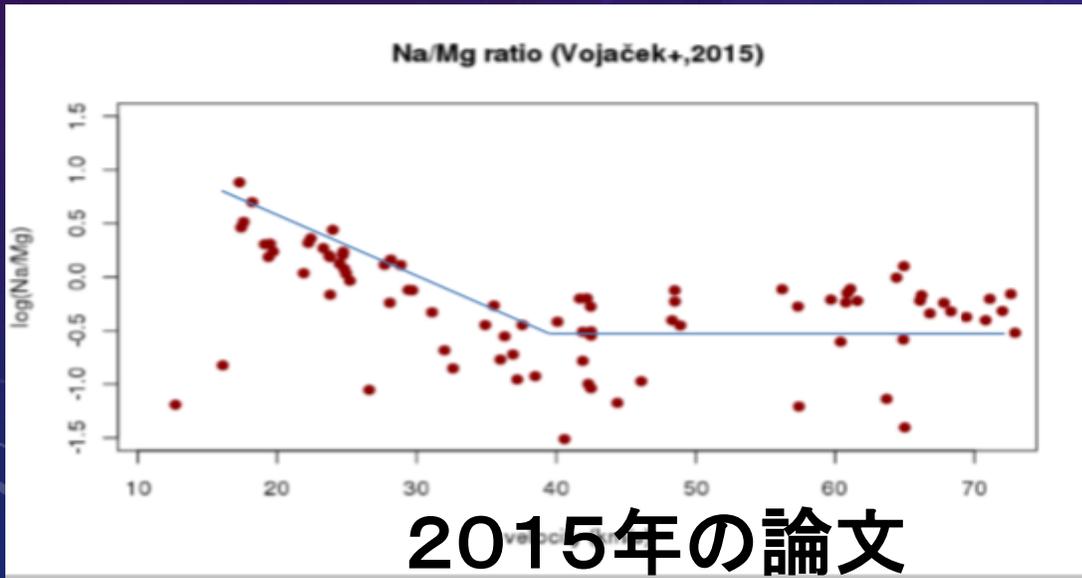
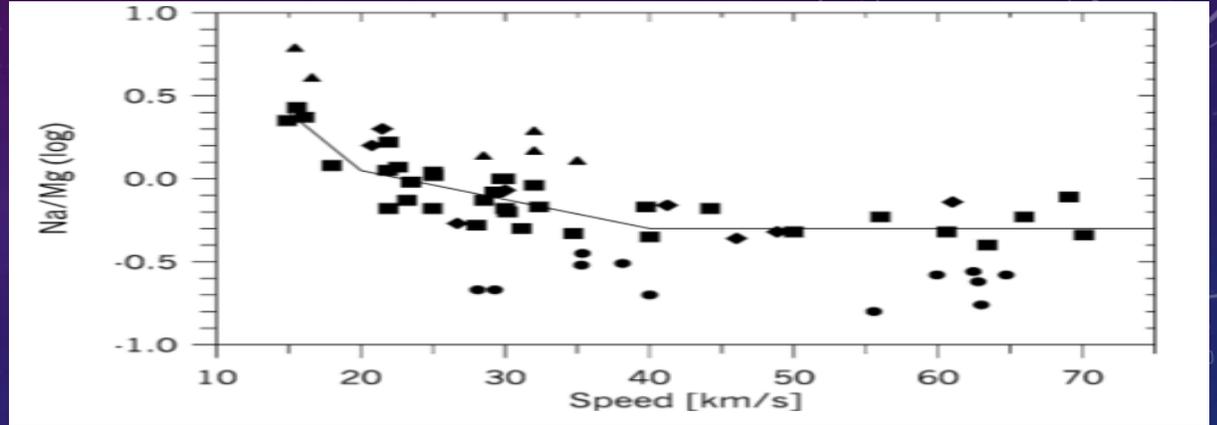
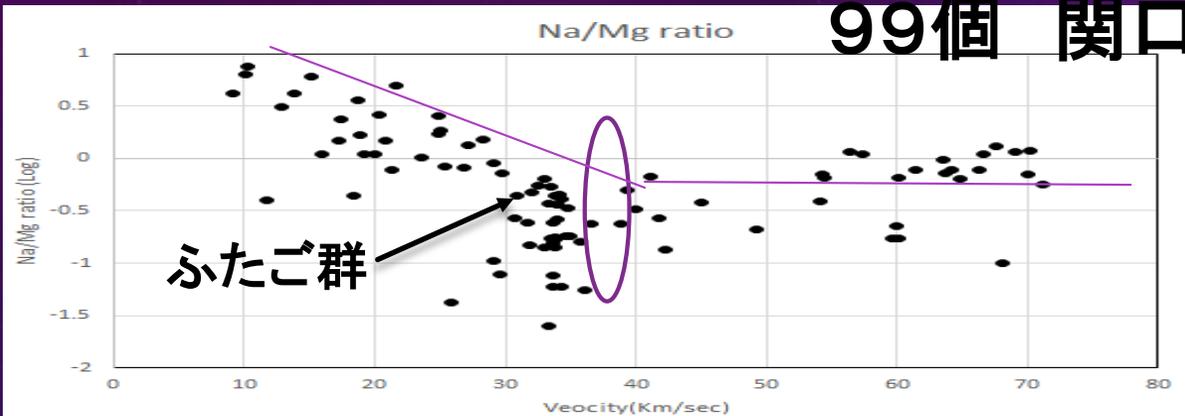


qとQの関係(Gem)

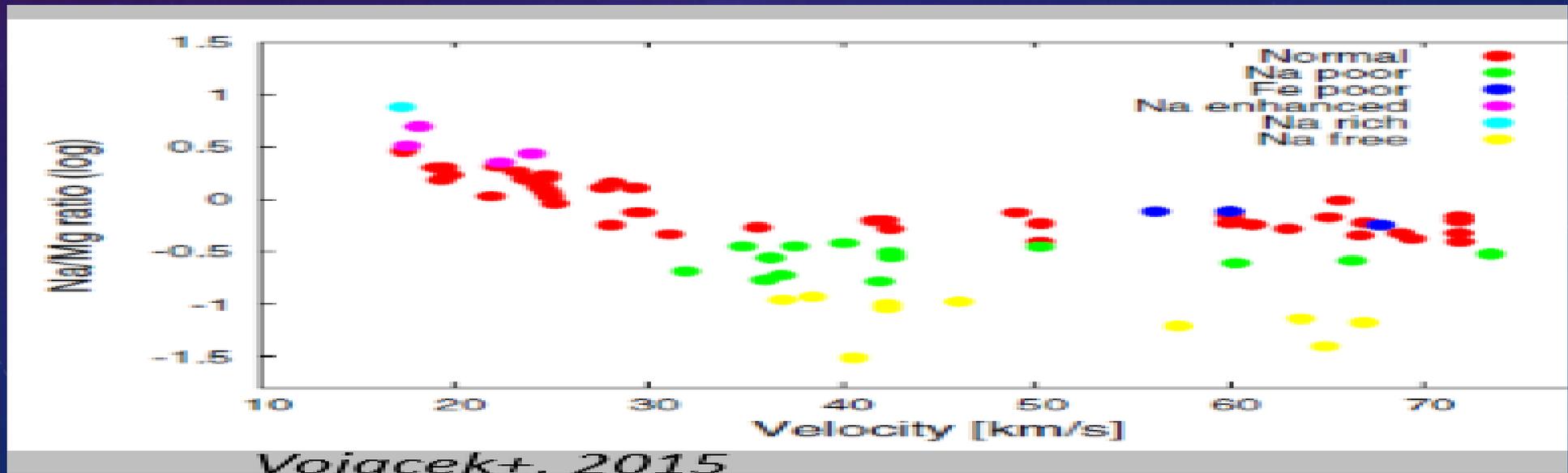
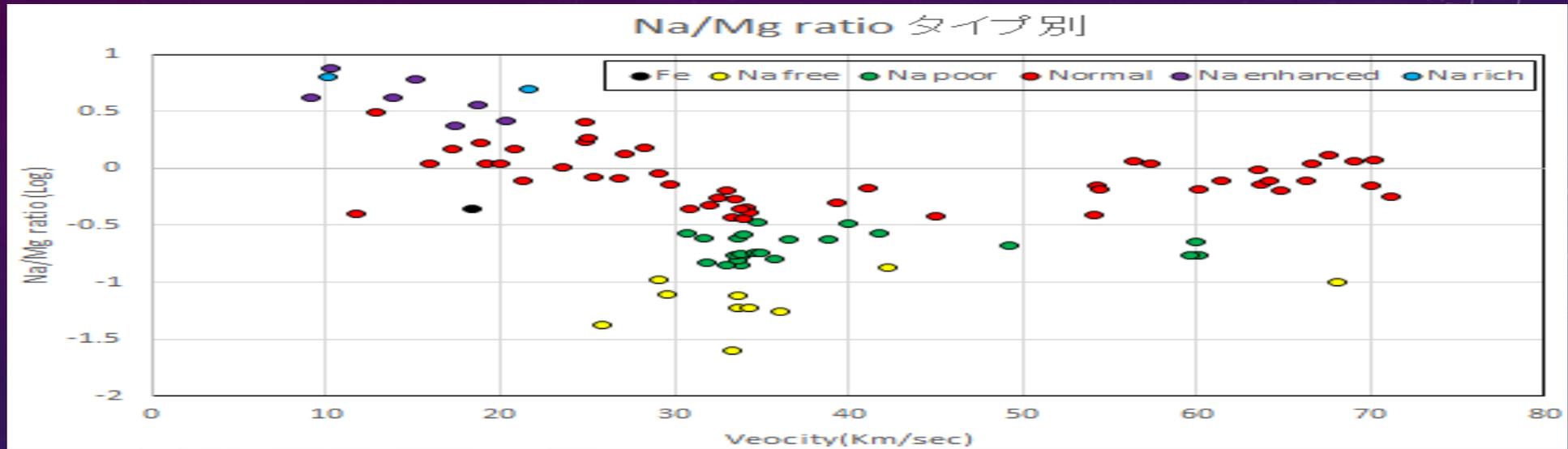


# 流星スペクトルの解析結果 (Na/Mg ratio) 論文との比較

2005年の論文



# 流星スペクトルの解析結果 Na/Mg ratio タイプ別

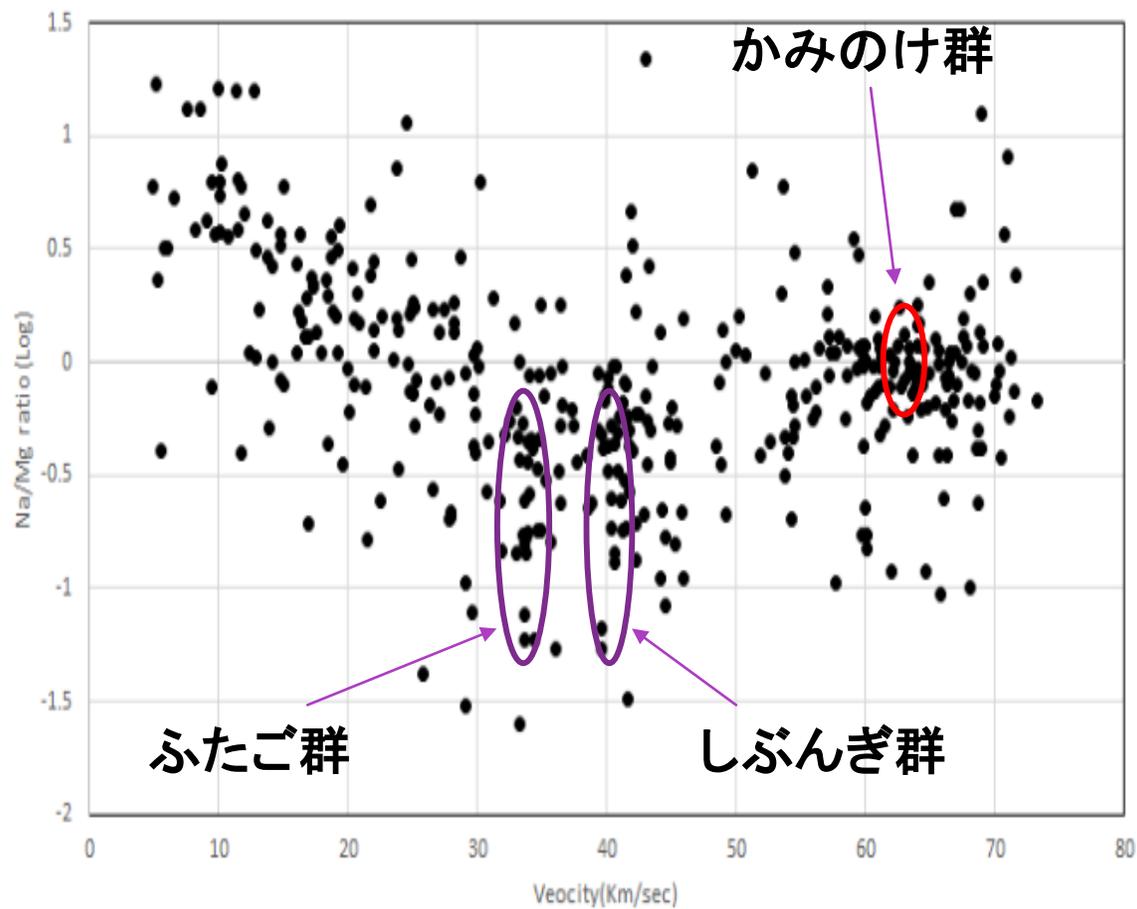


# 流星スペクトルの解析結果 Na/Mg ratio タイプ別 405個

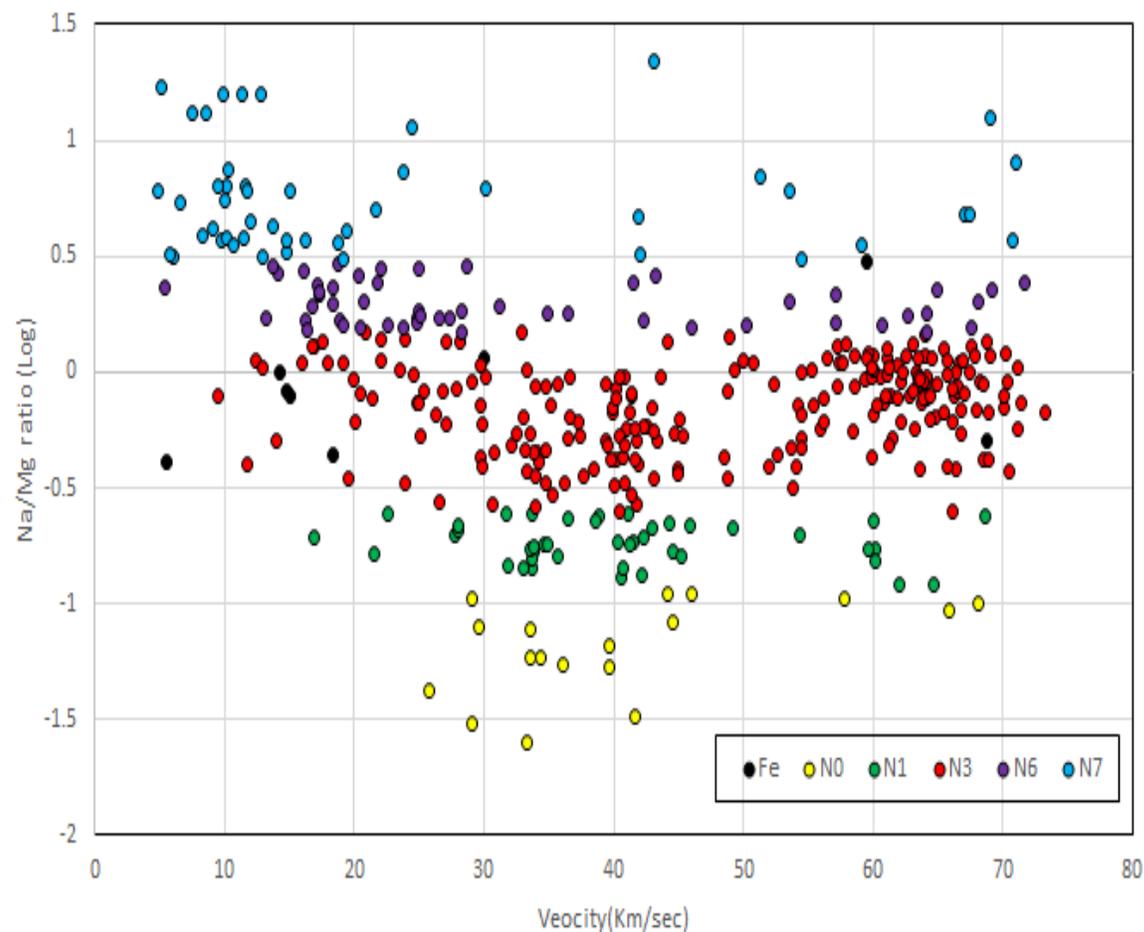
2018年10月から2019年3月までの分類

↓ 前田氏での分類

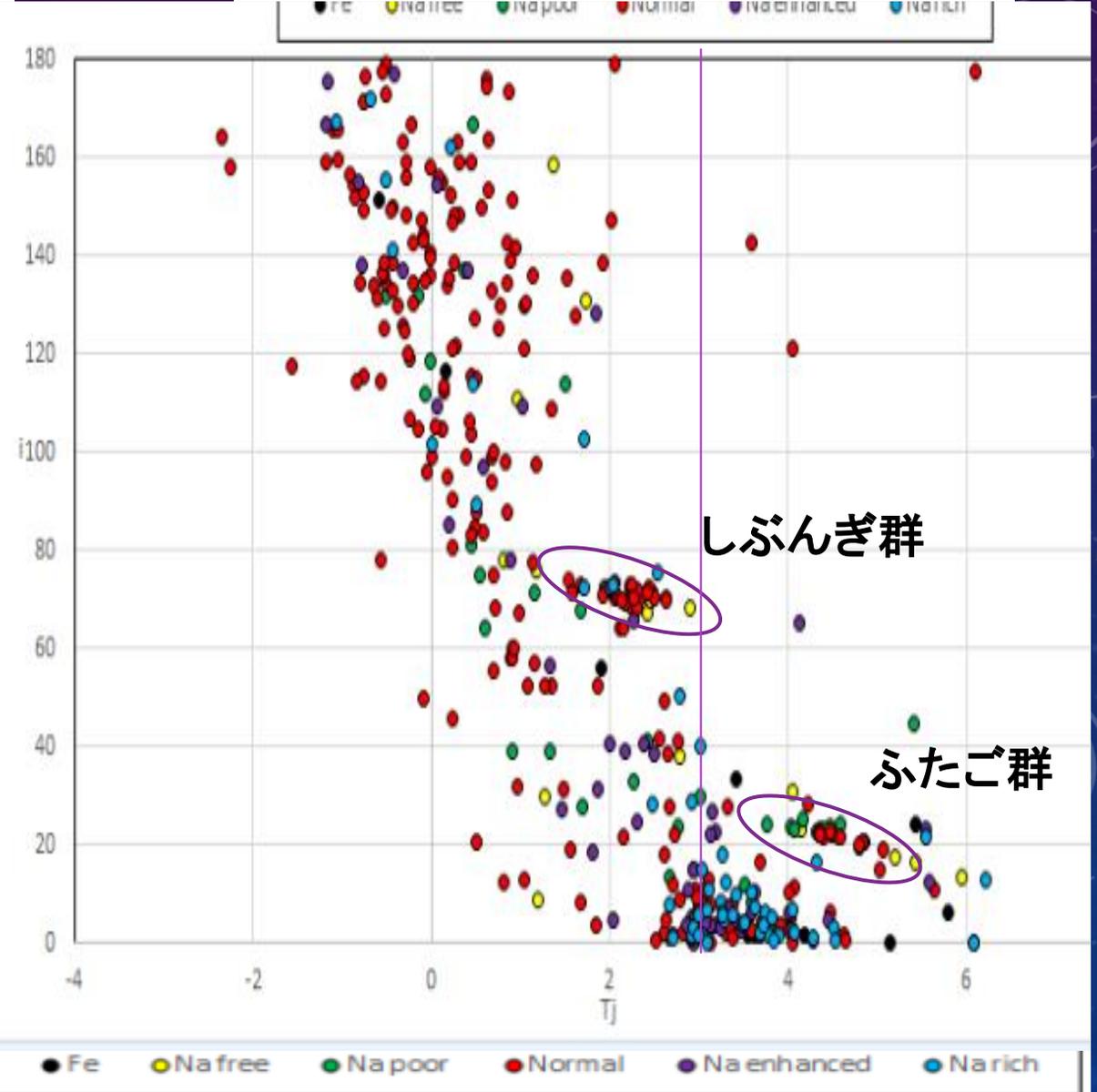
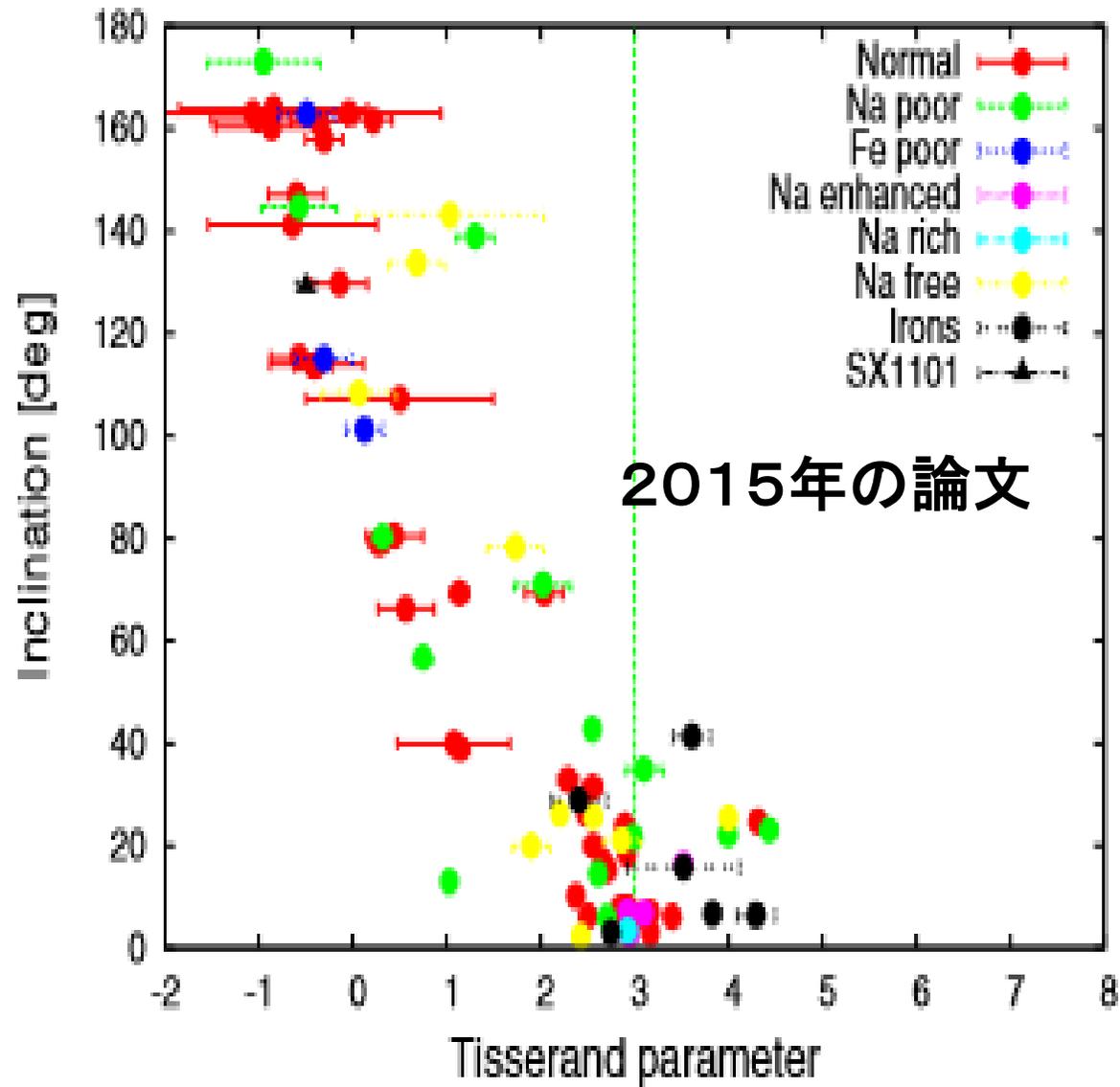
Na/Mg ratio 405個



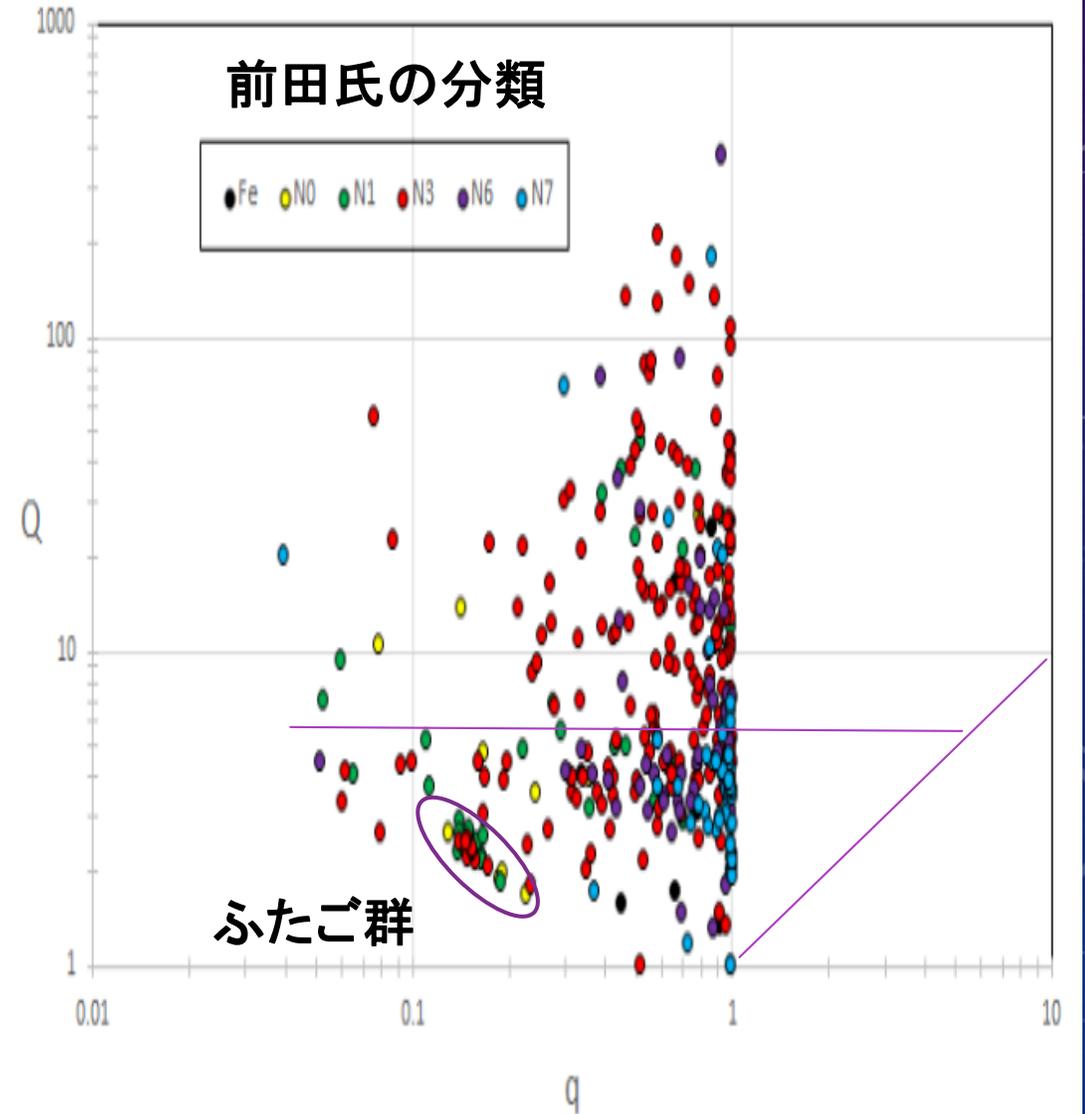
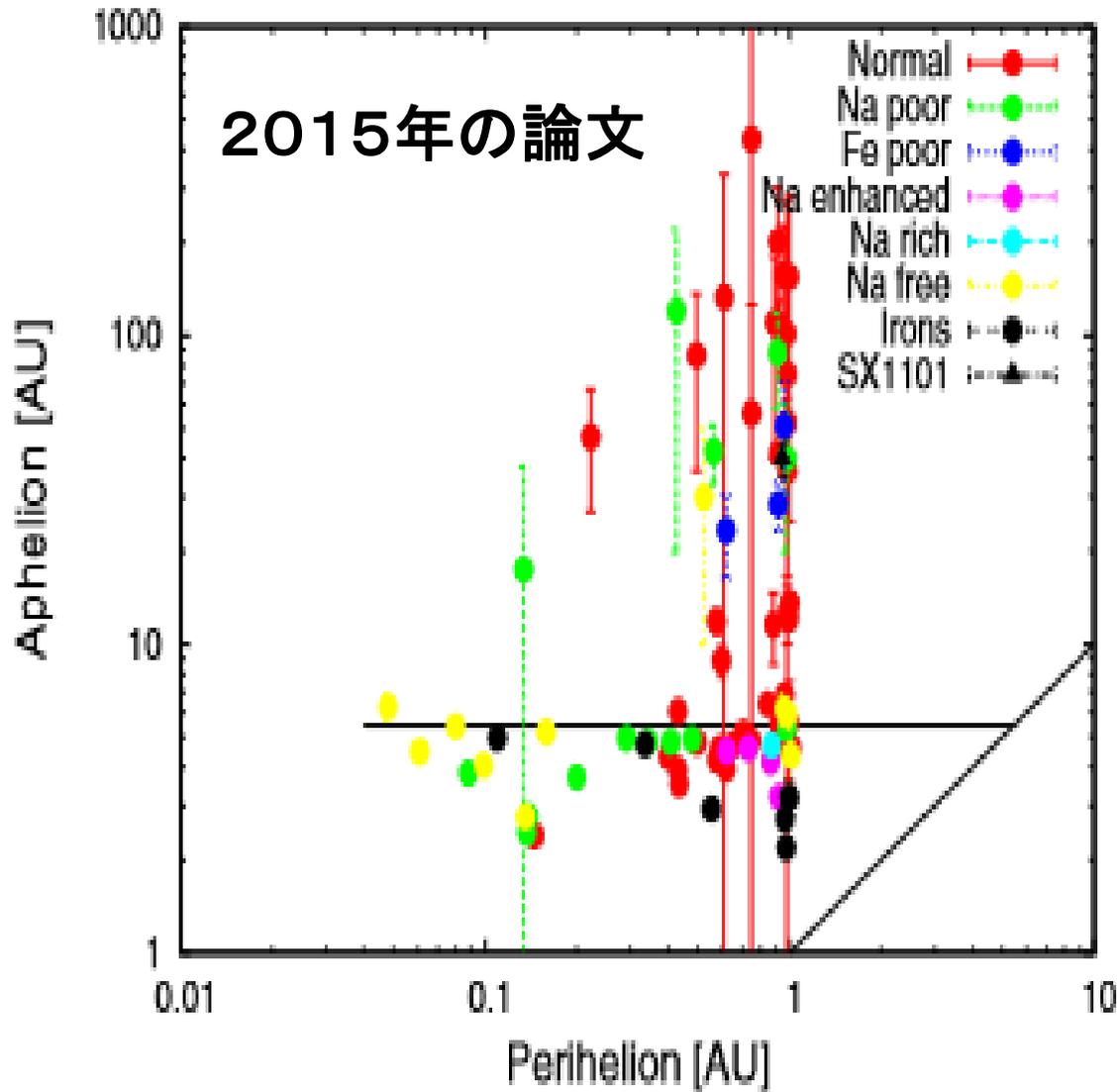
Na/Mg ratio タイプ別 感度補正後の405個



# 流星スペクトルの軌道の比較 Tjとi タイプ別(424個)

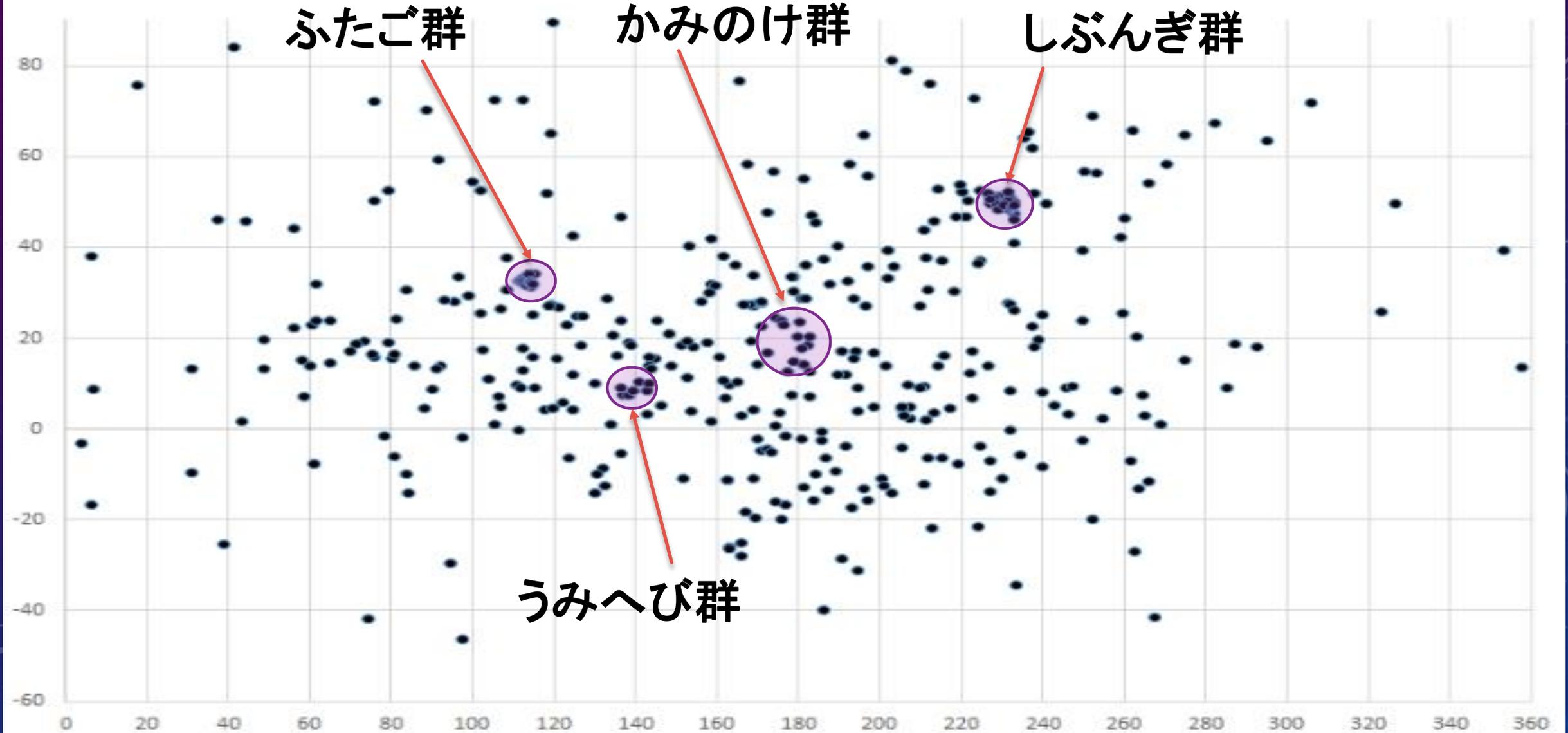


# 流星スペクトルの軌道の比較 Q-q (424個)

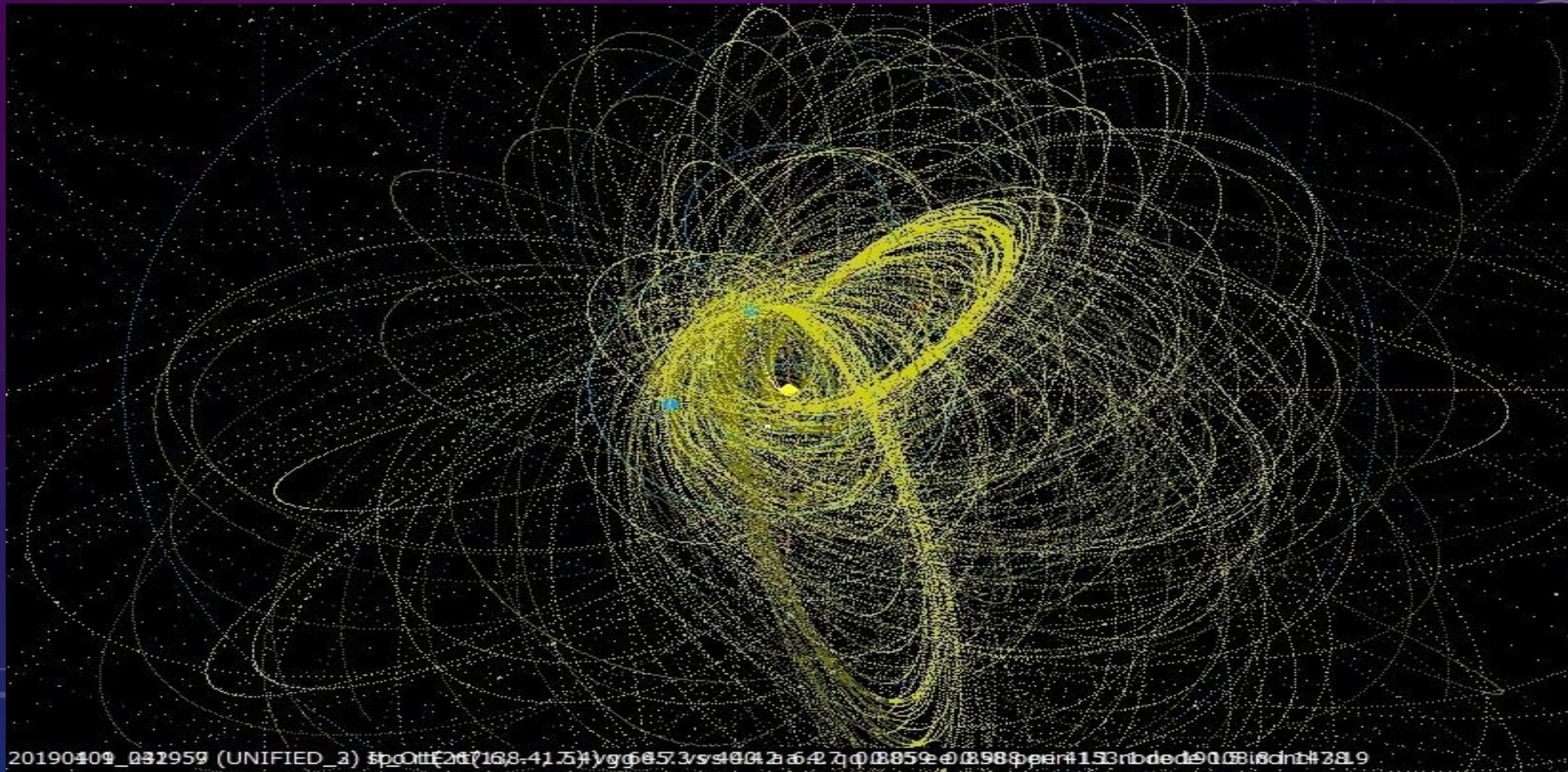


# 流星スペクトルの得られた流星の輻射点分布(424個)

スペクトルが得られた流星の輻射点分布

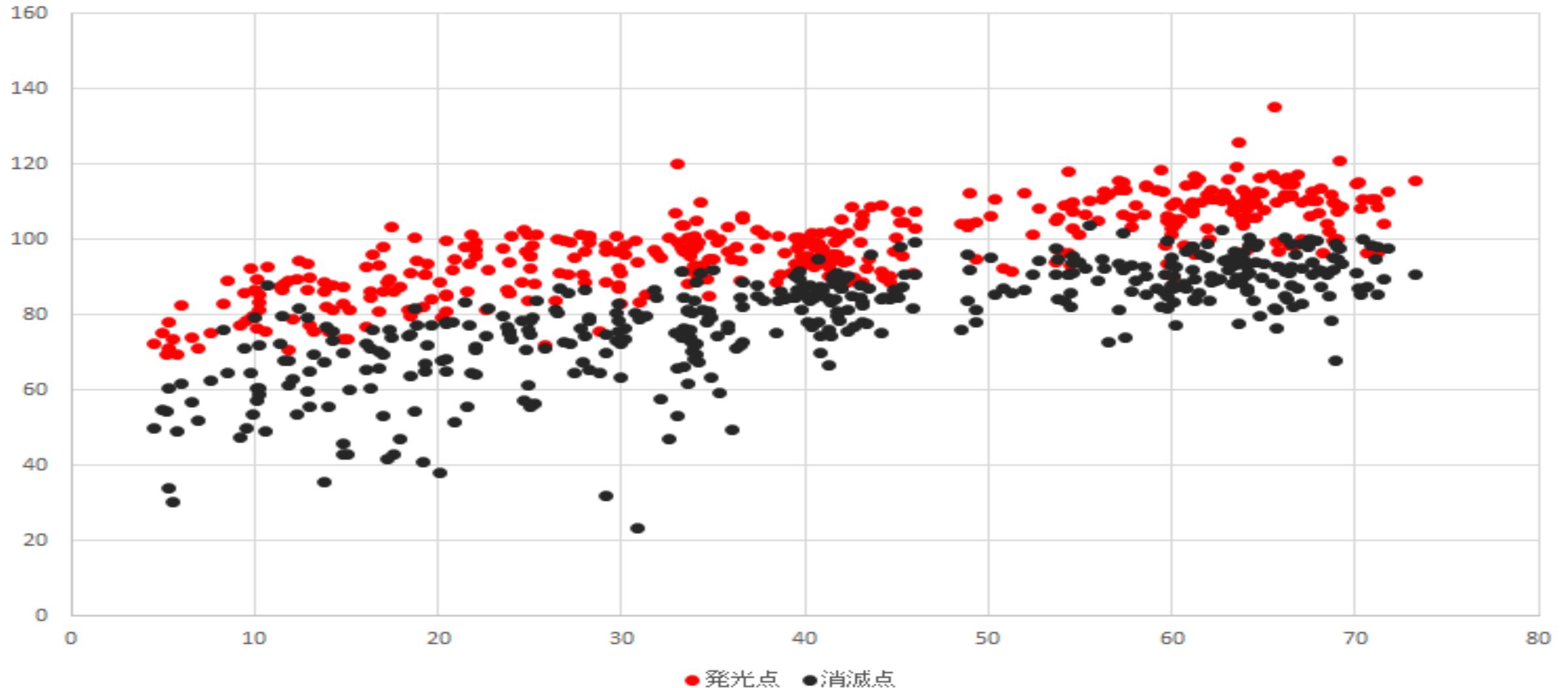


# 流星スペクトルの得られた流星の軌道分布



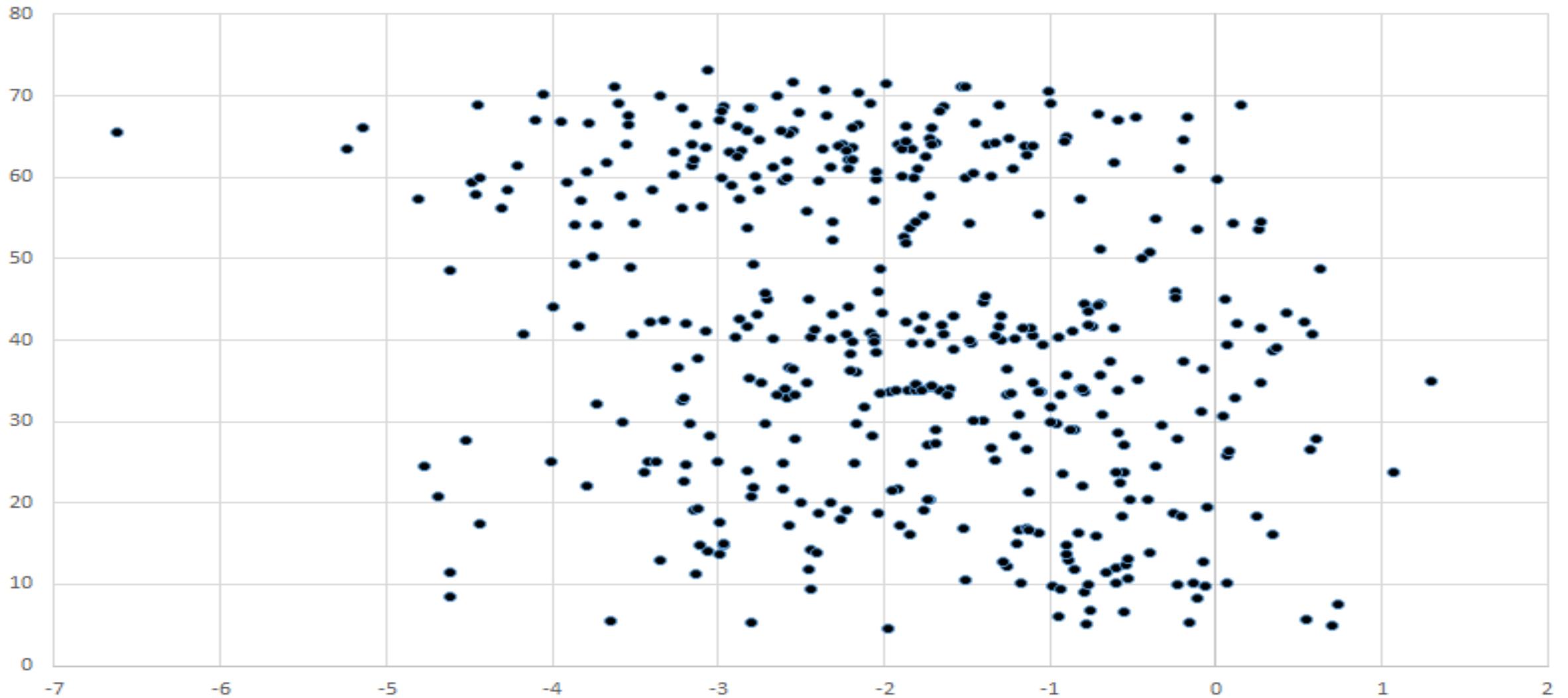
# 流星スペクトルの得られた流星の地心速度と発光高度と消滅点

スペクトルの得られた流星の地心速度と発光高度分布



# 流星スペクトルの得られた流星の地心速度と絶対光度

地心速度と絶対光度

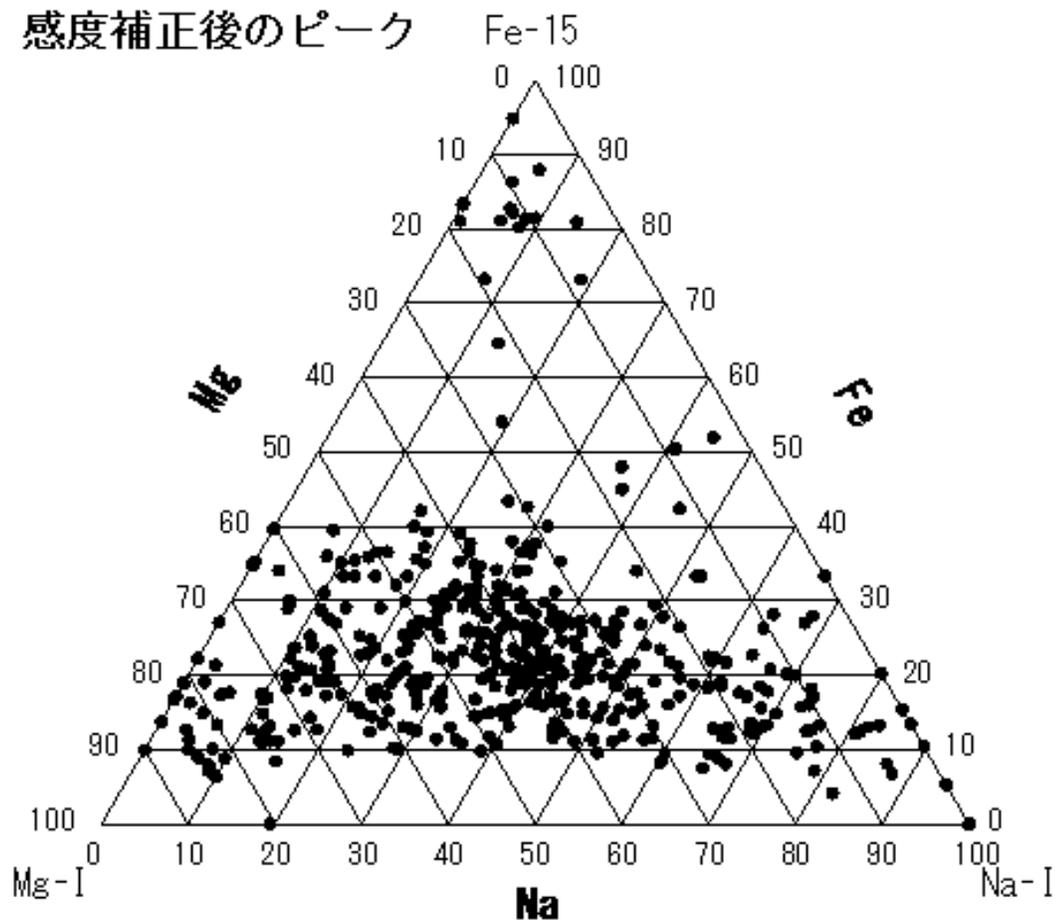


# 流星スペクトルの得られた流星の三角比 459個

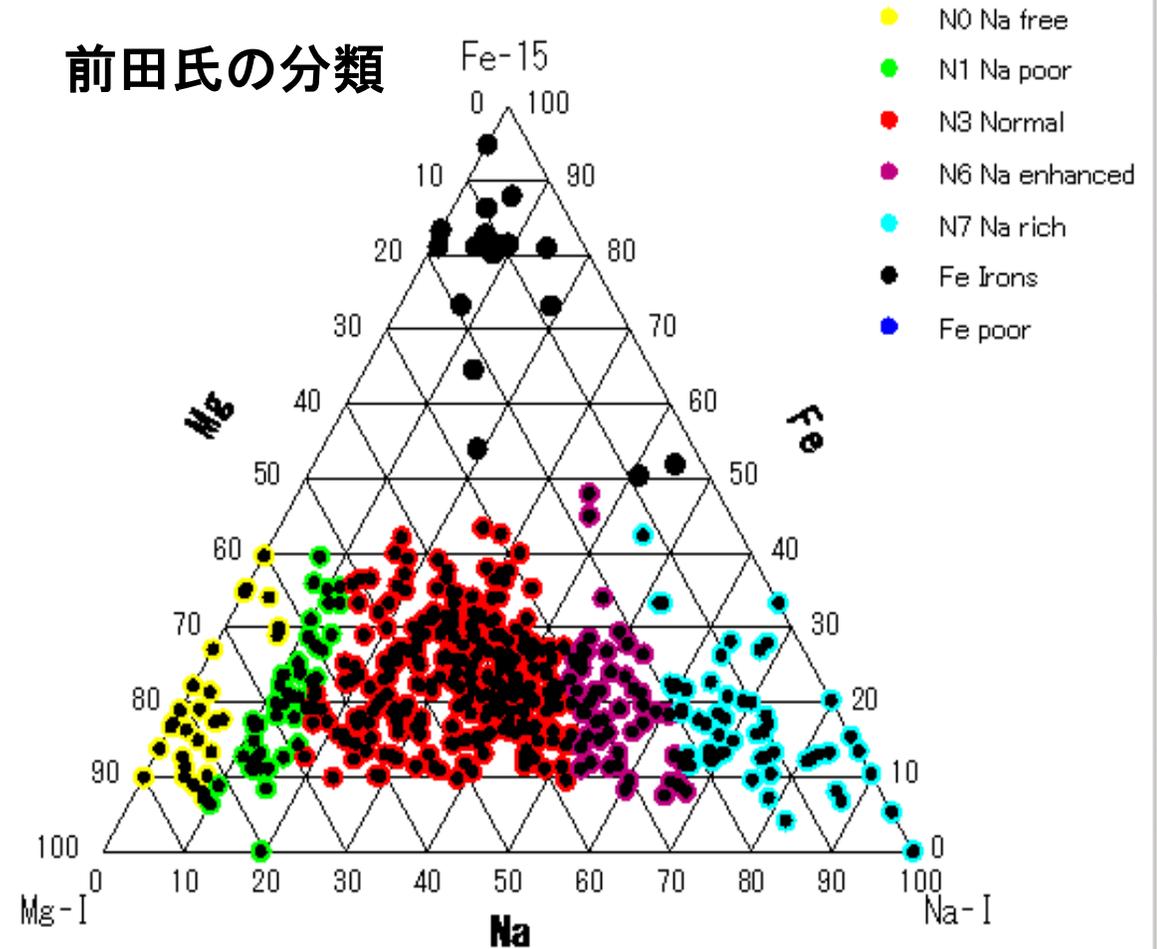
2018年10月-2019年3月 459個 関口

2018年10月-2019年3月 タイプ別 関口

感度補正後のピーク

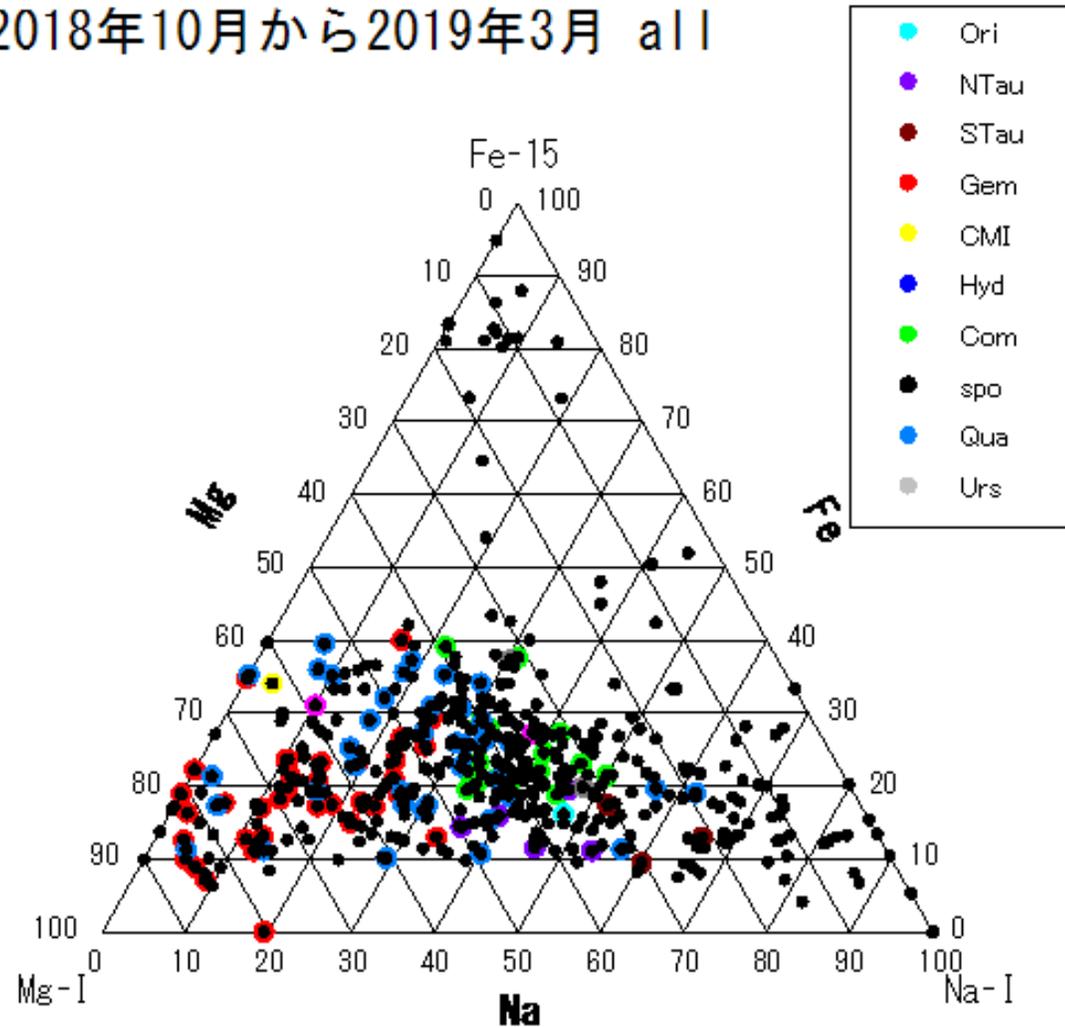


前田氏の分類

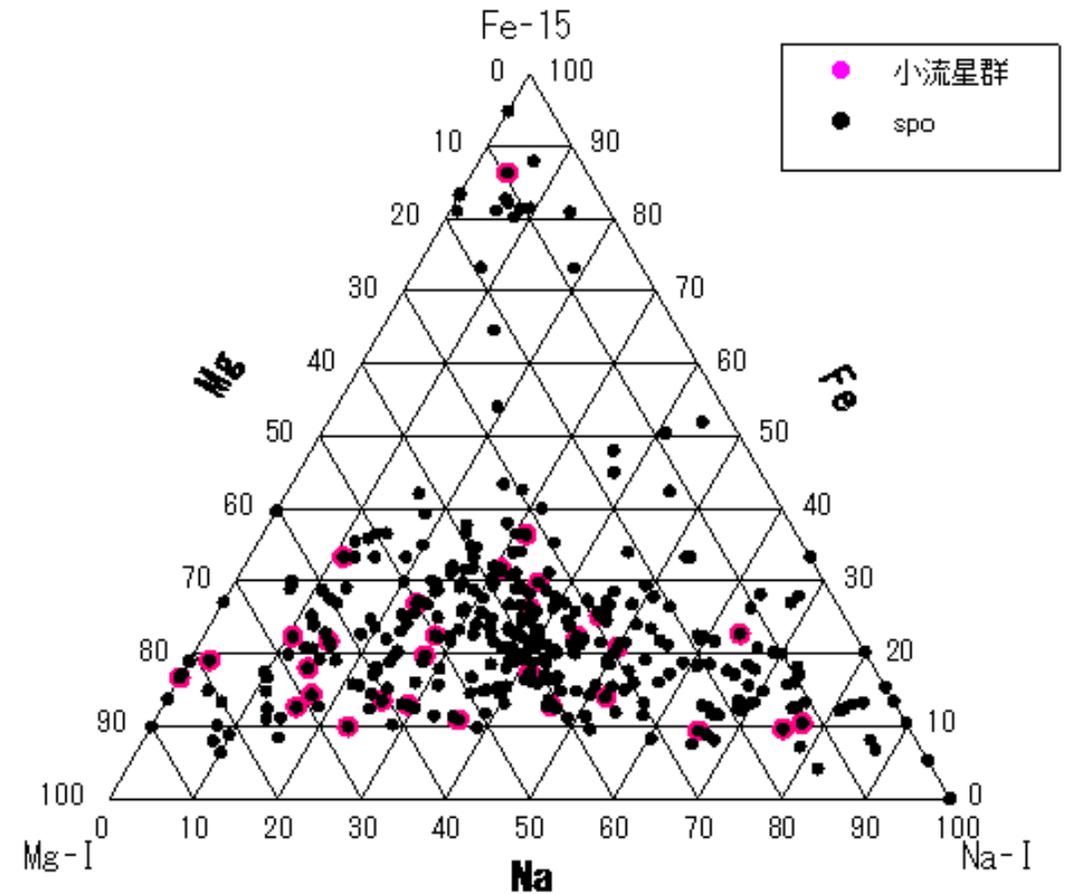


# 流星スペクトルの得られた流星の三角比 459個

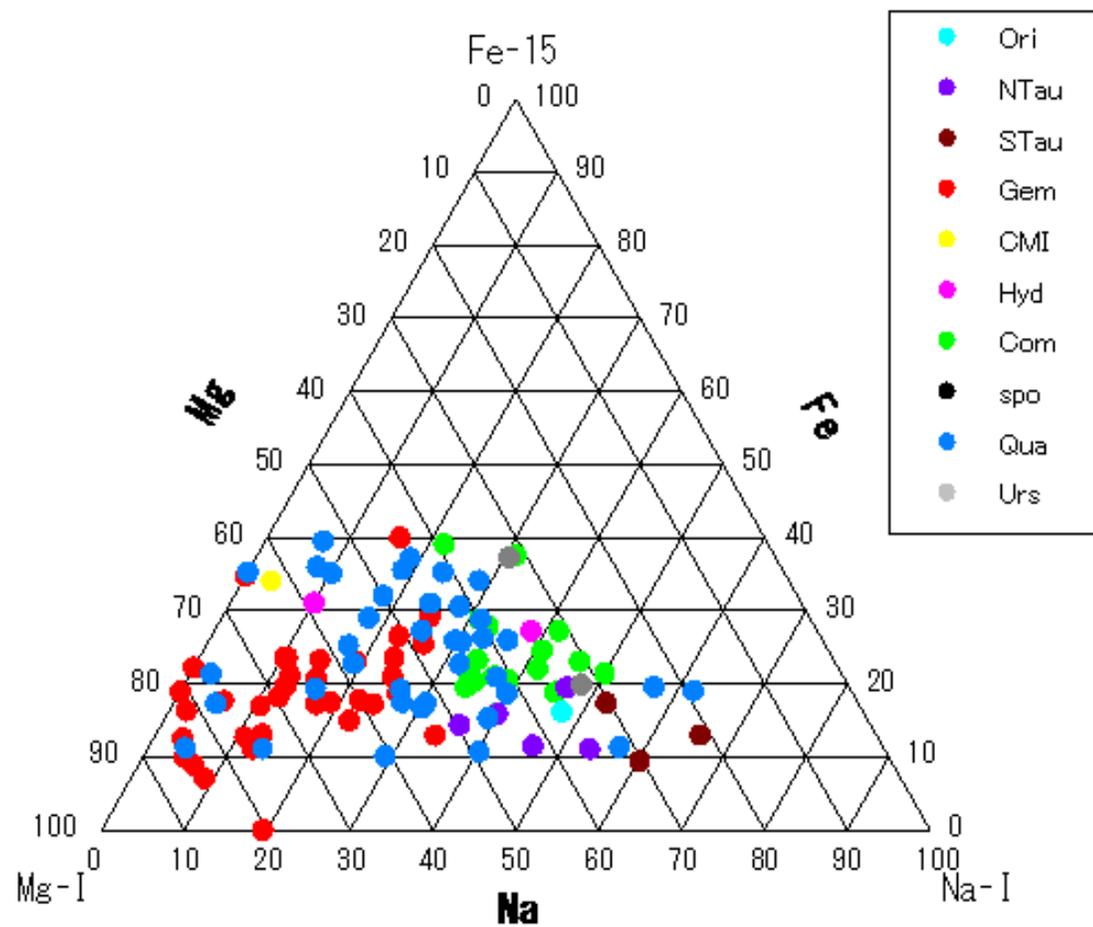
2018年10月から2019年3月 all



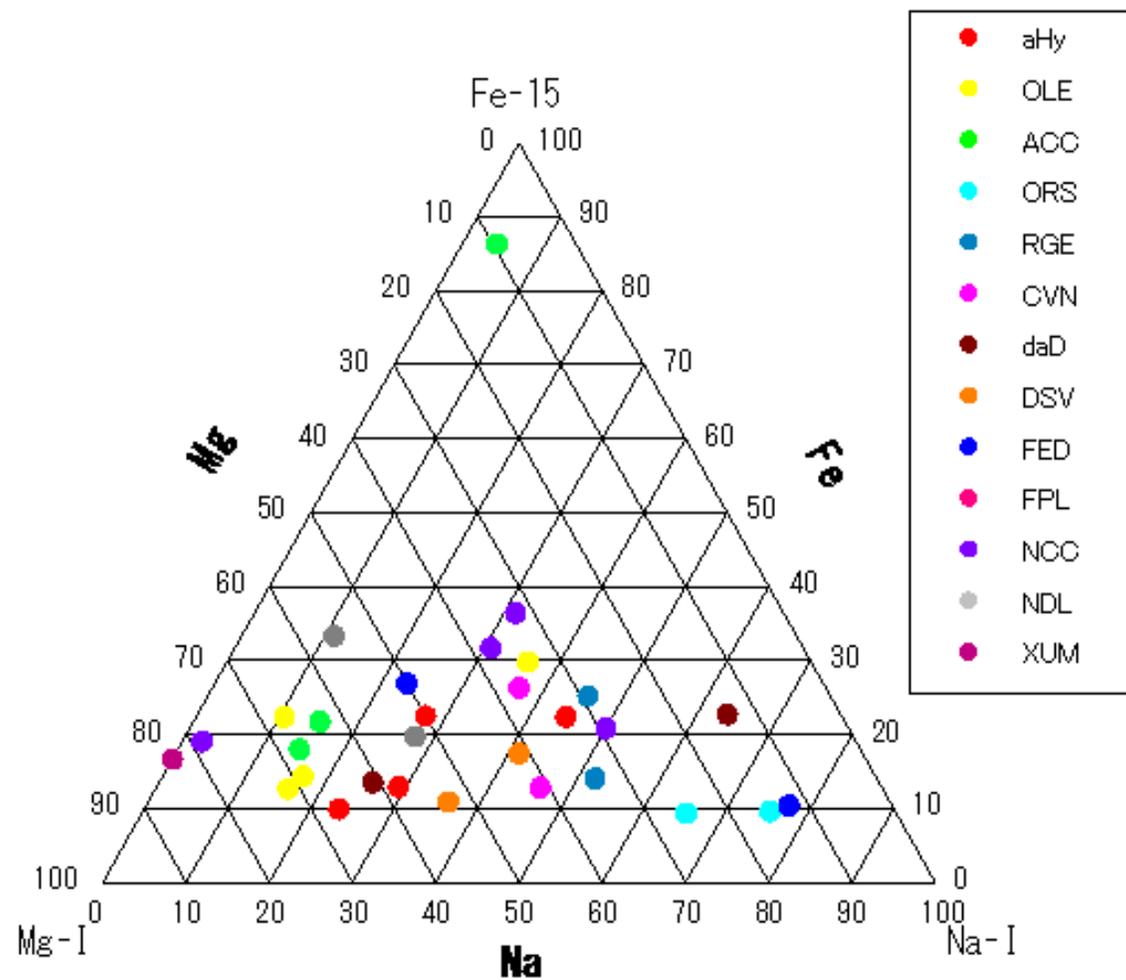
2018年10月から2019年3月 小流星群と散在



## 2018年10月から2019年3月 主要流星群



## 2018年10月から2019年3月 小流星群



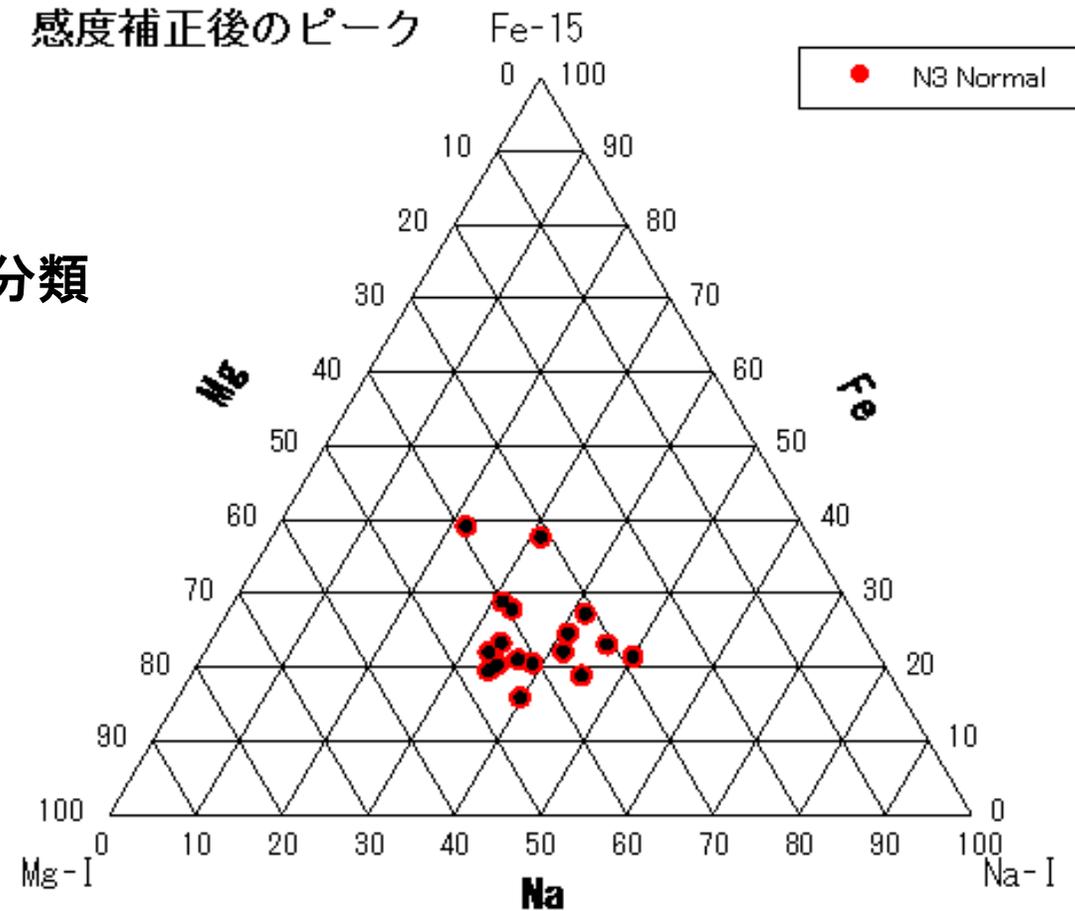
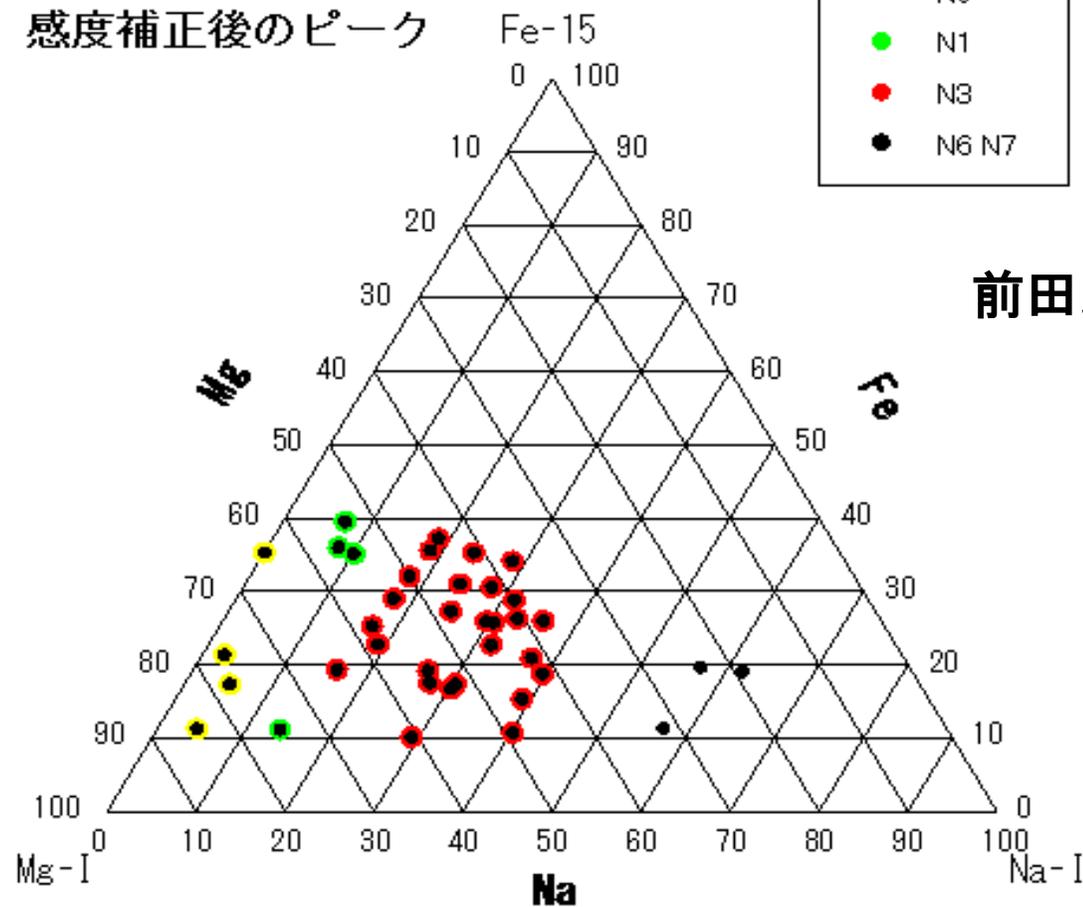
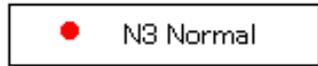
# 流星スペクトルの得られた流星の三角比 各群

2019年1月 Qua群 タイプ別 38個 関口

2018年12月-2019年1月 Com群 17個 関口

感度補正後のピーク

感度補正後のピーク



前田氏の分類

# 流星スペクトルの分類のまとめと課題

- 8台のカメラの観測で、9か月で780個近くのスペクトルが得られた。今回のデータは、2018年10月から2019年3月までの534個を解析した。
- カラーのスペクトルは、輝線の色から波長同定の判定がしやすい。
- ほとんどの流星はNaとMgが主成分だが、NaやMgのどちらかが非常に少ないものや、両方とも無い特殊な鉄流星もあった。鉄流星は、速度が遅い。
- 今回は、分散方向が悪いもの、ダブリや薄いものは、削除した。
- 今回も、鉄をバンドとして判定し感度補正までの結果で、面積比も求めてあるが組成比が測定場所で結構変化する。測定の仕方が課題である。測定方法の確立。
- 今回は、ふたご群のタイプ別による軌道の関係だけでなく軌道要素などで母天体との関係がどうか前回より少しははっきりしてきたといえそう。
- 速度とNa/Mg ratioは、速度が遅いほどNaが多くなっているという2016年の論文と似た結果になった。
- 今回は、Naの輝線がはっきりしているもので、鉄の比が50-80%の流星が7個ほどあった。

# 第153回 流星物理セミナー資料 20191006 関口孝志

2018年10月から2019年09月のスペクトル観測と結果  
(やぎ群やペルセウス群等)



# カメラ毎のスペクトル撮影数等 10月4日現在

| 方向           | N6        | S12       | W6         | Z6         | E6        | NW50       | NE6       | SE8       | スペクトル       |
|--------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|-------------|
| レンズ          | 6         | 12        | 6          | 6          | 6         | 50&28      | 6         | 8         |             |
| 回折格子<br>本/mm | 500       | 500       | 600        | 600 (200)  | 500       | 500 (200)  | 500       | 500       | 合計          |
| 10月11月       |           |           |            |            |           | 5 10       |           |           | 15          |
| 12月          | 8         | 7         | 26         | 17         | 9         | 52         | 9         | 14        | 142         |
| 1月           | 13        | 7         | 115        | 71         | 24        | 32         | 24        | 25        | 311         |
| 2月           | 4         | 3         | 28         | 28         | 0         | 8          | 2         | 6         | 79          |
| 3月           | 6         | 5         | 24         | 29         | 6         | 9          | 6         | 7         | 92          |
| 4月           | 4         | 3         | 20         | 15         | 1         | 4          | 5         | 4         | 56          |
| 5月           | 5         | 4         | 22         | 12         | 0         | 15         | 5         | 5         | 68          |
| 6月           | 1         | 0         | 9          | 3          | 0         | 6          | 2         | 2         | 23          |
| 7月           | 4         | 0         | 14         | 11         | 4         | 4          | 5         | 2         | 44          |
| 8月           | 14        | 5         | 70         | 57         | 8         | 19         | 19        | 17        | 209         |
| 9月           | 2         | 1         | 28         | 14         | 2         | 5          | 1         | 1         | 54          |
| <b>合計</b>    | <b>61</b> | <b>35</b> | <b>359</b> | <b>258</b> | <b>54</b> | <b>169</b> | <b>78</b> | <b>84</b> | <b>1098</b> |

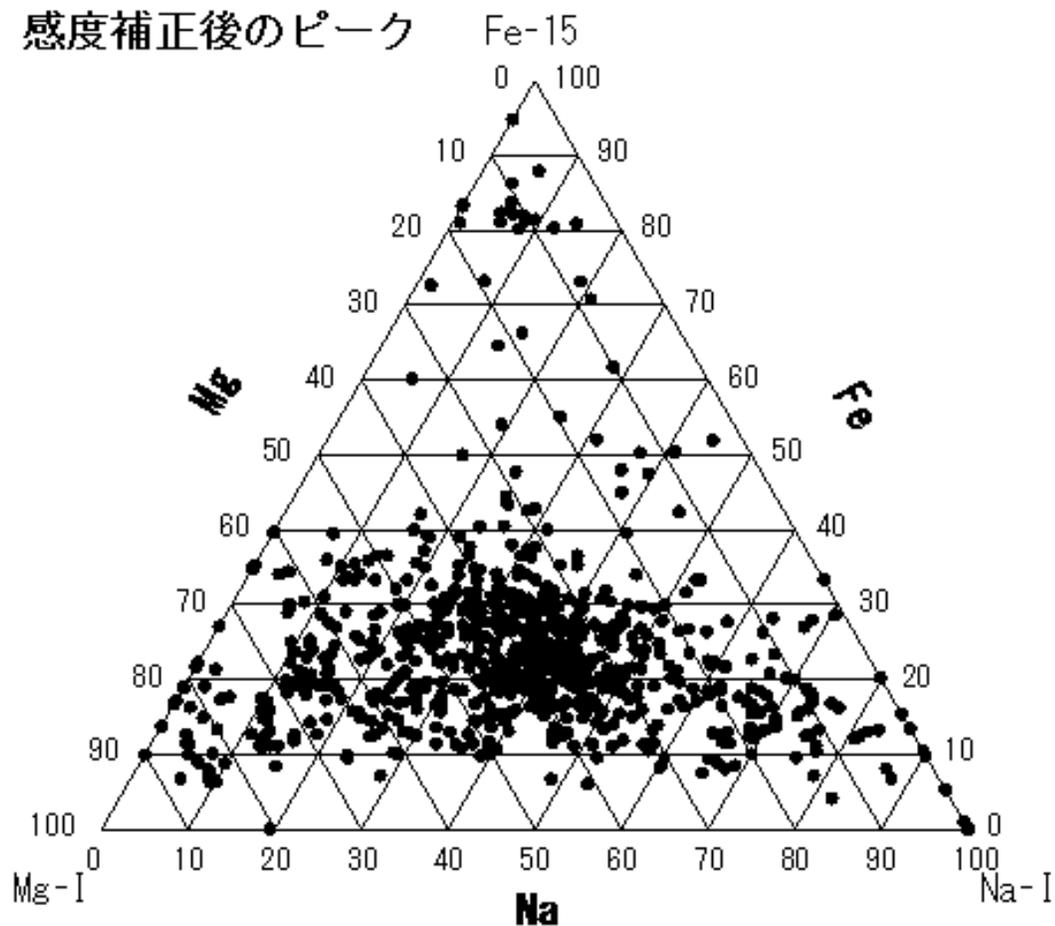
解析済

745

# 流星スペクトルの得られた流星の三角比

2018年10月～2019年8月 745 関口

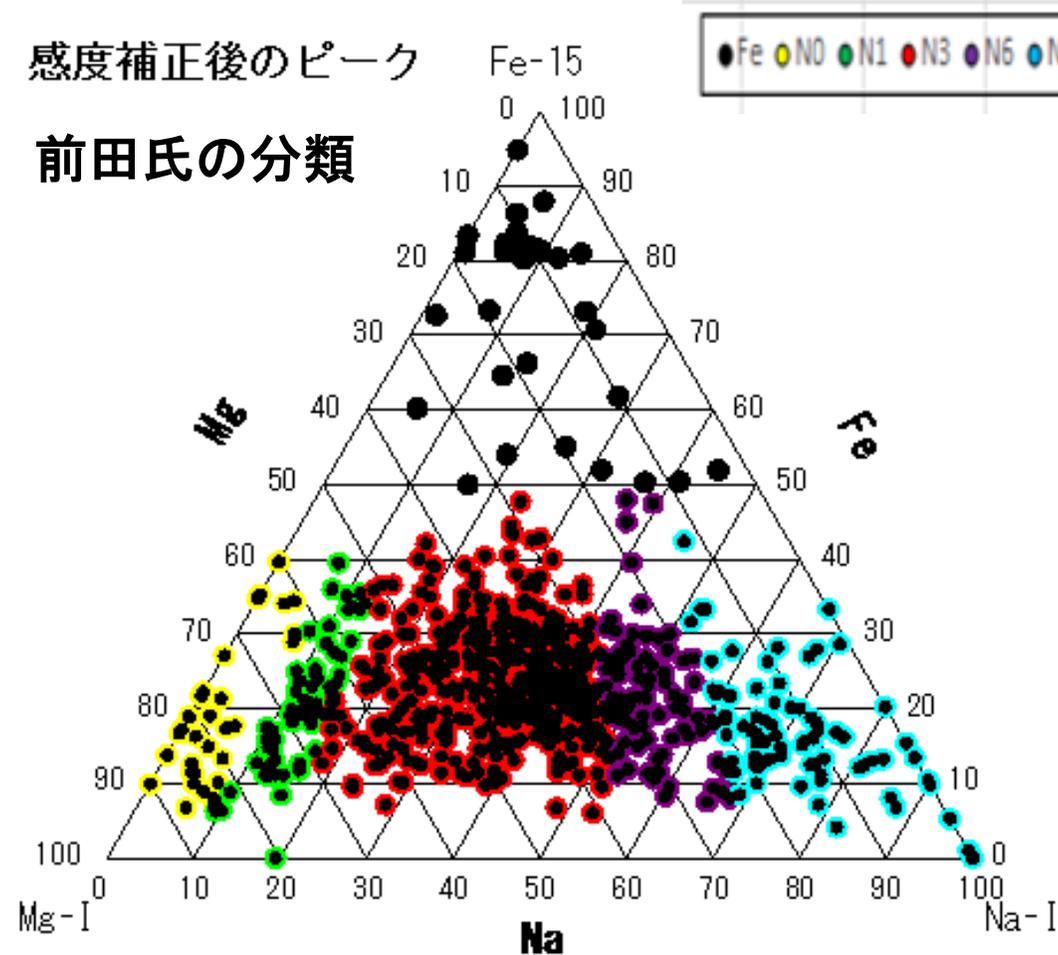
感度補正後のピーク



2018年10月～2019年8月 745個 関口

感度補正後のピーク

前田氏の分類



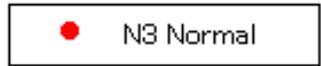
# 流星スペクトルの得られた流星の三角比 各群

2019年1月 Qua群 タイプ別 38個 関口

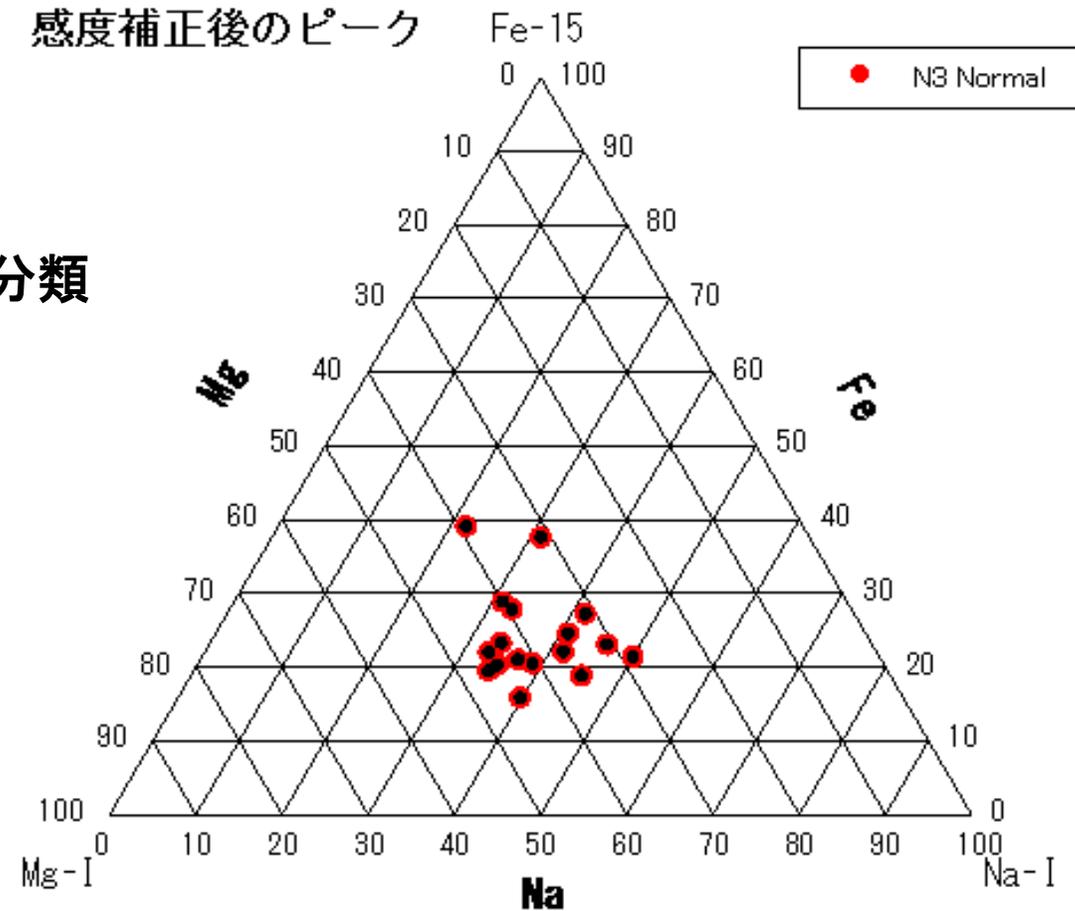
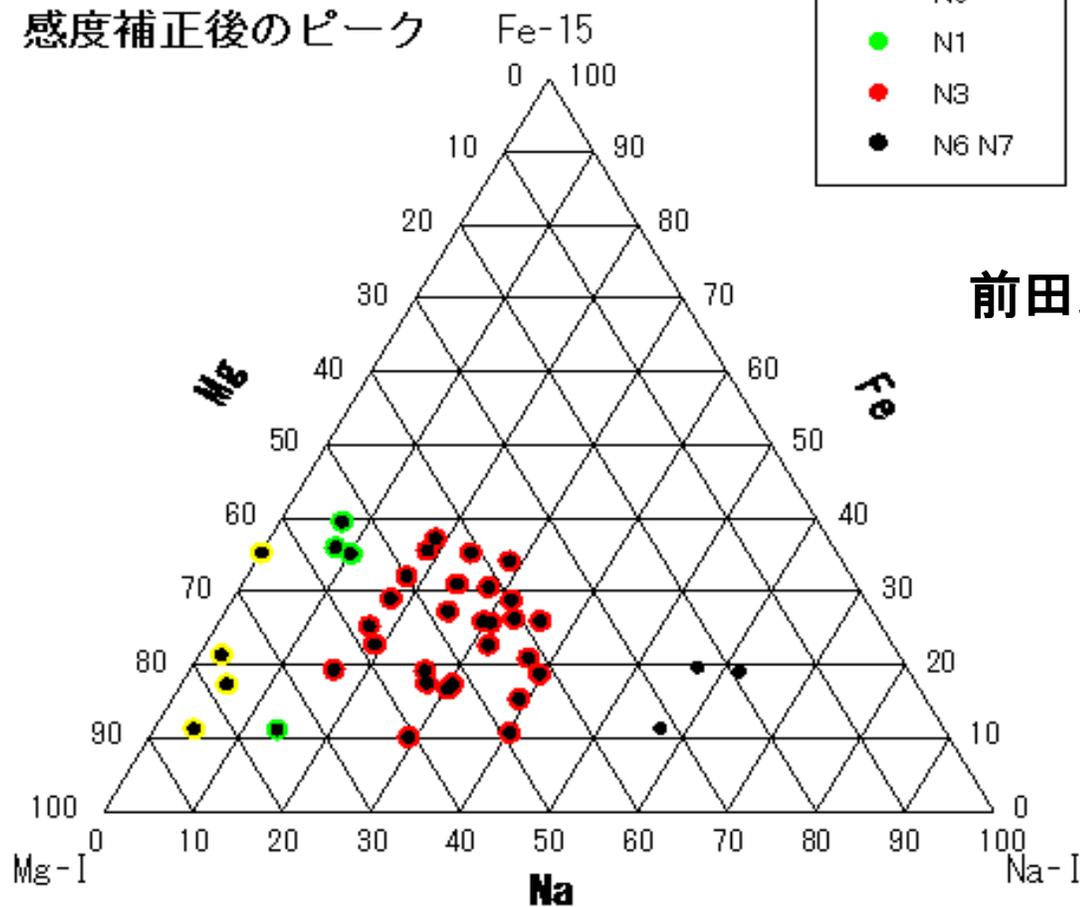
2018年12月-2019年1月 Com群 17個 関口

感度補正後のピーク

感度補正後のピーク

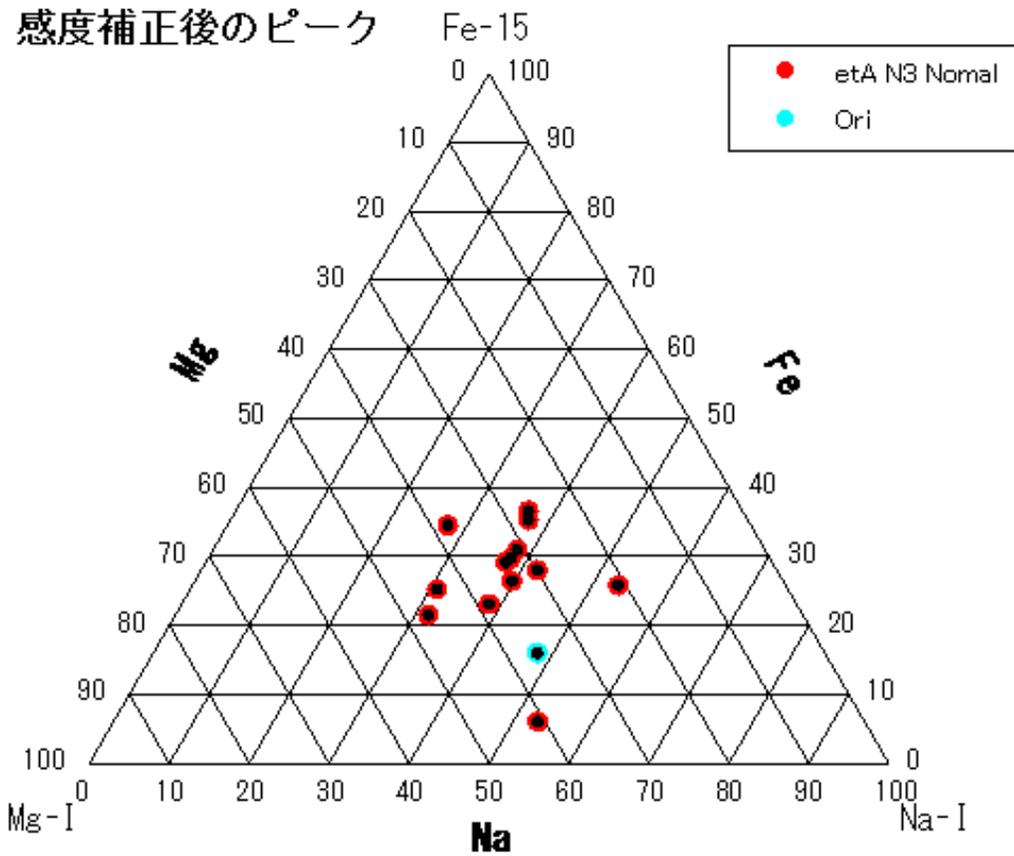


前田氏の分類

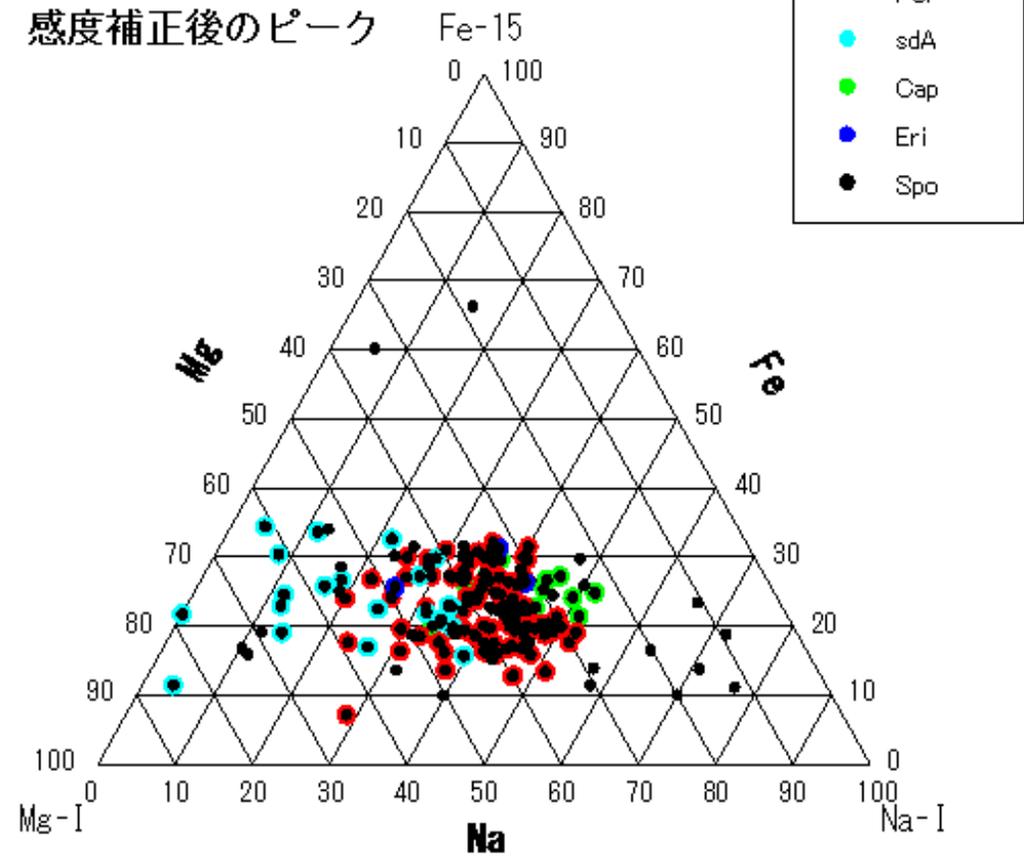


# 流星スペクトルの得られた流星の三角比 各群

2019年5月 みずがめ群 13個 関口

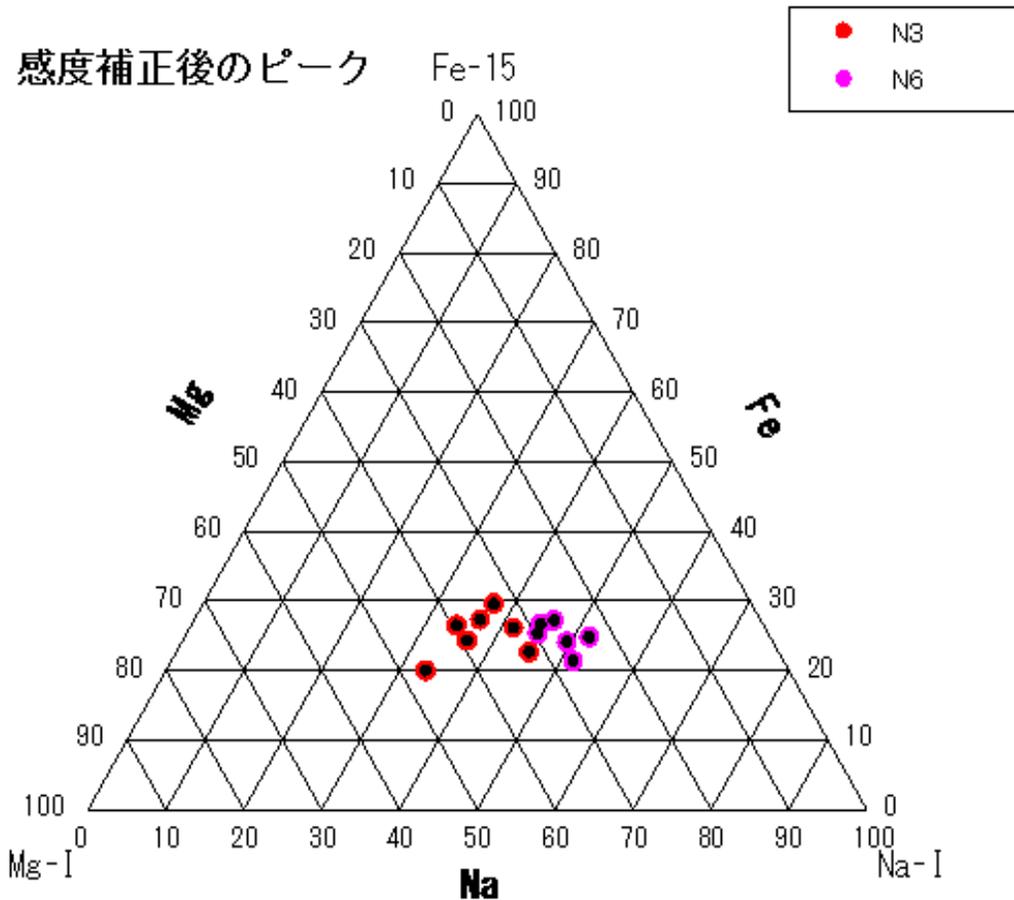


2019年7月～2019年8月 167個 関口

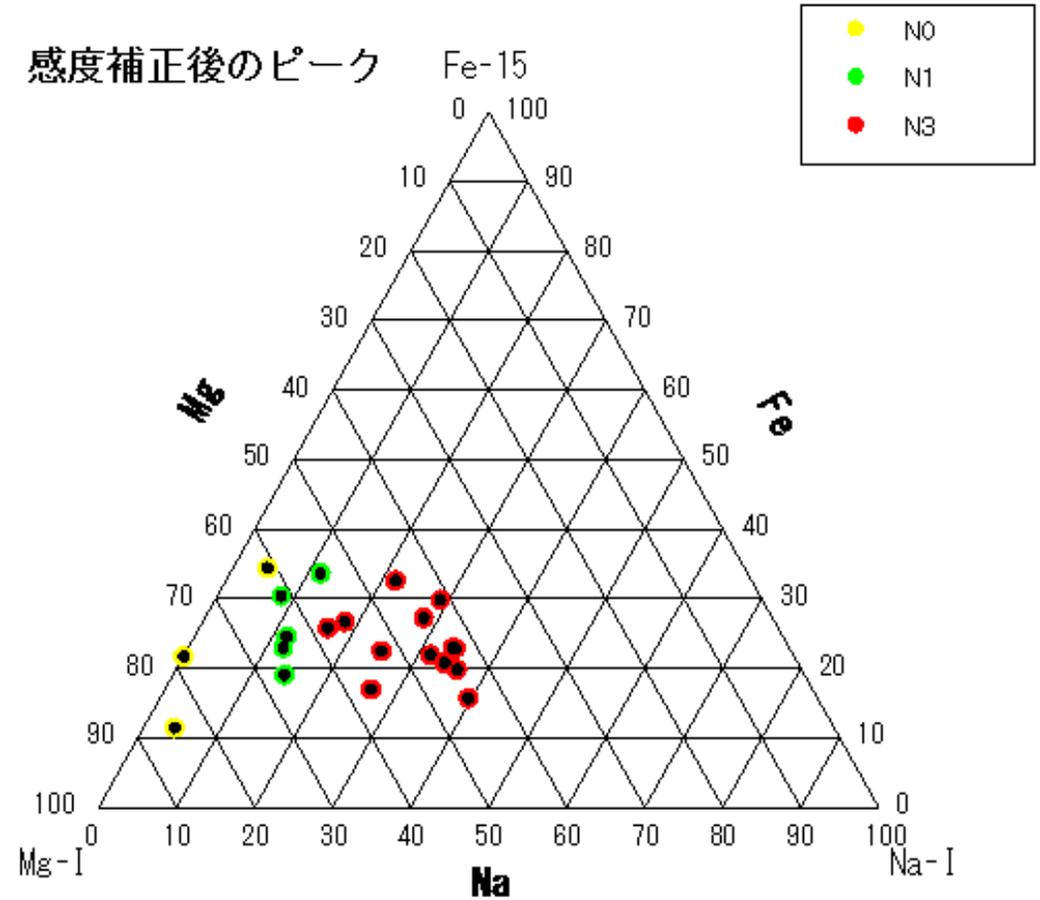


# 流星スペクトルの得られた流星の三角比 各群

2019年7月～2019年8月 やぎ群 13個 関口

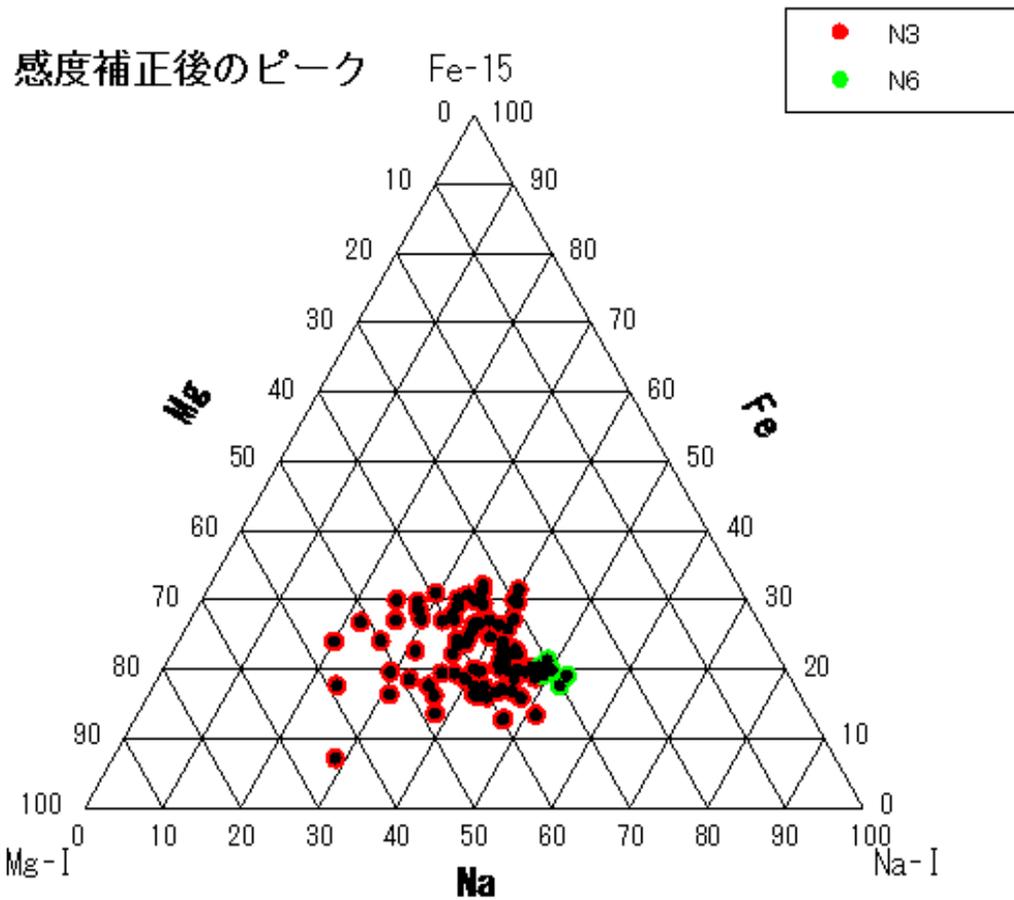


2019年7月～2019年8月 sdA群 20個 関口

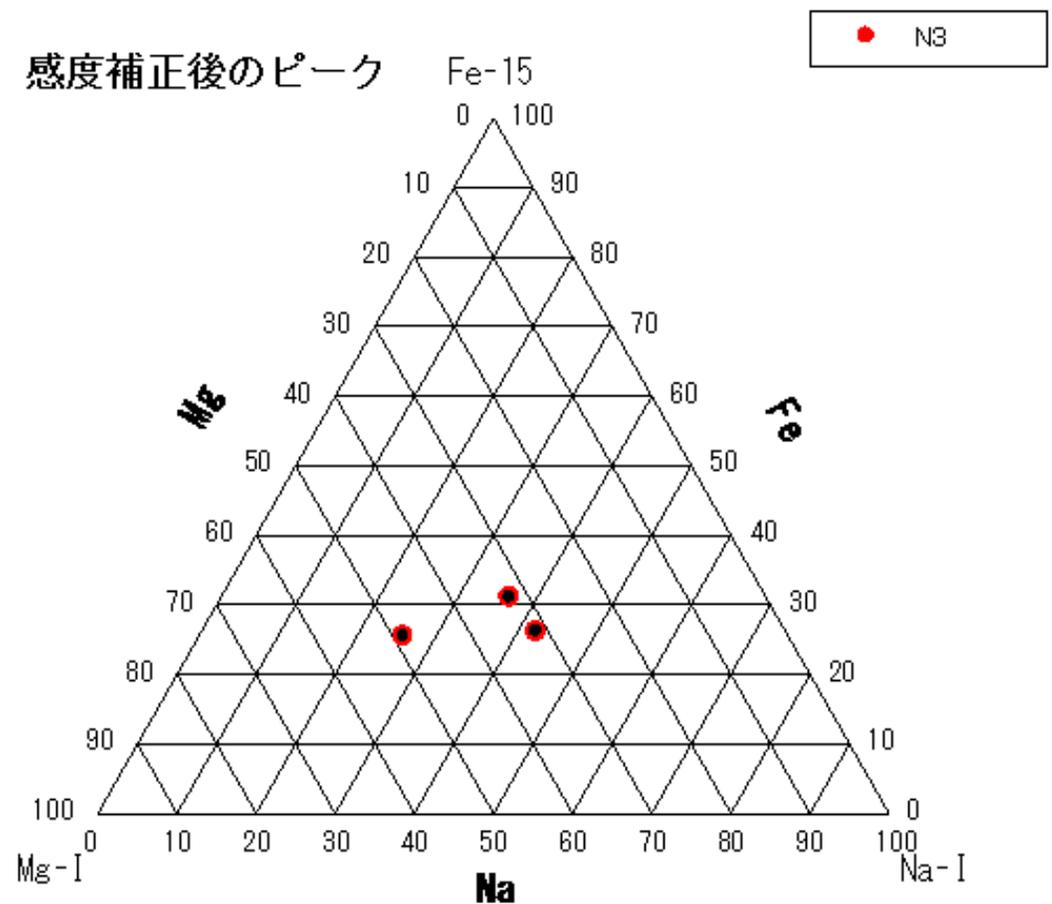


# 流星スペクトルの得られた流星の三角比 各群

2019年7月～2019年8月 ペルセ群 86個 関口

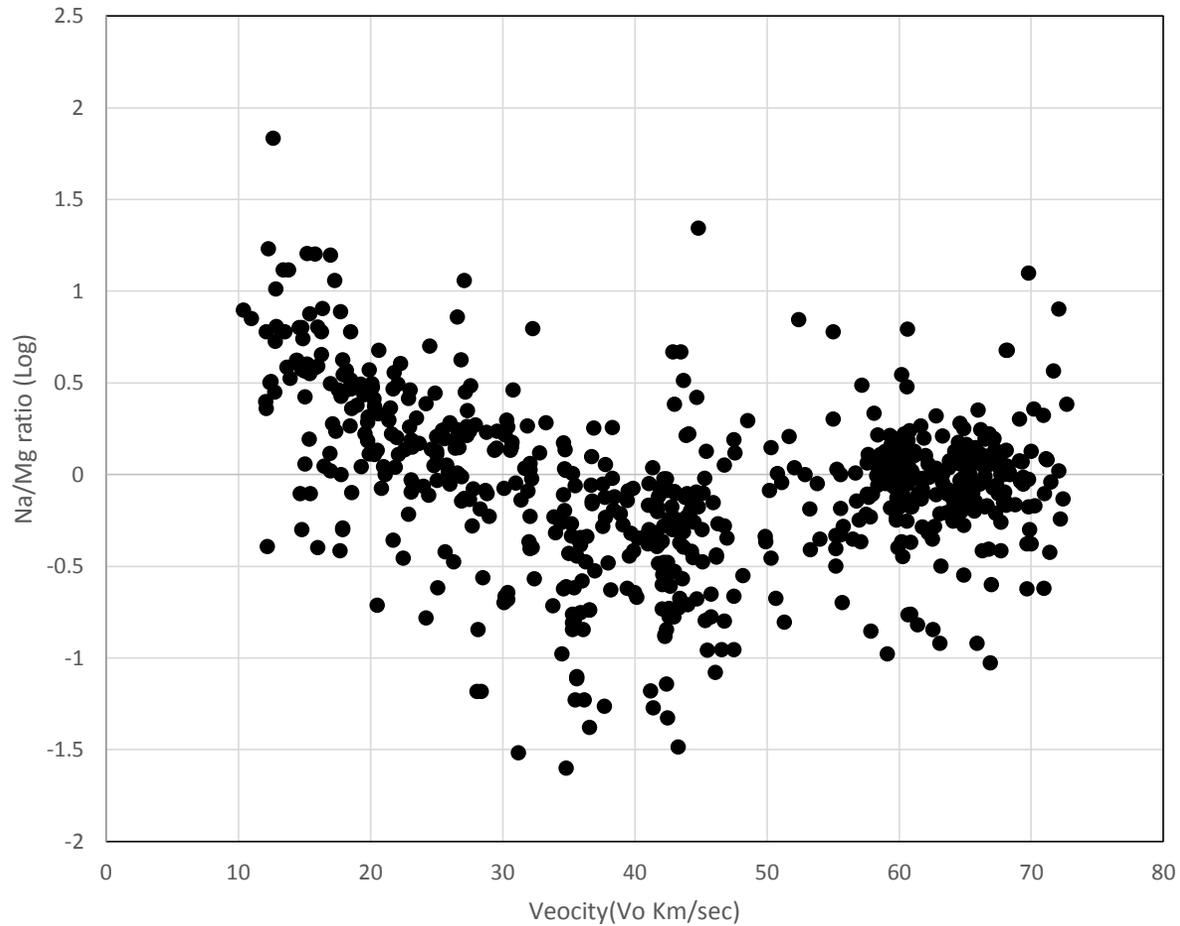


2019年8月 Eri群 3個 関口

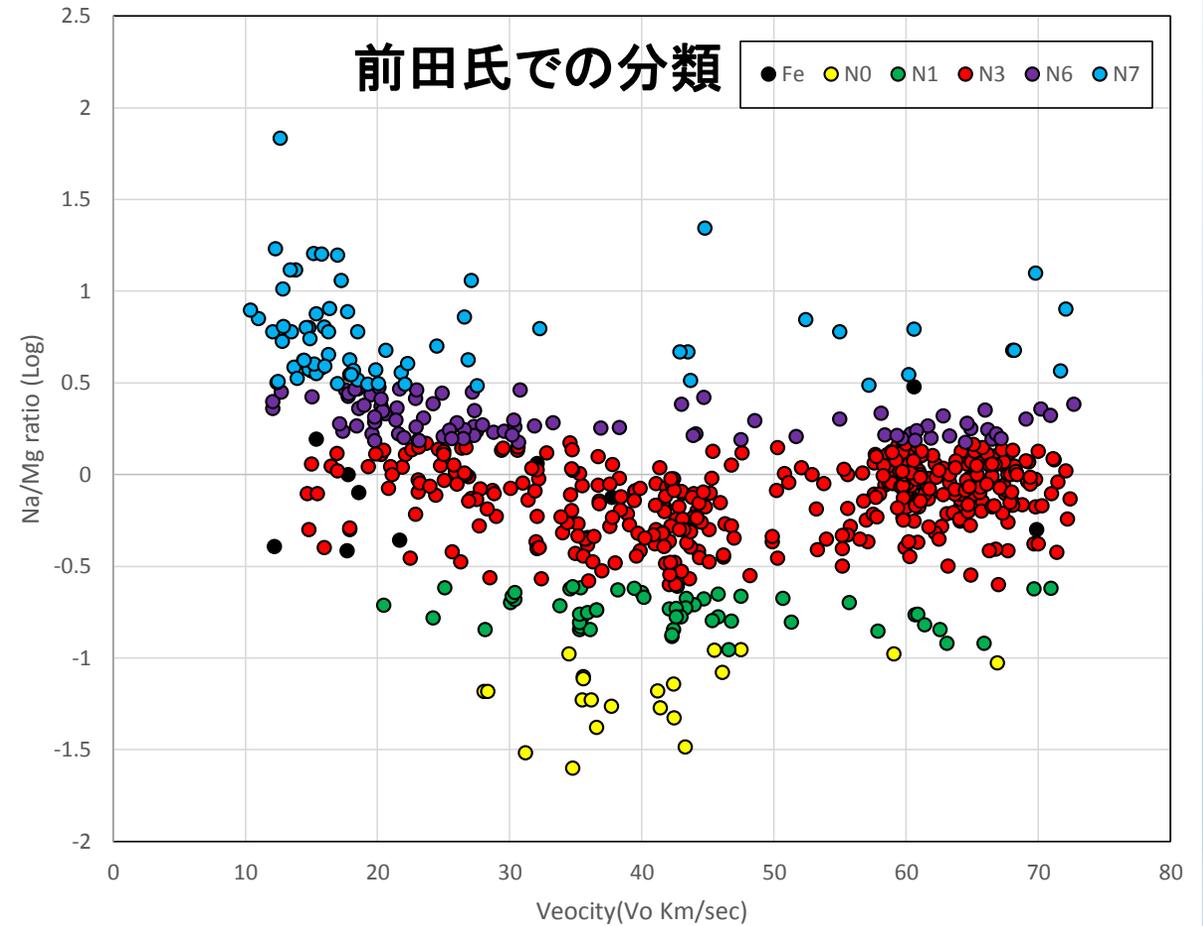


# 流星スペクトルの解析結果 Na/Mg ratio タイプ別 673個

Na/Mg ratio

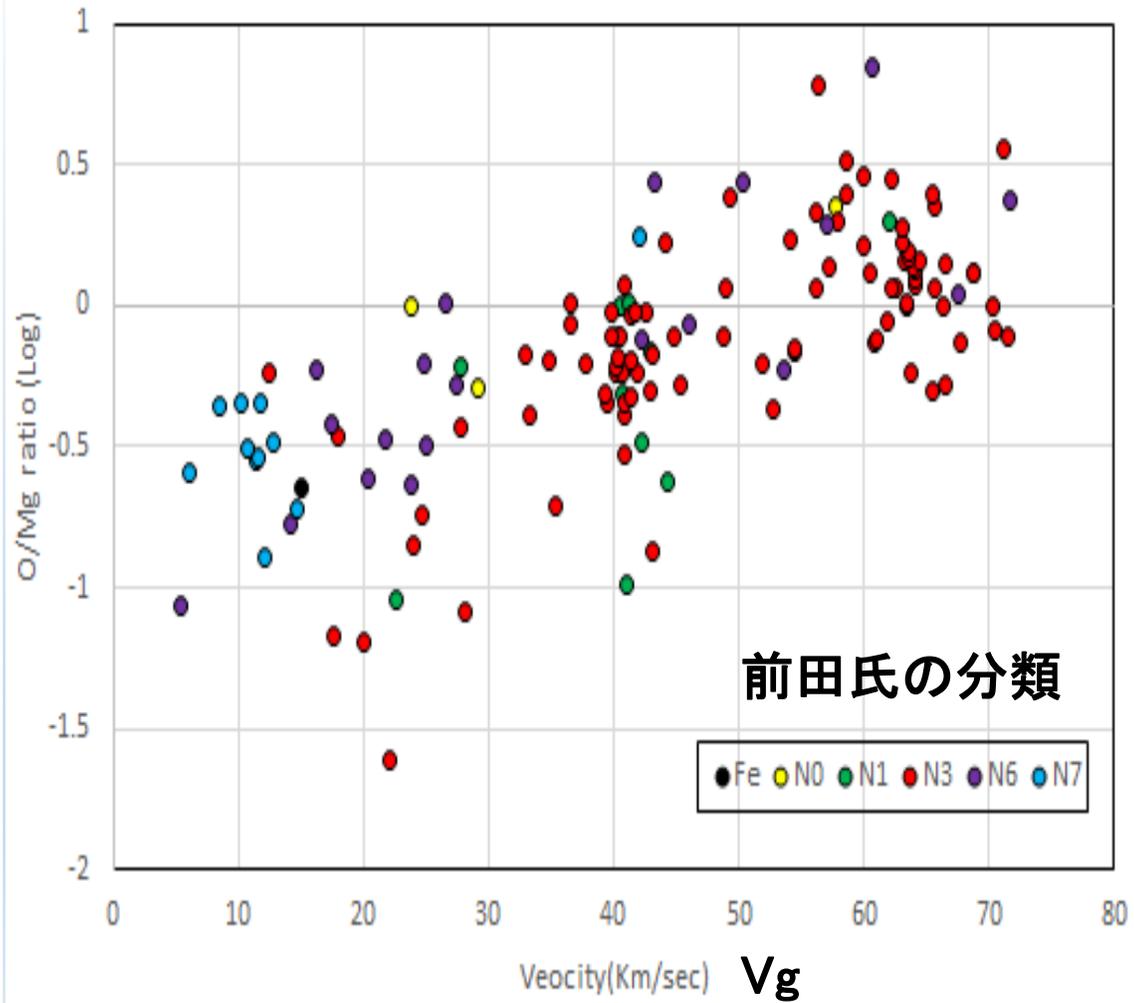


Na/Mg ratio タイプ別 感度補正後の673個

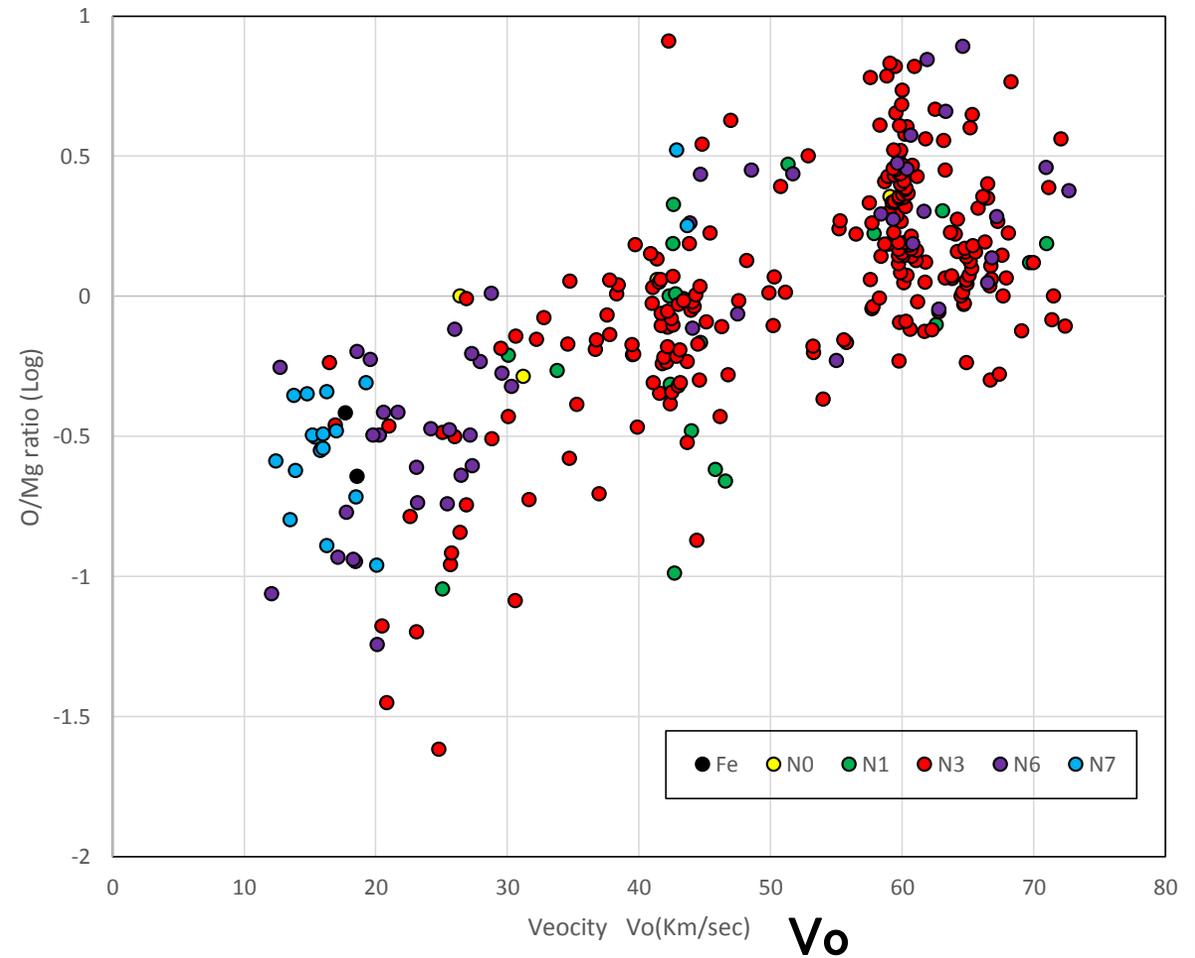


# 流星スペクトルの得られた流星の O/Ma ratioの比較

O/Mg ratioタイプ別 感度補正後の140個



O/Mg ratioタイプ別 感度補正後の331個



# 流星スペクトルの画像

しぶんぎ群



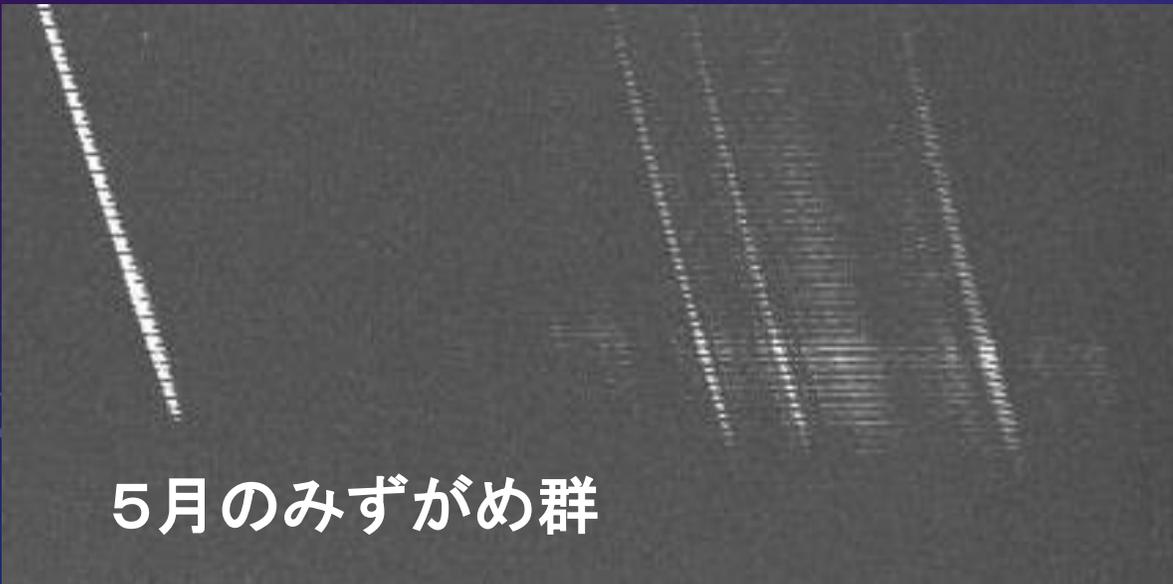
かみのけ群



散在



5月のみずがめ群



# 流星スペクトルのグラフ

やぎ群 カラー



<http://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=4355>

やぎ群 白黒



ペルセ群 カラー

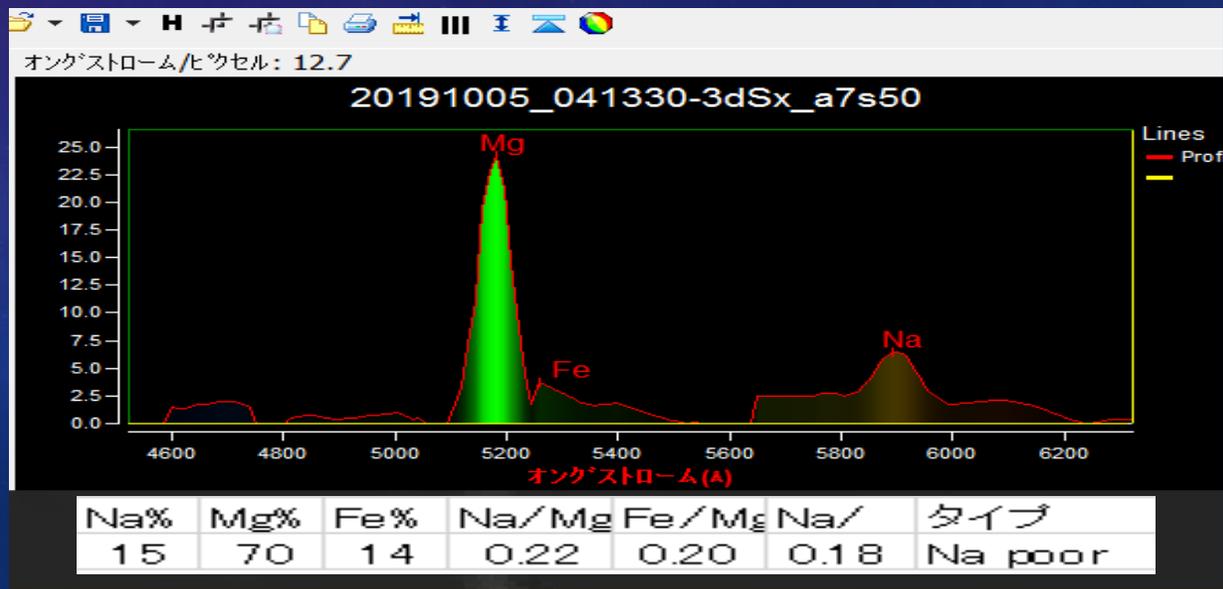
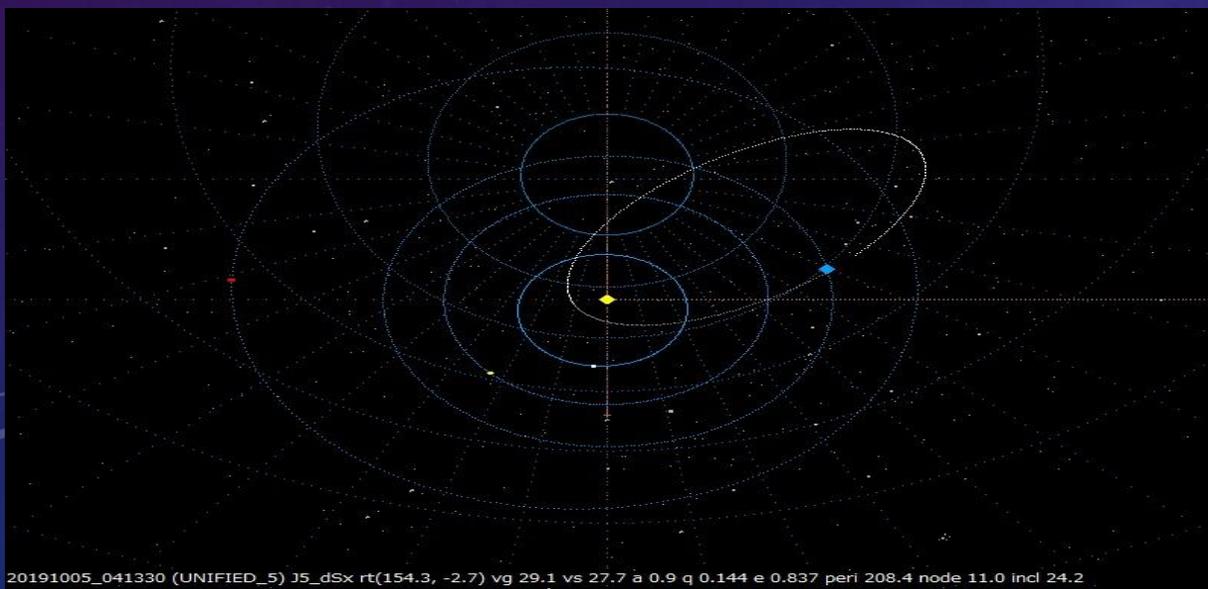
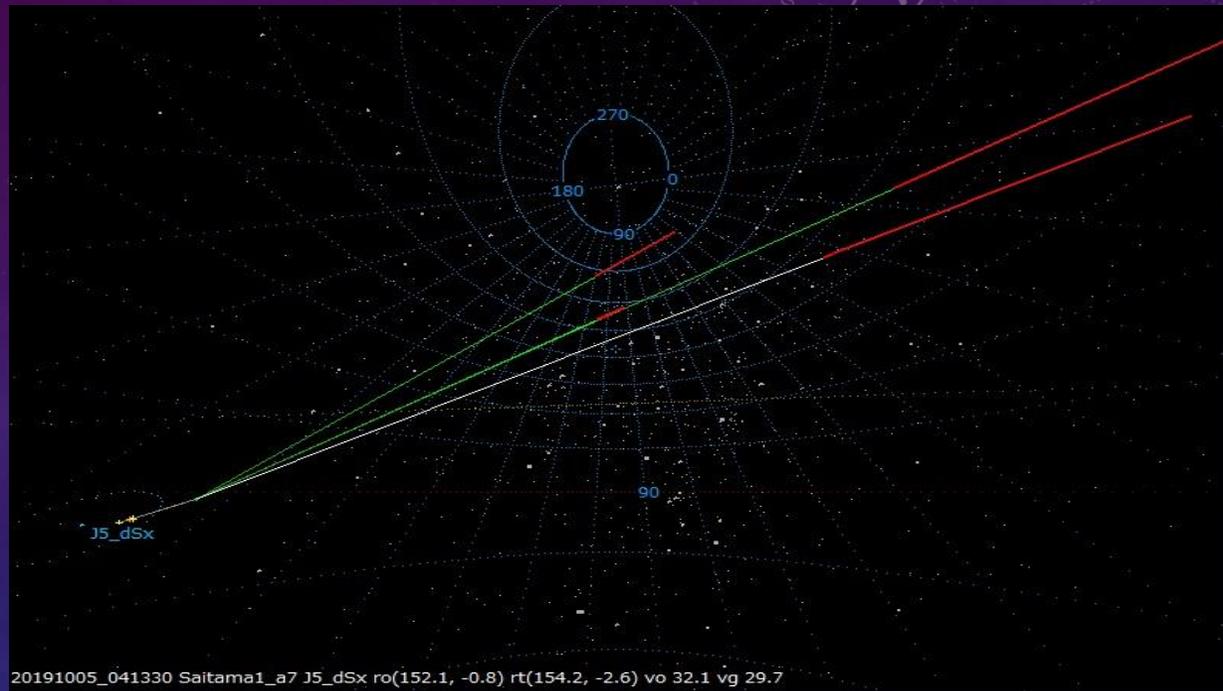


<http://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=4358>

ペルセ群 白黒



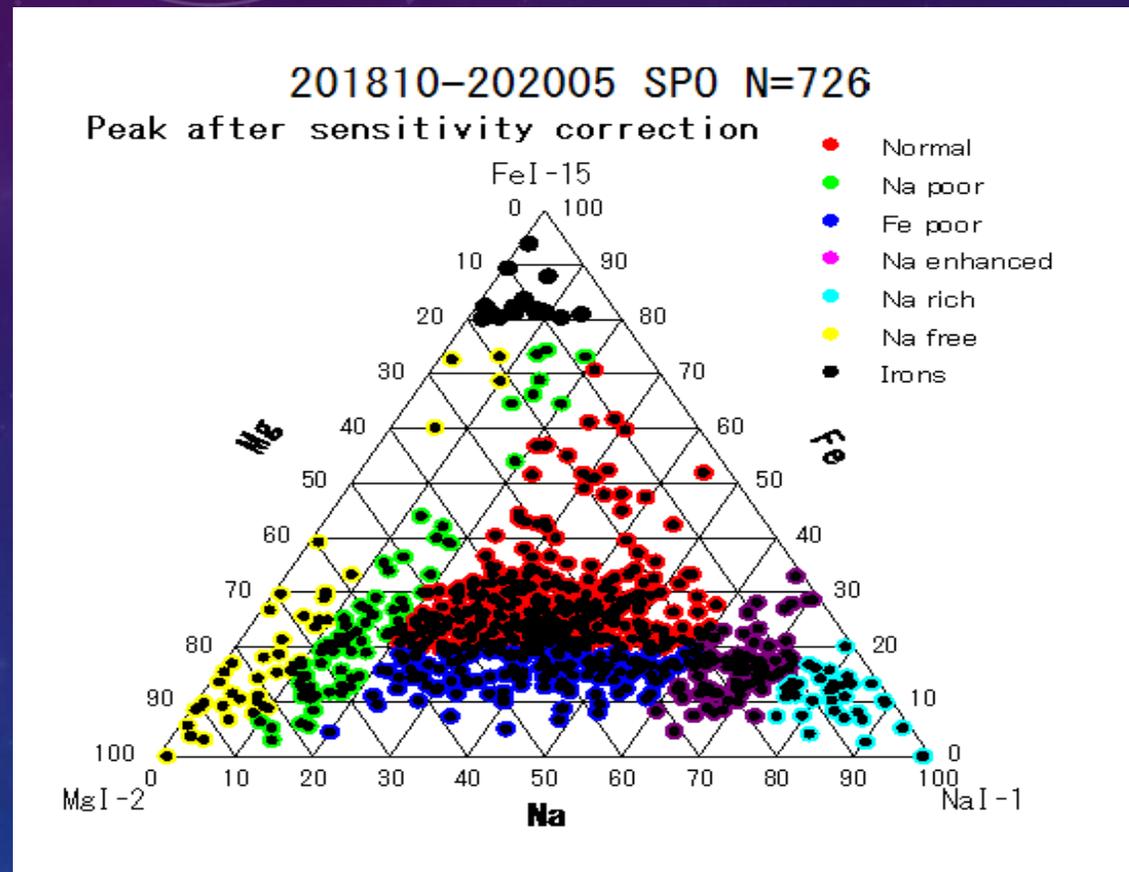
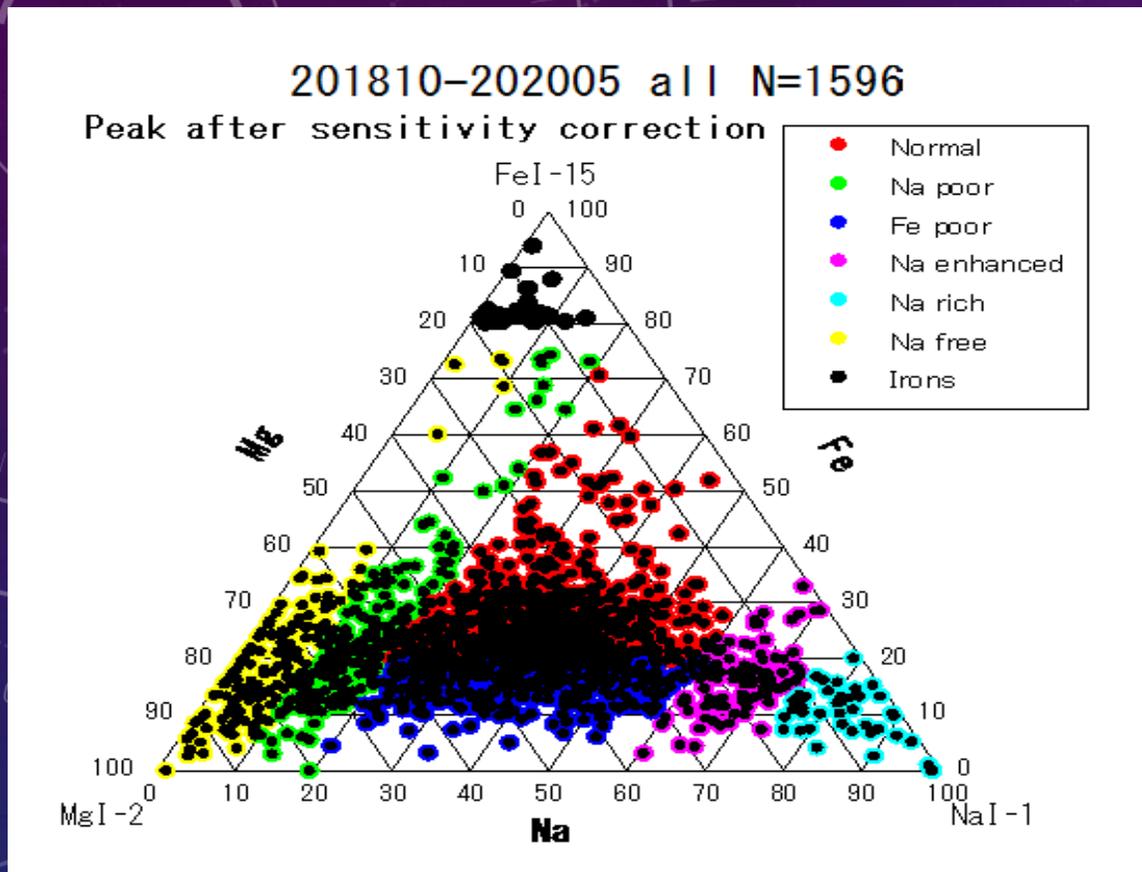
# おまけ 2019年10月5日4時13分30秒 dSx群 2005UD関連



# 流星スペクトルの観測と解析のまとめ

- 8台のカメラの観測で、ほぼ1年で1100個近くのスペクトルが得られた。今回のデータは、2018年10月から2019年8月までの745個を解析した。
- 今回は、主要群のしぶんぎ群とかみのけ群と5月の水がめ群とやぎ群と7月の水がめ群とペルセ群の三角比を求めた。やぎ群は、比較的集中が見られたが他の群は、広がりがあった。ペルセ群は、殆どノーマルタイプであった。7月の水がめ群は、しぶんぎ群と似ていて3つのタイプに分かれていた。
- Na/MgとO/Mgの比率と速度の関係は、前回よりサンプルが増えたが傾向は、あまり変わらなかった。前は、 $v_g$ までやったが今回は、論文に合わせて $v_o$ でやったが傾向は、殆ど変わらなかった。

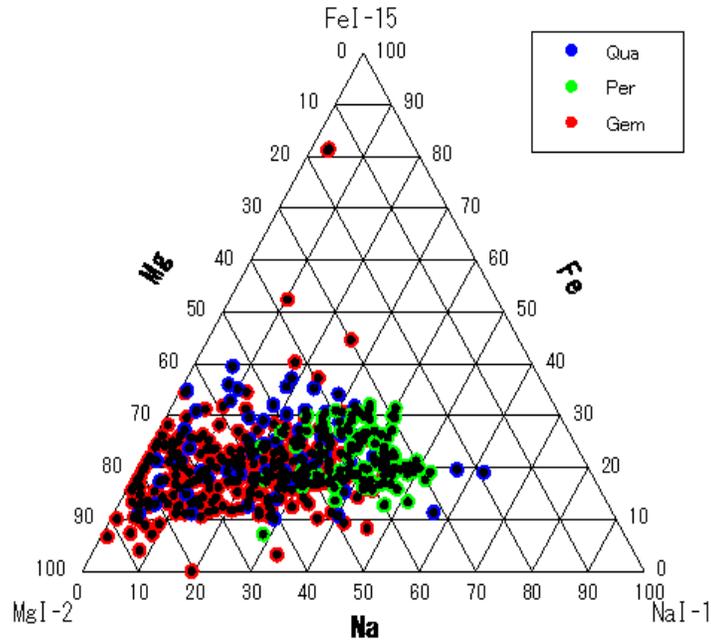
## 2018年10月から2020年8月のスペクトル解析結果と考察



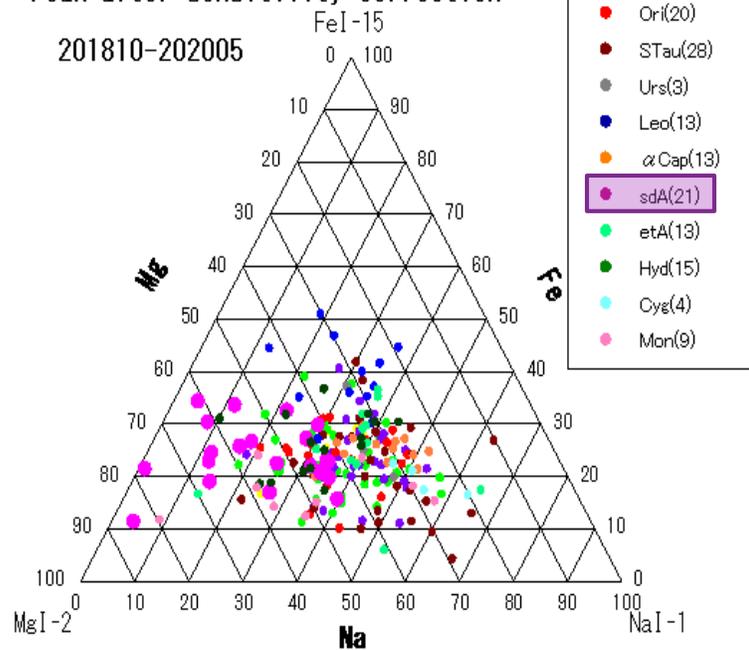
2018年10月から2020年8月までのスペクトル解析結果です。とりあえず、2020年5月までのタイプ別の三角図です。左が全部の流星です。右が散在のみで約半分です。鉄が50%を超えるものは、殆どが散在流星です。どちらも、Normalが一番多いです。

# 流星スペクトルの得られた流星群の流星の三角比

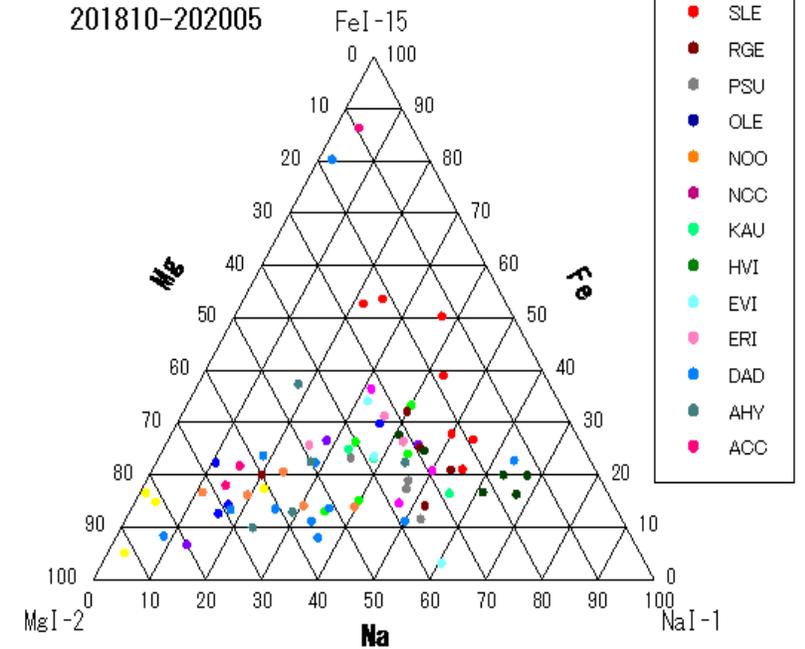
201810-202005 Qua Per Gem  
Peak after sensitivity correction



major meteor showers  
(Excluding QUA PER GEM)  
Peak after sensitivity correction



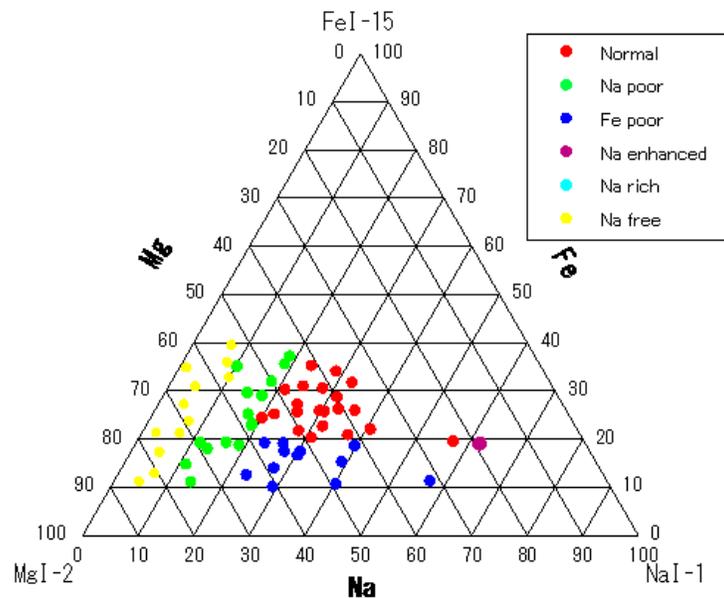
minor meteor showers (N>=3)  
Peak after sensitivity correction



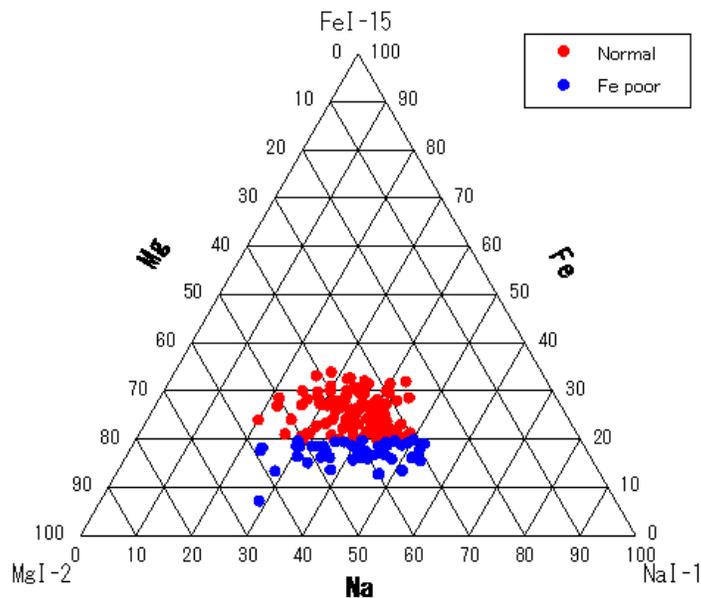
左は、しぶんぎ群とペルセ群とふたご群の3つの群です。Naが50%以下で、Feが10-30%が殆どです。3つの群の分布は、次のスライドにあります。真ん中は、3つの群を除いた主要流星群です。Naが20-60%でFeがFeが10-40%に集中しています。sdA群は、Naが40%以下で、Feが10-40%に集中していて4つのタイプが混在しています。右は、3つ以上の小流星群です。群によってタイプの違いが見られます。鉄流星は、2つの群(ACC群とdaD群)で見られます。

# 流星スペクトルの得られたQuaとPerとGem群のタイプ別の三角比

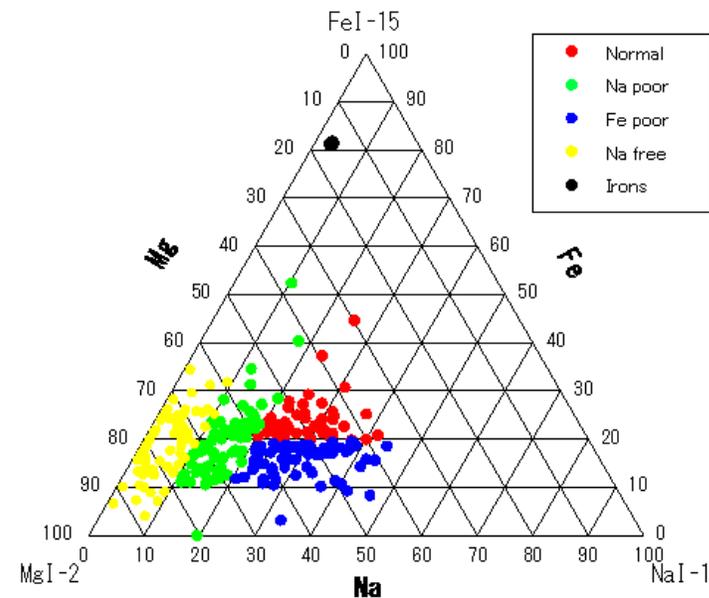
201810-202005 Qua N=61  
Peak after sensitivity correction



201810-202005 Per N=151  
Peak after sensitivity correction



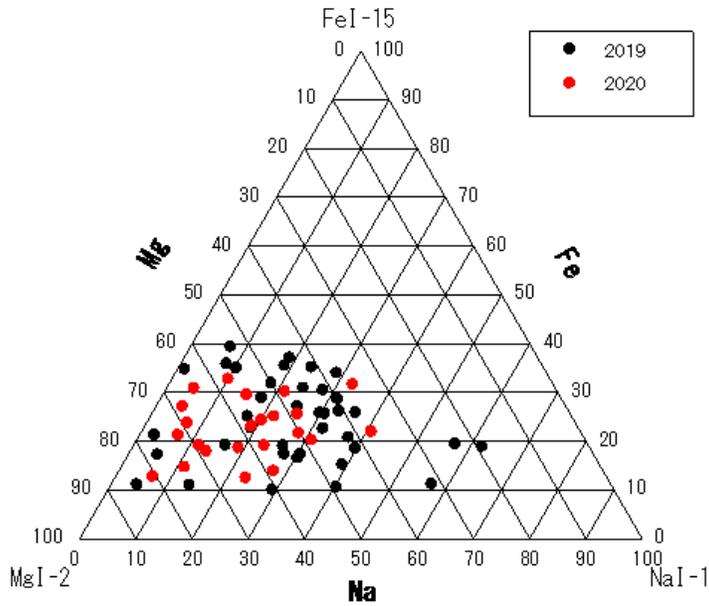
201810-202005 Gem N=248  
Peak after sensitivity correction



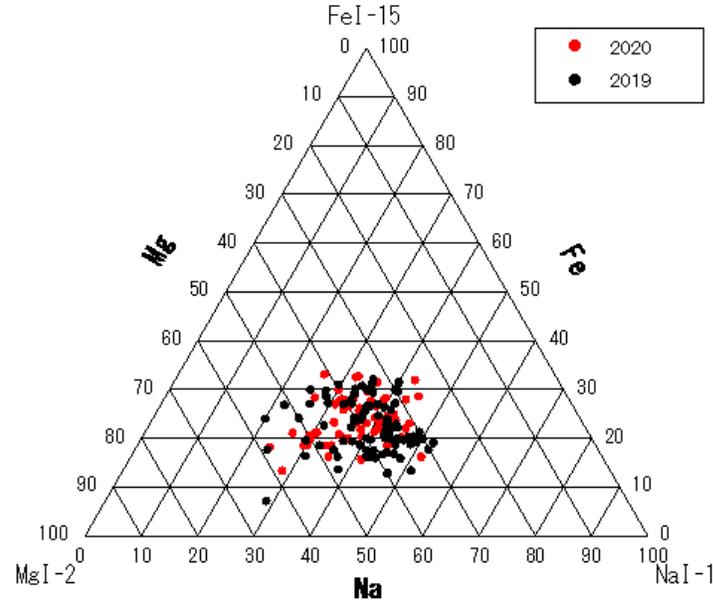
左のしぶんぎ群は、4つのタイプが混在しています。Normalがやや多く他は、大体同じです。ペルセウス群は、2つのタイプでNormalが多く3分の2を占めています。ふたご群は、4つのタイプに分かれNormalが一番少ないが他とそれほどの違いはないです。Na freeとNa poorは、同じぐらいです。鉄流星は、1個だけです。年によって比率は違います。

# 流星スペクトルの得られたQuaとPerとGem群の年別の三角比

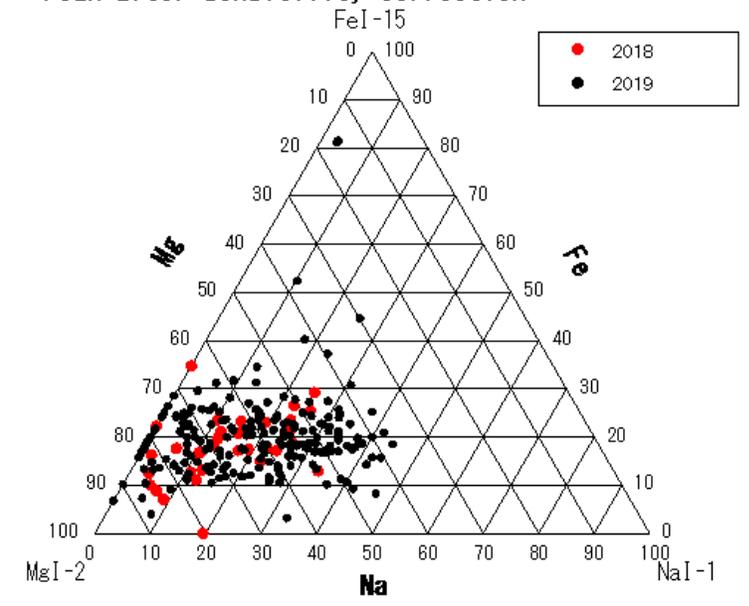
201812-202001 Qua N=61  
Peak after sensitivity correction



201907-202008 Per N=151  
Peak after sensitivity correction

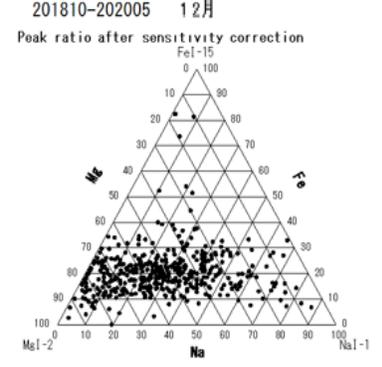
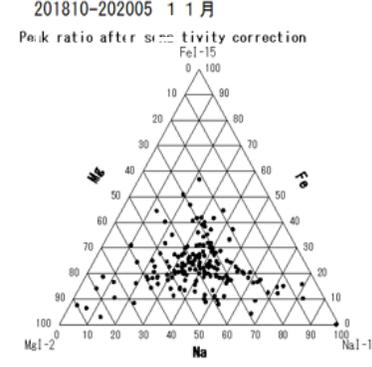
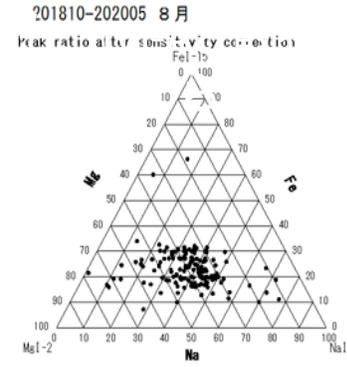
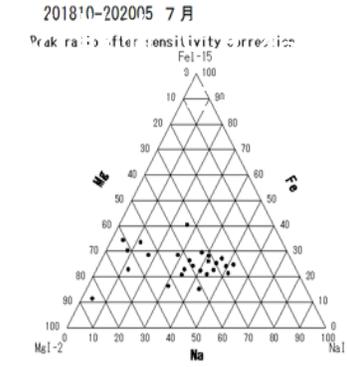
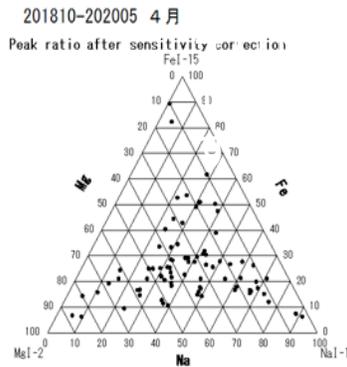
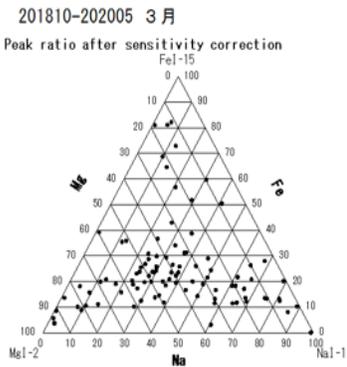
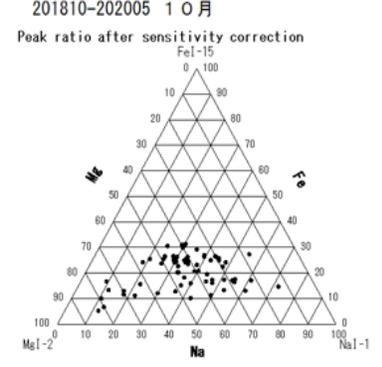
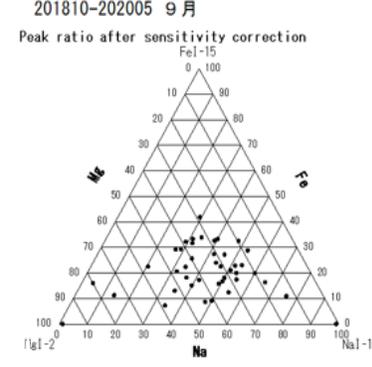
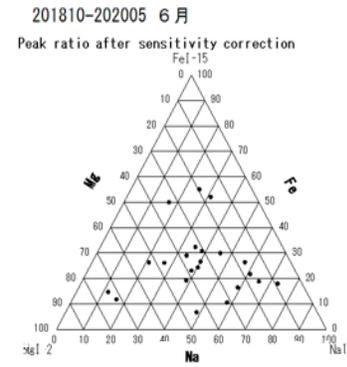
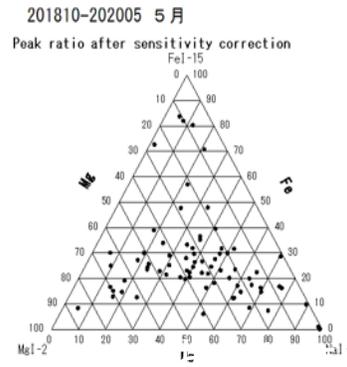
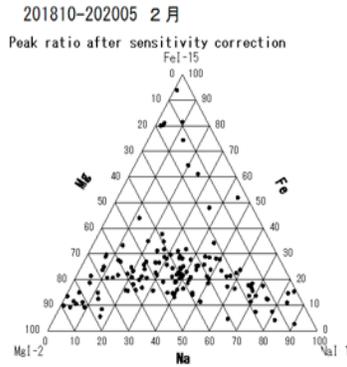
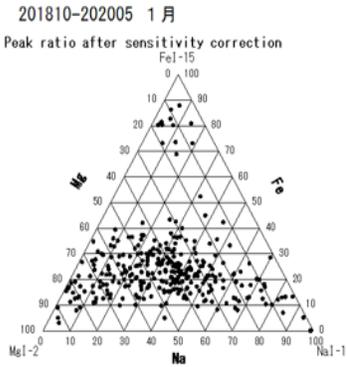


201910-202005 Gem N=248  
Peak after sensitivity correction



3つの群とも、年によって違いが見られます。3つの群とも2019年の方がばらつきが見られます。ペルセ群は、明るい流星が多くスペクトルがよく出ているためかよく集中しています。しぶんぎ群とふたご群は、4つのタイプが混在しているのでばらつきがみられます。ふたご群だけは、2018年のカメラ1台でスペクトルの数が少なくなっています。

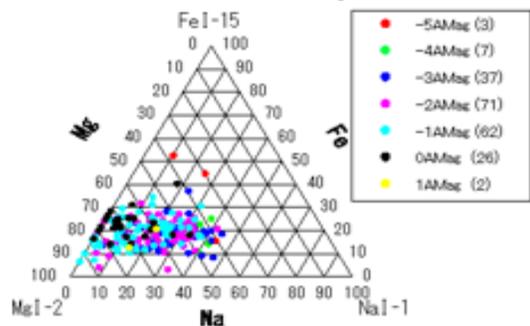
# 流星スペクトルの得られた流星の月別の三角比



各月によってばらつきがみられます。群の活動でだいぶ変わっています。Na70-Mg15-Fe15あたりの密集は、2月と4月と5月と11月と12月に集中が見られます。2月は、散在のみです。4月は、HVI-Aと散在です。5月も、HVI-Aと散在です。11月も12月も、散在です。Ironsは、12月から5月まで見られます。

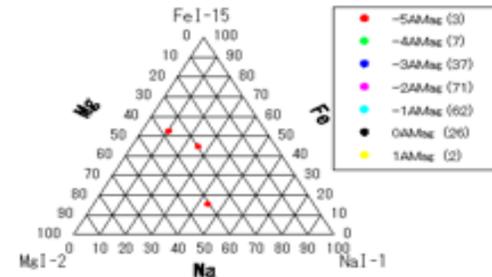
# 2019年のふたご群の絶対等級別三角図とAmag-Na/Mg図

Peak ratio after sensitivity correction



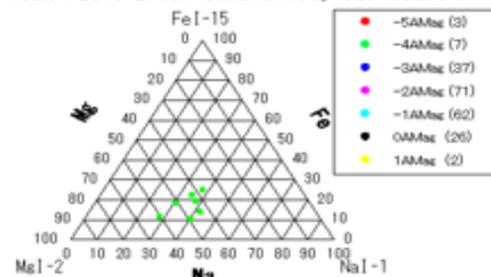
201912 Geminids (N=208)

Peak ratio after sensitivity correction

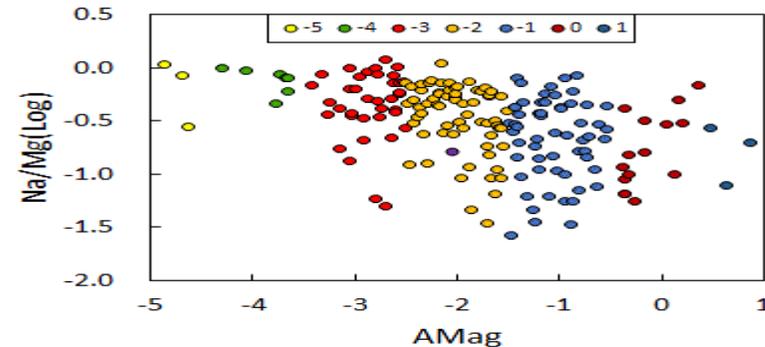


201912 Geminids (N=208)

Peak ratio after sensitivity correction

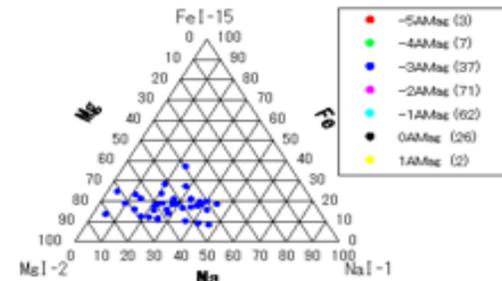


AMag-Na/Mg(Log)  
2019Geminids(N=190)



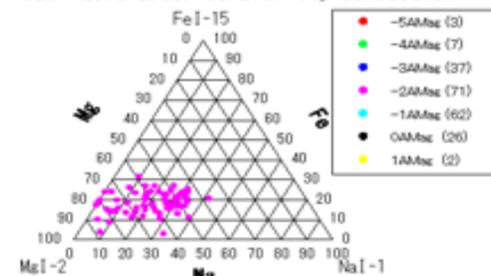
201912 Geminids (N=208)

Peak ratio after sensitivity correction



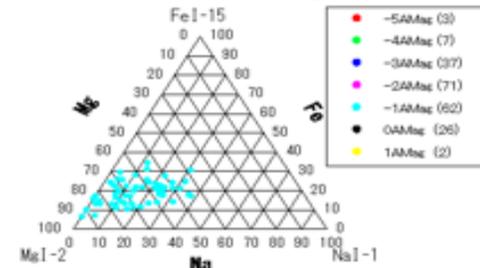
201912 Geminids (N=208)

Peak ratio after sensitivity correction



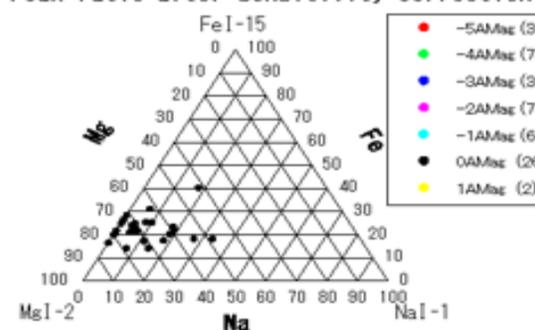
201912 Geminids (N=208)

Peak ratio after sensitivity correction



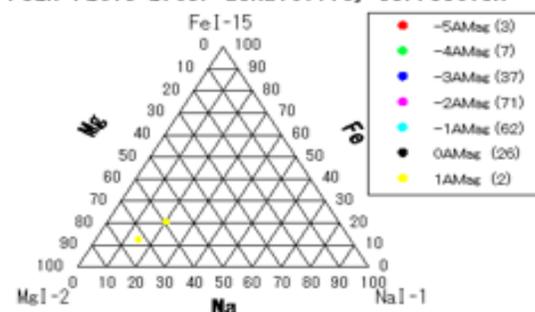
201912 Geminids (N=208)

Peak ratio after sensitivity correction

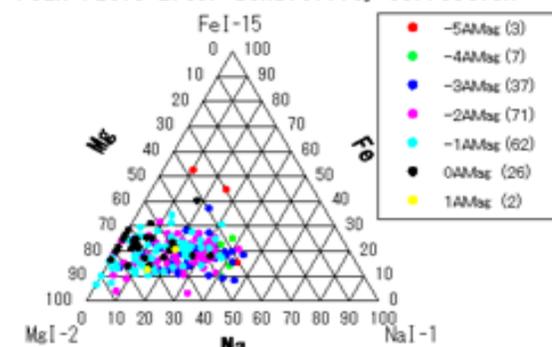


201912 Geminids (N=208)

Peak ratio after sensitivity correction

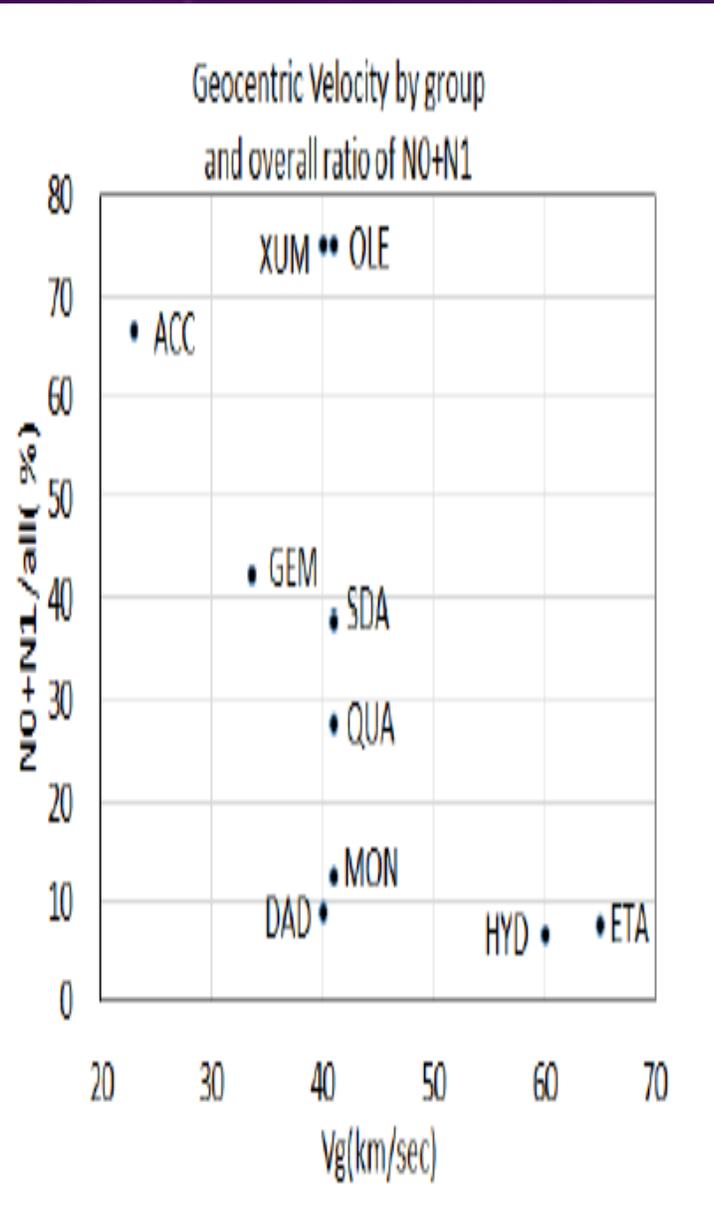
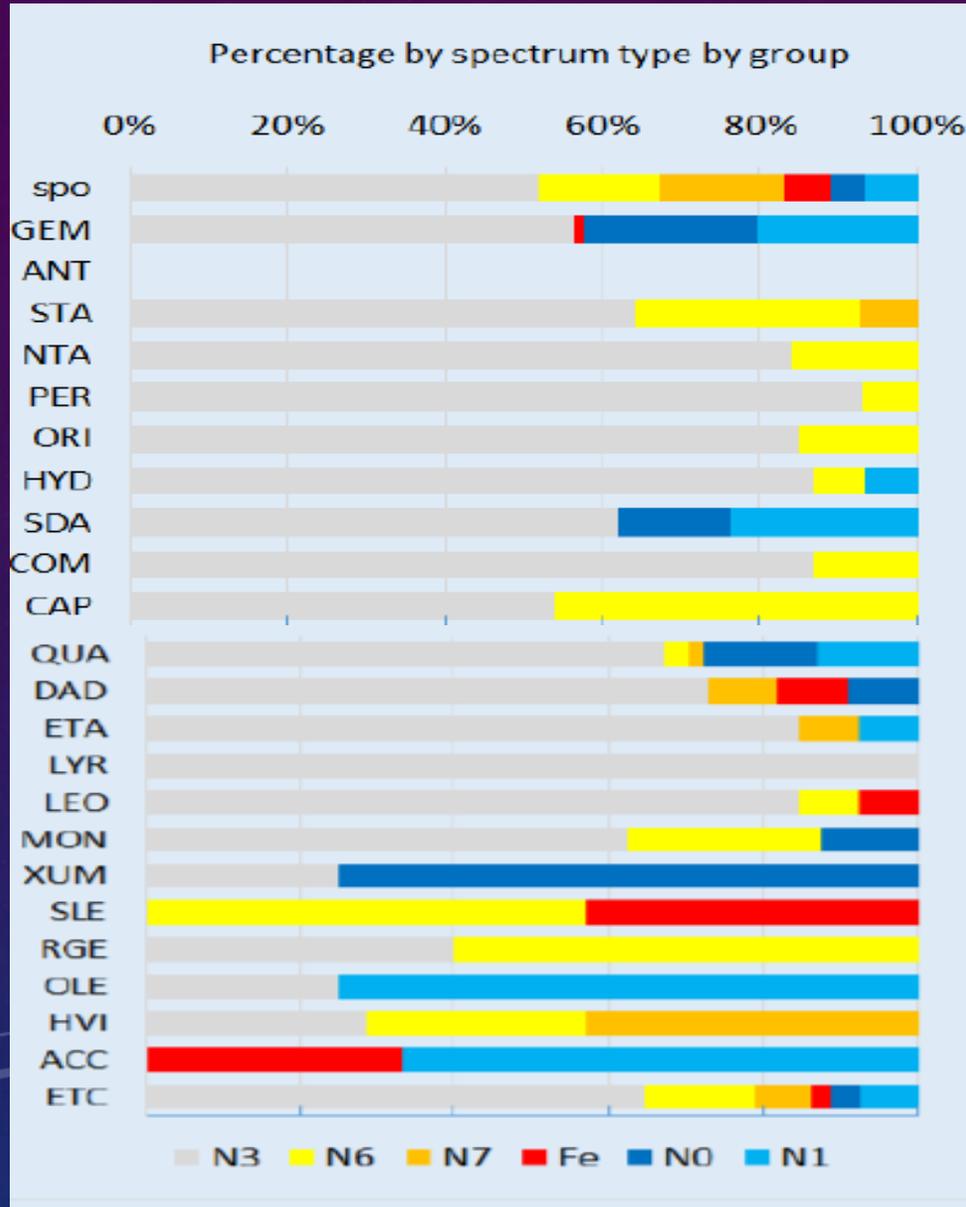


Peak ratio after sensitivity correction



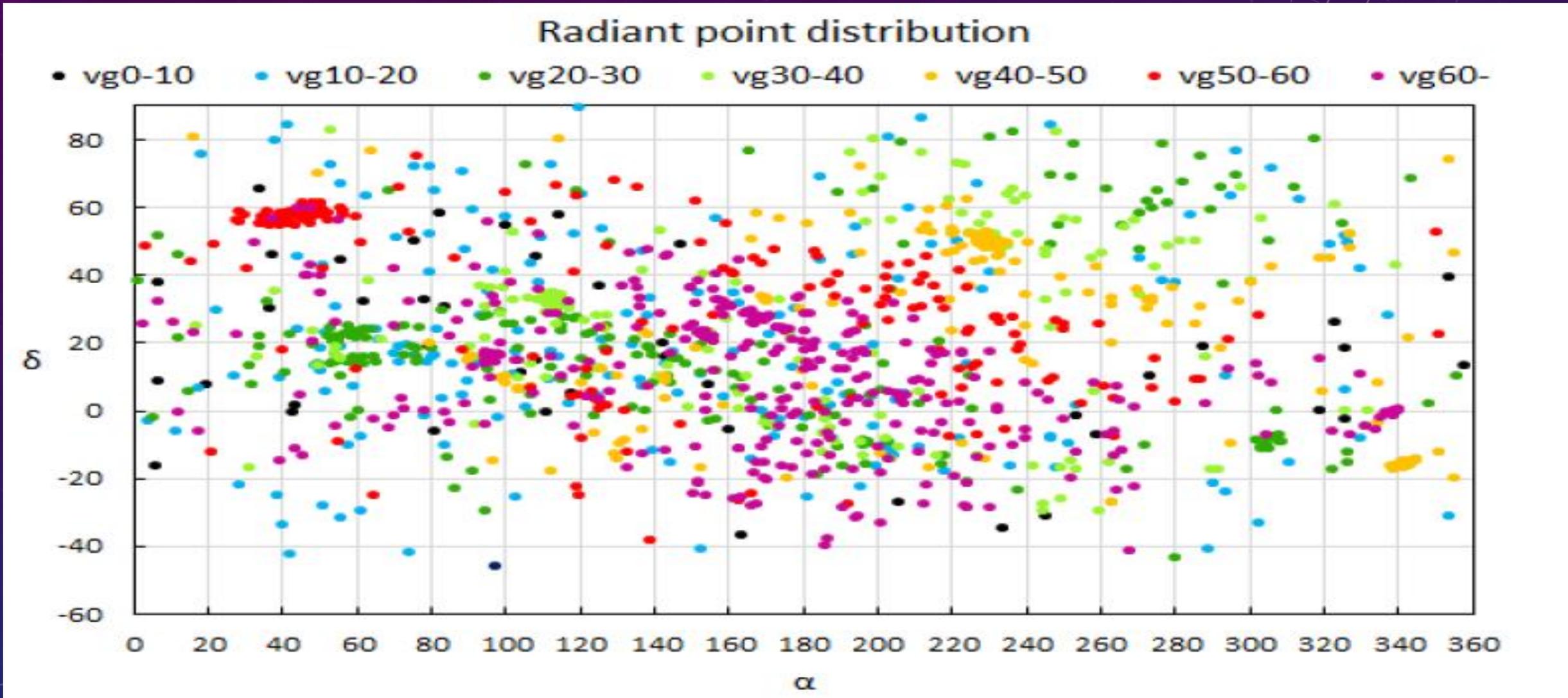
2019年のふたご群の絶対等級別の三角図とAmag-Na/Mg図です。この2つの図から明るい流星ほどNormalが多いことがわかります。暗くなるにつれてNa poorやNa freeが多くなっています。このことからNaの枯渇がみられることがわかります。

# 流星スペクトルの得られた各群のタイプ別の割合の比較



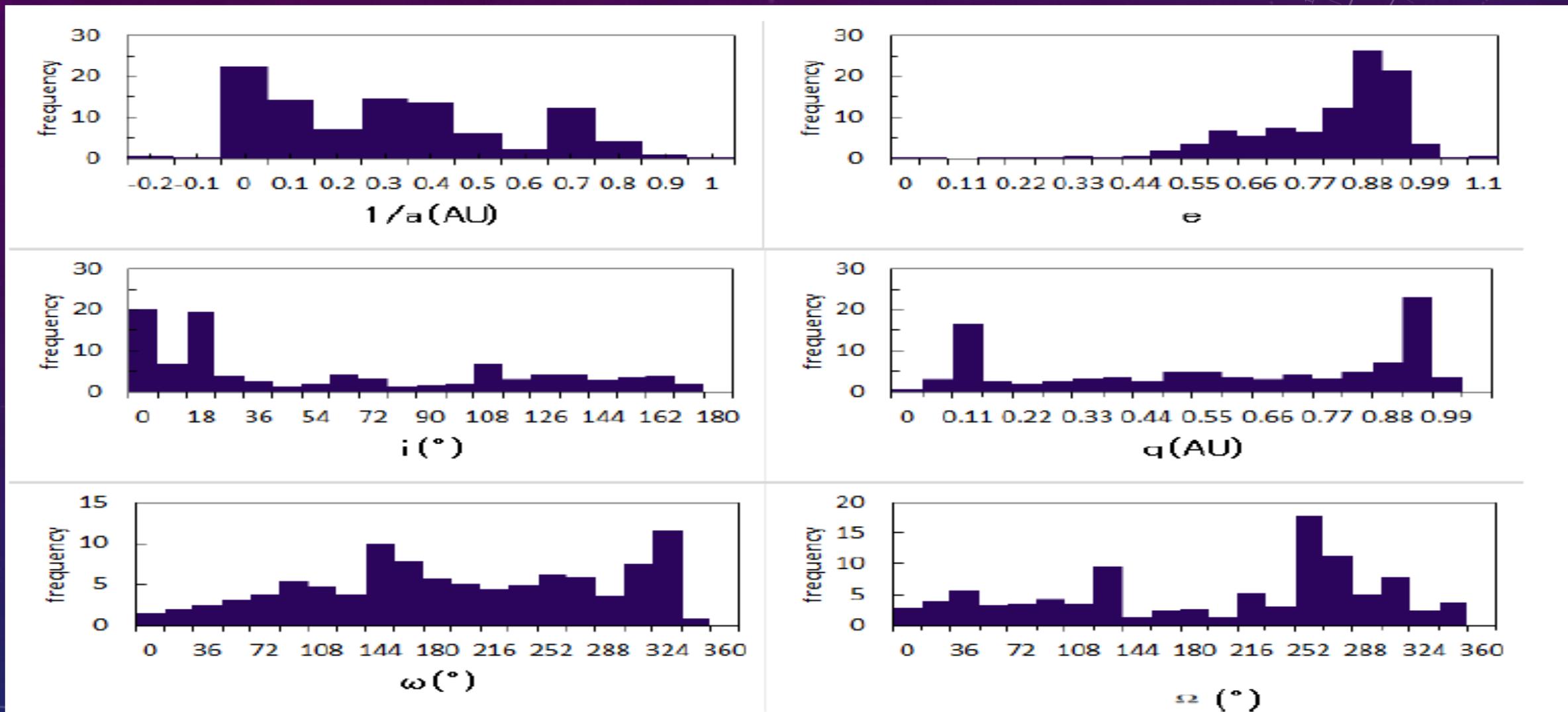
散在流星の半数は、Normalタイプで、他のタイプは全て判定されています。GemとSDAとQUAとDADは、4つのタイプに分類されていてNaの枯渇が見られます。他の主要群は、Normalが多く、N6やN0少し見られます。小流星群は、群によってタイプの割合にばらつきが見られます。XUMとSLEとRGEとOLEとHVIとACCが特徴的な割合を示しています。これらは、速度や軌道による違いも見られます。

# 流星スペクトルの得られた流星の速度別の輻射点分布



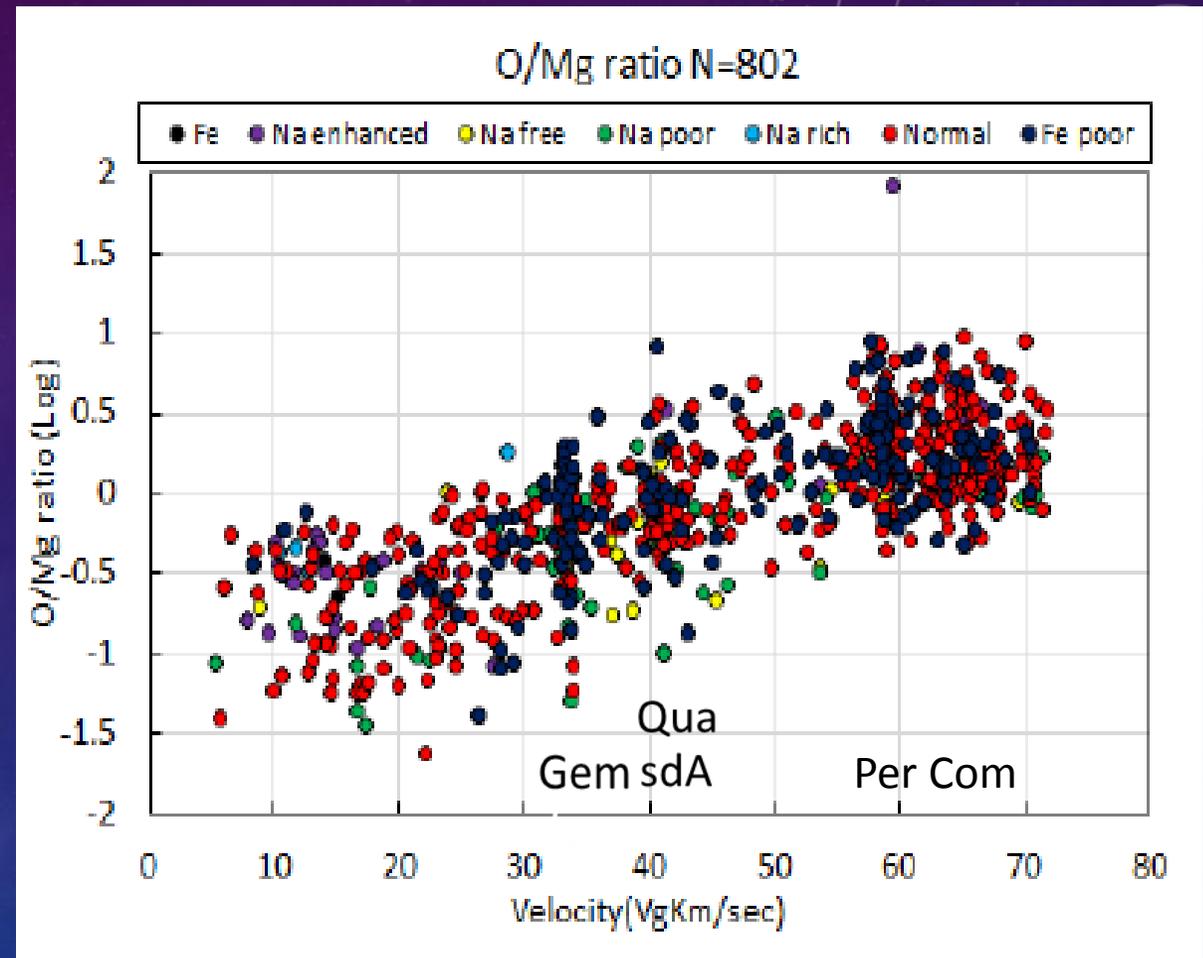
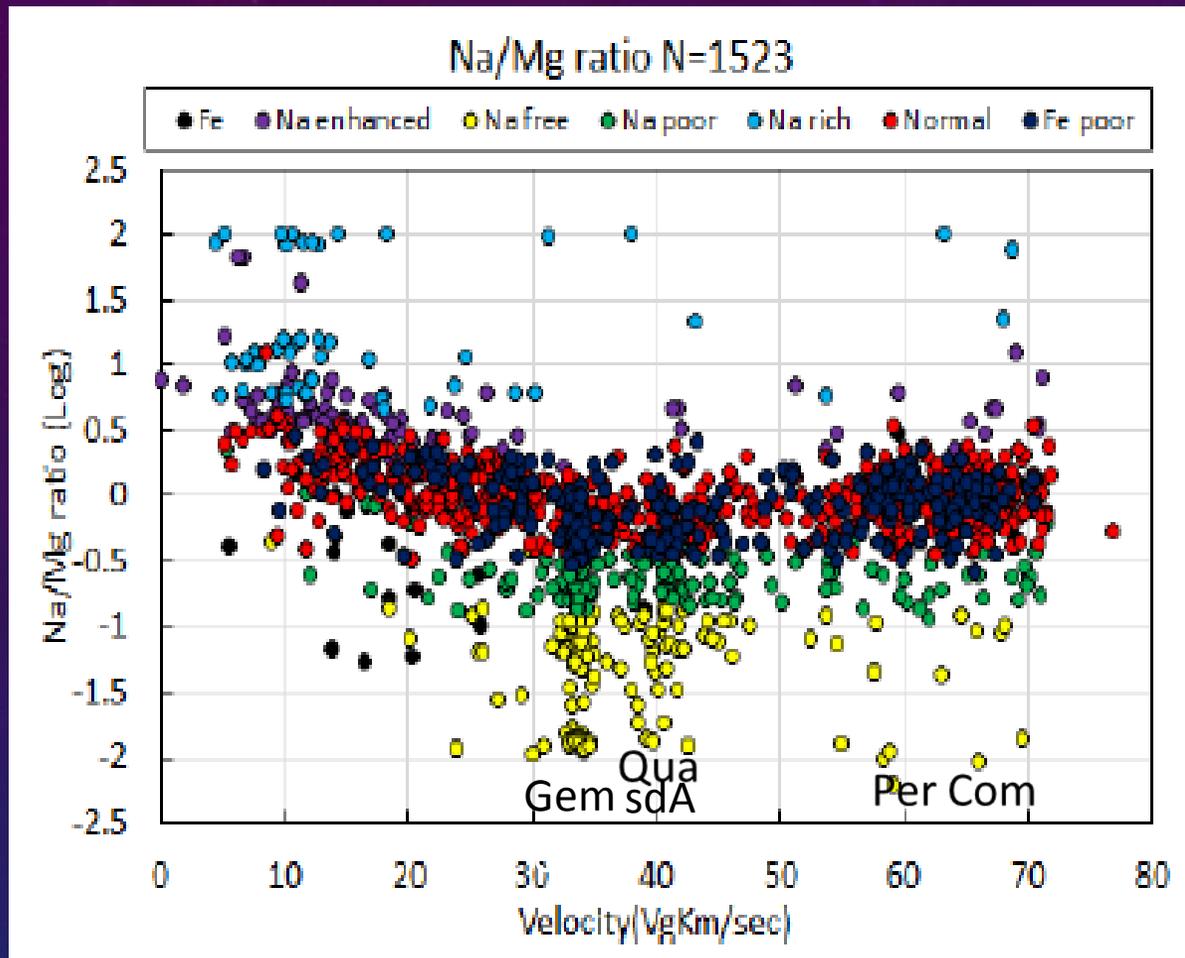
ほとんどの領域でスペクトルが得られています。主要流星群では、集中や広がりが見られます。小流星群の集中も見られます。

# 流星スペクトルの得られた流星の軌道要素の広がりグラフ



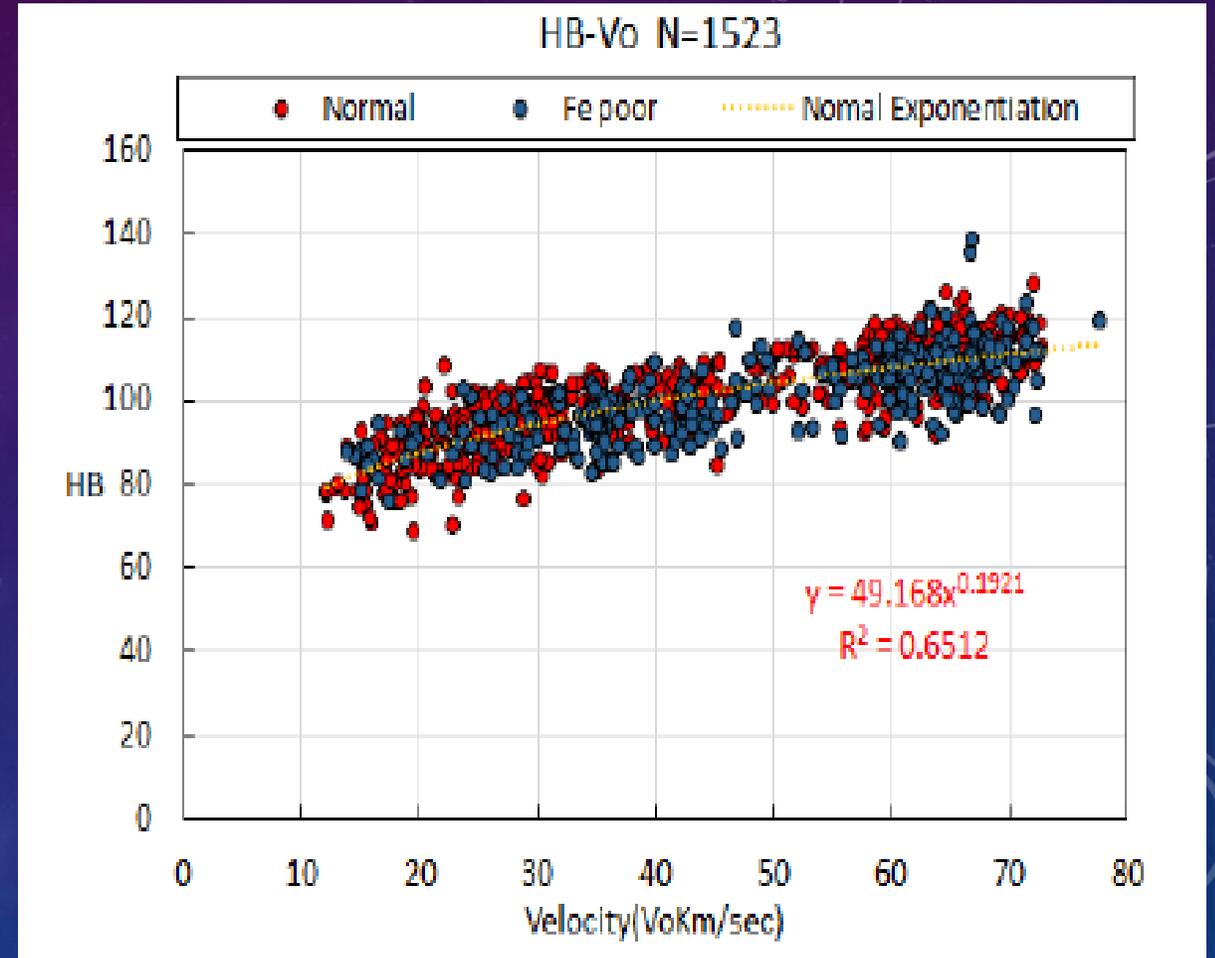
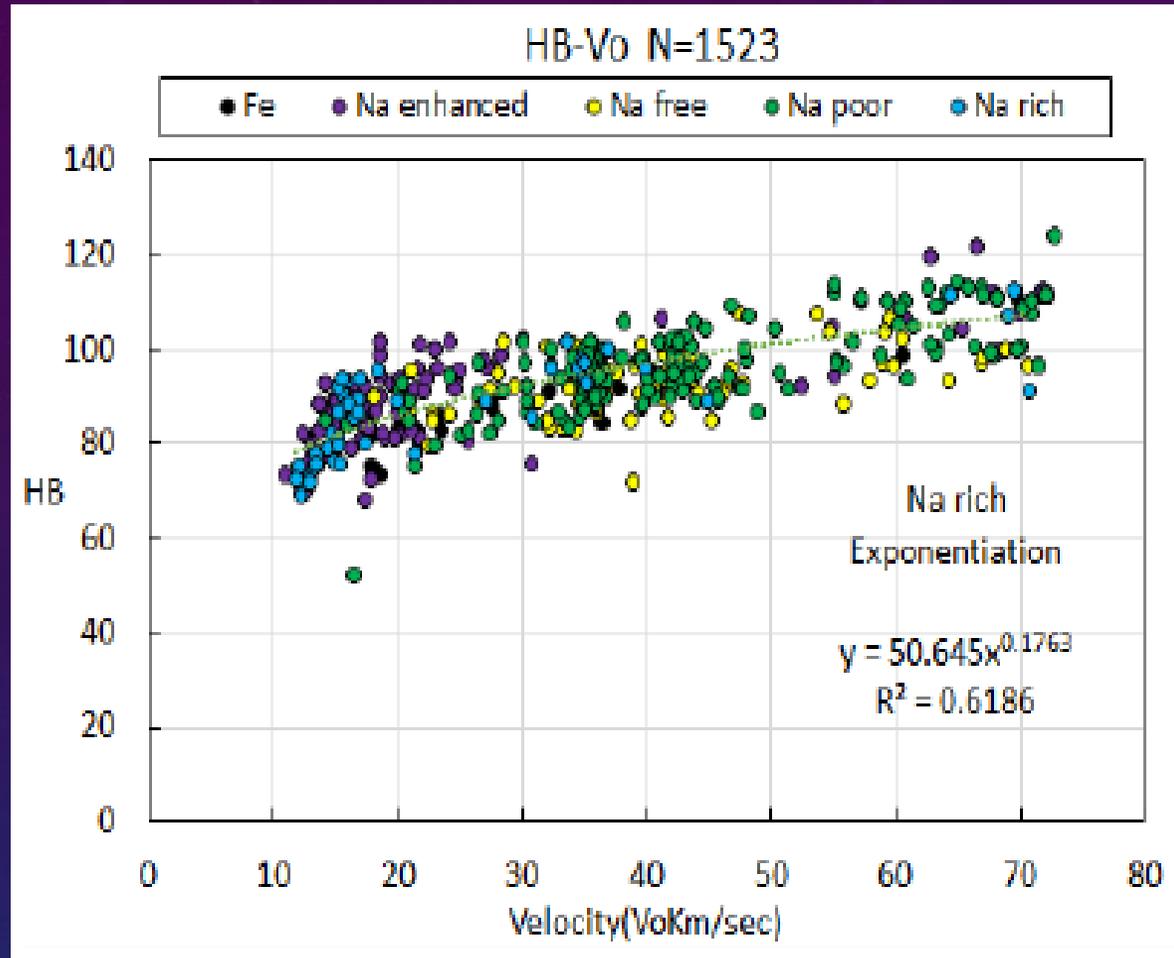
ほとんどの領域でスペクトルが得られています。主要流星群では、集中が見られます。。

# 流星スペクトルの得られた流星のNa/Mg-VgとO/Mg-Vgのグラフ



左がNa/MaとVgのグラフです。30km/sec以下では、2005年の論文と似た傾きになっています。GemとQuaとsdAとPerとComの塊がよく分かります。右は、O/MgとVgのグラフです。全体的に速度と関係していて右上がりの傾きが見られます。

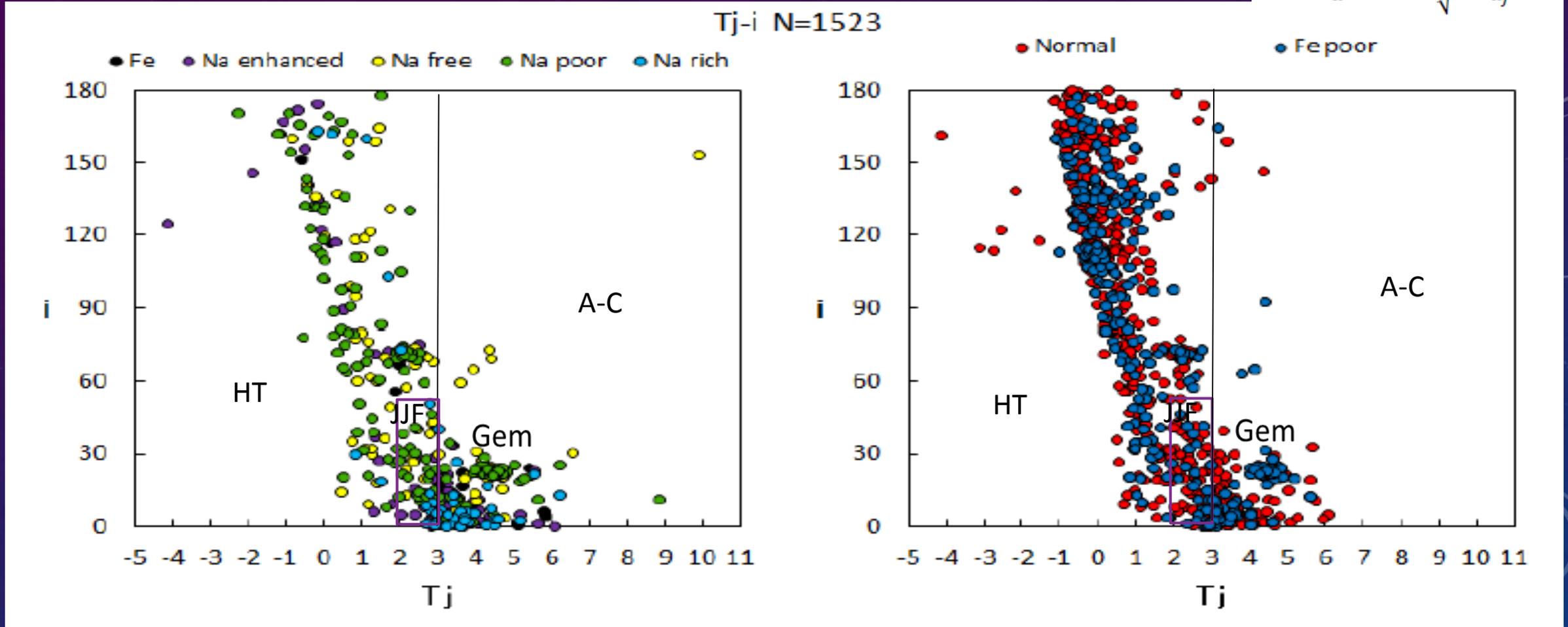
# 流星スペクトルの得られた流星の発光高度と速度の関係図



左がFeからNa richまでのグラフです。タイプによって分布のばらつきが見られます。右は、NormalとFe poorのグラフです。似た傾向があります。全体的に速度と関係していて右上がりの傾きが見られます。それぞれの関数の式で表しています。

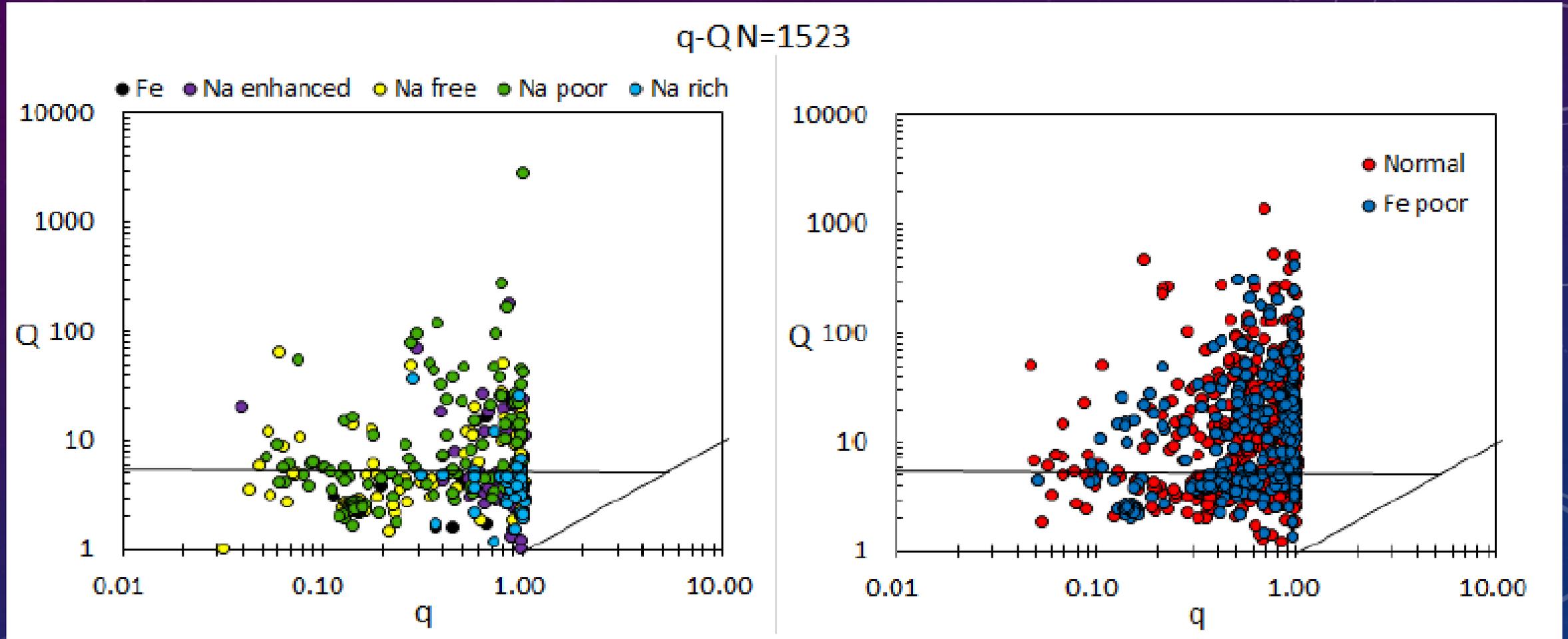
# 流星スペクトルの得られた流星のTj-iの関係図

$$T_j = \frac{a_j}{a} + 2 \cos i \sqrt{\frac{a(1-e^2)}{a_j}}$$



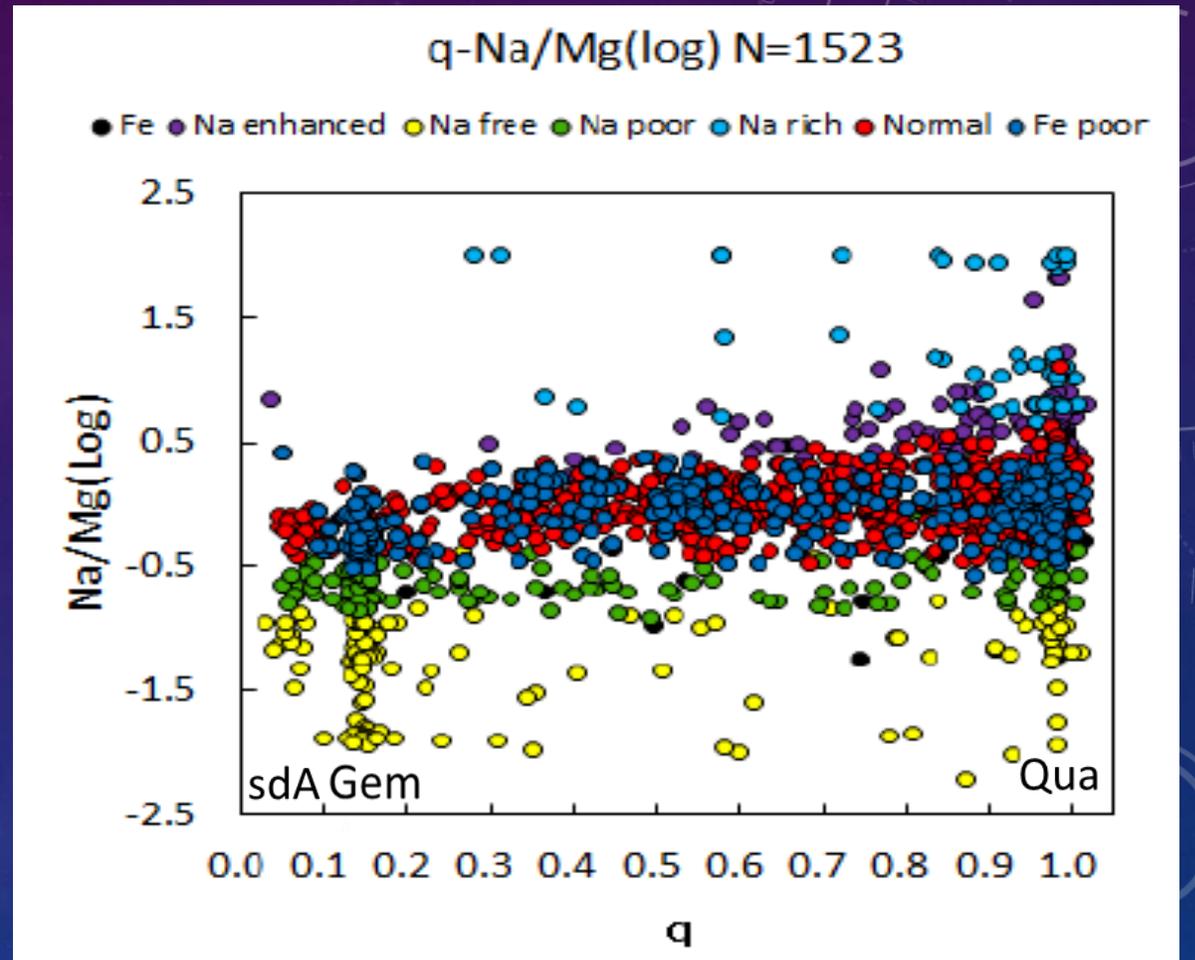
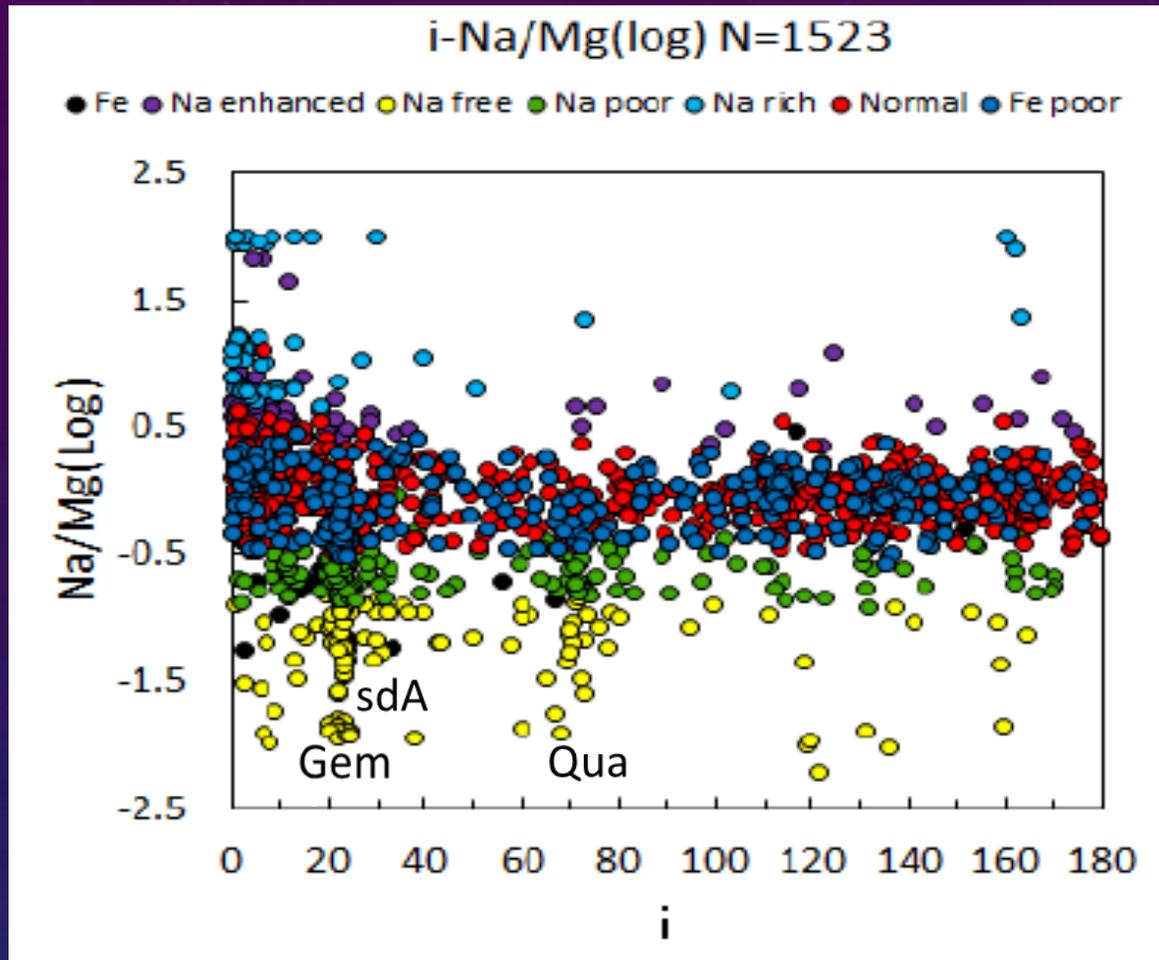
左がFeからNa richまでのグラフです。タイプによって分布のばらつきが見られます。右は、NormalとFe poorのグラフです。似た傾向があります。全体的に3つのタイプ(ハレータイプ HT 木星族 JF 小惑星とコンドライト A-C)に分かれます。

# 流星スペクトルの得られた流星のq-Qの関係図



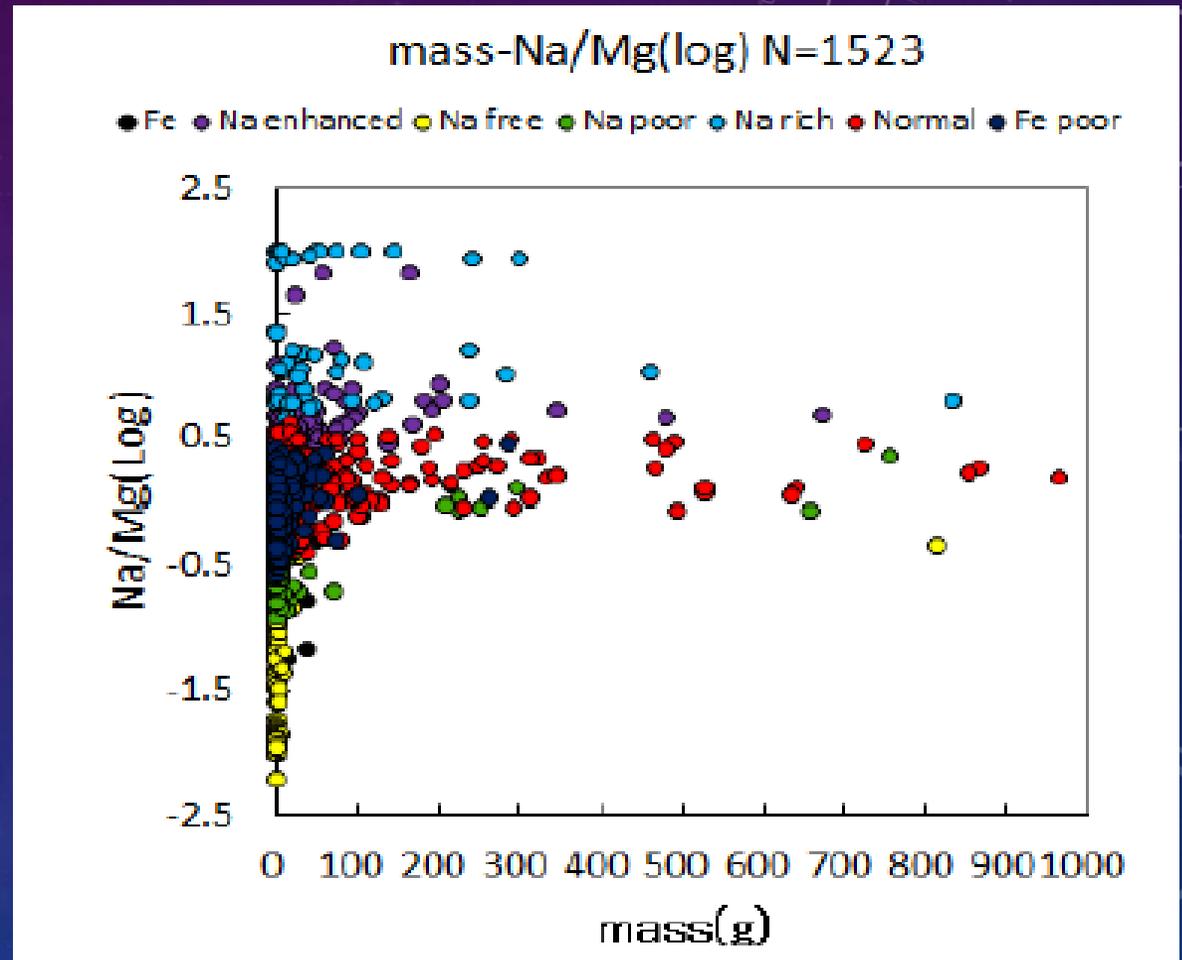
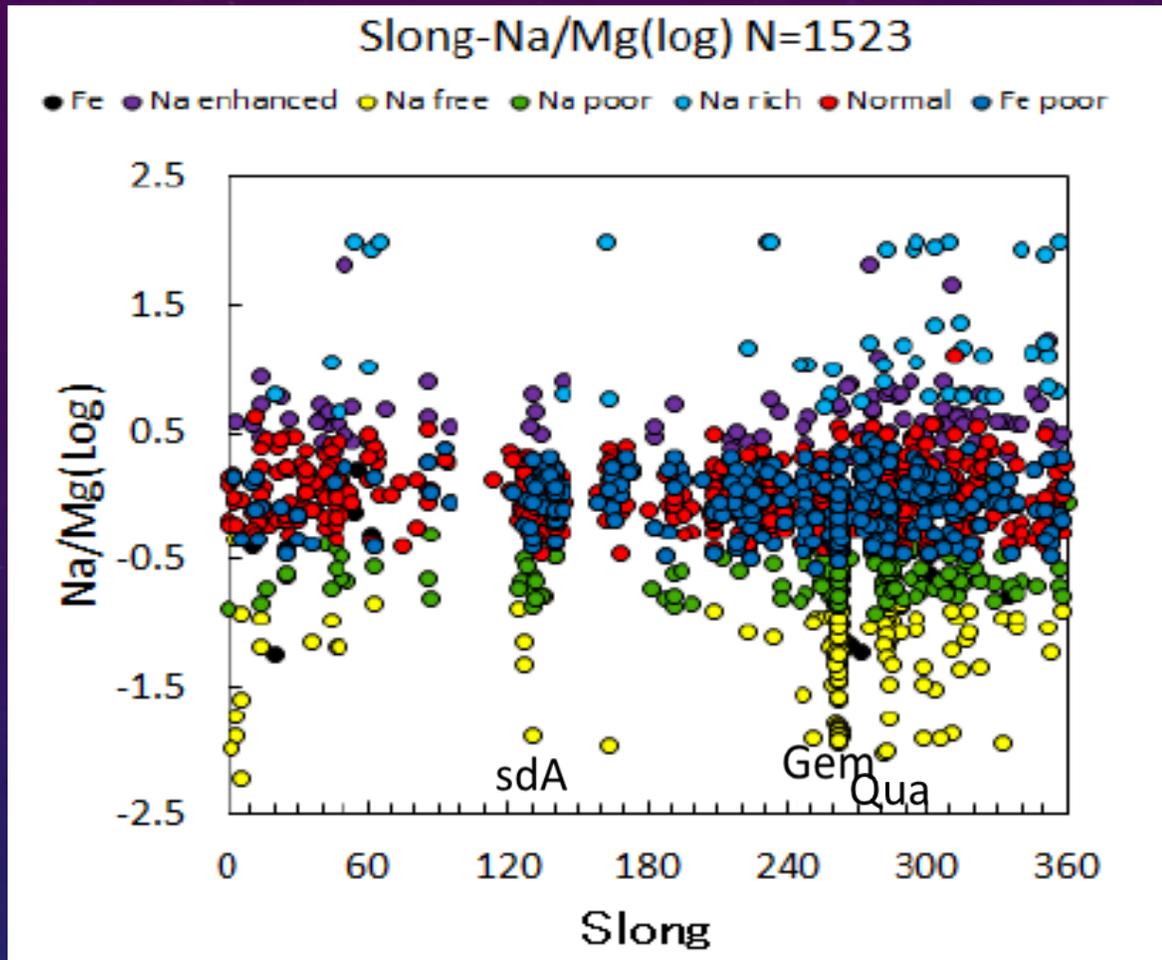
左がFeからNa richまでのグラフです。タイプによって分布のばらつきが見られます。右は、NormalとFe poorのグラフです。似た傾向があります。

# 流星スペクトルの得られた流星のi-Na/Mgとq-Na/Mgの関係図



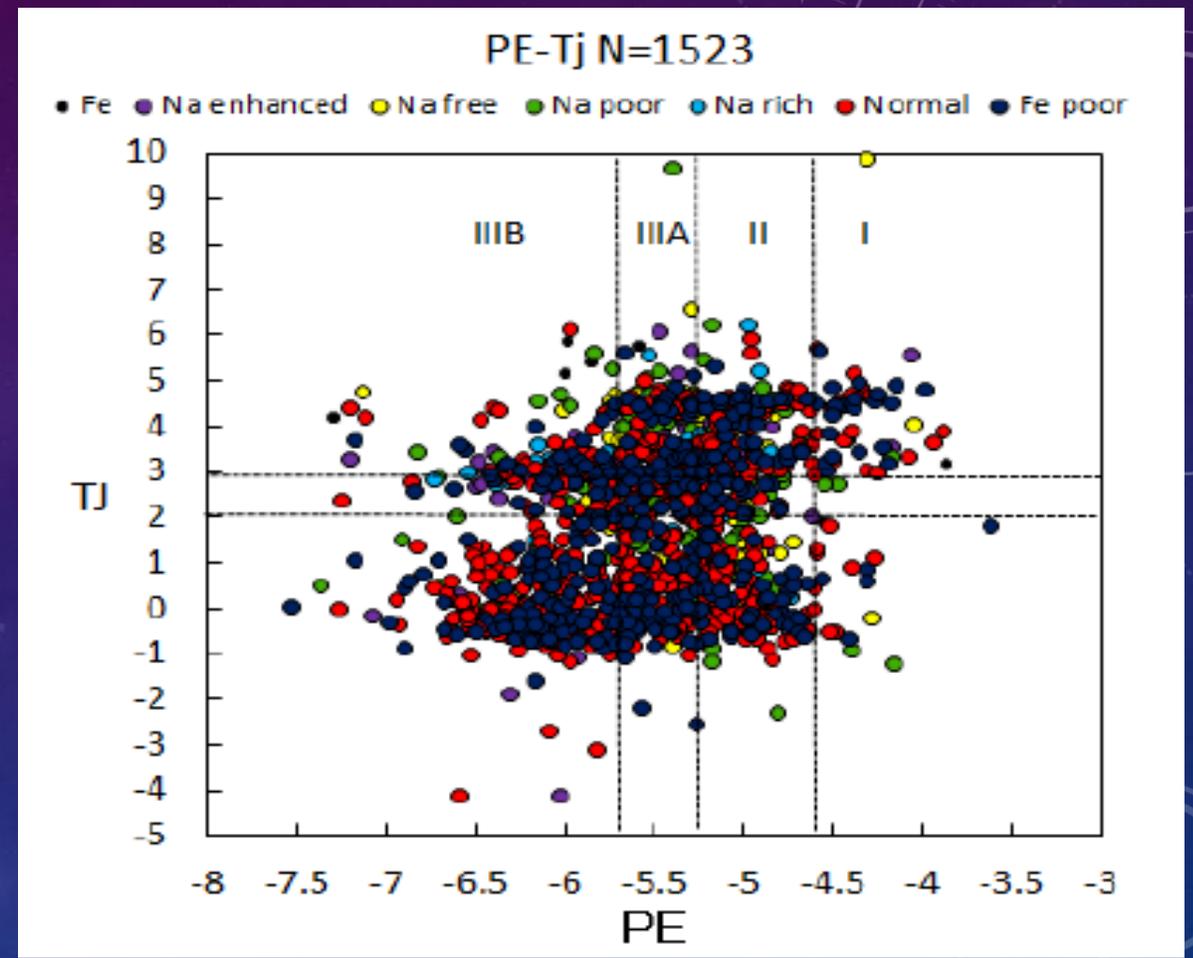
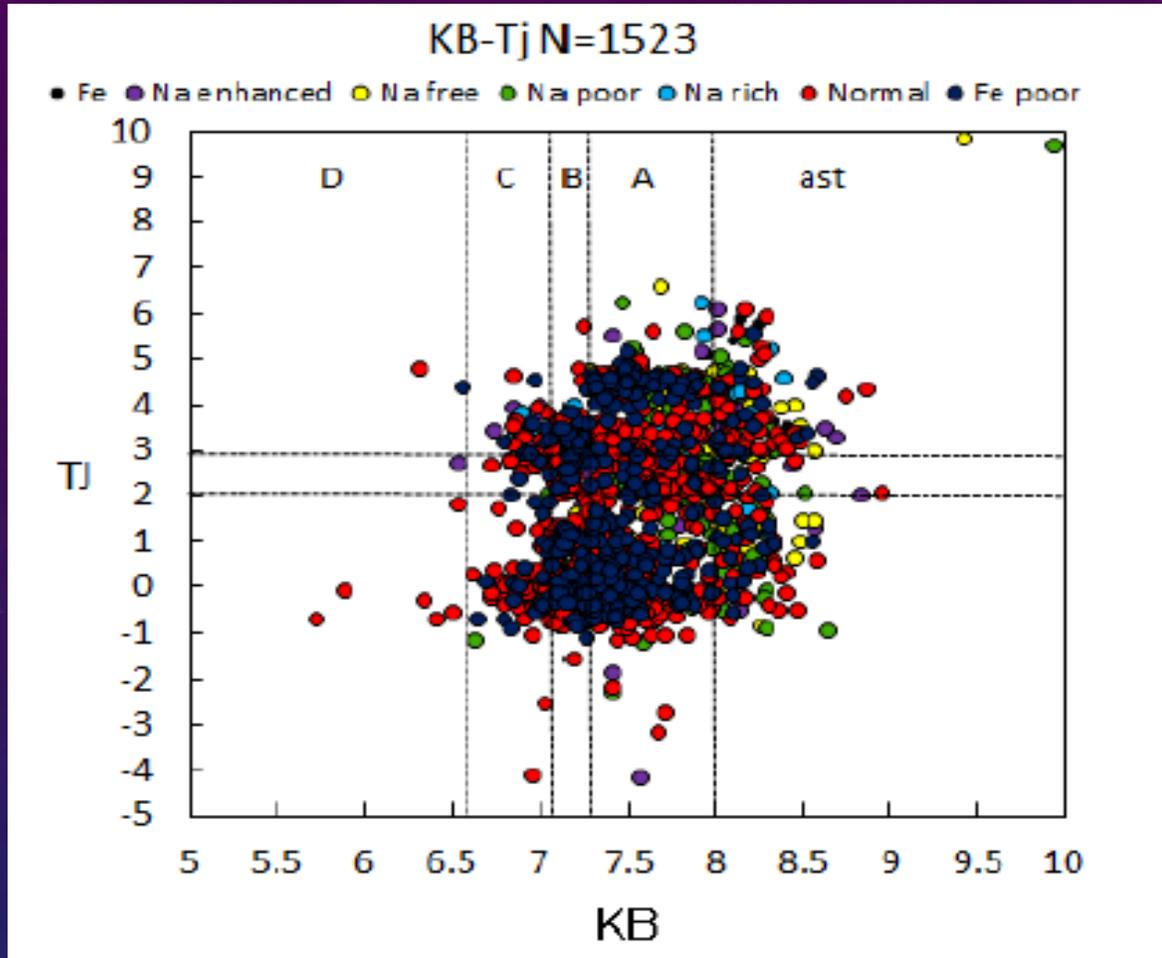
左がi-Na/Mgのグラフです。FeとNa poorとNa freeは、ほぼ一定ですが、他のものは、 $i < 60$ では、左上がりの傾きが見られます。右は、q-Na/Mgのグラフです。FeとNa poorとNa freeは、ほぼ一定ですが、他のものは、右上がりの傾きが見られます。

# 流星スペクトルの得られた流星のSlong-Na/Mgとmass-Na/Mgの関係図



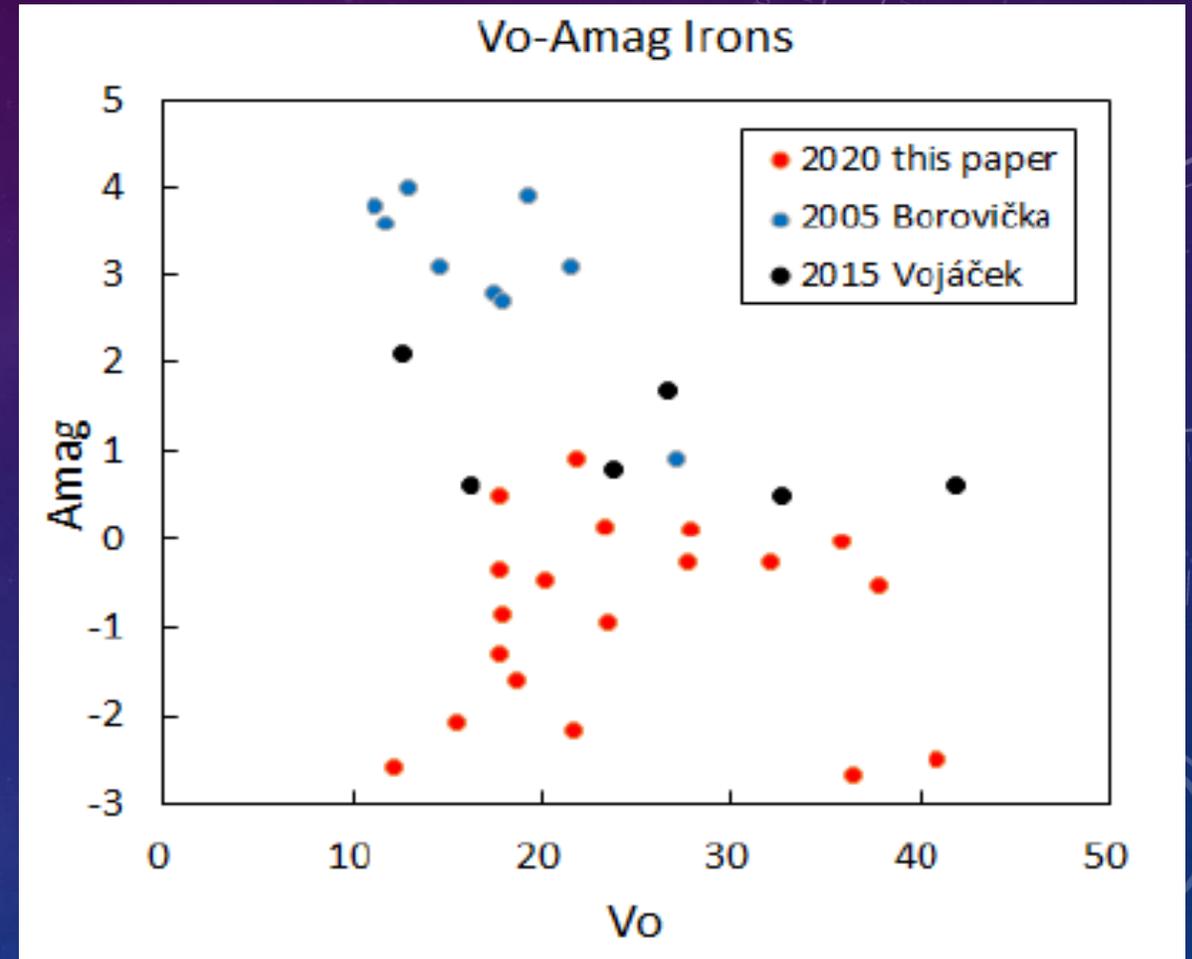
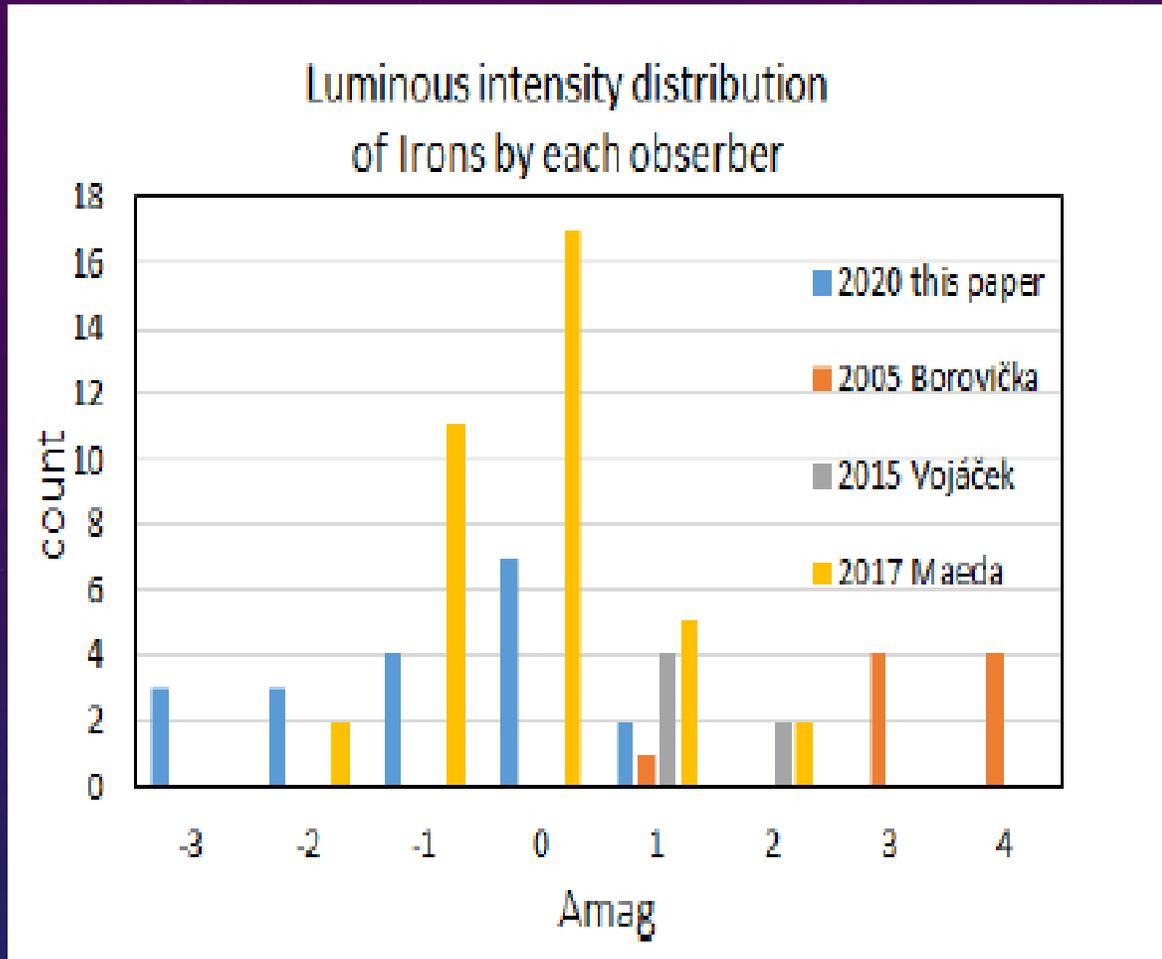
左がSlong-Na/Mgのグラフです。年間を通してNormalが多いです。梅雨時が少なく冬場が多いことがわかります。右は、mass-Na/Mgのグラフです。殆どが50g以下です。Normalが質量の重いものが多いです。低速の流星の火球は、Naが多く主すものが多いです。

# 流星スペクトルの得られた流星のSlong-Na/Mgとmass-Na/Mgの関係図



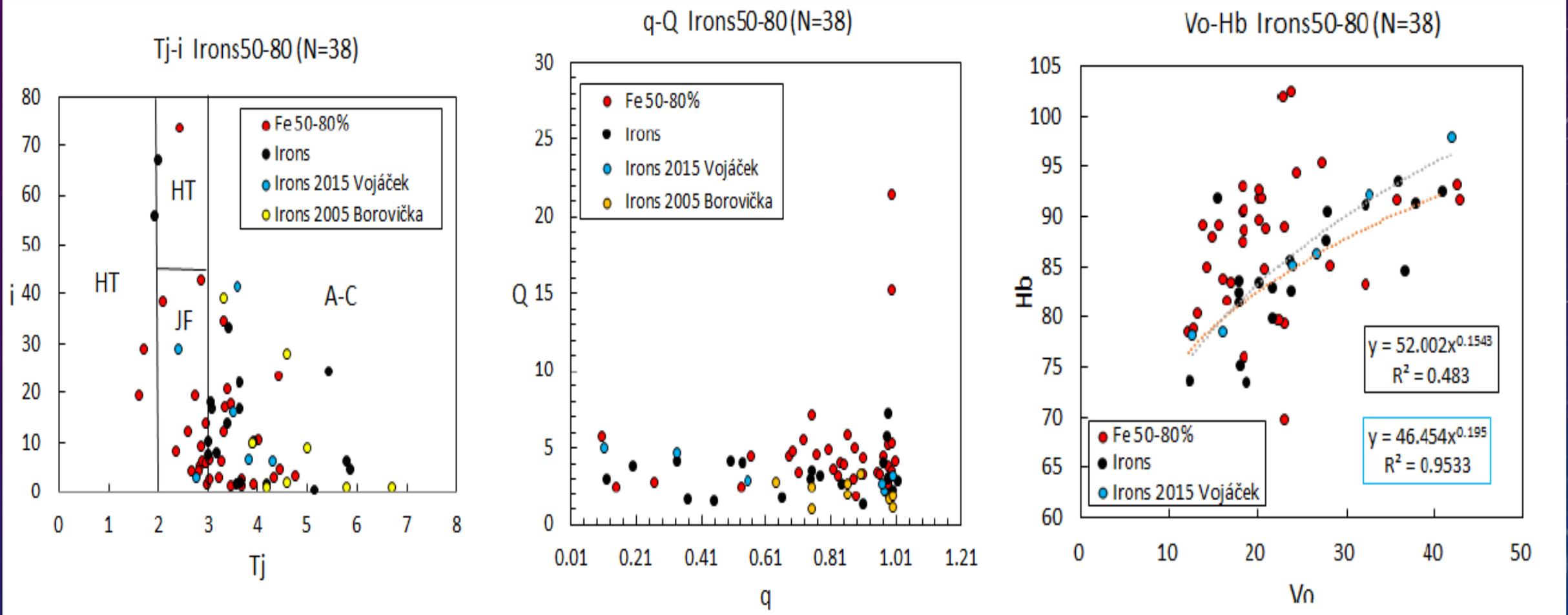
左がKB-Tjのグラフです。Aタイプが多いです。NormalとFe poorは、AとBタイプに多いです。Na freeとNa poorは、astタイプが多いです。右は、PE-Tjのグラフです。II-III Bのタイプが多いです。Iのタイプは、少ないです。KBは、中央に集中しています。PEの方は、横に広がっています。NormalとFe poorは、似たような分布をしています。

# 流星スペクトルの得られた鉄流星の観測者による違いのグラフ



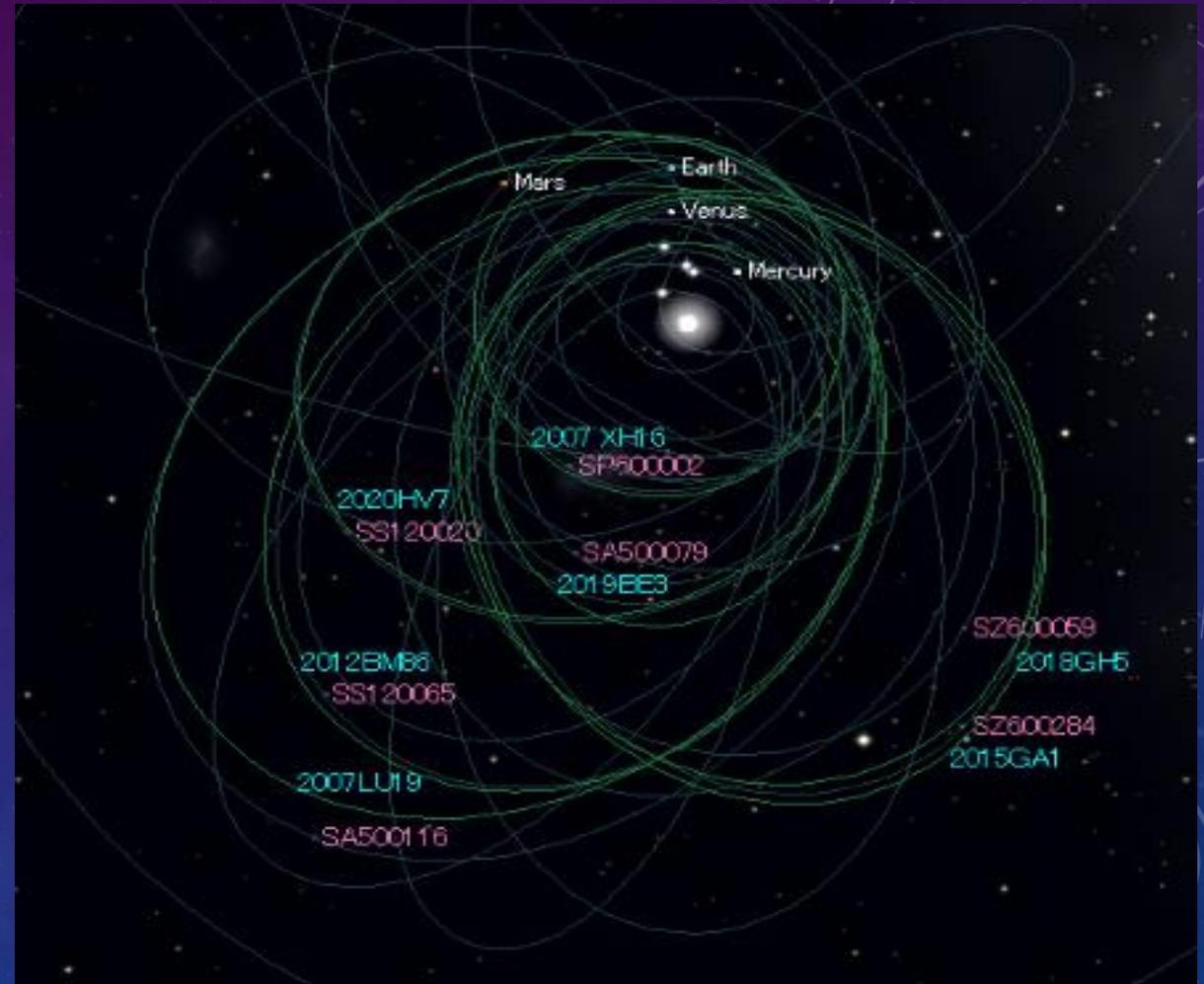
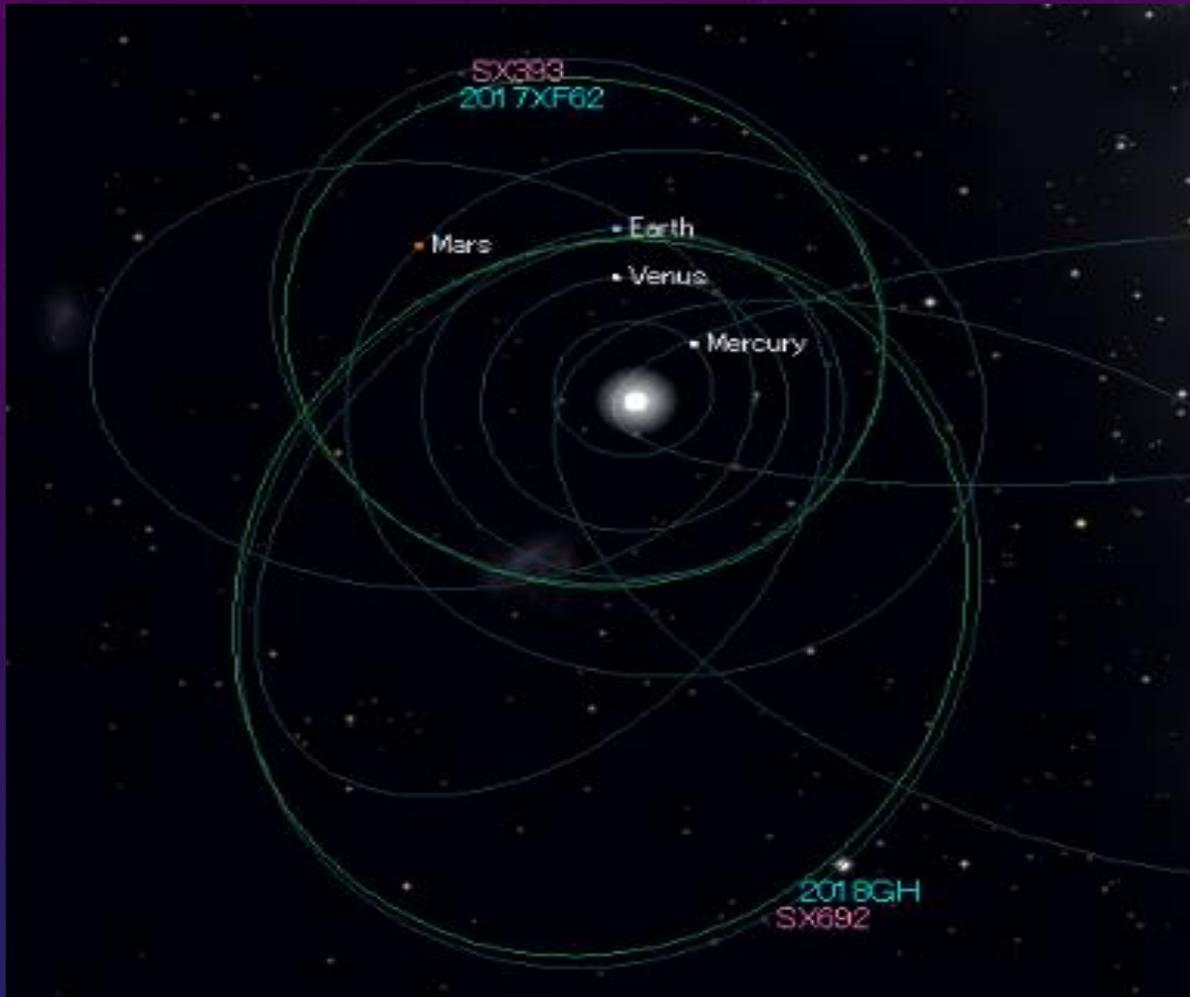
左が各観測者によるAmagの数のグラフです。観測者によって流星の明るさの範囲に差がありますが暗い流星が多い傾向があります。右は、VoとAmagのグラフです。どの観測者でも40Kmを超えるものは殆どありません。10-25の範囲に集中しています。

# 流星スペクトルの得られた鉄流星のTj-iとq-QとVo-Hbの関係図



左がTj-iのグラフです。A-Cタイプが多く見られます。Feが50-80%の鉄流星に近いものも似た分布を示しています。真ん中は、q-Qのグラフです。殆どが $Q < 7$ で、 $0.5 < q < 1$ です。右は、Vo-Hbのグラフです。2015年の論文と似た傾向にあります。

# 流星スペクトルの得られた鉄流星の軌道と母天体候補比較図



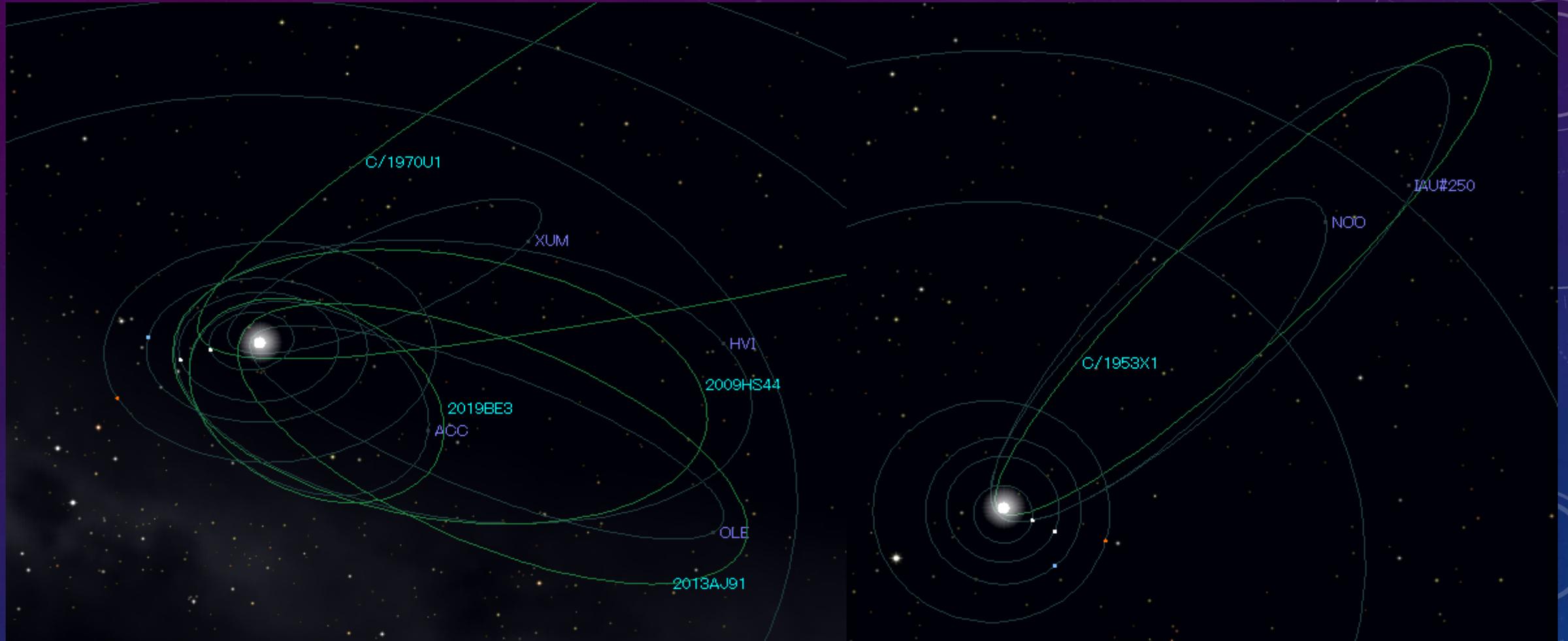
左が2015年の論文の鉄流星の軌道と母天体候補です。2つ母天体候補が見つかりました。右は、私の鉄流星の軌道と母天体候補です。7つの母天体候補が見つかりました。論文と私との共通の鉄流星と母天体は、見つけることができませんでした。

# 流星スペクトルの得られた鉄流星の軌道と母天体候補軌道比較表

| No   | Name      | e    | q    | i     | $\omega$ | $\Omega$ | $\lambda_{\Pi}$ | $\beta_{\Pi}$ | DSH  | Remarks |
|------|-----------|------|------|-------|----------|----------|-----------------|---------------|------|---------|
| V-1  | SX393     | 0.38 | 0.98 | 6.40  | 194.10   | 262.70   | 96.73           | -1.56         |      |         |
| V-1  | 2017XF62  | 0.34 | 1.00 | 5.45  | 203.92   | 254.07   | 97.89           | -2.21         | 0.06 |         |
| V-2  | SX692     | 0.52 | 1.00 | 16.00 | 194.00   | 45.80    | 239.28          | -3.82         |      |         |
| V-2  | 2018GH    | 0.53 | 0.96 | 9.65  | 193.31   | 46.15    | 239.28          | -2.21         | 0.12 |         |
| S-1  | SP600002  | 0.20 | 0.91 | 24.30 | 58.40    | 86.40    | 142.40          | 20.51         |      |         |
| S-1  | 2007 XH16 | 0.23 | 0.91 | 27.43 | 58.30    | 91.29    | 146.46          | 23.08         | 0.08 |         |
| S-2  | SS120020  | 0.40 | 1.00 | 1.80  | 359.20   | 190.20   | 189.44          | -0.03         |      |         |
| S-2  | 2020HV7   | 0.40 | 0.99 | 1.55  | 354.36   | 194.25   | 188.61          | -0.15         | 0.01 |         |
| S-3  | SS120065  | 0.65 | 0.75 | 13.97 | 67.12    | 154.14   | 220.64          | 12.85         |      |         |
| S-3  | 2012BM86  | 0.63 | 0.79 | 11.40 | 56.35    | 164.15   | 219.98          | 9.47          | 0.07 |         |
| S-4  | SZ600284  | 0.61 | 0.75 | 2.14  | 70.89    | 200.77   | 271.65          | 2.02          |      |         |
| S-4  | 2015GA1   | 0.61 | 0.78 | 5.17  | 69.55    | 202.58   | 272.06          | 4.85          | 0.06 |         |
| S-5  | SA500079  | 0.57 | 0.45 | 6.30  | 120.80   | 121.00   | 241.89          | 5.40          |      | ACC     |
| S-5  | 2019BE3   | 0.59 | 0.50 | 8.51  | 111.01   | 130.11   | 241.33          | 7.94          | 0.07 |         |
| S-6  | SA500116  | 0.62 | 0.97 | 8.00  | 153.10   | 55.30    | 208.59          | 3.61          |      |         |
| S-6  | 2008JD33  | 0.65 | 1.03 | 5.93  | 144.05   | 65.77    | 209.97          | 3.47          | 0.08 |         |
| S-7  | SZ600059  | 0.52 | 0.84 | 10.10 | 238.00   | 25.20    | 262.72          | -8.59         |      |         |
| S-7  | 2018GH5   | 0.55 | 0.85 | 5.07  | 248.76   | 21.84    | 270.52          | -4.73         | 0.12 |         |
| S-8  | SA500118  | 0.49 | 1.01 | 22.00 | 180.80   | 61.10    | 241.88          | -0.30         |      |         |
| S-8  | 1999 FN53 | 0.46 | 0.94 | 20.16 | 191.71   | 50.59    | 241.60          | -4.01         | 0.10 |         |
| S-9  | SW600479  | 0.64 | 0.37 | 4.50  | 308.04   | 282.40   | 230.53          | -3.54         |      |         |
| S-9  | 2013YL2   | 0.66 | 0.40 | 5.87  | 303.56   | 277.90   | 221.60          | -4.89         | 0.11 |         |
| S-10 | SA500064  | 0.53 | 0.98 | 33.20 | 177.70   | 271.70   | 89.76           | 1.25          |      |         |
| S-10 | 2019YA6   | 0.57 | 1.07 | 31.38 | 169.11   | 275.07   | 85.75           | 5.65          | 0.12 |         |
| S-11 | SA500279  | 0.77 | 0.53 | 18.12 | 92.81    | 120.91   | 213.87          | 18.10         |      |         |
| S-11 | 2009 BJ58 | 0.71 | 0.53 | 13.03 | 85.60    | 131.46   | 216.94          | 12.99         | 0.12 |         |
| S-12 | SS800036  | 0.46 | 0.66 | 0.40  | 93.50    | 138.40   | 231.85          | 0.35          |      |         |
| S-12 | 2019BV2   | 0.50 | 0.66 | 0.66  | 82.14    | 134.78   | 216.92          | 0.65          | 0.13 |         |
| S-13 | SA500115  | 0.93 | 0.12 | 16.70 | 147.20   | 234.40   | 22.72           | 8.96          |      |         |
| S-13 | 2005 GL9  | 0.90 | 0.22 | 20.02 | 162.17   | 225.64   | 28.83           | 6.02          | 0.17 |         |
| S-14 | SW600549  | 0.79 | 0.50 | 10.27 | 97.35    | 154.39   | 251.85          | 10.18         |      |         |
| S-14 | 2019DW1   | 0.78 | 0.50 | 4.87  | 97.38    | 164.86   | 262.26          | 4.83          | 0.17 |         |
| S-15 | SA500259  | 0.90 | 0.20 | 16.66 | 313.20   | 281.48   | 235.90          | -12.07        |      | Gem?    |
| S-15 | Phaethon  | 0.89 | 0.14 | 22.26 | 322.19   | 265.22   | 229.53          | -13.43        | 0.18 |         |
| S-16 | SA500271  | 0.71 | 0.98 | 66.93 | 188.00   | 287.63   | 110.78          | -7.35         |      | Qua?    |
| S-16 | 2003 EH1  | 0.62 | 1.19 | 70.84 | 171.34   | 282.98   | 100.12          | 8.18          | 0.33 |         |

V-1とV-2は、2015年の論文の鉄流星(上)の軌道と母天体候補(下)軌道です。S-1からS-16は、私の鉄流星(上)の軌道と母天体候補(下)軌道です。DSHと $\lambda$ と $\beta$ で判定しました。

# 流星スペクトルの得られた小流星群の軌道と母天体候補比較図



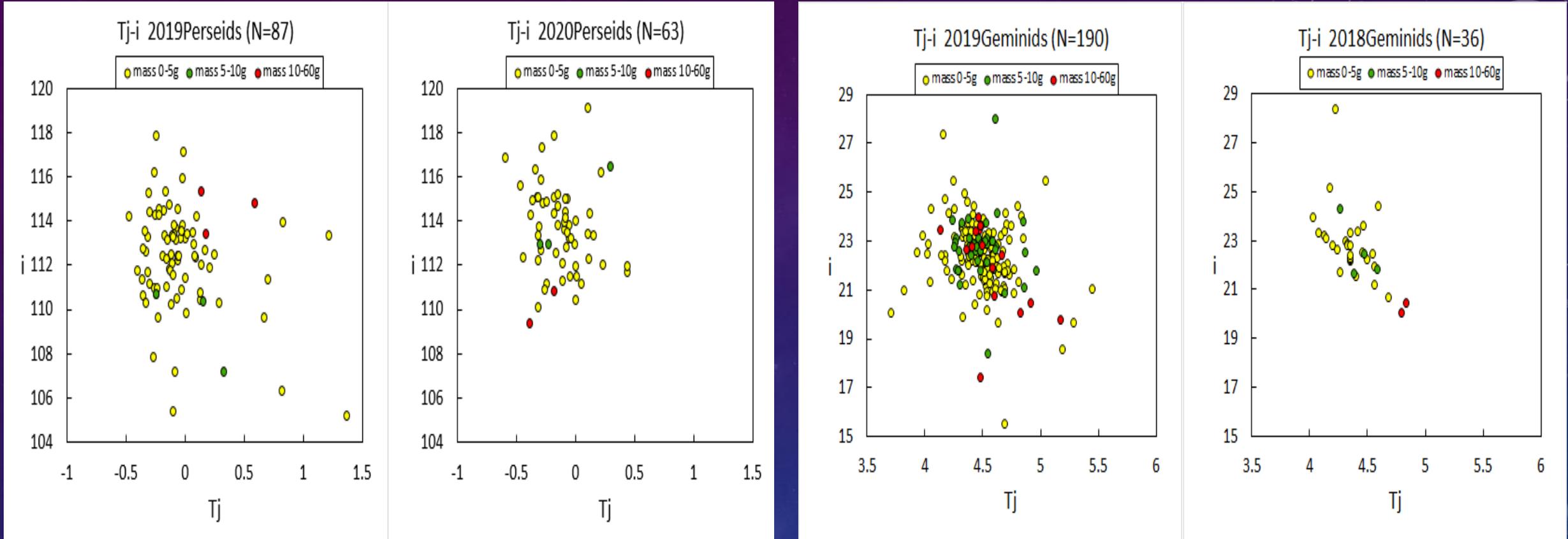
左がACC群とCLE群とHVI群とXUM群と母天体候補の軌道図です。XUM群は、速度で軌道の違いが見られます。右は、NOO群と母天体候補の軌道図です。似た傾向があります。速度による影響が考えられます。

# 流星スペクトルの得られた小流星群の軌道と母天体候補比較表

| Name      | Vg   | e    | q    | i    | $\omega$ | $\Omega$ | Dsh  | $\lambda_{\Pi}$ | $\beta_{\Pi}$ | Remark     |
|-----------|------|------|------|------|----------|----------|------|-----------------|---------------|------------|
| ACC       | 23.0 | 0.69 | 0.46 | 8.7  | 109.2    | 126.8    | 0.11 | 236.21          | 8.21          | N=4        |
| IAU#266   | 19.3 | 0.59 | 0.48 | 7.2  | 112.6    | 124.2    | 0.00 | 236.96          | 6.64          | asteroidal |
| 2019BE3   |      | 0.59 | 0.50 | 8.5  | 111.0    | 130.1    | 0.05 | 241.33          | 7.94          |            |
| OLE       | 40.1 | 0.94 | 0.11 | 26.5 | 146.8    | 114.9    | 0.11 | 264.55          | 14.16         | N=4        |
| IAU#515   | 41.5 | 0.97 | 0.08 | 23.0 | 151.0    | 116.0    | 0.00 | 268.97          | 10.92         |            |
| 2013AJ91  |      | 0.93 | 0.18 | 33.3 | 165.8    | 95.4     | 0.27 | 263.45          | 7.73          | ?          |
| XUM       | 40.7 | 0.84 | 0.23 | 66.8 | 312.5    | 299.3    | 0.03 | 276.01          | -42.65        | N=5        |
| IAU#341   | 40.9 | 0.86 | 0.22 | 66.8 | 313.2    | 298.0    | 0.00 | 275.24          | -42.07        |            |
| C/1970 U1 |      | 1.00 | 0.41 | 60.8 | 318.5    | 293.7    | 0.27 | 270.34          | -35.32        | ?          |
| HVI       | 17.7 | 0.71 | 0.77 | 0.9  | 64.6     | 219.9    | 0.02 | 284.59          | 0.80          | N=7        |
| IAU#343   | 18.1 | 0.73 | 0.76 | 0.6  | 64.1     | 220.4    | 0.00 | 284.50          | 0.54          |            |
| 2009HS44  |      | 0.70 | 0.77 | 2.4  | 73.2     | 209.1    | 0.05 | 282.32          | 2.33          |            |
| NOO       | 40.7 | 0.97 | 0.12 | 19.8 | 140.4    | 67.0     | 0.08 | 209.17          | 12.45         | N=5        |
| IAU#250   | 42.5 | 0.99 | 0.12 | 24.4 | 140.4    | 67.6     | 0.00 | 210.61          | 15.27         |            |
| C/1953 X1 |      | 1.00 | 0.07 | 13.6 | 94.1     | 115.2    | 0.32 | 209.43          | 13.54         | ?          |

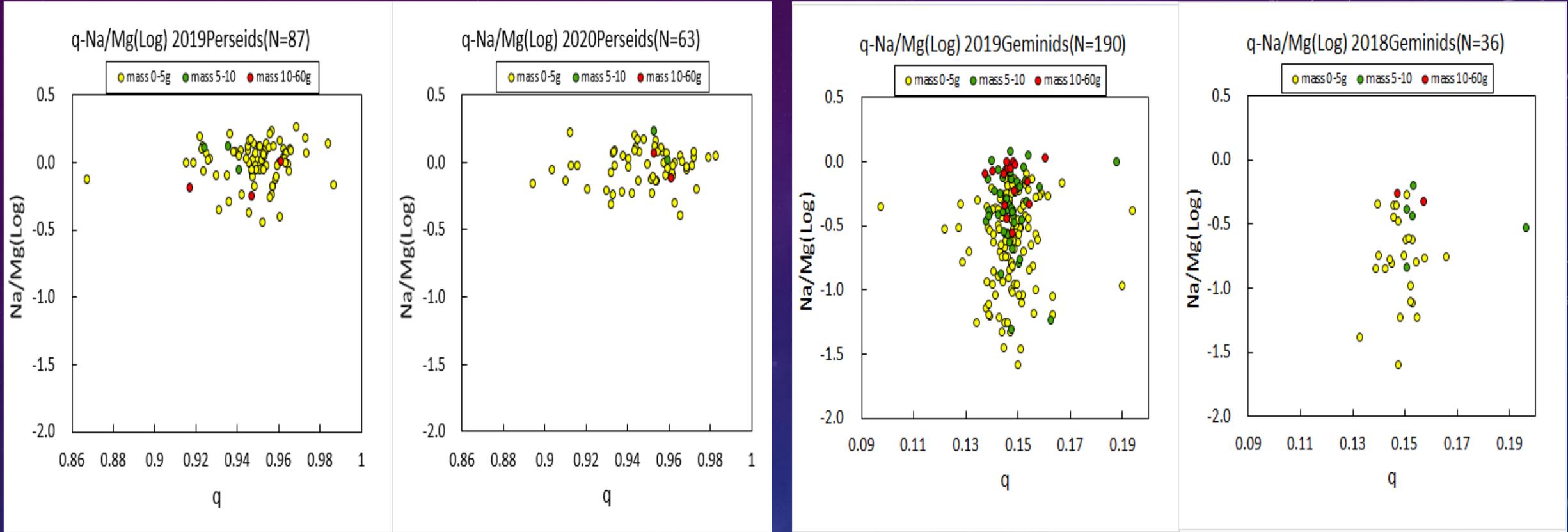
ACCとHVIは、軌道要素も $\lambda$ と $\beta$ もよく一致していますが、OLEとXUMとNOOは、軌道要素は、大体似ていますがDSHが0.2を超えていて?です。速度による影響があると思われます。候補は、一番近いものです。

# 流星スペクトルの得られたPer群とGem群のTj-iの比較



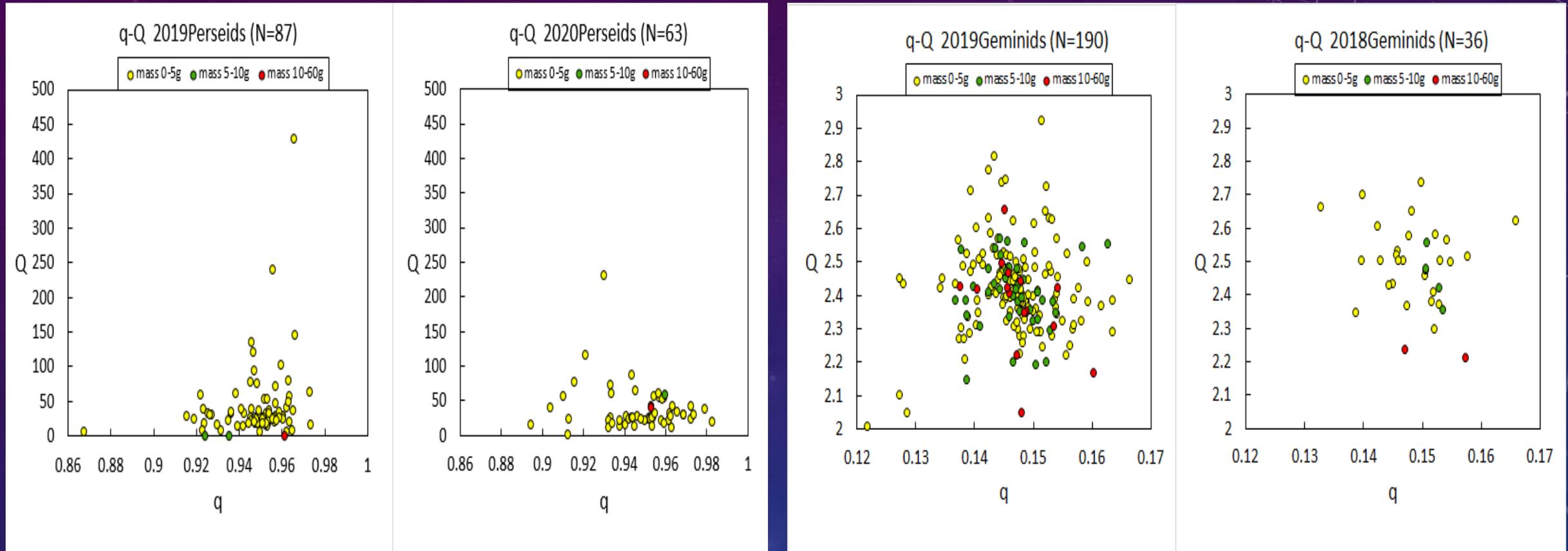
左は、ペルセ群です。どちらの年も集中している中心より外側に質量の重い物質が多いようです。iが110-115°に集中しています。右は、ふたご群です。iが20-25°に集中しています。ペルセ群よりも集中部分の近くに重い物質も集中しているが離れた所にも散見している。このことからふたご群の方が流星物質の広がりが少ないと思われます。

# 流星スペクトルの得られたPer群とGem群のq-Na/Mgの比較



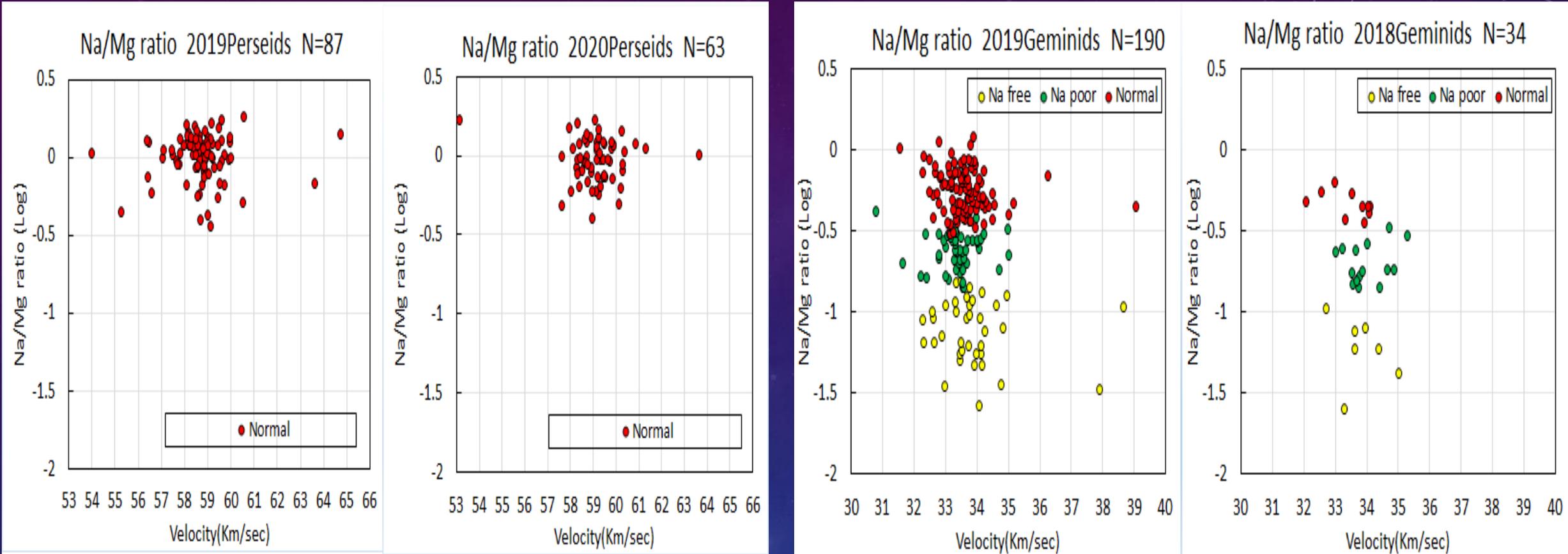
左は、ペルセ群です。どちらの年も集中している中心より外側に質量の重い物質が多いようです。qが0.94-0.97°に集中しています。右は、ふたご群です。qが0.14-0.16°に集中しています。ペルセ群よりも集中部分の近くに重い物質も集中しているが離れた所にも散見している。このことからiと同様にふたご群の方が流星物質の広がりが少ないと思われます。しかし、タイプの広がりには、ふたご群が非常に大きい。これは、4つのタイプが混在しているためです。

# 流星スペクトルの得られたPer群とGem群のQ-qの比較



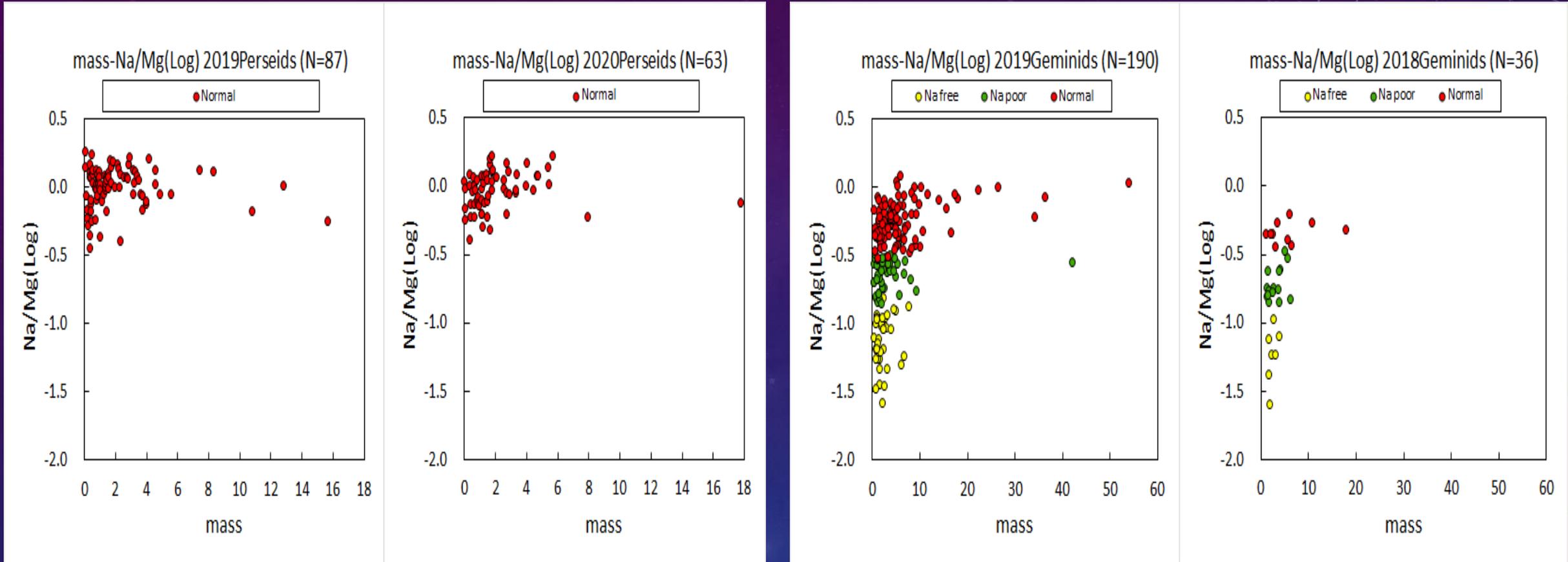
左は、ペルセ群です。どちらの年もqが0.93-0.97に集中しています。2019年は、0.92付近にも集中が見られます。2019年の方がばらつきが見られます。右は、ふたご群です。2018年は、ばらついていますが、2019年は、qが0.14-0.16°に集中しています。ペルセ群よりも集中部分の近くに重い物質も集中しているが離れた所にも散見している。このことからと同様にふたご群の方が流星物質の広がりが少ないと思われます。また、速度による違いが見えるものと思われます。

# 流星スペクトルの得られたPer群とGem群のVg-Na/Magの比較



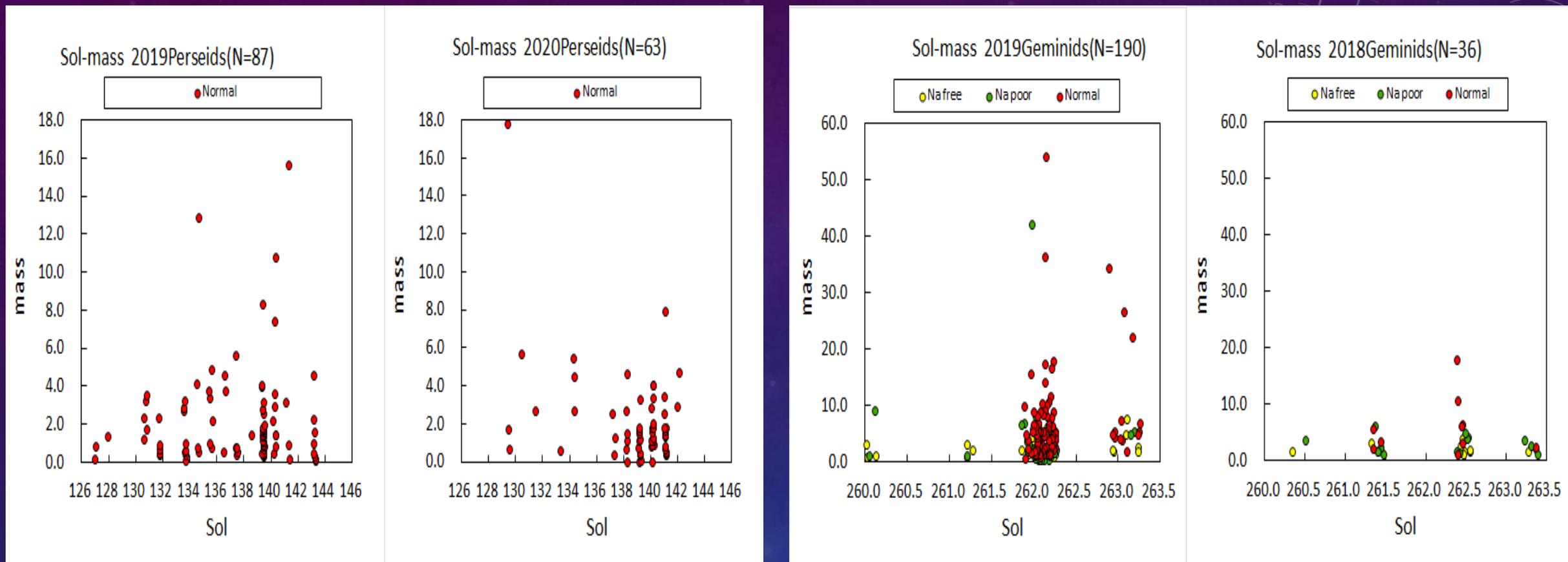
左のペルセ群です。NormalのみでFe poor判定はしていません。2019年の方がやや集中している。Na/Mgの範囲は年によってあまり変わっていない。右は、ふたご群です。2019年は、カメラが増えたが、Normalの集中がよく一番多い。明らかに2018年よりも多いことがわかります。Na freeも多くなっています。明るいものが多かったことによると思われる。

# 流星スペクトルの得られたPer群とGem群のmass-Na/Mgの比較



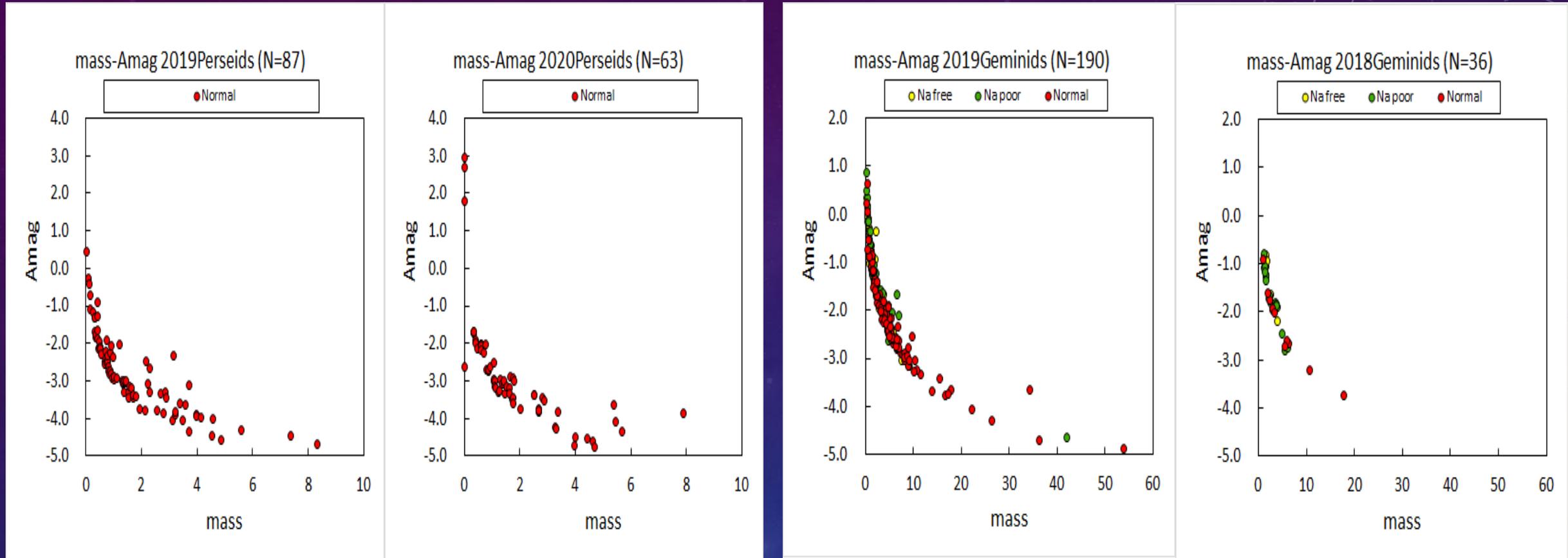
左のペルセ群です。2019年の方が質量の重いものがやや多かったようです。2019年には、2g付近がよく集中している。右は、ふたご群です。2019年は、カメラが増えたが、10g以上の重い物質が多いことがわかります。どちらの年も10g以下が多いことがわかります。

# 流星スペクトルの得られたPer群とGem群のSol-massの比較



左のペルセ群です。2019年の方が広い範囲で多く撮影できています。また、質量の重いものがどちらの年も極大付近でやや多いです。右は、ふたご群です。こちらも質量の重いものがどちらの年も極大付近でやや多いです。2019年の方が極大付近にたくさん撮影できていました。極大から離れたSol 261.3より前では、Normalがありません。

# 流星スペクトルの得られたPer群とGem群のAmag-massの比較



左のペルセ群です。2019年の方がきれいに分布しています。2020年は、カラーがFHDになり暗い2等以下でも撮影できています。2019年よりも明るいものが多かったようです。右は、ふたご群です。2019年の方がきれいに分布しています。カメラが増えたが、-1から-3等のが多かったです。ペルセ群もふたご群もきれいな分布になっています。

# 流星スペクトルの解析のまとめ

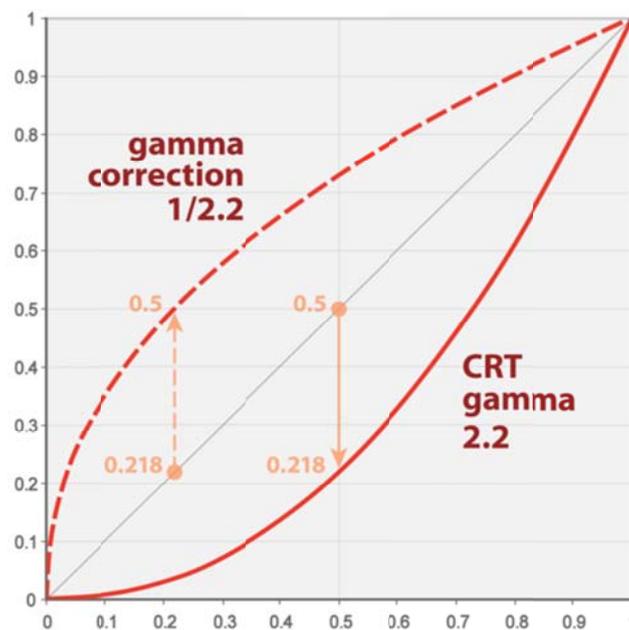
- 8台のカメラの観測で、ほぼ2年で1600個近くのスペクトルが得られました。今回のデータは、2018年10月から2020年8月までを解析しました。解析結果を元に2020年5月までを中心に様々な関係図を作成し考察しました。
- 今回は、散在や主要群のしぶんぎ群とペルセ群とふたご群の三角比を比べました。また、他の主要流星群や小流星群と比較しました。やぎ群は、比較的集中が見られたが他の群は、広がりがありました。ペルセ群は、殆どノーマルタイプでした。みずがめ南群は、しぶんぎ群と似ていて4つのタイプに分かれていました。さらに、各月ごとに比べてみました。主要群の群ごとのタイプ別の割合も調べました。群による違いが見られました。
- 鉄流星の観測者ごとの違いや軌道比較から母天体候補を探しました。また、小流星群のいくつかの中からも母天体候補を探しました。母天体候補をいくつか見つけることができました。速度や軌道のばらつきで確定するのは難しいです。
- ペルセ群とふたご群の2年分の軌道要素等との関係の考察をしました。Na/Mgの比率と速度の関係は、前回よりサンプルが増えましたが傾向は、あまり変わりませんでした。今回は、 $v_g$ でやりましたが殆ど変わらなかったです。他の関係も年によって変わるものと変わらないものがありました。
- KB-TjとPE-Tjの関係も調べて見ました。タイプによって違いが見られました。

## ソニー α7s の $\gamma$ 補正

神奈川県 永井和男

ソニーのデジタル一眼レフカメラ  $\alpha 7s$  の  $\gamma$  補正を ITU709 に設定して UFO capture HD2 が出力する BMP ファイルを逆に  $\gamma$  補正して線形な感度に戻す方法です。

$\gamma$  補正とはブラウン管のテレビでは CRT のカソードに大きな容量があり、これをトランジスタでドライブすると入出力の関係がリニアにならず、この問題を解決するためにカメラの記録特性をテレビと逆な関数で補正して記録することでテレビで再生するとリニアなものに復調されるようにしました。



上図で CRT gamma 2.2 のラインがブラウン管テレビの入出力特性です。X 軸が入力信号です。0.5 の明るさの信号が入力されると 0.218 のレベルに下がって画面に写ります。そのため、カメラ側を 1/2.2 で補正して記録します。0.218 の明るさの信号が入力されたら 0.5 に変換して記録します。これを 2.2 で再生すると正しい入力信号のレベルになります。

$$V_{out} = V_{in}^{\gamma}$$

上式で指数  $\gamma$  をガンマ値と言っています。(ここまで <https://ja.wikipedia.org/wiki/ガンマ値> より)

このような  $1/\gamma$  でガンマ補正された画像では流星の明るさや流星スペクトル画像から輝線の強度を正しく測れなくなります。ようするに  $\gamma$  で逆に補正すれば正しく測定されることとなります。WATEC のカメラは  $\gamma$  を off に出来ますが  $\alpha 7s$  はどうでしょうか？

ガンマ補正には規格が幾つかあります。また、 $\alpha 7s$  はピクチャープロファイルの設定で様々な補正を選択できます。

ソニーのカメラのピクチャープロファイルは web 取扱説明書のクリエイターズヘルプガイドに記述があり、ガンマ補正や黒レベル補正などを細かく設定する説明があります。

<https://helpguide.sony.net/di/pp/v1/ja/contents/TP0000847999.html>

設定は静止画と動画で同じ設定が使用されるそうです。静止画と動画を別な設定で撮影したい場合は、その都度、設定を変えて撮影することになります。

$\alpha 7s$  を流星の TV 観測に使う場合、HDMI 出力をキャプチャーして動体検出します。PC 側は UFO capture HD2 を使います。このシステムでレンズ前には回折格子を付けると流星スペクトル観測が出来ます。

ピクチャープロファイルを見ると明らかな ITU 規格は ITU709 だけの様です。そこで、ITU709 の設定と、これ以外に映像シーンによって動的な補正(たとえば黒レベル補正など)が掛からないような設定を考察しました。

|         |                               |
|---------|-------------------------------|
| ブラックレベル | 0で補正なし                        |
| ガンマ     | ITU709                        |
| ブラックガンマ | 0でブラックガンマなし                   |
| ニーマニアル  | マニアル、ポイント100%、スロープ0 > これで補正なし |
| カラーモード  | ITU709マトリクス                   |
| 彩度      | 0で補正なし                        |
| 色相      | 0で補正なし                        |
| 色の深さ    | (R,G,B,C,M,Y)すべて0で補正なし        |
| ディテール   | レベル0で補正なし                     |

上記の設定と「HDRをOFF」で ITU709 で記録されます。この設定で UFO capture HD2 が出力する BMP ファイルを ITU709 の逆  $\gamma$  補正する事で線形な感度に戻すことが出来ます。(jpeg ファイルも出力されますが jpeg は圧縮画像ですので振幅を議論するような科学的測定にはお勧め出来ません)

下の画像は ITU709 の設定で UFO capture HD2 が出力した BMP ファイルです。



下の画像は ITU709 規格で $\gamma$ を逆補正したものです。これが正しい明るさ情報を持って画像となります。これならば流星の明るさも正しく評価できます。



ここでこの逆補正をするプログラムを紹介します。プログラムは下記の URL からダウンロード出来ます。

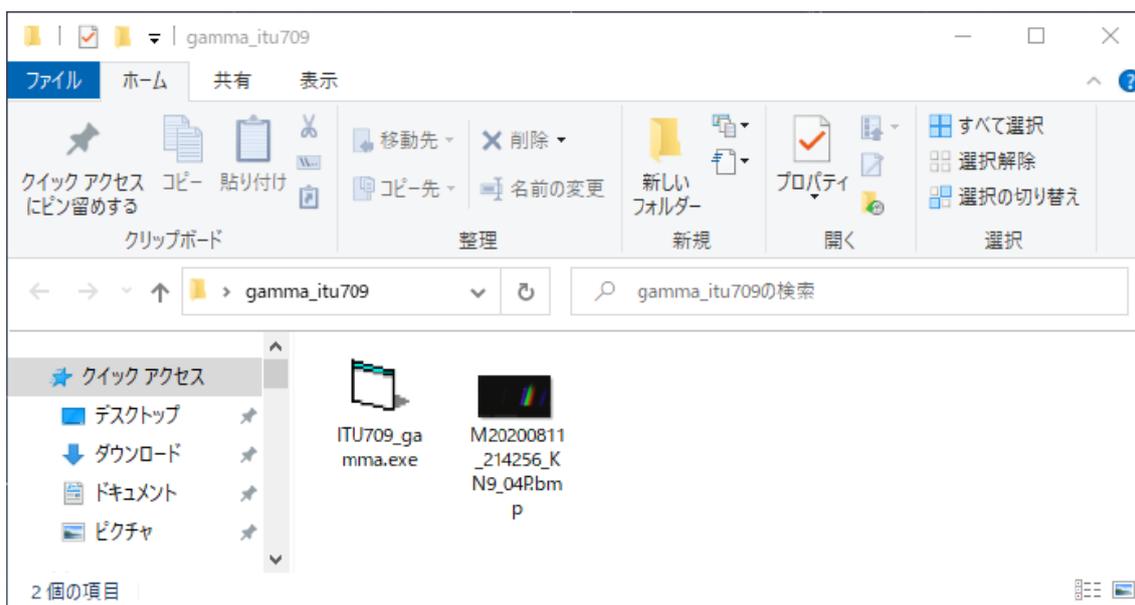
[http://binary.cocolog-nifty.com/blog/files/gamma\\_itu709.zip](http://binary.cocolog-nifty.com/blog/files/gamma_itu709.zip)

ダウンロードしましたら解凍すると ITU709\_gamma.exe が得られます。これが補正

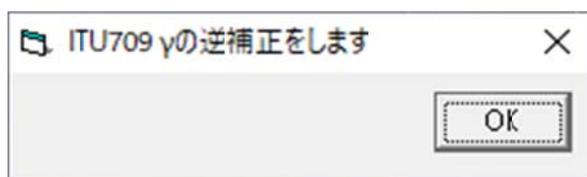
プログラムです。プログラムは Visual Basic Ver.5.0 で作りましたので VB5 のランタイムライブラリが必要です。PC にインストールされていない場合は下記などの URL からダウンロードしてインストールします。

<https://www.vector.co.jp/soft/win95/util/se081909.html>

使い方は ITU709\_gamma.exe と HD 画像の BMP ファイルを任意のフォルダーに置きます。BMP ファイルは何個置いても構いませんが、フォルダー内のすべての BMP ファイルを補正しますので、補正したくない BMP ファイルは置かないようにします。



準備が出来たら ITU709\_gamma.exe をダブルクリックして実行します。



OK ボタンを押すとフォルダー内の BMP ファイルを ITU709 規格で補正します。

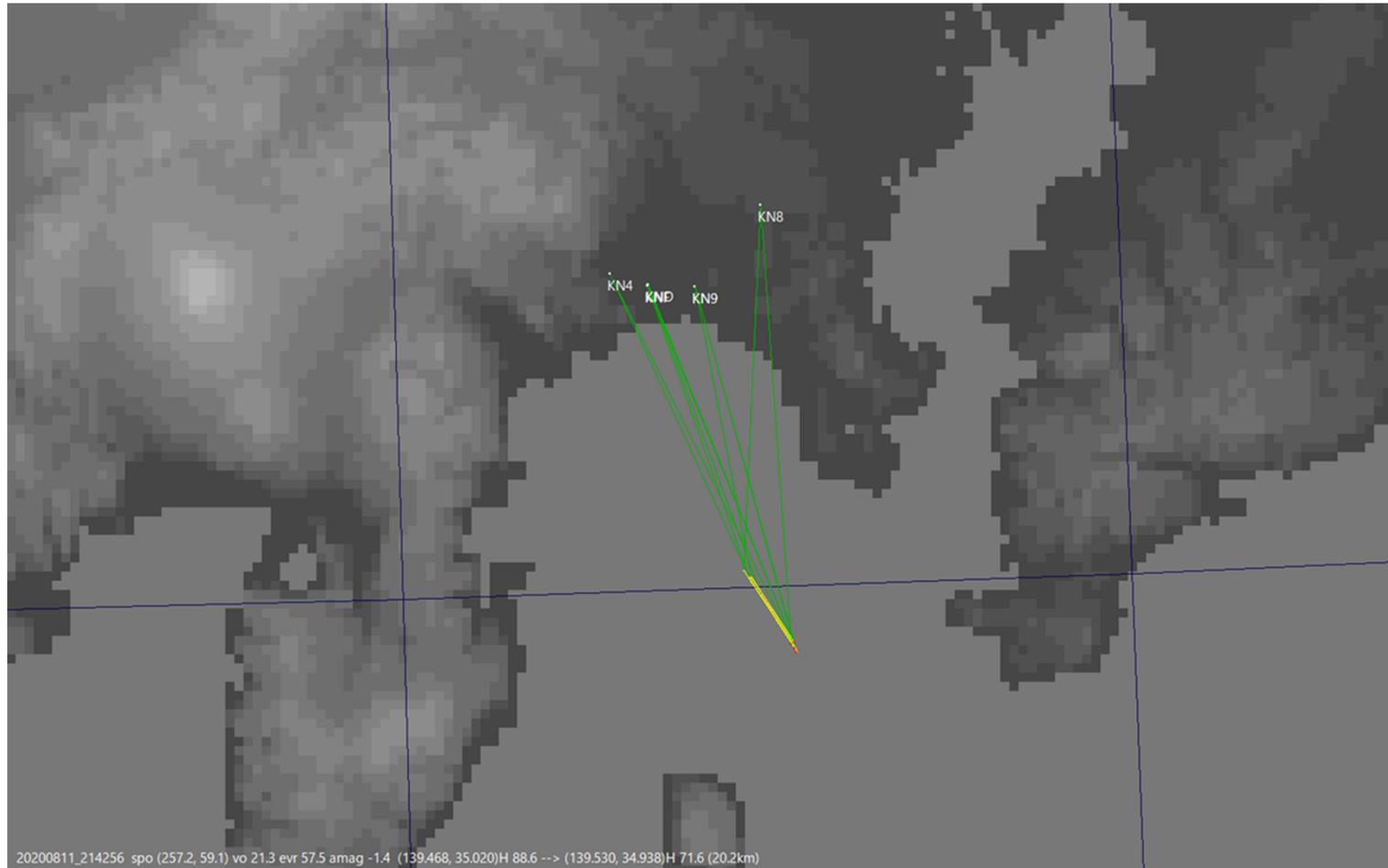
ファイル名が gamma\_ で始まるファイルが補正された画像です。

# 鉄流星の温度測定

2020年8月11日に撮影出来た鉄流星のハイビジョン分光画像から流星プラズマの実効励起温度を測定してみましたので報告します

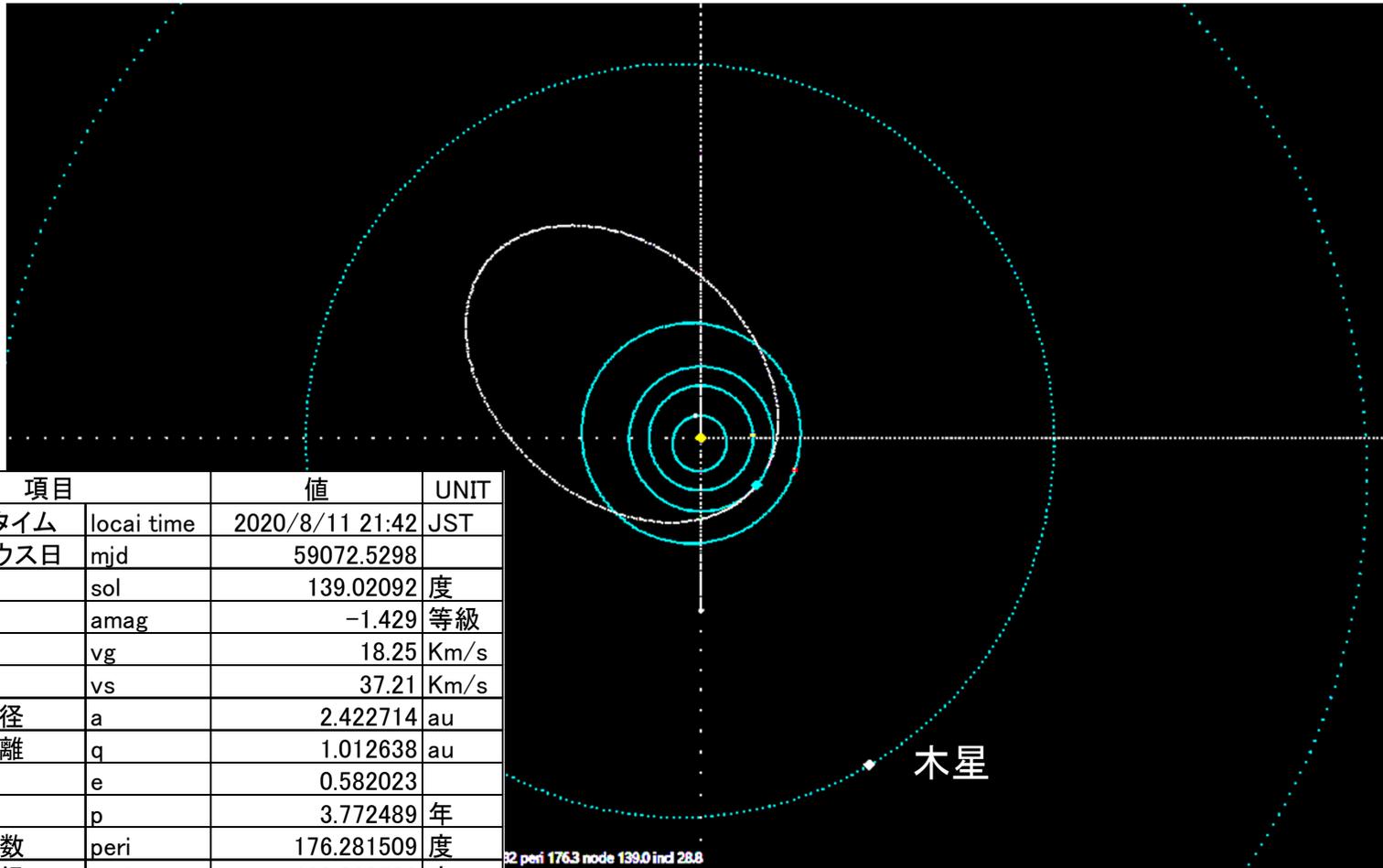
2021/4/5 平塚市博物館流星分科会 永井和男

# TV観測



- 流星は相模湾上空に出現しました
- 観測はKN4(平塚市:秋山),KN8(横浜市:鈴木),KN9(茅ヶ崎市:永井),KND(平塚市:横関)の4名
- KN9はSonotaCo netに報告しています

# 日心軌道ほか



| 項目      |            | 値               | UNIT |
|---------|------------|-----------------|------|
| ローカルタイム | local time | 2020/8/11 21:42 | JST  |
| 修正ユリウス日 | mjd        | 59072.5298      |      |
| 太陽黄経    | sol        | 139.02092       | 度    |
| 絶対等級    | amag       | -1.429          | 等級   |
| 地心速度    | vg         | 18.25           | Km/s |
| 日心速度    | vs         | 37.21           | Km/s |
| 軌道長半径   | a          | 2.422714        | au   |
| 近日点距離   | q          | 1.012638        | au   |
| 離心率     | e          | 0.582023        |      |
| 周期      | p          | 3.772489        | 年    |
| 近日点引数   | peri       | 176.281509      | 度    |
| 昇交点黄経   | node       | 139.020782      | 度    |
| 軌道傾斜角   | incl       | 28.821266       | 度    |
| 流星群名    | stream     | spo             |      |
| 継続時間    | dur        | 0.934           | 秒    |
| 始点高度    | H1         | 88.632965       | Km   |
| 終点高度    | H2         | 71.617805       | Km   |

- UFO orbitにて解析しました
- メインベルト由来の天体のようです

# 分光観測

¥ 103,498



ソニー SONY フルサイズミラーレス一眼 α7S ボディ ILCE-7S

ソニー SONY フルサイズミラーレス一眼 α7S ボディ ILCE-7S

¥ 3,103



ケンコー・トキナー コッキン Pシリーズアダプターリング P455 55mm 205455

Cokin フィルターアクセサリー Pシリーズ ワイドアングルフィルターホルダー P299 815733

Kenko フィルターホルダー 100mm テクニカルペーパーマウント 10枚入

¥ 799



AC-PW20 AC電源アダプタPW20充電器キット

¥ 12,788



ezcap261 1080P 60fps USB3.0ビデオキャプチャーボックス HDMI IN/OUT搭載

¥ 46,000



Dell Latitude E7240 (Win7Pro 64bit Core i7 8GB SSD 256GB 12.5型) LATIE7240-093

手持ちの品

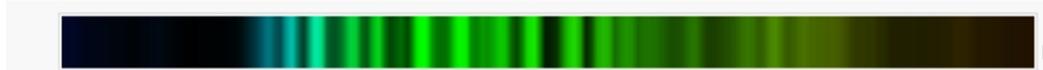
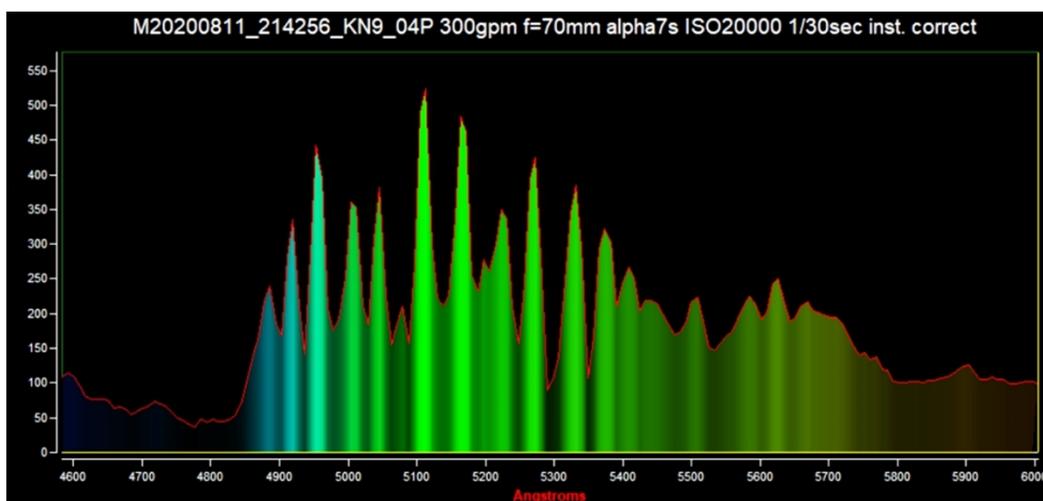
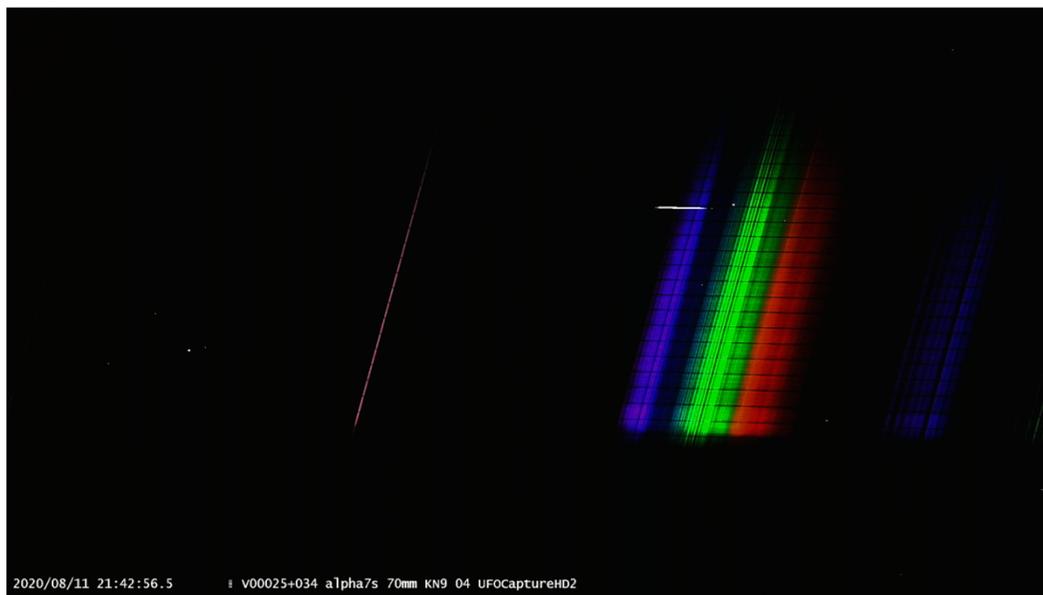
- 回折格子
- HDMIケーブル

合計 ¥166,188



- 昨年の給付金10万円でソニーα7sとレンズを購入しました
- 回折格子は手持ちのエドモンドのブレード回折格子(50x50mm 300本/mm)を使用しました
- USBキャプチャーはEZCAP261にしました
- 上記の他にUFO capture HDを購入しました

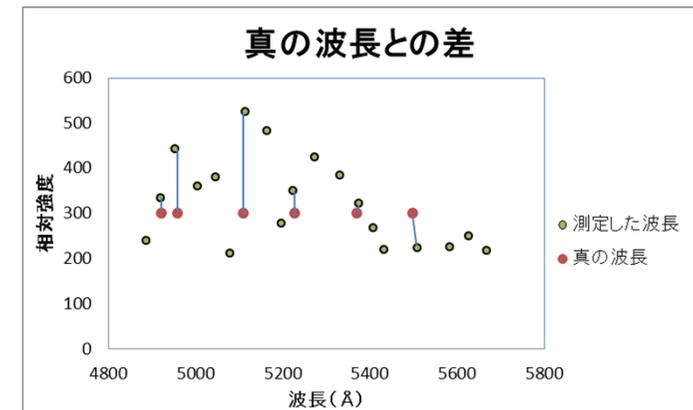
# 分光解析



- 2020年8月11日21時42分57秒の分光画像です。ガンマ補正を逆に補正してリニアな感度の画像にしてあります
- 補正方法は下記を参照願います  
<http://msswg.net/mssonline/MS S19-spectrum-20210307-Nagai-gammaHOSEI.pdf>
- これを波長校正・分光感度補正してRspecで解析しました(下図)
- 解析後のグラフから各輝線の波長と相対強度を抽出しました

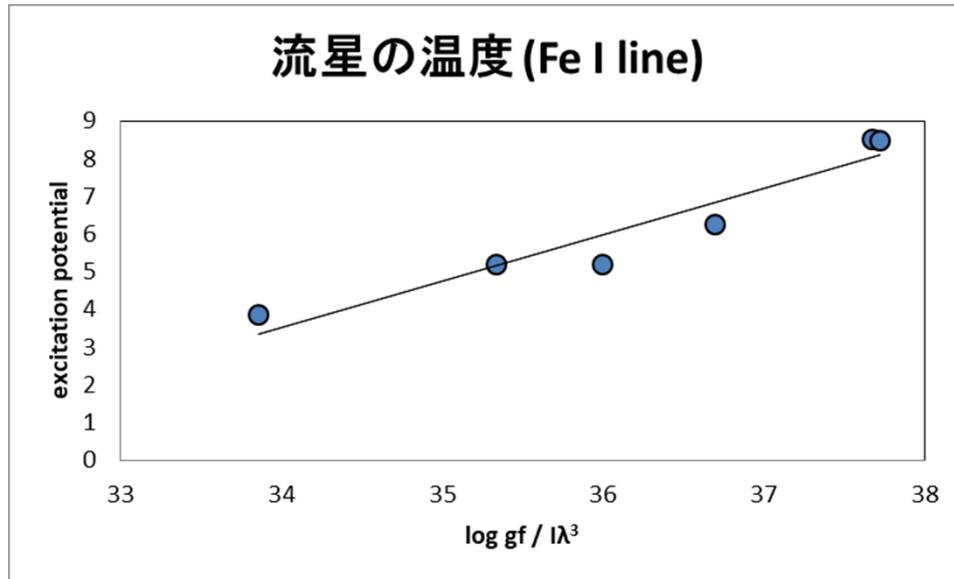
# Intensities of Fe I Lines

| ID number | 真の波長(Å) | 測定波長(Å) | Relative intensity | 誤差(Å)  | log(gf) | excitation potential( $\times 10^{-12}$ erg) | $\log(gf/\lambda^3)$ |
|-----------|---------|---------|--------------------|--------|---------|--|----------------------|
|           |         | 4886.21 | 239.35             |        |         |  |                      |
| 18        | 4921    | 4919.85 | 334.82             | 1.15   | -0.09   | 8.54   | 37.67                |
| 19        | 4958    | 4953.49 | 443.01             | 4.51   | 0.26    | 8.48   | 37.72                |
|           |         | 5003.95 | 360.97             |        |         |  |                      |
|           |         | 5046.00 | 381.21             |        |         |  |                      |
|           |         | 5079.64 | 210.96             |        |         |  |                      |
| 22        | 5110    | 5113.28 | 524.17             | -3.28  | -3.34   | 3.86   | 33.86                |
|           |         | 5163.74 | 483.68             |        |         |  |                      |
|           |         | 5197.38 | 277.46             |        |         |  |                      |
| 24        | 5227    | 5222.61 | 349.41             | 4.39   | -0.84   | 6.26   | 36.70                |
|           |         | 5273.07 | 424.45             |        |         |  |                      |
|           |         | 5331.94 | 384.22             |        |         |  |                      |
| 27        | 5371    | 5373.99 | 323.16             | -2.99  | -1.54   | 5.21   | 35.99                |
|           |         | 5407.63 | 267.10             |        |         |  |                      |
|           |         | 5432.86 | 219.44             |        |         |  |                      |
| 31        | 5498    | 5508.55 | 224.20             | -10.55 | -2.49   | 5.21   | 35.34                |
|           |         | 5584.24 | 225.11             |        |         |  |                      |
|           |         | 5626.29 | 250.34             |        |         |  |                      |
|           |         | 5668.34 | 217.71             |        |         |  |                      |



- 多数の輝線が測定出来ました
- 分光器の波長分解能は約8.4 Åでした
- 波長測定の誤差は±5.7 Åでした
- その中の6つのFe Iの $\log(gf/\lambda^3)$ を求めました

# 励起温度



$$\chi = k T \log (gf / I \lambda^3) + C \quad \dots \dots \dots [4 - 36]$$

$T$  : 絶対温度                       $C$  : 定数

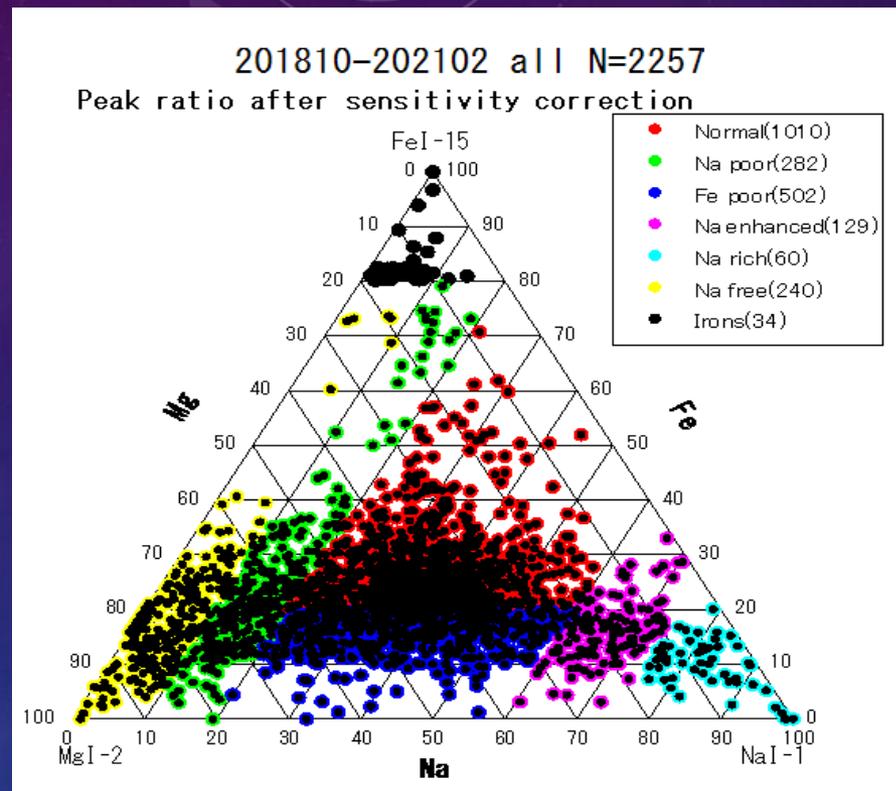
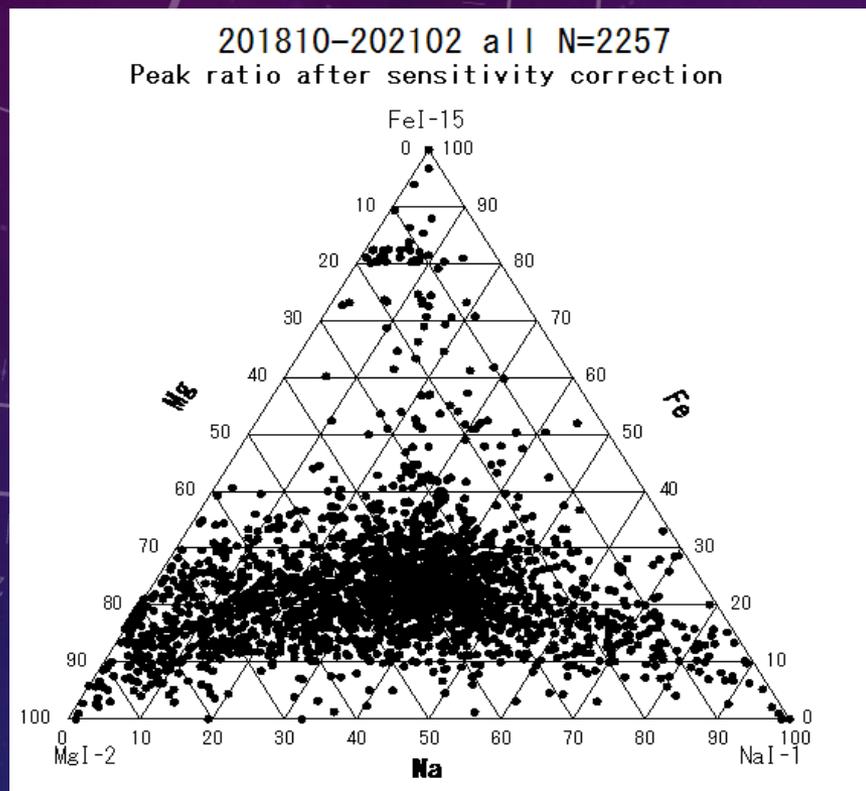
$k$  : ボルツマン定数

- グラフの傾き $\log B(Te)$ は1.226となりました
- 式4-36より温度は $3058 \pm 267K$ でした
  
- 今後はサンプルを増やして温度と光度・速度・継続時間・高度などの相関の有無を調べたいと思います

- Ref.
  - ANALYSIS OF THE SPECTRA OF LEONID METEORS, Ko Nagasawa, 19/Jan/1978
  - アストラルシリーズ3 流星Ⅱ, 斎藤・長沢, 恒星社厚生閣

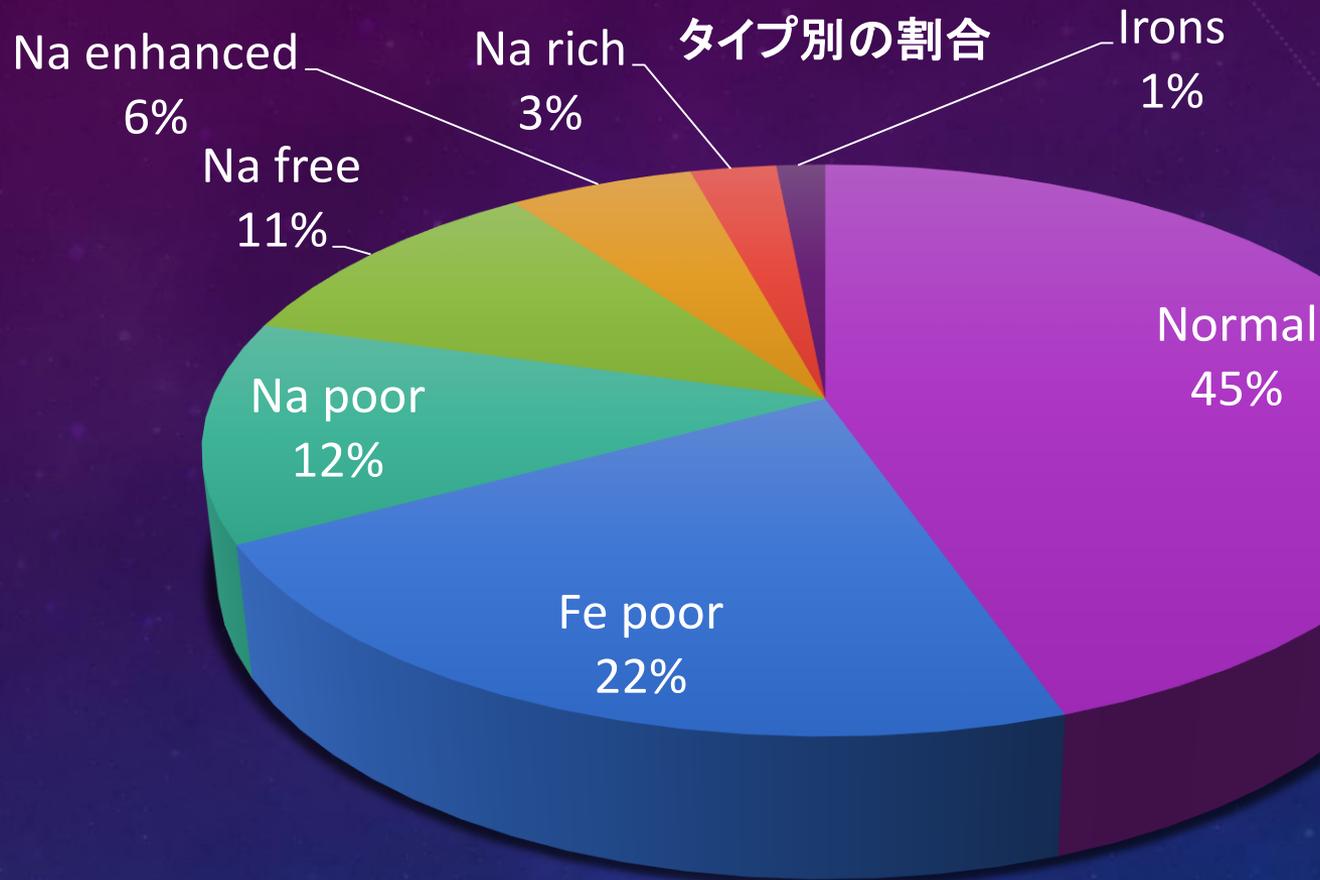
# 流星物理セミナー資料 20210702 関口

## 2018年10月から2021年2月のスペクトル解析結果と考察



2018年10月から2020年8月までと2021年2月までの一部のスペクトル解析結果の2257個です。カメラ8台の感度補正までのピーク比です。左が2021年2月までの一部の三角図です。右がタイプ別の三角図です。どちらも中央部分に集中が見られます。Feが50-80%になっているタイプが46個ありました。ほぼ全てのタイプのスペクトルが撮影されています。Na rich(60)とIrons(34)が少ないです。

# 流星スペクトルの得られたタイプ別の割合

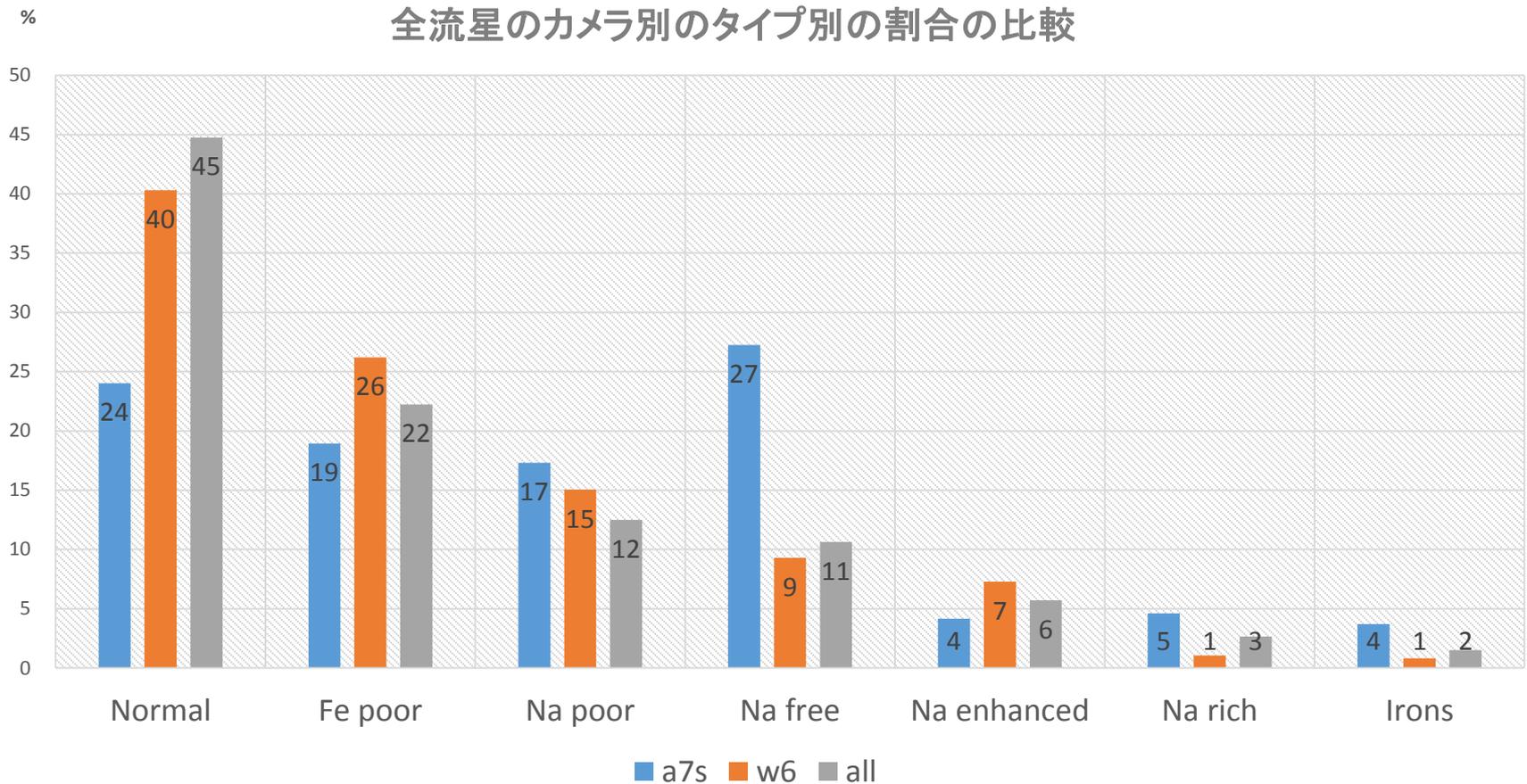


■ Normal ■ Fe poor ■ Na poor ■ Na free ■ Na enhanced ■ Na rich ■ Irons

2257個の全流星のスペクトルのタイプ別の割合です。Normalが45%と一番多かったです。次にFe poorでこの2つで約3/4になります。Na richとIronsは、合わせても全体の4%しかありませんでした。第3回スペクトル研究会の資料の時と殆ど変わっていません。

# 流星スペクトルの得られたカメラ別のタイプ別の割合

## 全流星のカメラ別のタイプ別の割合の比較

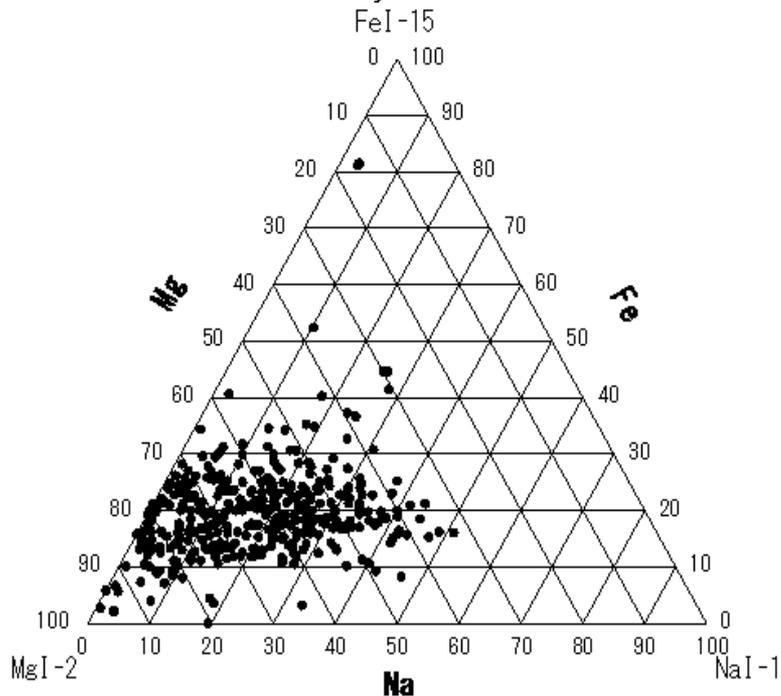


全流星2257個のスペクトルのカメラ別のタイプ別の割合です。a7SのみとW6のみと全体で比べました。W6と全体は、Normalが一番多かったですが。a7Sのみは、Na freeが多かったです。次に Fe poorとこの2つで約半分以上になりました。Na richとIronsは、第3回スペクトル研究会の資料の時と変わって少なくないです。Na freeは、ふたご群の影響があると思います。a7Sのみだけ暗いものを撮影したためと思われます。詳しくは、あとのスライドにあります。

# 流星スペクトルの得られた全Gem群の三角比

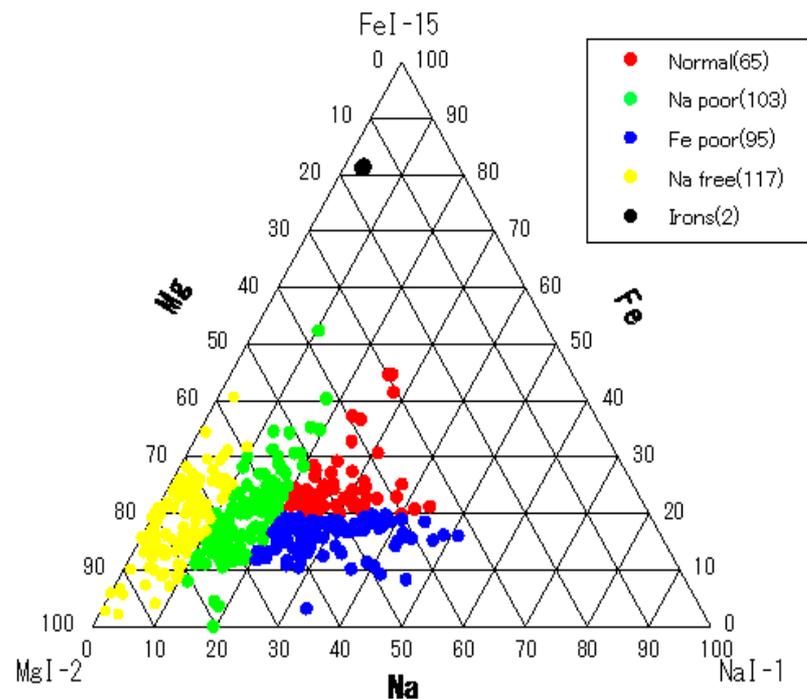
2018-2020 Gem 全カメラ途中 382個

Peak after sensitivity correction



2018-2020 Gem N=382

Peak after sensitivity correction

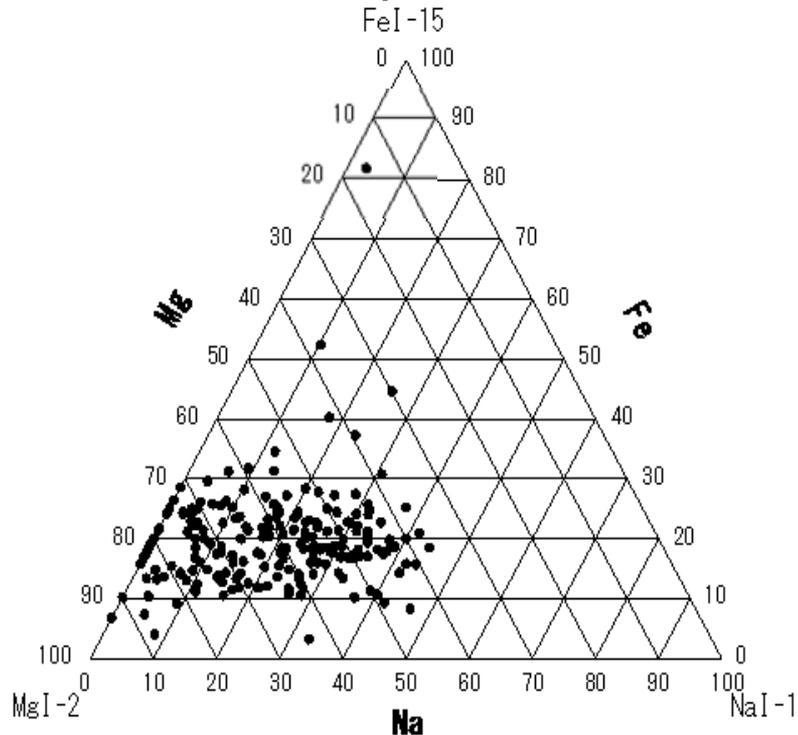


左は、2018年-2020年のふたご群の全流星382個のスペクトルの三角図の結果です。三角図の中央から左側によっています。Naの割合が0-40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-30%に集中しています。右は、タイプ別の結果です。4つのタイプが大体同じですが、Na poor とNa Freeがやや多くなっています。

# 流星スペクトルの得られたGem群の年別の三角比

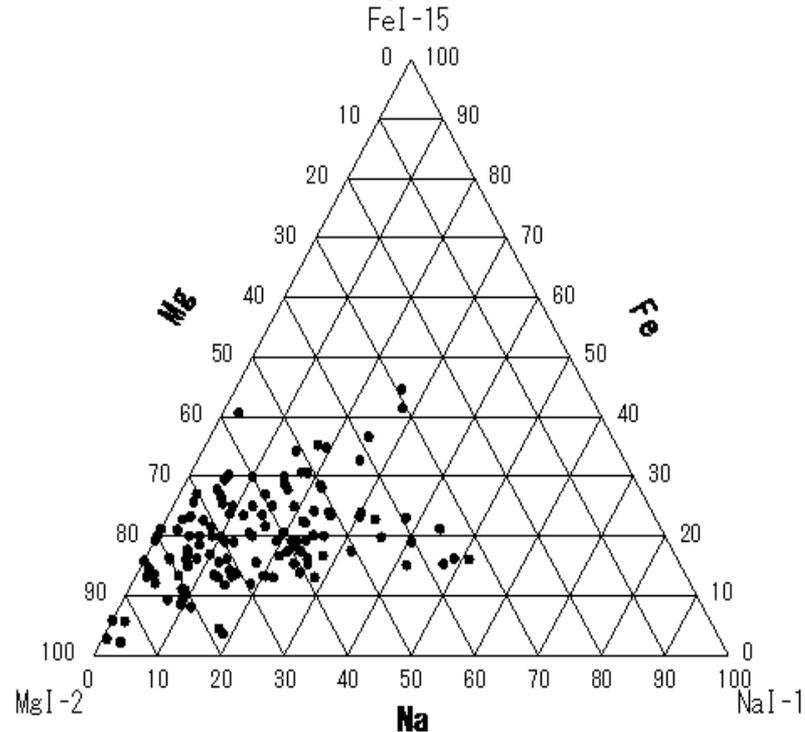
2019 Gem 全カメラ

Peak after sensitivity correction



2020 Gem 全カメラ途中 132個

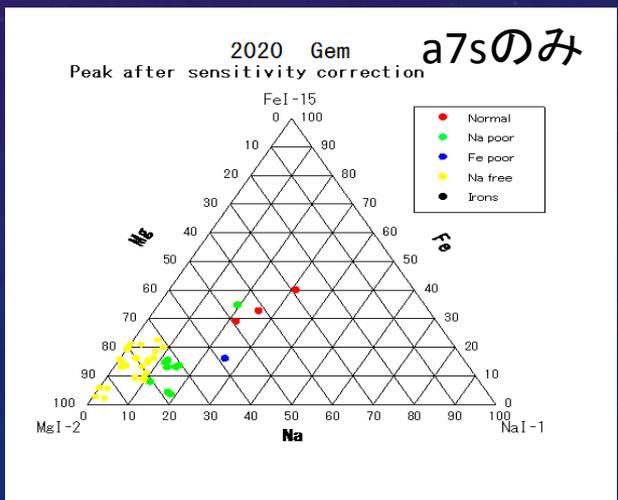
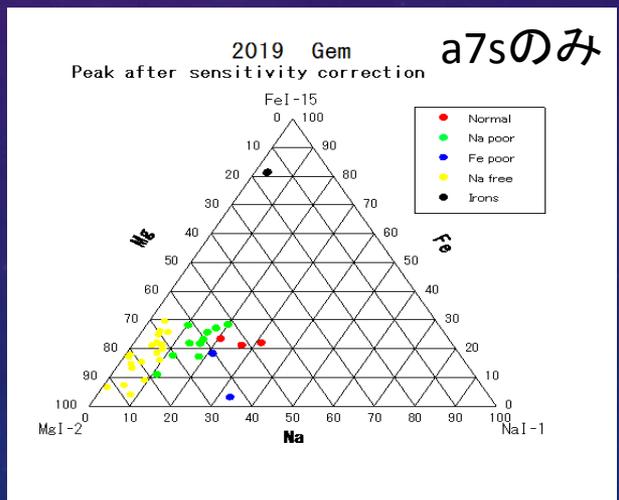
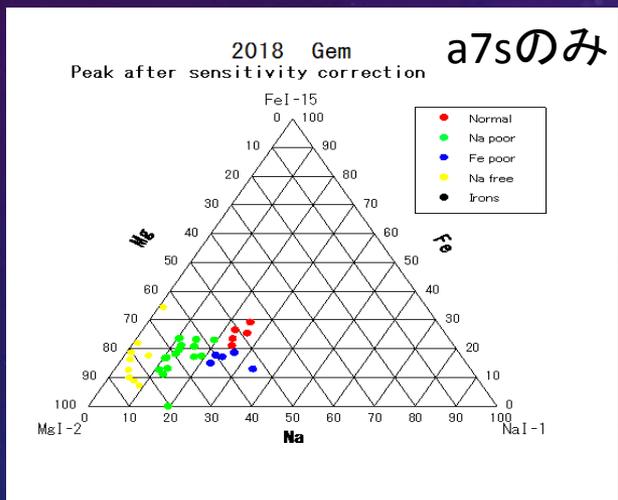
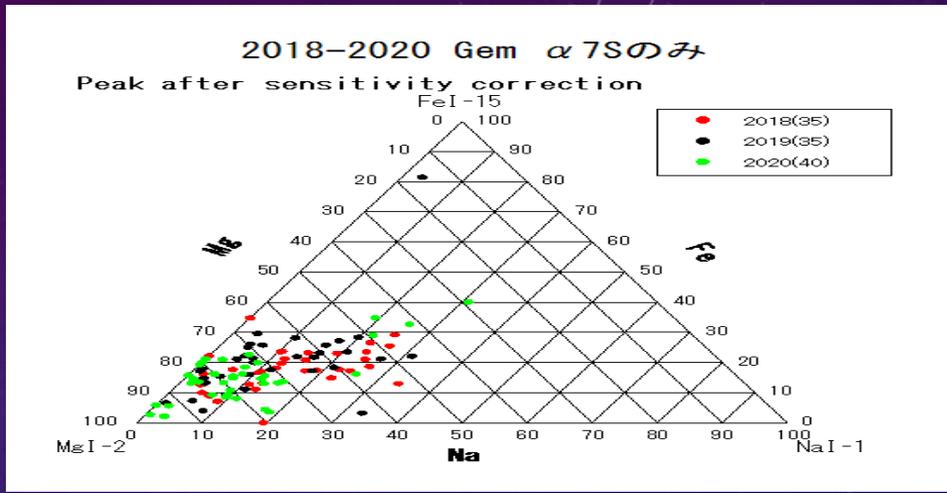
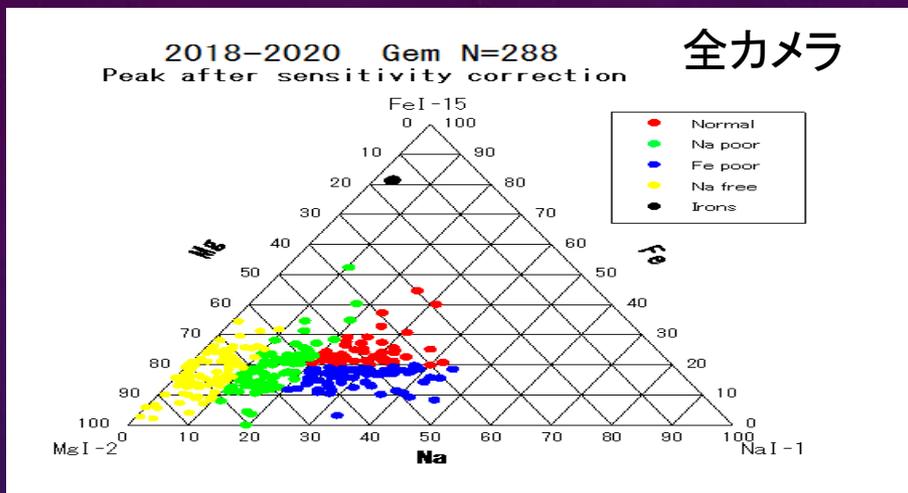
Peak after sensitivity correction



左は、2019年の全カメラによるふたご群のスペクトルの結果です。極大付近の明るいものが焦点距離の短いレンズでたくさん撮影され、Naの20-40%に集中が見られます。

右は、2020年の全カメラの一部によるスペクトルの結果です。2020年の方は、Naの割合が30-40%の集中が見られません。年によって分布の違いが見られます

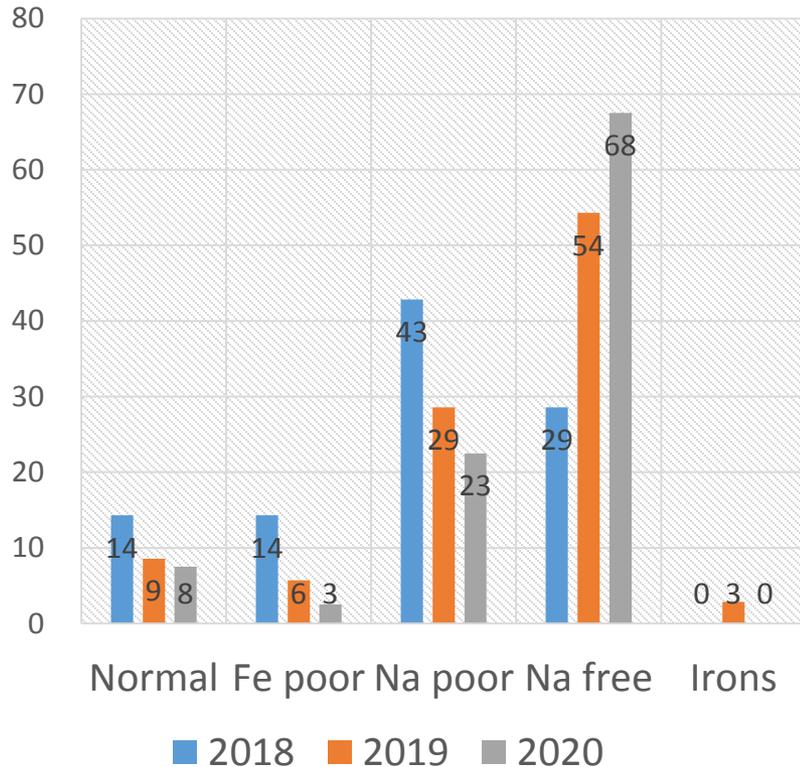
# 流星スペクトルの得られたGem群のタイプ別の三角比



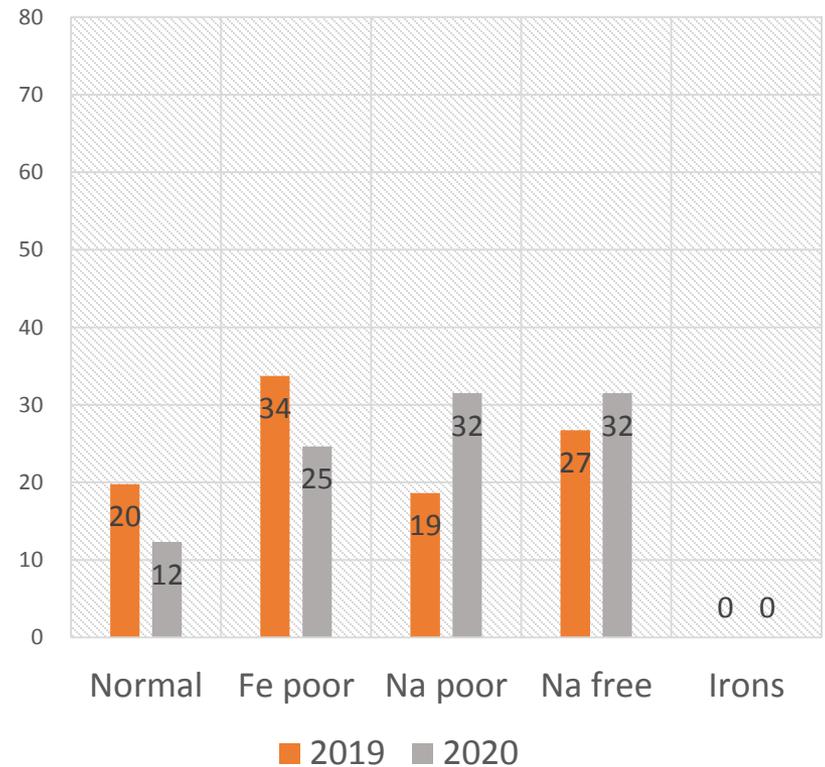
上の左はカメラのタイプ別三角図です。上の右は、 $\alpha$ 7sの50mmレンズのみのふたご群全部のタイプ別の三角比です。2018年は、赤点。2019年は、黒点。2020年は、緑点です。年によって分布の違いが見られます。下は、それぞれの年に分けたものです。違いが見られます。Normalは、少なく、Na free とNa poorが年によってばらつきが見られます。2018年は、Na poorがやや多かったですが、2019年と2020年は、Na Freeの方が多いです。

# Gem群のカメラごとの年によるタイプ別の割合

% ふたご群の年によるタイプ別の割合の比較 a7s

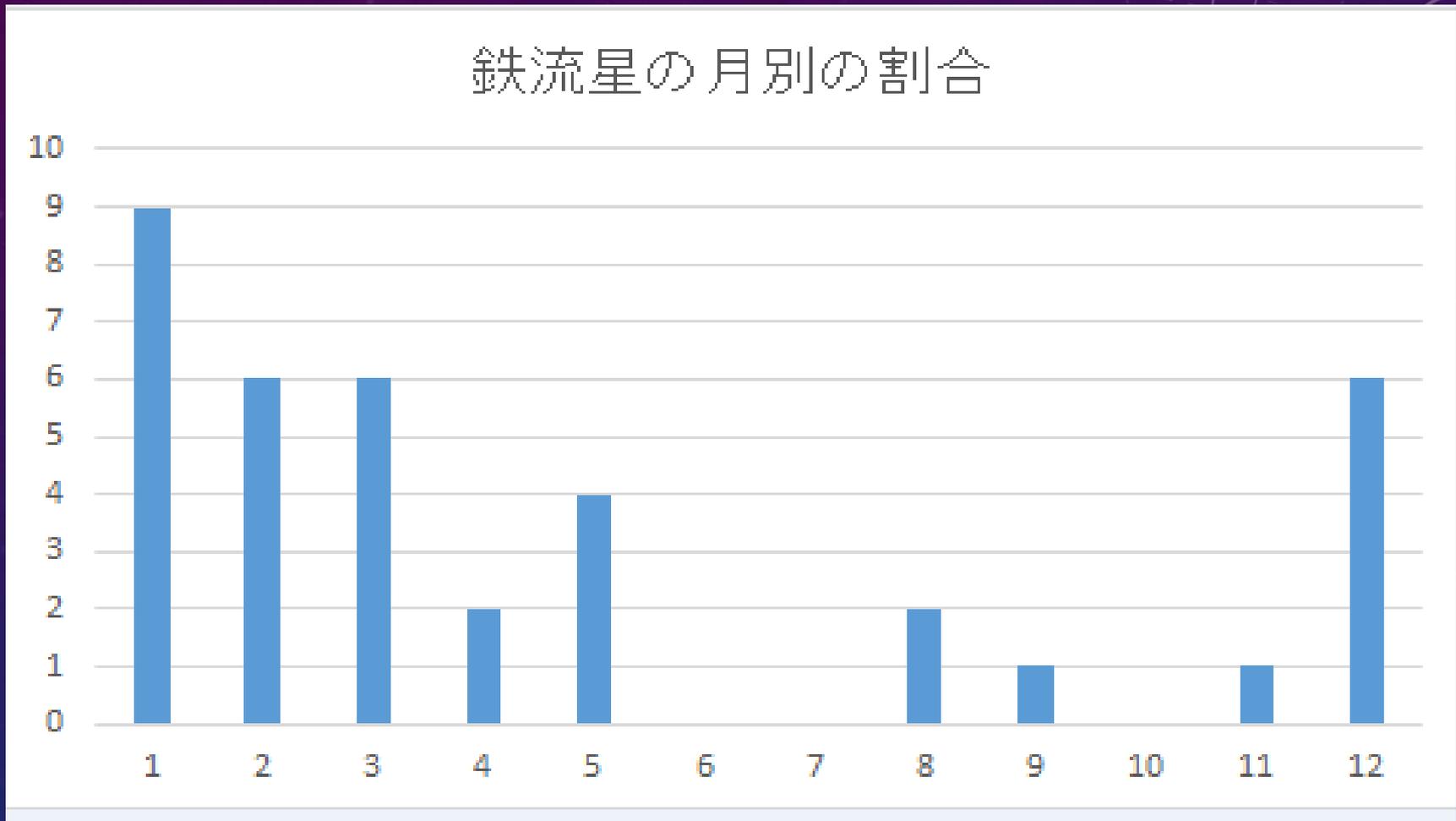


% ふたご群の年別のタイプ別の割合の比較 wカメラ



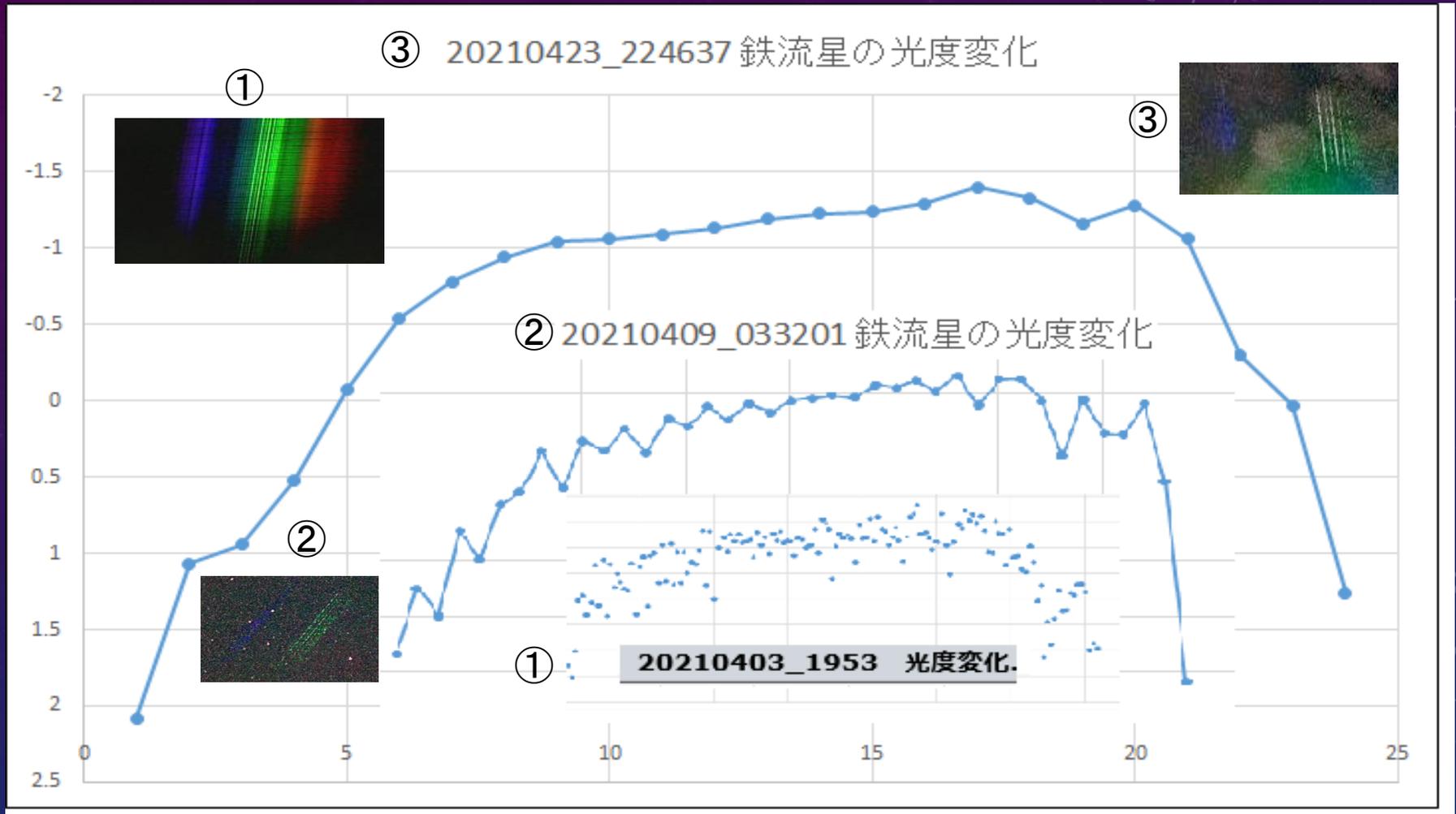
左は、a7sの50mmレンズのみのふたご群のタイプ別の割合の年による変化です。年によって割合の違いが見られます。NormalとFe poorは、少なく、Na free とNa poorが年によってばらつきが見られます。Na Freeは、毎年割合が増えています。Na Free以外の3つは、毎年割合が減っています。右は、wカメラの結果です。4つとも大体割合同じです。年よる傾向は、a7sと似ています。このことから、2020年の方がNormalタイプが少なかったことがわかります。

# 鉄流星の月別の割合



上は、鉄流星の月別の割合です。前田さんの結果と似たような傾向を示しています。12月から3月までが多く出現しています。空がよいことと観測時間が長いことも起因していると思います。6月から7月は、梅雨で観測できていません。10月も0個です。

# 2021年4月に得られた鉄流星のスペクトルの光度変化



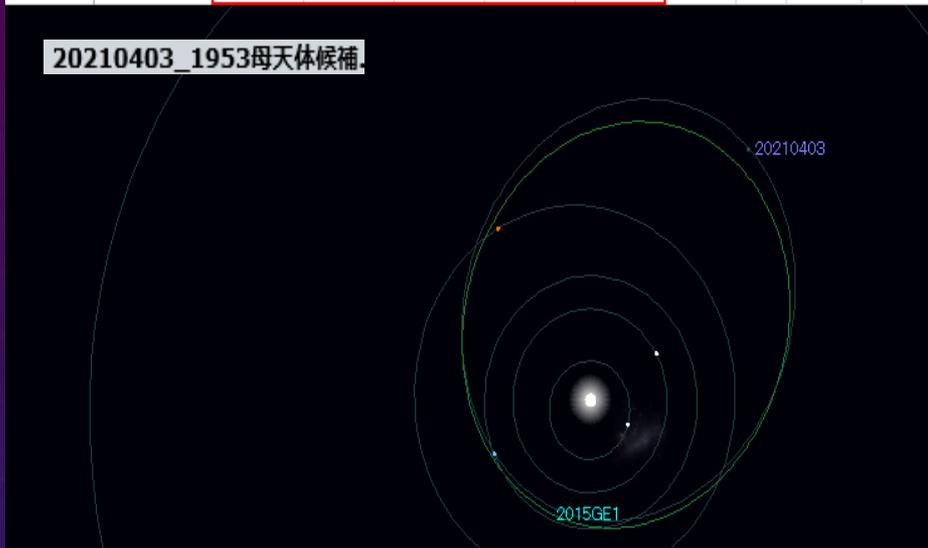
上は、2021年の4月に得られた鉄流星のスペクトルと本体の高度変化です。①のスペクトルは、永井氏が、②と③は、山崎氏が撮影されています。3つとも本体を私が撮影していて同時になっていました。私の本体の光度変化を元に比べてみました。よく似た変化を示しています。

# 4月に得られた鉄流星のスペクトルの母天体候補

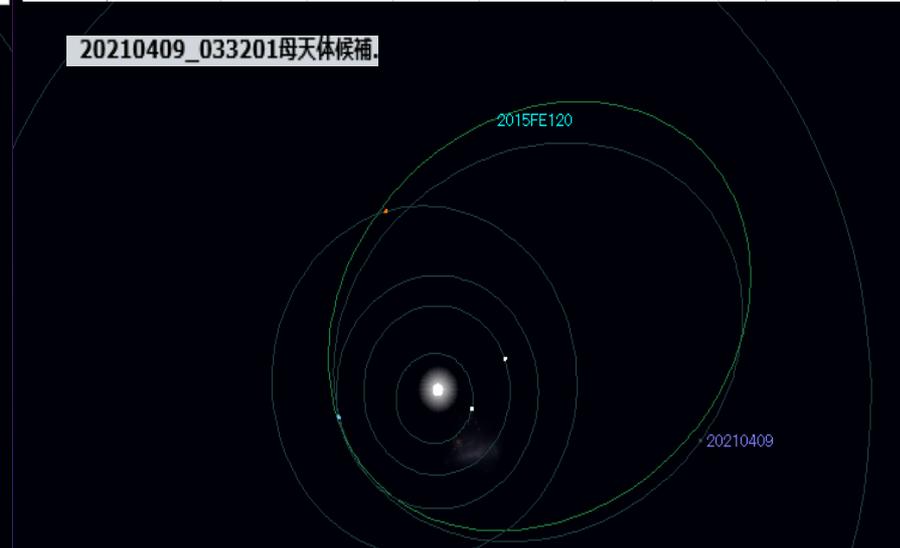
| Num  | Name | e     | q     | i     | $\omega$ | $\Omega$ | D判定  | $\lambda_{\pi}$ | $\beta_{\pi}$ |
|------|------|-------|-------|-------|----------|----------|------|-----------------|---------------|
| 0    | 基準天体 | 0.507 | 0.909 | 12.30 | 43.20    | 193.60   | 0.00 | 236.14          | 8.39          |
| 2015 | GE1  | 0.446 | 0.960 | 11.10 | 34.09    | 200.58   | 0.09 | 234.16          | 6.19          |

| Num  | Name  | e     | q     | i     | $\omega$ | $\Omega$ | D判定  | $\lambda_{\pi}$ | $\beta_{\pi}$ |
|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|------|-----------------|---------------|
| 0    | 基準天体  | 0.534 | 1.001 | 23.10 | 181.00   | 18.90    | 0.00 | 199.82          | -0.39         |
| 2015 | FE120 | 0.551 | 1.010 | 22.80 | 188.98   | 21.51    | 0.10 | 209.80          | -3.47         |

20210403\_1953母天体候補



20210409\_033201母天体候補

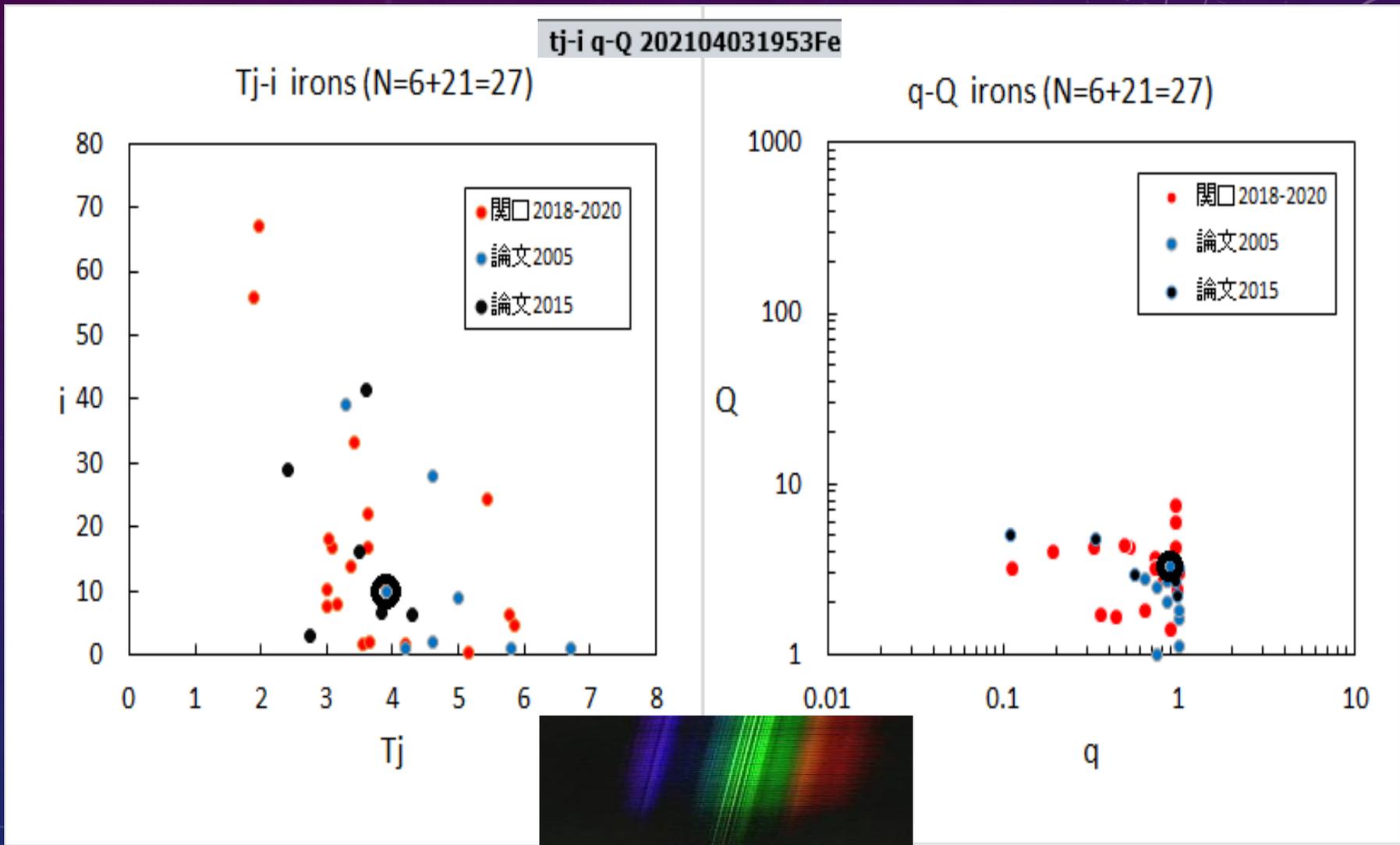


20210406-0423類似軌道の母天体候補

| Num  | Name        | e     | q     | i     | $\omega$ | $\Omega$ | D判定  | $\lambda_{\pi}$ | $\beta_{\pi}$ |
|------|-------------|-------|-------|-------|----------|----------|------|-----------------|---------------|
| 0    | 基準天体        | 0.695 | 0.647 | 7.30  | 274.02   | 14.01    | 0.00 | 288.06          | -7.28         |
| 2002 | GM5         | 0.695 | 0.647 | 7.30  | 274.02   | 14.01    | 0.00 | 288.06          | -7.28         |
| 2012 | HQ          | 0.676 | 0.666 | 6.16  | 271.09   | 23.36    | 0.09 | 294.46          | -6.16         |
| 2014 | UR116       | 0.728 | 0.564 | 6.57  | 286.86   | 5.94     | 0.11 | 292.90          | -6.29         |
| 2017 | TF5         | 0.745 | 0.580 | 5.57  | 272.12   | 15.87    | 0.09 | 288.01          | -5.57         |
| 2004 | VY14        | 0.650 | 0.686 | 7.02  | 230.37   | 60.40    | 0.12 | 290.56          | -5.40         |
| 2017 | UH6         | 0.616 | 0.571 | 9.37  | 259.70   | 31.51    | 0.13 | 291.07          | -9.21         |
| 2021 | 0423_224637 | 0.749 | 0.655 | 12.10 | 259.30   | 33.30    | 0.13 | 292.36          | -11.89        |
| 2021 | 0406_005608 | 0.704 | 0.661 | 9.20  | 259.70   | 15.80    | 0.16 | 275.37          | -9.05         |

2021年の4月に得られた3つの鉄流星の母天体候補です。

# 4月に得られた鉄流星の火球のTj-Iとq-Qの関係



2021年の4月3日の鉄流星の火球のTj-Iとq-Qの関係。2005年の論文と似た位置にありますが軌道等が少し似ているようですが、ラムダに30度のずれがあります。

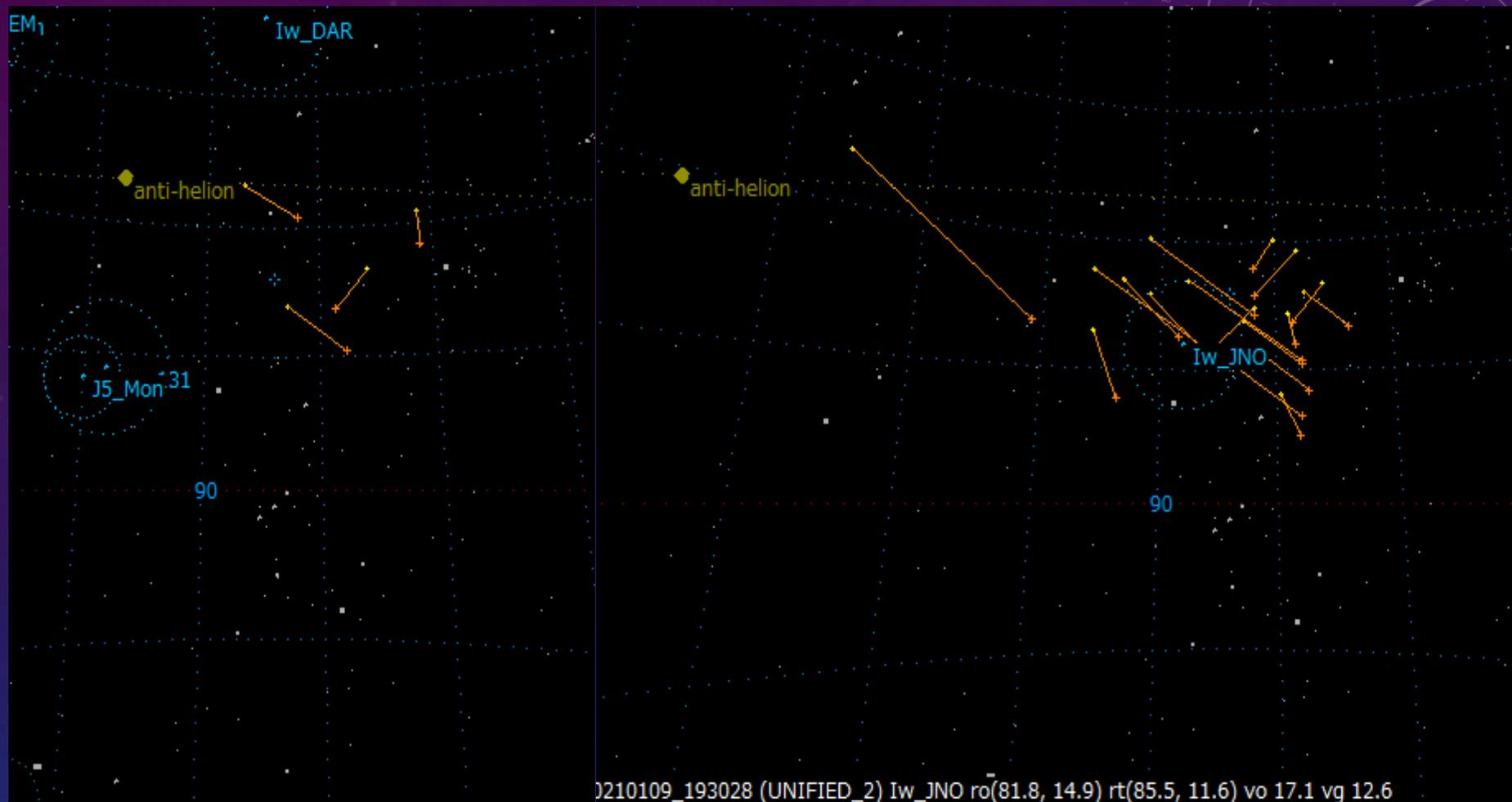
# 2020年12月下旬から1月初めに似た軌道の低速流星



| No   | ID       | 月  | 出現時刻            | 群名  | 群名  | mag  | dur | 速度  | ave/ve | Na    | Mg    | Fe      | 合計   | Na% | Mg% | Fe% | Na/Mg | Fe/Mg | Na/     | タイプ   | タイプ      |
|------|----------|----|-----------------|-----|-----|------|-----|-----|--------|-------|-------|---------|------|-----|-----|-----|-------|-------|---------|-------|----------|
|      |          |    | JST             | 単点  | 同時  | amag | sec | Vg  |        | 589.2 | 518.2 | 526-545 |      |     |     |     |       |       | (Mg+Na) | 前田氏論文 |          |
| 2465 | SZ600327 | 12 | 20201226_013236 | 同群○ | spo | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 14.4   | 268   | 171   | 85      | 524  | 51  | 33  | 16  | 1.57  | 0.50  | 0.61    | N6    | Normal   |
| 2468 | SZ600330 | 12 | 20201226_212600 | 同群○ | spo | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 11.1   | 291   | 85    | 104     | 480  | 61  | 18  | 22  | 3.42  | 1.22  | 0.77    | N7    | Na enhan |
| 2469 | SZ600331 | 12 | 20201228_195813 | 同群○ | spo | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 13.1   | 134   | 8     | 55      | 197  | 68  | 4   | 28  | 16.75 | 6.88  | 0.94    | N7    | Na enhan |
| 2470 | SZ600332 | 1  | 20210101_005755 | 同群○ | spo | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 13.5   | 652   | 473   | 607     | 1732 | 38  | 27  | 35  | 1.38  | 1.28  | 0.58    | N3    | Normal   |

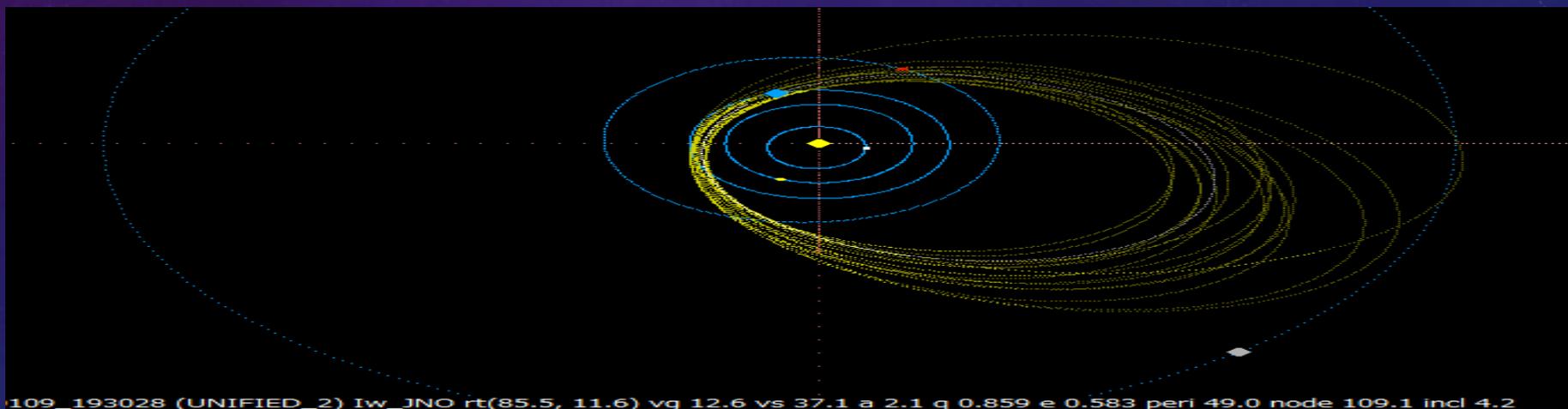
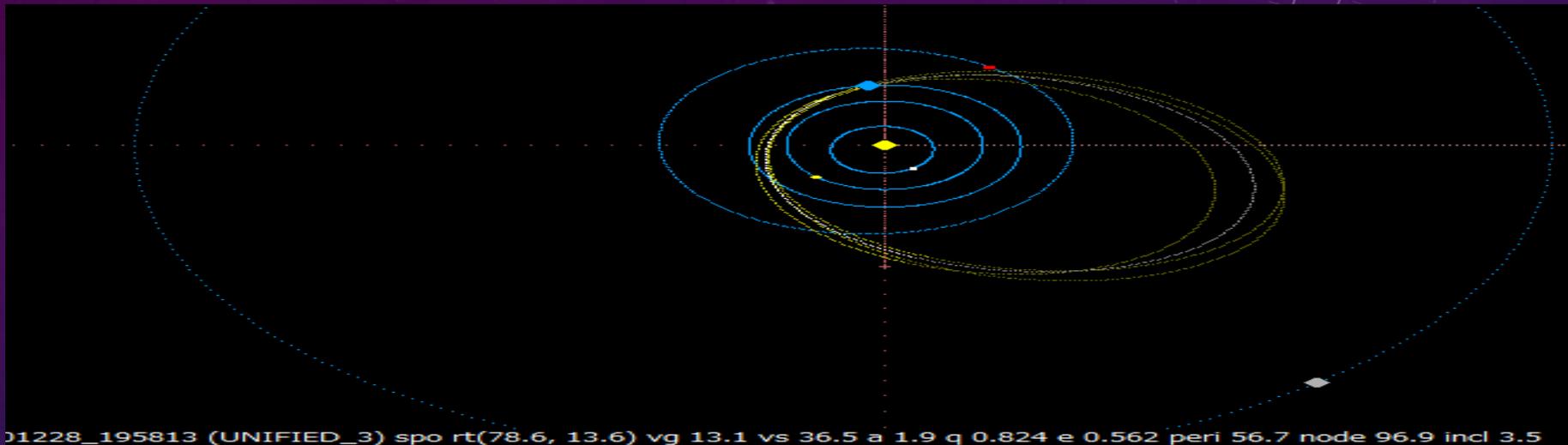
上の写真は、今回似た軌道のスペクトルと本体です。長めの3つは、高度変化がよく似ています。最後の1個も最初の淡い発光側の様子がにっています。低速のため静止画では、良く見えませんので動画の静止画から測定しました。低速のためNaが多めになっています。

# 12月下旬から1月初めに似た軌道の低速流星



左は、今回の4個のスペクトルの輻射点分布です。低速のため広がっています。右は、1月中旬から2月から始めのIw\_JNOの輻射点分布です。やはり広がっています。輻射点の赤経の移動量を0.3として判定させると1月上旬から判定され今回のスペクトルの流星でも判定されたものもありました。たぶん太陽黄経からみてもこの群の初期の活動と思われます。

# 12月下旬から1月初めに似た軌道の低速流星



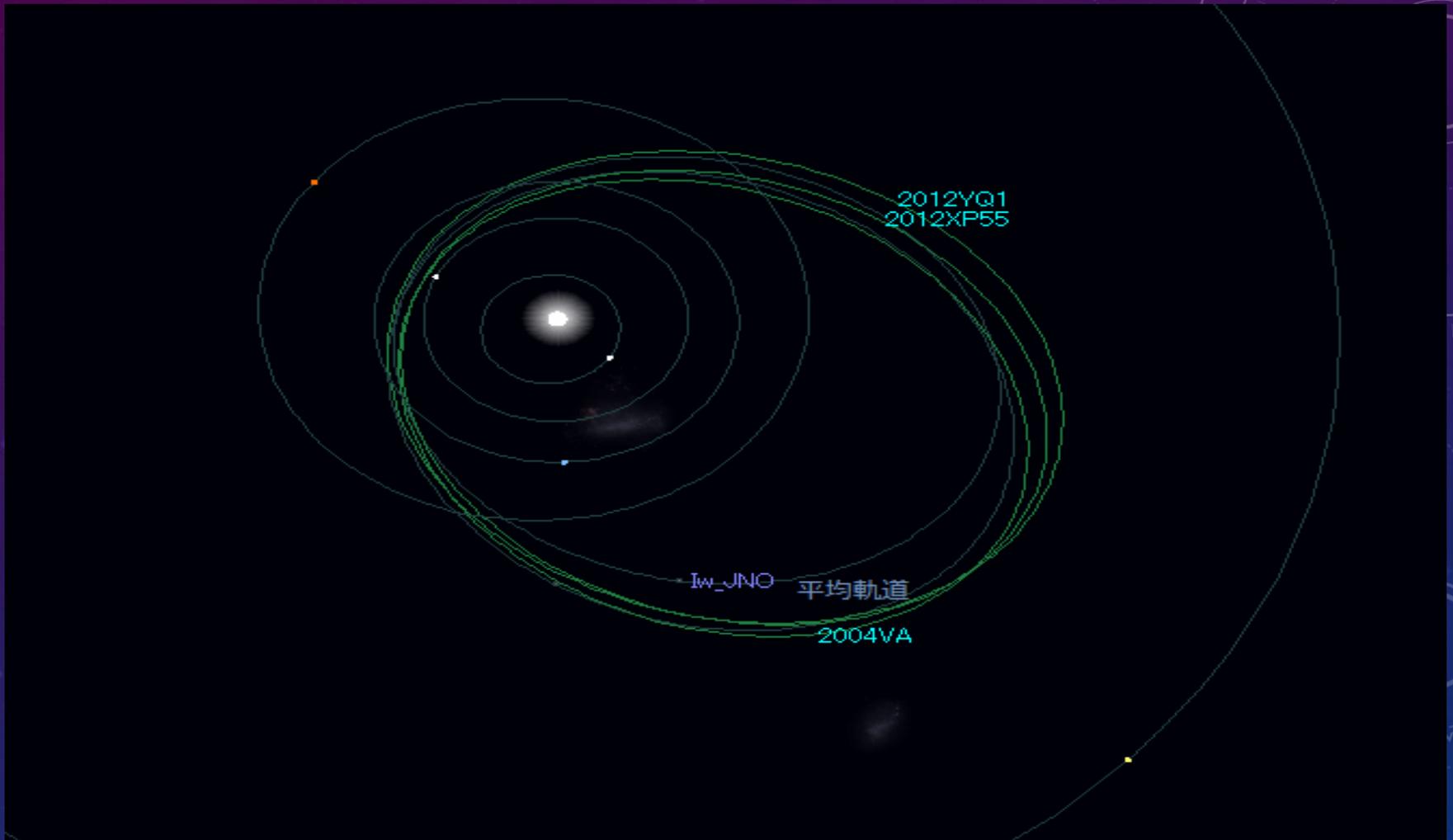
上は、今回の4個のスペクトルの軌道図です。低速のためよく一致しています。下は、1月中旬から2月から始めのIW\_JNOの赤経方向の移動量を入れて計算した軌道図です。似た軌道をしています。1月上旬から判定され今回のスペクトルの流星でも判定されたものもありました。軌道図からみてもこの群の初期の活動と思われます。

# 12月下旬から1月初めに似た軌道の低速流星

| _localtime       | _amag   | _ra_t | _dc_t | _vg  | _a  | _q   | _e   | _p  | _peri | _node | _incl | _stream | _H1  | _H2             |               |
|------------------|---------|-------|-------|------|-----|------|------|-----|-------|-------|-------|---------|------|-----------------|---------------|
| _20201226_013236 | -0.5    | 77.7  | 10.4  | 14.4 | 2.0 | 0.80 | 0.60 | 2.9 | 59.0  | 94.1  | 5.2   | _Ie_ORs | 86.4 | 75.7            |               |
| _20201226_212600 | -0.9    | 71.0  | 18.3  | 11.1 | 1.8 | 0.86 | 0.51 | 2.4 | 50.3  | 94.9  | 1.3   | _spo    | 78.0 | 50.4            |               |
| _20201228_195813 | 0.5     | 78.6  | 13.6  | 13.1 | 1.9 | 0.82 | 0.56 | 2.6 | 56.7  | 96.9  | 3.5   | _spo    | 83.5 | 55.5            |               |
| _20210101_005755 | -0.9    | 81.8  | 20.7  | 13.5 | 1.9 | 0.82 | 0.58 | 2.7 | 57.5  | 100.2 | 1.0   | _spo    | 81.8 | 57.3            |               |
| 平均軌道             | -0.5    | 77.3  | 15.8  | 13.0 | 1.9 | 0.83 | 0.56 | 2.6 | 55.9  | 96.5  | 2.7   |         | 82.4 | 59.7            |               |
|                  |         | _ra_t | _dc_t | _vg  | _a  | _q   | _e   | _p  | _peri | _node | _incl |         | D判定  | $\lambda_{\pi}$ | $\beta_{\pi}$ |
| 平均軌道             |         | 77.3  | 15.8  | 13.0 | 1.9 | 0.83 | 0.56 | 2.6 | 55.9  | 96.5  | 2.7   |         | 0.00 | 153.55          | 2.92          |
| Iw_JNO           |         | 88.0  | 12.0  | 12.0 | 1.9 | 0.85 | 0.52 |     | 51.7  | 112.5 | 4.1   |         | 0.12 | 164.13          | 3.22          |
| 母天体候補            | 2012YQ1 |       |       |      |     | 0.87 | 0.57 |     | 42.1  | 120.2 | 5.2   |         | 0.06 | 162.13          | 3.45          |
| 2004VA           |         |       |       |      |     | 0.77 | 0.60 |     | 43.1  | 109.6 | 3.7   |         | 0.08 | 152.71          | 2.53          |
| 2012XP55         |         |       |       |      |     | 0.78 | 0.60 |     | 77.0  | 80.2  | 2.8   |         | 0.08 | 157.32          | 2.73          |

上は、4つのスペクトルの得られた軌道などです。低速のため輻射点は、広がっていますが軌道は、そろっています。1日に1個ですが確実に群活動をしていると思われます。IAUの軌道リストを見るとFireball streamsで1月1日から2月4日 $\mu$ -Oriとなっています。母天体候補は、2003 AC23? となっています。この群の平均軌道からでは、母天体候補は、2012YQ1となりました。また、4つのスペクトルの母天体候補は、2004VAと2012XP55となりました。複合群の可能性もあるかもしれません。

# 12月下旬から1月初めに似た軌道の低速流星の母天体等軌道図



上は、今回の4個のスペクトルの得られた低速流星の平均軌道の軌道図とIw\_JNOと母天体候補の小惑星の軌道図です。2004VAがよく似た軌道をしています。後の二つも類似しています。これらの軌道図からみても今回のこの低速群は、 $\mu$ -Ori群とIw\_JNO群は、同じ群でこの低速群の初期の活動と思われる。

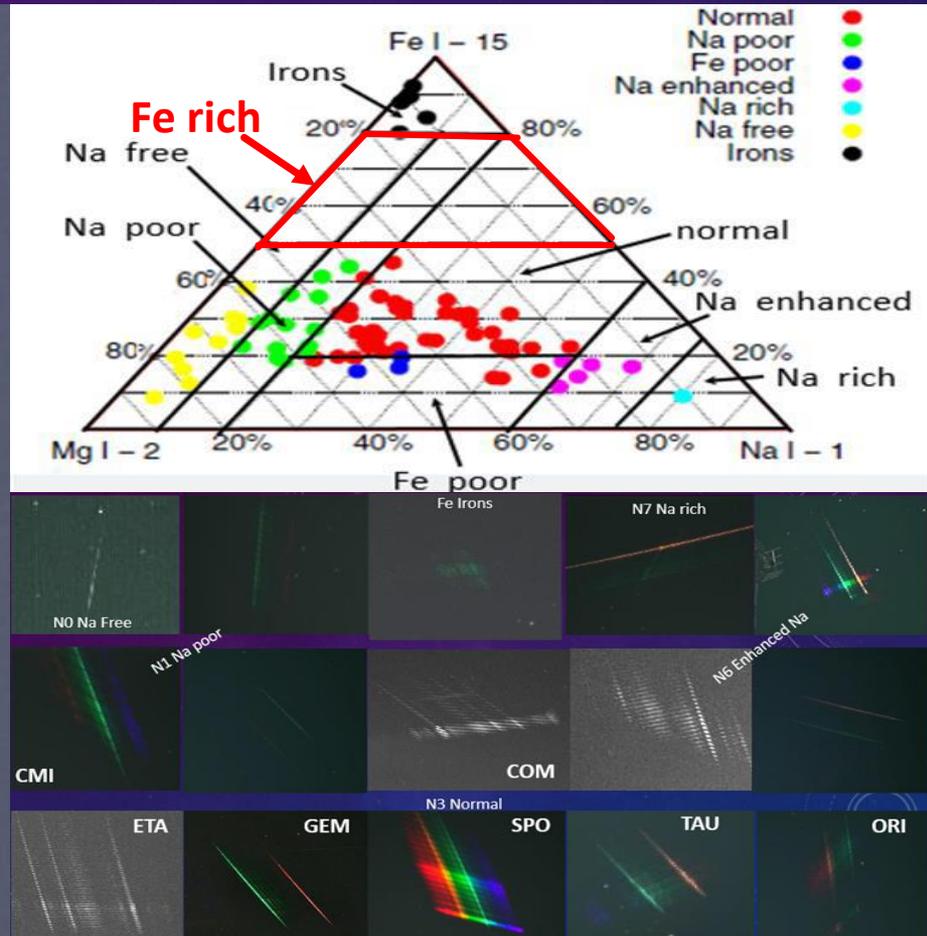
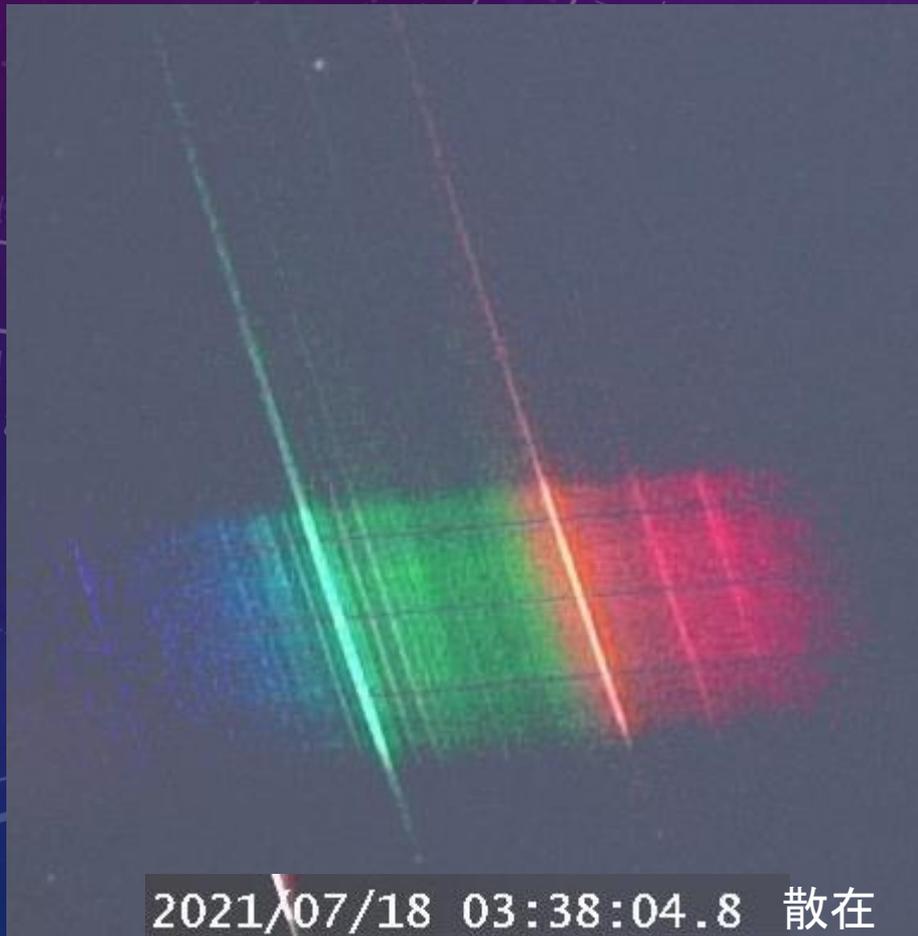
# 流星スペクトルの解析のまとめ

- 8台のカメラの観測で、ほぼ2年4か月で2200個近くのスペクトルが得られました。今回のデータは、2018年10月から2021年2月の一部までの解析をしました。7つのタイプが殆ど得られました。Feが50-80%になっているタイプが46個得られました。
- 解析結果を元にGem群の三角図を作成し考察しました。今回は、ふたご群の年とカメラによる三角比やタイプ別の割合を比べました。群による年やカメラによって違いが見られました。
- 鉄流星の月別の出現の割合も調べました。前田さんの結果と似た傾向を示した。
- 2021年の4月の鉄流星の軌道比較から母天体候補を探しました。母天体候補をいくつか見つけることができました。今回は、低速で比較的よく一致していると思います。過去の鉄流星との類似軌道は、やはり、ありませんでした。4月3日の火球の励起温度は、約2960度となりました。
- 2020年12月下旬から2021年1月初めに似た軌道があり、調べた結果、1月から2月の $\mu$ -Ori群とlw JNO群と関連があり初期活動をとらえたと言えます。また、母天体候補も見つかりました。
- 2018年10月から2020年8月までの詳細の結果は、以下に公開しています。

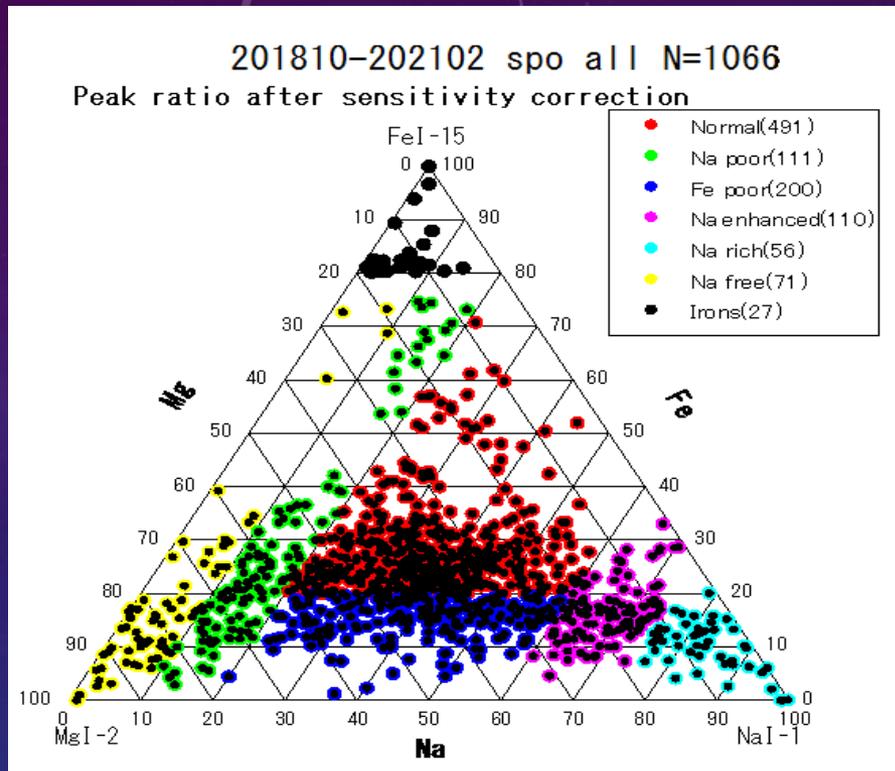
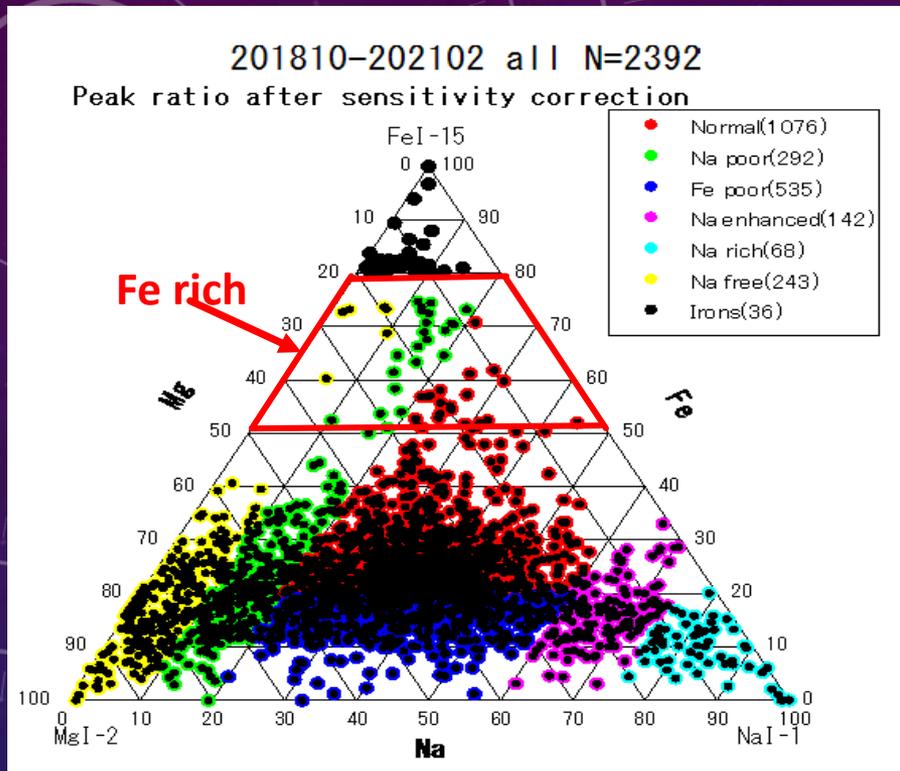
<http://msswg.net/msonline/MSS19-spectrum-20201125-Sekiguchi-2018to20.pdf>

# 2018年10月から2021年2月までの スペクトル解析結果と考察

関口 孝志 20211103

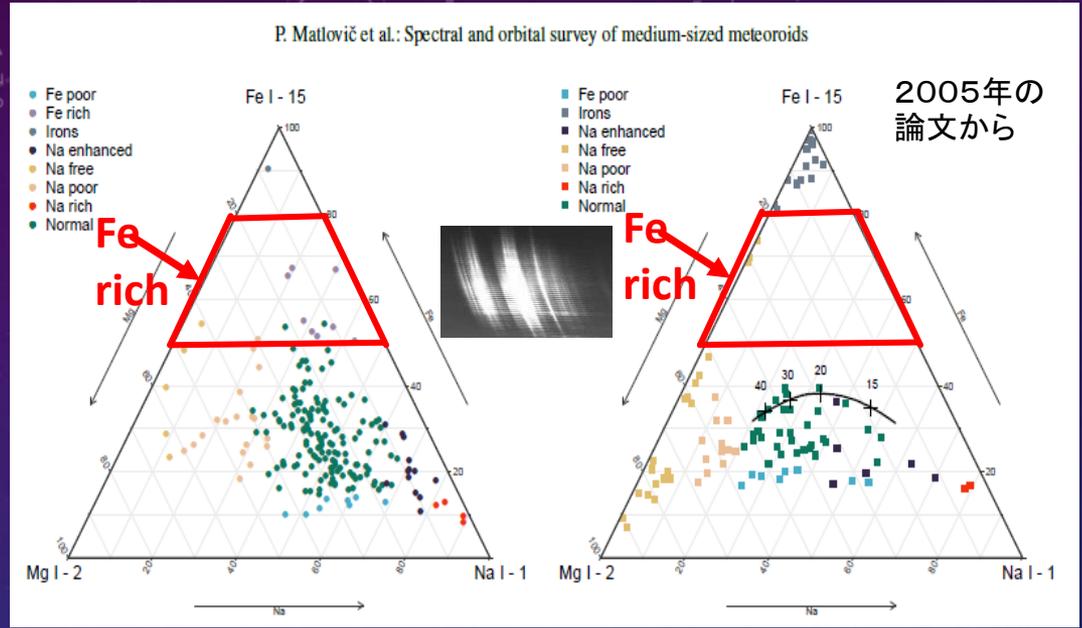
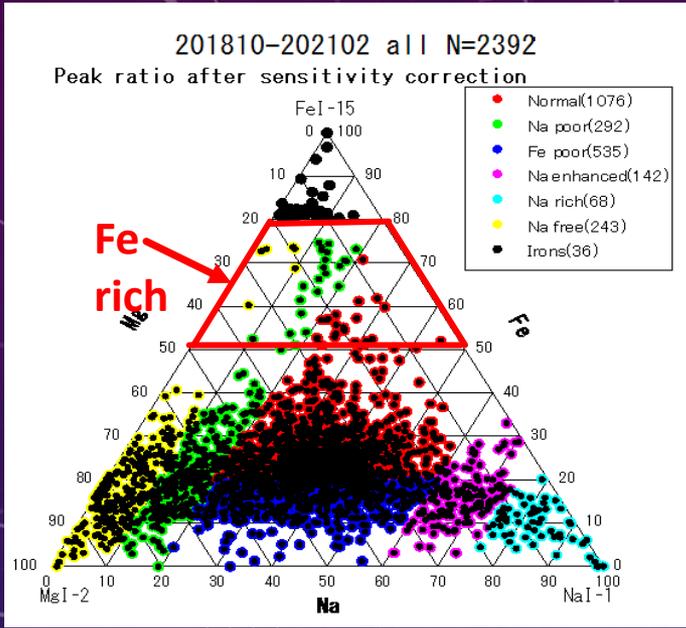


# 2018年10月から2021年2月のスペクトル解析結果と考察



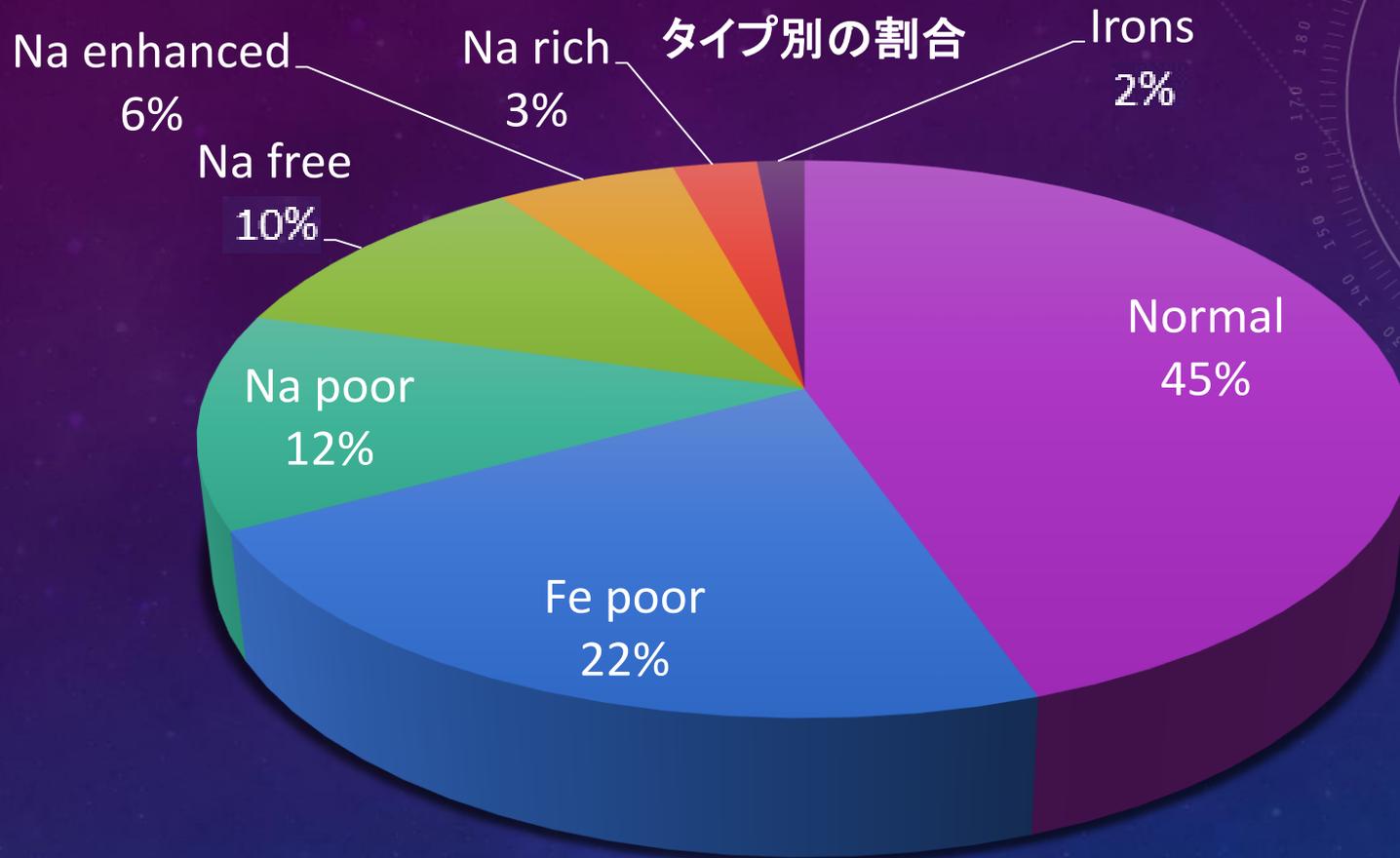
2018年10月から2021年2月までの2392個のスペクトル解析結果です。カメラや解析方法やソフトや分類の仕方は、2019年の流星会議の私の資料を参考にしてください。最後のスライドにアドレスがあります。グラフは、カメラ8台の感度補正までのピーク比です。左が全流星のタイプ別の三角図です。中央部分に集中が見られます。Feが50-80%になっているタイプが54個ありました。ここを Fe richとして新グループとしている論文(2019年PAVOL MATLOVIĆら)もあります。全てのタイプのスペクトルが撮影されています。Na rich(68個)と Irons(36個)が少ないです。右が1066個の散在判定のみのタイプ別の三角図です。やはり、中央部分に集中が見られFeが40%以上の流星とNa richとNa enhancedと Ironsの流星の殆どが散在流星になっています。2020年5月までの分布とあまり変わりません。

# タイプ分類の2005年と2019年の論文との比較



前のスライドのFeが50-80%になっているタイプを Fe richとして新グループとしている論文 (2019年PAVOL MATLOVIČらのSPECTRAL AND ORBITAL SURVEY OF MEDIUM-SIZED METEOROIDS)との比較です。右側の三角図の分類は、この論文で、2005年のJ. BOROVIČKA, ET AL ICARUS 174, 15 の論文と比較しています。一番右がもとになっている2005年の論文の三角図です。ここには、Fe richが一つもありません。なので7つのタイプで分類されています。真ん中が2019年の論文で8つのタイプに分類されています。しかも、2005年の分類とは、少し異なっています。8個がFe richになっています。この領域には、4個の別のタイプも含まれています。左が私の結果です。Fe richのこのタイプが54個ありました。この図は、2005年の分類でしているので、3つのタイプが合わさっています。しかし、どうも1つのタイプにした方がよいと思っていた所で、この論文を見つけ、納得しました。

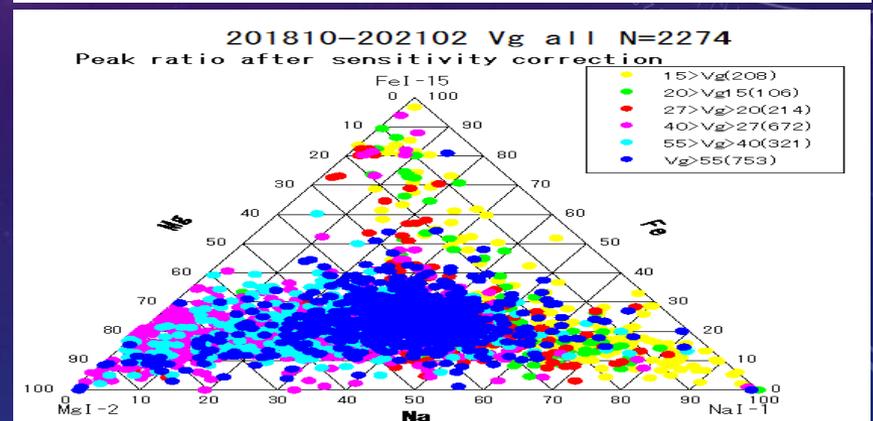
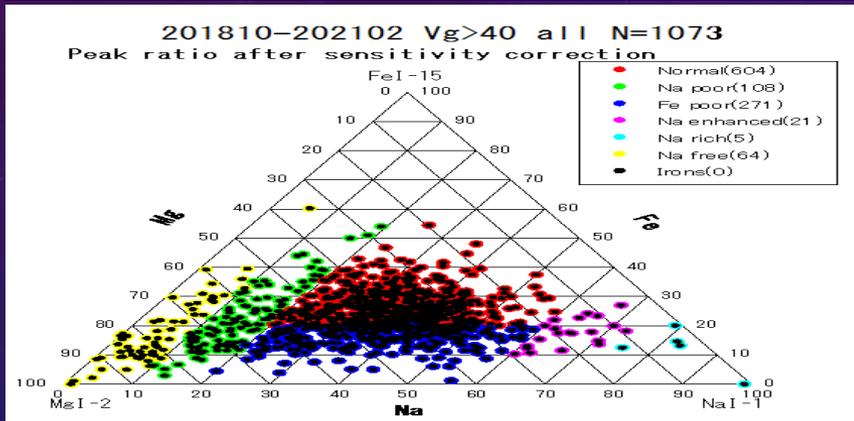
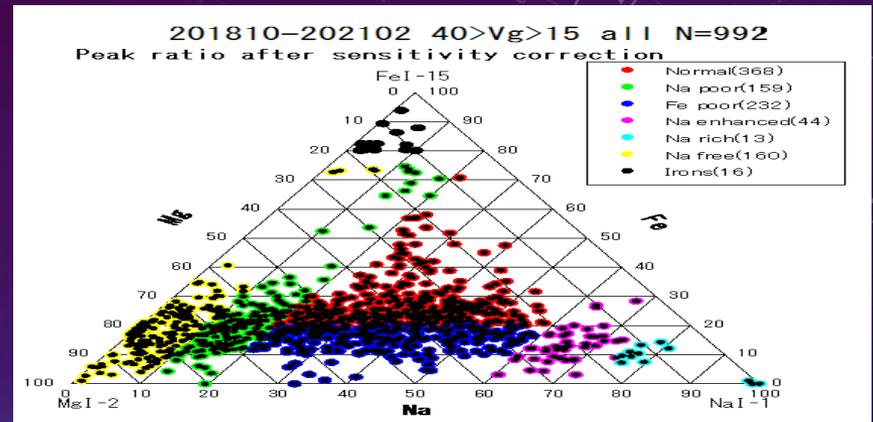
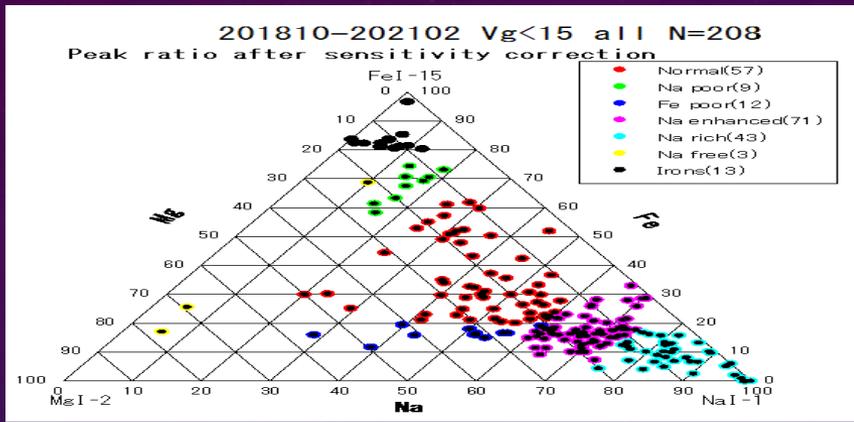
# 流星スペクトルの得られたタイプ別の割合



■ Normal ■ Fe poor ■ Na poor ■ Na free ■ Na enhanced ■ Na rich ■ Irons

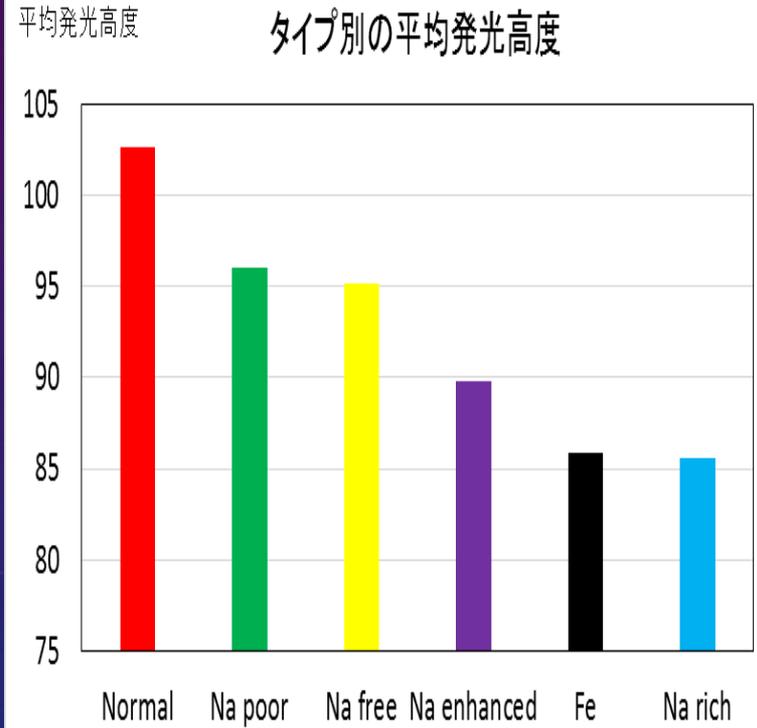
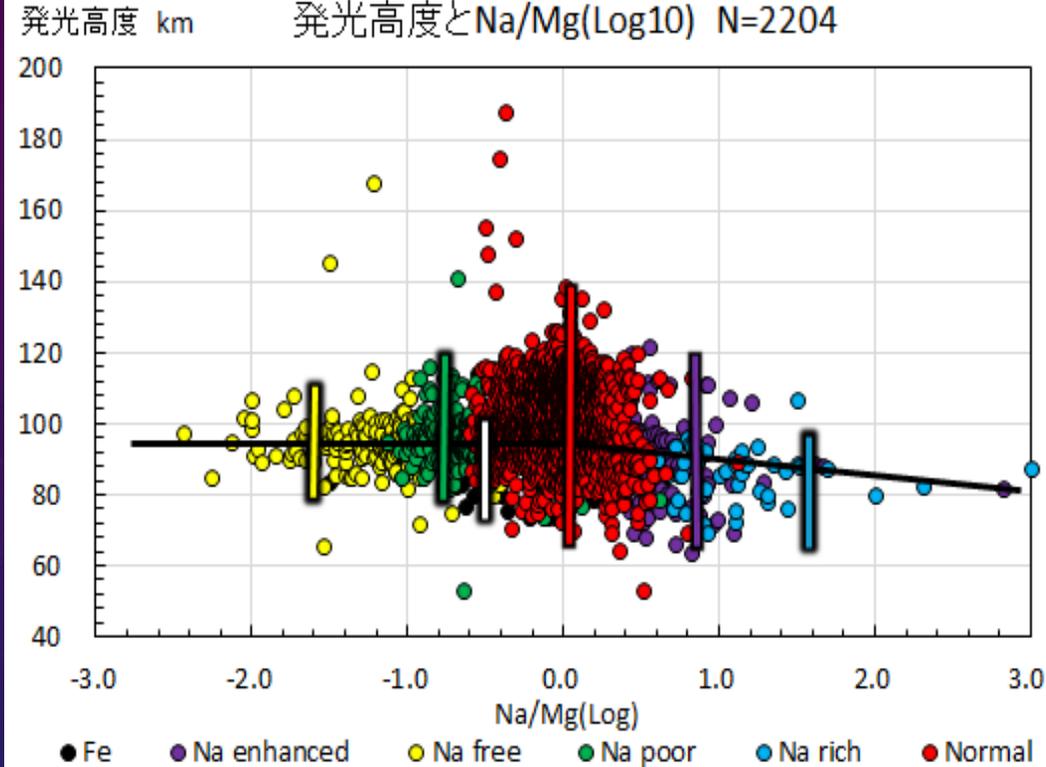
2392個の全流星のスペクトルのタイプ別の割合です。**Normalが45%と一番多かった**です。次にFe poorでこの2つで約3/4になります。**Na richとIronsは、合わせても全体の5%**しかありませんでした。Fe richは、分類していません。第3回スペクトル研究会等の資料の時と殆ど変わっていません。

# 全流星の速度によるタイプ別の三角図



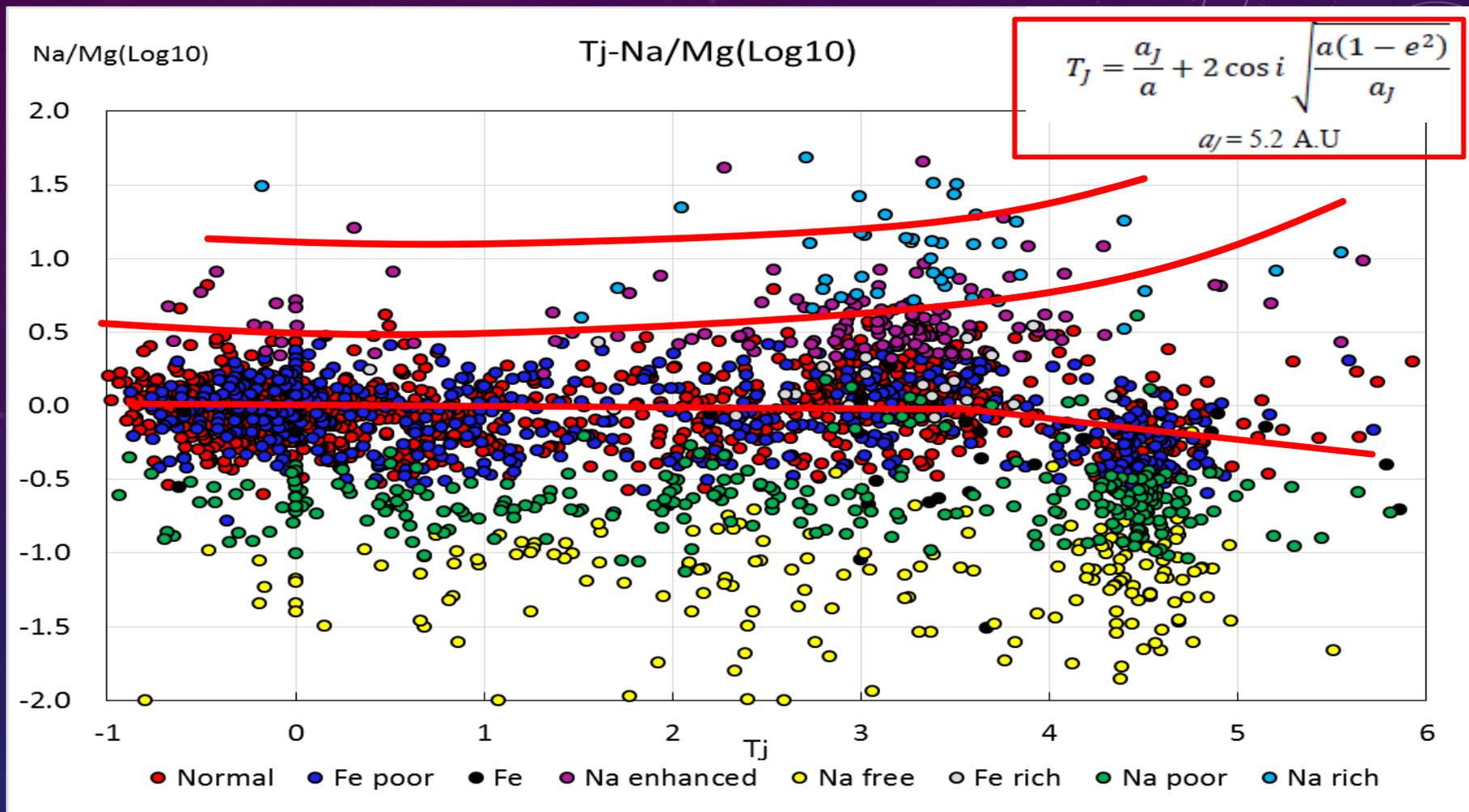
全流星の速度でのタイプ別の三角図です。左上は、Vgが**15km以下**です。7つの全部のタイプがみられます。**Mgの量は、0-30%の間に集中**しています。FeとNaの量の差で各タイプに分かれています。右上は、 $40\text{km} > Vg > 15\text{km}$ です。こちらも7つのタイプが見られます。IronsとNa enhancedは、左上と同じくらい見られます。Na richは、少なくなっています。Na freeとNa poorとNormalとFe poorは、Feの量が10-40%に集中しています。Na poorとNormalは、やや鉄の量が多いものが中央の上に固まっています。左下は、**Vgが40Km以上**です。Ironsは、ありません。Na richとNa enhancedが少し見られます。Na freeとNa poorとNormalとFe poorは、右上より集中が少なくなっています。**Normalが一番多く中央の下に集中**しています。右下は、全流星の速度別の三角図です。この図から、**IronsとFe richとNa richとNa enhancedは、低速流星が多い**ということがわかります。

# 全流星の発光高度とNa/Mgの関係等



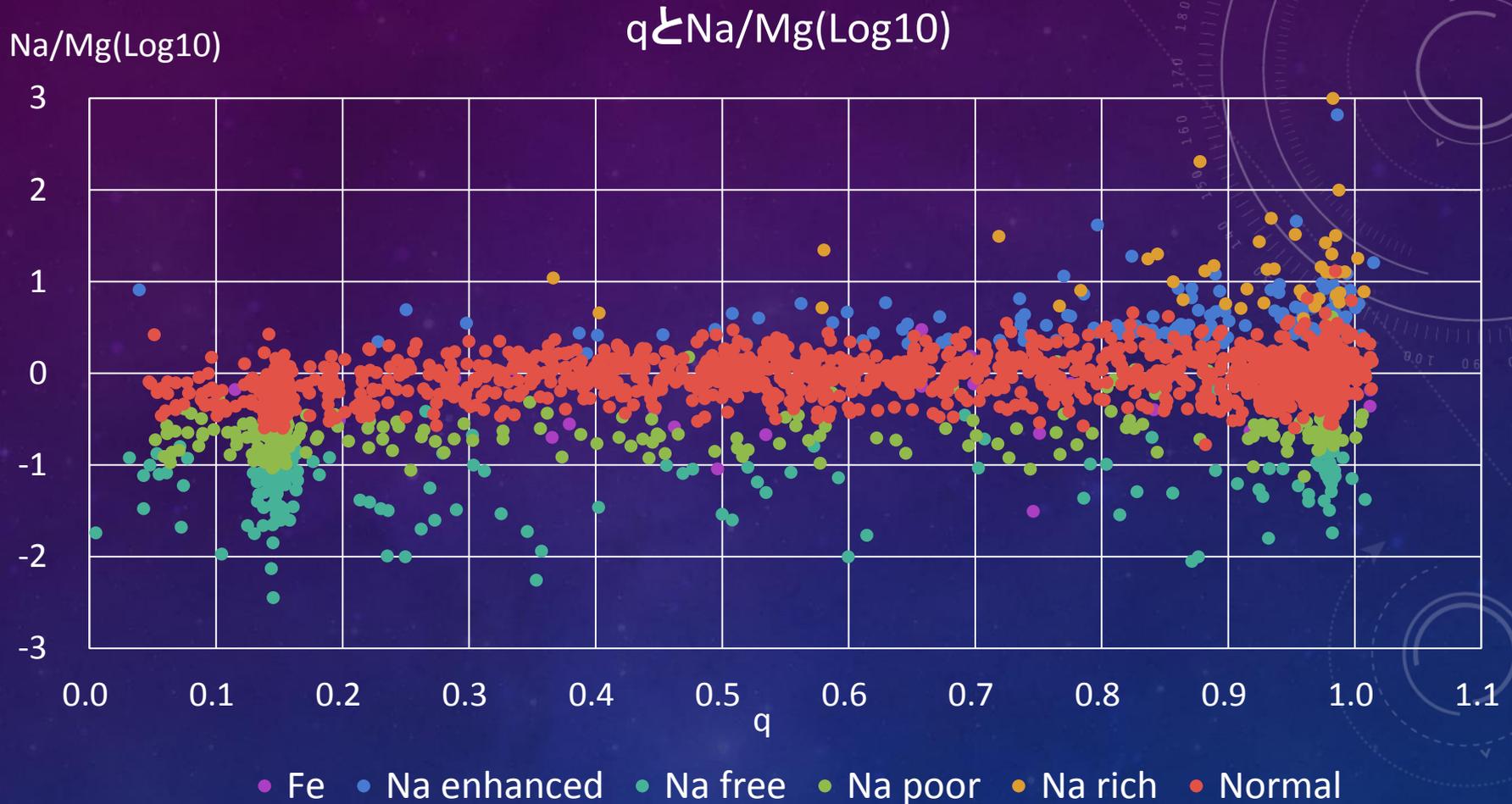
左は、全流星の発光高度とNa/Mg比です。どのタイプ(Fe richとFe poorは、分類してなくNormalに含めています。)も100km付近からの発光が見られます。Na/Mg比が0以下では、集中している部分が殆ど100kmです。Na/Mg比が0以上では、100kmから80kmへと低くなっています。タイプでは、Na enhancedとNa richです。これらは、低速流星が多いので低くなっているのがわかります。右は、タイプ別の平均の発光高度です。これを見ても、**Na enhancedとNa richとIron(Fe)が低速が多く低くなっている**ことがわかります。前のスライドからも**NormalとNa poorとNa freeは、中高速が多く発光点が高くなっています**。Normalに比べるとNa poorとNa freeは、暗い流星が多く高度の差が小さくなっています。

# 全流星のTj(Tisserand parameter)とNa/Mgの関係



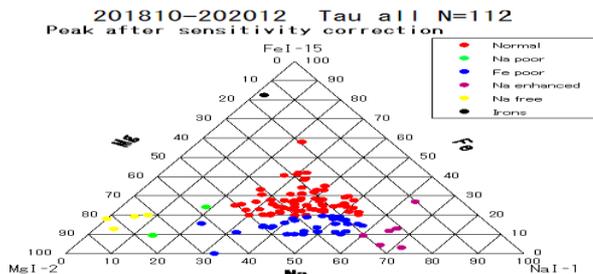
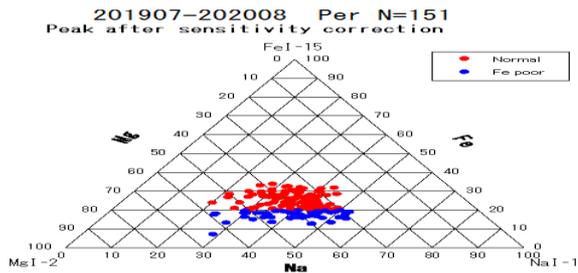
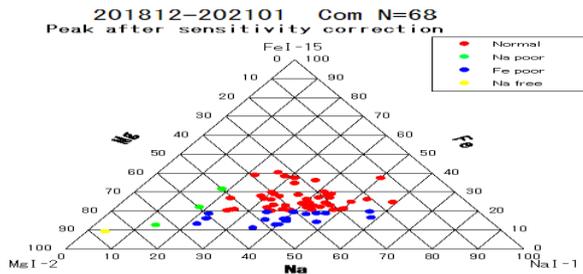
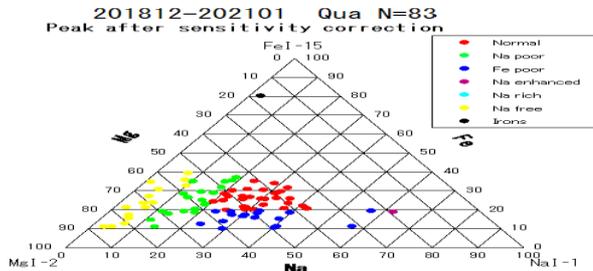
全流星のTj(Tisserand parameter 上の赤四角の式  $a_j$ は、木星の軌道長半径)とNa/Mg比です。Normal とNa poorとNa freeは、特に変化が見られません。Na enhancedとNa richは、Tj 3以下でほぼ一定ですが、Tj 3からNa/Mgの比の増加がやや見られます。Fe poorは、Tj 3以上でNa/Mgの比の減少がやや見られます。

# 全流星のq(近日点距離)とNa/Mgの関係等



上は、全流星のqとNa/Mg比です。これをみても、**Na richとNa enhancedがqが小さくなるに従ってNa/Mg比が低くなっていることがわかります。**前のスライドとNaが減る似た傾向があります。**Na poorとNa freeは、もともとNaの量が少ないので特に大きな変化が見られません。**Normalは、qが0.35以下になると少しずつ低くなっています。

# Qua群とCom群とPer群とTau群の三角比



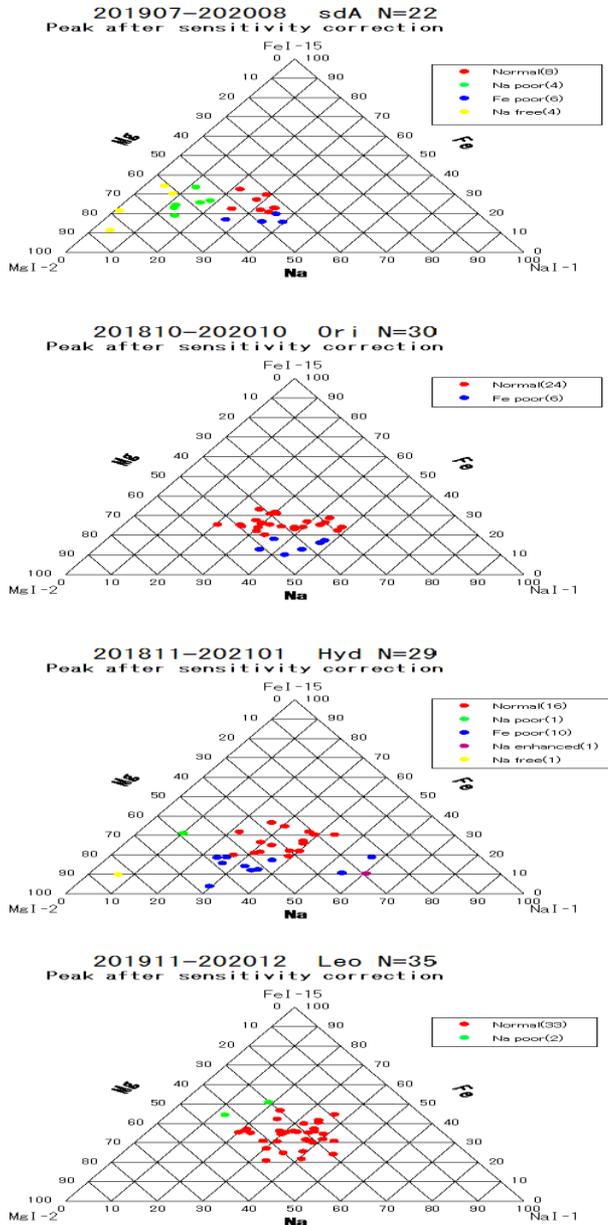
1つ目は、2018年-2021年の**しぶんぎ群**の全流星83個のスペクトルのタイプ別の三角図です。三角図の中央から左側によっています。Naの割合が0-40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-40%に集中しています。**4つのタイプが多く大体同じ割合**で分布しています。後のスライドのふたご群と似ています。

2つ目は、**かみのけ群**の全流星68個の結果です。**NomalとFe poorが殆ど**で中央に集中しています。Naの割合が30-50%に集中が見られます。鉄の割合は、10-40%に集中しています。Na poor とNa Freeが少しあります。

3つ目は、2019年から2020年の**ペルセ群**の全流星151個のスペクトルの三角図です。三角図の中央に集中しています。**NomalとFe poorが殆ど**です。明るい流星が多くスペクトルがよく出ています。Naの割合が30-50%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-30%に集中しています。

4つ目は、**おうし群全体**のタイプ別の結果です。**6つのタイプ**に分かれました。**NomalとFe poorが殆ど**です。火球が多く爆発時のFeの割合が影響しFe割合の幅があります。いくつか散在判定と紛らわしいものがあります。中央から外れているものは、散在の可能性もあります。

# sdA群とOri群とHyd群とLeo群の三角比



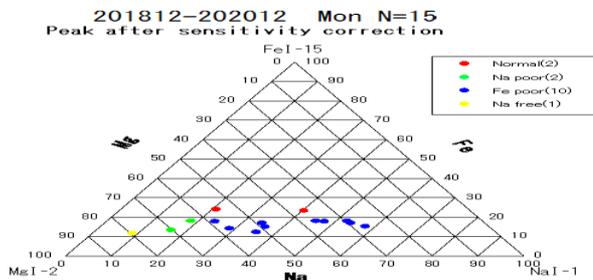
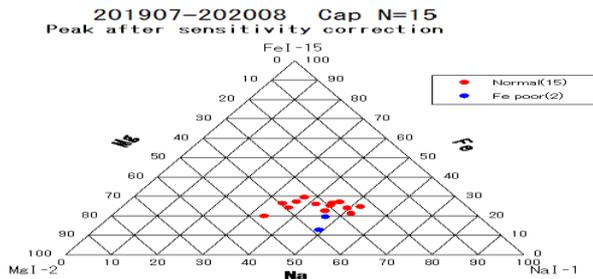
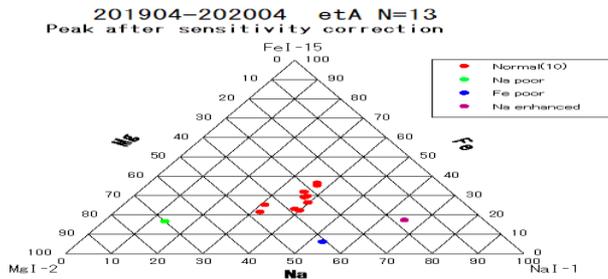
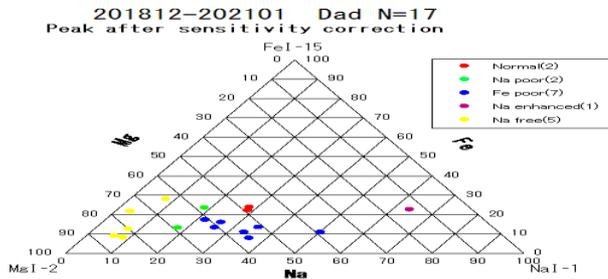
1つ目は、2019年-2020年の**水がめ南群**の全流星のスペクトルのタイプ別の三角図です。三角図の中央から左側によっています。Naの割合が0-40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-40%に集中しています。**4つのタイプが多く大体同じ割合**で分布しています。しぶんぎ群とふたご群と似ています。

2つ目は、2018年-2020年の**オリオン群**の結果です。**NomalとFe poorが殆ど**で中央に集中しています。Naの割合が20-50%に集中が見られます。鉄の割合は、10-40%に集中しています。ペルセ群と似ていますが同じ母天体の水がめ群とは、少し違うようです。

3つ目は、2018年-2021年の**うみへび群**の結果です。三角図の中央に集中しています。**NomalとFe poorが殆ど**です。Naの割合が20-40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-35%に集中しています。

4つ目は、**しし群全体**のタイプ別の結果です。**Nomalが殆ど**です。Na poorが2つあります。火球が多く爆発時のFeの割合が影響しFe割合が20-50%と幅があります。高速でスペクトルがきれいに出るのでペルセ群と似たような感じです。でも、**明らかに鉄の割合が多い**のが違います。

# Dad群とetA群とCap群とMon群の三角比



1つ目は、2018年-2021年の12月から1月の**りゅう群**のスペクトルのタイプ別の三角図です。三角図の中央から左側によっています。Naの割合が0-40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-30%に集中しています。**4つのタイプが多く大体同じ割合**で分布しています。しぶんぎ群と判定が難しいですが似ています。

2つ目は、5月の**みずがめ群**の結果です。**Nomalが殆ど**で中央に集中しています。Naの割合が30-40%に集中が見られます。鉄の割合は、20-35%に集中しています。

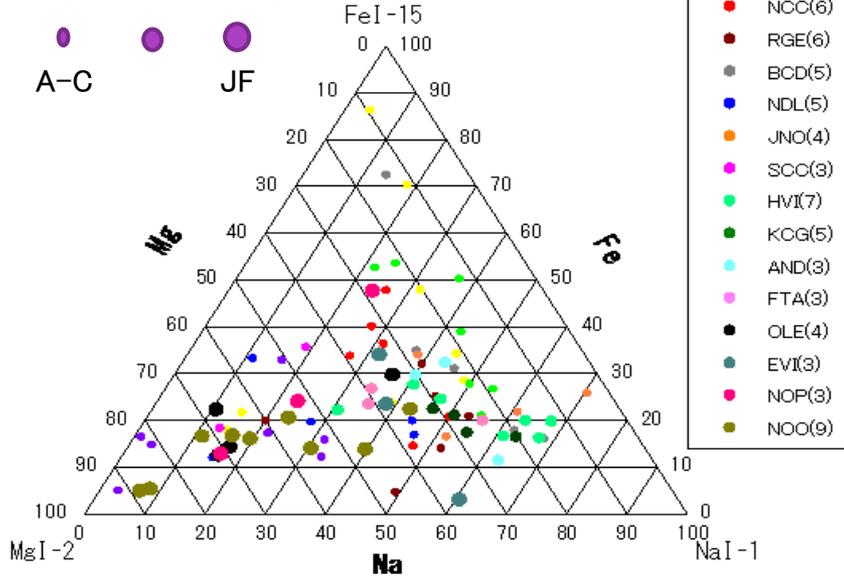
3つ目は、2019年-2020年の**やぎ群**の全流星15個のスペクトルの三角図です。三角図の中央に集中しています。**NomalとFe poorが殆ど**です。明るい流星が多くスペクトルがよく出ています。Naの割合が30-50%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-30%に集中しています。

4つ目は、**一角獣群**のタイプ別の結果です。**4つのタイプ**に分かれました。**Fe poorが殆ど**です。Naの割合が10-60%と広く分布しています。**qが小さいのでNaの枯渇**が見られているようです。

# 流星数が3~10個の小流星群の三角比

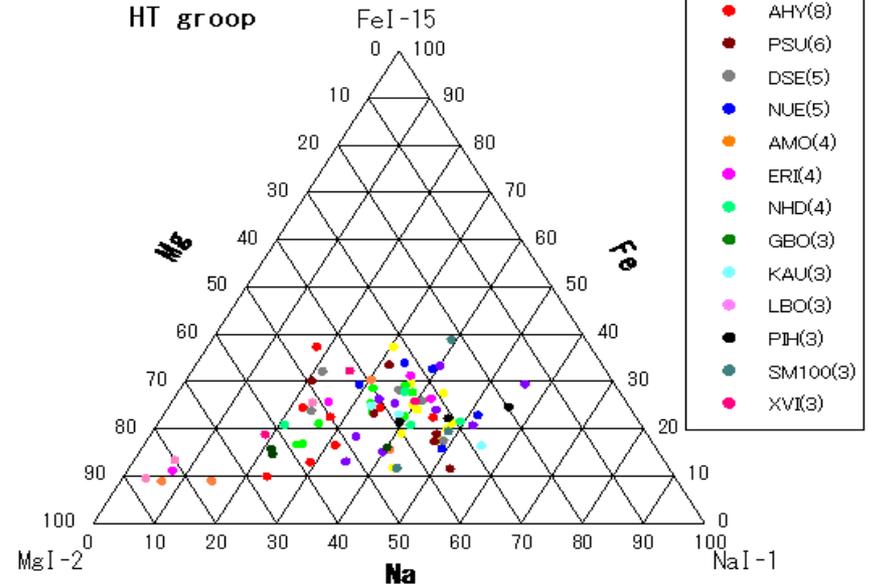
minor meteor showers-1 (N>=3)

Peak after sensitivity correction  
a-c group and JF group



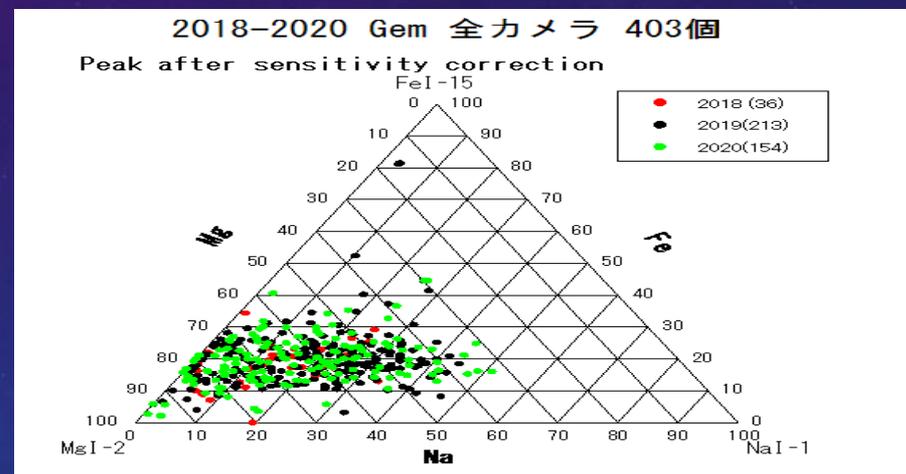
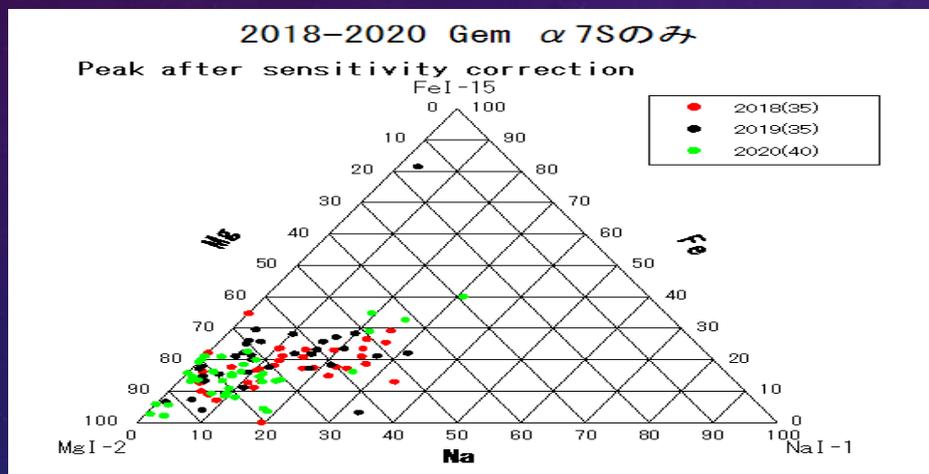
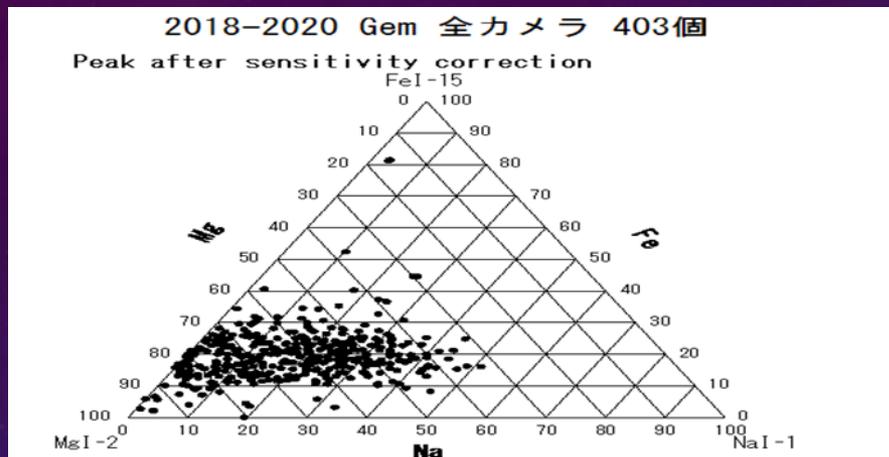
minor meteor showers-2 (N>=3)

Peak after sensitivity correction



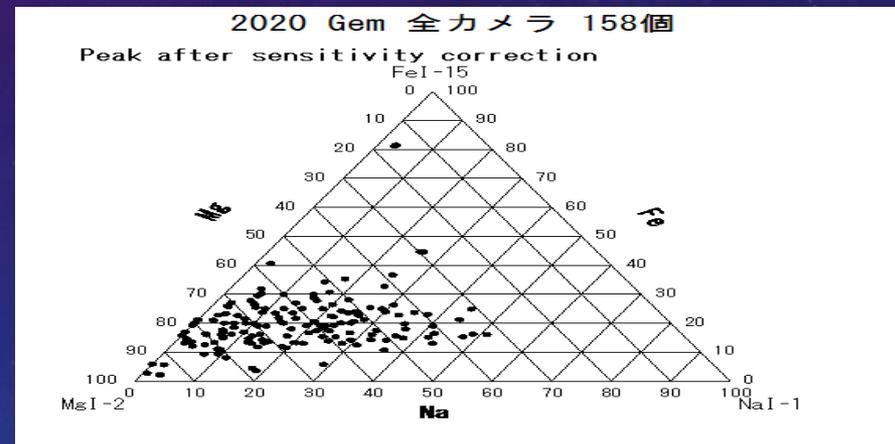
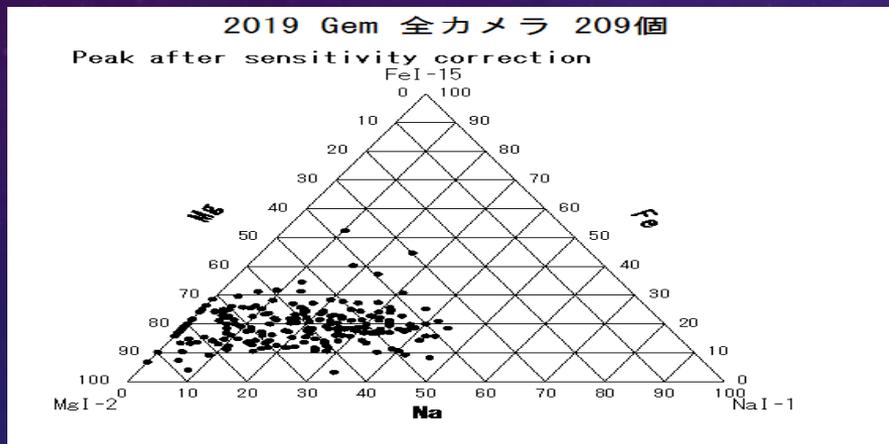
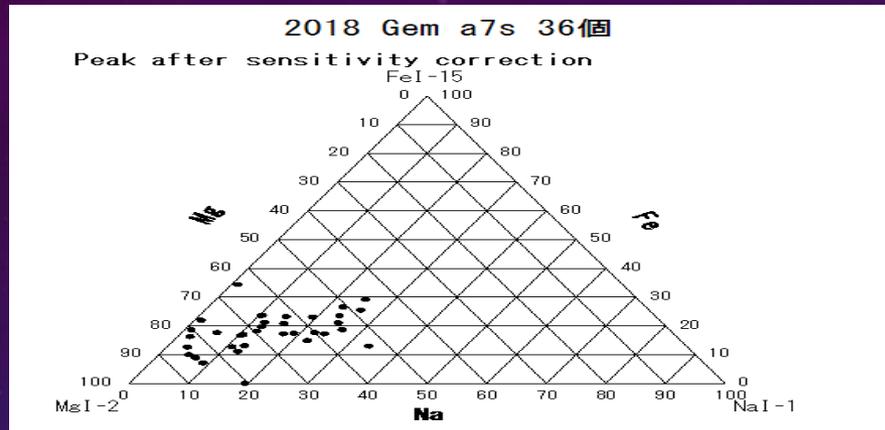
左がA-CとJFグループで、右がHTグループに分けてあります。左右から分かることは、**Naが0-30%と少ない群**は、軌道から見ると**SCC**( $q=0.1$   $i=5$  a-c)と**XUM**( $q=0.2$   $i=67$  a-c)と**NDL**( $q=0.5$   $i=5$  a-c)と**ACC**( $q=0.5$   $i=8$  a-c)と**NOO** ( $q=0.1$   $i=20$  JF)と**OLE** ( $q=0.1$   $i=30$  JF) となっています。これらは、全てで、 $q$ が小さくAsteroidal-chondritic class (A-C)とJupiter-family orbits(JF)です。また、Halley-type orbits (HT)タイプのもので**AHY**( $q=0.3$   $i=60$  HT)と**AMO** ( $q=0.4$   $i=130$  HT)と**LBO**( $q=0.97$   $i=80$  HT)と**GBO**( $q=0.9$   $i=80$  HT)があります。**Naの少ない群**は、**Naの枯渇**があるものと考えられます。**Feが多い群**として**ACC**( $q=0.5$   $i=8$  a-c)と**NCC**( $q=0.4$   $i=3$  a-c)と**SLE**( $q=0.7$   $i=5$  a-c) さらに、**Naが多い群**として**HVI** ( $q=0.8$   $i=1$  JFとa-c)と**JNO**( $q=0.8$   $i=5$  a-c)と**KCG**( $q=0.9$   $i=30$  JFとa-c)と**BCD**( $q=0.8$   $i=6$  a-c)があります。**他の小流星群**は、中央部に分布しています。

# 流星スペクトルの得られた全Gem群の三角比



上は、2018年から2020年のふたご群の全流星のスペクトルの三角図です。三角図の中央から左側によっています。Naの割合が0から40%に集中が見られます。また、鉄の割合は、10-30%に集中しています。鉄流星が2個撮影できています。左下は、 $\alpha 7S$ のみの結果で3年分を分けています。右下は、全カメラの3年分を分けています。2018年は、赤点。2019年は、黒点。2020年は、緑点です。 **$\alpha 7S(50mm)$ のみと全カメラでは、ともに年によって分布の仕方が違います。全カメラは、6mmが多いので明るい流星も多く広い範囲に広がってます。**

# 流星スペクトルの得られたGem群の年別の三角比

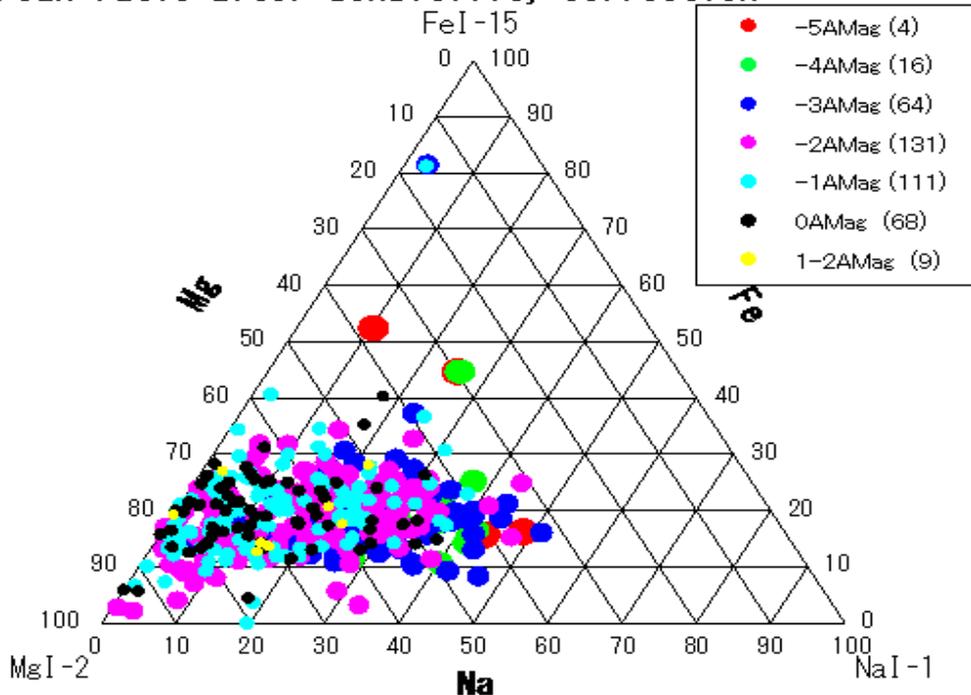


前のスライドの上の全部のふたご群のグラフを年毎に分けました。上は、2018年のa7sのみの結果です。Naは、30%以下です。左下は、2019年の全カメラによるふたご群の結果です。極大付近の明るいものが焦点距離の短いレンズでたくさん撮影され、Naの20-40%に集中が見られます。右下は、2020年の全カメラのふたご群のスペクトルの結果です。2020年の方は、Naの割合が30-40%に集中が見られなくて、0-30%に集中しています。**年によって分布の集中の違いが見られますがFeの分布の範囲は、10-30%と似た傾向があります。**

# スペクトルの得られたGem群の絶対光度別の三角比

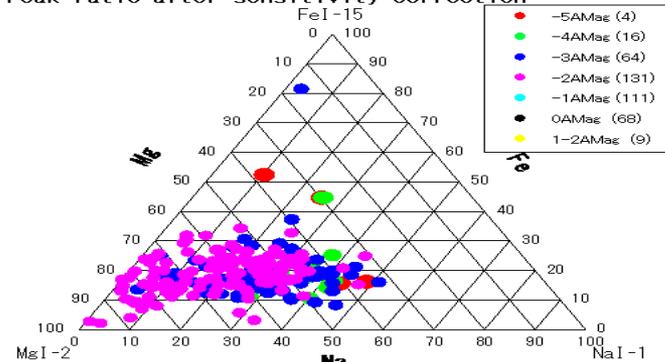
2018-2020 Geminids (N=403)

Peak ratio after sensitivity correction



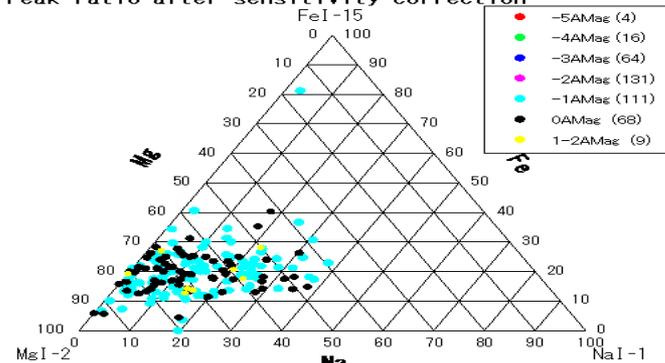
2018-2020 Geminids (N=403)

Peak ratio after sensitivity correction



2018-2020 Geminids (N=403)

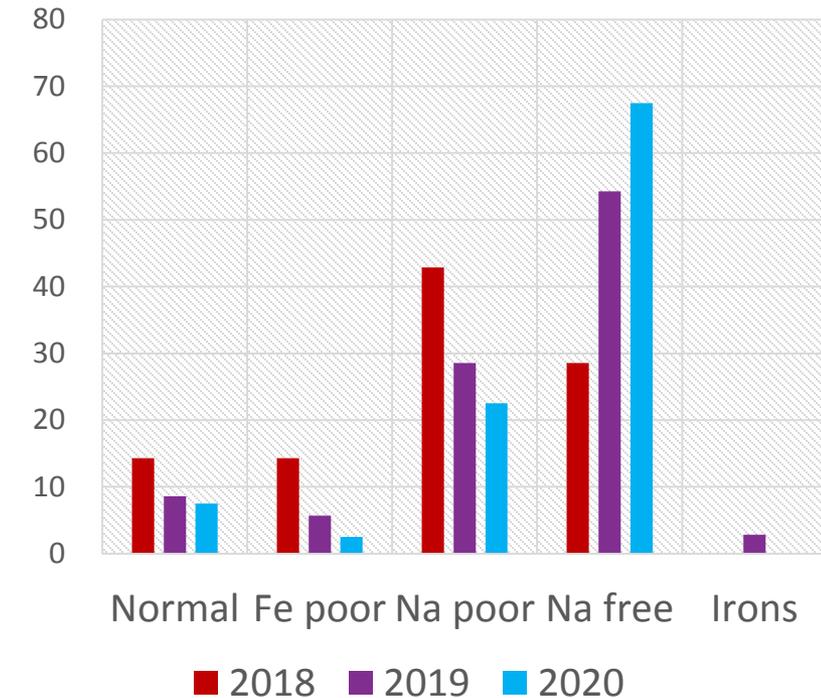
Peak ratio after sensitivity correction



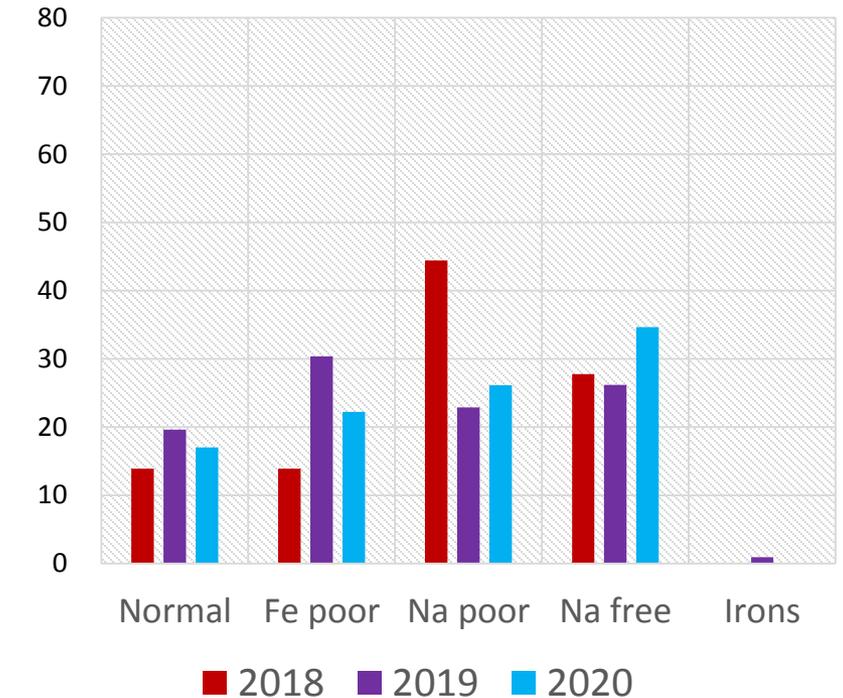
左は、2018年から2020年の全カメラによるふたご群の全絶対光度別の三角比です。中央に明るいものが左に暗いものが集中しています。重なりが多いので2つに分けました。右上は、絶対等級-5等から-2等までの明るい流星の分布です。右下は、絶対等級-1等から2等までの暗い流星の分布です。-2等から-1等は、やや広がりが大きいですが、集中部のずれは、10%程度あります。0等から2等は、左の0-10%の範囲が多くなっています。暗い流星は、Naの量が少ないので、暗い流星ほどNaの枯渇が起きやすいと考えられます。

# Gem群のカメラごとの年によるタイプ別の割合

ふたご群の年別のタイプ別の割合の比較 a7s カラーHDカメラ



ふたご群の年別のタイプ別の割合の比較 全カメラ



左は、**a7sの50mmレンズのみ**のふたご群のタイプ別の割合の年による変化です。年によって割合の違いが見られます。**NormalとFe poorが少なく、Na freeとNa poorが多い**ですが年によってばらつきが見られます。Na Freeが、毎年割合が増えていて他の3つは逆に毎年減っています。右は、**全カメラ**の結果です。こちら、年によってタイプの一番多いものは、違います。**2019年だけがNormalタイプとFe poorが他の年より多かった**ことがわかります。2018年と2020年の方は、反対にNa freeとNa poorが多かったことがわかります。

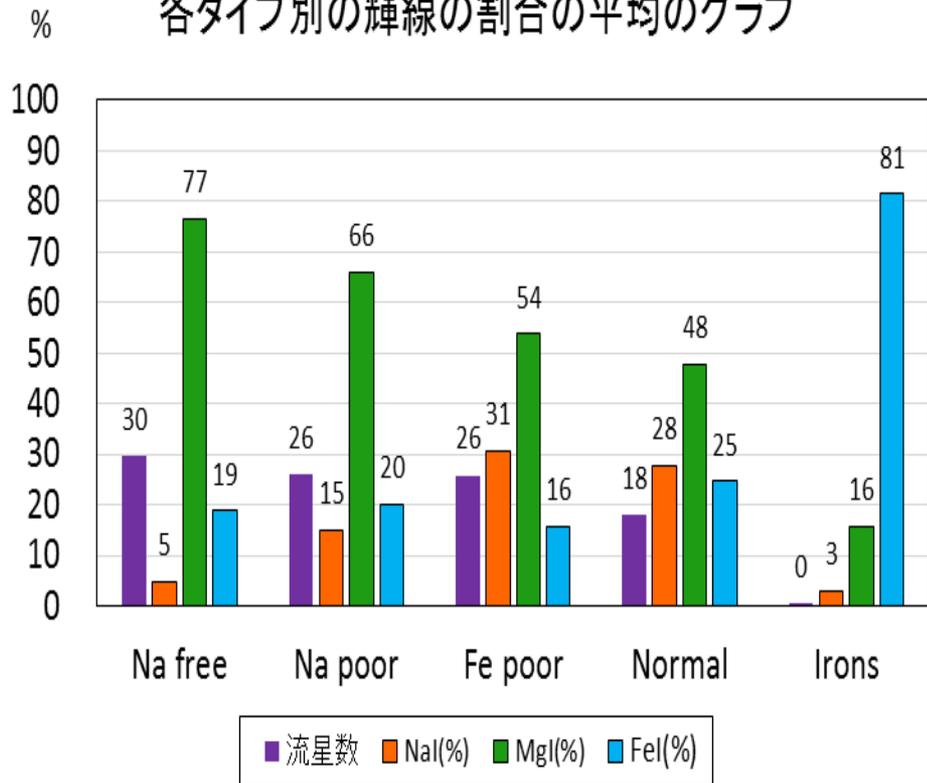
# 全Gem群のタイプ別の輝線の割合の平均の比較

| Class   | 流星数 | NaI(%) |      | MgI(%) |      | FeI(%) |      |
|---------|-----|--------|------|--------|------|--------|------|
| Na free | 119 | 4.7    | ±2.6 | 76.6   | ±6.1 | 18.8   | ±5.5 |
| Na poor | 105 | 14.9   | ±2.4 | 66.0   | ±6.3 | 20.0   | ±5.7 |
| Fe poor | 104 | 30.6   | ±6.1 | 53.8   | ±6.4 | 15.7   | ±2.5 |
| Normal  | 73  | 27.8   | ±4.4 | 47.7   | ±5.6 | 24.6   | ±3.4 |
| Irons   | 2   | 3.1    | ±0.0 | 15.6   | ±0.2 | 81.4   | ±0.1 |

第3回スペクトル研究会資料 阿部氏  
2017年と2018年のGemの合計

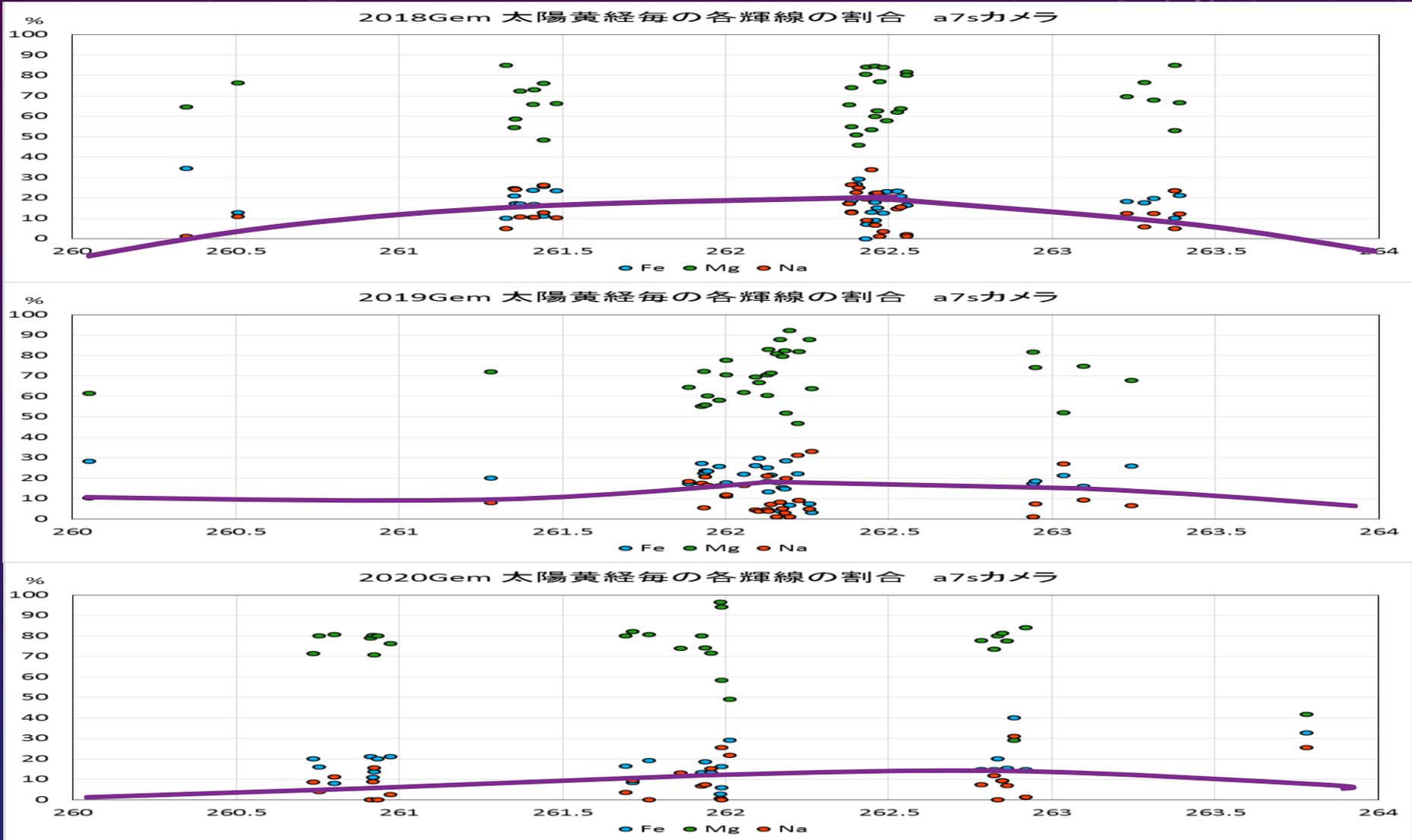
| Class   | 流星数 | NaI(%) |      | MgI(%) |      | FeI(%) |      |
|---------|-----|--------|------|--------|------|--------|------|
| Na free | 114 | 3.7    | ±2.6 | 75.1   | ±6.4 | 21.2   | ±6.0 |
| Na poor | 24  | 12.8   | ±1.7 | 70.0   | ±4.6 | 17.6   | ±4.6 |
| Fe poor | 9   | 31.8   | ±9.6 | 52.1   | ±9.7 | 16.1   | ±2.9 |
|         |     |        |      |        |      |        |      |
| Irons   | 3   | 0.37   | ±0.3 | 12.1   | ±6.0 | 87.6   | ±5.7 |

各タイプ別の輝線の割合の平均のグラフ



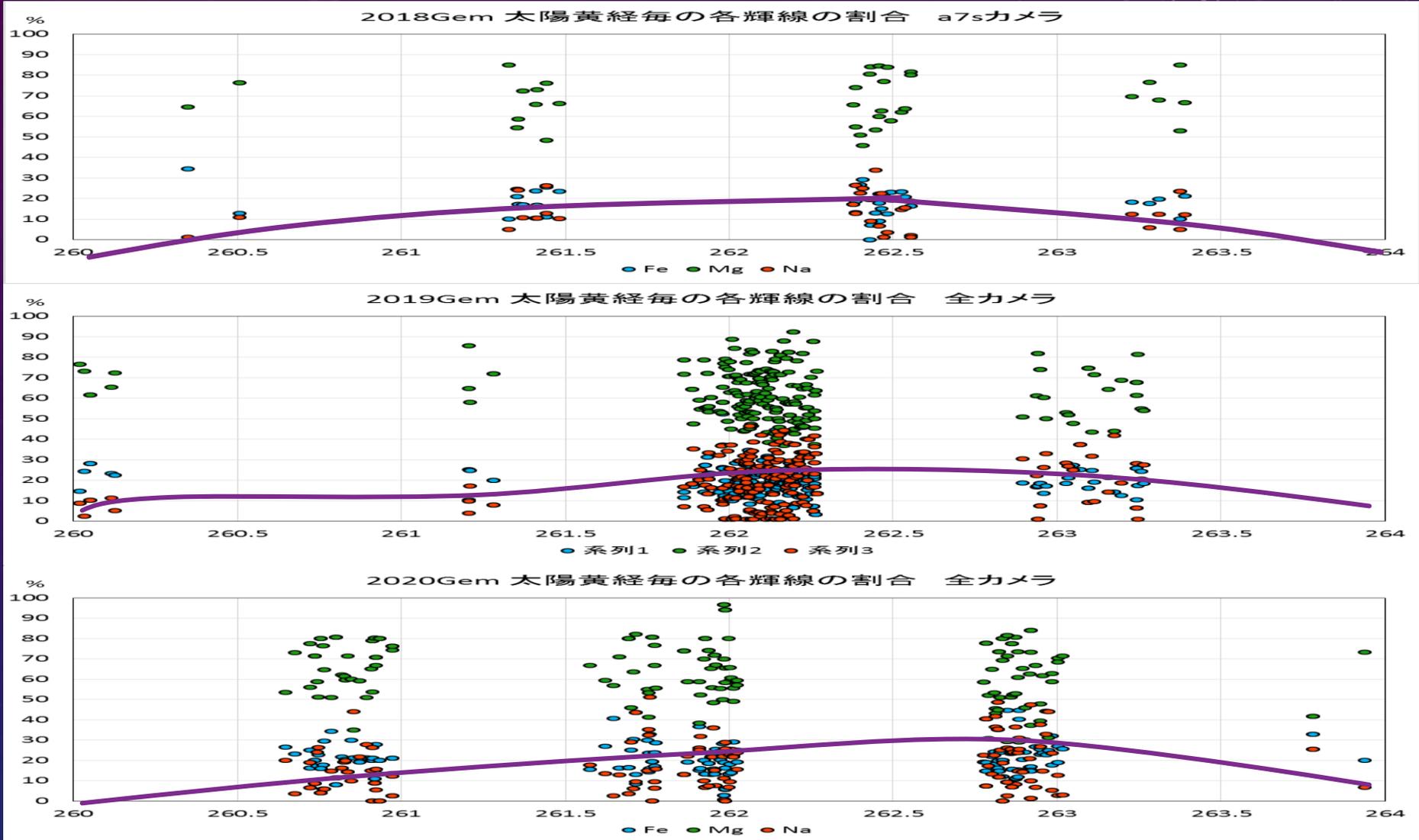
左は、全カメラのふたご群のタイプ別の輝線の割合の表です。上が私の結果で、下が阿部さんの結果です(第三回スペクトル研究会資料参照)。タイプによって輝線の割合の違いが見られます。ともに、Na freeが一番多くNaの枯渇がわかります。タイプ別の輝線の割合も大体似た傾向になっています。右は、私の左の表をグラフにしたものです。Feは、Ironsを除くとタイプ別でも大体同じ割合ですが、Mgは、タイプによって減っています。Naは、逆に増えています。このことからふたご群は、Na freeが多いのでNaの枯渇が起きていることがわかります。

# a7sのカメラのGem群の各年の太陽黄経毎の輝線別の割合



上は、**a7sの50mmレンズのみ**のふたご群の輝線別の割合の年による変化です。年によって大きな違いは、見られません。**Mgが一番多く、次にFeが多く、Naは、一番少なくなっています。**このことから**Naの枯渇がわかります。**どの年も極大付近で**Naがやや多くなる傾向**が見られます。2019年は、極大前が天候が悪く数が少なくなっています。

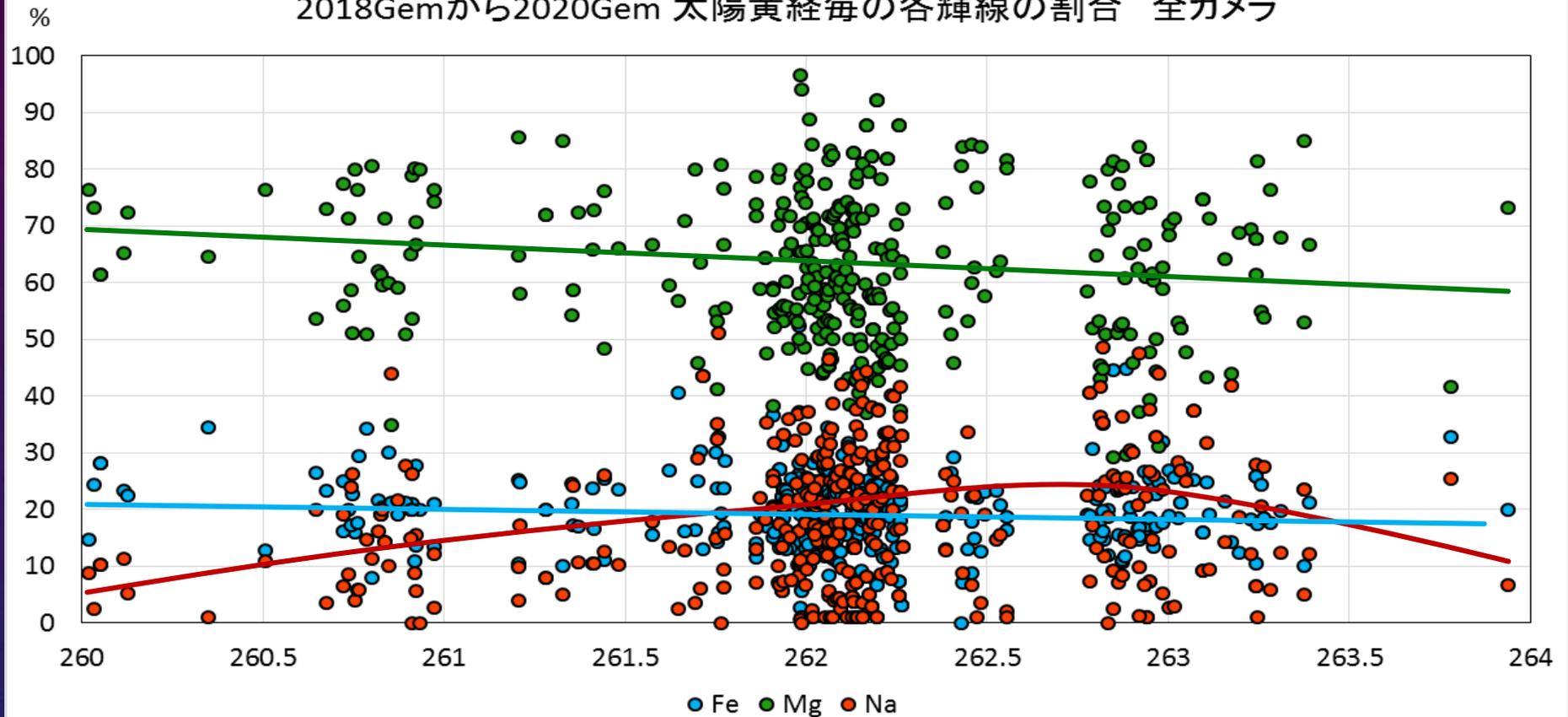
# 全カメラのGem群の各年の太陽黄経毎の輝線別の割合



上は、**全カメラ**のふたご群の輝線別の割合の年による変化です。どの年も極大付近と極大前後にNaがやや多くなる傾向は、前のスライドと変わりません。2019年は、極大付近のため、Naが、他の年よりも多くなっています。2018年と2020年は極大後の方が少しNaが多くなっています。Feは、広がりが一番少ないです。**Naの増加曲線は年によって違った変化**をしています。

# 全カメラの3年分のGem群の太陽黄経毎の輝線別の割合

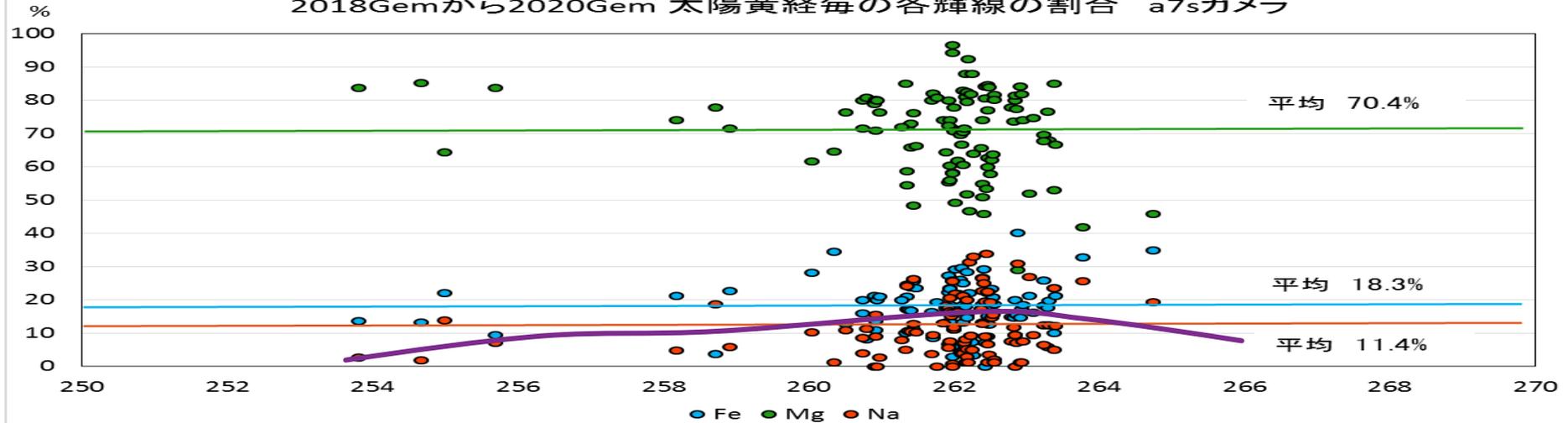
2018Gemから2020Gem 太陽黄経毎の各輝線の割合 全カメラ



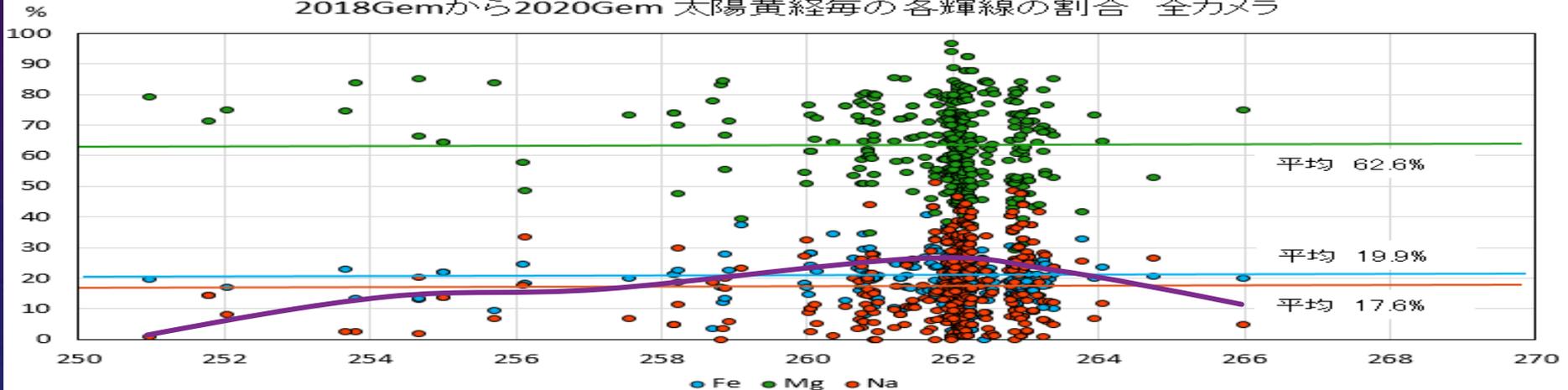
全カメラの3年分のふたご群の太陽黄経毎の輝線別の割合の変化です。まとめたことでふたご群全体の傾向が見えてきました。**Feの割合は、20%程度の広がり**で、広がりの範囲は、一番少ないです。Naは、極大付近と極大前後にやや多くなる傾向は、変わりません。また、**Naは、極大前より極大後にやや多くなっています**。Mgは、Naと反対で極大付近と極大前後にやや減る傾向が見られます。まだ、隙間がありますが今年の結果が入ると4年分となりました、傾向がわかりやすくなると思われます。

# a7sと全カメラのGem群の3年分の太陽黄経毎の輝線別の割合

2018Gemから2020Gem 太陽黄経毎の各輝線の割合 a7sカメラ

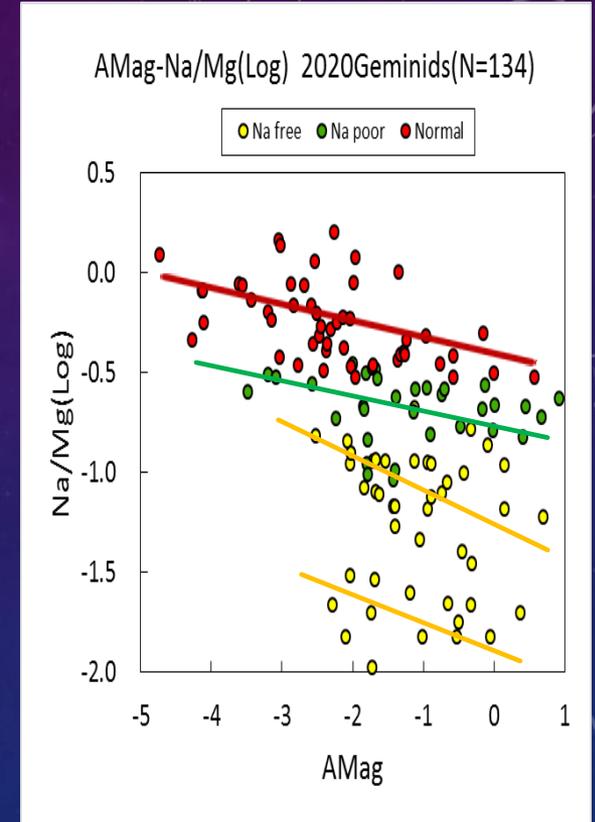
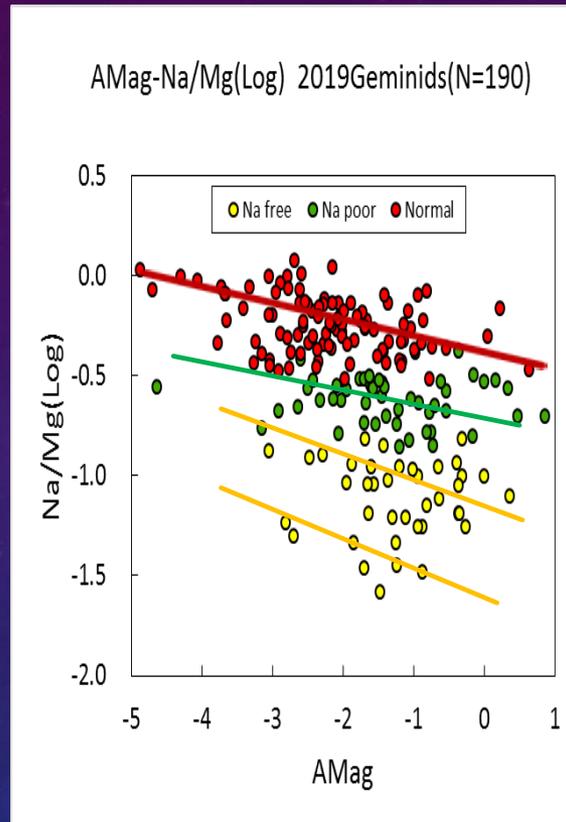
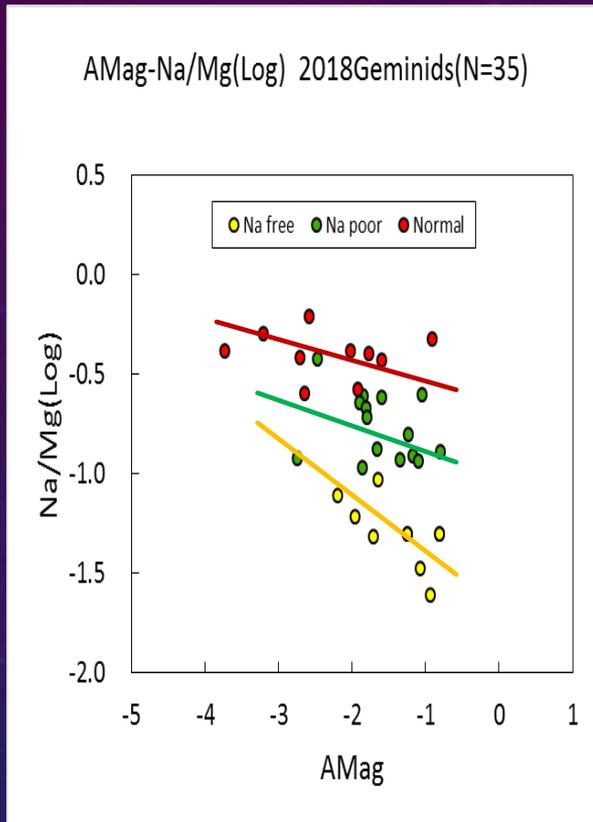


2018Gemから2020Gem 太陽黄経毎の各輝線の割合 全カメラ



上は、**a7s**の50mmレンズのみの3年分のふたご群の変化です。太陽黄経の範囲を前後少し増やしました。**Mg**の平均は、約**70%**で、**Fe**の平均は、約**18%**で、**Na**の平均は、約**11%**です。下は、**全カメラ**の3年分です。**Mg**の平均は、約**63%**で、**Fe**の平均は、約**20%**で、**Na**の平均は、約**18%**です。カメラによってやや違いが見られます。前のスライドと同様に、**Na**は、極大付近と極大後にやや多くなる傾向は、変わりません。**Mg**と**Fe**の傾向も変わらずよくわかります。

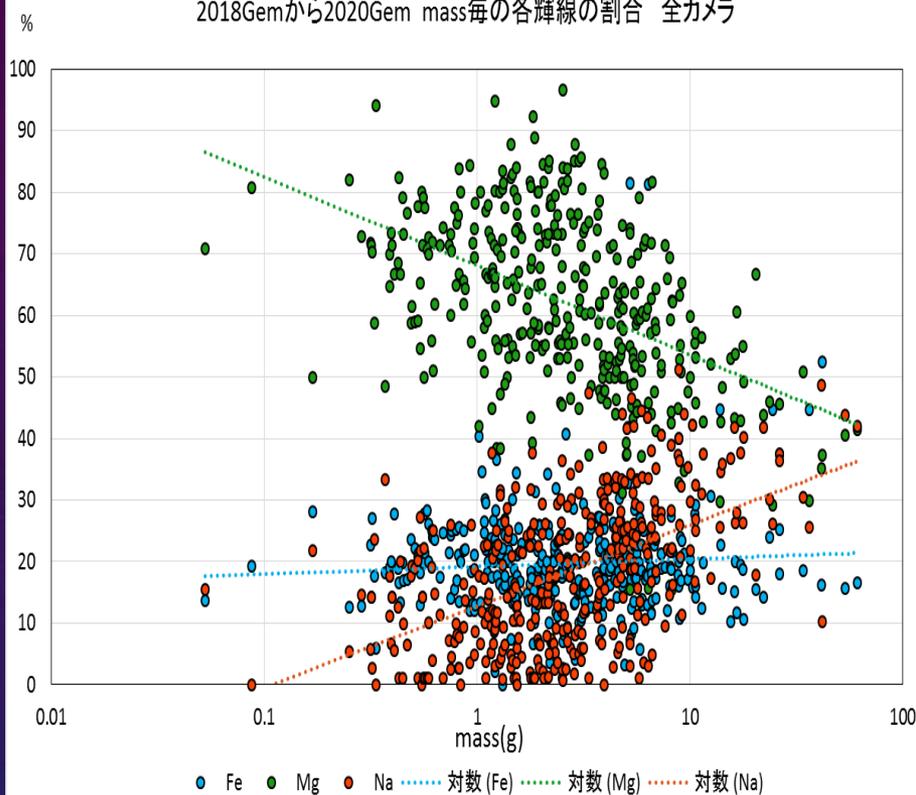
# 全Gem群の各年のAMagとNa/Mg(Log)の関係



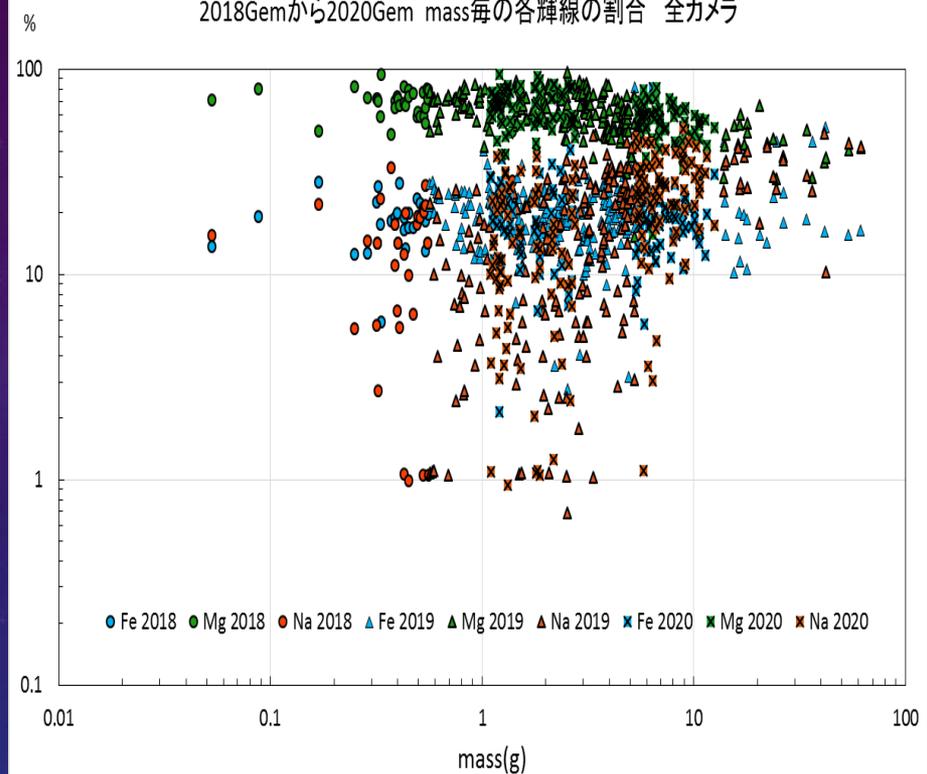
左は、2018年の a7sの50mm レンズのみのでたご群のタイプ別のAMagとNa/Mg(Log)の関係のグラフです。3つのタイプともAMagが小さくなるとNa/Mg(Log)の値も小さくなっています。真ん中は、2019年のふたご群のタイプ別のAMagとNa/Mg(Log) の関係のグラフです。右が2020年のふたご群のタイプ別のAMagとNa/Mg(Log) の関係のグラフです。**3年間とも3つのタイプで似たような直線の傾き**になっています。2019年と2020年は、2018年よりもNaのばらつきが大きくNa Freeが2つのグループに分かれているように見えます。**暗い流星ほどNaが少なくなっている**のでNaの枯渇が見られていることがわかりやすくなったと思われます。

# 全Gem群のNaとMgとFeのそれぞれの割合とMassの関係

2018Gemから2020Gem mass毎の各輝線の割合 全カメラ

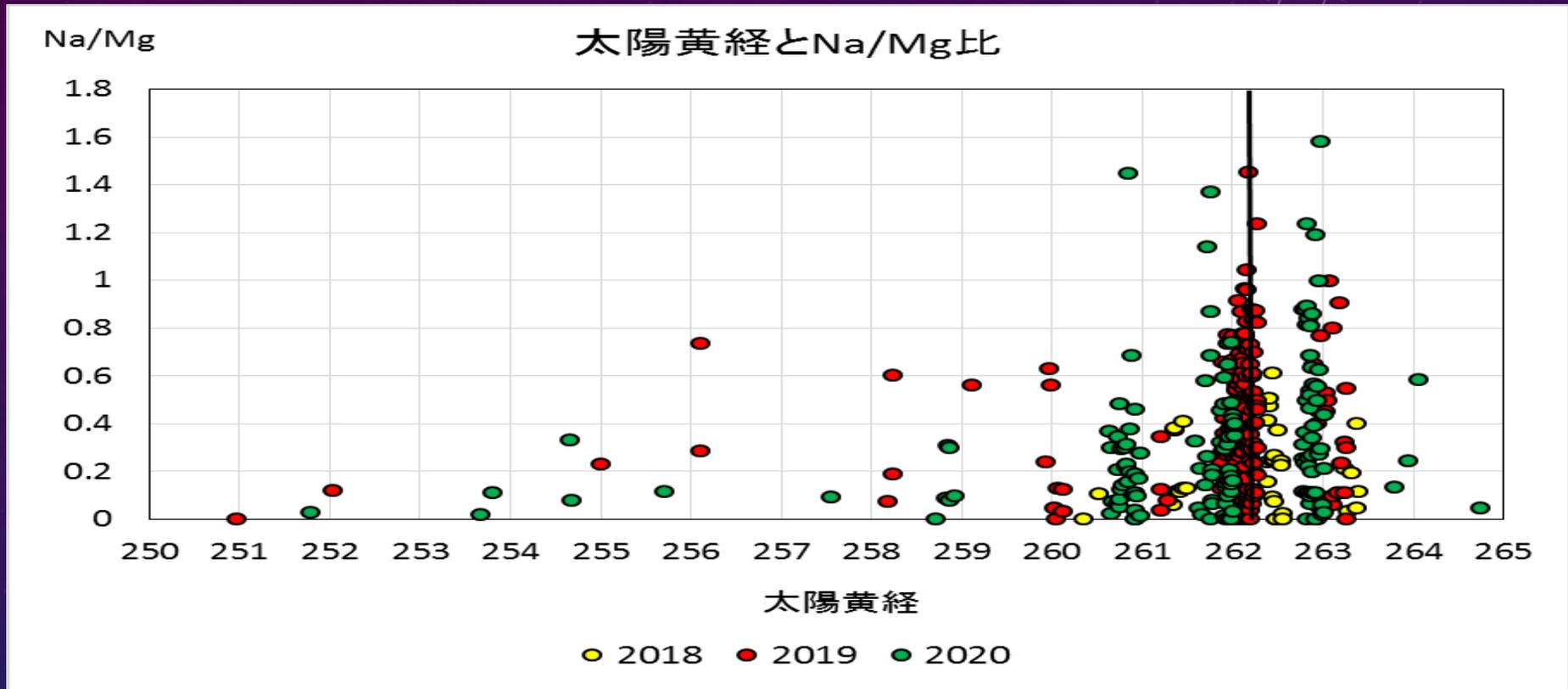


2018Gemから2020Gem mass毎の各輝線の割合 全カメラ



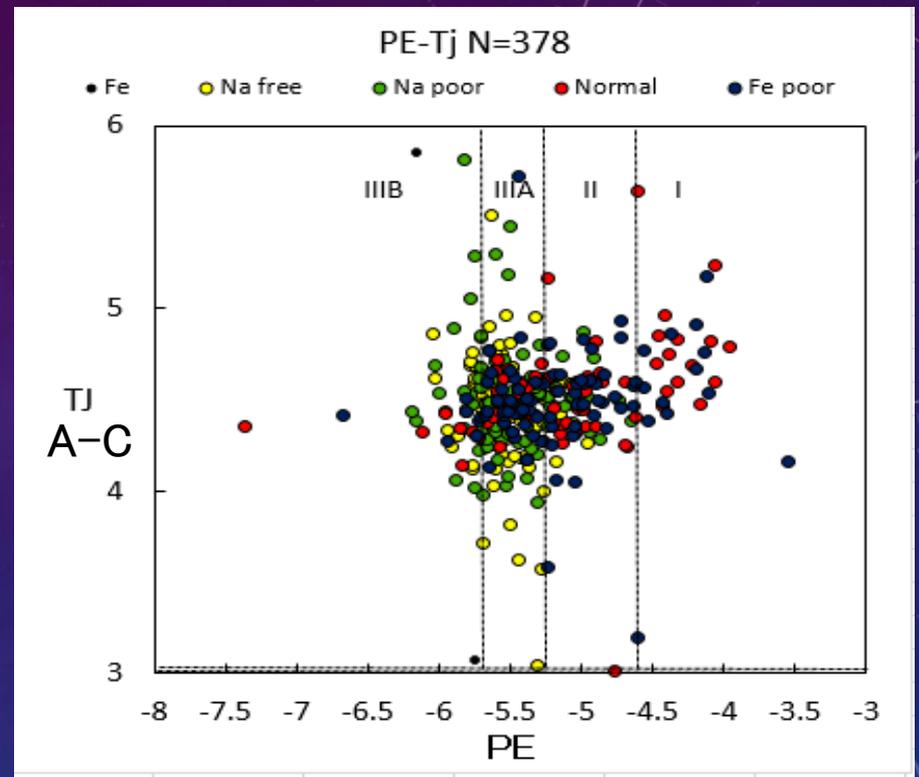
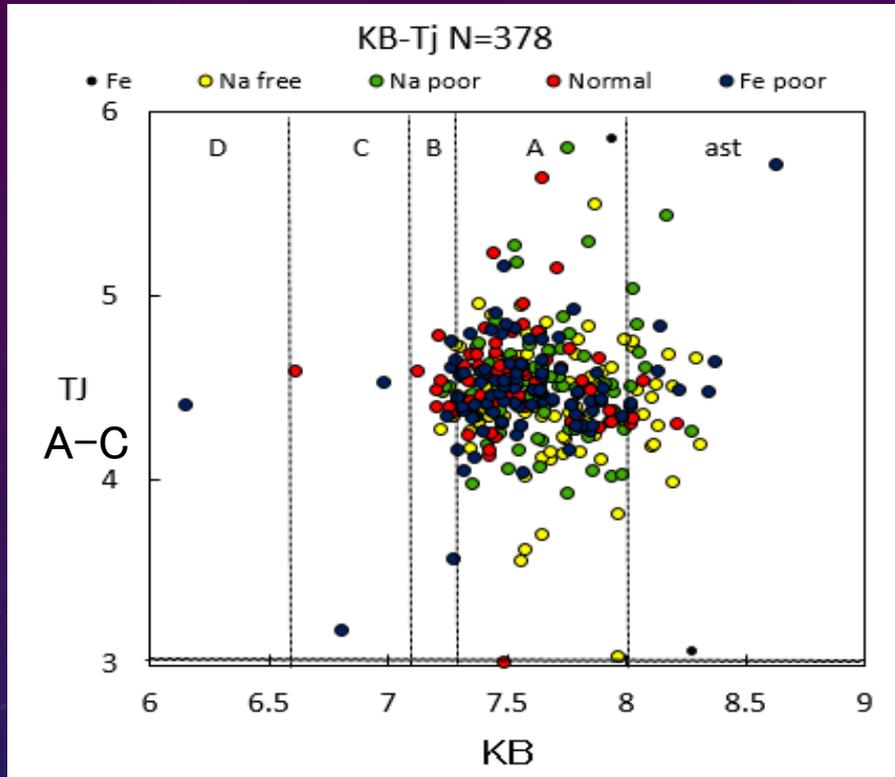
左は、2018年から2020年までの3年間のふたご群の全流星のNaとMgとFeのそれぞれの割合とMassの関係のグラフです。質量の小さいほどMgの割合が多くなっています。Feは、殆ど変わりません。Naは、質量の小さいほど割合が少なくなっています。このことから、Naのみ質量に依存して変動や枯渇していると言えます。右のグラフは、縦軸を対数にしてあります。また、年ごとにマークを変えています。MgやFeに比べて、Naの広がりが大きいことがわかります。年よっての質量の違いも見られます。2018年は、0.1gから1gに集中しています。2019年は、0.6gから6gと幅広くて分布し、15gから70gまでの重いものもあります。明るい流星が多かったことからもうなづけます。2020年は、1から10gに集中しています。

# 全Gem群の年別の太陽黄経とNa/Mgの関係



全カメラの3年分のふたご群の年別の太陽黄経とNa/Mg比です。太陽黄経の範囲は、250—265です。極大は、2019年の262.1度付近としました。これを見ると、**2018年と2020年**が極大後に少しNa/Mg比が多くなっています。**2019年は、ほぼ極大で極大前と比べると極大後の方が約2倍近く多くなっています**。これは、261度付近は、天候が悪かったのもう少し多かったものと思われます。このことから、**ダストレイルの分布は、太陽黄経によってNa量の分布が異なると考えられます**。前のスライドと合わせるとNaが多いほど質量が大きいという結果から、**小さい流星ほどポインティング・ロバートソン効果が大きく効き、極大前に小さい流星が観測されやすい**と考えられ今までの先行研究と似た結果になりました。

# 軌道の求まったGem群のTJとKBとTjとPEの関係



左は、2018年から2020年までの3年間の軌道の求まったふたご群の全流星のKBとTjの関係のグラフです。ふたご群は、Tjでは、小惑星とコンドライトA-Cタイプです。KBのタイプでは、astタイプには、Fe poorとNa poorとNa freeが見られます。Aタイプには、殆どのタイプがTj4-5に集中しています。特にNormalとFe poorが多いです。Na poorとNa freeは、ややばらけています。CとDタイプは、殆どありません。右は、PEとTjの関係のグラフです。PEのタイプでは、Iのタイプは、NormalとFe poorだけです。IIのタイプもNormalとFe poorが殆どで、Na poorとNa freeが少し見られます。III Aタイプには、殆どのタイプがTj 4-5に集中しています。Na poorとNa freeが多く中央に集中していますがやや広がりもあります。このIII Aタイプが一番多いです。III Bは、Na poorとNa freeが多くNormalとFe poorは、ほんの少しです。

# 8月下旬のはくちょう群と思われる流星のスペクトル



上は、8個のはくちょう群と思われるスペクトル画像です。似たような光度変化をしています。タイプは、**NomalとFe poorが多い**です。もう一つ下のサイトにアップしてあります。  
<http://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=4982> また、軌道計算結果等もアップしてあります。今年、7年周期で活発な活動がとられました。**3つの群の複合群**のようです。

# 流星スペクトルの解析のまとめ

- 8台のカメラの観測で、ほぼ2年4か月で2390個近くのスペクトルが得られました。今回のデータは、2018年10月から2021年2月までの解析をしました。8つのタイプが得られました。Feが50-80%になっているタイプが46個得られました。Fe richのタイプであることが2019年の論文からわかりました。発光高度とNa/Mg比や速度によるタイプの違いを調べ速度によって違いが見られました。
- 解析結果を元にQua群Com群Per群Tau群や小流星群のタイプ別に分類し比較しました。Gem群の三角図を作成し考察しました。今回は、ふたご群の年とカメラによる三角比やタイプ別の割合等を比べました。ふたご群の年やカメラによって違いが見られました。また、色々な方法でNaの枯渇が見えてきました。
- 8月のはくちょう群と思われるスペクトルと軌道の結果から似たような光度変化をしていてタイプは、NomalとFe poorが多いことがわかりました。
- 2019年の流星会議の自動観測によるスペクトル観測と結果「2018年から2019年3月まで」の結果は、以下に公開しています。  
<https://www.web-nms.com/app/download/13829249327/%EF%BC%A8%EF%BC%B0%E7%89%88%E9%9B%86%E9%8C%B2-5.pdf?t=1572683438>
- オンライン流星物理セミナーに2018年10月から2020年8月までの詳細の結果を以下に公開しています。
- <http://msswg.net/msonline/MSS19-spectrum-20201125-Sekiguchi-2018to20.pdf>