

ふたご座流星群の分光観測と 分光データ処理について

日本大学大学院 理工学研究科 航空宇宙工学専攻

阿部 新助

小川 巧覽

宮崎大学 工学部 電子物理工学科

前田 幸治

2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

1

研究背景

流星とは、彗星や小惑星起源のメテオロイドと呼ばれる惑星間塵が、
12~72[km/s]で大気に衝突した際、メテオロイドと上層大気が衝
突し、衝突励起することでプラズマ発光が起きる現象のことである

流星を撮像、分光することで、メテオロイドの軌道や組成がわかる
ためメテオロイドの母天体を間接的に探査することができる



2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

2

研究背景・目的

また、ふたご座流星群の流星物質やその母天体の(3200) Phaethonの組成は定かではないため、探査機「DESTINY+」が2022年に打ち上げられる予定



「深宇宙探査技術実証機DESTINY+」 <https://destiny.isas.jaxa.jp/science/>より

今回の観測では、ふたご座流星群の流星に絞ることで、母天体でありDESTINY+の探査対象である(3200) Phaethonの組成を間接的に探査するため、2017年から2018年にかけて150個の流星を分光観測した

2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

3

観測機材

- ・カメラ

SONY α 7s



- ・回折格子

Edmund Optics VIS 600GPM
(600本/mm)

- ・キャップチャ

BlackMagic Intensity Pro 4K



- ・キャップチャソフト

UFO Capture HD2

- ・観測用PC

i7-4790K 256GBSSD × 2(RAID)

2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

4

観測機材

去年の観測風景



2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

5

観測結果

宮崎の観測結果は宮崎大学の前田幸治教授からデータを頂きました

観測地点	カメラ	波長範囲[nm]	波長分解能	レンズ	視野角(水平)	観測日時	観測個数[ヶ]
千葉	SONY ILCE-7S (IRフィル ターなし)	380-800	0.44[nm]	SIGMA DG HSM	24mm F1.4	73.74°	2018年12月 13~16日
			0.28[nm]	SIGMA DG HSM	35mm F1.4 (APS-Cクロッ プのため)	36.97°	2017年12月 13~14日
宮崎	SONY ILCE-7S	400-700	0.51[nm]	Canon FD L	24mm F1.4	73.74°	2018年12月 1~21日
			0.37[nm]	SIGMA DG HSM	35mm F1.4	54.43°	2018年12月 9~18日

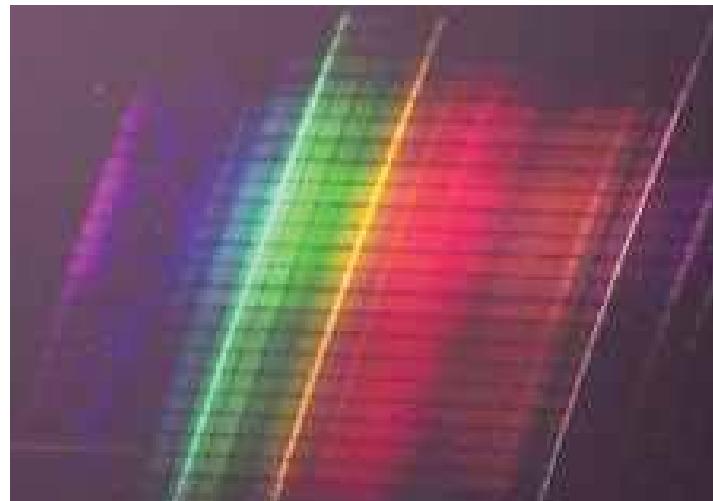
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

6

解析手法

まずはスペクトル画像取得(この画像は一例です)



2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

7

解析手法

この画像にはガンマがかかっている(以下の式参照)

$$\text{Output} = \text{Input}^\gamma$$

通常はこのような形であるが、α7sはxvYCCと呼ばれる規格のため、
この形より少し異なるガンマを持つ

$$\text{Output} = -1.099 \times (-\text{Input})^{0.45} + 0.099 \quad (\text{Input} \leq -0.018)$$

$$\text{Output} = 4.5 \times \text{Input} \quad (0.018 \leq \text{Input} \leq -0.018)$$

$$\text{Output} = 1.099 \times \text{Input}^{0.45} - 0.099 \quad (0.018 \leq \text{Input})$$

※Input, Outputが0~1であればITU-R BT.709と同等

またこの時のInputはRGBの形式であり、YUVではない
α7sの出力はYUVなので、データをYUVからRGBに直す必要がある

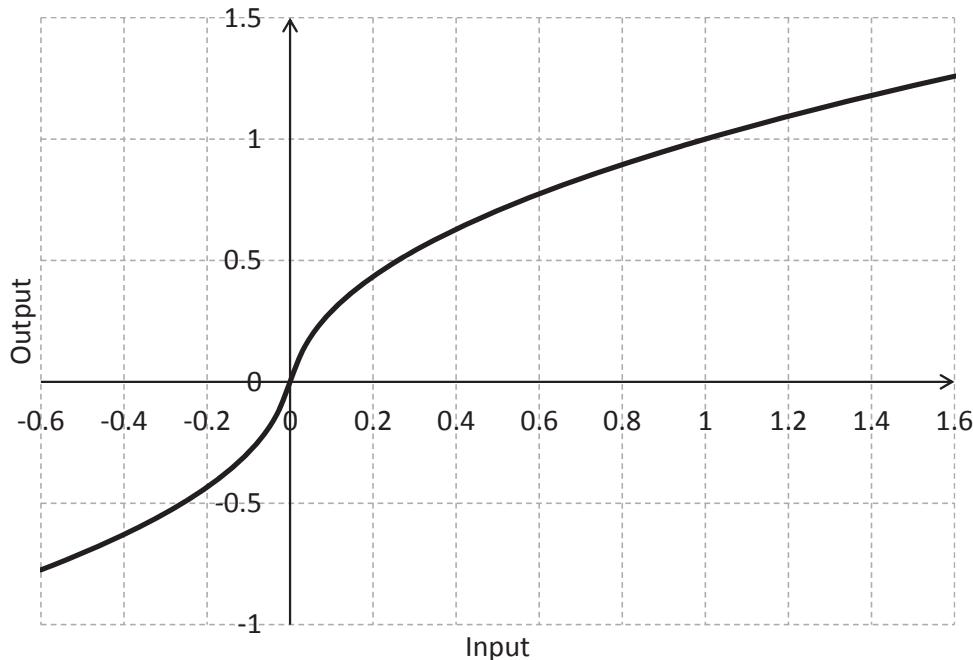
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

8

解析手法

グラフにするとこのような形



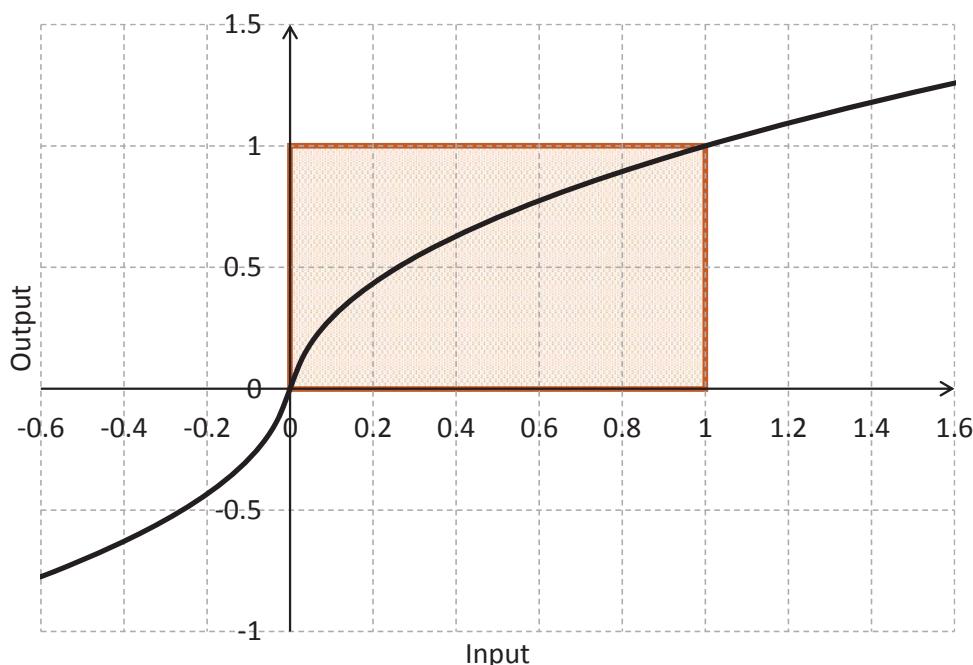
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

9

解析手法

また、扱う画像のカウント値の範囲は0～255(規格化すると0～1)なので、橙色の部分だけ使っていることになる(ITU-R BT.709と同等)



2019/8/25

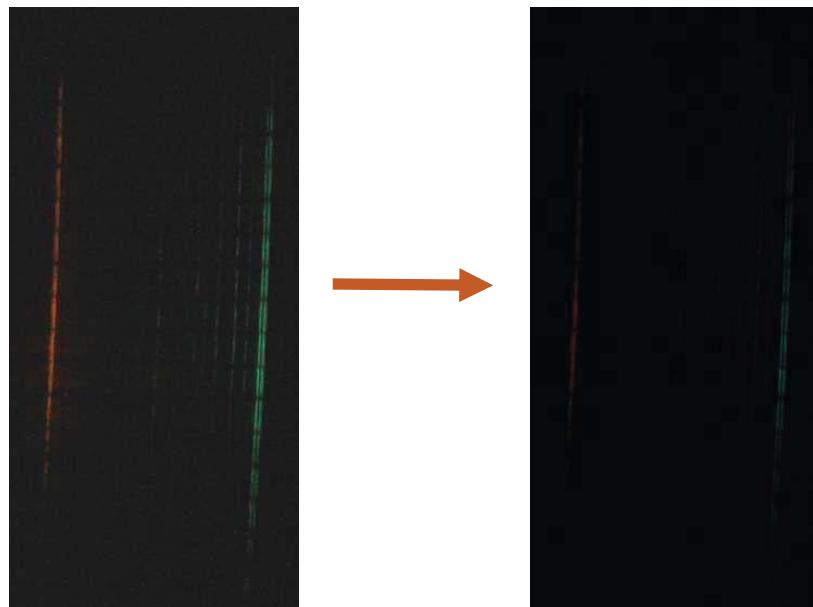
第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

10

解析手法

ガンマ補正前(左)と後(右)

全体的に暗くなる。見づらいので以降のスライドではガンマ補正前の画像を使います



2019/8/25

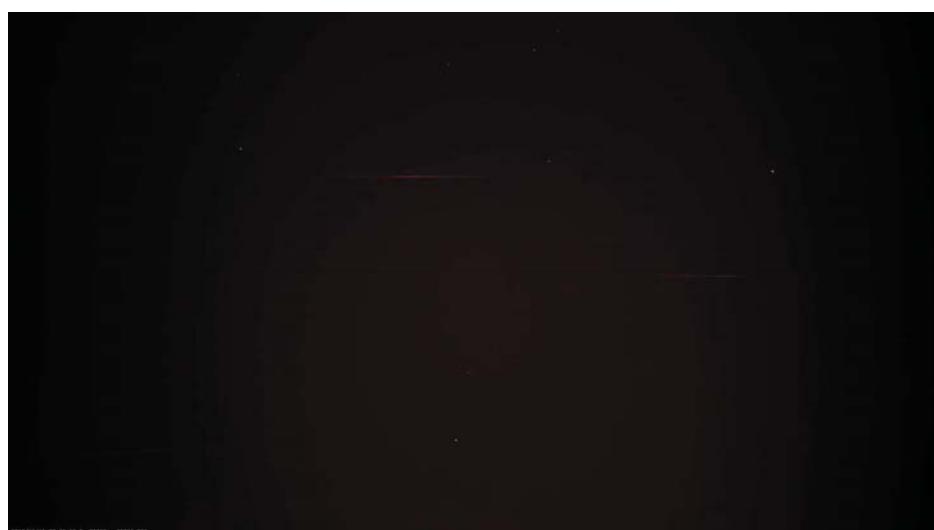
第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

11

解析手法

続いてダークを引く

ダークは流星の写る前の十数フレームを加算平均して取得した
このダークをすべてのフレームから減算する



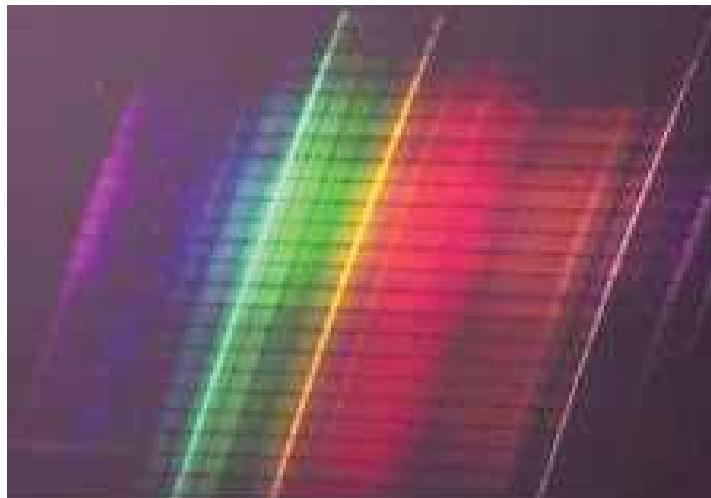
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

12

解析手法

どこのピクセルにどの波長があるのか輝線から判断するため輝線の位置を特定する



波長較正に用いたのは以下の輝線

MgI-2 518.36[nm]

MgI-0 552.84[nm]

NaI-1 589.2[nm]

OI-1 777.4[nm]

鉄流星のみ

MgI-2 518.36[nm]ではなく

FeI-2 516.9[nm]を用いる

これらの輝線の位置は直線であるとしてピクセル位置を定める

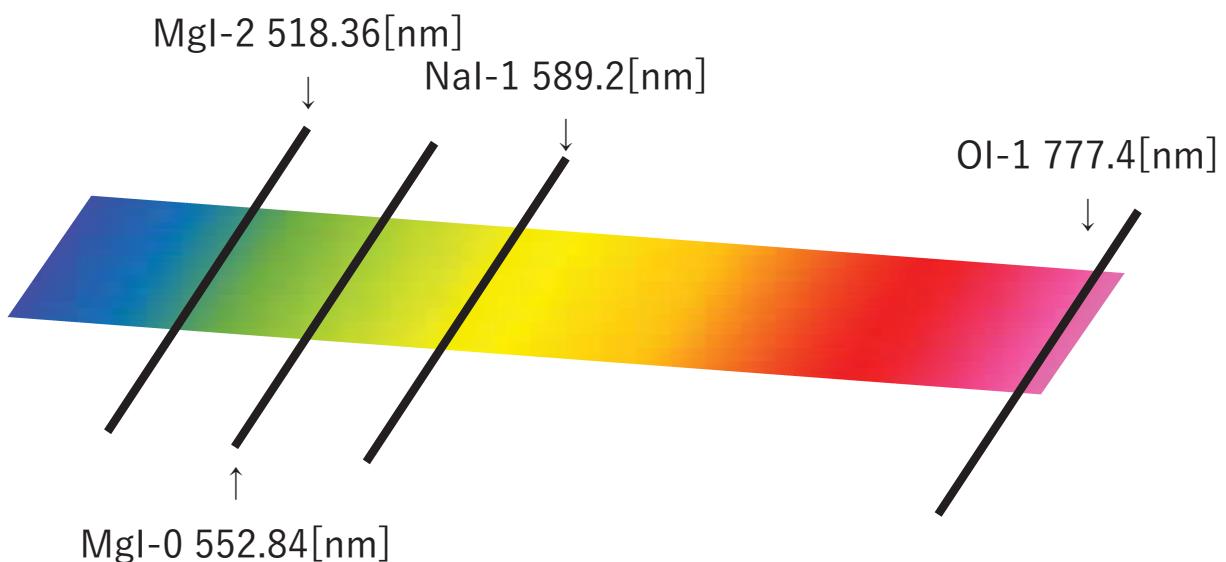
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

13

解析手法

輝線の位置を直線として置くイメージ



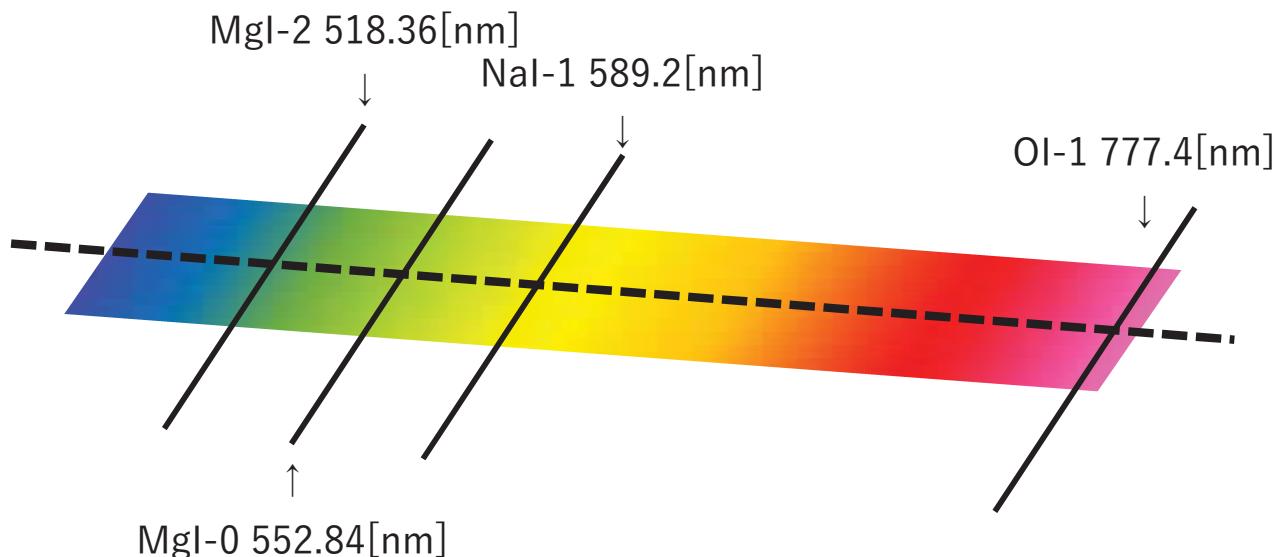
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

14

解析手法

続いて、測光のための線をスペクトルに平行になるよう引く(点線)



輝線を直線近似した線との交点の位置を出し、交点の位置と波長とで3次近似を行う。これで波長較正ができる

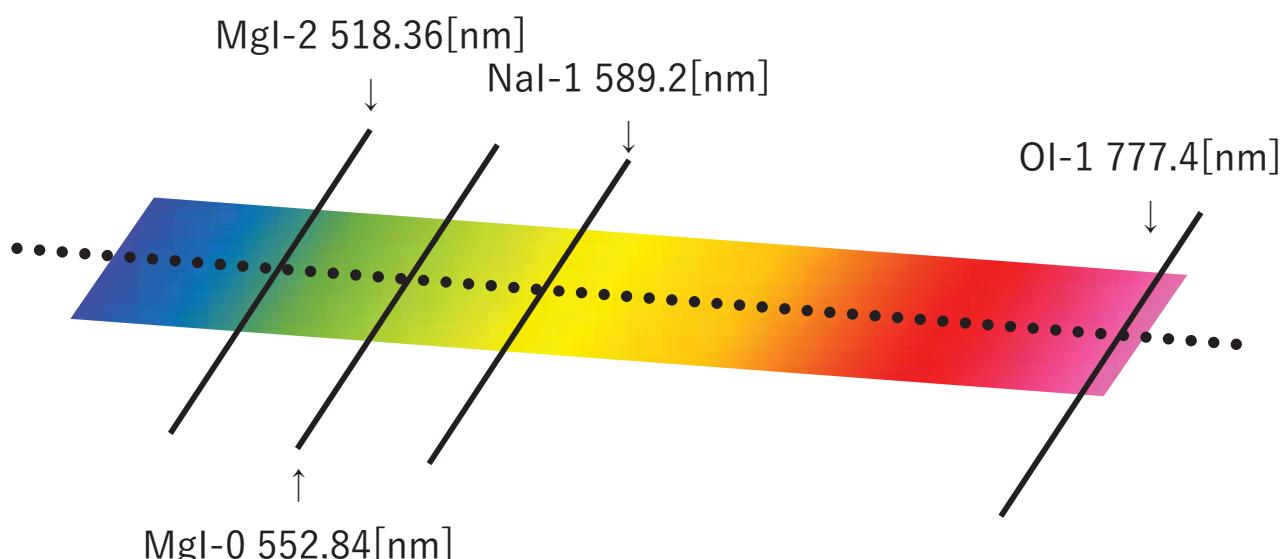
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

15

解析手法

測光は一ピクセル毎に取るのではなく波長毎でとる



この時、測光の間隔はカメラの波長分解能より細かいものにすればよい。

今回は0.2[nm]間隔で取得し、補間によって各点の輝度を求めた

2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

16

解析手法

主な補間方法

- ・ニアレストネイバー法

一番近いピクセルの値を取る

全体の輝度値をそっくりそのまま保存できるので、0次光の強度測定に使える。ただし、形状は崩れるのでスペクトルには向かない

- ・バイリニア法

点に近い四隅の点の平均を取る

形状を保つことができる。線形補間なので、細かく点が取れれば全体の輝度値を保存できる

- ・バイキュービック法

点に近い 4×4 の各点を3次式で補間する

形状は保つことができるが、全体の輝度値は3次式の補間のため、多少変動する

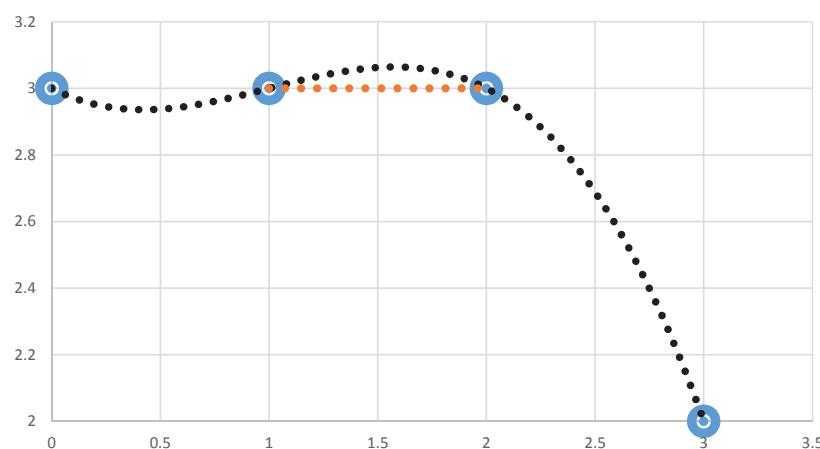
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

17

解析手法

バイキュービック法の全体の輝度値の変動理由は3次式の補間によるオーバーシュートまたはアンダーシュートが原因



青…元データ 黒…バイキュービック法 橙…バイリニア法

よって、今回の測光ではバイリニア法を用いた

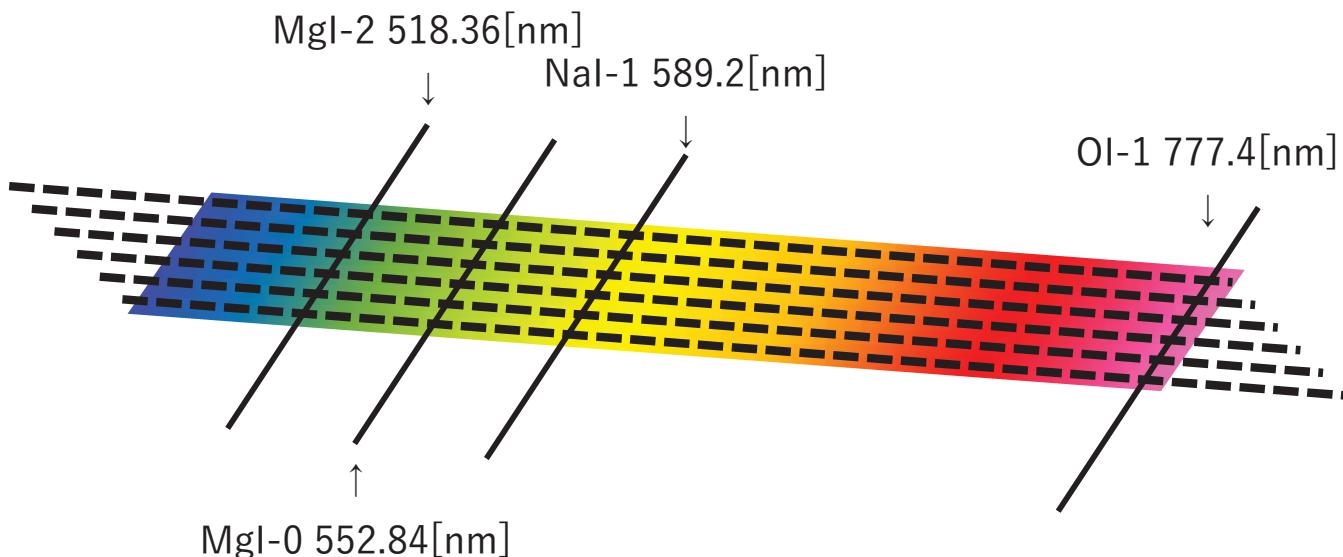
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

18

解析手法

あとは測光のための線を1ピクセルごとに引いていけば全体の測光ができる



2019/8/25

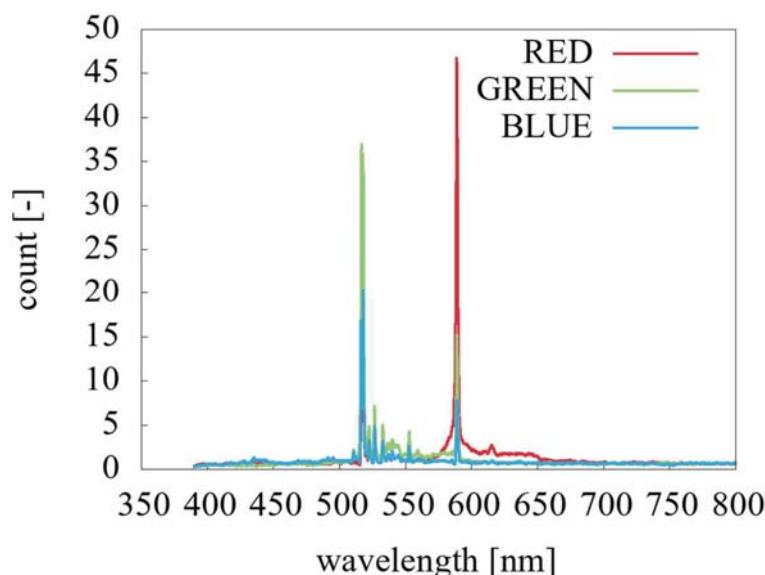
第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

19

解析手法

測光結果

RGB各色で測光をした。これはRGBからグレースケールへの変換の方法が複数存在するため、変換次第で結果に違いが出るためである



2019/8/25

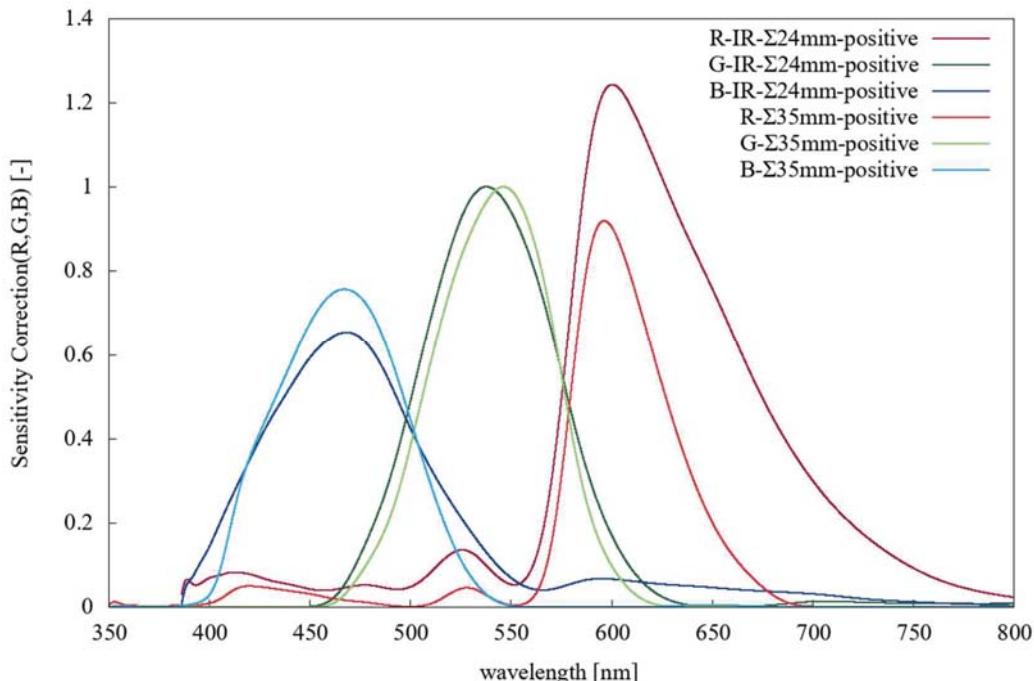
第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

20

解析手法

続いて感度較正を行う

α 7sの感度曲線は以下のとおりである



2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

21

解析手法

感度曲線はハロゲンランプを用いて作成している

ハロゲンランプ(Ocean Optics社製HL-3 plus)から出される光を、光学スリットに入れてスペクトルを取得する



2019/8/25

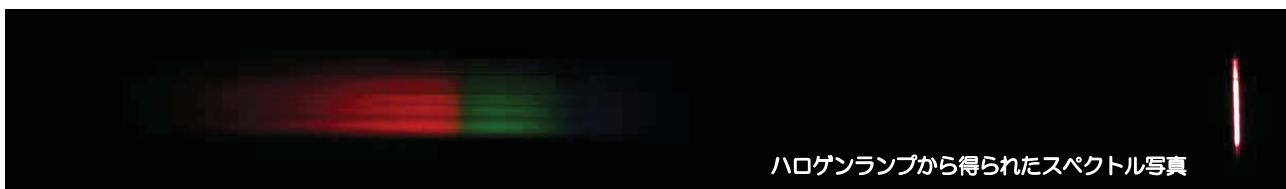
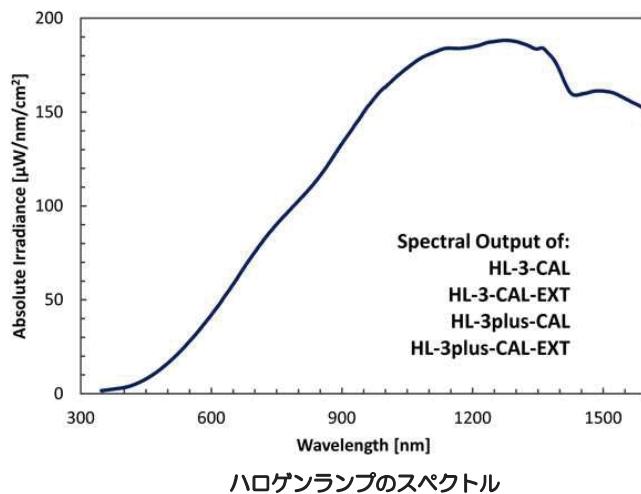
第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

22

解析手法

ハロゲンランプのスペクトルはすでに分かっている(左図)

そのため、カメラで下の写真のスペクトルを測光したのち、ハロゲンランプのスペクトルを比較すると、感度曲線を出すことができる



2019/8/25

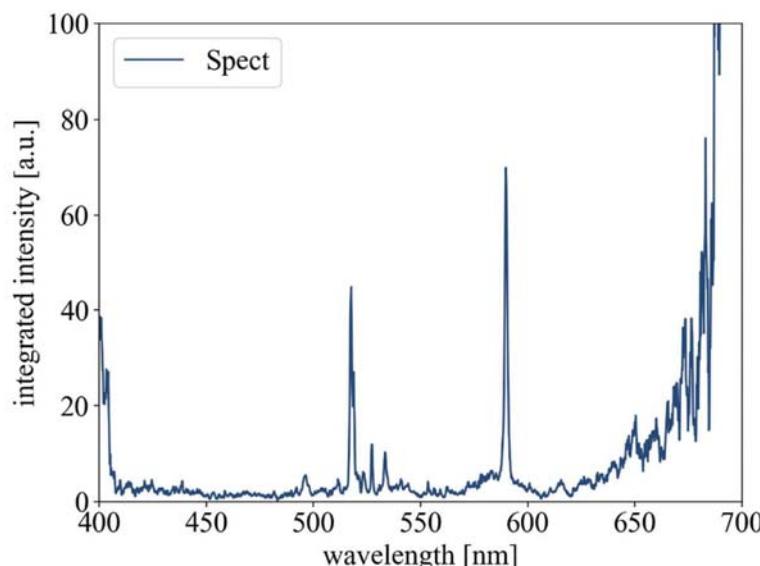
第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

23

解析手法

スペクトルの生データを感度曲線で割ることで感度較正ができる

今回はRGBごとに感度較正したあと、それぞれの感度が強い部分をつなぎ合わせて一つのスペクトルを出力している



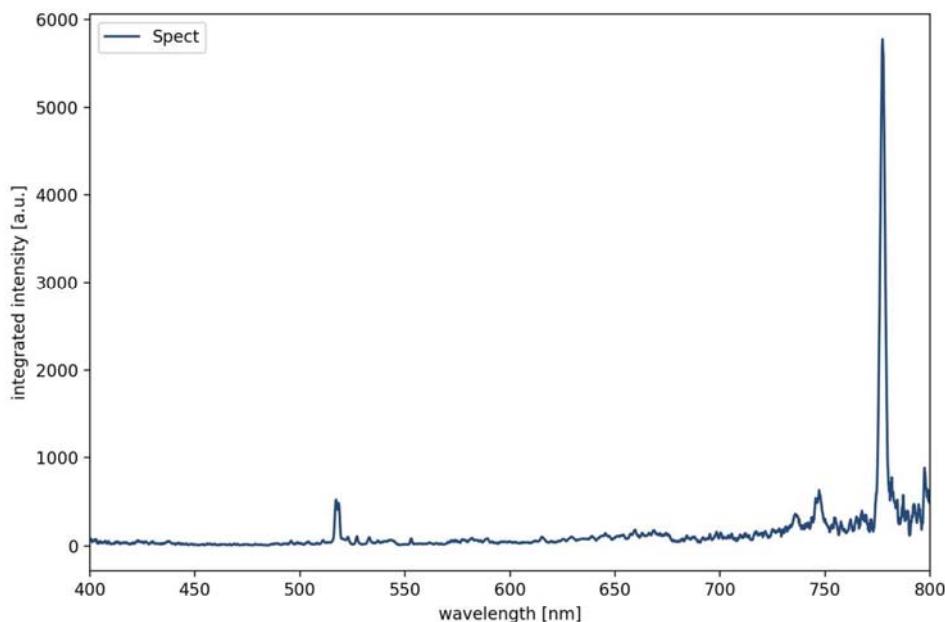
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

24

解析手法

ちなみに、赤外フィルター無いものは800[nm]までスペクトルが取れるので、OI-1 777.4[nm]などの輝線が観測できる。



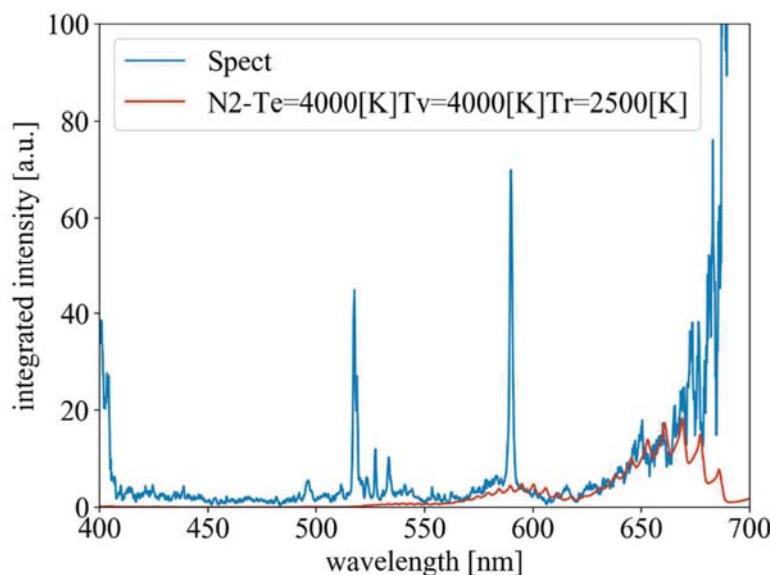
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

25

解析手法

次に輝線の強度測定をしたいが、N2バンドがあるため正確に測定できないので輻射予測コード「SPRADIAN」を用いてN2バンドの推定を行った



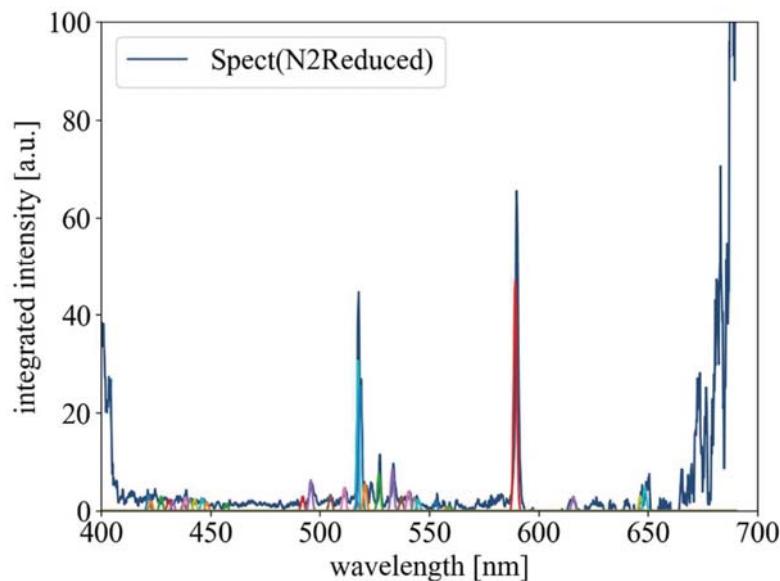
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

26

解析手法

N2バンドを引いたあと、各輝線をガウス分布でフィッティングすると、輝線強度が出来る。これを各フレームで行うことで輝線の時間変化を出す。



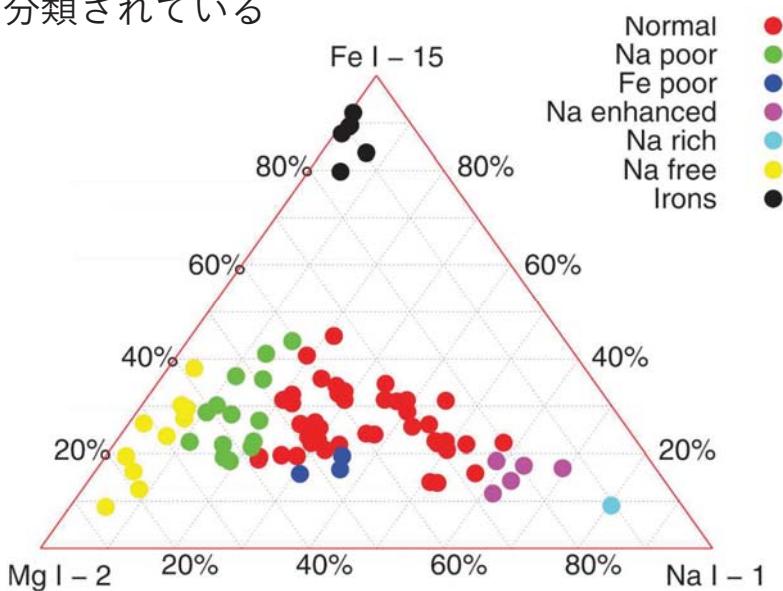
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

27

結果

流星の組成は、輝線強度比を用いて表される
比によって分類されている



Classification of meteor spectra [-3(10mm) < mag < +2(1mm)].

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

2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

28

結果

強度比に用いた輝線

・ FeI-15

526.9, 532.8, 537.1, 540.4, 543.1, 544.9[nm]

・ MgI-2

516.732, 517.268, 518.36[nm]

・ NaI-1

589.2[nm]

これらの輝線で強度比を出している。

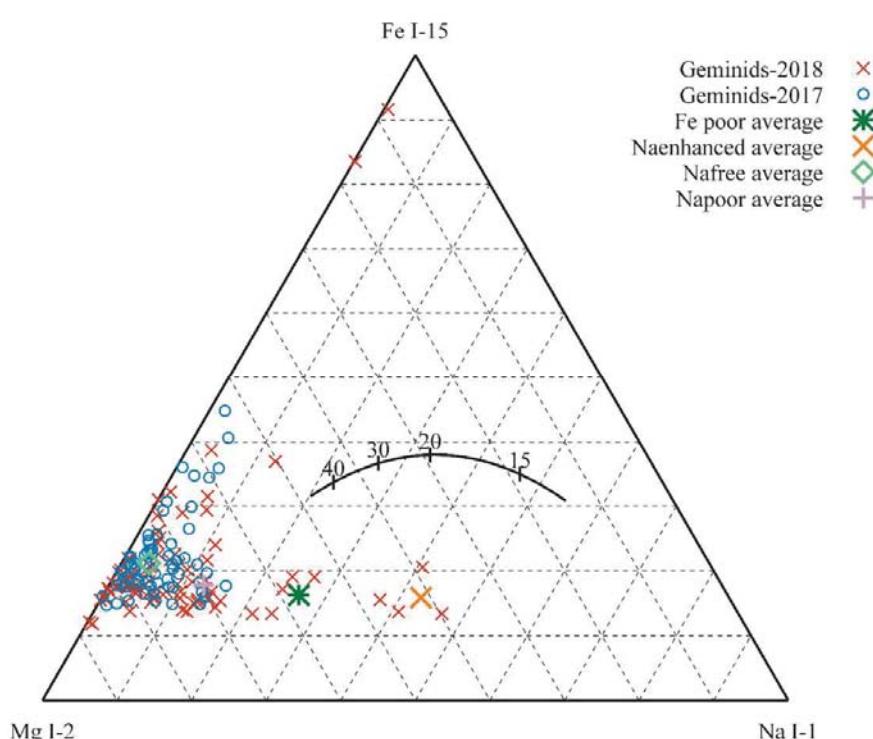
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

29

結果

組成を三角ダイアグラムで表したもの(表は各分類の平均値)



2019/8/25

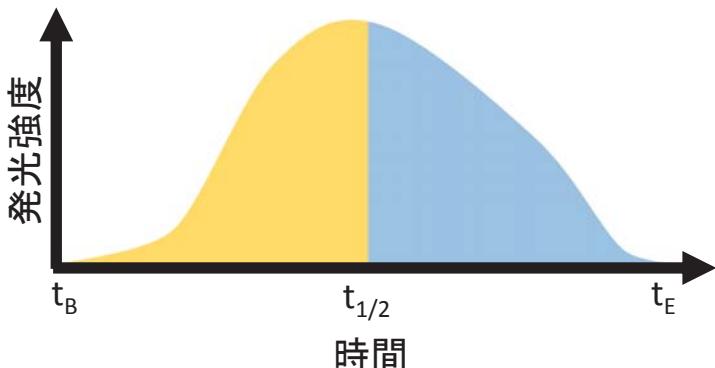
第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

30

結果

また、輝線のライトカーブからFパラメーターという値を出した
Fパラメーターはライトカーブの積分値のちょうど半分になる位置の時間の値を用いて以下の式で表される

$$F_{\text{parameter}} = \frac{t_{1/2} - t_B}{t_B - t_E}$$



これでライトカーブの形状を数値で表すことができる。

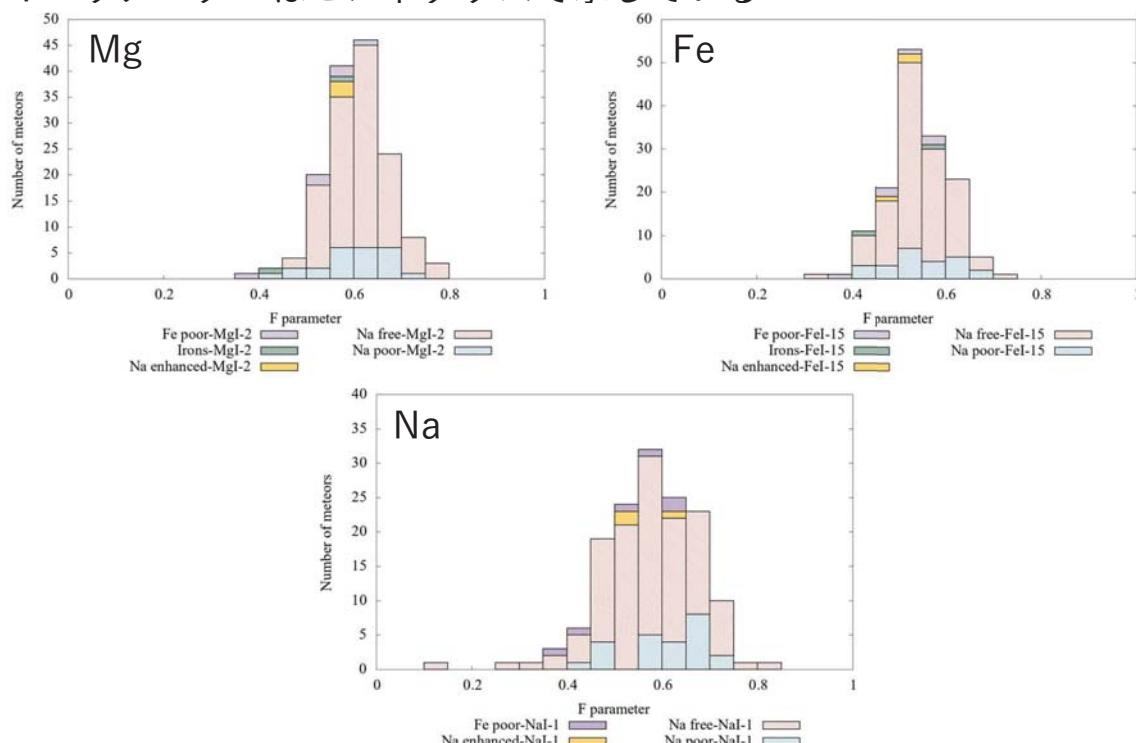
2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

31

結果

Fパラメーターはヒストグラムで示している



2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

32

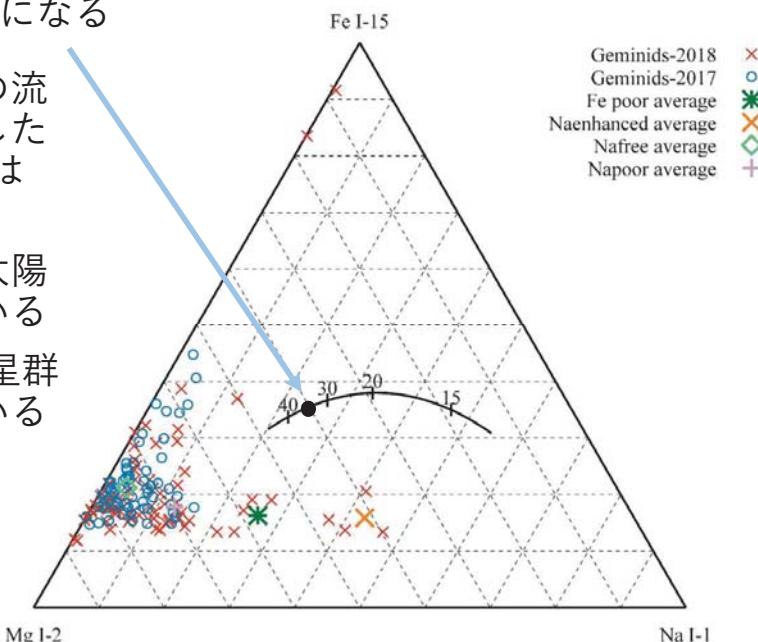
考察

ふたご座流星群の速度で、太陽組成の流星物質が大気に突入した際の各物質の比は黒丸の点になる

中央の曲線は、太陽組成の流星物質がある速度で突入した際の比を表している(単位は [km/s])

ふたご座流星群の組成は太陽組成から左側に位置している

これは、Naがふたご座流星群の流星物質から枯渇していることを示している



2019/8/25

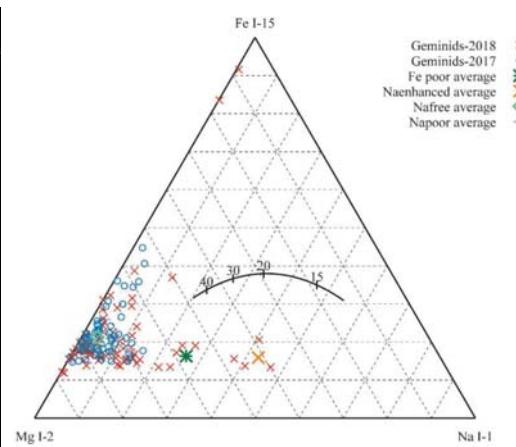
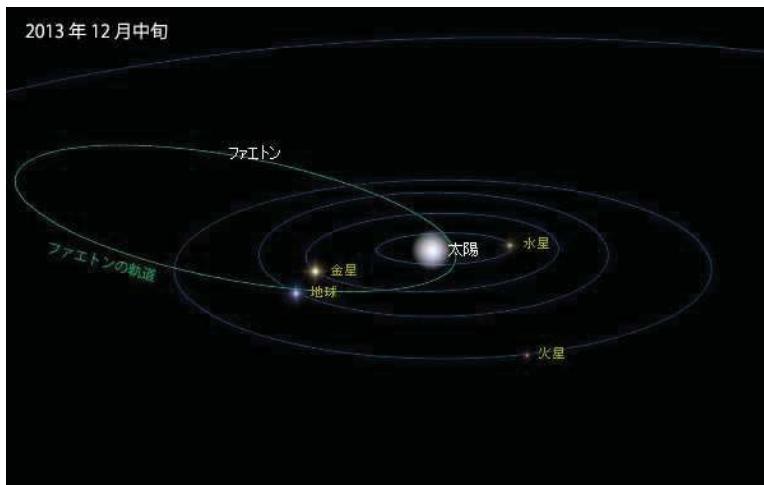
第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

33

考察

ふたご座流星群のNaが枯渇している原因是、母天体である(3200) Phaethonの軌道に由来する

近日点距離0.14[AU]、遠日点距離2.4[AU]の橢円軌道で、太陽に近いところを通るため、その際にNaが揮発してしまったと考えられる



アストロアーツ 「ふたご座流星群を生んだ小惑星、現役の彗星だった」(2013/8)より

2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

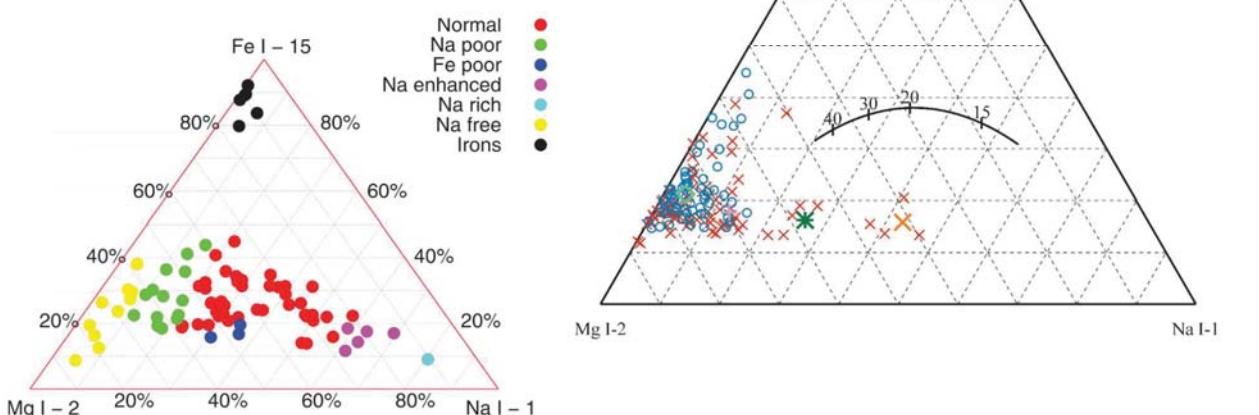
34

考察

また、先ほどのVojáčekさんの三角ダイアグラムと見比べるとふたご座流星群の中にもIrons(鉄流星)があることが分かる

そのためふたご座流星群の流星物質の中にも、少なからず鉄で構成されたものが存在すると考えられる

また、Naが豊富な流星も観測されたので、同様にNaも少ないながら存在すると考えられる

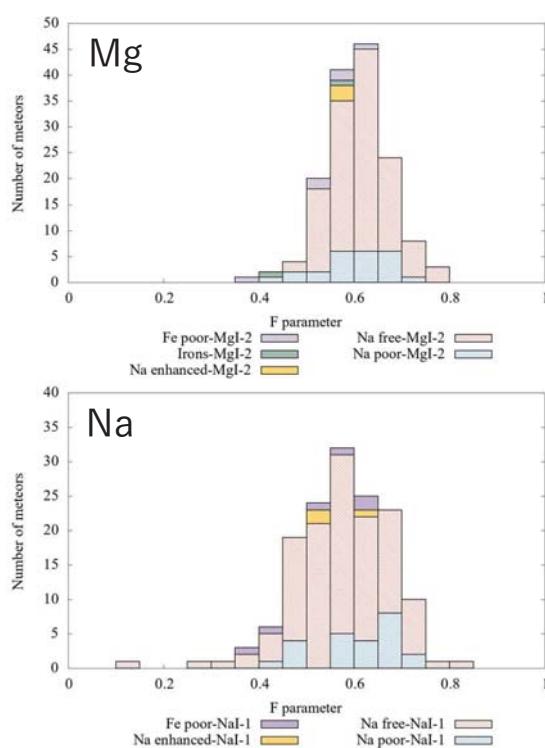


2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

35

考察



Fパラメータのヒストグラム形状はMg, Feに比べNaの分布が広がっていることが分かる

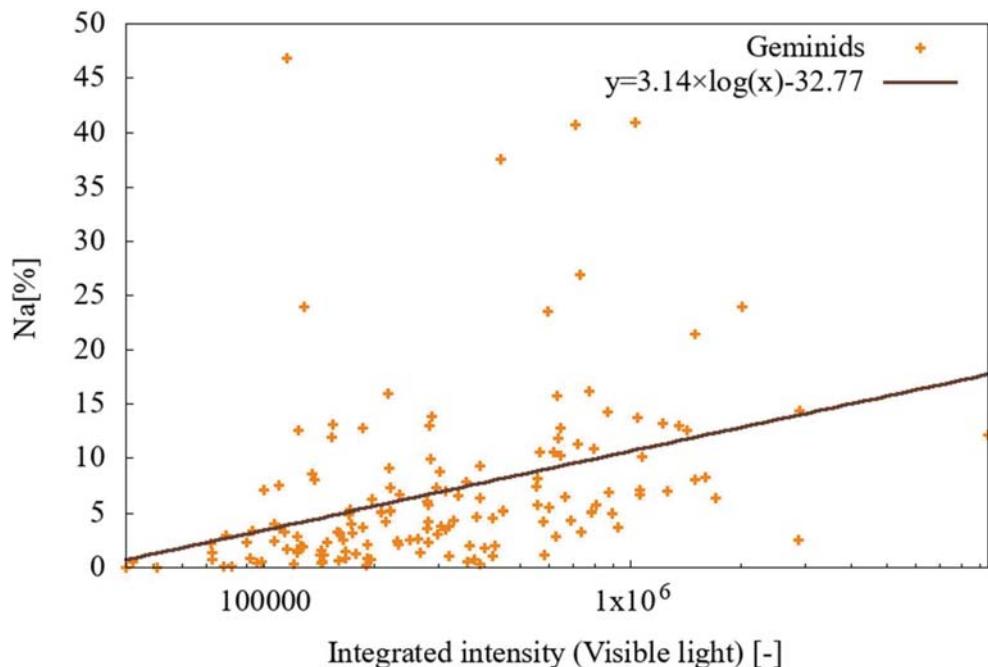
そのため流星物質内のナトリウムの分布が一様でないことが考えられる。

2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

36

可視光の全積分発光強度とNa量のグラフ
暗い流星(小さなサイズの流星物質)ほどNaが枯渇する傾向がある



2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

37

まとめ

- ・ガンマ補正を直してから画像解析
- ・測光はバイリニア補間
- ・組成比は全体的にNaが枯渇していた
- ・ごくわずかにNaが豊富な流星、鉄流星がみられた
- ・Naの組成分布にはらつきがある
- ・暗い流星ほどNaが枯渇する傾向がある

2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

38

謝辞

本研究は、JSPS科研費 26287106(流星・火球の高精度分光観測と軌道決定による隕石の母天体小惑星探査, 研究代表者; 阿部新助)の助成を受けたものです。

解析データの多くは、宮崎大学・前田幸治教授からご提供頂いた生データの解析を行ったものです。

2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

39

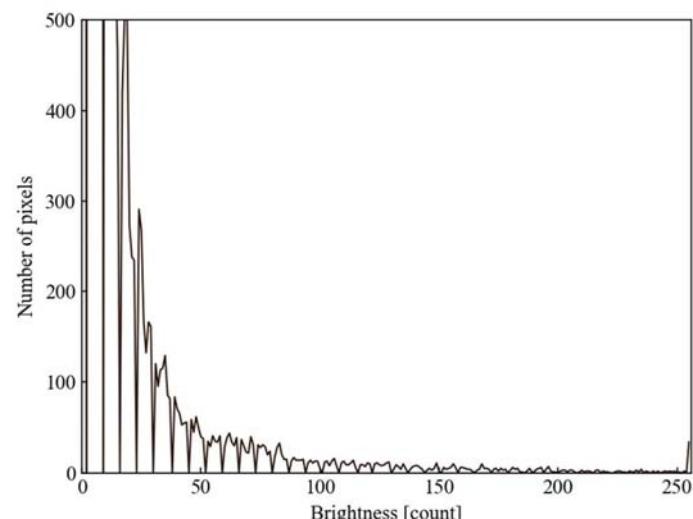
appendix

I-O DATA社製GV-USB2でキャプチャした白黒動画のヒストグラムがギザギザになる問題

これは動画キャプチャの入力はNTSC(ITU-R BT.601)であるため、NTSCの信号下限値は16、上限値は235である

それをPC用に0~255に引き伸ばすと右のようなヒストグラムのギザギザができる

NTSCは220階調で、PCは256階調なので、ギザギザの個数は全部で37個ある



2019/8/25

第60回 日本流星研究会「日本ど真ん中流星会議」

40

緑の最大値を1として、入射角(0,15,30,45度)ごとに表した感度曲線
入射角で感度曲線が変化する。これは回折格子のブレーズ角度が変
化することや、周辺減光の影響が出るため
そのため、可能ならば入射角ごとの感度曲線で感度較正をすべき…

