

流星スペクトルのタイポロジー

Typology of Meteor Spectrum

前田 幸治

Koji Maeda

(NMS / SonotaCo Net)

構成

1. はじめに
2. 流星スペクトル観測の基礎
3. 流星スペクトルの類型分類
4. 類型分類が示すもの
5. まとめと課題

1. はじめに: タイポロジーとは

類型学 (建築学、写真、美術)

分類学、特に考古学や考現学などにおいて、物質をその特質・特性によって分類し、分類結果を考察すること (以下略)

(Wikより)

”タイポロジー 写真”と
検索すると見つかる給水塔の
画像

ベッヒャー夫妻、写真集より

ここでは、基本的には”分類“を目指すが、そこまでいかないことも、、

きっかけ

- UFOCaptureが公開されて、めったに起きない現象（流星）が時間さえかければ、いつか得られる。



流星スペクトルに応用

当初のもくろみ

流星のスペクトルにはどれだけ種類があるのか？
すべて流星のスペクトルタイプを集めたい。



流星が何（物質）が光っているのかわかる
流星体の物質の種類がわかる

流星ビデオ観測

- 流星は、本質的に動いているので、動画の観測が必須
静止画（写真）に比べて感度を上げる必要があり、
解像度が悪い、ノイズが多い → 精度悪い



数で精度をカバー： a/\sqrt{N}

Nは最低10は欲しい、できれば20個

1つのサンプル（流星）をだけで結論をださない

もちろん、例外はあり

観測目的

流星スペクトルを全部知りたい（集めたい）

- タイポロジー：類型分類
- 群流星間のタイポロジー： 軌道との関連
- 群流星内のタイポロジー： GEMについて
- スペクトルライトカーブのタイポロジー
- 短痕（wake, tail）のタイポロジー
- …

問題点

- これまでより桁違いに多くの流星のスペクトルが必要
- これまでのTV観測（ワテックカメラ）によるスペクトルは分解能が低い
→ 焦点距離を伸ばすと流星が撮れなくなる



高感度で、分解能が高い4Kビデオ観測の登場

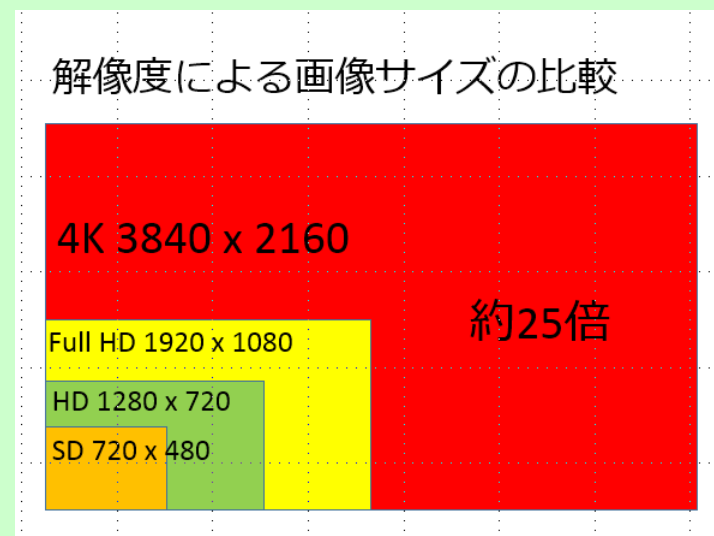
2. 流星スペクトル観測の基礎

観測条件

station	Miyazaki (MZ1) 131.42 E, 31.83 N, 13 m
Camera	SONY alpha 7s (normal)
Video mode	4K (3840 x 2160), 30p
Lens	FD24mmF1.4L, FD85mmF1.2L Sigma 50mmF1.4, 35mmF1.4
Grating	300, 600 grooves / mm, VIS,UV, Edmund opt.
Software	UFOCaptureHD2 V4.10→4.60 UFOAnalyzer V2.42→2.65
wavelength	400 - 660 nm
observation type	Single station

スペクトル解析BASS : Basic Astronomical Spectroscopy Software,
<https://uk.groups.yahoo.com/neo/groups/astrobodger/info>

画素数
SD : 720 (640) ×480
HD : 1280×720
フルHD (BSデジタル) : 1920×1080
4K : 4096×2160
8K : 7680×4320



観測機材



2015

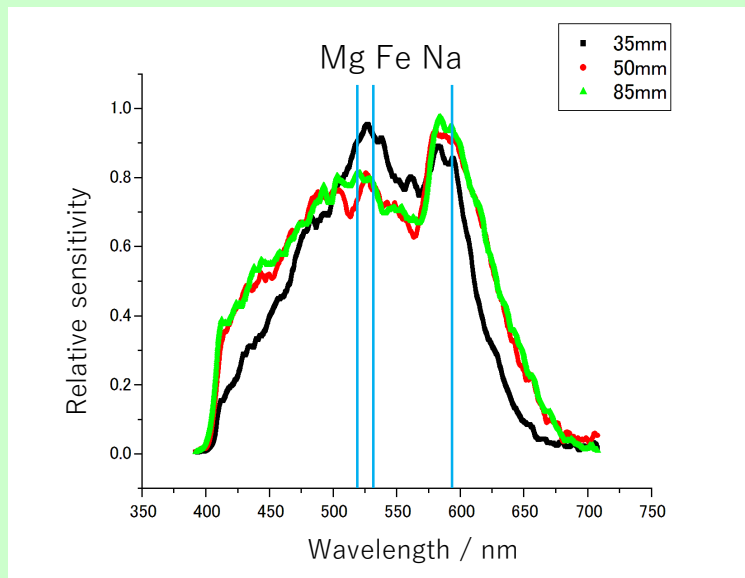


2017



2021-2024

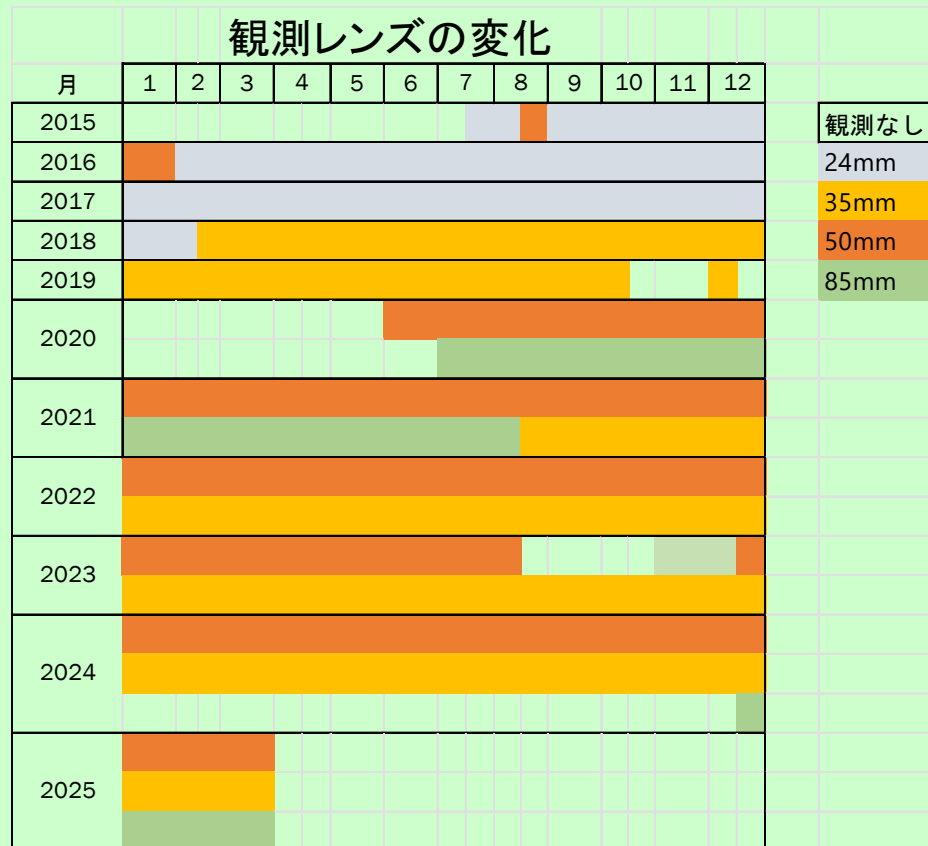
西向き、南向き 仰角30-45度
主要群の時は、経路に垂直に合わせる



システム相対感度

観測

- 2015年7月から2024年12月31日
- 2015-17年分全静止画像(約1500個)は the SonotaCo Network Japan Forum (*1) にアップ



年ごとのスペクトル撮影数

年	スペクトル数
2015	367
2016	588
2017	646
2018	776
2019	398
2020	861
2021	1492
2022	1665
2023	988
2024	1531
全期間	9312

*1 <http://sonotaco.jp/forum/viewtopic.php?t=3650>



レンズによる流星光度の違い

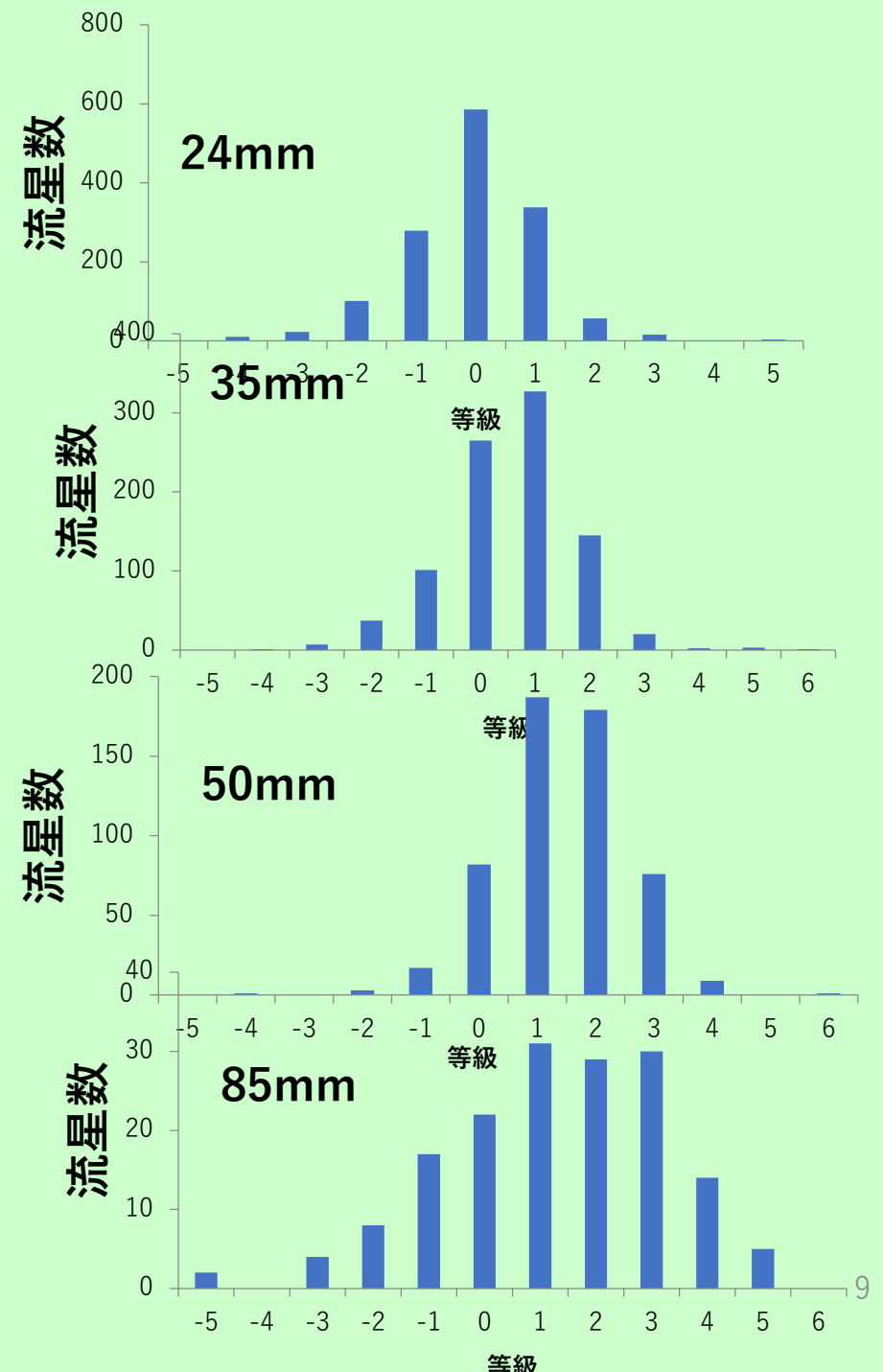
2015-2023データ

24-50mmは、600VIS

85mmのみ300VIS

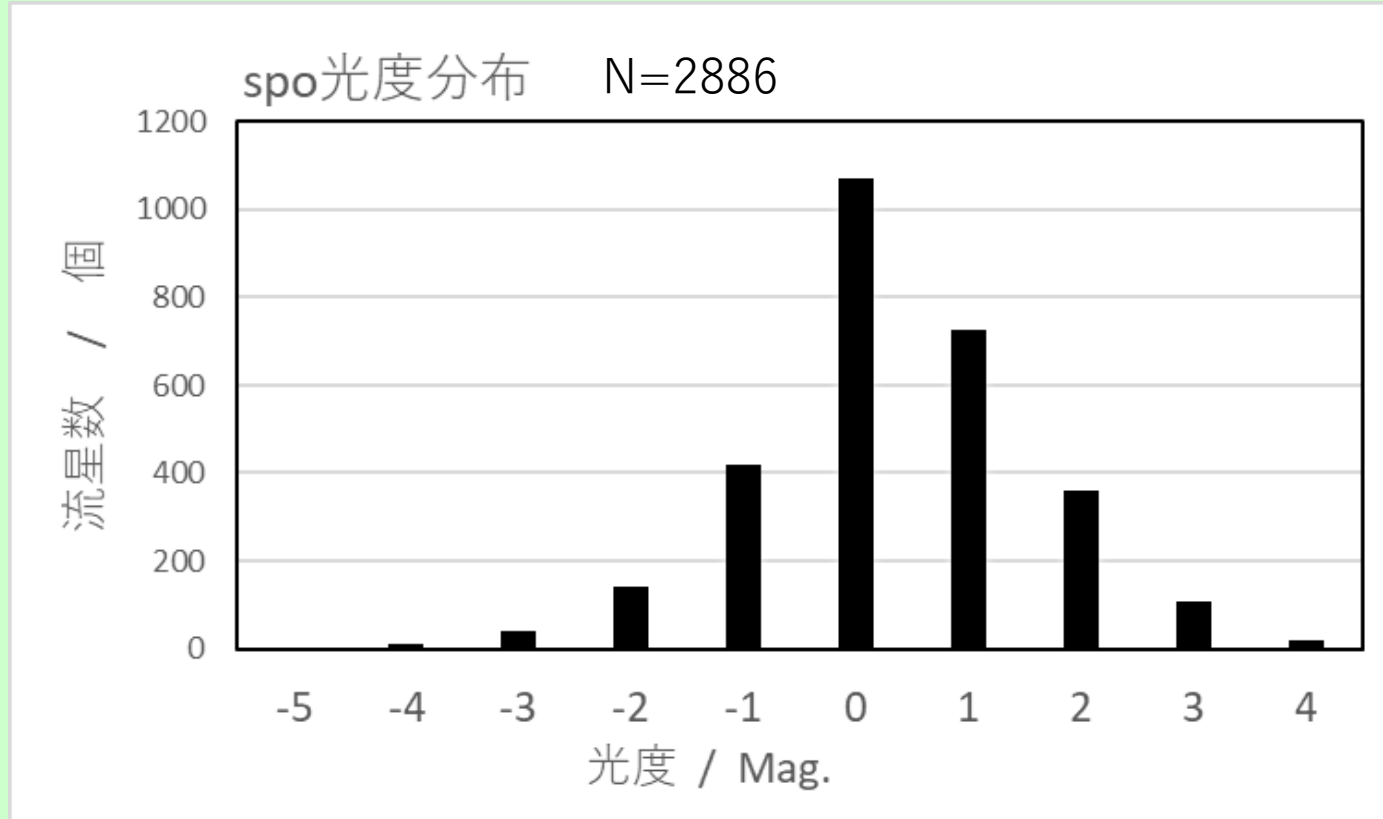
焦点距離が2倍になると約1等弱
暗いスペクトルが写る

以後、光度分布などはこれらを混ぜて
利用しているので、やや信頼性に欠ける
ところあり



流星光度分布

0次が写っていたスペクトルの全期間の光度分布



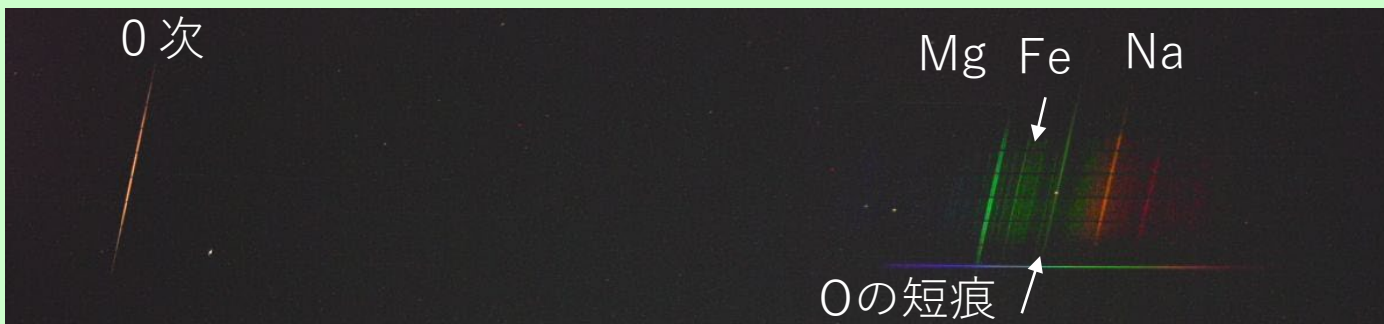
3. スペクトルの類型分類

Borovicka (*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

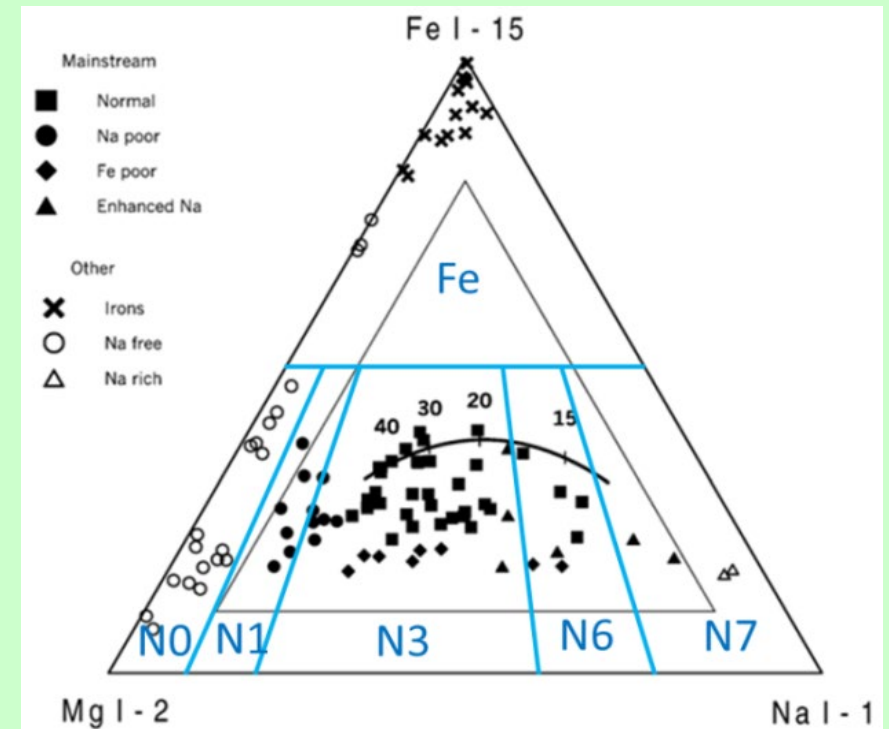
This work (右図 青字)
Borovičkaの方法に準じて6種類に分類

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、目視で明るさの比を判断して決めた



Mg-Na-Fe 三角ダイアグラム



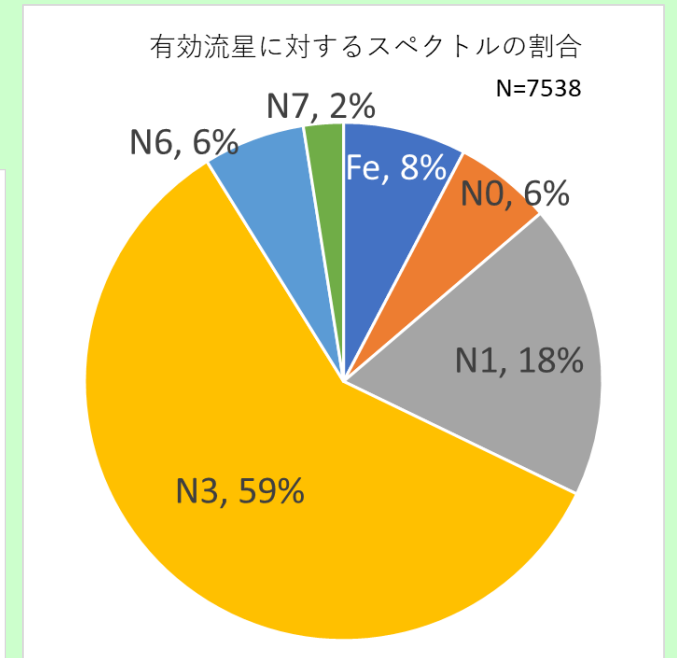
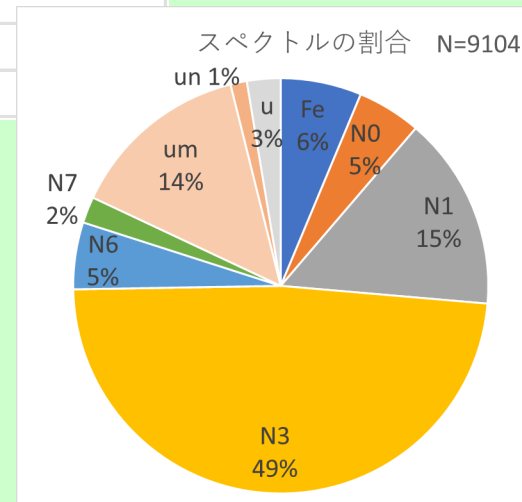
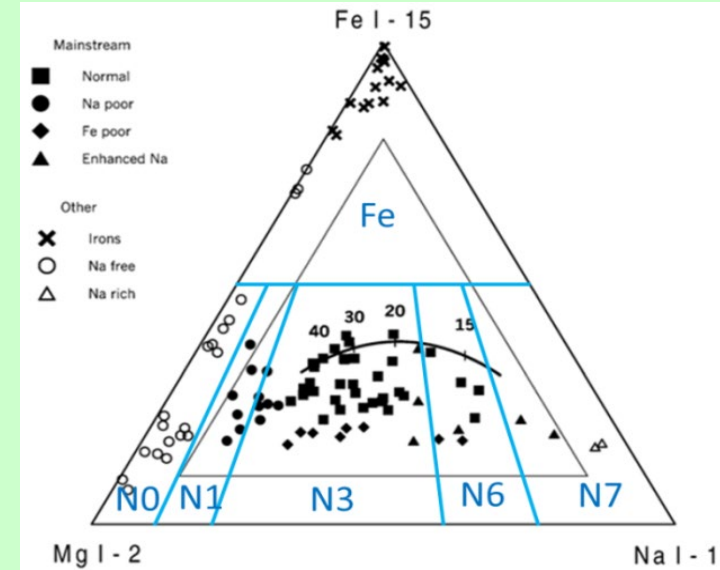
4K ビデオ観測によるスペクトルの一例
50mm レンズ

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

スペクトルの分類結果

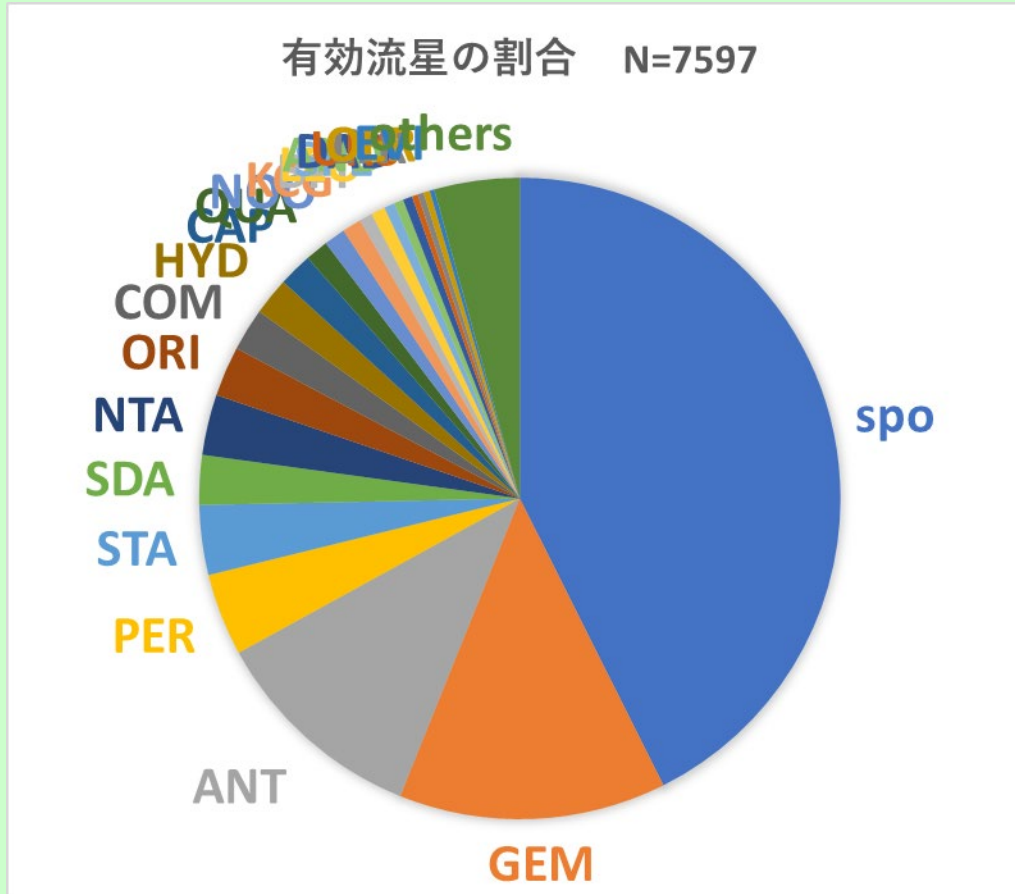
Borovika		this work				
7種の分類		Na/(Na+Mg)	type	個数	全流星に対する割合	有効流星に対する割合
メインストリーム	Iron		Fe	579	6%	8%
	Na free	< 10%	N0	458	5%	6%
	Na poor	10-20%	N1	1387	15%	18%
	Normal, Fe poor	20-60%	N3	4447	48%	59%
	Enhanced Na	60-75%	N6	479	5%	6%
	Na rich	75-100%	N7	188	2%	2%
			小計	7538	82%	100%
	淡	0%	um	1298	14%	
	い	100%	un	117	1%	
		不明	u	241	3%	
			合計	9194	100%	

Mg-Na-Feダイアグラム



群と散在

判定はUFOAnalyzerと目視で角速度のチェック



shower	全流星	有効流星
spo	3962	3237
GEM	1341	1024
ANT	967	830
PER	370	315
STA	313	267
SDA	273	190
NTA	256	232
ORI	243	192
COM	202	163
HYD	165	144
CAP	141	129
QUA	106	88
NOO	99	82
KCG	86	73
BPI	62	50
LEO	61	54
SPE	49	40
AND	42	36
DAD	40	36
URS	27	23
LYR	27	23
OER	27	24
EVI	21	18
others	327	327

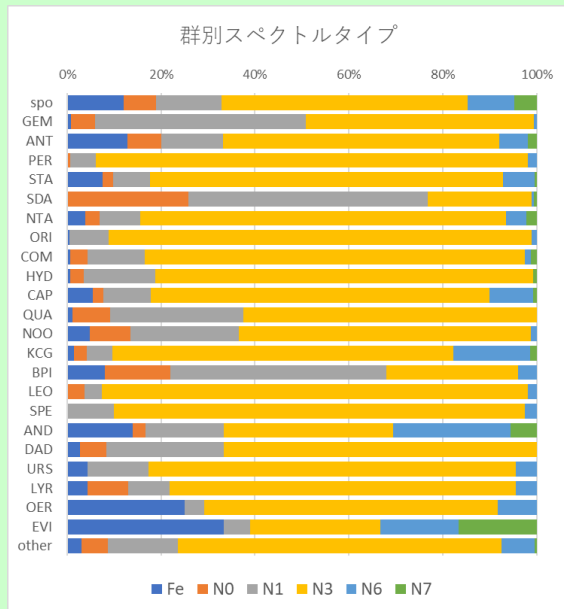
4. スペクトルの類型分類が示すもの

- 1 流星群別のスペクトルによる特徴
- 2 鉄流星について
- 3 ふたご群内のスペクトルの変化
- 4 スペクトルライトカーブの世界

4.1 流星群別のスペクトルの分布

20個以上スペクトルが撮れた群の表
それ以外はothersとして集計

流星群の判定は基本はUFOシステムのj14リスト
ANTは、IMOのリストによるが、10, 11月は
ANTとSTA, NTAを分けて集計



各流星群のスペクトルの割合を棒グラフ

各群のスペクトルタイプ分布

	Fe	N0	N1	N3	N6	N7	um	un	u	sum	有効流星数
spo	387	225	452	1699	320	154	541	69	110	3847	3237
GEM	8	52	461	497	6	0	277	5	32	1306	1024
ANT	107	59	109	489	50	16	99	14	21	943	830
PER	0	2	17	290	6	0	32	3	19	350	315
STA	20	6	21	201	18	1	37	5	4	309	267
SDA	0	49	97	42	1	1	75	1	7	266	190
NTA	9	7	20	181	10	5	18	4	2	254	232
ORI	1	0	16	173	2	0	43	2	6	237	192
COM	1	6	20	132	2	2	33	1	5	197	163
HYD	1	4	22	116	0	1	17	0	4	161	144
CAP	7	3	13	93	12	1	7	2	3	138	129
QUA	1	7	25	55	0	0	11	0	7	99	88
NOO	4	7	19	51	1	0	15	0	1	97	82
KCG	1	2	4	53	12	1	6	2	5	81	73
BPI	4	7	23	14	2	0	9	1	2	60	50
LEO	0	2	2	49	1	0	7	0	0	61	54
SPE	0	0	4	35	1	0	8	1	0	49	40
AND	5	1	6	13	9	2	4	1	1	41	36
DAD	1	2	9	24	0	0	4	0	0	40	36
URS	1	0	3	18	1	0	2	0	2	25	23
LYR	1	2	2	17	1	0	3	0	1	26	23
OER	6	0	1	15	2	0	3	0	0	27	24
EVI	6	0	1	5	3	3	3	0	0	21	18
other	8	15	40	185	19	1	44	6	9	327	268

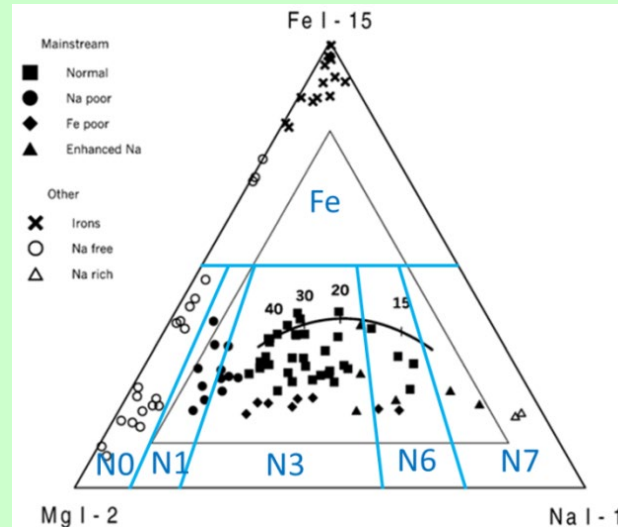
Naの強度比と軌道要素の関係

• 各流星群のNaの割合を数値化

$$1. \text{ Na枯渇度} = (N0+N1)/\text{全流星} (\%)$$

$$2. \text{ Na-rich度} = (N6 + N7)/\text{全流星} (\%)$$

Mg-Na-Feダイアグラム



Hb: 0等の流星の発光点の高度の散在流星の平均値との差。
+の方が光度が高い(*)

軌道要素は上田氏による2019年観測指針(天文回報)より
OERのみ司馬氏(2022)
*小関氏(2024) MSS29より

	略号	有効流星数	枯渇度	rich度	軌道要素			km/s km		流星群名
					q	i	e	対地速度	Hb	
1	spo	3237	21%	15%					0	散在
2	GEM	1024	50%	1%	0.15	22.3	0.89	33.6	-0.2	ふたご
3	ANT	830	20%	8%				30.0		アンチヘリオンソース
4	PER	315	6%	2%	0.95	113	0.91	58.7	1.9	ペルセウス
5	STA	267	10%	7%	0.38	5.41	0.8	26.9	2.6	おうし南
6	SDA	190	77%	1%	0.09	25.7	0.96	39.8	-1.5	みずがめδ南
7	NTA	232	12%	6%	0.37	2.67	0.81	27.4	2.1	おうし北
8	ORI	192	8%	1%	0.58	164	0.93	66.0	2.6	オリオン
9	COM	163	16%	2%	0.55	135	0.94	63.0	1.8	かみのけ
10	HYD	144	18%	1%	0.98	130	0.98	58.9	0.9	うみへびσ(12月)
11	CAP	129	12%	10%	0.6	7.2	0.75	22.0	3.5	やぎα
12	QUA	88	36%	0%	0.98	70.9	0.63	40.3	-1.3	四分儀
13	NOO	82	32%	1%	0.12	23.3	0.99	42.0	0.4	11月オリオン
14	KCG	73	8%	18%	0.98	36.7	0.69	25.8	3.0	はくちょうκ
15	BPI	50	60%	4%	0.1	20.3	0.95	38.1		8月βうお=みずがめδ北
16	LEO	54	7%	2%	0.99	162	0.85	70.0	3.7	しし
17	SPE	40	10%	3%	0.94	140	0.94	64.1	1.5	9月ペルセウスε
18	AND	36	19%	31%	0.76	9.4	0.75	21.5	7.8	アンドロメダ
19	DAD	36	31%	0%	0.98	72.2	0.65	44.6		12月αりゅう
20	URS	23	13%	4%	0.94	52.3	0.79	32.7	6.8	こぐま
21	LYR	23	17%	4%	0.92	79.6	0.94	46.6	3.6	4月こと
22	OER	24	4%	8%	0.51	19.3	0.87	28.0		エリダヌスο
23	EVI	18	6%	33%	0.44	5.09	0.8	29.0		おとめη(3月)
24	others	268	21%	7%						その他

流星群によるNa枯渇度の違い

Naの割合は低速な流星ほど強くなるので、速度の速い群と遅い群の比較は注意（後ほどグラフあり）

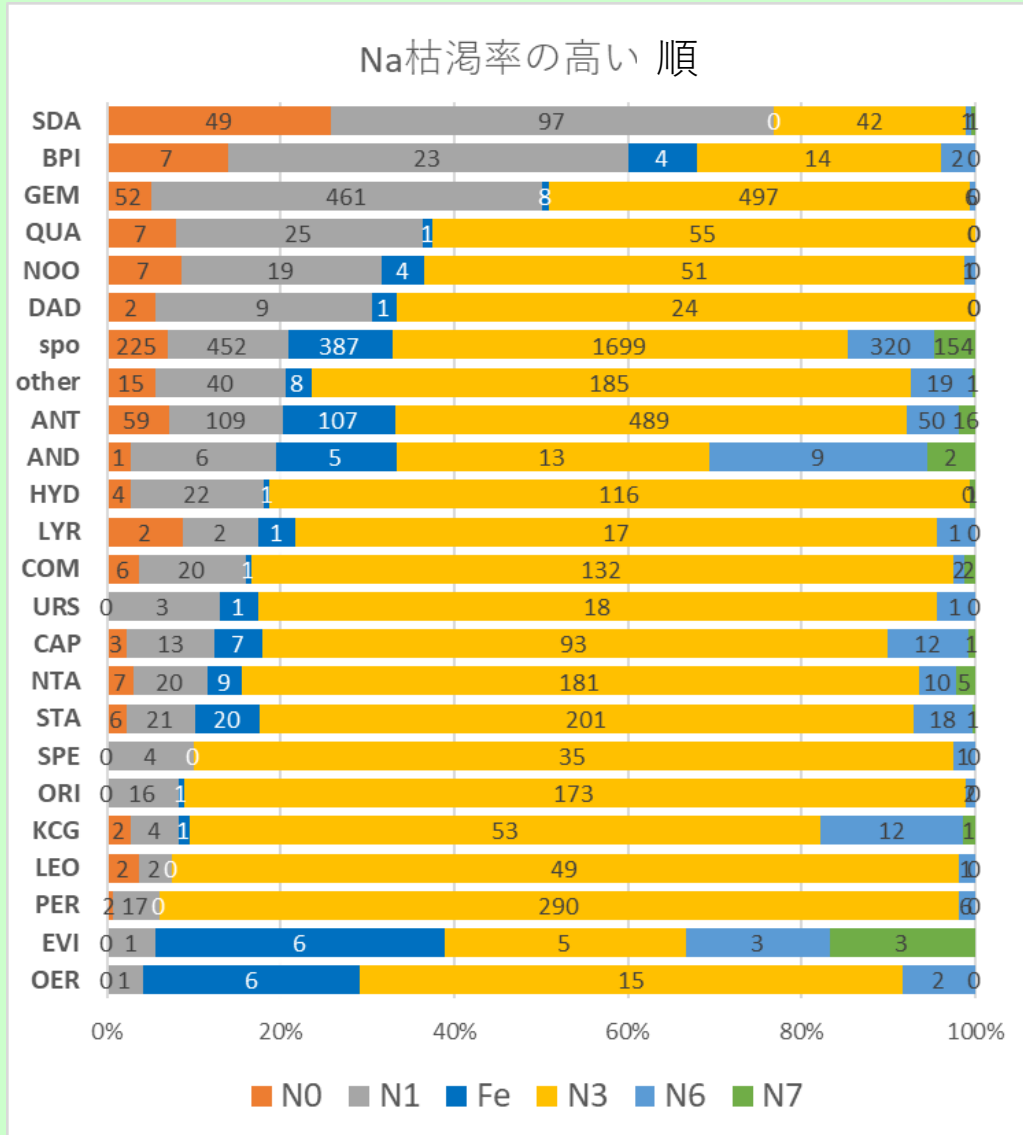
結果

枯渇度（N0+N1）は77%から4%まで非常に広い範囲

SDAとBPIが枯渇度60%以上で非常に大きい
GEMも50%と大きい

spoが21%と意外に大きく、spoより大きいのは、6群しかない

N0が多い群は、N1が多い傾向がありそう

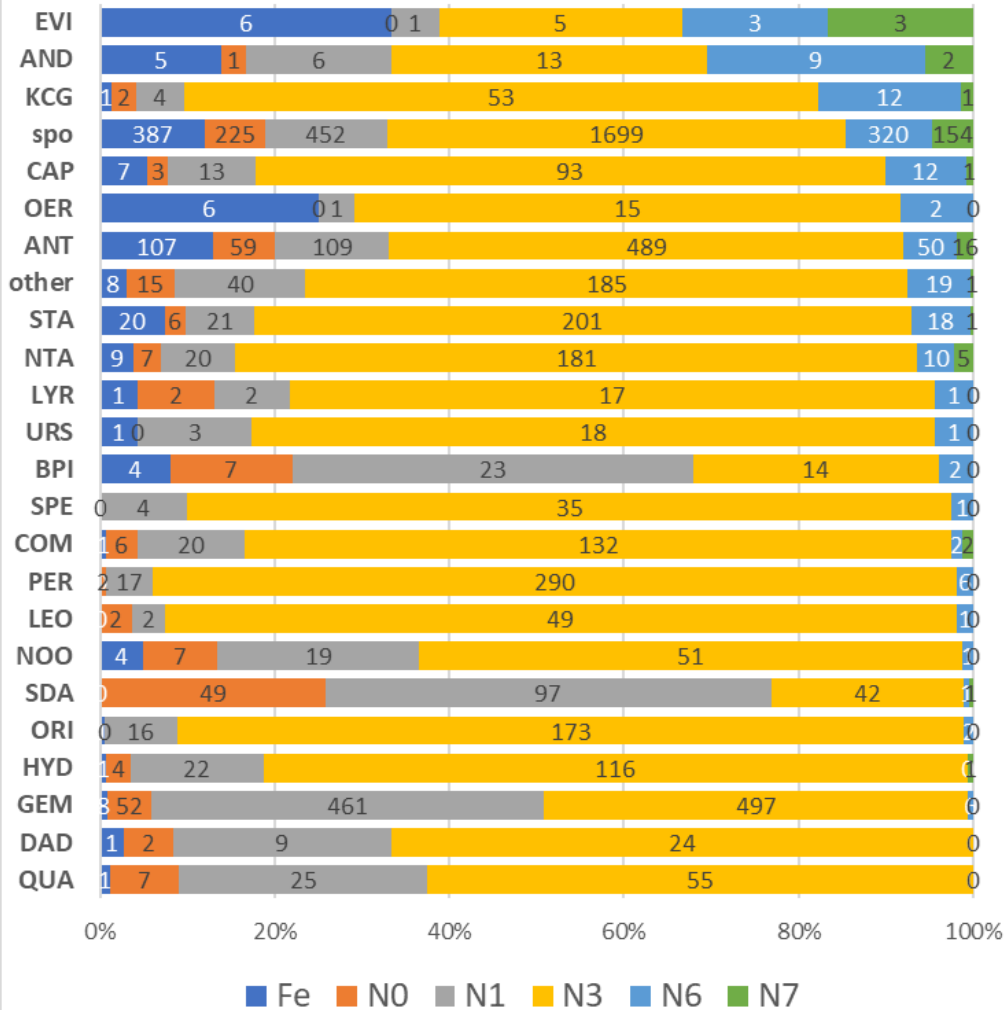


流星群によるNa-rich度の違い

Naの割合は低速な流星ほど強くなるので、速度の速い群と遅い群の比較は注意（後述）

考察

Na richの割合が多い群



上位のEVI, ANDは、サンプル数がまだ少なく、しかも群判定が難しい群なので注意を要する

ANDとKCGは、爆発するライトカーブ(LC)という特徴があり、それは、Na-richが影響しているのかも。同様に爆発する性状のCAPも上位（5番目）。しかし、EVIにはそのような性状は知られていない。

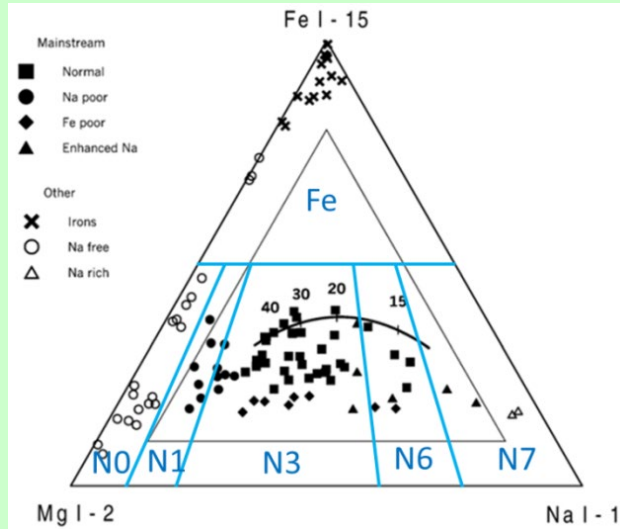
散在流星が上から4番目

群流星→散在流星 から散在流星は古い流星体というイメージがあったが、そうではないかもしれない。

Naの割合は外的に増加することはないので、Na-rich度が高いことは、そもそもの流星体のNaの割合が高かったことを意味するのでないか？

Naの割合と対地軌道パラメータ 1

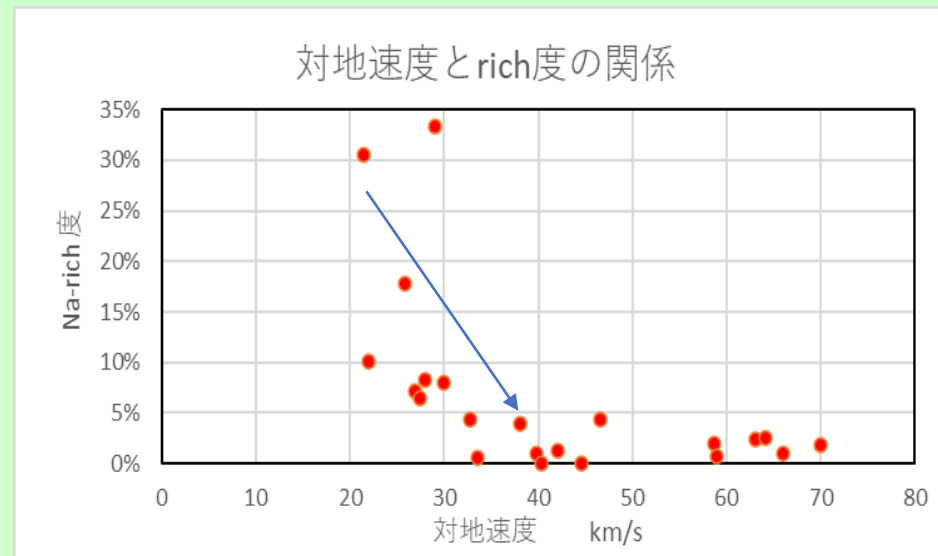
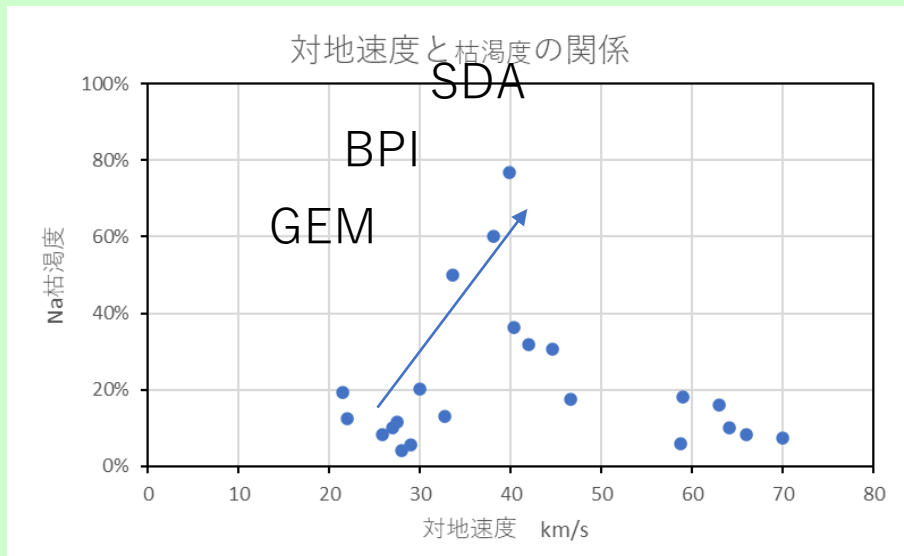
Mg-Na-Feダイアグラム



- 速度が遅い流星は、同じ組成でも、Naの割合が増加する（右図）

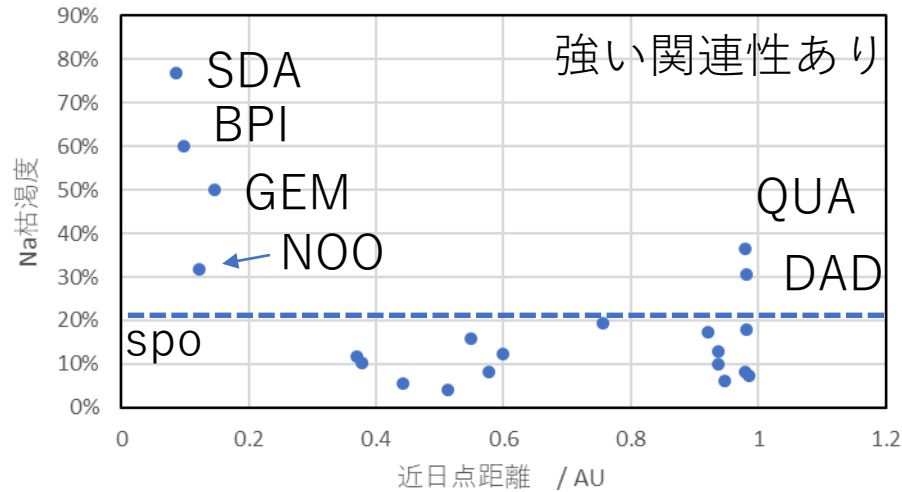
下図では、その傾向を矢印で示した。

- 40km/sより速度の速い群はNa枯渇度が少し高くないのは、別の要因か？
- rich度の傾向は妥当



Na枯渇度と軌道パラメータの関係

近日点距離と枯渇度の関係

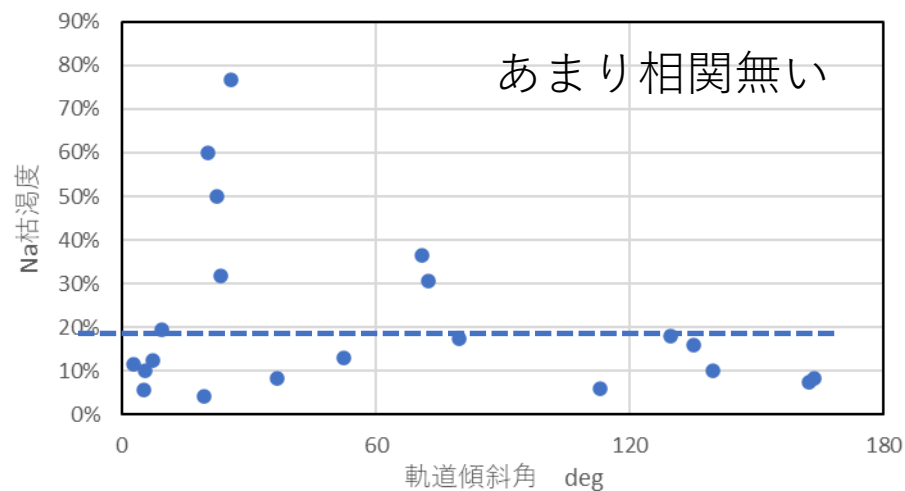


- Na枯渇度は近日点距離と強い相関あり
→これまで言われていた通り

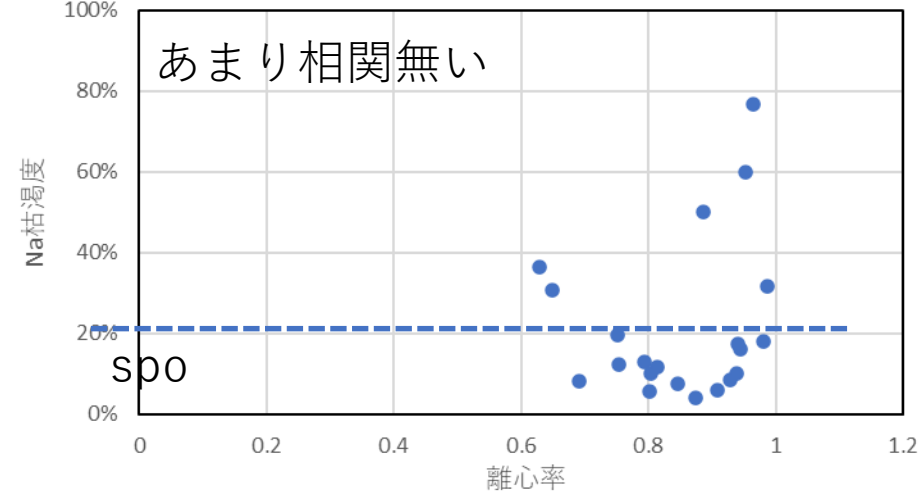
QUAとDADは、別の理由か？

他のパラメータは相関あまりない

軌道傾斜角と枯渇度の関係

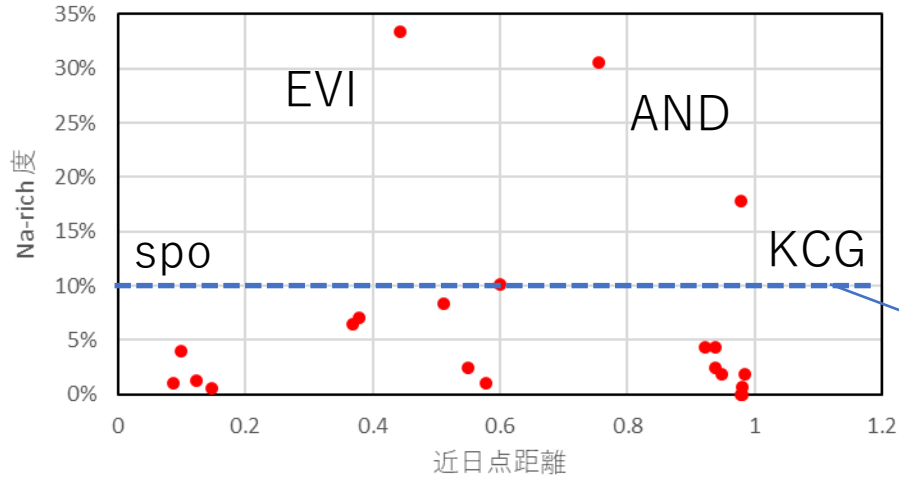


離心率とNa枯渇度の関係



Na-rich度と軌道パラメータの関係

近日点距離とrich度の関係



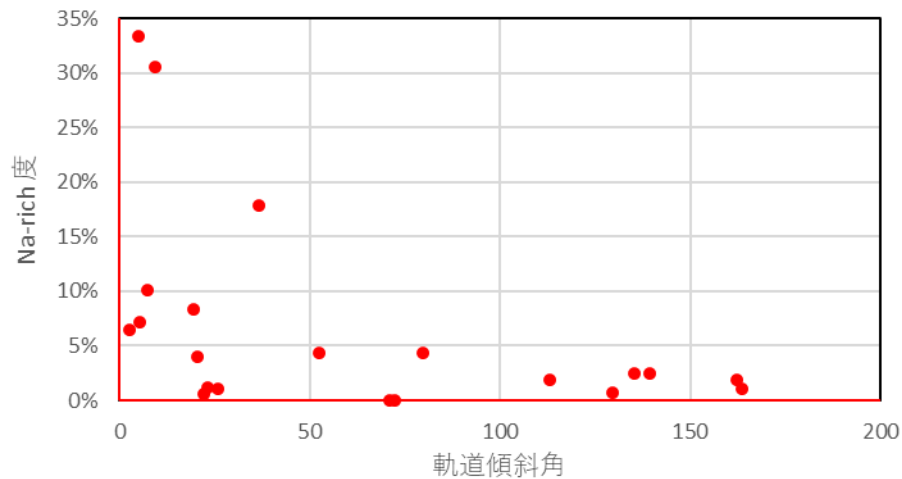
- どれも相関は低そう



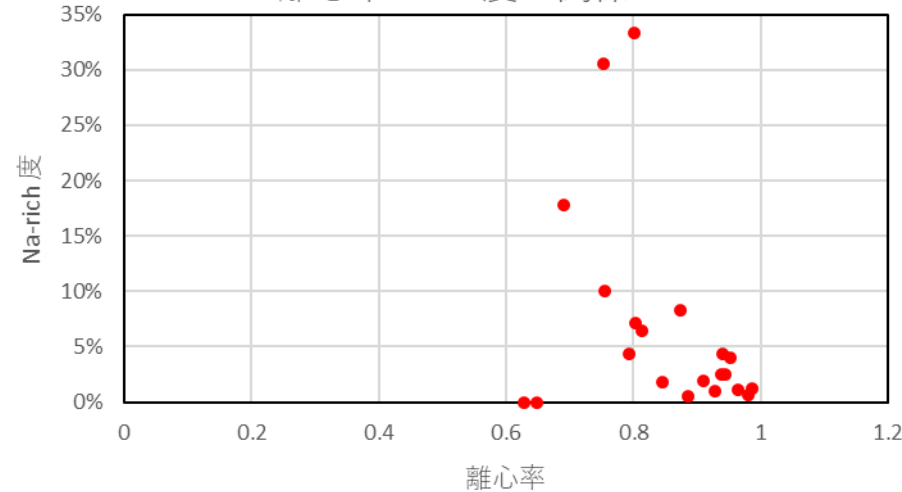
流星群の個性を表している？

- 散在流星が意外に大きい

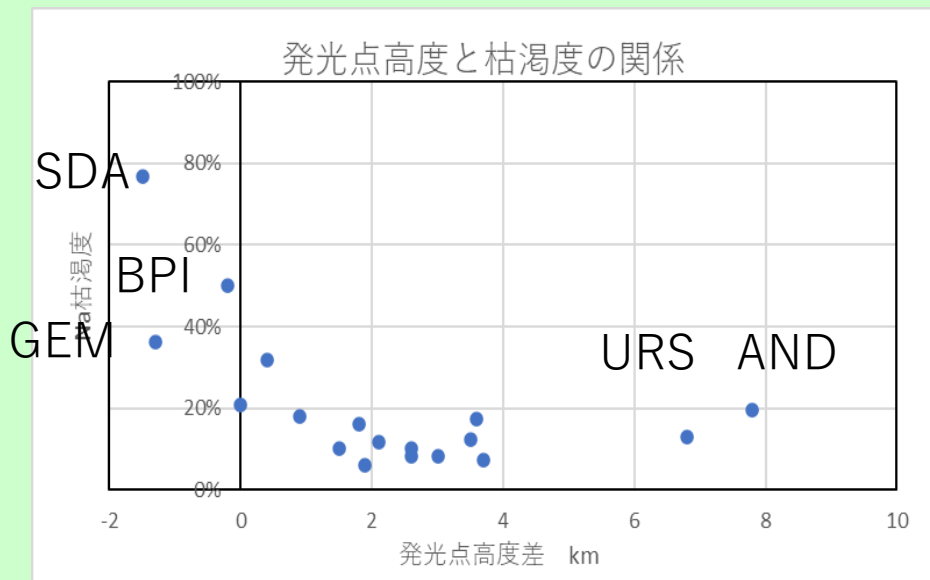
軌道傾斜角とrich度の関係



離心率とrich度の関係

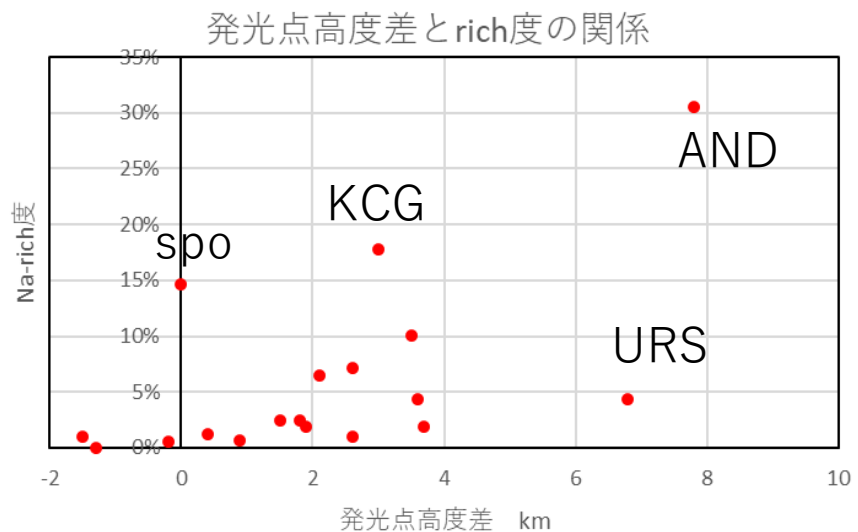


Naの割合と対地軌道パラメータ 2



枯渇度と発光点高度差の相関は高い (小関)

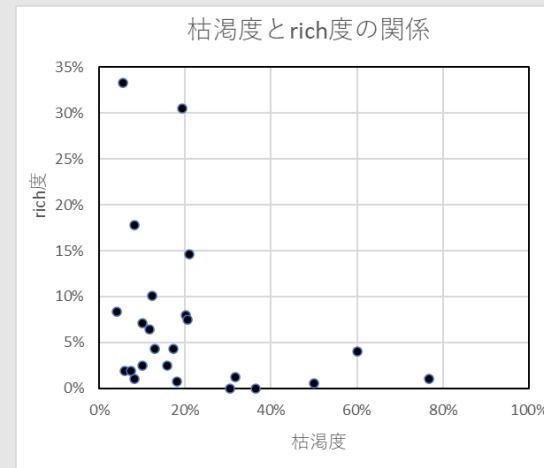
枯渇度の低めのURSとANDは特に高空より発光



Na-rich度が高いと発光点高度は高くなる傾向はあるが、URSはことなり、枯渇度程傾向は一致しない

Na-rich度の高いEVIは、発光点高度差のデータがない

参考



枯渇度とrich度は、逆相関になりそうだが、それほど強い逆相関ではない。

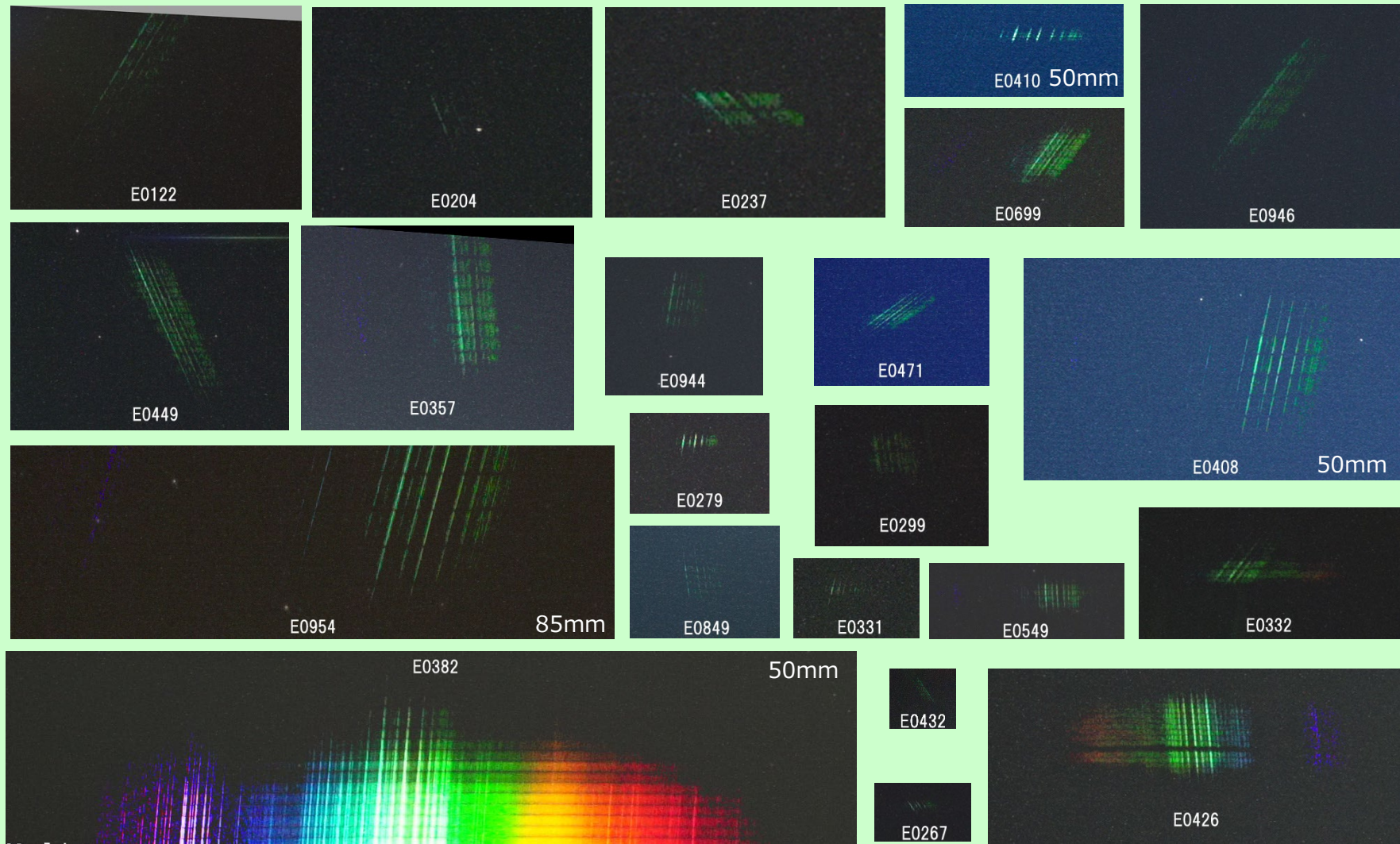
小まとめ

群のスペクトルの相違点、特徴

- Naの枯渇割合は、群によって大きく異なる
- Naの枯渇した流星の割合の大きな群は、近日点距離が小さい。周期が短いという特徴があるが、やや例外もある。
- ペルセ群とオリオン群などほとんどがN3で分布があまり無い群もある
- EVI, ANDなど、Naの割合が多い群が存在する

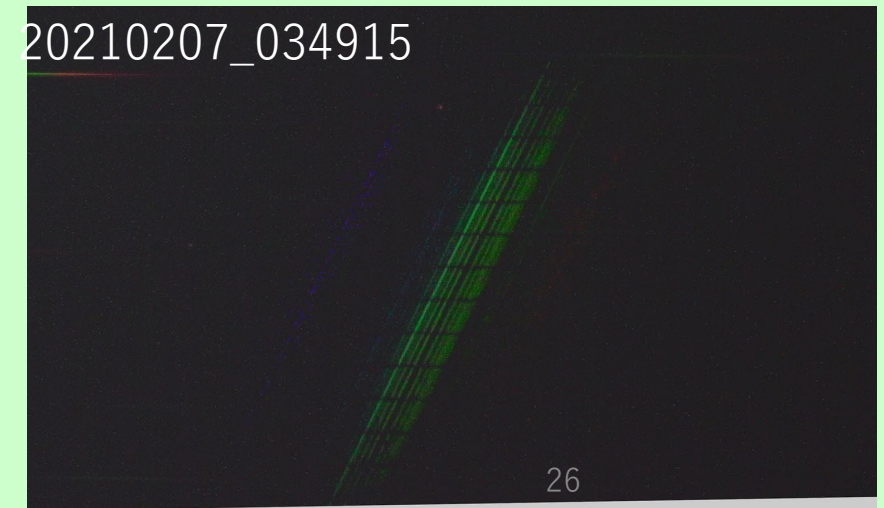
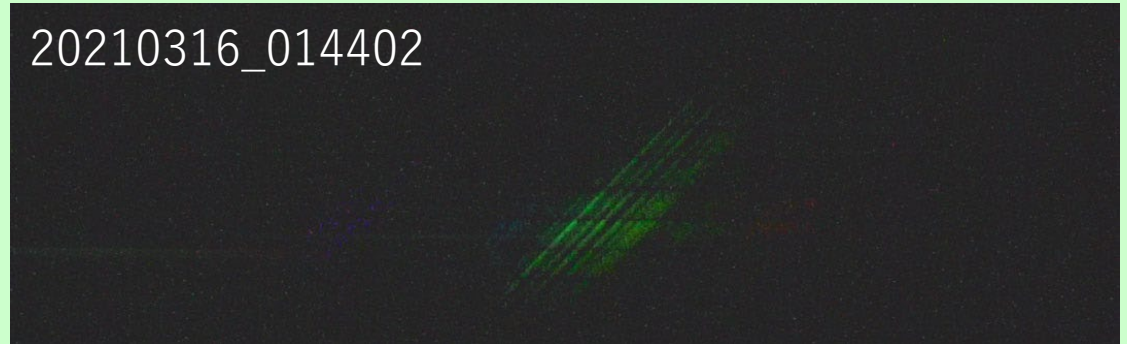
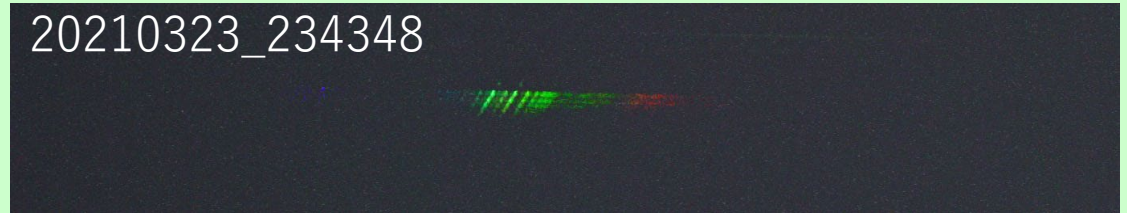
4.2 鉄流星について

鉄流星のタイポロジー



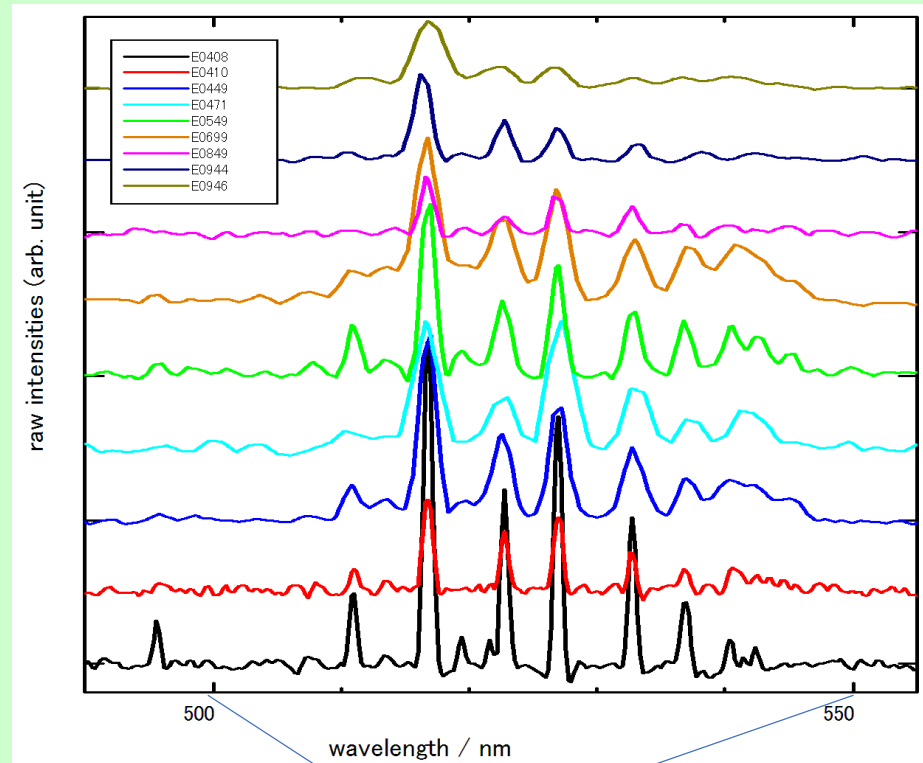
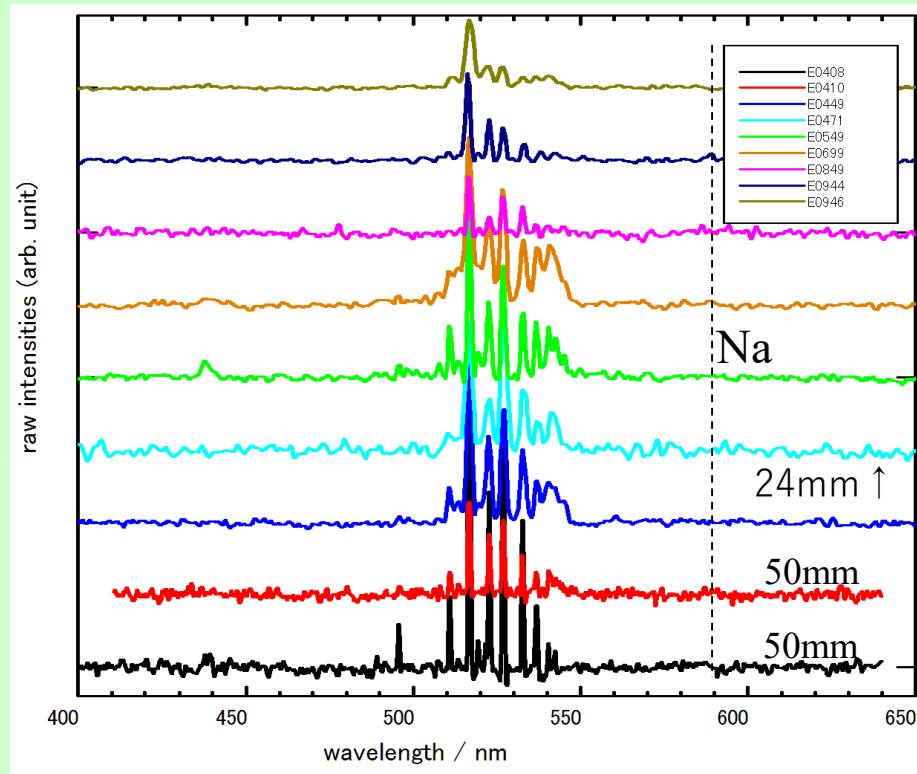
鉄流星とは

- 鉄以外の元素のスペクトルがほとんど見えない流星
- 現在のところスペクトル観測でしか正確に検出する手段がない
- 光度変化が特徴的
左の画像はすべて上から下へ流れた流星

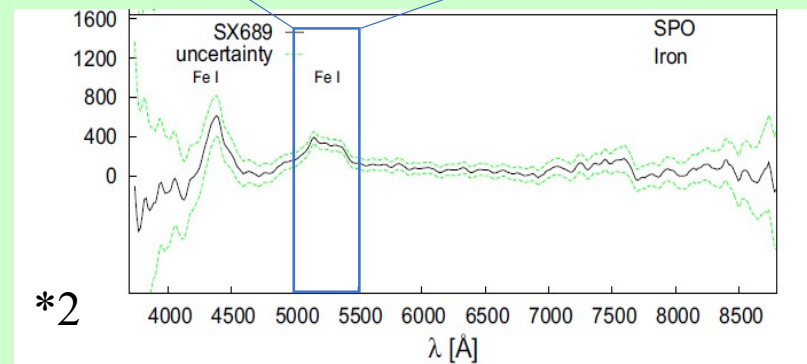


すべて85mm
300本グ
レーティング

鉄流星スペクトル比較



- これまでのビデオ観測より分解能が高い
- Mg と Na (589 nm) は、ほぼ0
- スペクトル形状は、どれもよく一致

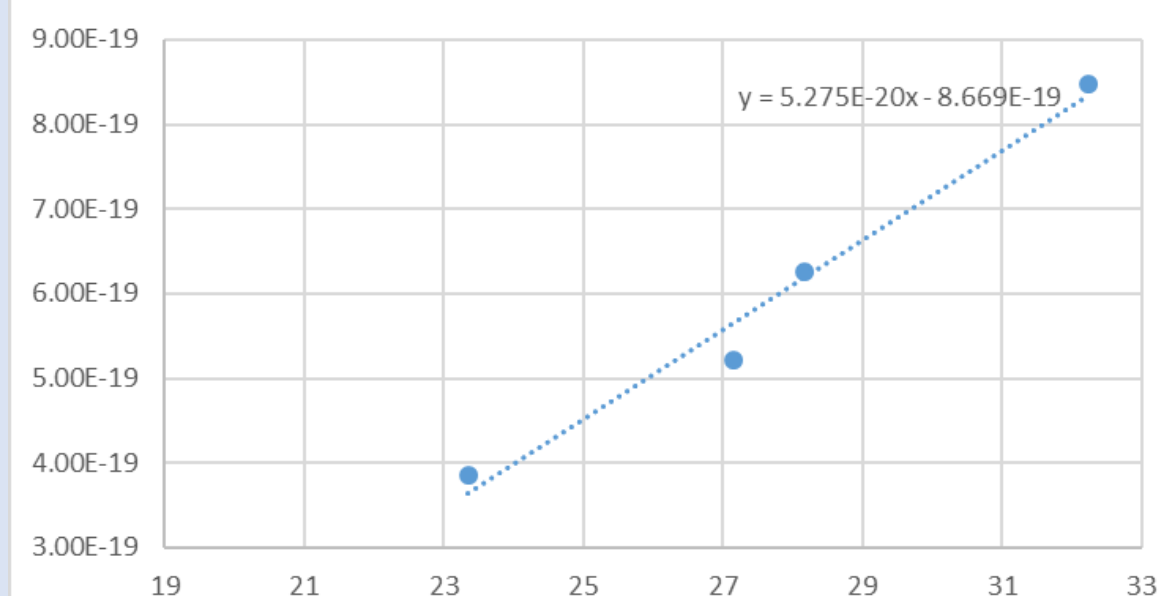


*2) V. Vojáček, A&A **580**, A67 (2015)

鉄流星から求めたプラズマの温度

ID	波長 λ (Å)	測定値		$gf/I\lambda^3$	X軸	Y軸
		Intensity I	gf		$\ln(gf/I\lambda^3)$	Excitation J
19	4958	0.15	1.819701	9.95E+13	3.22E+01	8.48E-19
22	5110	0.25	0.000457	1.37E+10	2.33E+01	3.86E-19
24	5227	0.6	0.144544	1.69E+12	2.82E+01	6.26E-19
27	5371	0.3	0.02884	6.20E+11	2.72E+01	5.21E-19

Fe流星 代表値



プラズマ温度 3820K
(23個の平均)

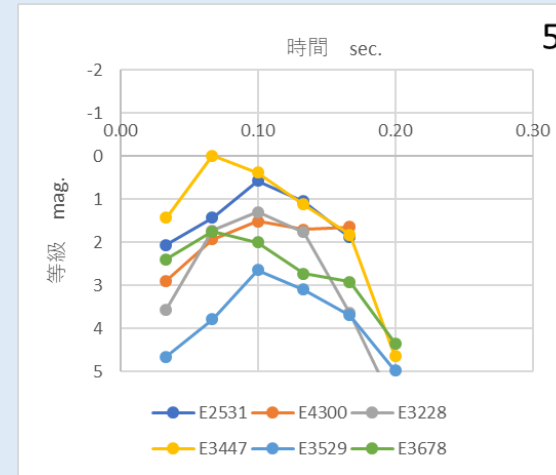
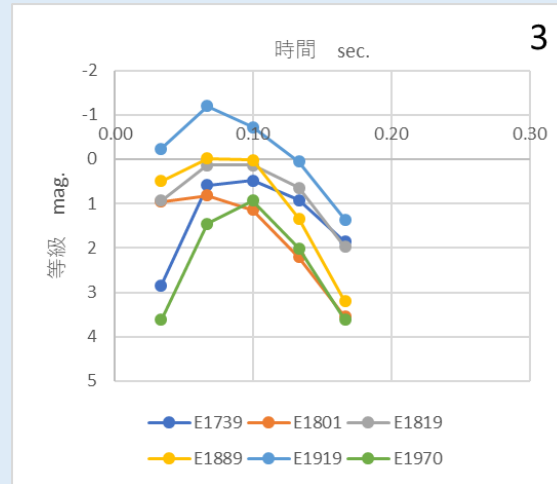
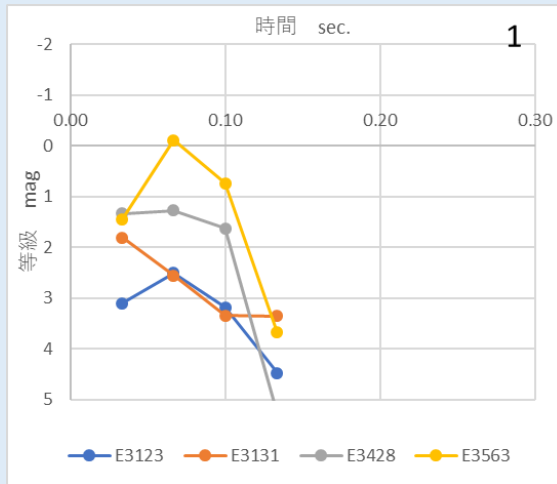
2500-3300K (流星II)

明るい流星 5000K (阿部)

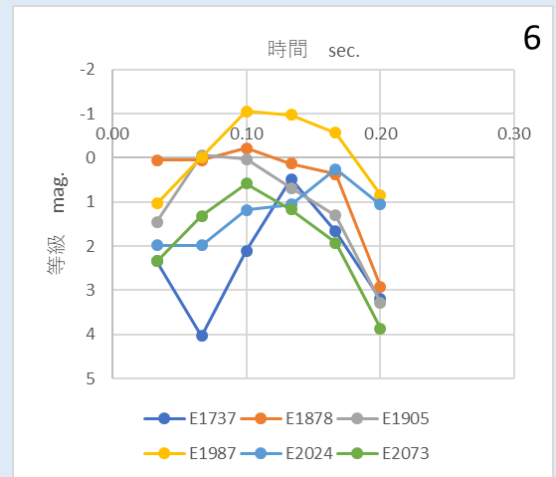
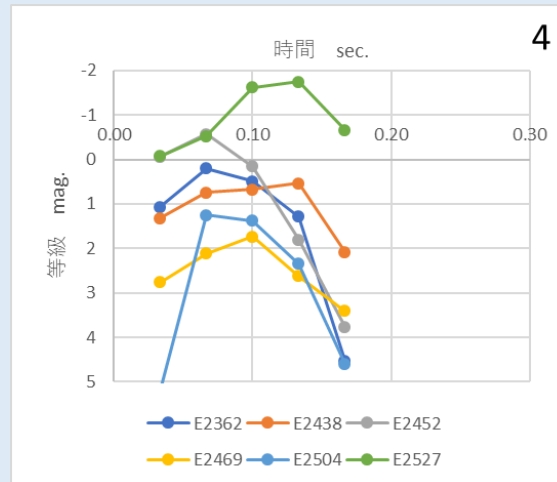
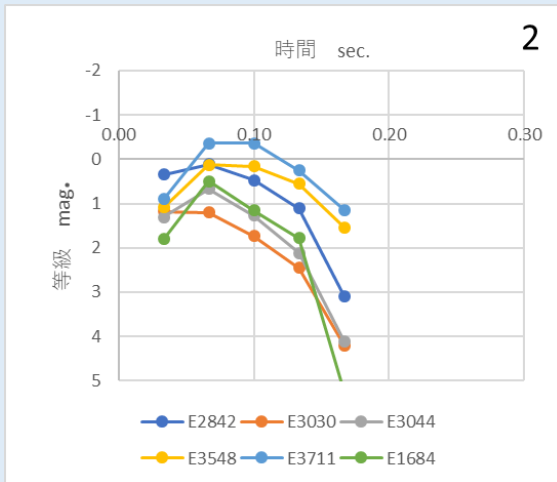
鉄流星ライトカーブ

短経路の鉄流星は前半に最大がある

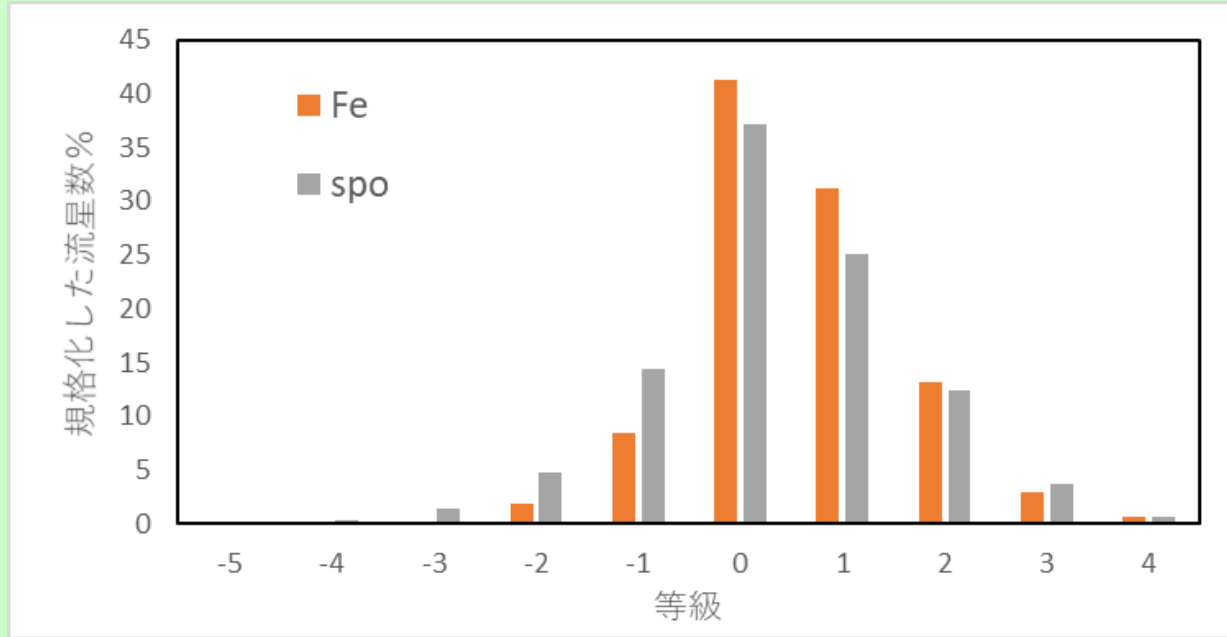
他、N=112



継続時間
0.2秒以下
N=34



鉄流星の明るさ



0次のスペクトルのみで見かけの光度の分布

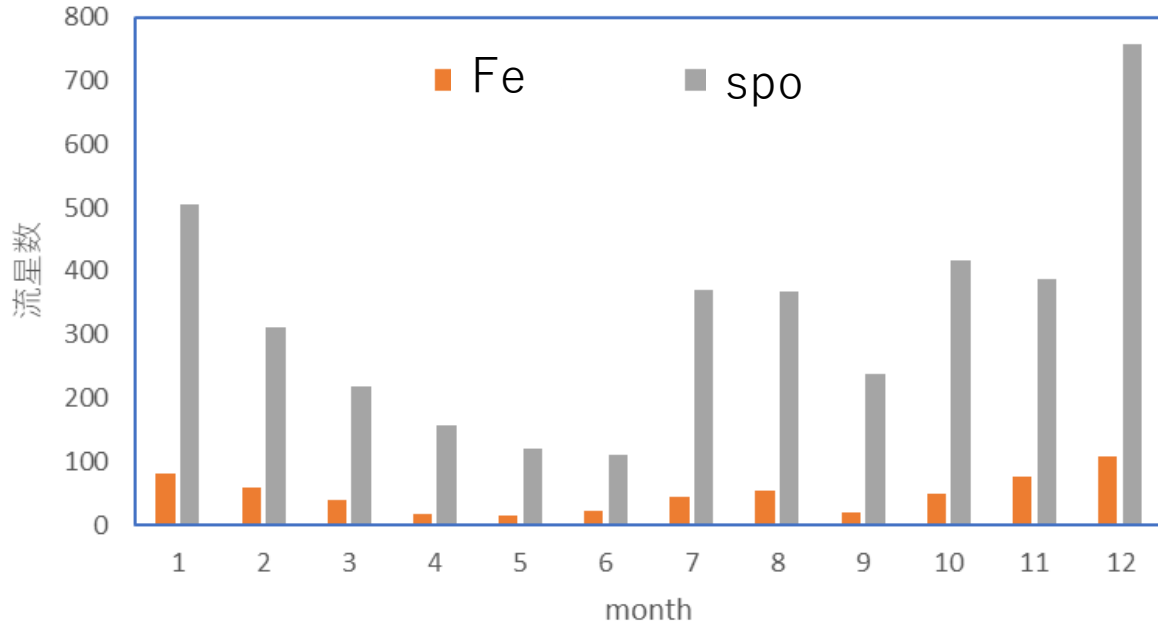
レンズ別などの詳細な平均光度などの解析が今後必要

- 平均光度
- Fe 0.56 ± 0.06 等 N= 461
- spo 0.34 ± 0.03 等 N=2886

Fe流星は暗い印象だが平均を取るとそれほど暗くはない

鉄流星の出現時期

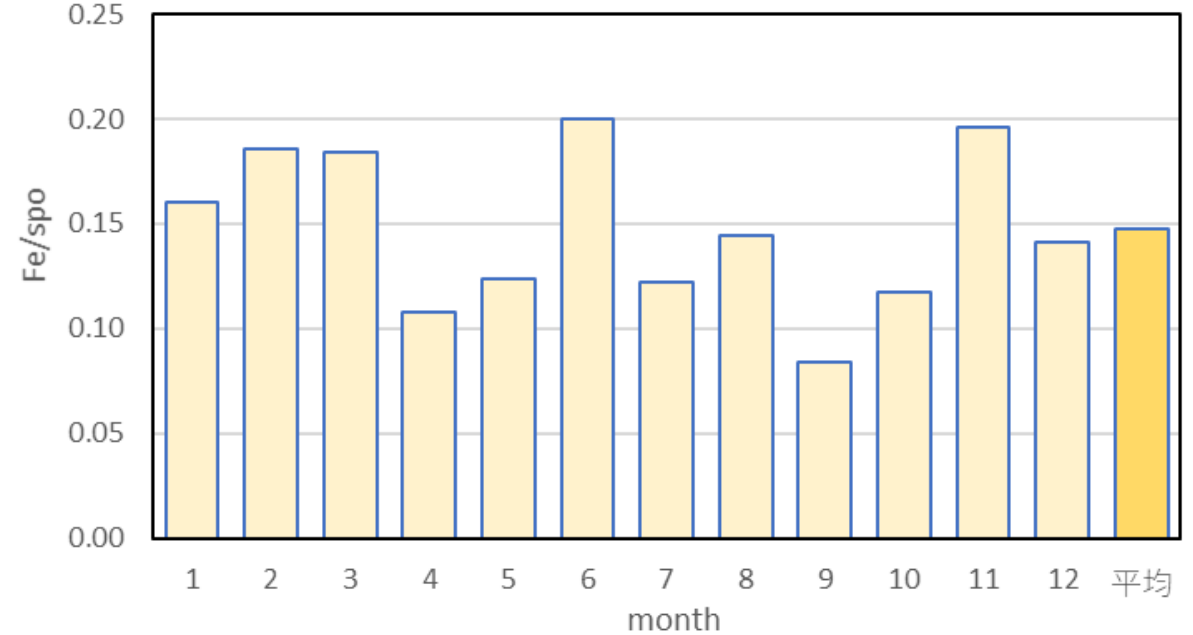
Feとspoの月別流星数 (2015-2024)



鉄流星と散在流星の月ごとの出現数変化

Fe/spo

N: 583/3958

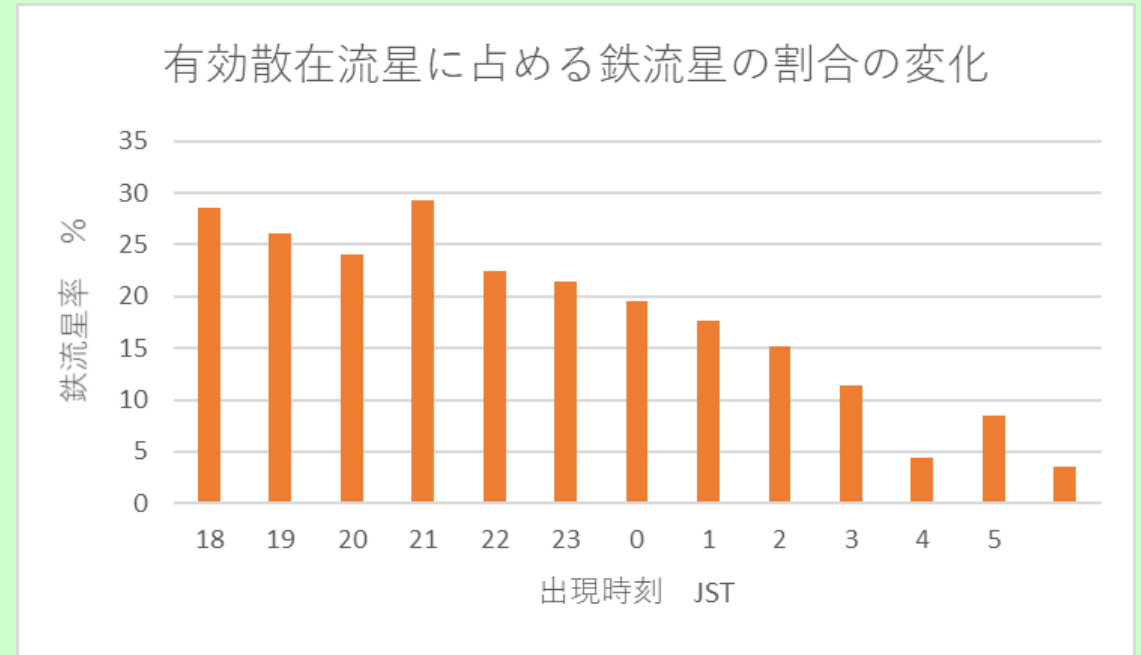
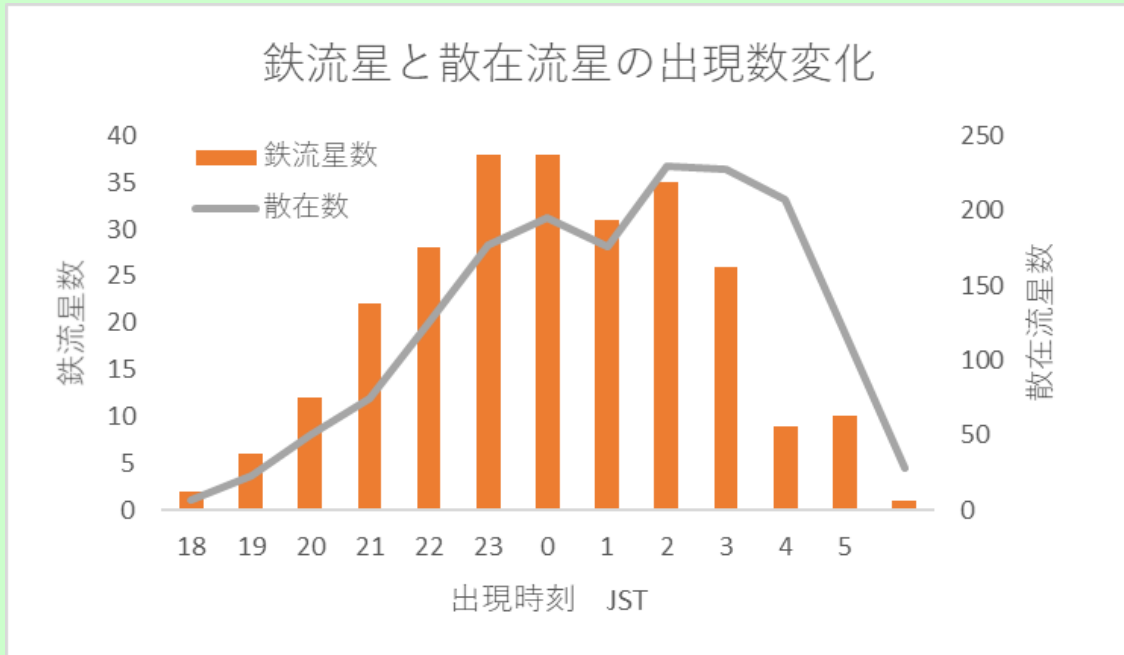


鉄流星の出現数をその月の散在流星で割った分布
観測月によるカメラ台数や天気の違いをある程度補正したもの

→6月を除くと、11-3月の冬に多く、
4-10月の夏に少ない

鉄流星の出現時刻

2015-2021のデータ



夜半前から23時ごろに多く感じていたので、分布を取ってみた。

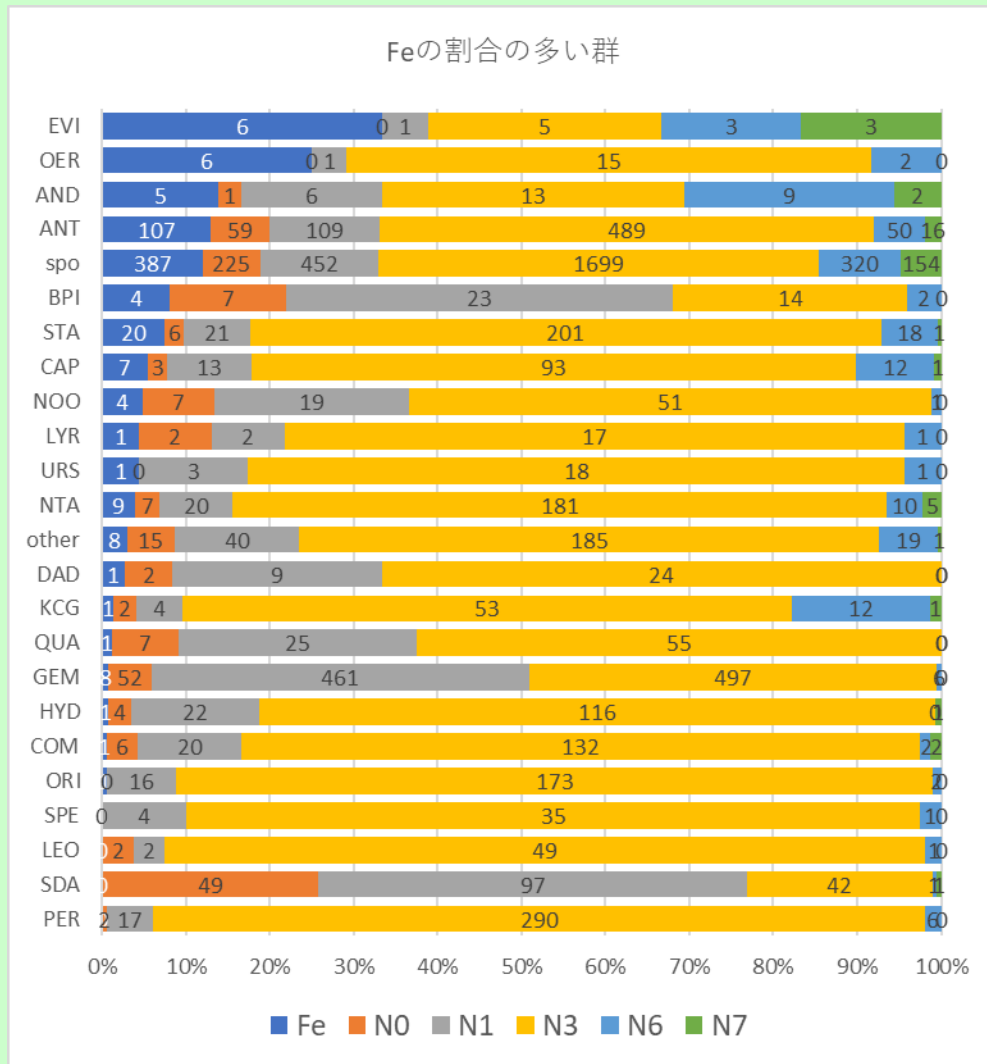
→ 23時から0時台にピーク

散在流星の増える明け方には割合は減少

散在流星との比は、夕方に最大で、25%を超える

→ 地球に追突するタイプの軌道？ 鉄流星の速度は約30km/sが多い

鉄流星と流星群



- 鉄流星は散在流星が、ほとんど
- ANTと散在では、と同じ程度
- 鉄流星の割合が多い流星群が見つかった

EVI: ηおとめ群

ORE: エリダヌス^o群

AND: アンドロメダ群、BPI: 8月のβうお群、も多めだが、まだ鉄流星が5個以下なので、今後要注意としておく

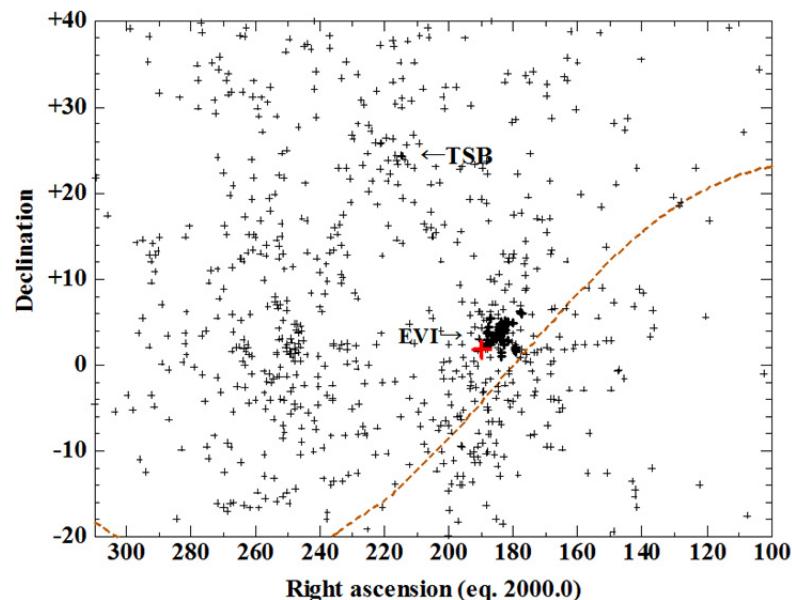
※散在流星の鉄流星の割合が約15%と多いので、混入の可能性が常にかなりある

EVI群とは

- 古くから知られている小流星群の一つ
- おとめ群呼ばれていた群の一部 3/16極大
- 輻射点は良く集中
- 木星との3:1共鳴で4年周期で増加*2)
- 2017、21、25年に多かった

年	EVI 検出数	鉄流星数
2016	0	0
2017	2	0
2018	7	1
2019	1	0
2020	0	0
2021	7	4
2022	1	0
2023	2	1
2024	0	0
2025	6	2
計	26	8

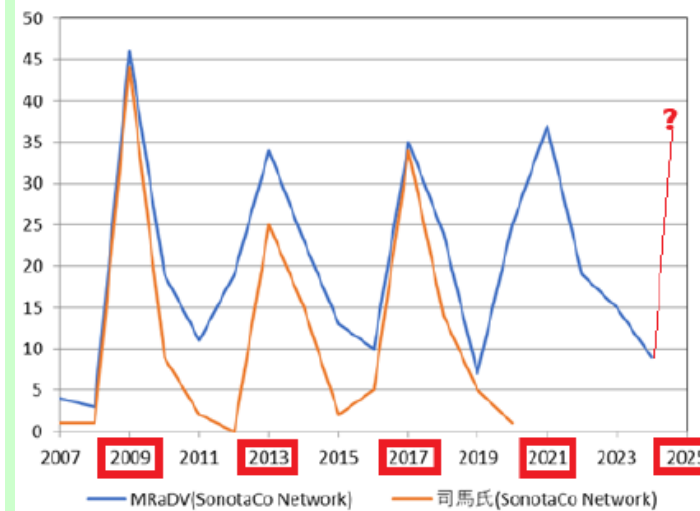
レンズ別	EVI 検出数	鉄流星
24mm	2	0
35mm	16	3
50mm	3	2
85mm	5	3
計	26	8



図*. 2017年おとめ座 η 流星群(EVI)同時流星の輻射点の天球上の分布
 + おとめ座 η 流星群の輻射点
 + EVI群以外の同時流星の輻射点 (2017年3月)
 -- 黄道
 赤色の+ : 2018年3月23日3:11:20(JST)の火球

(* 1)

EVIの出現数変化 (*3)



	期間	期間	max	太陽黄経	α	δ	Vg	a	e	q	Ω	i	ω	P	Q	N	IAU No	
		deg		deg	deg	deg	km/s	AU		AU	deg	deg	deg	year	AU			
Ueda	おとめ座 η 流星群	Feb.27-Aqr.01	338-12	Mar.16	356	184.9	3.4	29	2.23	0.801	0.442	356	5.09	284.45	3.3	4.02	154	11
Shiba	おとめ座 η 流星群		354-6		356.45	184.24	2.86	26.589	2.341	0.8057	0.455	356.45	5.19	282.56	3.58			

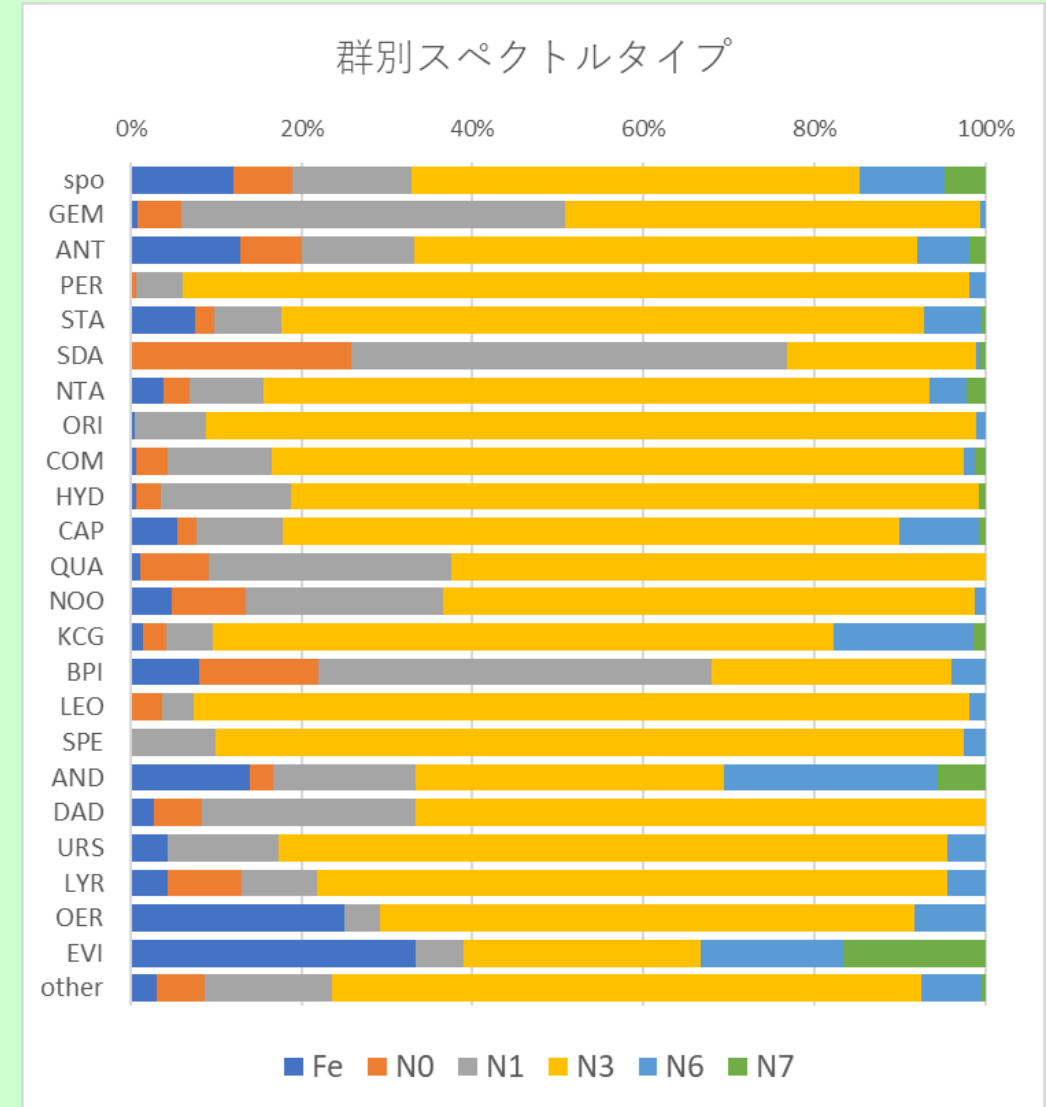
*1) 上田昌良 SonotaCo BBS, *2) Y.Shiba WGN 46:6(2018) p184, 3) 関口 天文回報(2025)

小まとめ -鉄流星-

- 鉄流星は、12月-3月に多い。散在の15%
- 散在に対する割合は、夕方に最大25%
- ほとんどは散在流星だが、 η おとめ群 (EVI)は鉄流星の割合が高いおもしろい群：30%

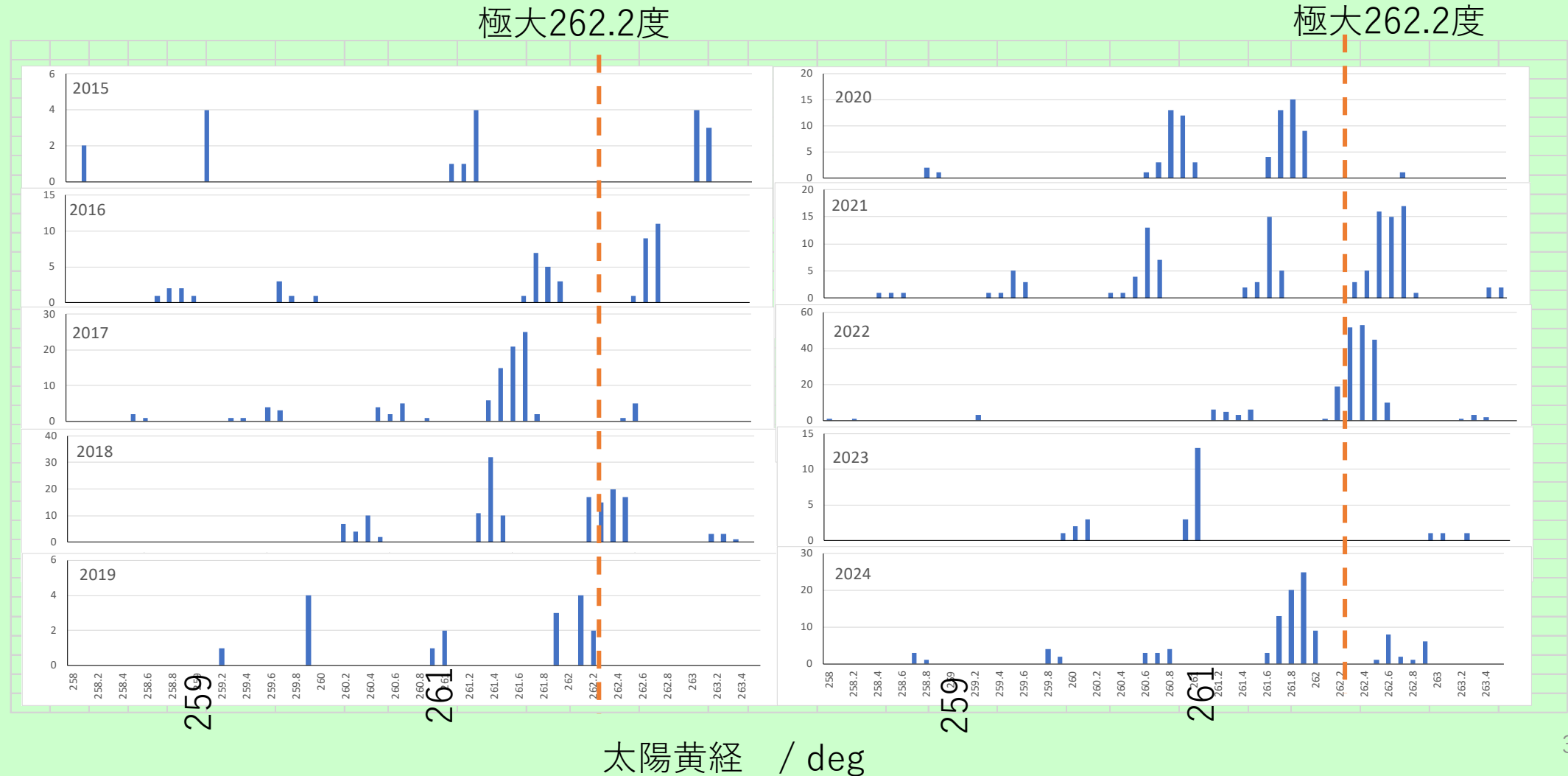
4.3 ふたご群内のスペクトル変化

- GEMはスペクトルのばらつきが大きい
- Naの枯渇が以前から言われている
Kasuga、Abe

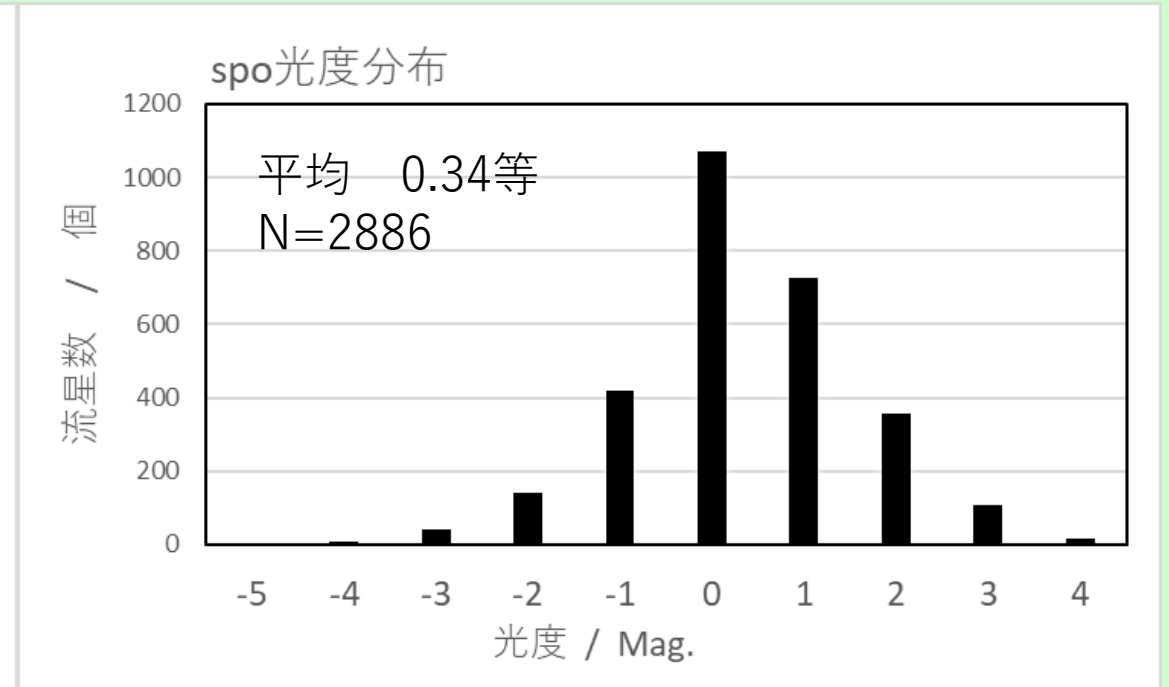
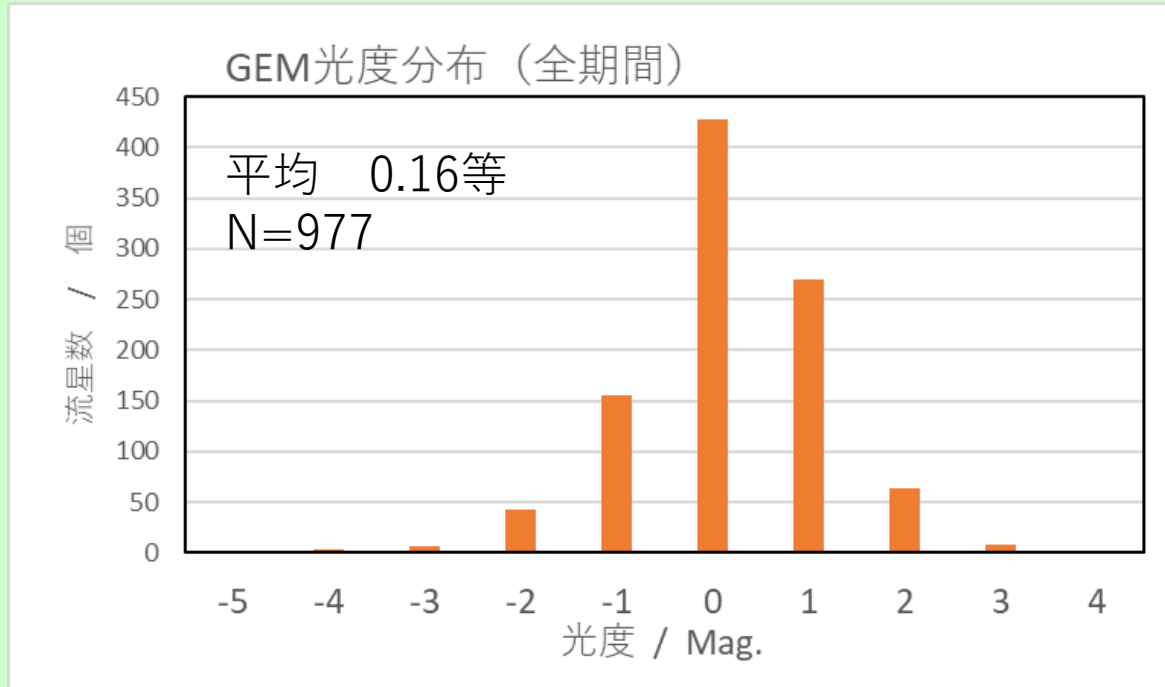


GEM観測数変化 (2015-2024)

年により観測されるスペクトルの数は大きく異なる (主に天候による)



GEM光度分布



見かけの明るさ (絶対等級ではない)

0次像で光度が求められた流星のみ (今回は、全経路が撮れた流星のみを選択していないので、やや不正確)
散在よりやや明るい、大きな差ではない

色々なレンズのデータを混ぜているので、参考程度

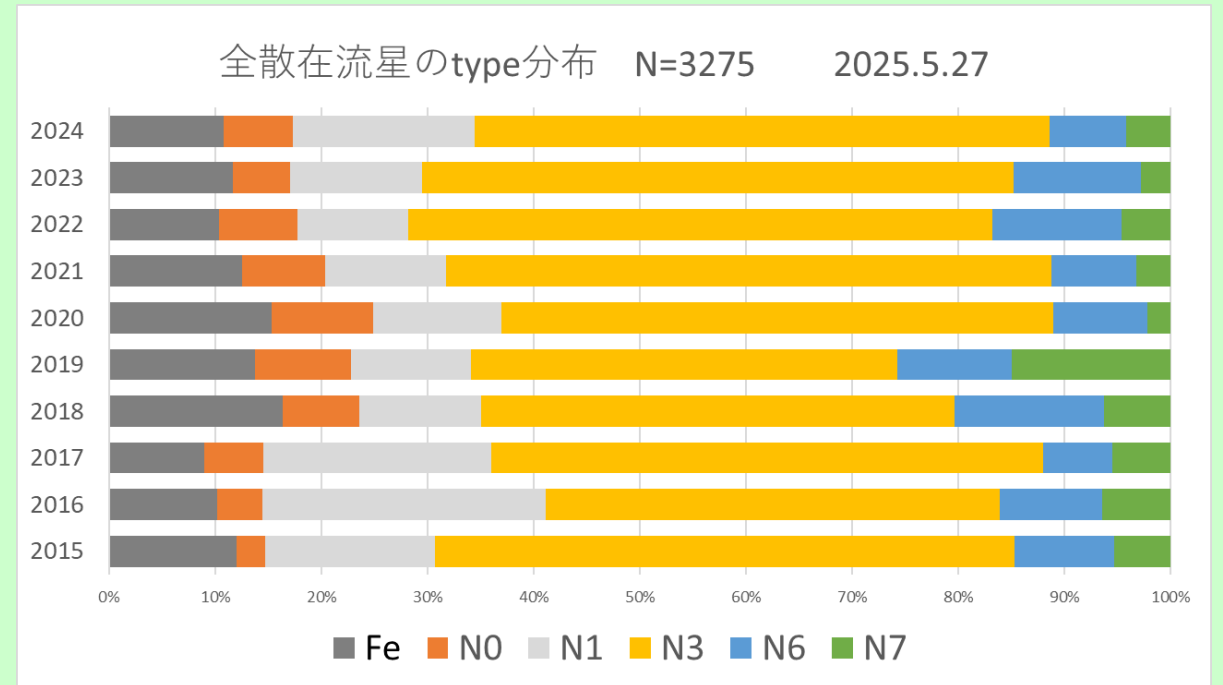
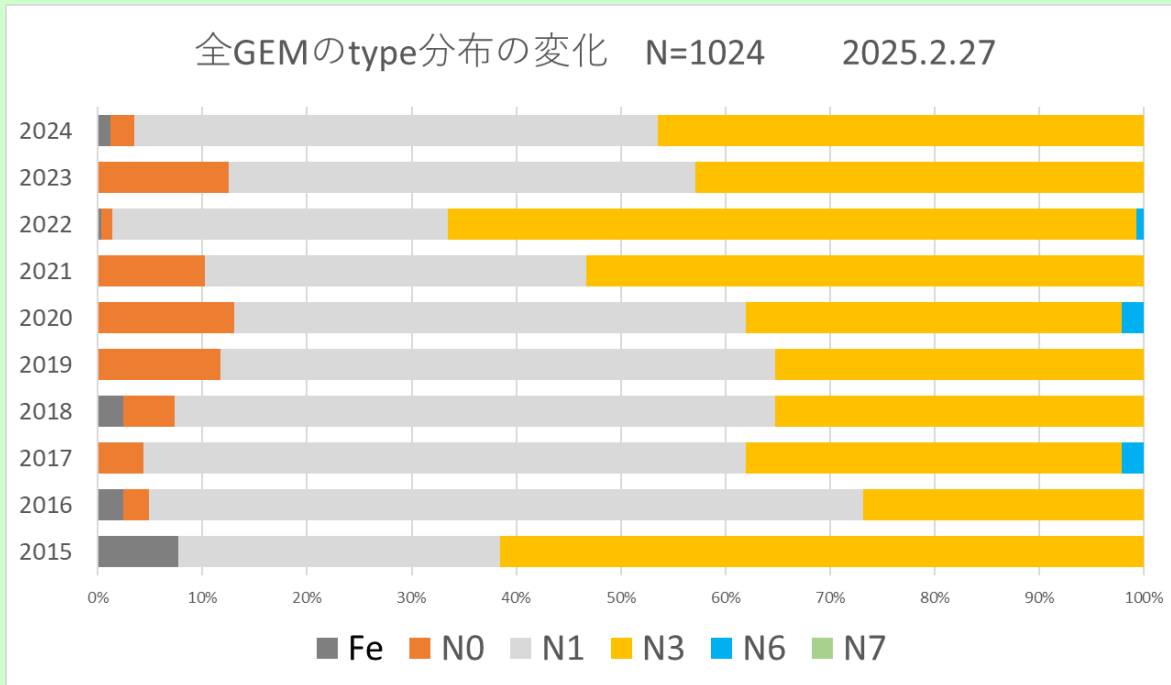
GEMスペクトルの年変化

GEMは、スペクトルの変化や分布が大きい

GEMはNaの割合が少ない Kasuga(2005)

GEMはNaの割合の多い流星が増加中 Abe(2022)

経年変化なのか、太陽黄経変化なのか？



GEMのスペクトルの太陽黄経変化

流星数が10個/0.1度より多いのは
260.5から262.7度の2.2度のみ

下図：データは荒れているが、
・ N3が増加、N1が減少しているように見える
・ N0の割合も減少している？

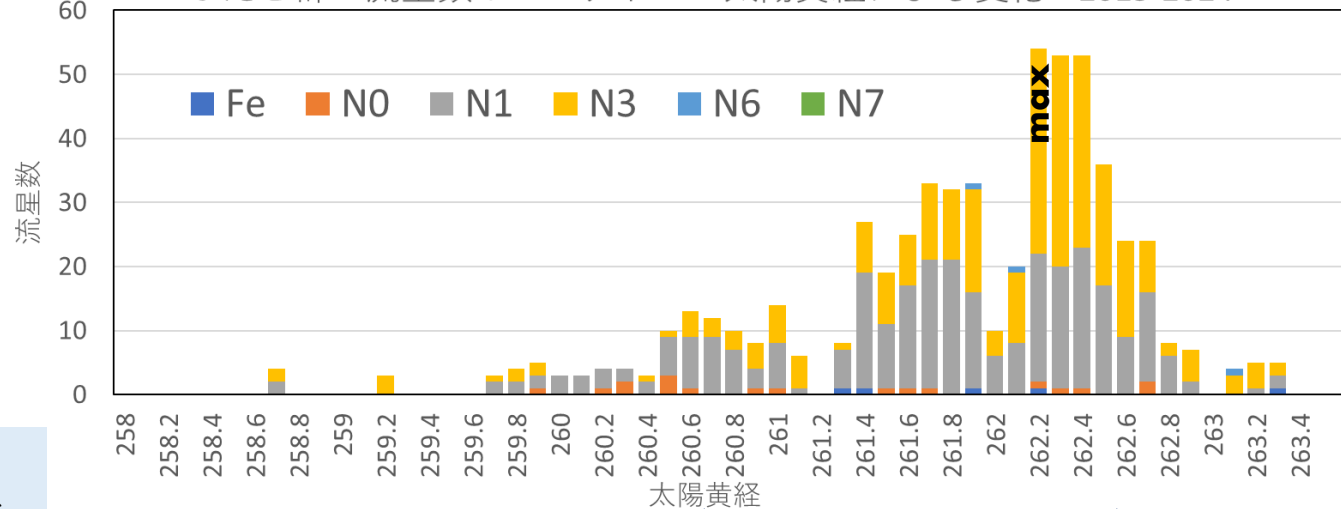
考察

1. Naの減少は、経過時間を表すと仮定
極大前はNaの枯渇した古い流星体
極大へ向けて新しい流星体が地球と衝突

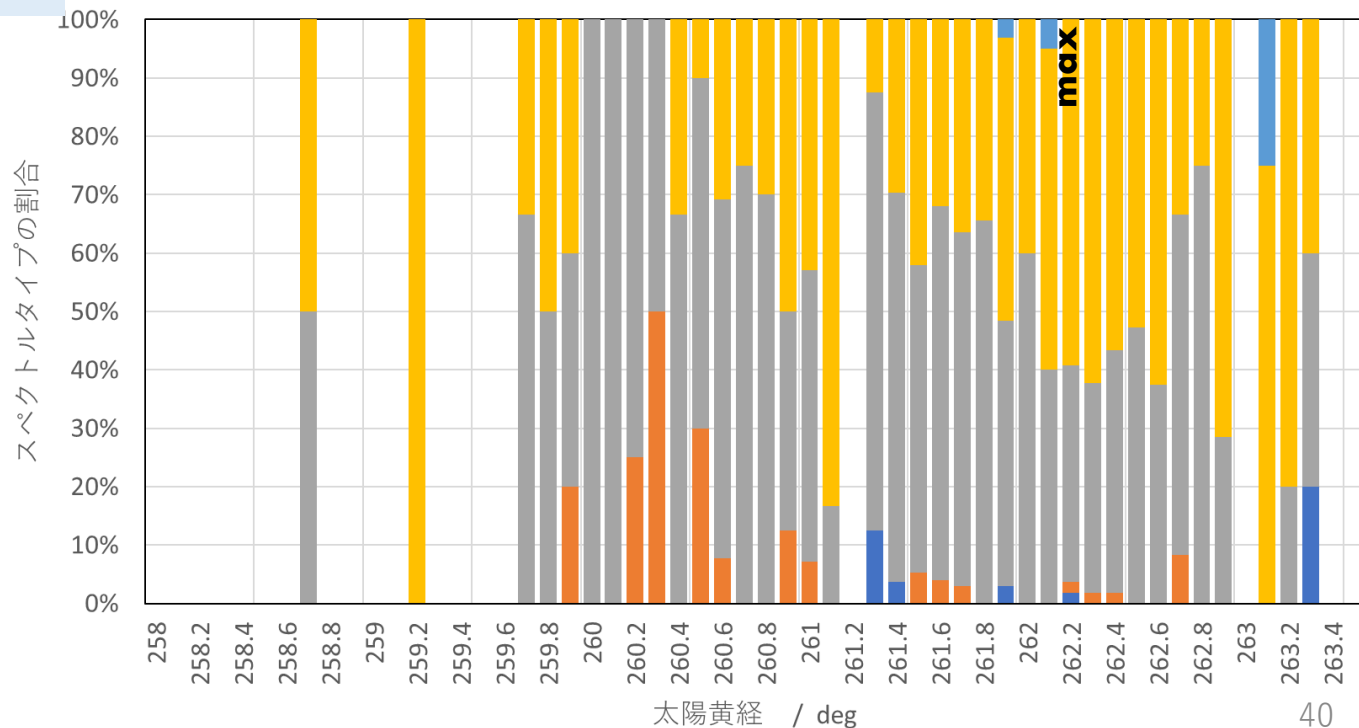
2. Naの減少は、粒子サイズによる(*)
極大付近は、大きな流星体も増えるので
Naの枯渇が少ないものも増加

*Trigo-Rodríguezら (2005)

ふたご群の流星数とスペクトルの太陽黄経による変化 2015-2024



太陽黄経によるスペクトル型の変化2015-2024 (GEM) N>2の区画のみ



■ Fe ■ N0 ■ N1 ■ N3 ■ N6 ■ N7

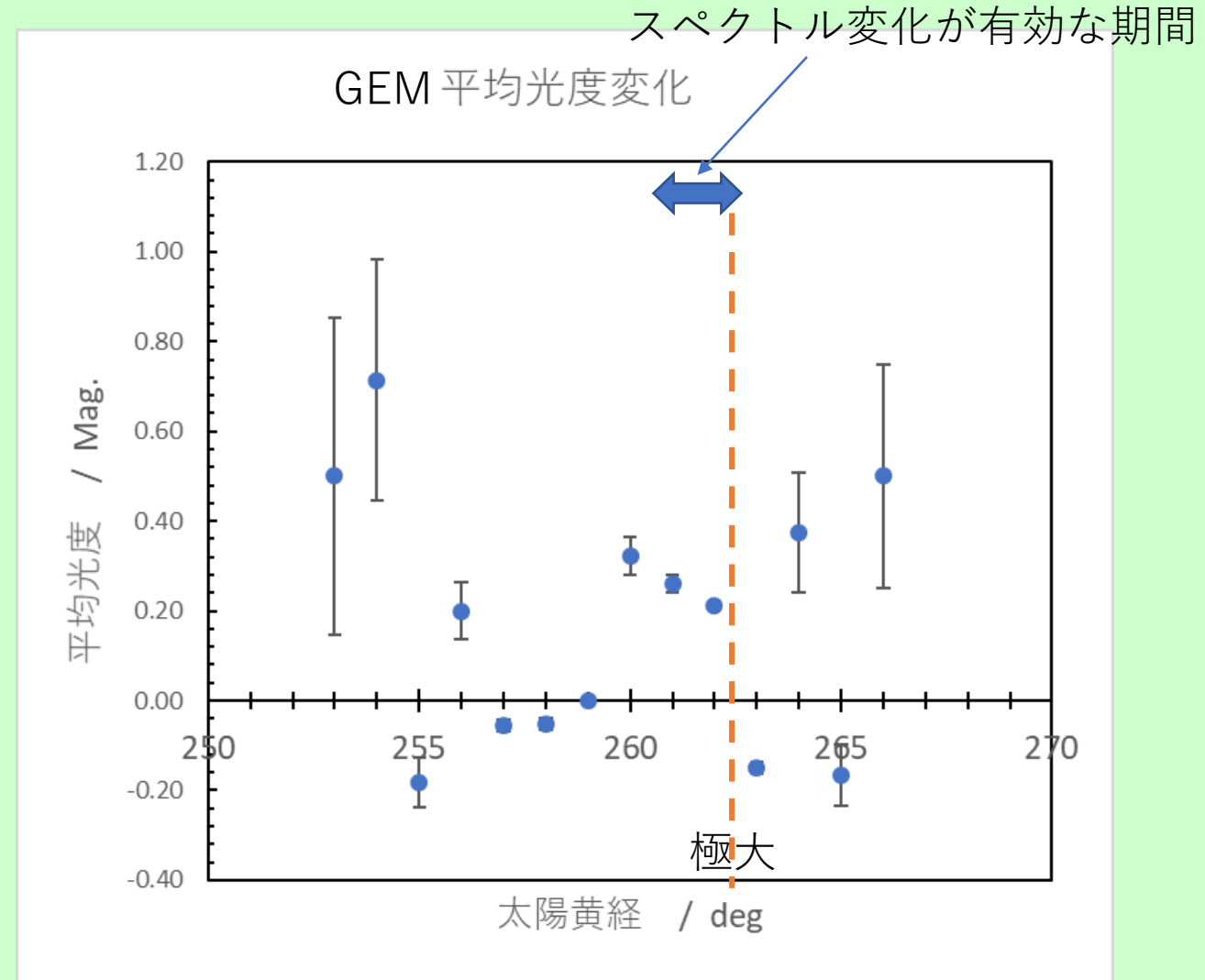
GEM平均光度の変化

- 粒子サイズは平均光度関連する可能性



大きな変化はない？

平均光度、光度関数は、今後検討の必要あり



4.4 スペクトルライトカーブの世界

流星スペクトル輝線ライトカーブの分類 (前田 幸治)
2019年3月8日 流星スペクトル研究会 極地研(立川) →NMSのHP

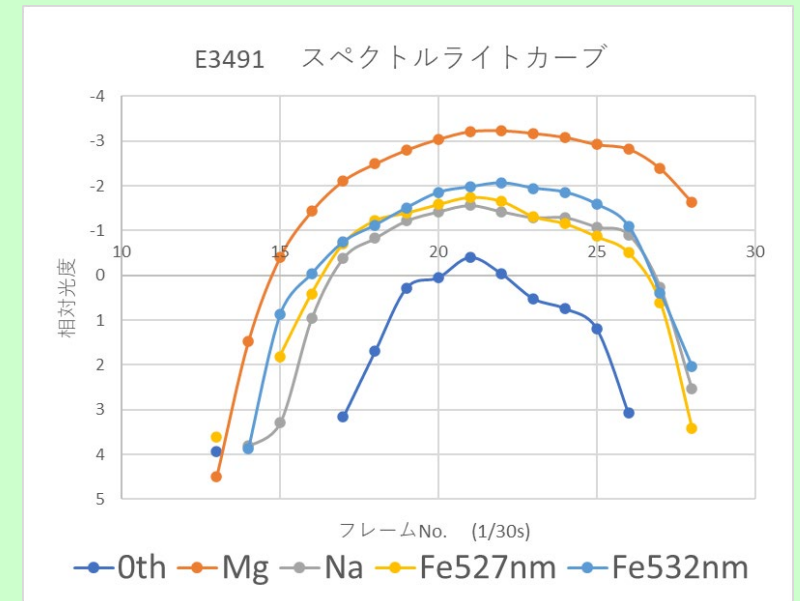
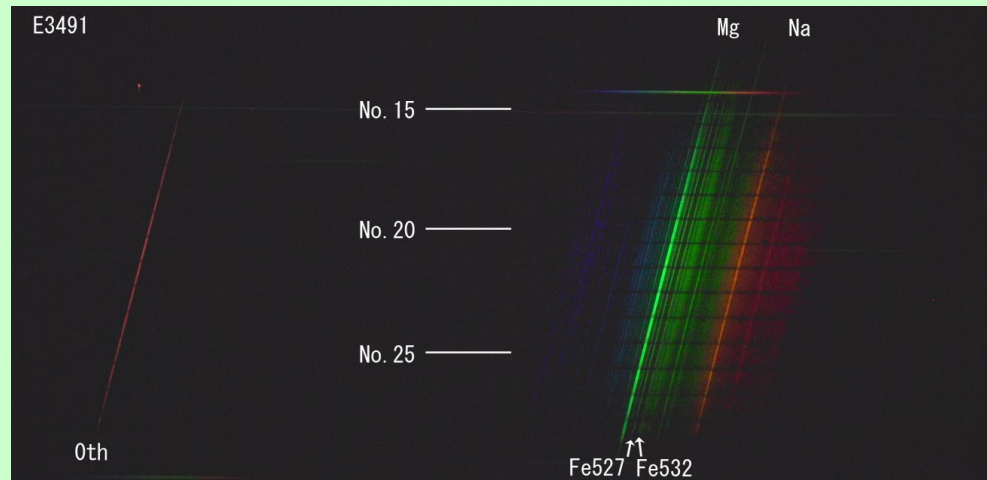
Vojacek(2019)に詳しい

用語

ライトカーブ (LC) : 流星経路に沿った明るさの時間変化 → 発光高度にも変換できる

輝線LC : 流星のスペクトル線 1 本だけの明るさの時間変化

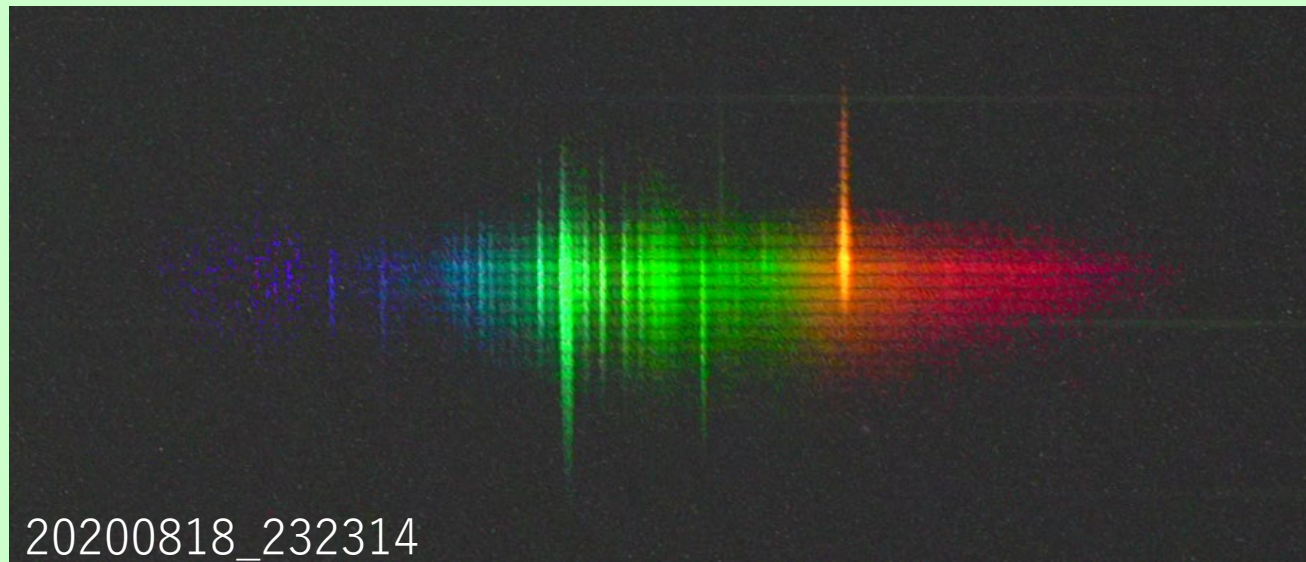
一例



輝線ライトカーブの特異な変化

経路（発光時間）に沿って、輝線の強度比が変化するスペクトルがまれに出現

- ・どのようなタイプがあるか？
- ・群との関係は？
- ・原因は？



流星スペクトルLCの調べ方

調べた流星

2015-2018に撮れた、有効流星1701個

調べ方

コントラストを上げた静止画像を目視で観察し、
Mg輝線または0次を基準に他の輝線の光度変化が、異なるパ
ターンのものを探す

比較には、流星の経路と分散方向を直角にそろえて描画

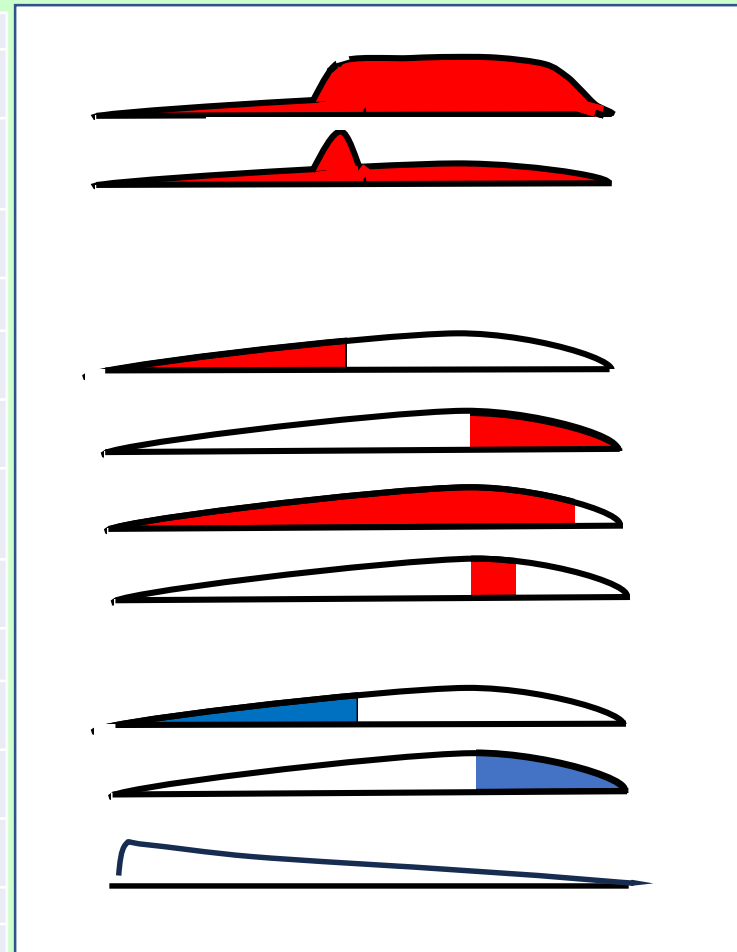
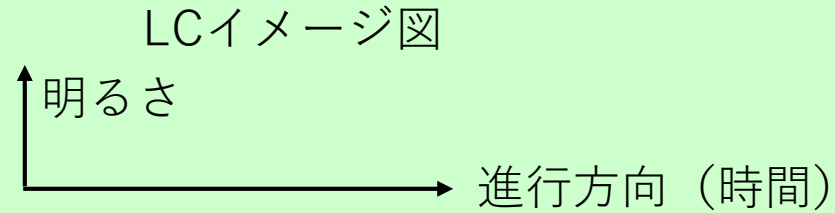
タイポロジー的に並べてみて、グループ分け

code	2015-2018		
	count	%	%
Fe	130	5.5	7.6
N0	77	3.2	4.5
N1	395	16.6	23.2
N3	944	39.6	55.5
N6	106	4.4	6.2
N7	49	2.1	2.9
subtotal	1701	71.4	100.0
um	611	25.6	
un	53	2.2	
u	19	0.8	
total	2384	100.0	

輝線ライトカーブの類型分類

輝線ライトカーブ(LC)の類型分類

分類コード			
a1	Mg-Na 連動変 化	途中から急増、その後ノーマル	
a2		経路の一部で増光、爆発との区別が難しい	
a3		経路の一部で減光、消滅	
b1	Na	前半のみ発光	Na前光型
b2		後半のみ発光	Na後光型
b3		最後の部分 (1~3F)のみ消光、b1との区別があいまいなこともあり	Na先消光型
b4		途中の一部のみ発光 (増光)	Na増光型
c1	Mg	前半のみ発光	Mg前光型
c2		後半のみ発光	Mg後光型
d	Fe	急増光	
全流星数 1701個			



0次およびスペクトルが典型的な発光パターンと明らかに異なる各輝線は同じ時間変化する

Naが0次またはMgに対して異なる変化

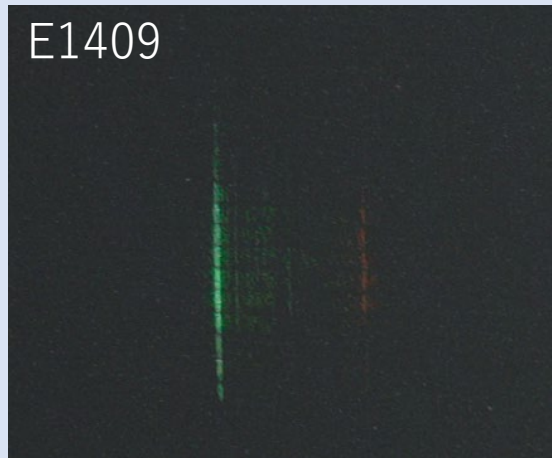
b型とc型のみを扱う
Differential Ablation(DA型)

Mgが0次またはNaに対して異なる変化

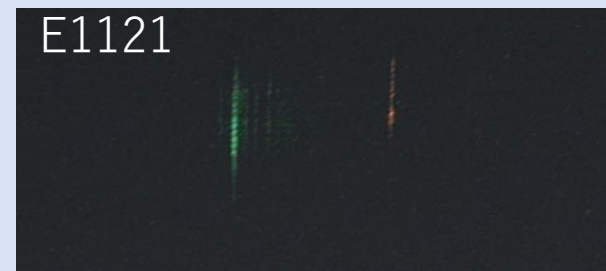
Feでよくある発光時が最大光度

b1 type
Na前光型

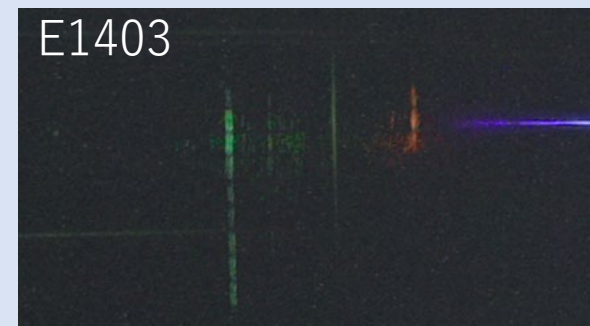
E1409



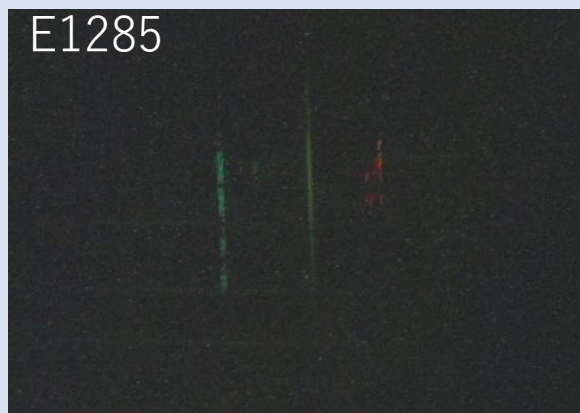
E1121



E1403

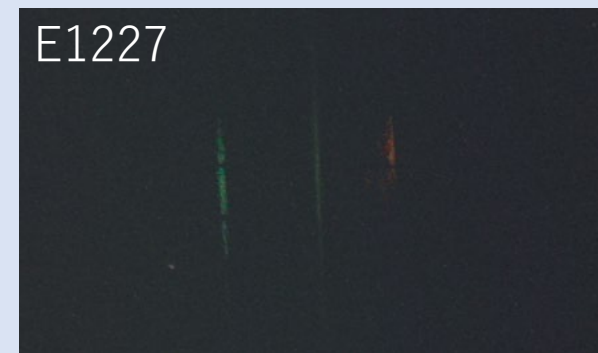


E1285



E1453

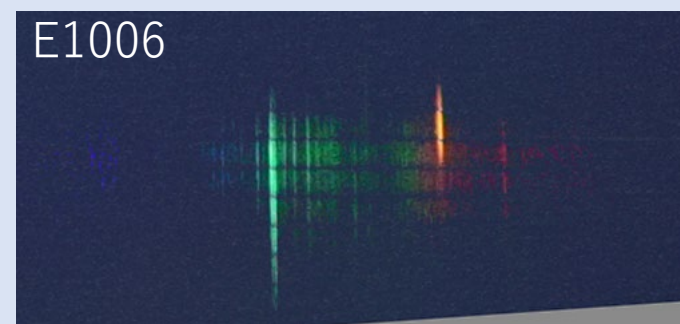
E1227



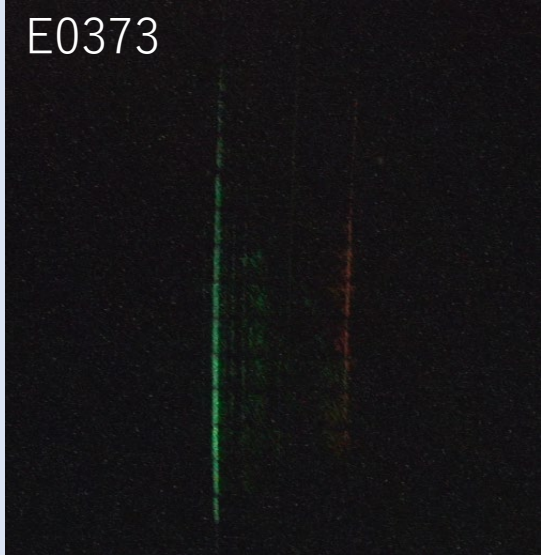
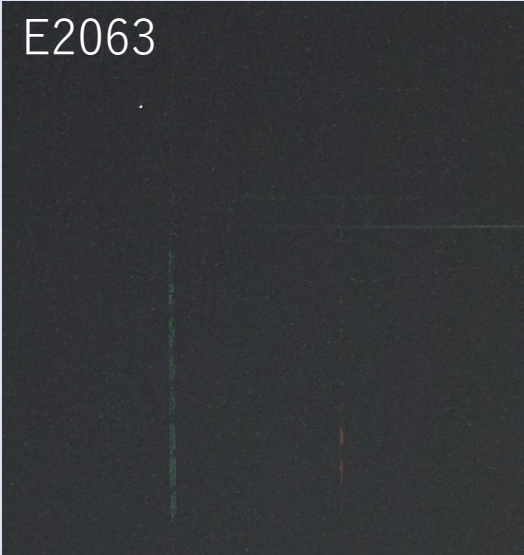
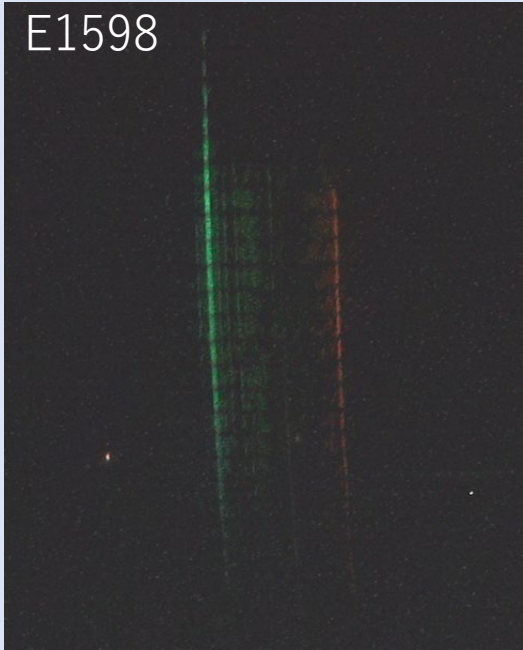
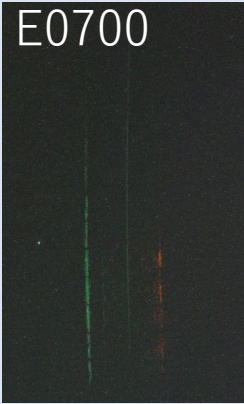
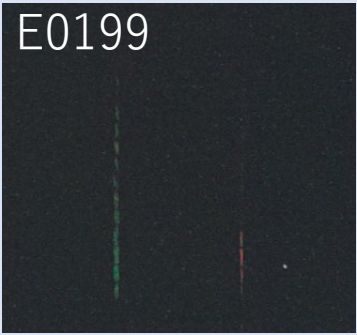
E1133



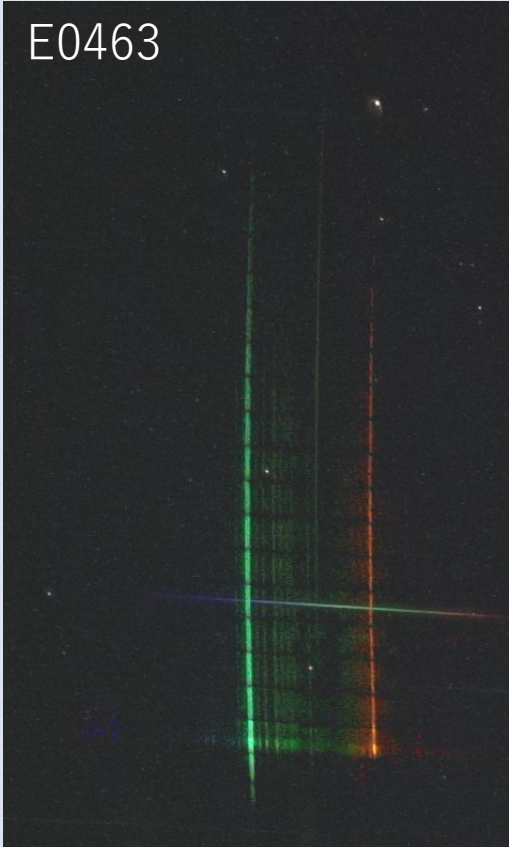
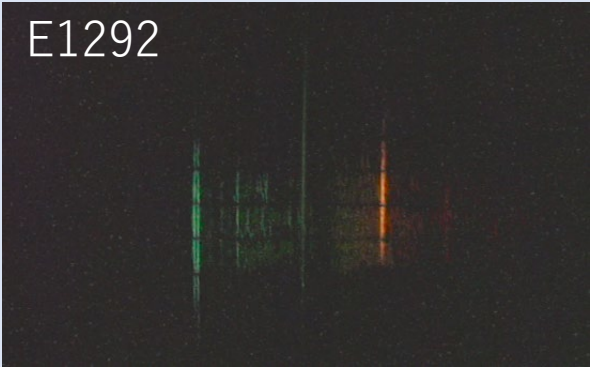
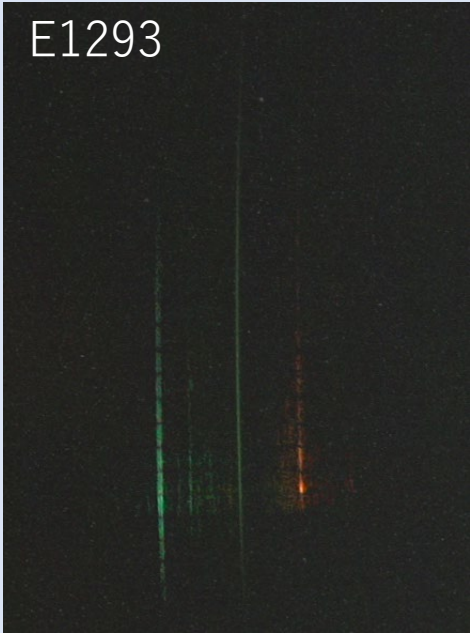
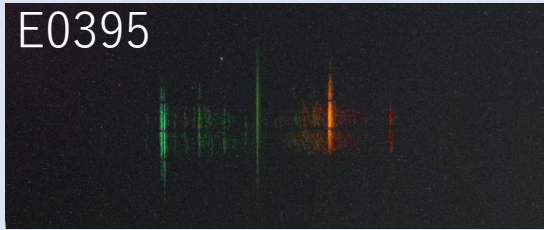
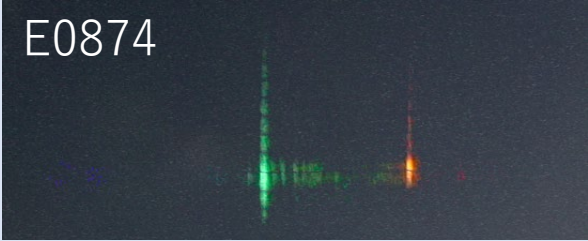
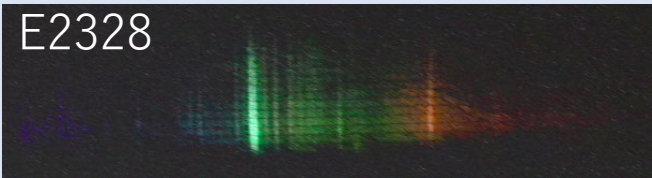
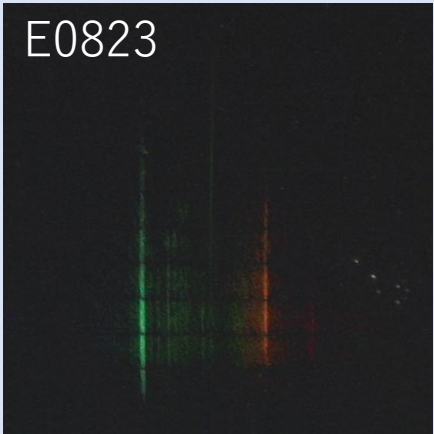
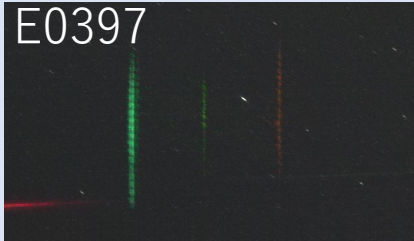
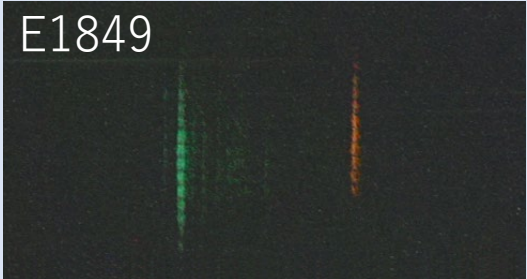
E1006



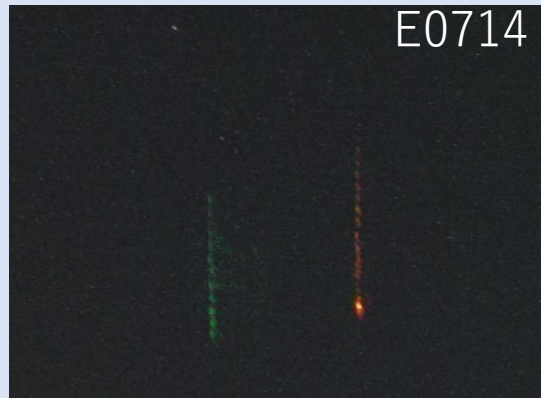
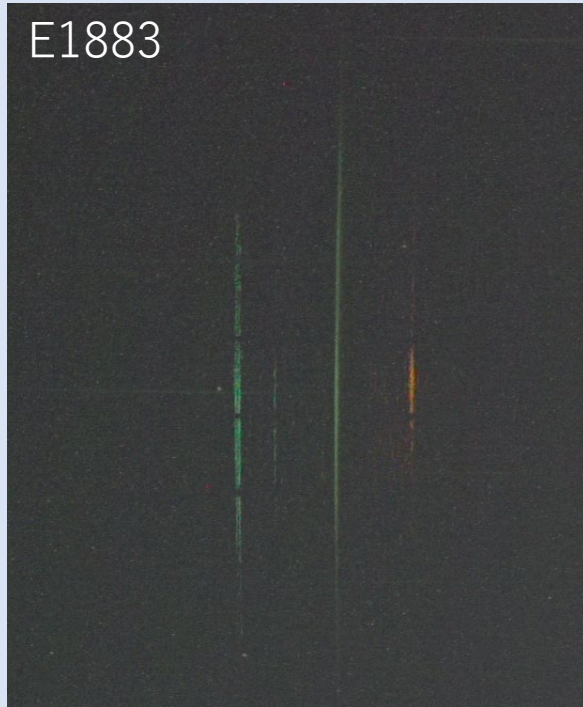
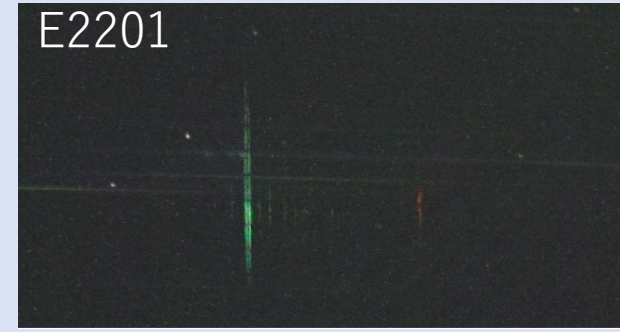
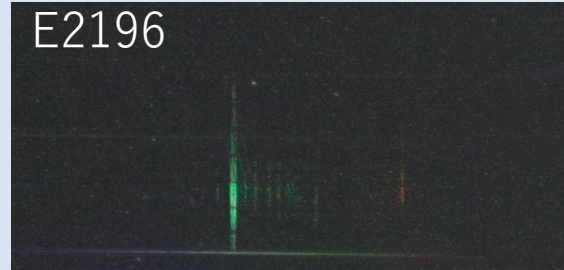
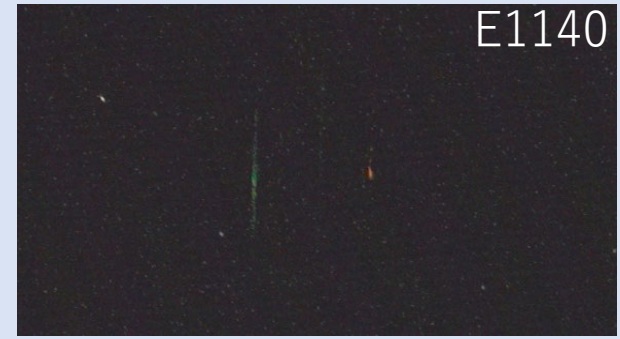
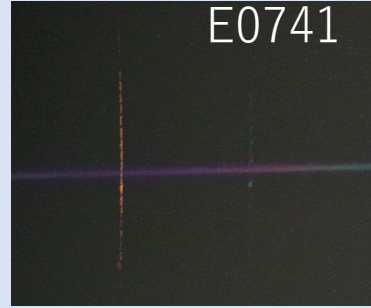
b2 type
Na後光型



b3 type
Na先消光型



b4 type
Na增光型



LCタイプ別の割合

分類コード			流星数	複合	計	%	合計	%
a1	Mg-Na 連動変化	途中から急増、その後ノーマル	3	1	4	0.2	8	0.5
a2		経路の一部で増光、爆発 (exp) との別が難しい	3		3	0.2		
a3		経路の一部で減光、消滅	1		1	0.1		
b1	Na	前半のみ発光	39	3	42	2.5	92	5.4
b2		後半のみ発光	17	1	18	1.1		
b3		最後の部分 (1~3.5秒)	23		23	1.4		
b4		途中の一部のみ発光	9		9	0.5		
c1	Mg	前半のみ発光	5		5	0.3	8	0.5
c2		後半のみ発光	2		2	0.1		
d	Fe	急増光	1		1	0.1		
			103	5	108	6.3		

全流星数 1701個

特異なLCをもつスペクトルは約6%
NaのLCは、Mgよりも変化に富む割合が高い

DAタイプと流星群

2015-2019 data

群	LC特異流星		DA率
	b1-b4	出現数	
GEM	21	423	5.0
ANT	5	185	2.7
ORI	9	70	12.9
NTA	3	69	4.3
PER	4	68	5.9
COM	2	48	4.2
HYD	3	44	6.8
QUA	4	18	22.2
LEO	4	15	26.7
spo	28	1049	2.7
etc	11	-	
合計	94	2383	3.9

個 個 %

- 群流星でDA率が高い
- GEMが数は多いがDA率は散在に近いタイプに偏りない (右表)

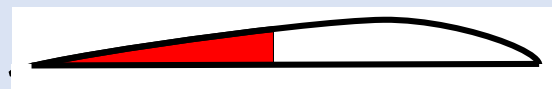
type	GEM
b1	7
b2	5
b3	9
b4	2

個

- LEO, ORI, QUAはDA率が多い 10-25%
高速な群が多い印象

LEO, ORI, PER, HYD, COM, LMI (> 60 km/s) のみを集計 (右表)

B1 (Na前半型) が多い



type	数
b1	17
b2	5
b3	6
b4	1
計	30

個

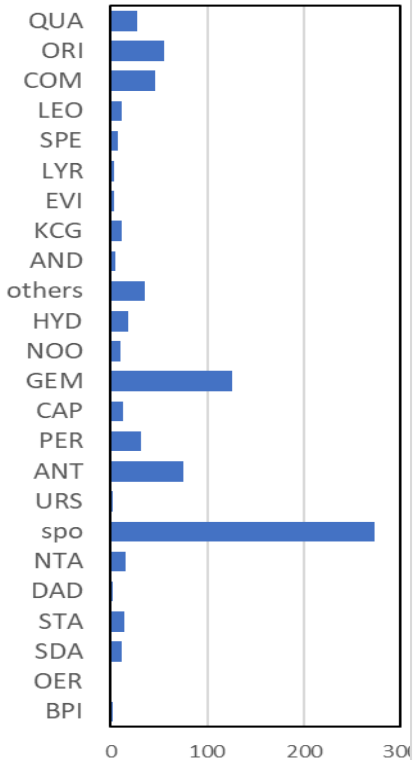
群別のDA型LCの割合 (ここだけ2024年データ)

速報値で変わるかも

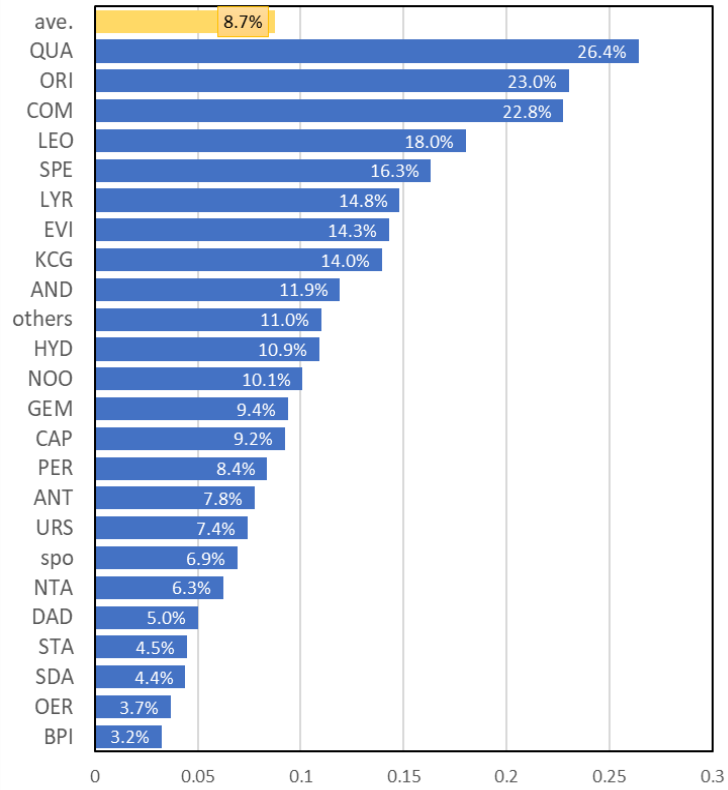
結果

1. 平均は8.7%で少ない
2. 高速群はDAしやすい
上位のORI, COM, LEO, SPEは、Vgが60km/s以上の超高速群
他の上位のQUA, LYRも40km/s台の高速群
3. GEMは、DA型の数が多いが母数が多いだけで割合は平均値程度 (=特に変わっていない)
4. Na枯渇度とDA率は相関なさそう (右図)

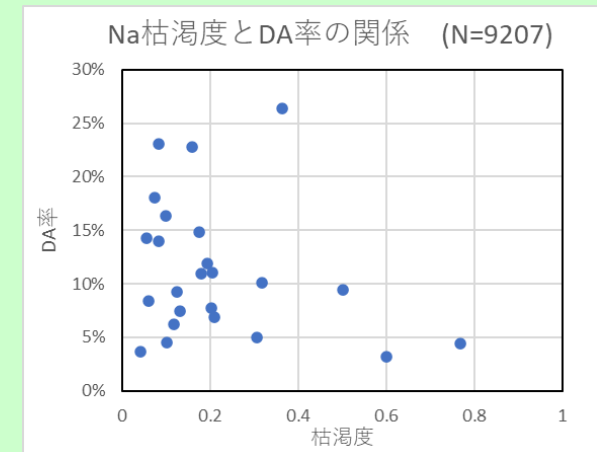
DA型の数 N=9207



DA型スペクトルLCの割合 N=9207



DA率



流星体の発光

ここからは、想像で、根拠はありません

発光過程には、次の2つが考えられる

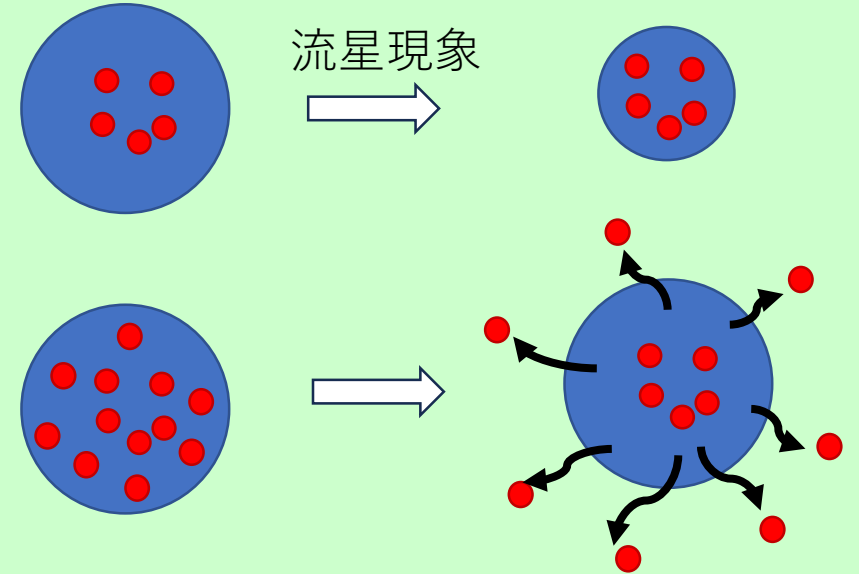
1. 初めから動径方向に組成に不均一があり流星として外側から発光成分として見られる
2. 流星発光の過程で何らかのメカニズムにより各元素の発光に時間差が生じる
(これが、本来のdifferential ablationか)



DA率が10%以下なので、2の過程が生じているとすると、もっとDA率が高くてもよさそう？

発光前の流星体

発光中の流星体



4.4 小まとめ

- Mg, Naに関して、特異なライトカーブを取る流星は、約9%と少ない
- Naの変化が主な原因
- 高速な群でDA型ライトカーブが多く10-25%
- GEMは平均的なDA率

5. まとめと課題

2015年から2024年までの約7000個の流星スペクトル観測の結果をタイポロジー的にまとめた。

410-630nmの範囲のスペクトルはMg-Na-Feが主な発光成分でそれ以外の成分が強いことは少ない（Ca、Siあり）

1 流星群別のスペクトルによる特徴

流星群のNaの割合は、知られているように近日点距離とよく相関、Naの割合と発光点高度の相関も高い。
群流星のスペクトル数はまだ少ないものが多い

2 鉄流星について

鉄流星の割合は散在で約15%（平均光度1等程度で）
群流星に同定された鉄流星は散在の混入の疑問が残る

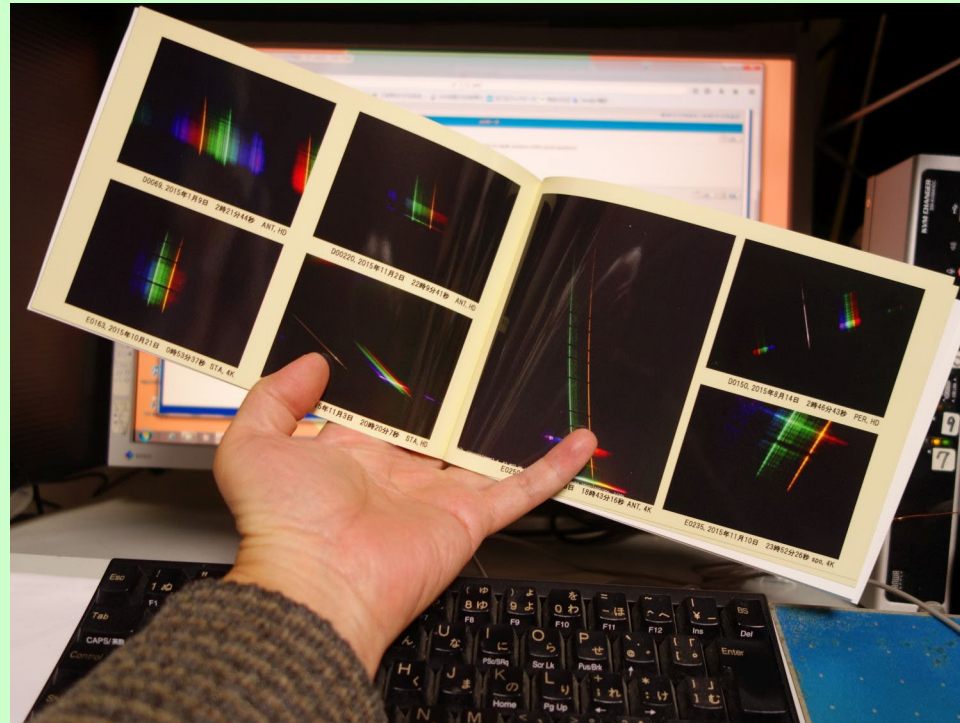
3 ふたご群内のスペクトルの変化

ふたご群は他群に比べNaの割合が少ないものがる。
群のスペクトルの時間変化の観測より、極大へ向かうに従ってNaの割合が増加している可能性が示せた。

4 スペクトルライトカーブをタイポロジー的にまとめた。

まだ、分類項目もはっきりせず、今後の研究課題は多い。メカニズムも不明。

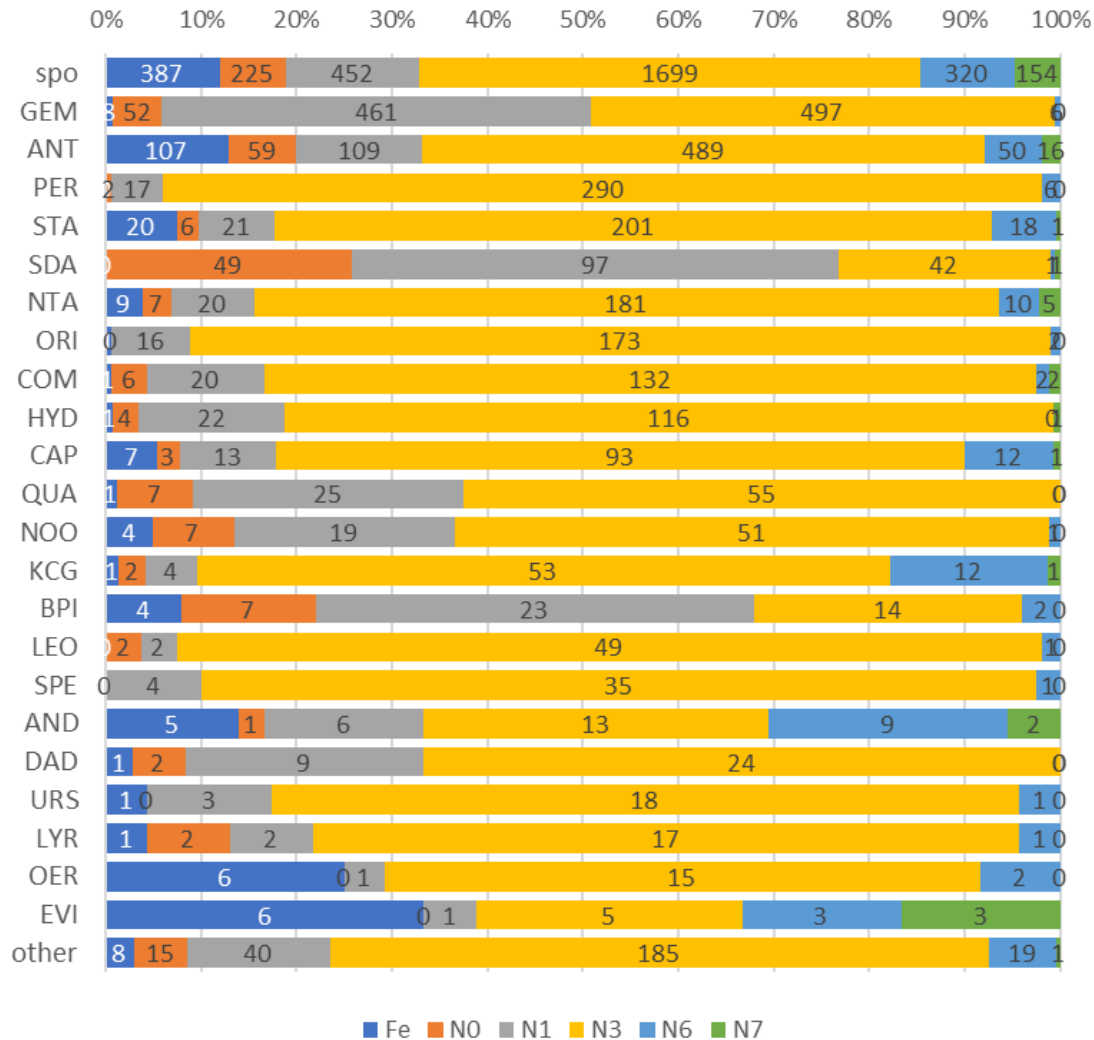
ご清聴ありがとうございました。



流星スペクトル図鑑(2015)

資料

群別スペクトル割合(2015-24) N=7538



	略号	有効流星数	枯渇度	rich度	軌道要素			対地速度	発光点高	流星群名
					q	i	e			
18	AND	36	19%	31%	0.755	9.4	0.752	21.5	7.8	アンドロメダ
3	ANT	830	20%	8%				30.0		アンチヘリオンソース
15	BPI	50	60%	4%	0.098	20.3	0.952	38.1		8月βうお=みずがめδ北
11	CAP	129	12%	10%	0.599	7.2	0.754	22.0	3.5	やぎα
9	COM	163	16%	2%	0.549	135.2	0.944	63.0	1.8	かみのけ
19	DAD	36	31%	0%	0.981	72.23	0.649	44.6		12月αりゅう
23	EVI	18	6%	33%	0.442	5.09	0.801	29.0		おとめη (3月)
2	GEM	1024	50%	1%	0.147	22.26	0.886	33.6	-0.2	ふたご
10	HYD	144	18%	1%	0.981	129.6	0.981	58.9	0.9	うみへびσ (12月)
14	KCG	73	8%	18%	0.979	36.68	0.69	25.8	3.0	はくちょうκ
16	LEO	54	7%	2%	0.985	162.3	0.846	70.0	3.7	しし
21	LYR	23	17%	4%	0.921	79.63	0.94	46.6	3.6	4月こと
13	NOO	82	32%	1%	0.122	23.3	0.986	42.0	0.4	11月オリオン
7	NTA	232	12%	6%	0.369	2.67	0.814	27.4	2.1	おうし北
22	OER	24	4%	8%	0.512	19.3	0.873	28.0		エリダヌスο
8	ORI	192	8%	1%	0.577	163.6	0.928	66.0	2.6	オリオン
24	others	268	21%	7%						その他
4	PER	315	6%	2%	0.948	113	0.909	58.7	1.9	ペルセウス
12	QUA	88	36%	0%	0.979	70.85	0.628	40.3	-1.3	四分儀
6	SDA	190	77%	1%	0.087	25.69	0.964	39.8	-1.5	みずがめδ南
17	SPE	40	10%	3%	0.938	139.5	0.938	64.1	1.5	9月ペルセウスε
1	spo	3237	21%	15%						0 散在
5	STA	267	10%	7%	0.378	5.41	0.803	26.9	2.6	おうし南
20	URS	23	13%	4%	0.938	52.31	0.793	32.7	6.8	こぐま 58