

小惑星(219) Thusnelda の可視反射率スペクトル：  
美星天文台 101cm 望遠鏡可視分光器を用いた観測

岡山大学大学院 自然科学研究科 地球科学専攻  
41502507 山下美聖

2022/02/10

## 要旨

反射率スペクトルの観測は、遠隔測定によって小惑星表層にある物質に関する情報を取得する手法のひとつである。観測された反射率スペクトルを、実験室で測定した様々な鉱物・岩石の反射率スペクトルと比較することで、小惑星の表層にある物質を推定することができる。本研究では、小惑星の分光観測をおこない、小惑星(219) Thusnelda の反射率スペクトルを推定した。

可視分光観測を 2021 年 10 月 29 日夜に、美星天文台でおこなった。用いた機材は 101cm 望遠鏡とそのフォールデッド・カセグレン焦点に取り付けられた可視分光器である。小惑星の観測に前後して、小惑星の近傍にある G2V 型星(太陽に似たスペクトルを持つ恒星)の観測もおこなった。また、可視分光観測をおこなった G2V 型星については、2021 年 12 月 21 日夜に、岡山大学天文台で測光観測をおこなった。機材は 35cm 望遠鏡と CCD カメラ(SBIG STL-1001E)を用いた。

一次処理(ダーク引き、フラット補正)をおこなった後、分光データは BeSpec を用いてスペクトルの抽出をおこない、測光データは AstroImageJ を用いて開口測光をおこなった。分光データについては、1nm 毎に平均をとって SN 比を向上させた。G2V 型星のスペクトルは、岡山大学天文台でおこなった測光観測の結果を用いて色補正をおこなった。色補正した G2V 型星のスペクトルを用いて、小惑星(219) Thusnelda の反射率スペクトルを求めた。

観測の結果をデータベースと比較し、小惑星(219) Thusnelda の反射率スペクトルを S 型と推定した。G2V 型星の色補正をした場合としない場合を比較することで、反射率スペクトルの観測においては、比較星の選定と色補正が重要であることを示した。

## Abstract

Observation of reflectance spectra is one of the methods to investigate the chemical composition on the asteroid surface. By comparing the observed reflectance spectra with those of various minerals and rocks measured in laboratory, the materials on the asteroid surface can be inferred. We performed spectroscopic observations of an asteroid and estimated the reflectance spectrum of asteroid (219) Thusnelda.

We observed on the night of 29th, October 2021, at Bisei Observatory. The equipment used was a 101cm telescope and a visible spectrograph attached to its folded-Cassegrain focus. We also observed G2V stars located near the asteroid as comparison stars. We also observed the comparison stars by photometry with 35cm telescope and CCD camera (SBIG STL-1001E) at Okayama University Observatory on the night of 21st, December 2021.

After dark subtraction and flat-fielding, spectral data were extracted using the software BeSpec, and aperture photometry was performed with AstroImageJ. The spectra of comparison stars were color-corrected using the results of photometric observations at Okayama University Observatory. The color-corrected spectra of comparison stars were used to obtain the reflectance spectrum of the asteroid (219) Thusnelda.

It is shown that the selection of comparison stars and color correction has a large influence on the estimation of the reflectance spectra.

# 目次

<b>第 1 章 序章</b>	<b>5</b>
1.1 小惑星	5
1.2 反射率スペクトル	5
<b>第 2 章 分光観測</b>	<b>6</b>
2.1 観測地点	6
2.2 観測機材	6
2.3 データ	7
2.4 一次処理	8
2.4.1 ダーク	8
2.4.2 フラット	9
2.5 スペクトルの抽出	9
2.5.1 測光とスカイ引き	9
2.6 波長較正	10
<b>第 3 章 比較星の色補正</b>	<b>15</b>
3.1 比較星のスペクトル	15

---

3.2	比較星の測光観測	15
3.3	補正係数	16
3.4	比較星の色補正	18
<b>第 4 章</b>	<b>反射率</b>	<b>20</b>
4.1	反射率の導出	20
4.2	小惑星(219) Thusnelda の反射率スペクトル	21
4.3	スペクトル型の推定	23
<b>第 5 章</b>	<b>まとめ</b>	<b>27</b>
	<b>謝辞</b>	<b>28</b>
	<b>参考文献</b>	<b>29</b>

# 第 1 章 序章

## 1.1 小惑星

太陽系には惑星よりも小さい天体が多数存在している。小天体は、大きい天体と比較すると早くに冷却するため、太陽系形成時の古い記録を残していると考えられている。また、惑星は微惑星が衝突や合体を繰り返して形成されたと考えられている。惑星となった微惑星は残っていないが、小惑星のなかには微惑星があった年代から存在し、記録を保持しているものが存在している可能性が示唆されている。小惑星を調べることで、太陽系形成時の環境や惑星の材料物質に関する情報を得ることができる可能性がある。

## 1.2 反射率スペクトル

小惑星の反射スペクトルの観測は、遠隔測定で物質に関する情報を取得する手法のひとつである。実験室で測定した、鉱物や隕石といったさまざまな物質の反射率スペクトルと比較することで、小惑星の表層にある物質を推定することができる。

本研究では、小惑星の可視分光観測をおこない、小惑星の反射スペクトルを導出し、小惑星のスペクトル分類をおこなうことができるデータを取得することを目的とした。

## 第 2 章 分光観測

### 2.1 観測地点

分光観測は美星天文台でおこなった。美星天文台は、岡山県井原市美星町大倉(東経 133°32'43, 北緯 34°40'18, 標高 420.m)に位置している。

### 2.2 観測機材

美星天文台にある口径 101cm 反射望遠鏡と、そのフォールデット・カセグレン焦点に取り付けられている可視分光器を用いた。101cm 反射望遠鏡の詳細は表 2.1 に、分光器の詳細は表 2.2 にまとめた。

表 2.1 美星天文台 101cm 反射望遠鏡の仕様

主鏡	1010mm,
F 値	2.8
焦点	カグセレン焦点, フォールデットカグセレン N 焦点, フォールデットカグセレン S 焦点, 成すミス焦点

出典 : <http://www.bao.city.ibara.okayama.jp/koubo/kiki/bunkouki.html>

表 2.2 分光器の仕様

スリットの長さ	25mm(7 分角)
スリットの幅	60 $\mu$ m(1"), 90 $\mu$ m(1.5"), 120 $\mu$ m(2"), 300 $\mu$ m(5"), CCD ティルト調整用, 2mm(35")
スリットビューワー	ST-6 を使用. 視野は 8'×5'
コンパリソン	ホロカソードランプ(Fe,Ne)
フラット光源	ハロゲンランプ
CCD カメラ	ANDOR DU-440BV を使用

出典 : <http://www.bao.city.ibara.okayama.jp/koubo/kiki/bunkouki.html>



図 2.1 口径 101cm の美星天文台の望遠鏡。2021 年 10 月 29 日撮影。

## 2.3 データ

観測は 2021 年 10 月 29 日におこなった。小惑星(219) Thusnelda を 2 回と、小惑星の近傍にあった 2 つの G2V 型星を比較星として 1 回ずつ、計 4 つのスペクトルを取得した(表 2.3)。比較星はどちらも太陽と同じスペクトル型(G2V 型)の星で、後で述べるように、小惑星の反射率を求めるときに使用する(4.1 節)。これら 4 つのスペクトルは同一の設定で取得した(表 2.4)。計画では、(25) Phocaea と(1) Ceres も観測する予定であったが、(25) Phocaea は天の川の星が密集した領域に位置していたため、天体を特定することができず、観測することができなかった。観測計画を立てるときには、美星天文台の可視分光器の視野が狭いこと(8'x5')を考慮して、周囲にある星の密集度が高すぎない領域にある天体を選定するべきであった。また、(1) Ceres については、(25) Phocaea で時間を使ってしまったため、全体の観測時間の割り当てを考慮して、観測しないことにした。望遠鏡の向きによって光学系に生じるひずみが変わる可能性を考慮して、望遠鏡を大きく動かすときは、前後にフラットと比較光を取得した。



表 2.3 2021 年 10 月 29 日の観測記録

対象	露出時間[s]	撮影開始時刻[UT]	エアマス	枚数	備考
ダーク	600			10	
HD19061	600	14:52:22	1.077	1	比較星
比較光	1			1	波長較正
フラット	1			11	
219 Thusnelda	600	17:20:49	1.159	1	
比較光	1			1	波長較正
フラット	1			11	
219 Thusnelda	600	18:03:32	1.254	1	
HD27834	1	18:35:52	1.150	1	比較星
比較光	1			1	
フラット	1			11	
ダーク	1			11	

表 2.4 観測の設定

検出器温度	-70[°C]
スリット幅	300[ $\mu\text{m}$ ]
望遠鏡のフォーカス	13,093
コリメータ	90,000
オーダーカットフィルター	1

## 2.4 一次処理

CCD カメラ で撮影した画像は、ダークと、各素子の感度ムラの補正が必要である。この補正のことを一次処理という。一次処理には FIJI を使用し、その使い方は「天文学入門 2021」のウェブページを参考にした。

### 2.4.1 ダーク

検出器に光が全く入らない状態にして撮像しても、検出器は電子をカウントする。これをダーク(暗電流)という。ダークを補正するため、検出器に光が入らない状態でデータを取得する。これをダー

クフレームと呼ぶ。発生するダークはピクセル毎に異なる。ダークは露出時間に比例し、検出器温度に依存する。ダークフレームは、解析で使用するデータを取得したのと同じ条件(露出時間、検出器温度)で取得する。ダークフレームを複数枚撮像し、各ピクセルについて複数枚の画像の中央値を求め、マスターダークフレームとする。オブジェクトフレームからマスターダークフレームを引き算することで、ダークの影響を除去する。この作業をダーク引きという。

## 2.4.2 フラット

検出器の各素子には感度にムラがあり、同じ明るさの光に対して各素子は異なった応答をする。これを感度ムラという。感度ムラの補正をするために、明るさが一様な対象を撮像した画像(フラットフレーム)を用いる。ピクセルが飽和しない程度の露出時間で、フラットフレームを複数枚撮像する。フラットフレームは、ダーク引きした後、各ピクセルについて複数枚の画像の中央値をとる。全ピクセルの平均値を求め、各ピクセルの値を平均値で割って規格化したものをマスターフラットフレームとする。オブジェクトフレームをマスターフラットフレームで割り算することで、感度ムラは補正される。この作業をフラット割りと呼ぶ。

## 2.5 スペクトルの抽出

分光観測で取得したデータは、分光データ解析ソフト BeSpec(<http://www.bao.city.ibara.okayama.jp/soft/bespec/index.html>)を用いて解析した。スペクトルの抽出は、BeSpec のウェブページにあるチュートリアルに従っておこなった。

### 2.5.1 測光とスカイ引き

図 2.2 は、分光観測で取得した小惑星(219) Thusnelda のスペクトル画像に、一次処理を施した画像である。縦はスリットの空間方向で、横は波長方向である。横方向に伸びる白い線は小惑星(219) Thusnelda の光で、いくつかある縦に伸びる白い線は大気が出している大気光である。

天体の明るさを測定すること測光と呼ぶ。星の他に空も光を出しているため、測光では空の明るさを引く必要がある。これをスカイ引きという。表 2.5 は今回のスペクトル抽出で用いたパラメータである。スキャン幅は、天体の明るさを積算する空間方向の広がりである。今回は各波長について、空間方向に 6 ピクセルの範囲で積算した。スカイの範囲は、スカイ(天体の影響を受けない空)の明るさを評価するのに用いた範囲である。スカイはなるべく天体に近い位置で評価するのがよいが、天体に近すぎると天体からの光の影響を受けてしまう。今回は、スキャンした幅の中心から、両側それぞれに 10 から 20 ピクセル離れた領域でスカイを評価した。

図 2.3 は、スカイ引きをおこなって抽出した小惑星(219) Thusnelda のスペクトルで、縦軸は光の強度、横軸は波長(ピクセル)である。ただし、絶対値の較正はおこなっていないため、波長間での強度の比較をすることはできない

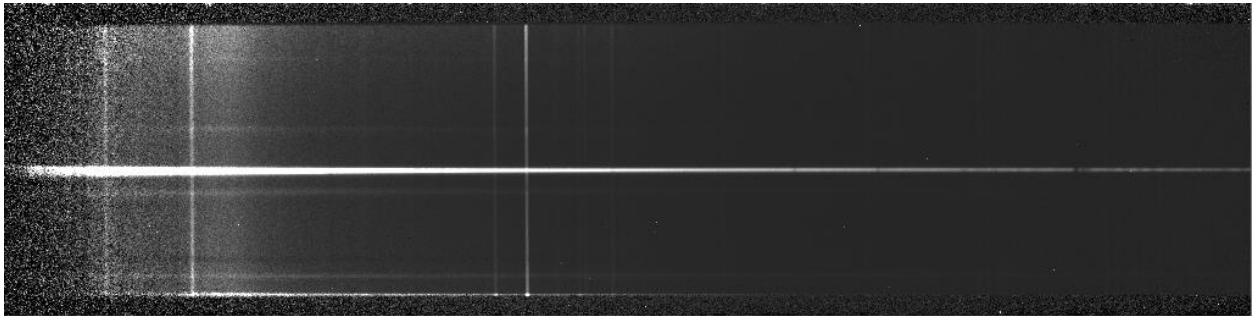


図 2.2 小惑星(219) Thusnelda のスペクトル画像

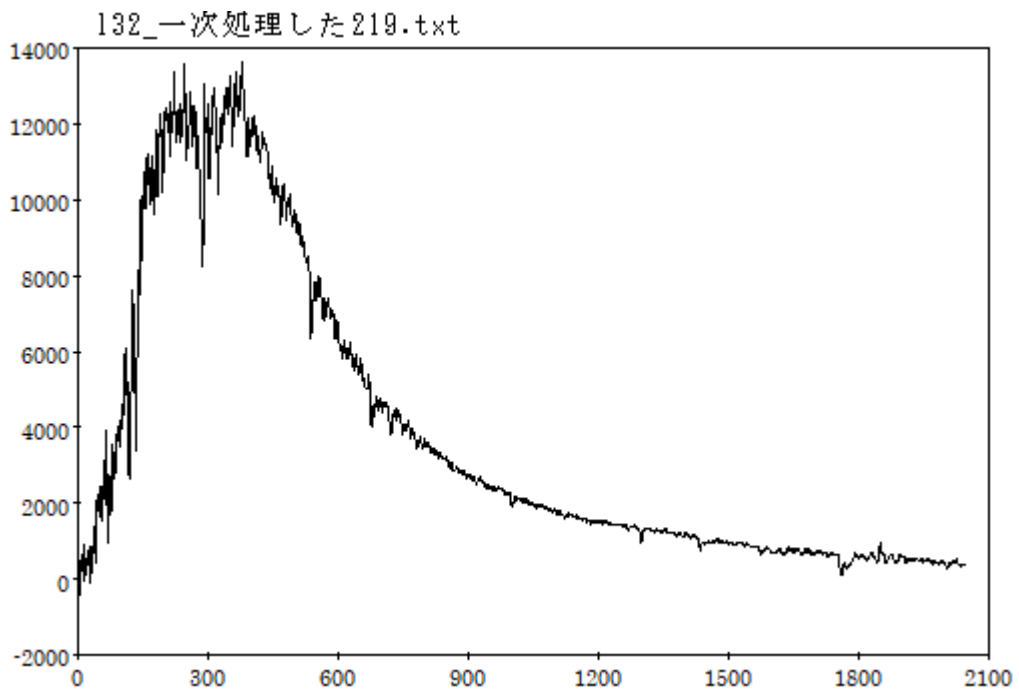


図 2.3 小惑星(219) Thusnelda のスペクトル

表 2.5 測光とスカイ引きで使用したパラメータ

スキャン幅[pix]	スカイの範囲(負)[pix]	スカイの範囲(正)[pix]
6	-20~-10	+10~+20

## 2.6 波長較正

抽出したスペクトル(図 2.3)を波長と対応させるため、ホロカソードランプ(Fe, Ne)を光源として撮像したものを用いて、ラインの同定をおこなった。ランプ(比較光)を撮像したフレームは、一次処理をおこなってから、オブジェクトフレームでスペクトルを抽出したのと同じ位置でスペクトルを抽出し、美星天文台の 101cm 望遠鏡 分光器 鉄・ネオン 波長チャート (<https://www.bao.city.ibara.okayama.jp/wp-content/uploads/2020/01/fenechartlow0504.pdf>) の FeNe Chart 5500A - 8000A のグラフと対比することで、10 本のラインを同定した(表 2.6)

ラインの同定によって、10 箇所のピクセルについて波長を対応させることができたので、それらを用いて波長とピクセルの関係を表す 1 次式

$$\lambda = a_0 + a_1x$$

を決定した(図 2.4)。ここで、 $\lambda$ は波長、 $x$  はピクセルの位置である。小惑星と比較星を観測して得たスペクトルは、同じ望遠鏡の向きで取得した比較光から作成した波長のピクセルの関係式を用いて、波長較正をおこなった(図 2.5-8)。

表 2.6 同定されたライン

波長[Å]	ピクセル
5852.49	980
5944.83	1024
6143.06	1113
6334.43	1198
6402.25	1228
6506.53	1275
6678.28	1351
6929.47	1462
7032.41	1508
7245.17	1602

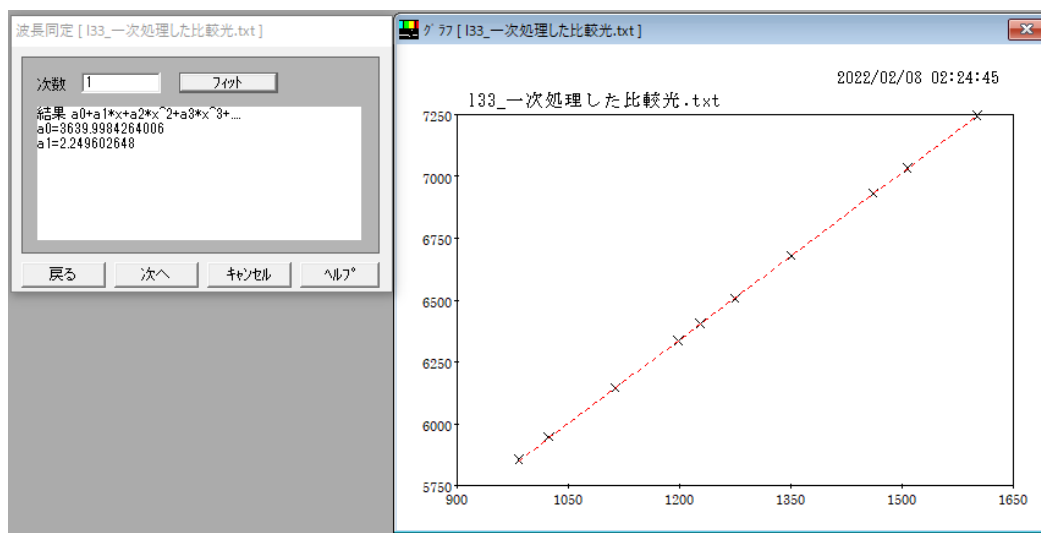


図 2.4 波長とピクセルの関係式

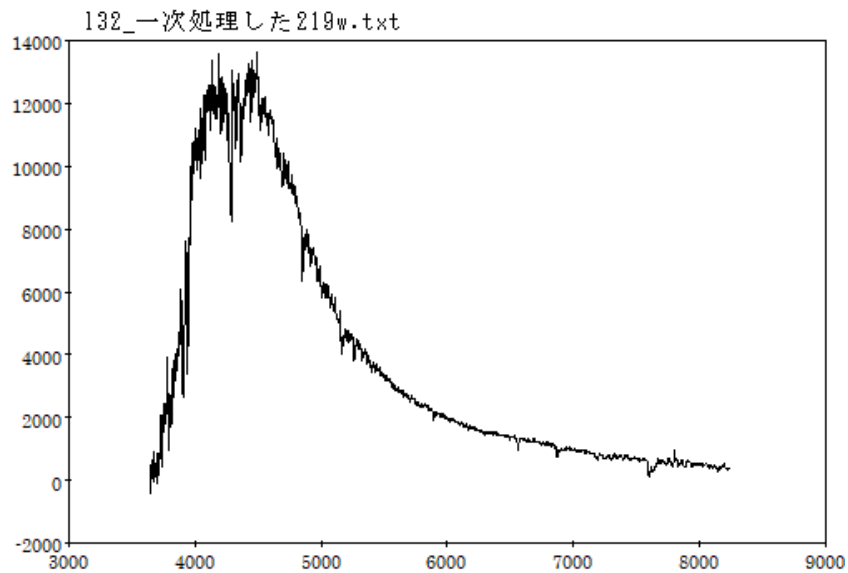


図 2.5 波長較正後の小惑星(219) Thusnelda のスペクトル。  
縦軸は光の強度(絶対値の較正はしていないため、波長間の強度比較はできない)、横軸は波長(オングストローム)。

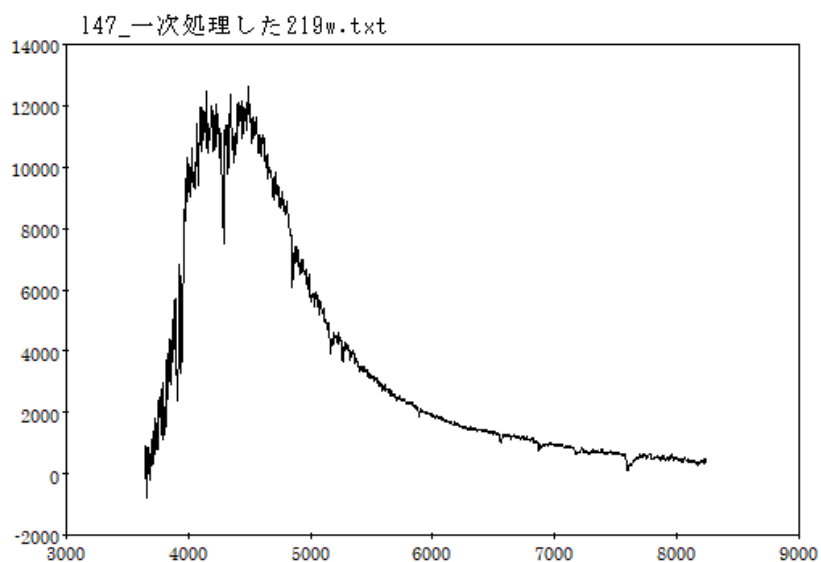


図 2.6 波長較正後の小惑星(219) Thusnelda のスペクトル。  
縦軸は光の強度(絶対値の較正はしていないため、波長間の強度比較はできない)、横軸は波長(オングストローム)。

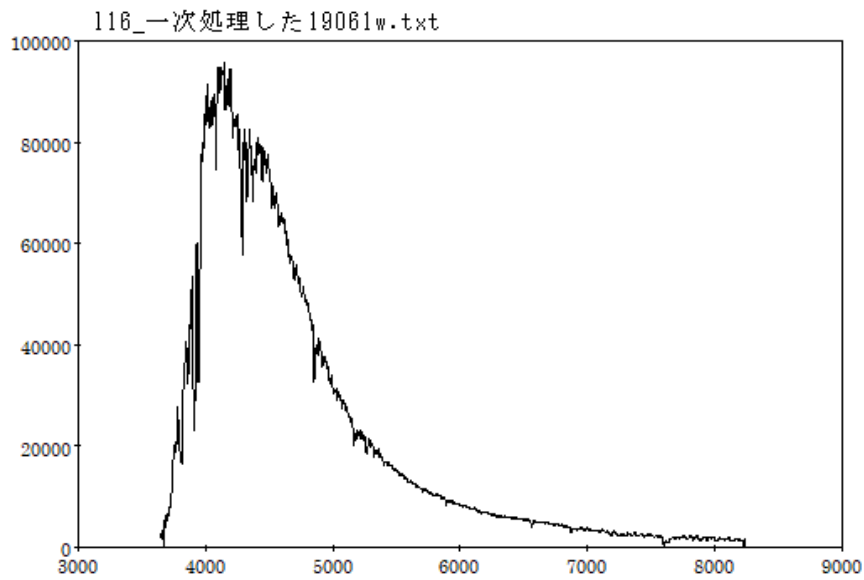


図 2.7 波長較正後の比較星 HD19061 のスペクトル. 縦軸は光の強度(絶対値の較正はしていないため, 波長間の強度比較はできない), 横軸は波長(オングストローム).

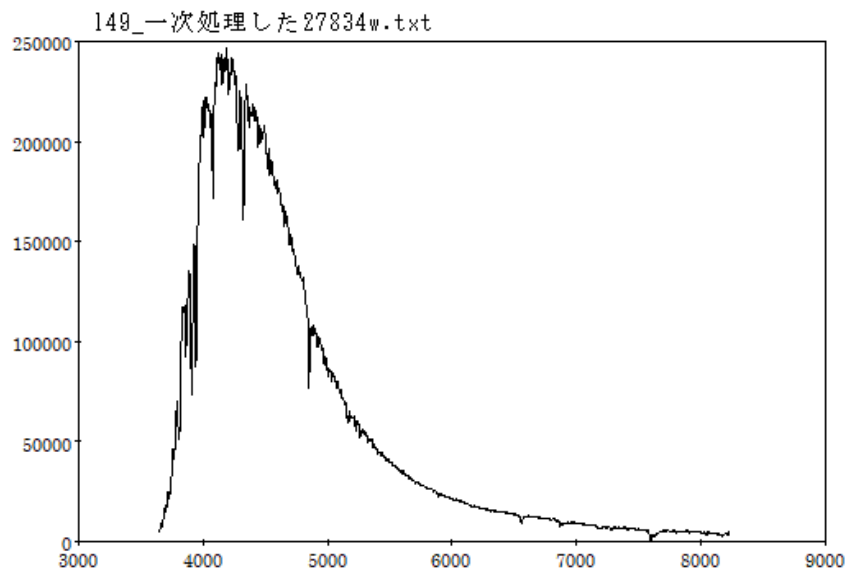


図 2.8 波長較正後の比較星 HD27834 のスペクトル. 縦軸は光の強度(絶対値の較正はしていないため, 波長間の強度比較はできない), 横軸は波長(オングストローム).

## 第3章 比較星の色補正

### 3.1 比較星のスペクトル

図 3.1 は、観測した 2 つの比較星のスペクトルの比をとったものである。今回観測した 2 つの比較星はどちらも G2V 型星であったが、スペクトルは平らになっておらず、色は同じでないことがわかる。小惑星の反射率を求めるためには、太陽と同じスペクトルが必要となるが、ここで示されたように、G2V 型星であってもそのスペクトルには多少の差異が見られ、比較星のスペクトルをそのまま太陽のスペクトルとみなすことはできない。

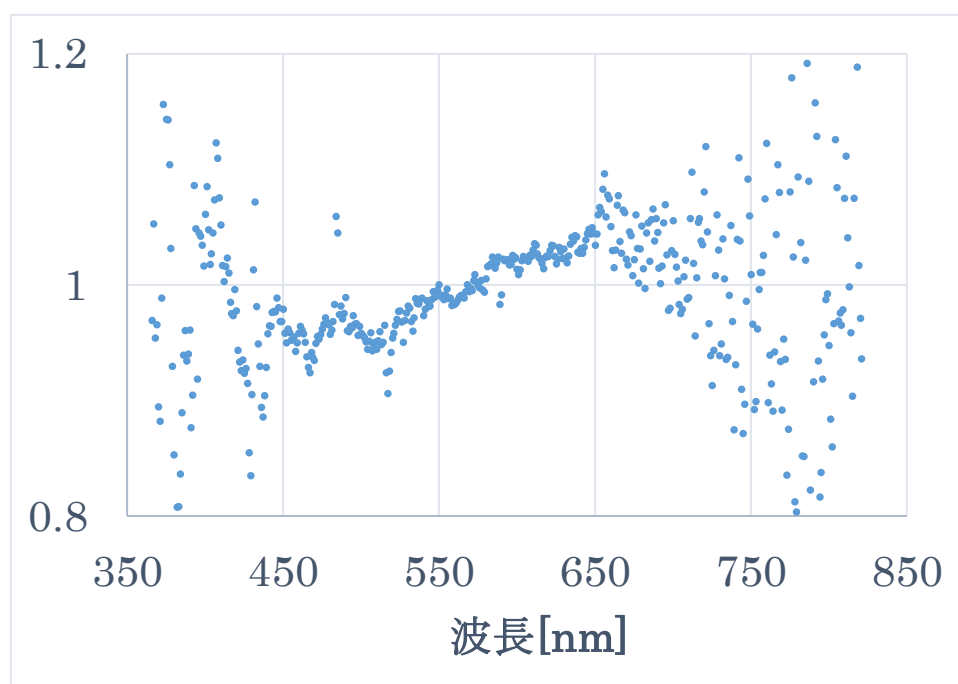


図 3.1 2 つの比較星のスペクトルの比。横軸は波長，縦軸は HD19061 を HD27834 で割った値(波長 550nm の値で規格化した)。

### 3.2 比較星の測光観測

比較星の色を補正するため、2021 年 12 月 21 日に、岡山大学天文台で、35cm 望遠鏡と CCD カメラ (SBIG STL-1001E) を用いて、B,V,R,I バンドの測光観測をおこなった。表 3.1 に示した値のうち、HD19061 と HD27834 は測光観測によって得られた結果を示し、Sun は Ramirez et al. (2012) が太陽の値としたものを引用した。本研究は表 3.1 の値を用いて、比較星の色補正をおこなった。



表 3.1 測光観測の結果

観測対象	B-V	V-R	R-I	備考
HD19061	0.609	0.332	0.363	測光結果
HD27834	0.445	0.275	0.219	測光結果
Sun	0.653	0.352	0.350	Ramirez et al. (2012)

### 3.3 補正係数

B, V, R, I を等級とすると、それぞれはカウント値  $C_i$  と以下の関係にある。

$$B = -2.5 \log (C_B/C_{B0})$$

$$V = -2.5 \log (C_V/C_{V0})$$

ここで  $C_{B0}$  と  $C_{V0}$  はそれぞれ 0 等級の星のカウント値である。このとき、

$$\begin{aligned} B - V &= \{-2.5 \log (C_B/C_{B0})\} - \{-2.5 \log (C_V / C_{V0})\} \\ &= -2.5 \log (C_B/C_V) + 2.5 \log (C_{B0}/C_{V0}) \end{aligned}$$

太陽は添字に  $\odot$  を付けて表すことにすると、

$$B_{\odot} - V_{\odot} = -2.5 \log (C_{B\odot}/C_{V\odot}) + 2.5 \log (C_{B0}/C_{V0})$$

観測した比較星のカウント値  $C_B/C_V$  に係数  $X_{B-V}$  を掛け算することで、観測した比較星の  $B - V$  を太陽の  $B_{\odot} - V_{\odot}$  に合わせることにすると、

$$(C_B/C_V) X_{B-V} = (C_{B\odot}/C_{V\odot})$$

より、

$$X_{B-V} = (C_{B\odot}/C_{V\odot}) / (C_B/C_V)$$

$$= 10^{-\{(B_{\odot}-V_{\odot})-(B-V)\}/2.5}$$

波長  $\lambda$  における補正の係数  $X$  は、B バンドと V バンドの中心波長をそれぞれ  $\lambda_B$  と  $\lambda_V$  とすると、

$$X(\lambda) = \frac{(\lambda - \lambda_B) + X_{B-V}(\lambda_V - \lambda)}{\lambda_V - \lambda_B}$$

同様にして、V-R を使って V バンドと R バンドの間にある波長のカウント値を補正するならば、

$$(C_R/C_V) X_{V-R} = (C_{R\odot}/C_{V\odot})$$

として、

$$\begin{aligned} X_{V-R} &= (C_{R\odot}/C_{V\odot}) / (C_R/C_V) \\ &= 10^{-\{(R_{\odot}-V_{\odot})-(R-V)\}/2.5} \\ &= 10^{\{(V_{\odot}-R_{\odot})-(V-R)\}/2.5} \end{aligned}$$

R バンドの中心波長を  $\lambda_R$  とすると

$$X(\lambda) = \frac{(\lambda_R - \lambda) + X_{V-R}(\lambda - \lambda_V)}{\lambda_R - \lambda_V}$$

R-I を使って R バンドと I バンドの間にある波長のカウント値を補正をする場合は、

$$(C_I/C_R) X_{R-I} = (C_{I\odot}/C_{R\odot})$$

として、

$$\begin{aligned} X_{R-I} &= (C_{I\odot}/C_{R\odot}) / (C_I/C_R) \\ &= 10^{-\{(I_{\odot}-R_{\odot})-(I-R)\}/2.5} \end{aligned}$$

$$= 10^{(R_{\odot} - I_{\odot}) - (R - I) / 2.5}$$

この係数  $X_{R-I}$  は、I バンドのカウント値を R バンドのカウント値に合わせるように補正する。R バンドと I バンドの間にある波長のカウント値を、V バンドのカウント値に合わせるように補正係数は、I バンドの中心波長を  $\lambda_I$  として

$$X(\lambda) = \frac{(\lambda_I - \lambda) + X_{R-I}(\lambda - \lambda_R)}{\lambda_I - \lambda_R} X_{V-R}$$

で与えられる。

以上より、表 3.1 の値を用いて求めた補正係数を表 3.2 に示す。この補正係数と各バンドの中心波長(表 3.3)を用いることで、可視光の波長域における補正係数を求めた。

表 3.2 補正係数

観測対象	$X_{B-V}$	$X_{V-R}$	$X_{R-I}$
HD19061	0.609	0.332	0.363
HD27834	0.653	0.352	0.350

表 3.3 各バンドの中心波長

フィルター	中心波長[ $\mu\text{m}$ ]
U	0.3618
B	0.4410
V	0.5524
R	0.6612
I	0.8047

出典：Willmer (2018)

### 3.4 比較星の色補正

比較星の色補正をおこなった結果を図 3.2 に示す。450-650nm の波長範囲において、2つの比較星の比は平らになっており、よく補正できていることがわかる。450nm より短波長側は平らになっているとは言えず、色補正が十分になされているとは言えない。これは、今回測光したのは B バンド(中心波長 441.0nm)までで、それより短波長側の補正係数は B バンドの補正係数を外挿したこと

## 小惑星(219)Thusnelda の可視反射率スペクトル

に問題があったのかもしれない。650nm より長波長側についても比較光の比は平らになっておらず、ここも色補正は十分とは言えない。長波長側は I バンド(中心波長 804.7nm)の測光観測をしているのだが、I バンドは暗いため、測光の精度が十分でなかったのかもしれない。

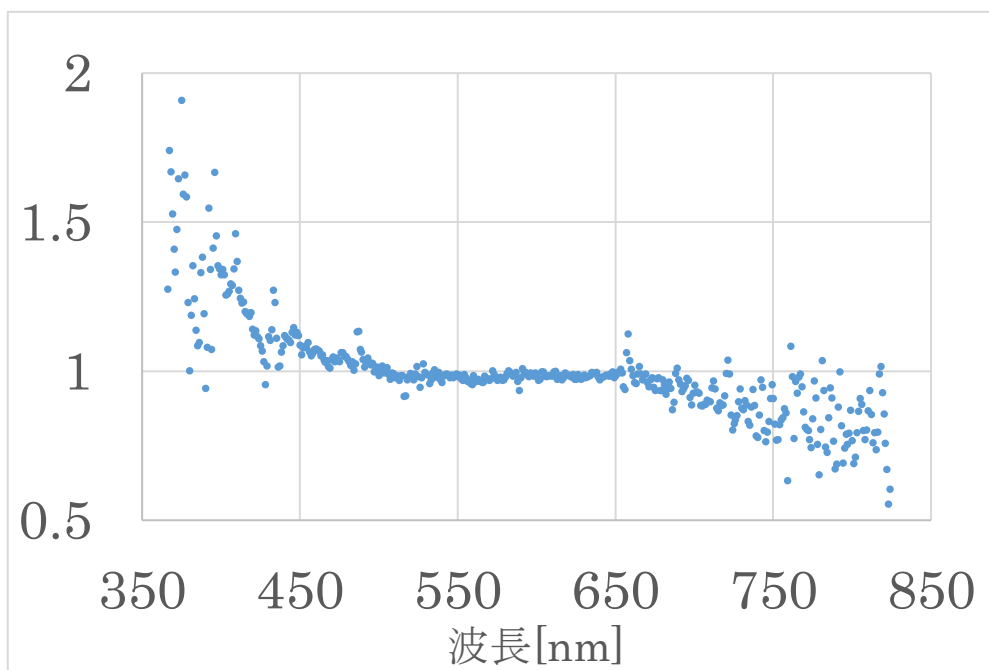


図 3.2 色補正後の比較星の比。横軸は波長，縦軸は HD19061 を HD27834 で割った値(波長 550nm の値で規格化した)

## 第4章 反射率

比較星の色補正をおこなった後、小惑星と比較星のスペクトルから小惑星の反射率スペクトルを求めた。

### 4.1 反射率の導出

反射率  $r$  は、小惑星に入射する太陽の光を  $I_{\odot}$ 、小惑星が反射する光を  $I_a$  とすると、波長  $\lambda$  での反射率は

$$r(\lambda) = \frac{I_a(\lambda)}{I_{\odot}(\lambda)}$$

反射率スペクトルの形だけを考えることにして、ある波長  $\lambda_0$  の反射率で規格化した反射率  $R_0$  は

$$R_0 = \frac{r(\lambda)}{r(\lambda_0)}$$

地上で観測される小惑星の光  $i_a$  は、小惑星が反射した光  $I_a$  と次の関係にある

$$i_a(\lambda) = I_a(\lambda) \cdot d^{-2} \cdot t_a(\lambda) \cdot f(\lambda)$$

$d$  は地球と小惑星の距離、 $t_a$  は小惑星観測時と大気透過率、 $f$  は装置関数である。同様に、地上で観測される比較星の光  $i_s$  は、

$$i_s(\lambda) = S_s(\lambda) \cdot t_a(\lambda) \cdot f(\lambda)$$

$S_s$  は比較星のスペクトル、 $t_a$  は比較星観測時の大気透過率である。規格化した反射率  $R_0$  は、

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{r(\lambda)}{r(\lambda_0)} = \frac{I_a(\lambda)/I_{\odot}(\lambda)}{I_a(\lambda_0)/I_{\odot}(\lambda_0)} \\ &= \frac{i_a(\lambda)/i_a(\lambda_0)}{i_s(\lambda)/i_s(\lambda_0)} \cdot \frac{t_s(\lambda)/t_s(\lambda_0)}{t_a(\lambda)/t_a(\lambda_0)} \cdot \frac{S_s(\lambda)/S_s(\lambda_0)}{S_{\odot}(\lambda)/S_{\odot}(\lambda_0)} \end{aligned}$$

小惑星の近傍にある比較星を観測することで、小惑星と比較星の大気透過率を同じとみなせるなら

$$t_a \approx t_s$$

色補正をしたことで、比較星のスペクトルは太陽のスペクトルとほぼ同等になったとすると、

$$S_s/S_\odot \sim \text{const.}$$

このとき、規格化した反射率 $R_0$ は、観測した量を用いて以下で求めることができる

$$R_0 = \frac{i_a(\lambda)/i_a(\lambda_0)}{i_s(\lambda)/i_s(\lambda_0)}$$

## 4.2 小惑星(219) Thusnelda の反射率スペクトル

図 4.1 は比較星の色補正をおこなわずに求めた小惑星(219) Thusnelda の反射率スペクトル、図 4.2 は比較星の色補正をして求めた小惑星(219) Thusnelda の反射率スペクトルである。反射率を求めるには、小惑星の観測と比較星の観測を組み合わせる必要がある。今回は、小惑星(219) Thusnelda を 2 回と、2 つの比較星を 1 回ずつ観測しているため、4 通りの組み合わせで反射率を導くことができる。図には、4 通りの組み合わせで求めた反射率スペクトルを示し、Lazzaro et al. (2004)の結果と比較した。比較星の色補正をしていないとき、本研究で得られた反射率スペクトルの傾きは、Lazzaro et al. (2004)の結果とは明らかに異なる(図 4.1)。一方、比較星を色補正して得られた反射率スペクトルの傾きは、Lzaaro et al. (2004)とほぼ同じものとなった(図 4.2)。小惑星は自転している面によって組成が異なっている可能性もあるため、Lazzaro et al. (2004)の結果と一致したので正しいとは言えないが、Lazzaro et al. (2004)の結果と同等のスペクトルが得られたことは、色補正によってスペクトルを精度よく決定できた可能性を示唆していると考えられる。

本研究は反射率スペクトルを 4 通りの組み合わせで求めているが、比較星の色補正をして求めた 4 つの反射率スペクトルは、波長 450-650nm の範囲でよく一致している。このことは、この波長範囲で比較星の色補正が機能したことを示している。一方で、短波長側(450nm 以下)と長波長側(650nm 以上)では、組み合わせによって得られる反射率にばらつきが見られる。反射率がばらついている波長で見ると、同じ比較星を使って異なる小惑星のデータから求めた反射率(青と薄青、橙と黄)は似たような反射率を示すのに対し、異なる比較星を使って同じ小惑星のデータから求めた反射率(青と橙、薄青と黄)は異なる反射率を示している。このことより、ばらつきの原因は比較星にあつて、小惑星にないことが示唆される。2 回測定した小惑星の分光スペクトルのどちらを使ってもほぼ同じ反射率スペクトルが得られたことから、今回おこなった分光観測の精度は小惑星の反射率スペクトルを

### 小惑星(219)Thusnelda の可視反射率スペクトル

求めるのに十分な精度があったと結論することができる。一方で、比較星の選択によって得られる反射率スペクトルに差が出たことは、比較星の分光スペクトルが十分な精度で得られなかったことを示している。小惑星の反射スペクトルを決定するにあたっては、比較星の選定とその色補正が重要であることが示唆される。

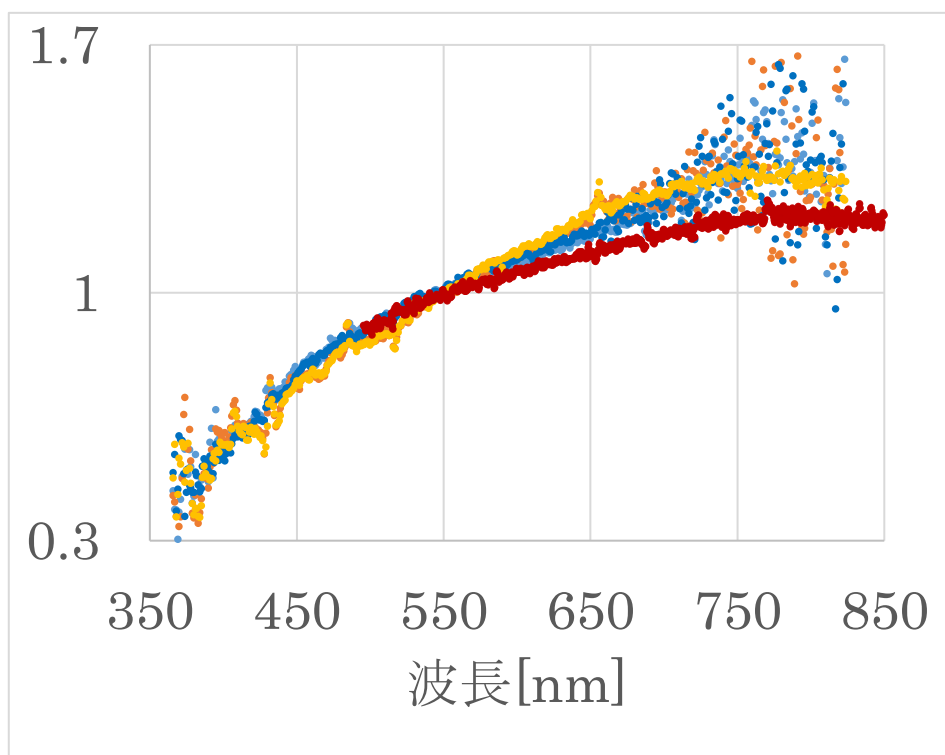


図 4.1 Thusnelda の反射率スペクトル(比較星の色補正なし). 横軸は波長[nm], 縦軸は 550[nm]の値で規格化した反射率である. 青, 薄青, 橙, 黄は本研究の結果で, それぞれ反射率スペクトルを求めるときに用いたデータが異なり, 青:小惑星 1 回目と比較星 HD19061, 薄青:小惑星 2 回目と比較星 HD27834, 橙:小惑星 1 回目と比較星 HD19061, 黄:小惑星 2 回目と比較星 HD27834, である. 赤は Lazzaro et al.(2004)による結果. その数値データは [https://sbnarchive.psi.edu/pds3/non\\_mission/EAR\\_A\\_I0052\\_8\\_S3OS2\\_V1\\_0/data/n00166\\_n00307/00219\\_thusnelda.tab](https://sbnarchive.psi.edu/pds3/non_mission/EAR_A_I0052_8_S3OS2_V1_0/data/n00166_n00307/00219_thusnelda.tab) にあるものを用いた.

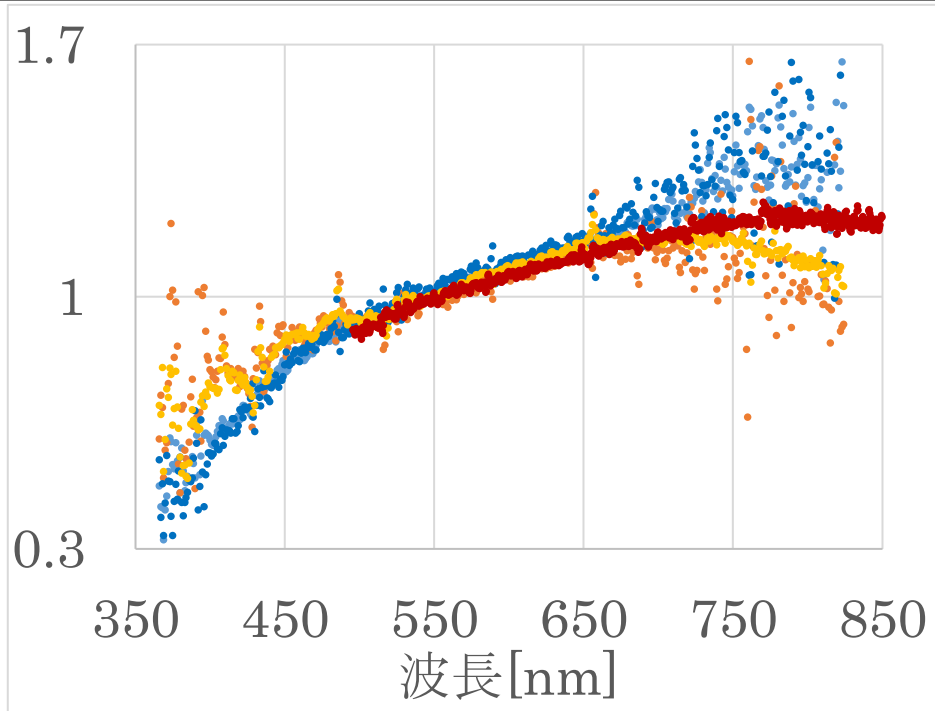


図 4.2 Thusnelda の反射率スペクトル(比較星の色補正あり). 横軸は波長[nm], 縦軸は 550[nm]の値で規格化した反射率である. 青, 薄青, 橙, 黄は本研究の結果で, それぞれ反射率スペクトルを求めるときに用いたデータが異なり, 青:小惑星 1 回目と比較星 HD19061, 薄青:小惑星 2 回目と比較星 HD27834, 橙:小惑星 1 回目と比較星 HD19061, 黄:小惑星 2 回目と比較星 HD27834, である. 赤は Lazzaro et al.(2004)による結果. その数値データは [https://sbnarchive.psi.edu/pds3/non\\_mission/EAR\\_A\\_I0052\\_8\\_S3OS2\\_V1\\_0/data/n00166\\_n00307/00219\\_thusnelda.tab](https://sbnarchive.psi.edu/pds3/non_mission/EAR_A_I0052_8_S3OS2_V1_0/data/n00166_n00307/00219_thusnelda.tab) にあるものを用いた.

### 4.3 スペクトル型の推定

小惑星は反射率スペクトルの特徴に基づいて, いくつかのスペクトル型に分類されている. 本研究で得られた反射率スペクトルを, 各スペクトル型の反射率スペクトルと比較して, (219) Thusnelda のスペクトル型を推定した(図 4.3). 各型の平均反射率スペクトルは DeMeo et al. (2020) を用いた. A 型, S 型, V 型, X 型, C 型, D 型, それぞれと比較すると, 今回得られた(219) Thusnelda の反射率スペクトルは S 型か V 型に近い. 今回得られた反射率スペクトルだけで, S 型と V 型のどちらかであるかを定めることはできないが, V 型は(4) Vesta に関連する特異な小惑星のグループであることを考慮して, (219) Thusnelda を S 型と推定した.



## 小惑星(219)Thusnelda の可視反射率スペクトル

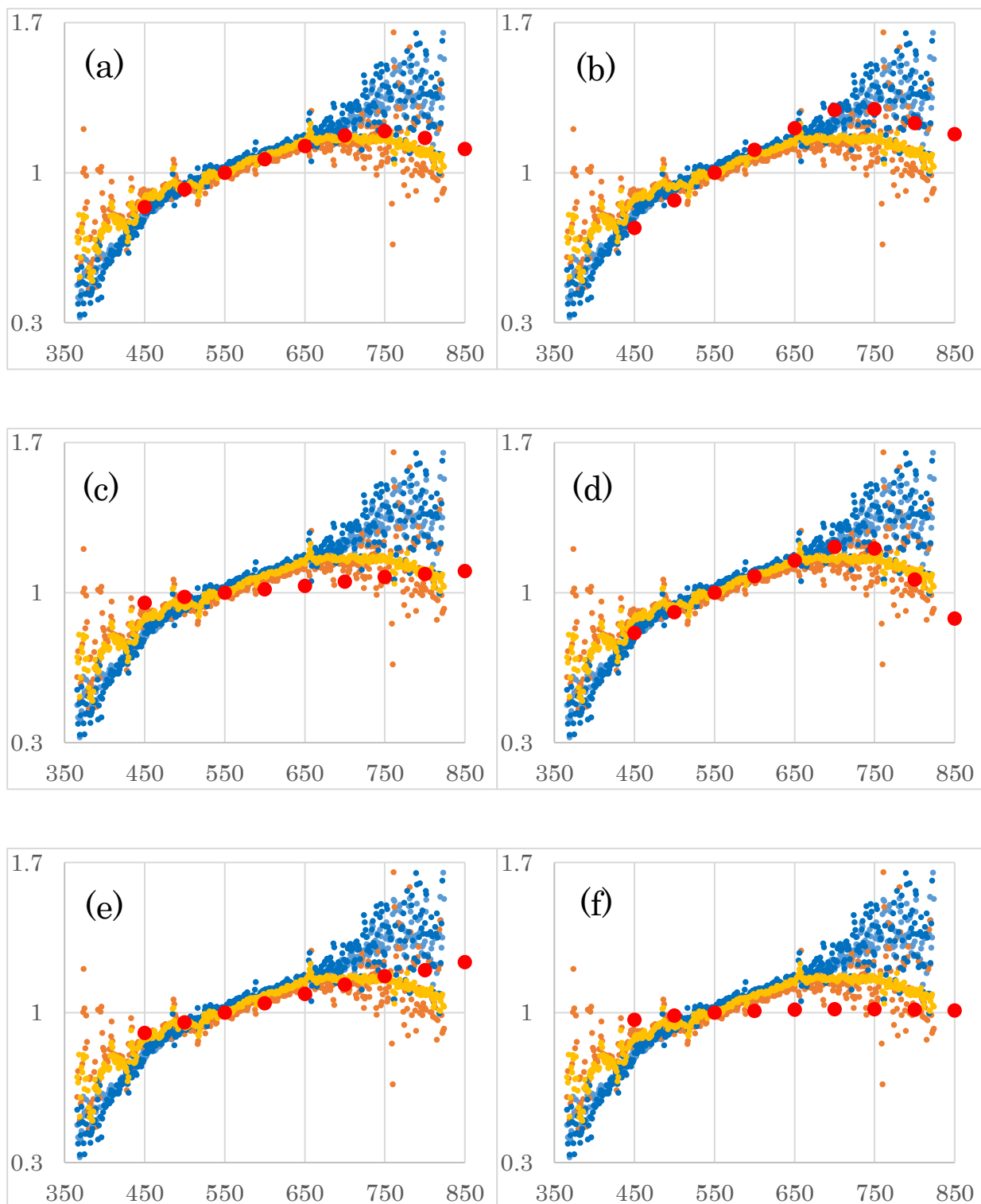
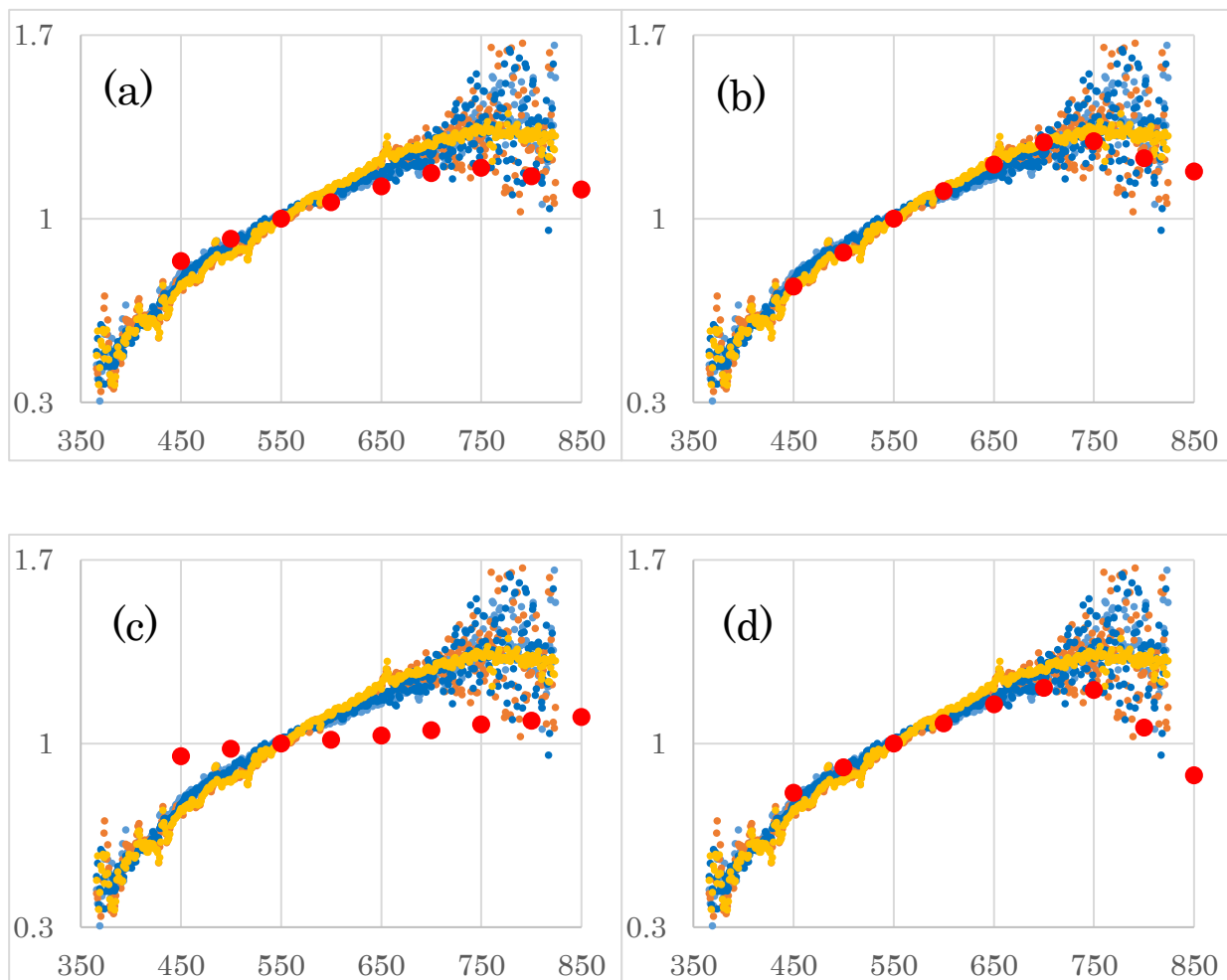


図 4.3 (219) Thusnelda の反射率スペクトルと、各スペクトル型の反射率スペクトル. 横軸は波長, 縦軸は 550nm の値で規格化した反射率. 青, 薄青, 橙, 黄は図 4.1 と同じ. 赤は Bus-DeMeo Asteroid Taxonomy V1.0 で, (a) S 型, (b) A 型, (c) X 型, (d) V 型, (e) D 型, (f) C 型. 数値データは [https://sbnarchive.psi.edu/pds3/non\\_mission/EAR\\_A\\_VARGBDDET\\_5\\_BUSDEMEOTAX\\_V1\\_0/data/](https://sbnarchive.psi.edu/pds3/non_mission/EAR_A_VARGBDDET_5_BUSDEMEOTAX_V1_0/data/)

小惑星(219)Thusnelda の可視反射率スペクトル  
meanspectra.tab にあるものを用いた。

参考のため、比較星の色補正をおこなわずに求めた反射率スペクトルについても、各スペクトル型の反射率スペクトルと比較した(図 4.4)。比較星の色補正をおこなわなかった場合、得られた反射率スペクトルと最も近いのは A 型の反射率スペクトルになる。比較星の色補正を適切におこなわないと、誤ったスペクトル型に分類してしまう危険性がある。



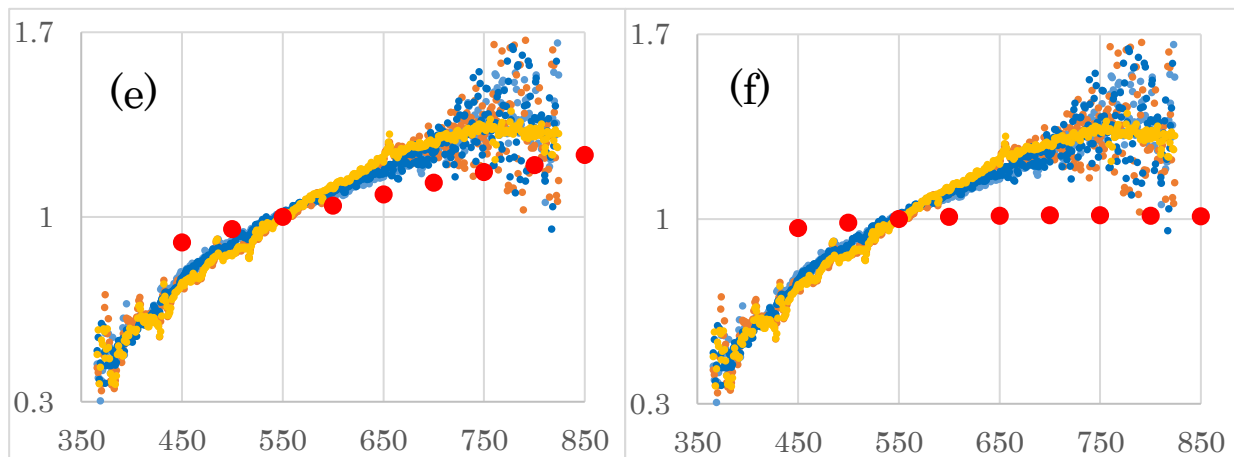


図 4.4 (219) Thusnelda の反射率スペクトルと、各スペクトル型の反射率スペクトル(色補正なし). 横軸は波長, 縦軸は 550nm の値で規格化した反射率. 青, 薄青, 橙, 黄は図 4.1 と同じ. 赤は Bus-DeMeo Asteroid Taxonomy V1.0 で, (a) S 型, (b) A 型, (c) X 型, (d) V 型, (e) D 型, (f) C 型. 数値データは [https://sbnarchive.psi.edu/pds3/non\\_mission/EAR\\_A\\_VARGBDET\\_5\\_BUSDEMEOTAX\\_V1\\_0/data/meanspectra.tab](https://sbnarchive.psi.edu/pds3/non_mission/EAR_A_VARGBDET_5_BUSDEMEOTAX_V1_0/data/meanspectra.tab) にあるものを用いた.

## 第5章 まとめ

スペクトル型を推定することのできるデータの取得を目的とし、2021年10月29日に美星天文台で小惑星(219) Thusnelda の分光観測をおこなった。

本研究で取得した可視の反射率スペクトルに基づいて(219) Thusnelda のスペクトル型を推定すると S 型に分類された。これは先行研究の結果と一致する。

小惑星のスペクトル型の推定には、比較星の選定が重要であることが示された。また、小口径の望遠鏡で広帯域フィルターを用いた測光観測をおこなって比較星の色補正をおこなうことは、小惑星の反射率スペクトルの決定精度を上げる有効な手段であることが示された。

## 謝辞

本研究をおこなうにあたり，ご指導いただきました指導教員であるはしもとじょーじ教授に心より感謝申し上げます。

美星天文台の前野将太主任技師と伊藤亮介技師には，美星天文台の望遠鏡での観測でお世話になりました。お礼申し上げます。

## 参考文献

Collins, K. A., J. F. Kielkopf, K. G. Stassun, F. V. Hessman (2017) AstroImageJ: Image processing and photometry extraction for ultra-precise astronomical light curves. *Astrophys. J.*, 153:77 (13pp).

DeMeo, F., Binzel, R.P., Slivan, S.M., and Bus, S.J. (2020). Bus-DeMeo Asteroid Taxonomy V1.0. urn:nasa:pds:ast.bus-demeo.taxonomy::1.0. NASAPlanetary Data System; <https://doi.org/10.26033/089p-c283>.

Fiji ImageJ, with "Batteries Included" , <https://fiji.sc/>

Lazzaro, D., C.A. Angeli, J.M. Carvano, T. Mothe-Diniz, R. Duffard, M. Florczak (2004) S3OS2: the visible spectroscopic survey of 820 asteroids. *Icarus*, 172, 179-220. 2004.

Ramirez, I., R. Michel, R. Sefako, M. Tucci Maia, W. J. Schuster, F. van Wyk, J. Melendez, L. Casagrande, and B. V. Castilho (2012) The UVB(RI)C colors of the Sun. *Astrophys. J.*, 752:5 (13pp)

Willmer, C. N. (2018) The absolute magnitude of the Sun in several filters. *Astrophys. J. Suppl. Series*, 236:47 (14pp)

岡山大学, 天文学入門 2021, <https://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/astro101/2021/>

川端哲也 (2002) 分光観測データ解析ソフト BeSpec Ver 0.9 , <http://www.bao.city.ibara.okayama.jp/soft/bespec/index.html>

川端哲也 (2005) 美星天文台 101cm 望遠鏡 分光器 鉄・ネオン 波長チャート 第 1.0 版, <https://www.bao.city.ibara.okayama.jp/wp-content/uploads/2020/01/fenechartlow0504.pdf>

☆ 美星天文台 ～ 観測機器概要 ～ ☆ , <http://www.bao.city.ibara.okayama.jp/koubo/kiki/bunkouki.html>