

修士論文

低価格モノクロ高感度ビデオカメラによる

流星分光観測システムの構築

Construction of a meteor spectroscopic observation system using
multiple low-cost monochrome high-sensitivity video cameras

報告者

学籍番号: 1245040

氏名: 谷 優希

指導教員

山本 真行 教授

令和4年2月18日

高知工科大学大学院工学研究科

基盤工学専攻航空宇宙工学コース

目次

第1章 序論	1
1.1 背景.....	1
1.1.1 流星現象.....	1
1.1.2 流星分光観測.....	1
1.2 目的.....	2
第2章 手法	3
2.1 観測システム.....	3
2.1.1 観測機器.....	3
2.1.2 カメラハウジング.....	6
2.1.3 流星観測ソフトウェア.....	6
2.2 流星スペクトル解析手法.....	7
2.2.1 波長校正.....	7
2.2.2 輝線強度補正.....	9
第3章 結果	11
3.1 流星観測結果.....	11
3.1.1 波長校正結果.....	17
3.1.2 輝線強度補正結果.....	19
第4章 考察と評価	23
4.1 誤差原因.....	23
4.2 ふたご座流星群の相対強度比の特徴比較.....	23
4.3 分光観測システム評価.....	24
4.3.1 ASI178MM を使ったシステム評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.3.2 ASI183MM を使ったシステム評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
4.3.3 自作カメラハウジング評価.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
第5章 結論	25
謝辞.....	26
参考文献.....	27

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 流星現象

流星(meteor)とは、宇宙空間を漂っている数 mm~数 cm 程度の大きさの流星体(meteoroid)と呼ばれる塵の粒が地球大気に突入する際に引き起こされる発光現象である。流星体は彗星や小惑星から放出され、これらの公転軌道上に拡がっている。この軌道と地球の公転軌道が重なる特定の時期に流星群が見られる。図 1.1 は流星について表した模式図である。流星体は、11.2 km/s~71 km/s の速さで地球に突入し、高度約 300 km 付近から地球大気を構成する分子と衝突し空力加熱により徐々に表面温度が上昇する。さらに表面温度が上昇すると流星体は崩壊し始め、約 2200K に達すると昇華し周囲に流星体の組成物質や大気成分が気化・プラズマ化した蒸気が充満する。蒸気中の原子の励起状態は脱励起され光を発する。流星光の 90%以上が流星体を構成する単一の低励起原子に由来する[1]。この彗星や小惑星の崩壊物質である流星体を調べることで太陽系の歴史をたどることが可能である。流星の観測手法として、眼視観測、ビデオ観測、分光観測、電波観測などがある。

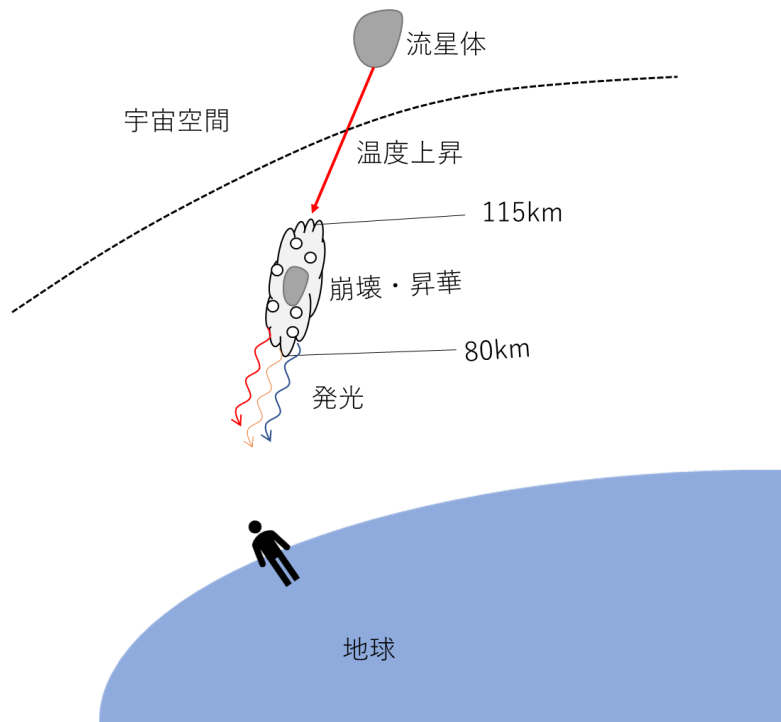


図 1.1 流星現象の模式図

1.1.2 流星分光観測

流星分光観測は、19 世紀後半に A.S.Herschel らによってプリズムを用いた眼視観測がはじめられた。これらの観測で、流星のスペクトルで最も一般的で明るい 2 つの輝線はナトリウムとマグネシウムであることが確認された。1950 年以降にはプリズムの代わりに透過型回折格子が流星分光観測に使用され始め、アメリカ、カナダ、旧ソ連、旧チェコスロバキアで大規模な流星分光観測プログラムが開始された[2]。回折格子を用いた流星分光観測によって得られる流星スペクトル画像の例を図 1.2 に示す。画像の一番左側に見られる輝線が 0 次光と呼ばれる輝線である。0 次

光の右側に 1 次光と呼ばれる分光された輝線がみられる。1971 年には高感度ビデオ技術を用いた観測が始まった。Borovicka et al.(2004)は、スペクトルの Mg I,Fe I,Na Iの相対的な線強度を図 1.3 のような三角図で表し流星の分類を行った[3]。

近年、カメラの性能向上や観測用ソフトウェアの発展などで流星分光観測は注目を集めており、日本でも日本流星研究会（NMS）によるメーリングリストやウェブサイト上の掲示板 (SonotaCo.com など)でアマチュア天文家による情報交換が頻繁に行われている。

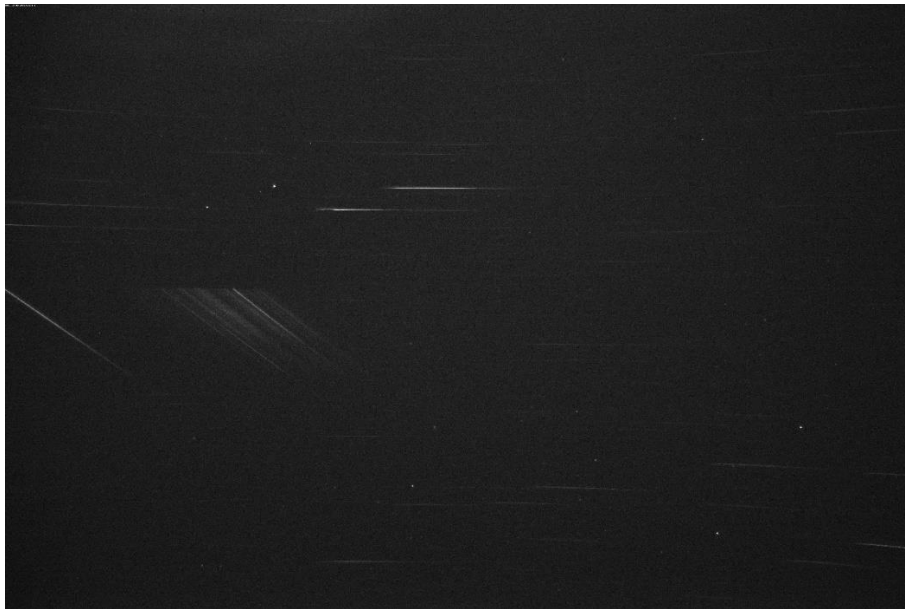


図 1.2 本研究で得られた透過型ブレード回折格子を用いた流星スペクトル画像の例

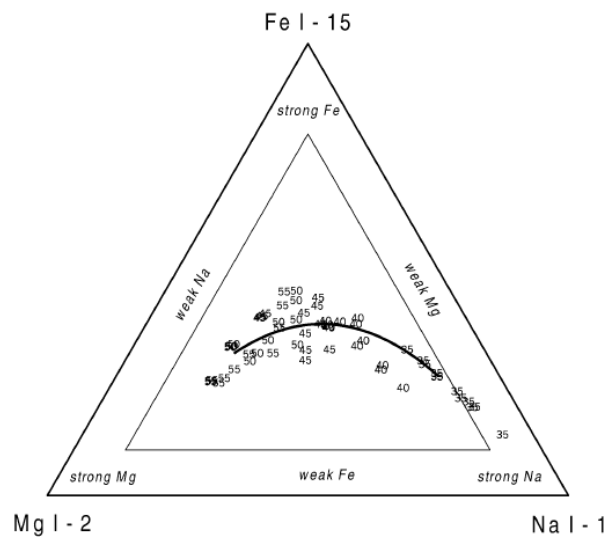


図 1.3 Mg I,Fe I,Na Iによる相対強度補正の例[3]

1.2 目的

本研究では、低価格モノクロ高感度ビデオカメラと回折格子を用いて、主にふたご座流星群、しぶんぎ座流星群の分光観測を行う。得られた流星スペクトルから Mg I,Fe I,Na Iの強度比を三角組成図で表す。また、構築した流星分光観測システムの評価を行うことを目的とする。

第2章 手法

2.1 観測システム

本研究で使用した観測システムの概略を図 2.1 に示す。

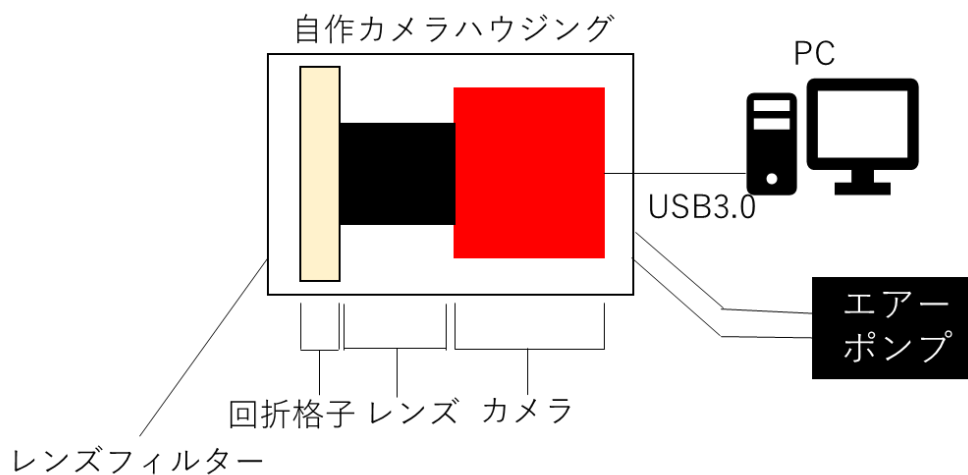


図 2.1 観測システムの概略

実際にカメラを設置している様子を図 2.2 に示す。カメラの設置場所として、高知工科大学 A 棟南西側にある観測小屋の屋上に設置し観測を行った。



図 2.2 観測装置の設置の様子

2.1.1 観測機器

観測に使用したカメラは、低価格高感度モノクロ CMOS カメラである ZWO 製 ASI178MM, ASI183MM の 2 台を使用した。ASI178MM は著者が卒業研究時(恒星の掩蔽観測)に使用したカメラであり、ソフトウェアでの制御や USB ケーブル 1 本で給電、データ転送を行える

等、扱いが容易であるため本研究で使用した。

ASI183MM は 178MM よりもセンサーサイズが大きく広視野、高解像度、高感度でより多くの流星を記録できると期待して使用した。解像度はそれぞれ 3096×2080 pixel, 5496×3672 pixel である。レンズには、Edmund Optics 製 TS C シリーズ固定焦点レンズ 8.5 mm, 1 型センサー対応固定焦点レンズ 12.5mm の 2 種類を使用した。回折格子には、Edmund Optics 製 透過型ブレード回折格子 VIS 300GPM 50×50 を使用した。カメラとレンズの組み合わせにより、ASI178MM カメラの視野角は 45.9° ×34.6° 。ASI183 カメラの視野角は 55.7° ×38.8° である。

表 2.1 に使用した観測機材の組み合わせと実売価格を図 2.3～図 2.5 に機材をそれぞれ示す。

表 2.1 観測機材の組み合わせと実売価格

カメラ	ZWO ASI178MM ¥39,100	ZWO ASI183MM ¥71,900
レンズ	Edmund Optics TS C シリーズ 固定焦点レンズ 8.5mm ¥34,650	Edmund Optics 1 型センサー 対応固定焦点レンズ 12.5mm ¥74,800
回折格子	Edmund Optics 透過型ブレード 回折格子 VIS 300GPM 50×50 ¥25,050	Edmund Optics 透過型ブレード 回折格子 VIS 300GPM 50×50 ¥25,050
合計金額	¥98,800	¥171,750



図 2.3 ZWO 製 ASI178MM(左)、ASI183MM(右)



図 2.4 Edmund Optics 製 TS C シリーズ固定焦点レンズ 8.5 mm(左)、1 型センサー対応固定焦点レンズ 12.5 mm (右)

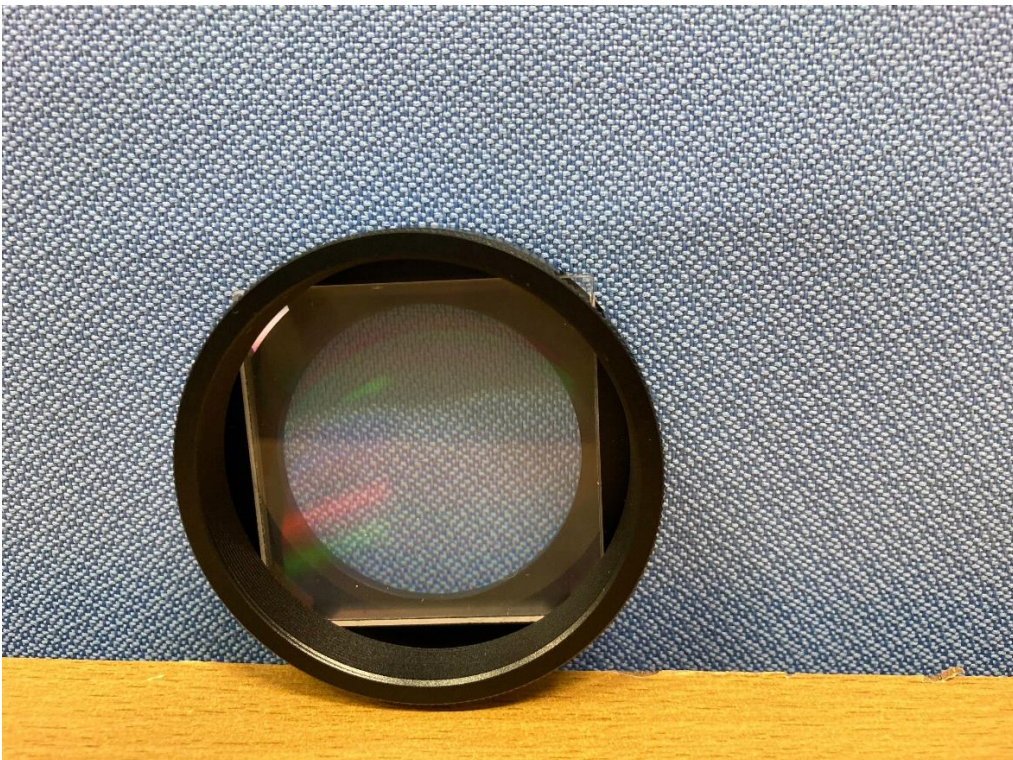


図 2.5 Edmund Optics 製透過型ブレード回折格子 VIS 300GPM 50×50

2.1.2 カメラハウジング

屋外でカメラを用いた連続観測を行うとき、雨天時や夜間の気温が下がった場合に生じる結露などを対策する必要がある。本研究では、塩ビパイプとレンズフィルターを加工して図 2.6 のようなカメラハウジングを作成した。塩ビパイプ内にエアーポンプから乾燥空気を送りこみ、さらに結露防止用のレンズヒーターを塩ビパイプの外側に巻き付けることによりハウジングの内側と外側に結露が生じないように対策を行った。



図 2.6 自作したカメラハウジング。隙間部分に水滴が入り込まないようにビニール袋で覆い使用した。

2.1.3 流星観測ソフトウェア

本研究では、流星を記録するソフトウェアとして、UFOCaptureHD2 と SharpCap4.0 を使用した。UFOCapture は、流星観測で広く用いられている動体検出機能があるソフトウェアであり流星を自動検出しその前後のフレームを AVI 形式で保存することができる。しかし、現在ソフトウェア内で使用できる最大解像度が 4096×2160 pixel であり、ASI183MM カメラの解像度を最大限利用できないため ASI178MM カメラの観測にのみこのソフトウェアを使用し観測を行った。SharpCap4.0 は、ZWO 製のカメラがネイティブサポートされているサードパーティのソフトウェアであり無料で利用できる。しかし、流星を自動で検出する機能は備わっていないので記録した画像を 1 枚 1 枚確認する必要がある。ソフトウェアとカメラの組み合わせを表 2.2 に示す。

表 2.2 カメラとソフトウェアの組み合わせ

カメラ	ソフトウェア	備考
ASI178MM	UFOCapture	流星自動検出機能がついている 最大解像度が 4096×2160
ASI183MM	SharpCap	流星自動検出機能なし ネイティブサポートされている。 無料で利用できる

2.2 流星スペクトル解析手法

流星スペクトルの解析にはスペクトル解析ソフトウェア RSpec を使用した[4]。解析の最終的な目標として流星スペクトルの Mg I、Fe I、Na I の相対強度を求め三角組成図で表すことである。まず、記録された流星スペクトルの輝線からピクセル位置と波長の関係を決めるために波長校正を行う。次に、記録されている輝度値を補正することにそれぞれの輝線の相対強度を求め三角組成図で表す。以下の項にて解析手法について詳しく説明する。

2.2.1 波長校正

流星の輝線成分とピクセルの位置関係を決定するため波長校正を行う。流星の主な輝線成分の波長を表 2.2 に示す[3]。

表 2.3 流星の主要な原子輝線のリスト(420-850nm)

λ (nm)	Atom	multiplet	λ (nm)	Atom	multiplet
(Low temperature lines)			(Wake lines)		
422.6	Ca I	2	421.6	Fe I	2
427.3	Fe I	42	437.6	Fe I	2
430.8	Fe I	42	442.7	Fe I	2
432.6	Fe I	42	446.2	Fe I	2
438.4	Fe I	41	448.2	Fe I	1
440.5	Fe I	41	457.1	Mg	1
492.0	Fe I	318	511.0	Fe I	1
495.7	Fe I	318	516.9	Fe I	1
504.7	Fe I	114	520.5	Fe I	1
518.2	Mg I	2	(Atmospheric lines)		
526.9	Fe I	15	533.0	O I	12
532.8	Fe I	15	543.6	O I	11
537.1	Fe I	15	615.7	O I	10
540.4	Fe I	15	645.5	O I	9
543.1	Fe I	15	648.4	N I	21
544.9	Fe I	15	742.4	N I	3
552.8	Mg I	15	744.2	N I	3
558.9	Ca I	9	746.8	N I	3
589.2	Na I	21	777.4	O I	1
643..9	Ca I	3	818.6	N I	2
643.9	Ca I	18	821.8	N I	2
646.3	Ca I	18	824..3	N I	2
819.4	Na I	4	844.6	O I	4
(High temperature line)			(Train line)		
448.1	Mg II	4	557.7	[O I]	3F

波長校正の手順を以下に示す。

- (1) RSpec のメインウィンドウから「開く」を押して解析したいファイルを選択すると図 2.7 のように画像が表示される。
- (2) 流星スペクトルが記録されている範囲をオレンジの線で囲み調整する。
- (3) 「バックグラウンドを減算」にチェックを入れさらに「領域をカスタマイズ」にチェックを入れると青と緑の線が出てくる。この領域を調整することによりオレンジの部分で囲った領域のバックグラウンドノイズが減少する。
- (3) 「回転」ボタンを押して回転や傾斜補正をスペクトルが真っ直ぐになるよう調整する。傾斜を調整するとさらに、スペクトルの輝線部分がはっきりと見られるようになる。
- (4) 波長校正には流星スペクトルの最も明るい一般的な輝線である Mg I (518.2 nm)、さらに大気発光成分である O I (777.4 nm) を利用する。「キャリブレーション」ボタンを押して図 2.9 のようにウィンドウが表示される。「プロファイル上の 1 番目のピクセルポイントをクリック」の部分を選択し Mg I だと考えられるグラフ上の点をクリックする。「そのピクセルの波長 (ナノメートル) を入力」に「518.2」を入力する。「プロファイル上の 2 番目のピクセルポイントをクリック」の部分を選択し O I だと考えられるグラフ上の点をクリックする。「そのピクセルの波長 (ナノメートル) 部分に「777.4」を入力。「適用」ボタンを押すとグラフの横軸がナノメートルで表示され図 2.8 のように波長校正される。

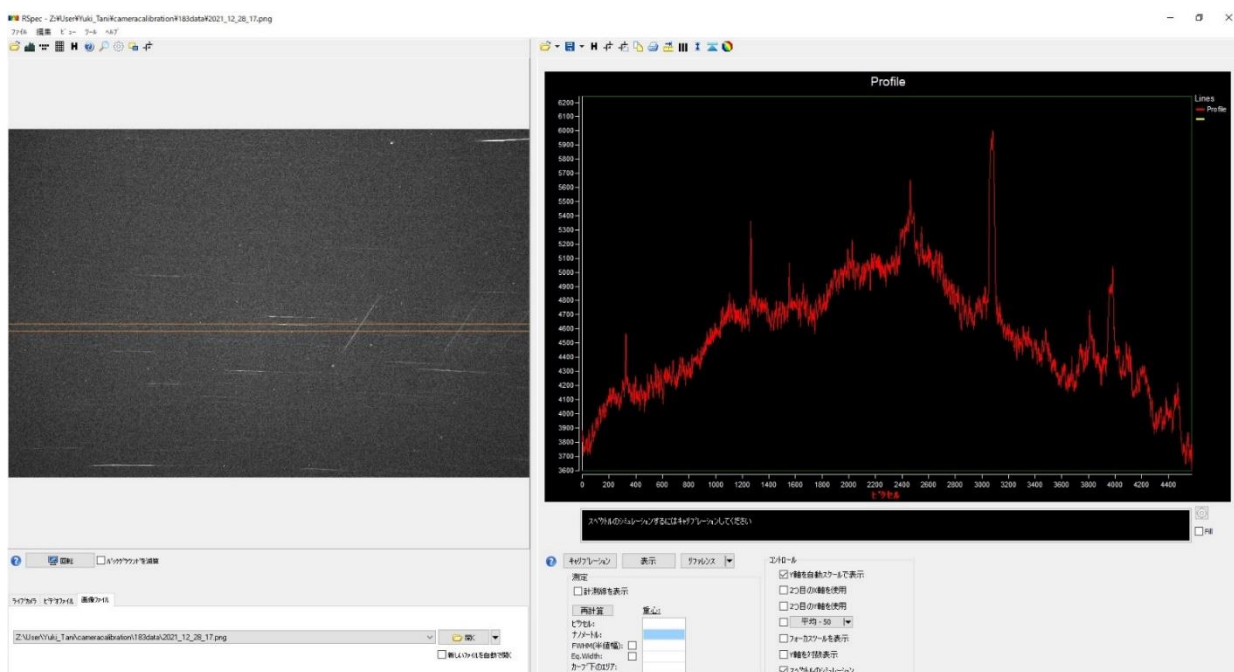


図 2.7 RSpec のメインウィンドウ 左側に流星スペクトル画像、右側にグラフが表示される。

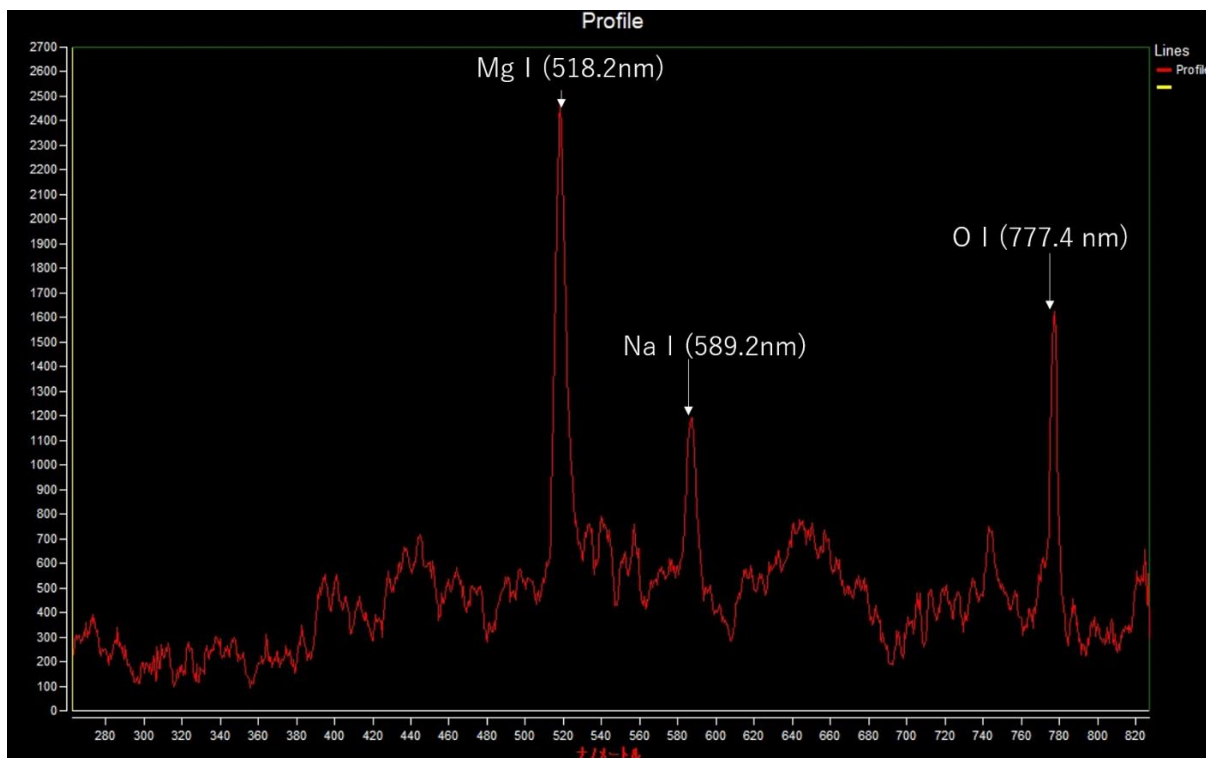


図 2.8 クロップした波長校正後のグラフ 横軸がナノメートルで表示される。

2.2.2 輝線強度補正

記録された流星は黒体放射や使用している光学系の周波数特性により本来の輝線の輝度値で記録されていない。以下に流星スペクトルの輝線強度補正手順について示す。

(1) 周波数特性を求め

2つのカメラでシリウスのスペクトルを撮影し RSpec にて解析を行った。

周波数特性を求める手順を図 2.9 に示す。

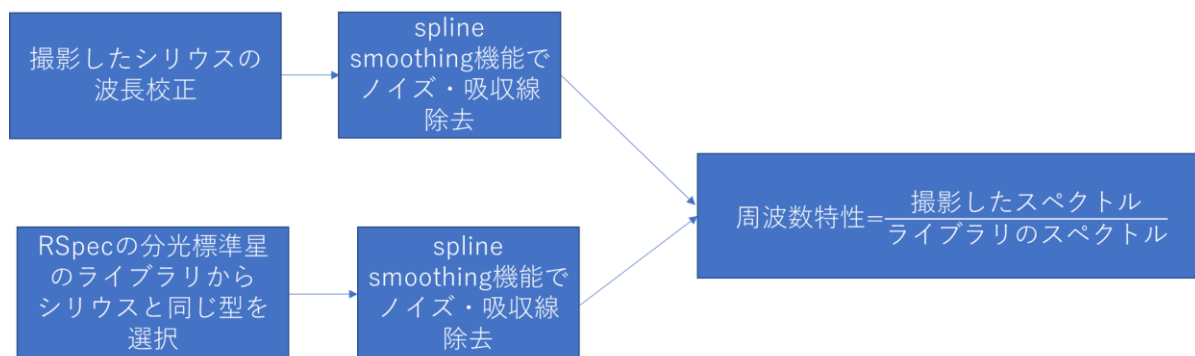


図 2.9 周波数特性を求める手順

(2) 正規分布曲線の重ね合わせにより流星スペクトルの再現

流星スペクトルを周波数特性のグラフで割ることにより補正を行う。ここで、スペクトルは複数の輝線の合成であるため補正された流星スペクトルを 8 つの正規分布曲線 Mg I (518.2 nm)、Fe I (526.9, 532.8, 537.1, 540.4, 543.1, 544.9 nm)、Na I (589.2 nm) の重ね合わせで流星スペクトルを再現する [5]。

正規分布曲線は以下の式で表される[6]。

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

ここで σ は分散、 μ は平均を表している。8つの正規分布曲線の重ね合わせで作ったグラフを図2.10に示す。

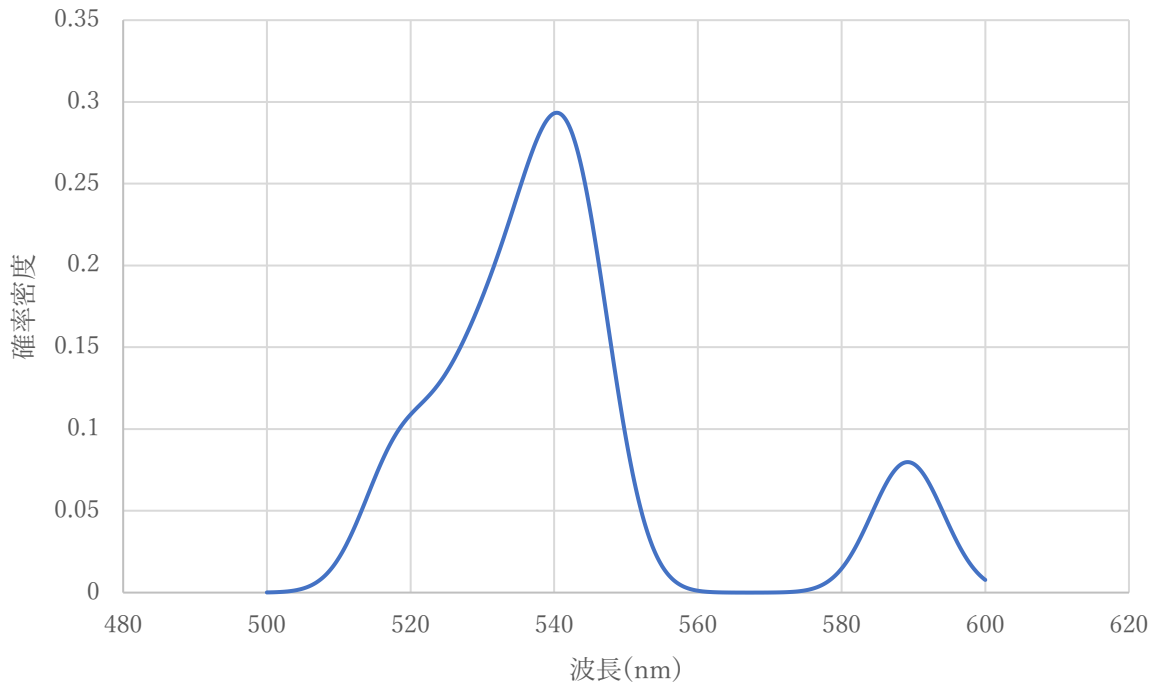


図 2.10 8つの正規分布を重ね合わせた例($\sigma=5$)

それぞれの正規分布に定数を掛けることで高さを、分散を変化させることで幅を変化させ流星スペクトルに合うように調整する。この時、掛けた定数の比をとることで本来の流星スペクトルの輝線強度の比を求めることができる。この比を三角組成図で表す。

第3章 結果

3.1 流星観測結果

流星観測としてふたご座流星群の期間にあたる 2021/12/8~12/16 さらにしぶんぎ座流星群の期間に当たる 12/30~1/5 の日没後から日の出時刻までそれぞれのカメラで観測を行った。ASI183MM カメラは設定ミスで 2021/12/12 の観測データの取得が行えなかった。2つのカメラでの流星スペクトルの比較を行うため、同じ方向(方位 315°、仰角 25°)へ向けて観測を行った。ASI178MM カメラの設定は露光 100 ms、ゲイン 450、ASI183MM の設定は露光 2 s、ゲイン 450 であった。2.1.3 項で記した通り SharpCap には流星を自動検出する機能がついていないため、UFOCapture で流星を記録した時刻から SharpCap が記録した流星画像を探し出す必要がある。表 3.1 に ASI178MM (UFOCapture) カメラで観測された流星の時刻をまとめたリストを示す。

表 3.1 ASI178MM カメラで記録された流星の日時のリスト

日付	時刻	日付	時刻	日付	時刻
2021/12/10	05:10:23	12/14	01:31:30	12/15	01:15:04
	12/11 00:47:43		01:45:28		01:33:46
	12/12 22:01:32		01:50:00		03:25:58
			02:58:12		03:50:08
	12/13 00:15:13		03:07:24		04:12:59
			03:27:38		
			03:38:21		
			05:23:53		
			05:24:27		
			20:15:13		
			22:06:02		

しぶんぎ座流星群の期間の観測では、流星が得られなかった。

ASI183MM カメラでは観測を行えなかった 12/12 の 2 例を除いて表 3.1 のリストと同じ 23 例の流星スペクトルが記録されていた。本研究では、2つのカメラでそれぞれ記録された 5 例の流星(10 枚の画像)の解析を行った。便利のため解析を行った流星画像にそれぞれのカメラに対応した名前を記録された順番に名前を付けた。表 3.2 に時刻と付けた名前の対応を示す。

表 3.2 画像に付けた名前と時刻との対応

記録された日時	ASI178MM	ASI183MM	群判定
2021/12/10 05:10:23	178_1	183_1	散在
2021/12/14 01:31:30	178_2	183_2	ふたご群
2021/12/14 03:07:24	178_3	183_3	ふたご群
2021/12/14 05:23:53	178_4	183_4	散在
2021/12/14 05:24:27	178_5	183_5	ふたご群

解析に用いた流星スペクトル画像を以下の図 3.1～図 3.10 に示す。



図 3.1 178_1 流星は画面下から上に向かって流れた。左側に流星の 0 次光が記録されており右側に 1 次光の輝線スペクトルが確認できる。もっとも明るい輝線スペクトルは O I(777.4 nm) であると考えられる。

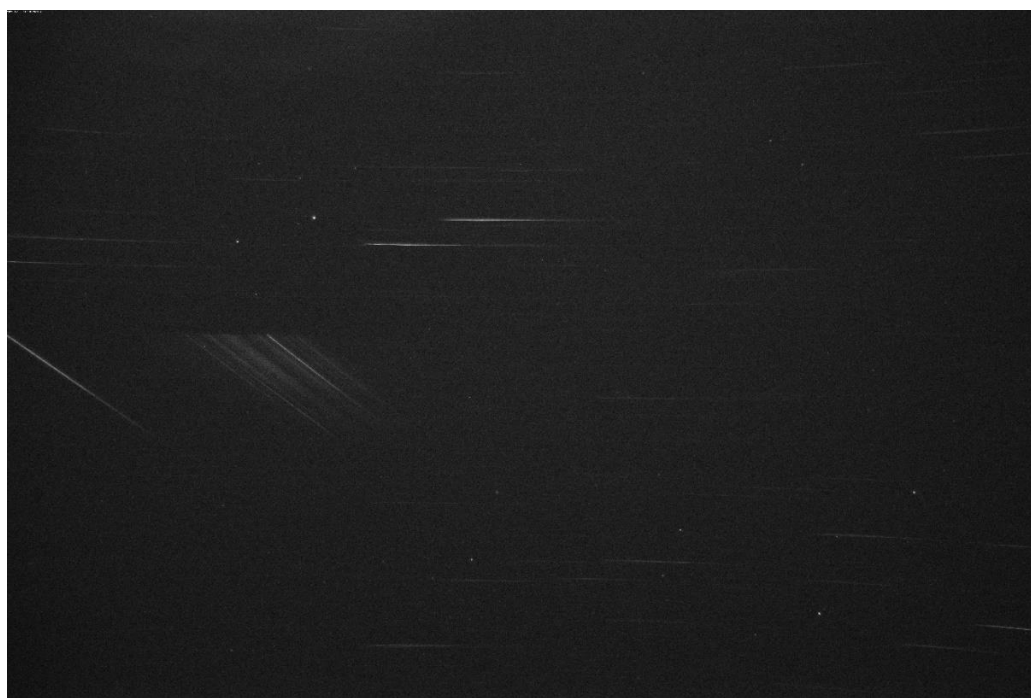


図 3.2 183_1 流星は画面下から上に向かって流れた。画像左端に 0 次光が見られ右側に輝線スペクトルが確認できる。最も明るい輝線スペクトルは O I(777.4 nm) であると考えられる。露光時間が図 3.1 よりも長いので画像全体が明るくなっている。



図 3.3 178_2 流星は画面下から上に向かって流れた。画像左端に 0 次光が見られその右側に 1 次の輝線スペクトルが確認できる。明るい輝線が 3 本確認でき左から Mg I (518.2 nm)、Na I (589.1 nm)、O I (777.4 nm) であると考えられる。



図 3.4 183_2 流星は画面下から上に向かって流れた。画像左に 0 次光が見られその右側に 1 次の輝線スペクトルが確認できる。画面全体が明るくなっており、明るい 3 本の輝線がわかりづらくなっている。



図 3.5 178_3 流星は画面下から上に向かって流れた。画面中央左側に 0 次光が見られ、右側に流星スペクトルの輝線が確認できる。特に明るい輝線は 3 本確認でき左から Mg I (518.2 nm)、Na I (589.1 nm)、O I (777.4 nm) であると考えられる。



図 3.6 183_3 流星は画面下から上に向かって流れた。画面中央左側に 0 次光が見られ、右側に流星スペクトルの輝線が確認できる。露光時間が長いことにより流星スペクトルに重なって恒星の連続スペクトルが記録されている。解析するとき恒星光スペクトルの重なっていない部分を使用するように注意が必要である。



図 3.7 178_4 流星は画面下から上に向かって流れた。画面中央右側に 0 次光が見られ、右側に淡い流星スペクトルの輝線が確認できる。肉眼で確認できる輝線は 2 本で左から Mg I (518.2 nm)、O I (777.4 nm) であると考えられる。



図 3.8 183_4 流星は画面下から上に向かって流れた。画面中央右側に 0 次光が見られ、右側に淡い流星スペクトルの輝線が確認できる。明るい輝線は 2 本で左から Mg I (518.2 nm)、O I (777.4 nm) であると考えられる。

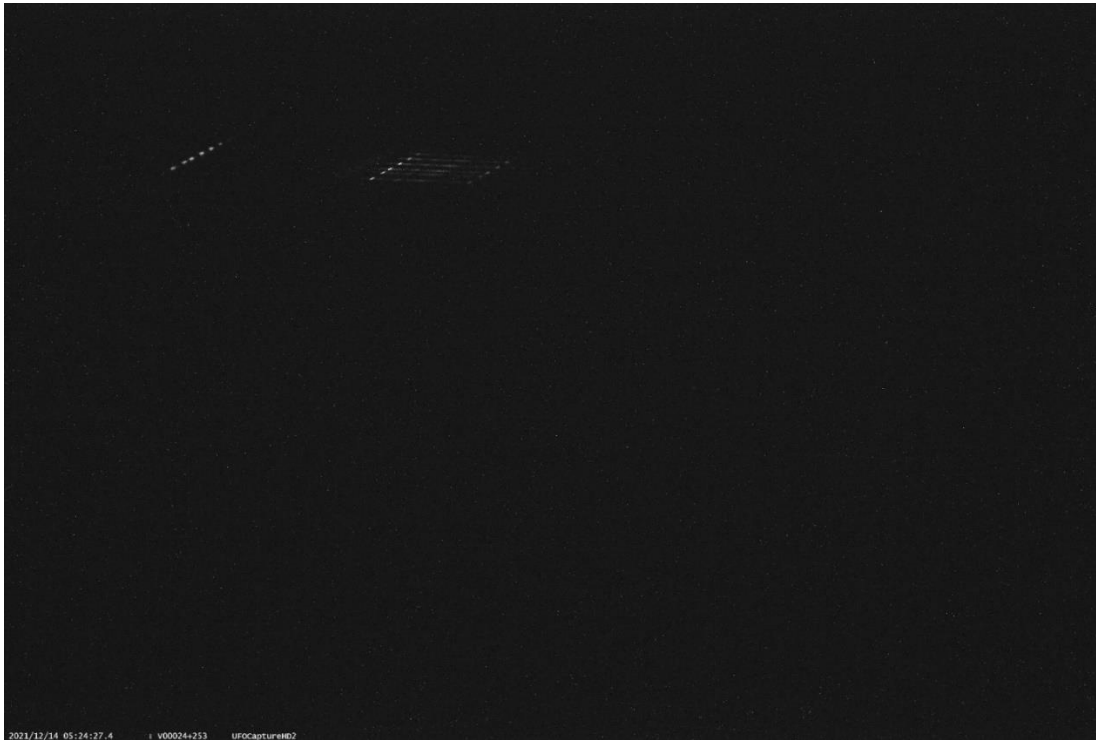


図 3.9 178_5 流星は画面上から下に向かって流れた。画面左側に 0 次光が見られ、右側に淡い流星スペクトルの輝線が確認できる。特に明るい輝線は Mg I (518.2 nm) であると考えられる。



図 3.10 183_5 流星は画面上から下に向かって流れた。画面中央右側に 0 次光が見られ、右側に流星スペクトルの輝線が確認できる。特に明るい輝線は Mg I (518.2 nm) であると考えられる。この流星は流星スペクトルが連続的に見えることがわかる。

3.1.1 波長校正結果

2.2.1 項で記した手順で波長校正を行った。ここでは、178_1 ,183_1 と 178_5 ,183_5 の 2 例の流星(4 つの画像)の波長校正結果の画像を図 3.11~図 3.14 に示す

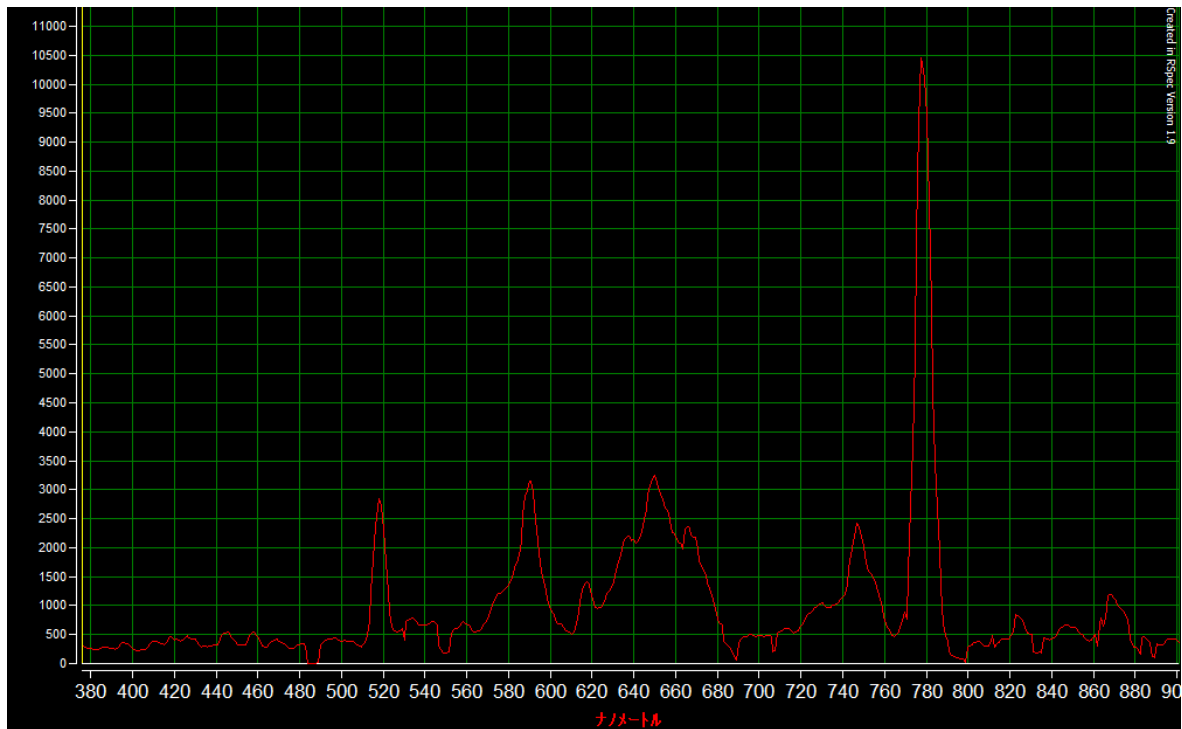


図 3.11 178_1 波長校正結果 Na I (589.2 nm) のピークが 590.4 nm となっており誤差 1.2 nm 程度で波長校正されている。

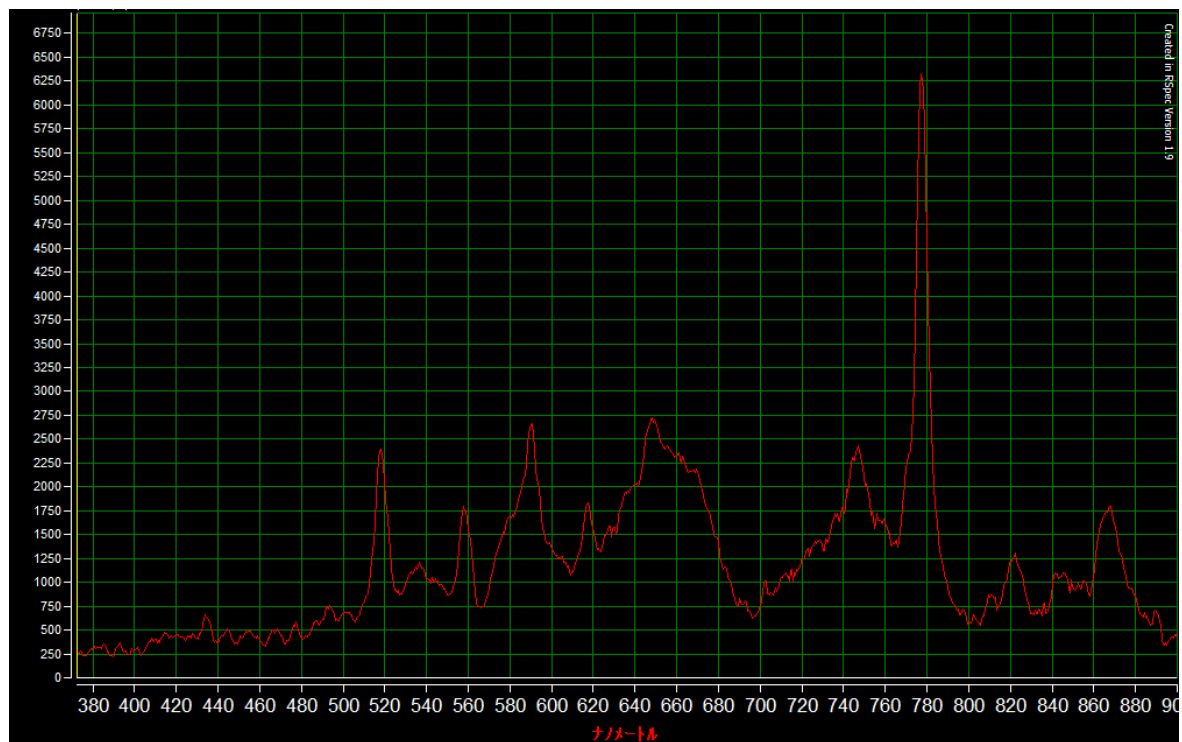


図 3.12 183_1 波長校正結果 波長校正結果 Na I (589.2 nm) のピークが 590.2 nm となっており誤差 1.0 nm 程度で波長校正されている。

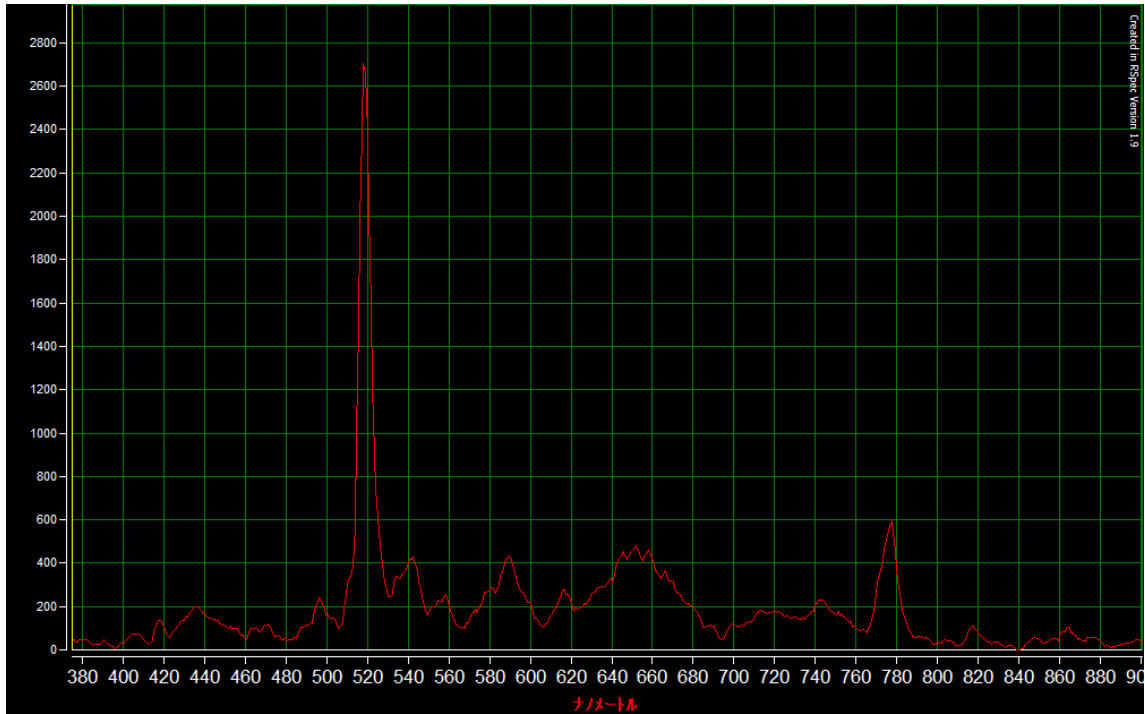


図 3.13 178_5 波長校正結果 波長校正結果 Na I (589.2 nm) のピークが 589.9 nm となっており誤差 0.7 nm 程度で波長校正されている。



図 3.14 183_5 波長校正結果 波長校正結果 Na I (589.2 nm) のピークが 588.3 nm となっており誤差 0.9 nm 程度で波長校正されている。

図 3.11～図 3.14 より、誤差 0.7~1.2 nm で波長校正されており、すべての流星スペクトルが正しく波長校正されていることがわかる。

3.1.2 輝線強度補正結果

2.2.2 項で示した手順で輝線強度補正を行った。

(1)シリウスを用いた周波数特性測定の結果

2022年2月4日20時40分ごろシリウスを2つのシステムでそれぞれ撮影した。ASI178MMカメラで撮影したシリウスのスペクトルを spline smoothing 機能を用いてノイズ除去したグラフを図 3.15 に示す。

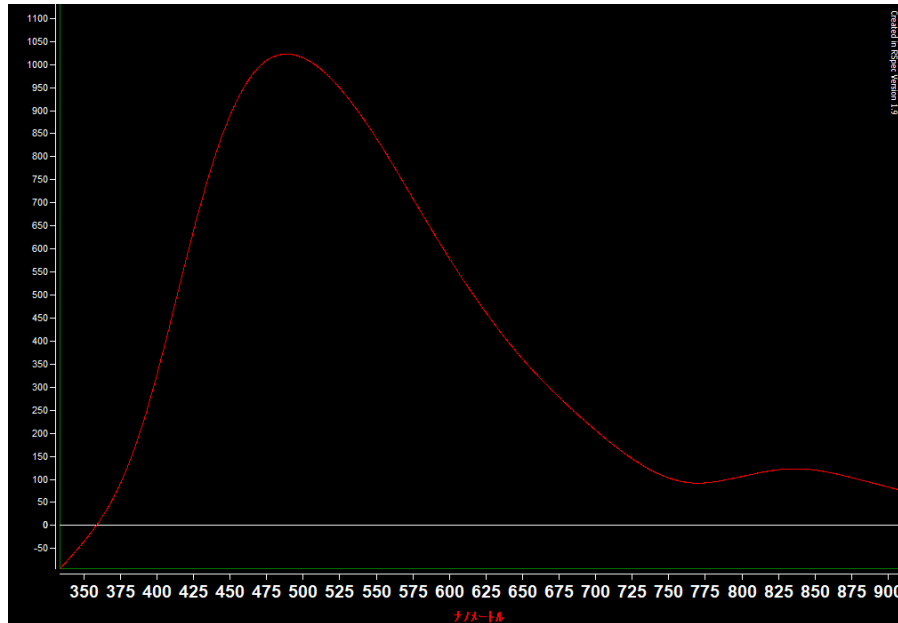


図 3.15 ASI178MM カメラで撮影したシリウスのスペクトル

RSpec に備わっている分光標準星のライブラリからシリウスのスペクトル型である「a0v」を選択し spline smoothing 機能を用いてノイズ除去を行った。図 3.16 にノイズ除去したライブラリのスペクトルを示す。

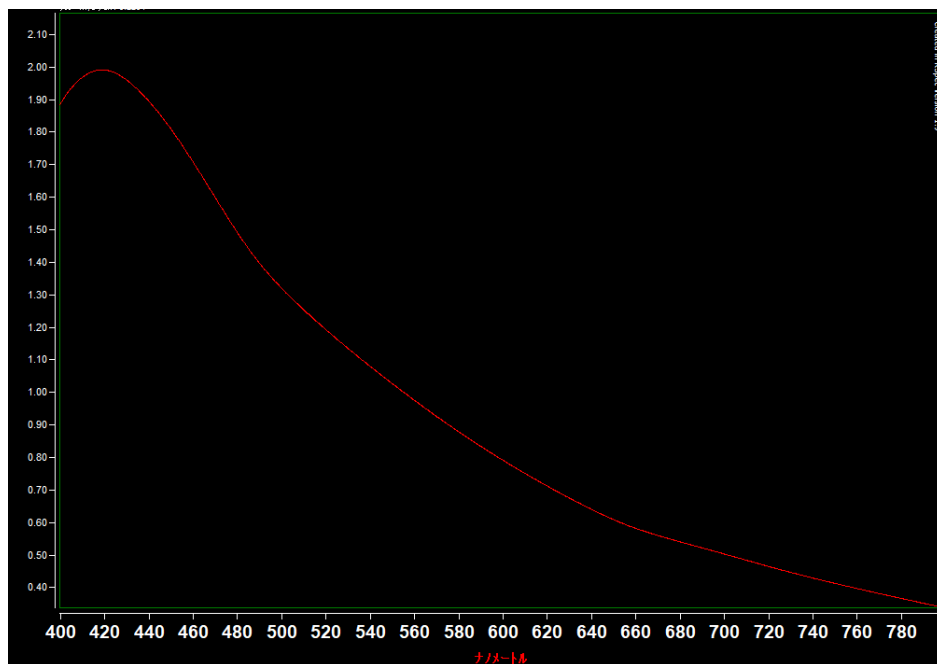


図 3.16 RSpec のライブラリにあるシリウスのスペクトル

周波数特性は図 3.15 のグラフを図 3.16 のグラフで割ることにより求められる。図 3.17 に ASI178MM、ASI183MM のシステムの周波数特性のグラフを示す。

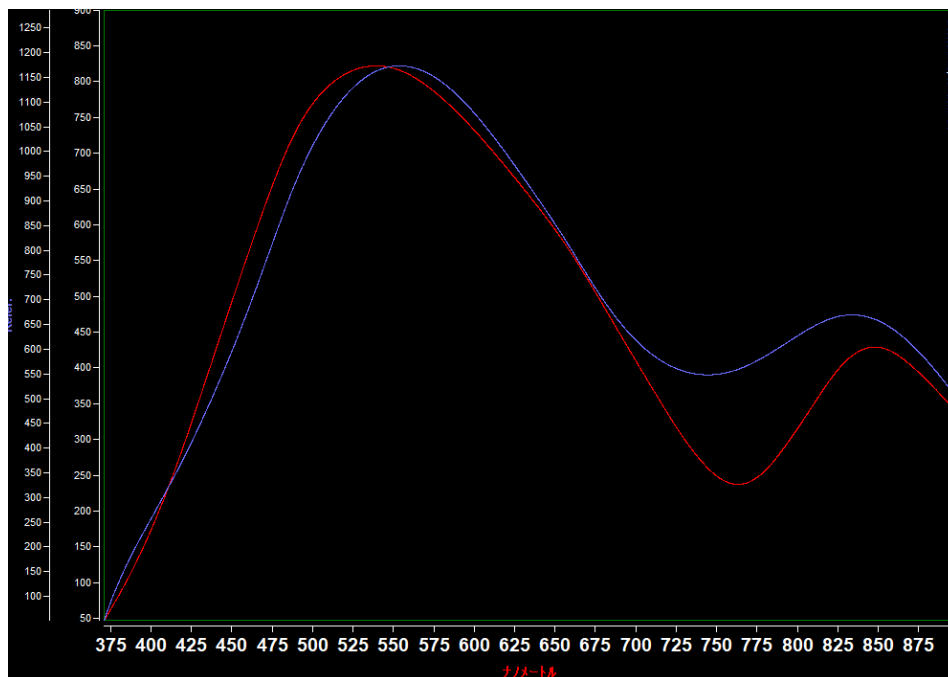


図 3.17 ASI178MM システムの周波数特性 赤線が ASI178MM システムの周波数特性。青線が ASI183 MM システムの周波数特性である。2つのシステムの周波数特性に違いがみられる。

流星スペクトルを求めた周波数特性で補正した結果を図 3.18 に示す。

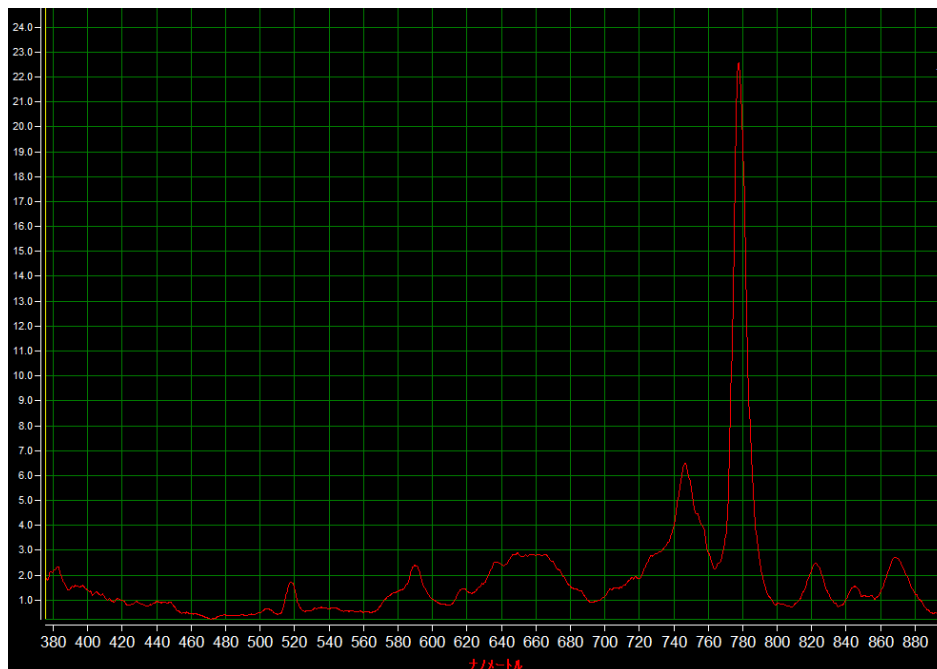


図 3.18 178_1 の流星スペクトルを周波数特性で補正したグラフ

補正前のスペクトル図 3.11 と比較して Mg I(518.2 nm)の強度が Na I(589.2 nm)よりも低くなっていることが確認できる。周波数特性によって実際の流星の明るさの関係とは違った輝度値が記録されていることがわかる。

(2)正規分布曲線の重ね合わせにより流星スペクトルの再現

表 3.3 に流星スペクトル再現する際、正規分布曲線に掛けた定数を示す。

表 3.3 正規分布曲線に掛け合わせた定数 ($\sigma = 3$)

流星画像	Mg I	Fe I						Na I
	518.2 nm	526.9 nm	532.8 nm	537.1 nm	540.4 nm	543.1 nm	544.9 nm	589.2 nm
178_1	13	4	3	3	1	1.9	3	18
178_2	105	15	10	8	8	2	7	54
178_3	98	15	10	8	8	2	7	44
178_4	27	6	3	3	1.1	2	3	10.5
178_5	25	3	2	2	1	1.9	1.5	4
183_1	5.3	1.2	1.2	1	0.9	0.9	1	6.3
183_2	54	15	12	10	8	4	5	29
183_3	26	7	3	4	1	2	3	12
183_4	19	5	3	3	2	1.9	2	8
183_5	21	7	5	3	3	2	3	9

178_1 の流星スペクトルを再現した正規分布曲線の重ね合わせの結果を図 3.19 に示す。

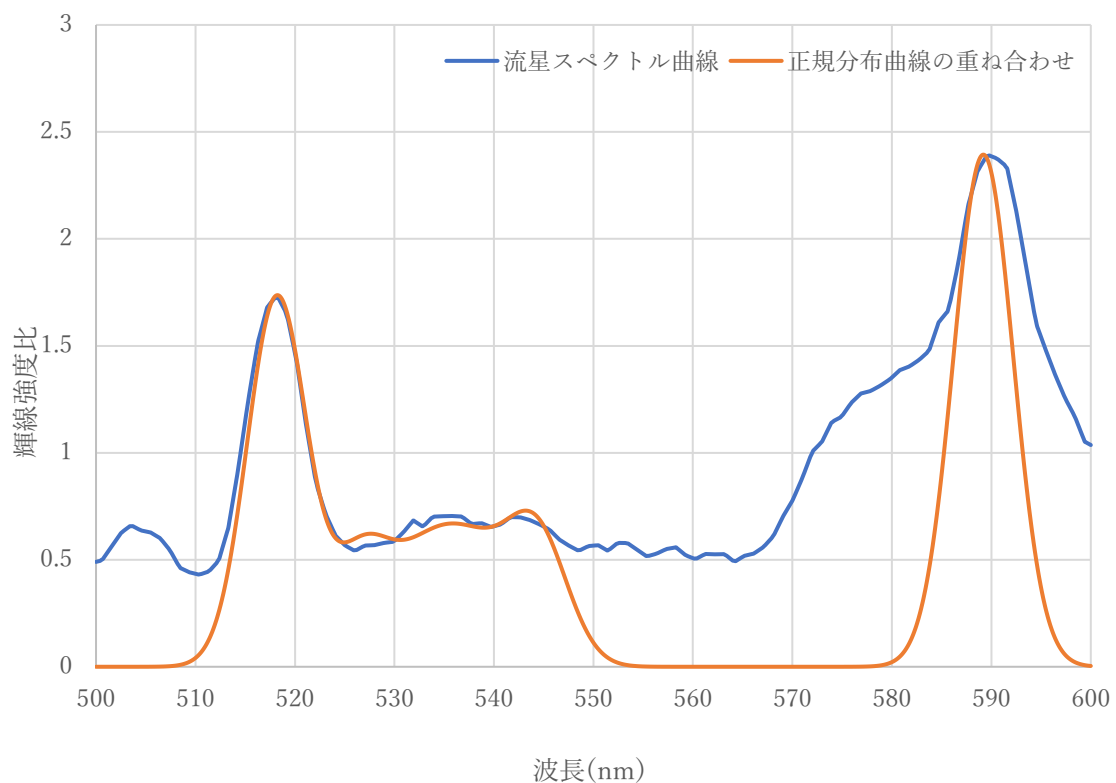


図 3.19 178_1 の流星スペクトルと正規分布曲線の重ね合わせによって再現した輝線強度比のグラフ。518 nm~545 nm, 589 nm の付近で正規分布曲線の重ね合わせによって流星スペクトルが再現されていることがわかる。545 nm から 580 nm 付近の正規分布の重ね合わせのグラフが流

星スペクトルにフィッティングできていないのは、その波長区間の輝線スペクトルの正規分布曲線は本解析に使用されていないからである。

表 3.3 の定数から流星に含まれている Mg I, Fe I, Na I の強度比が求められる。表 3.4 に求めた輝線強度比を示す。

表 3.4 流星に含まれている Mg I, Fe I, Na I の強度比

流星画像	強度比		
	Mg I	Fe I	Na I
178_1	0.277186	0.339019	0.383795
178_2	0.502392	0.239234	0.258373
178_3	0.510417	0.260417	0.229167
178_4	0.485612	0.32554	0.188849
178_5	0.618812	0.282178	0.09901
183_1	0.297753	0.348315	0.353933
183_2	0.394161	0.394161	0.211679
183_3	0.448276	0.344828	0.206897
183_4	0.432802	0.384966	0.182232
183_5	0.396226	0.433962	0.169811

表 3.4 の相対強度比を三角図で表した結果を図 3.20 に示す。

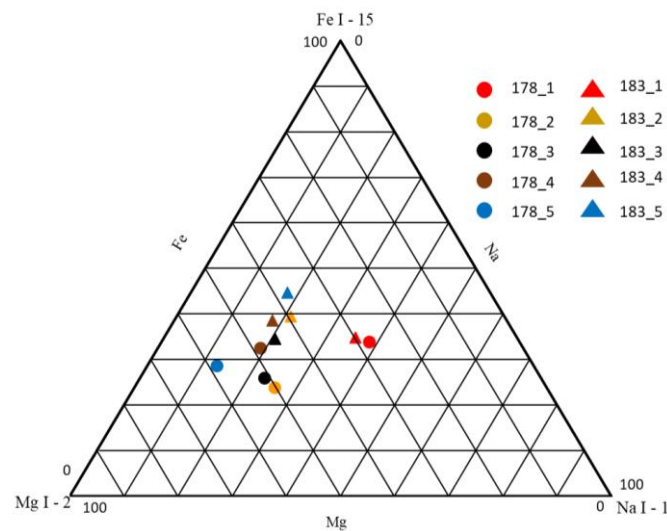


図 3.20 流星に含まれている Mg I, Fe I, Na I の相対強度比。丸で表した点は 178MM のシステムで観測した流星。三角で表した点が 183MM カメラで観測した流星である。さらに同じ色の組みあわせが同じ時刻に得られた流星である。

178_1, 183_1 の 1 例の流星を除く 4 例は Na I の相対比が弱い流星だと分かった。同じ流星を記録しているならば同じ相対強度比になるはずだが、2 つのシステム間で誤差が生じている。

第4章 考察と評価

2つの観測システムの相対強度比の結果について考察する。また、構築した観測システムについて評価を行う。

4.1 誤差原因

三角組成図の結果から、2つのシステムで誤差が生じており、特に Fe 成分の誤差が大きい。そこで、黒体放射の連続光を流星スペクトルから減算し、もう一度解析を行った。図 4.1 に解析結果を示す。

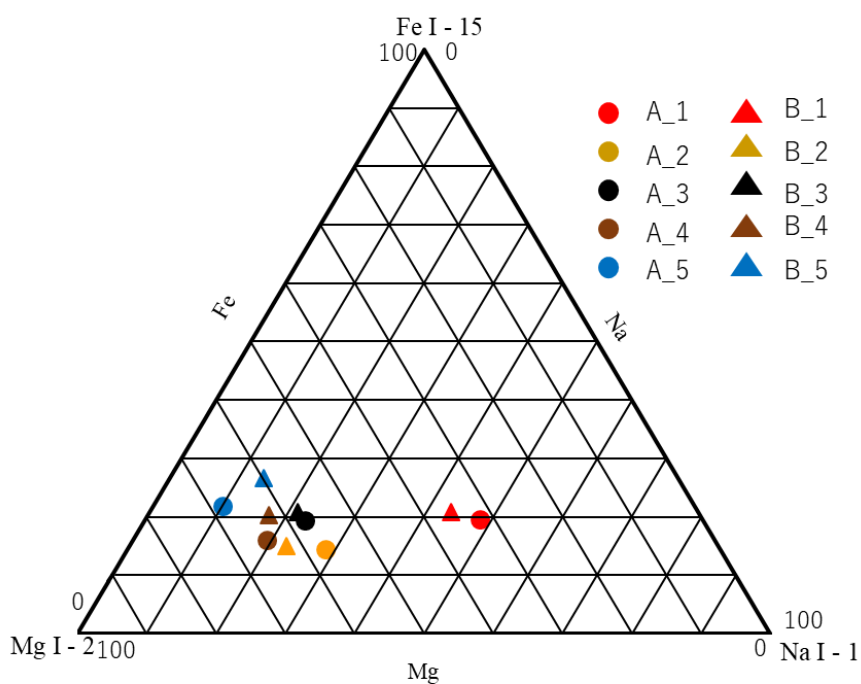


図 4.1 黒体放射を考慮した解析結果

図 4.1 より Fe I 成分の誤差が非常に小さくなったことがわかる。

さらに、ほかの誤差の原因として N_2 大気分子バンドを考慮して補正していないことによるものが考えられる。この補正を行うことにより誤差が小さくなると考えられる。

4.2 ふたご座流星群の相対強度比の特徴比較

Boroviča et al.(2004)に記されているふたご座流星群の相対強度比を図 4.1 に示す[3]。図 4.2 に図 3.20 の相対強度比からふたご座流星群だと考えられる 3 例の点だけを抜き出したものを示す。

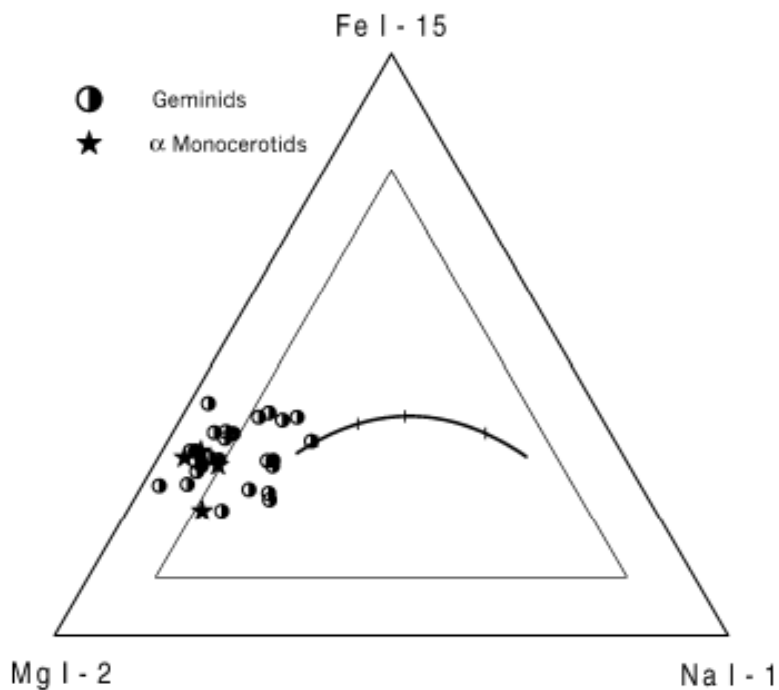


図 4.2 Borovica et al.(2004)によるふたご座流星群の三角組成図 [3]

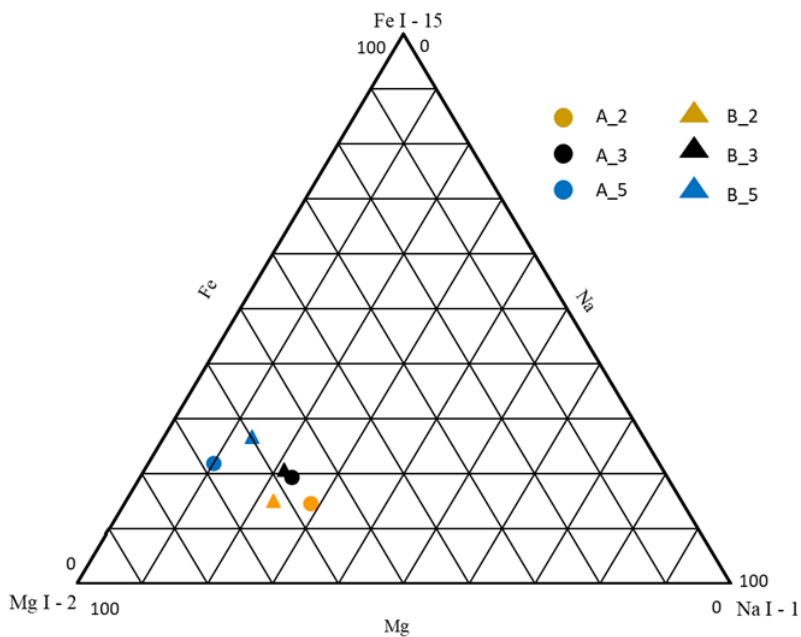


図 4.3 ふたご座流星群と考えられる 3 例の三角組成図 (黒体放射を考慮)

図 4.1、図 4.2 より、3 例だけであるが、いずれも Na I の強度が低い特徴がある。これは、ふたご座流星群の母天体が太陽にかなり近づくような軌道をしておりその過程で揮発性の高い Na I の成分が失われてしまうためである[2]。

4.3 分光観測システム評価

2 つの観測システムで Fe の誤差 5 % 以内、Na, Mg の誤差 10 % 以内で解析を行うことができた。また図 4.2、図 4.3 より従来のシステムとほぼ同等の結果が得られたと考える。

第5章 結論

本研究は、ふたご座流星群、しぶんぎ座流星群の観測を行い、得られた流星スペクトルから Mg I, Fe I, Na I の相対強度比を三角組成図で表すし、構築した流星分光観測システムの評価を行うことを目的とし実施した。ふたご座流星群の期間に構築した2つの流星分光観測システムでそれぞれ20例以上の観測データが得られた。しぶんぎ座流星群の期間に行った観測では流星スペクトルは得られなかった。観測された全25例の流星スペクトルのうち明瞭なスペクトルが得られた計5例の解析を RSpec を用いて行い、システム依存の情報を補正して、Mg I, Fe I, Na I の大まかな相対強度比を求めることができた。さらに、相対強度比を三角組成図で表し、ふたご座流星群の特徴と一致する傾向の結果が得られた。しかし、黒体放射による連続スペクトルや N₂ バンドによる影響を考慮した解析やほかの流星群の観測を行うことが今後の課題となった。これらの結果から二つの分光観測システムの評価を行うことが出来た。

謝辞

本研究を行うにあたり、指導教員である高知工科大学システム工学群 山本真行 教授にはさまざまなご指導をいただき心から感謝申し上げます。また、副査を担当してくださいました高知工科大学 システム工学群 小林弘和 准教授と 田上周路 准教授、同期と後輩の皆様には感謝申し上げます。

参考文献

- [1] ZDENĚK CEPLEHA, JIŘÍ BOROVOČKA, W.GRAHAM ELFORD, DOUGRAS O.REVELLE, ROBERT L.HAWKES, VLADIMÍR PORUBČAN, MILOŠ ŠIMEK, “METEOR PHENOMENA AND BODIES”, Space Science Reviews, 84, 327-471, 1998.
- [2] V. Vojáček, J. Borovička, P. Koten, P. Spurný, R. Štork, “Catalogue of representative meteor spectra”, Astronomy&Astrophysics, 580, A67, 2015.
- [3] J. Borovička, P. Koten, P. Spurný, J.Boček, R. Štork,” A survey of meteor spectra and orbits: evidence for three populations of Na-free meteoroids”, Icarus, 174, 15-30, 2004.
- [4] Sky and Telescope, Getting Started in Astronomical Spectroscopy with RSpec, <https://www.rspecastronomy.com/download/Getting%20Started%20in%20Astronomical%20Spectroscopy%20using%20RSpec.pdf> , 2022 年 2 月参照
- [5] 永井 和男, 流星スペクトル ,オンライン流星物理セミナー, <http://msswg.net/CD/MSS19-spectrum.pdf> 2022 年 2 月参照.
- [6] BellCurve, Excel による正規分布曲線の作り方, <https://bellcurve.jp/statistics/blog/15344.html>, 2021 年 2 月参照.