

# オンライン流星物理セミナー 論文紹介と解析結果

2024 10.16

日本流星研究会 関口 孝志

## 1.論文紹介 A statistical analysis of over three thousand meteors and their spectra

The screenshot shows the Oxford Academic website interface. At the top, there are navigation links for 'Journals' and 'Books', and a 'Sign in through your institution' button. The main header features the 'Monthly Notices of the Royal Astronomical Society' logo and a search bar. Below the header, there are navigation tabs for 'Issues', 'Advance Access', 'More content', 'Submit', 'Alerts', and 'About'. The main content area displays the article title 'A statistical analysis of over three thousand meteors and their spectra' by Alberto S Betzler and Takashi Sekiguchi. The article is from Volume 529, Issue 4, April 2024. To the right of the article title, there are three circular metrics: Citations (0), Views (425), and Altmetric (?). Below the article title, there are options for 'PDF', 'Split View', 'Cite', 'Permissions', and 'Share'. The abstract is visible, starting with 'In this article, over three thousand meteor spectra recorded in Saitama, Japan, between 2018 and 2021 are analysed. We performed a principal component analysis of the intensity of the sodium and magnesium lines and the iron band of each meteor in combination with the orbital elements and the kinematic parameters such as the geocentric velocity and the...'. On the left side, there is a table of contents for the article, listing sections from 'ABSTRACT' to 'ACKNOWLEDGEMENTS'. On the right side, there is an 'Email alerts' section with options for 'Article activity alert', 'Advance article alerts', 'New issue alert', and 'In progress issue alert'. At the bottom of the page, there is a link to receive exclusive offers and updates from Oxford Academic.

OXFORD ACADEMIC Journals Books

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society

Issues Advance Access More content Submit Alerts About

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society

JOURNAL ARTICLE

### A statistical analysis of over three thousand meteors and their spectra

Alberto S Betzler ✉, Takashi Sekiguchi

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 529, Issue 4, April 2024, Pages 3408–3423, <https://doi.org/10.1093/mnras/stae763>

Published: 15 March 2024 Article history

CITATIONS 0 VIEWS 425 ALTMETRIC ?

More metrics information

PDF Split View Cite Permissions Share

#### ABSTRACT

In this article, over three thousand meteor spectra recorded in Saitama, Japan, between 2018 and 2021 are analysed. We performed a principal component analysis of the intensity of the sodium and magnesium lines and the iron band of each meteor in combination with the orbital elements and the kinematic parameters such as the geocentric velocity and the

#### Article Contents

- ABSTRACT
- 1 INTRODUCTION
- 2 THE DATA
- 3 RESULTS AND ANALYSES
- 4 SUMMARY AND CONCLUSIONS
- ACKNOWLEDGEMENTS

#### Email alerts

- Article activity alert
- Advance article alerts
- New issue alert
- In progress issue alert

Receive exclusive offers and updates from Oxford Academic

<https://academic.oup.com/mnras/article/529/4/3408/7630220?login=false>

ブラジルのAlberto S. Betzler教授?から、メールが昨年あり、私のMeteornewsの<https://www.emeteornews.net/2020/07/24/results-of-spectral-observations-of-meteor-showers-and-sporadic-meteors-from-october-2018-until-may-2020/>の論文のスペクトルのデータを使用し、軌道の観点から論文を書きたいとのことで承諾し、さらに付け足して約3000個のデータで4月に連名で発表されたものです。私は、データ提供が殆どで質問にいくつか答えただけです。

## 概要

本稿では、2018年から2021年の間に日本の埼玉で記録された3000以上の流星スペクトルを分析しています。各流星のナトリウム線とマグネシウム線、鉄帯の強度の主成分分析を、軌道要素、地心速度や初期高度と最終高度などの運動学的パラメータと組み合わせて実行し、流星のスペクトルの構成におけるこれらの各変数の相対的な重要性を判断しました。**GEM、LEO、QUA、PER**などの流星群では、軌道要素または運動学的パラメータがこれらのスペクトル線の強度を決定する重要なパラメータであり、各流星群の流星物質の構成または強度の変化を区別する際に重力および/または非重力の影響を示す可能性があることが分かりました。私たちのサンプルの通常のスเปクトル型は39.5%から96.8%の範囲で、それぞれGEMとPERに相当します。**COM**流星は**LEO**流星群と**PER**流星群の成分とナトリウム含有量が類似しており、彗星が母天体である可能性を示唆しています。鉄クラスの流星のナトリウムとマグネシウム含有量はすべてのサンプルの中で最も低いですが、ゼロではないため、純粋な鉄流星は存在しないことが示唆されます。**GEM**流星群のナトリウム含有量は、2019年と2020年の観測シーズンと比較して2021年には時間的に変動しています。他の流星群のナトリウム含有量と近日点距離の間には相関関係が見つかりませんでした。

### 1. 群別のデータ数と観測期間

Group	N	Start	End
COM	77	Nov. 28, 2018	Dec. 23, 2021
GEM	491	Dec. 13, 2018	Dec. 30, 2021
LEO	52	Nov.02, 2019	Dec. 03, 2021
NTA	99	Oct. 31, 2018	Dec. 15, 2021
Others	755	Oct.18, 2018	Jun. 28, 2022
PER	203	Jul. 31, 2019	Aug. 11, 2021
QUA	99	Jan. 02, 2109	Jan. 04, 2022
SPO	1241	Oct. 22, 2018	Jun. 28, 2022
SPO Fe	41	Dec. 18, 2018	Feb. 25, 2022
STA	58	Oct. 10, 2019	Dec. 30, 2021

## 2.解析のパラメータと解析法

流星の13のパラメータ、すなわちナトリウム、マグネシウム、鉄のスペクトル線とバンド強度(Na、Mg、Fe)、軌道要素(長半径a、近日点距離q、離心率e、周期p、近日点引数 $\omega$ 、昇交点経度、傾斜角Incl)、地心速度vg、および発光高度と消滅高度(H1とH2)について主成分分析(PCA)とKruskal-Wallis H検定を使用して分析し、主な特徴を要約して比較しました。

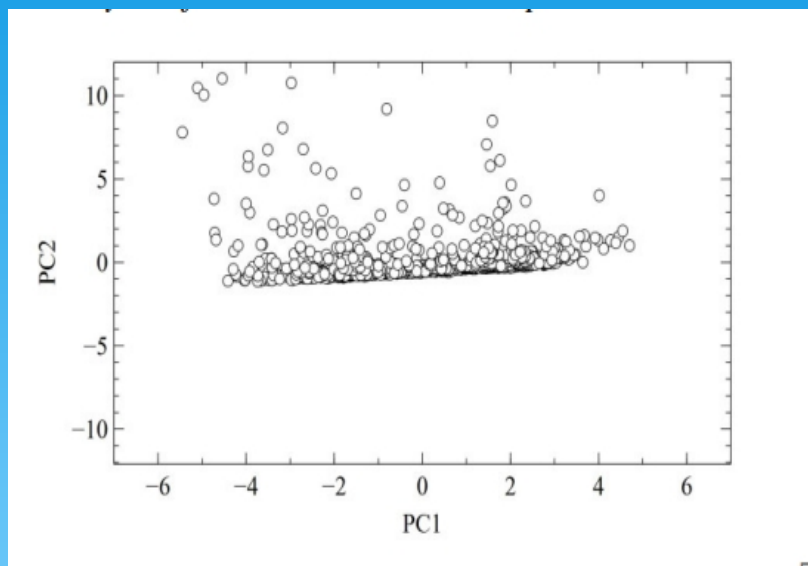
## 3.解析結果

図 2. 散発流星のサンプル全体の PCA 図。各主成分(PC)に関連付けられた流星パラメータは、表2に定義されています。GEM、COM、PER、NTA、STAの流星群はこの条件を満たしています。最後の931個の流星スペクトル、つまりサンプル全体の約31パーセントは、「その他の流星群」のグループにまとめられています。3.1.1 散発流星(全サンプル) – SPO このグループには、LEO、LYR、ETAなどの大規模な流星群と、CAP、STA、KCGなどの小規模な流星群の代表が含まれています。さらに、散発性流星サンプルから抽出した鉄流星体の41個のスペクトルのサンプルに対してPCAを実行しました。これらの変数間には異なる桁数があるため、各パラメータのzスコア $[=(生データ - 平均)/標準偏差]$ にPCAが適用されました。バートレットの球形性検定とKMO検定は、このサンプルにPCAを適用できることを示しています( $p < 0.001$  および  $0.715$ )。セクション3.1で分析した他のサンプルでも同様の結果が得られました。分析では、9つの第1主成分(PC)でサンプルの変動の95.1パーセントを説明できることが示唆されています。ただし、ここではデータ変動の50パーセント以上を説明できるPCの分析に重点を置きました。PC1とPC2はサンプルの分散の51.4パーセントを説明します(図1)。2) PC1の固有値の分析により、変数H1、H2、軌道離心率eは正の相関関係にあることが示されており、これは初期高度が高い流星は地球表面に対して最終高度も同じように高い状態で燃え尽きる傾向があり、中央値に比べて離心率が高いことを意味しています(表2および3)。PCAをサンプルに正しく適用するには、サンプルサイズが変数の数の少なくとも5倍以上で、分析する変数ごとに10人以上の個人が理想的な比率であるなど、いくつかの要件とテストを適用する必要があります(Nunnally 1978、Osborne & Costello 2004)。データセットから抽出されたサンプルのサイズは、この基準を満たしています。その他の重要な条件は、Bartlettの球面性検定(Bartlett 1951)およびKaiser-Meyer-Olkin(KMO)検定(Kaiser & Rice 1974)で検定されます。Bartlettの球面性検定では、元の変数の相関関係と、それらを少数の変数(主成分)に組み合わせることができるかどうか調べられます。

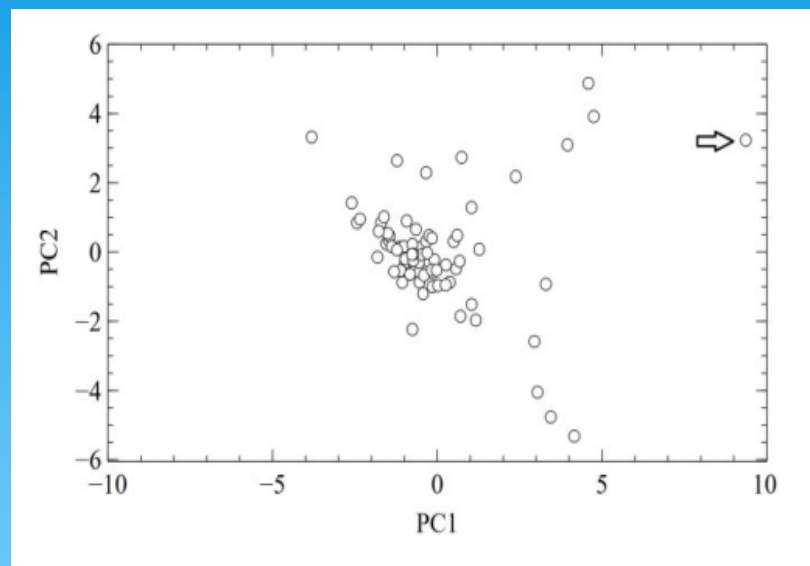
理想的には、検定値は 0.05 未満である必要があります。KMO 検定では、観測された変数間の共通分散の割合が評価されます。検定値は 0.5 超である必要があります。SPO サンプルは 1241 個の流星から構成されています。PCA スコアの二変量正規分布を想定すると、母集団ポイントの 95 パーセントが含まれると推定される範囲内に 1184 個の流星があります。これらの流星の 61.3 パーセントは、この間隔で正規のスペクトルを持っています。Na の少ない流星と Na を含まない流星は 18.6 パーセントを占め、流星の 16.8 パーセントはこのサンプルのナトリウム強化クラスとナトリウム高クラスに該当します。鉄流星クラスに属する流星は 39 個、つまり流星の 3.3 パーセントのみです。SPO サンプルの外れ値の例としては、Na が豊富な流星 ( $PC_1 = -4.41$ ,  $PC_2 = -1.11$ ) が挙げられます。この流星は離心率が 0.11 で、大気圏深くまで侵入し、 $H_1 = 73.4$  km、 $H_2 = 55.7$  km と、離心率の中央値よりも低くなっています。また、サンプル全体から決定された初期高度と最終高度は、それぞれ 0.85、98.1、80.02 km です。ナトリウムとマグネシウムの線の強度は、それぞれ 320 カウントと 55 カウントで、それぞれ中央値の 193 カウントと 212 カウントよりも高く、低くなっています。この化学異常は、Na/Mg 比が 5.8 であり、散発性流星のサンプル全体の値 0.95 と比較して非常に高いことを考慮すると、さらに明らかになります。この研究では、サンプルの分散の少なくとも 50 パーセントを説明する主成分 (PC) に分析を限定します。一般的なカットオフ値は総変動の 70 パーセントですが、主観的な選択でもあります (Jolliffe & Cadima 2016)。主観的であるにもかかわらず、カットオフ値が 50 パーセントであることは、最初の 2 つまたは 3 つの PC のみが考慮されることを意味し、グラフによる表現と解釈が容易になります。これらの流星は、おそらく彗星から発生したもので、各 PC における流星パラメータのこの配置は、たとえば、**中央値よりも高い地心速度と高いナトリウム線の強度を持つ COM 流星は、昇交点の経度が高く、鉄帯の強度が高いことを意味します。**主成分分析によって得られた結果は COM 流星体を区別できる要因としての昇りモードの経度は、圧倒的な結果ではない。ヒューズ、ウィリアムズ、フォックス (1981) は、「電波」と「視覚」QUA 流星体のグループでこのパラメータの間にほぼ 1 度の差があることを発見した。これらの流星体はおそらく大きさが異なり、流星と流星群は次のようにグループ分けされます主成分分析によって得られた結果は、次のスライド以降にあります。

### 3.解析結果 グラフ1

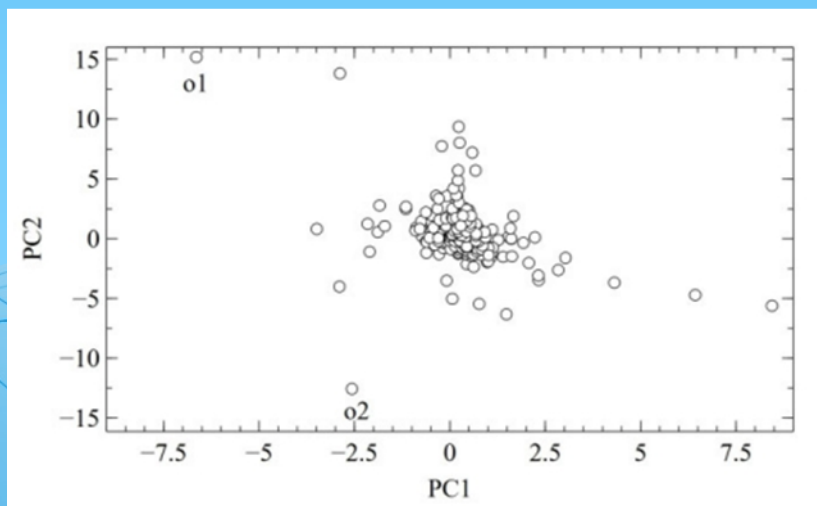
#### 3.1.1 Sporadic meteors – SPO 図2



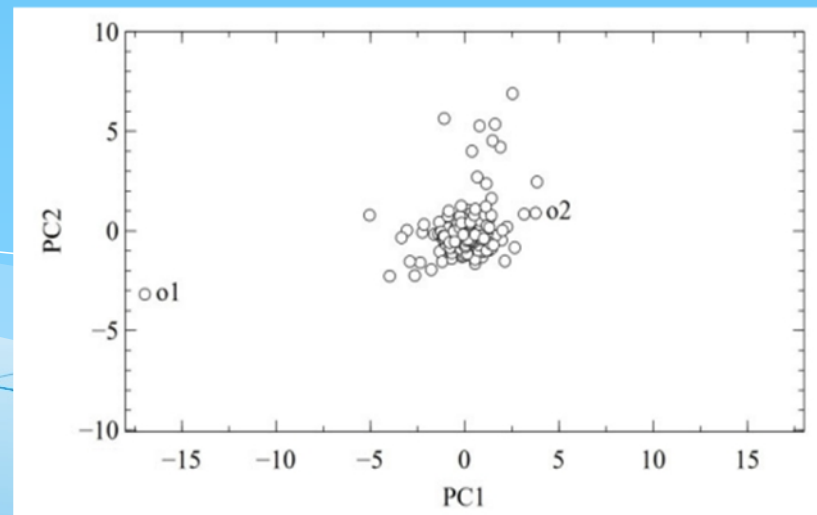
#### 3.1.2 Coma Berenicids – COM



#### 3.1.3 Geminids – GEM

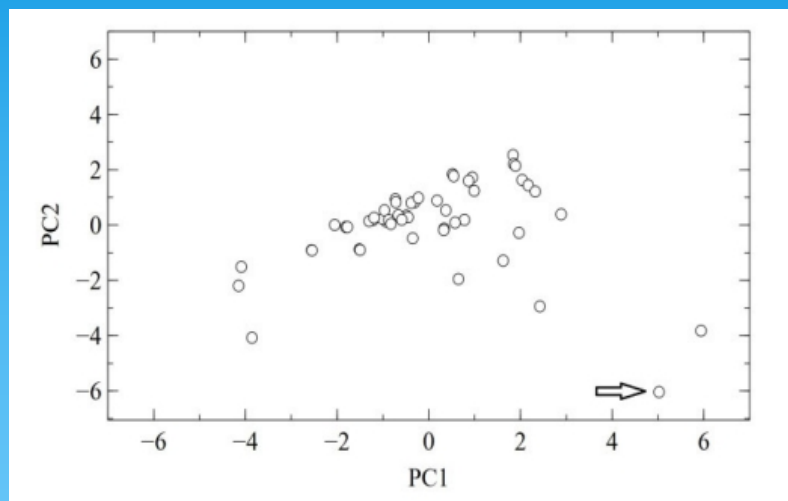


#### 3.1.4 Perseids – PER

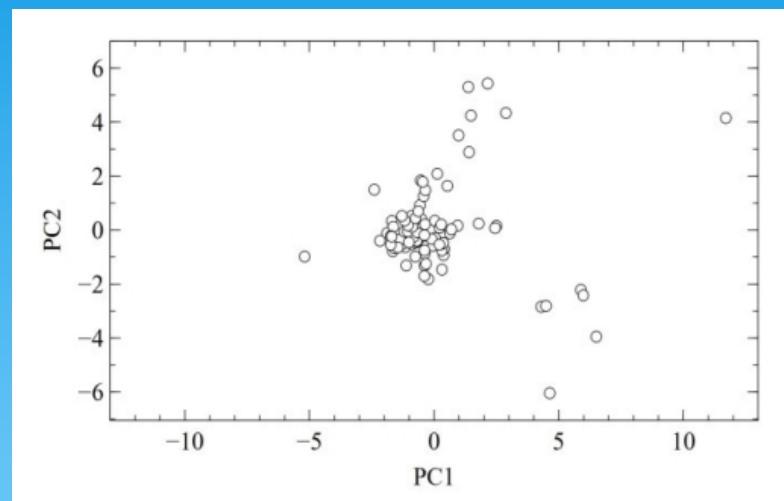


## 3.解析結果グラフ2

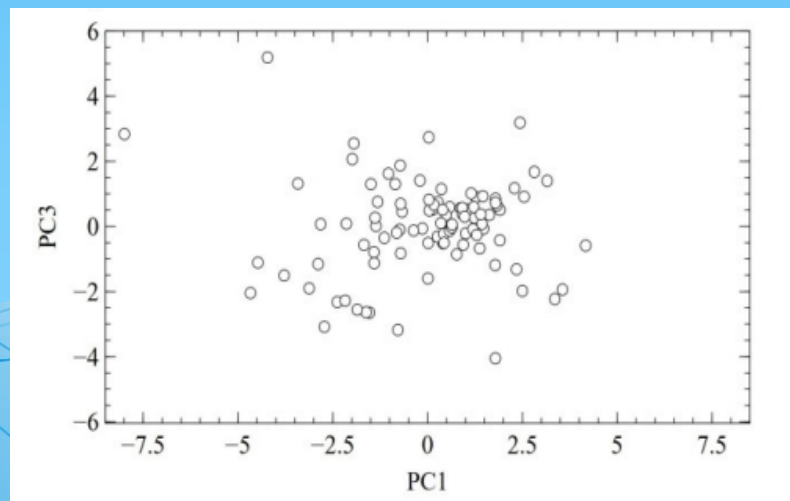
### 3.1.5 Leonids – LEO



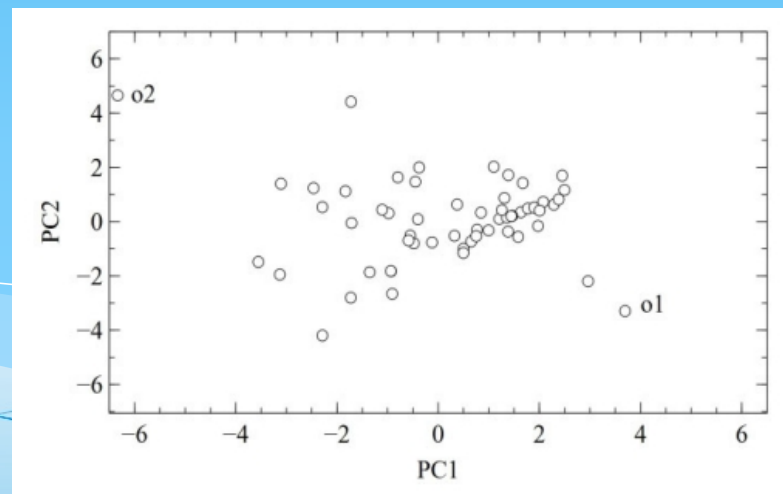
### 3.1.6 QUA – Quadrantids



### 3.1.7 Northern Taurids – NTA



### 3.1.8 Southern Taurids – STA



### 3.解析結果 表

#### 3.1.2 COM

**Table 4.** Principal component analysis of COM meteor shower data.  $\Omega$  is the longitude of the ascending node.

Parameter	Eigenvalue 固有値	PC
$V_g$	0.3937	1
Na	0.3775	1
$\Omega$	0.38	2
Fe	0.3718	2
Mg	0.3704	2

**Table 5.** Median values of the chemical, kinematic, and dynamic parameters defined as more representative by the PCA of the entire sample of Coma Berenicids meteors.

Parameter	Value
$V_g$ (km s <sup>-1</sup> )	63.1
$\Omega$ (deg)	272.97
Na/Mg	0.97
Fe/Mg	0.55

#### 3.1.3 GEM

**Table 6.** Principal component analysis of GEM meteor shower data.

Parameter	Eigenvalue	PC
$\Omega$	0.8283	1
Na	0.338	2
Mg	0.3544	2
$V_g$	-0.3826	2

**Table 7.** Median values of the chemical, kinematic, and dynamic parameters defined as more representative by the PCA of the entire sample of Geminids meteors.

Parameter	Value
$V_g$ (km s <sup>-1</sup> )	33.5
$\Omega$ (deg)	262.08
Na/Mg	0.24
Fe/Mg	0.29

#### 3.1.4 Perseids – PER

**Table 8.** Principal component analysis of PER meteor shower data.  $\omega$  is the argument of the perihelion.

Parameter	Eigenvalue	PC
H1	0.624	1
Mg	0.4717	2
Fe	0.4668	2
Na	0.4652	2
$\omega$	0.3304	3

**Table 9.** Median values of chemical, kinematic, and dynamical parameters defined as more representative by PCA of the entire sample of Perseid meteors.

Parameter	Value
H1 (km)	110.12
$\omega$ (deg)	150.79
Na/Mg	1.02
Fe/Mg	0.56

### 3.解析結果 表

#### 3.1.5 LEO

**Table 10.** PCA of LEO meteor shower data. Incl is the inclination of the orbit.

Parameter	Eigenvalue	PC
Incl	0.3745	1
$\Omega$	0.3541	1
Mg	-0.2916	2
Na	-0.3044	2

**Table 11.** Median values of chemical, kinematic, and dynamical parameters defined as more representative by a PCA of the total sample of Leonid meteors. Incl is the inclination of the orbit.

Parameter	Value
$\omega$ (deg)	234.61
Incl (deg)	161.83
Na/Mg	1.04
Fe/Mg	1.11

#### 3.1.6 QUA

**Table 12.** PCA of QUA meteor shower data. a is the semimajor axis.

Parameter	Eigenvalue	PC
$V_g$	0.419	1
a	0.4076	1
Fe	0.4735	2
Mg	0.4664	2

**Table 13.** Median values of chemical, kinematic, and dynamical parameters defined as more representative by PCA of the entire sample of Quadrantid meteors. a is the semimajor axis.

Parameter	Value
$V_g$ (km s <sup>-1</sup> )	40.7
a (au)	2.8
Na/Mg	0.48
Fe/Mg	0.48

#### 3.1.7 NTA

**Table 14.** PCA of NTA meteor shower data. q is the perihelion distance.

Parameter	Eigenvalue	PC
q	0.4487	1
$V_g$	0.4228	1
$\Omega$	-0.4542	2
$\omega$	-0.5079	2
Na	0.3736	3
Mg	0.3641	3

**Table 15.** Median values of chemical, kinematic, and dynamic parameters defined as more representative by a PCA of the entire sample of northern Taurid meteors. q is the perihelion distance.

Parameter	Value
$V_g$ (km s <sup>-1</sup> )	27.6
q (au)	0.36
$\omega$ (deg)	292.7
$\Omega$ (deg)	228.4
Na/Mg	1.00
Fe/Mg	0.64



### 3.解析結果 表

#### 3.1.8 Southern Taurids

**Table 16.** PCA of STA meteor shower data.

Parameter	Eigenvalue	PC
q	0.4052	1
$V_g$	0.3895	1
Hl	0.4213	2
Mg	0.3603	2
Na	0.3109	2

**Table 17.** Median values of chemical, kinematic, and dynamical parameters defined as more representative by PCA of the entire sample of Southern Taurids meteors.

Parameter	Value
$V_g$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	25.2
q (au)	0.43
Na/Mg	1.20
Fe/Mg	0.52

#### 3.1.9 Other meteor showers

**Table 18.** PCA of 'other meteor showers' data.

Parameter	Eigenvalue	PC
$V_g$	0.4743	1
Incl	0.445	1
Mg	0.5721	2
Na	0.5519	2
q	0.7634	3

**Table 19.** Median values of the chemical, kinematic, and dynamic parameters defined as more representative by the PCA of the 'other meteor showers'.

Parameter	Value
$V_g$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	40.9
Incl (deg)	52.54
q (au)	0.62
Na/Mg	0.81
Fe/Mg	0.49

#### 3.1.10 Sporadic iron type

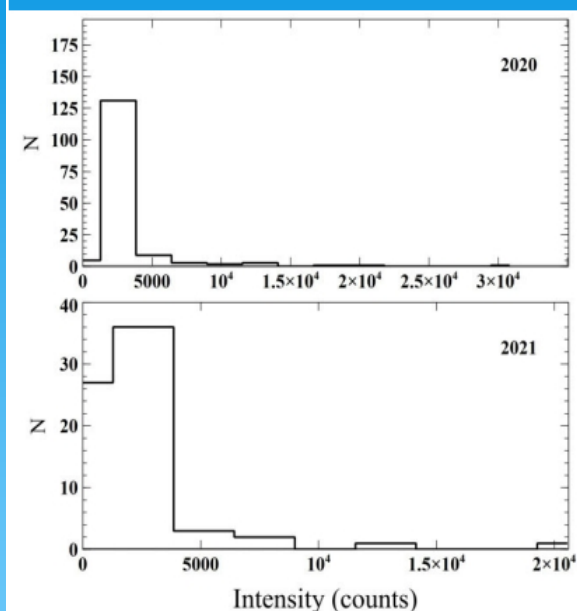
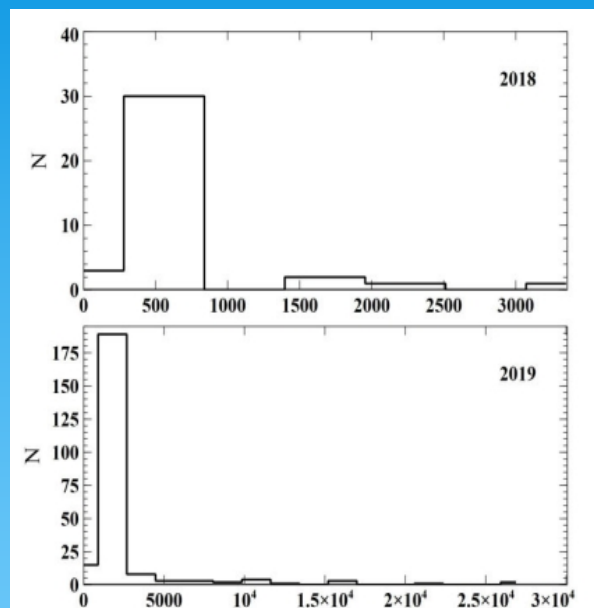
**Table 20.** PCA of the sporadic meteor of iron type.

Parameter	Eigenvalue	PC
$V_g$	0.4021	1
Incl	0.3692	1
Na	0.5291	2
Mg	0.5216	2

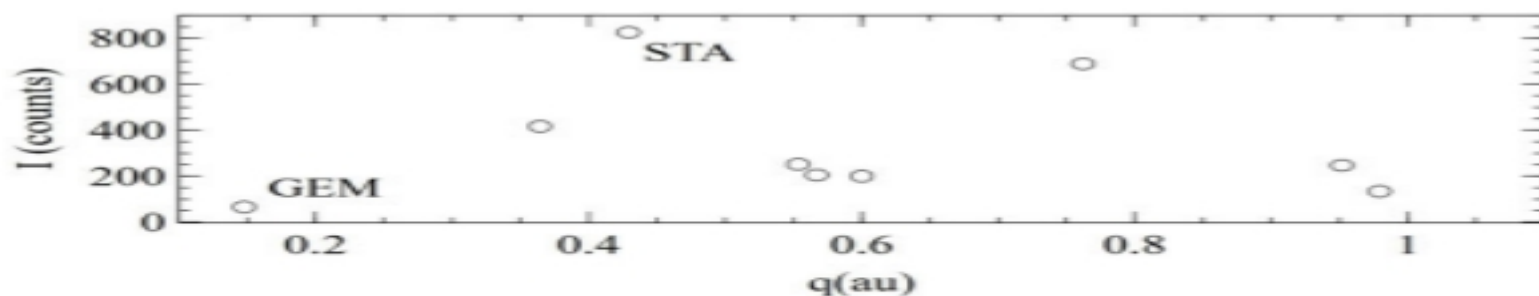
**Table 21.** Median values of chemical, kinematic, and dynamical parameters defined as more representative by PCA of the sporadic meteor of iron type.

Parameter	Value
$V_g$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	14.2
Incl (deg)	10.14
q (au)	2.0
Na/Mg	0.29
Fe/Mg	7.51

### 3.解析結果 GEMの経年変化等



Period	$N$	Na/Mg
2018	37	0.14
2019	230	0.37
2020	155	0.23
2021	69	0.07



**Figure 15.** Phase plane of the median intensity of the sodium line  $I$  against the perihelion distance  $q$  for some meteor showers from Table 24. The showers GEM and STA form the extremes of the median intensity.

## 4. 要約と結論

この論文では、日本のアマチュア天文家である関口氏が2018年10月から2022年8月(UT)の間に記録した3000以上の流星のスペクトルを分析しました。以下では、この研究の最も重要な結果を要約します。

(i) サンプルに含まれる流星の組成パラメータ(ナトリウムとマグネシウムのスペクトル線と鉄バンドの強度)、軌道パラメータ(長半径、近日点距離、離心率、周期、近日点引数、昇交点経度、傾斜)、および運動パラメータ(地心速度、初期高度と最終高度)についてPCAを実行します。流星に関する文献では、探索的データ解析法を用いた研究はまだまれです。

(ii) PCAを通じて、解析した流星群と流星群のナトリウムとマグネシウムの線の強度は、軌道パラメータ(GEM、LEO)と運動パラメータ(PER)に個別に関連付けられるか、またはこれら2つのグループ(SPO、QUA、NTA、STA)と同時に関連付けられることがわかりました。

(iii) 主成分の構成に関連する要因として軌道パラメータが存在することは、各流星群の流星群の構成を区別する際に重力および/または非重力の力の影響を示している可能性がある。運動パラメータは、流星群の物質の強度と相関関係がある。

(iv) セクション 3.1 で実行されたPCAのほとんどにおいて、鉄の帯の強度は、ナトリウムおよび/またはマグネシウムの線の強度よりも低い固有値を持っている。この特性は、流星群および太陽系自体におけるこの金属の含有量が少ないためである可能性がある。

(v) この規則の例外はCOMおよびQUA流星群であり、鉄の帯の強度はマグネシウムの線の強度よりもわずかに強い。

(vi) 流星群のグループ化は、必ずしも散発性流星のものと類似した軌道、化学、および運動パラメータの分布を持つ流星のグループにつながるわけではない。

(vii) サンプル中の通常のスペクトル型の割合の中央値は80.5%で、範囲は39.5%から96.8%です。これらの極端な値は、それぞれGEMとPERに対応します。GEM流星群では、Naの少ない流星とNaを含まない流星が60.3%、鉄流星が1つ見られましたが、PER流星群では、Naの少ない流星が2.1%、Naの多い流星が1つ、Naの多い流星が1つだけ見られました。

(viii) サンプル中の鉄スペクトル型の典型的な散発性流星の地心速度範囲は 4.8 から 36.6 km/s で、中央値は 14 km/s です。軌道傾斜角は 0.4 から 64.1 度で、中央値は 10.2 度です。

(ix) 鉄クラスの流星体のナトリウムとマグネシウムの含有量は、この研究で分析された他のすべての流星サンプルよりも低いですが、これはこの研究で分析された絶対等級範囲に純粋な鉄流星体が存在することを示すものではない。

(x) H テストでは、LEO 流星群と PER 流星群のナトリウム線の強度分布が類似していることが示された (p 値 = 0.068)。これら 2 つの流星群のナトリウム線の強度分布は、GEM 流星群の分布とは異なり、彗星と小惑星を母天体とするこれらの流星群のナトリウム含有量に有意な差があることを示している。

(xi) H テストでは、LEO、PER、および QUA 流星のナトリウム線の強度分布が異なることが示されており、これは小惑星 2003 EH1 が QUA 流星群の母天体であるという考えに関連している可能性がある。

(xii) QUA 流星群と GEM 流星群を比較すると、PER 流星群や LEO 流星群の場合と同様に、類似性に欠けることがわかります。この 2 つの流星群の統計的な違いは、ナトリウム線の平均強度が QUA 流星では GEM 流星群の 2 倍 (134 カウント) であるという事実によって説明できます。GEM 流星群はナトリウム含有量が非常に低く、化学的基準で母天体の仮説的定義の基準として使用することはできません。

(xiii) PER 流星群や LEO 流星群と比較すると、COM 流星群は QUA 流星群に比べて小惑星よりも彗星母天体である可能性が高くなります (p 値 = 0.182)。そこで、母天体候補を調べました。下の表参照

(xiv) ナトリウム含有量に基づく母天体タイプの定義は NTA 流星群と STA 流星群では明確ではなく、これらの流星群間のナトリウム分布も異なります。NTA と STA は、私たちのデータセットにおけるこのパラメータの上限です。

(xv) 私たちのサンプルの散発性流星体の 39.9 パーセントと 40.6 パーセントは、2 つの異なる力学的基準に従って彗星のような軌道を持っています。これらのパーセンテージは、同様のデータ収集機器とデータ削減ソフトウェアを使用するブラジル流星観測ネットワーク (BRAMON) によって観測された散発性流星に対して定義された彗星軌道の 66.2 パーセントと 61.3 パーセントよりも低いです。

Name	a	e	q	i	$\omega$	$\Omega$	Dsh	Tj	$\lambda_{\pi}$	$\beta_{\pi}$	$\alpha$	$\delta$	Vg
基準天体 COM	14.66	0.962	0.557	135.30	263.50	272.20	0.00	-0.30	11.31	-44.34	167.0	28.0	63.3
1750 C1	#####	1.000	0.200	132.00	285.00	303.00	0.53	#####	11.18	-45.88			
RVO 12/27	14.13	0.962	0.537	135.40	265.80	275.40	0.04	-0.27	11.29	-44.45	167.4	27.4	63.2