

多色測光観測による 小惑星反射率スペクトルの測定

岡山大学 大学院 自然科学研究科 地球科学専攻

41426511 矢野和希

2016/02/12

要旨

小惑星には惑星が形成された時代の記録を保持しているものもあると考えられており、惑星の材料物質や惑星形成時の太陽系の状態に関する情報を得ることを目的とした小惑星の観測がおこなわれている。なかでも反射率スペクトルの観測は、地上観測によって実施することができ、小惑星の表面物質を簡便に推定する有効な手段のひとつと考えられている。本研究では、多色測光観測をおこなって、1656 *Suomi* と 3447 *Burckhalter* という2つの小惑星についてその反射率スペクトルを推定し、Fornasier et.al. (2011)と Sanchez et.al. (2013)の観測結果と比較した。

観測は井原市美星町の星空公園で、2014年12月18日～2015年9月22日の期間に計20夜、60cm反射望遠鏡にSBIGの冷却CCDカメラ(STL-1001E)を取付けて、B, V, R, Iの4つのバンドで測光観測をおこなった。観測対象とした小惑星の観測に前後して、小惑星の近傍にあるG2V型星(太陽に類似したスペクトルを持つ恒星)の観測を行い、G2V型星の各バンド間の相対的な明るさに基づいて小惑星の各バンド間の相対的な反射率を推定した。また、大気減光の補正をおこなうため、小惑星とは別に、標準星の測光観測もおこなった。

取得したデータは一次処理(ダーク引き、フラット割り)をおこなってから、測光をおこなった。一次処理と測光にはソフトウェアMakaliを使用した。大気減光の補正は、標準星を測光した結果から標準星の見かけの光度と大気量(エアマス)の関係を表わす一次式を導出しておこなった。

To determine the chemical composition of asteroids would be valuable for understanding the history of solar system, since some of asteroids are supposed to be relicts of planetary formation. It is useful to measure spectral reflectance curves which allows us to evaluate the chemical composition of asteroids. To obtain the spectral reflectance curves of asteroids, we measured brightness of 1656 Suomi and 3447 Burckhalter with B, V, I, and R band filters. Between 18th December 2014 and 22nd September 2015, in total, 20 nights of observation were made at Hosizora Koen, Bisei, Okayama, using a 60-cm telescope equipped with CCD camera (SBIG STL-1001E). Spectrum of asteroids are divided by a G2V star to give the reflectivity of the asteroids, and are normalized by V band. Our measurement of spectral reflectance curve of 3447 Burckhalter is generally consistent with that obtained by Forasier et al. (2011), however, our measurement of 1656 Suomi is different from that of Sanchez et al. (2013).

目次

第1章 序章

1.1 小惑星-----	1
1.1.1 反射率スペクトル-----	1
1.2 研究目的-----	2

第2章 観測

2.1 観測機器	
2.1.1 60cm 反射望遠鏡-----	3
2.1.2 冷却 CCD カメラ-----	3
2.1.3 ジョンソンフィルター-----	4
2.2 小惑星の観測-----	5
2.2.1 観測前の準備-----	5
2.2.2 観測-----	7
2.3 大気減光の補正の観測-----	8
2.3.1 大気減光-----	8
2.3.2 観測-----	9

第3章 解析方法

3.1 一次処理-----	10
3.1.1 ダーク-----	10
3.1.2 フラット-----	11
3.2 品質管理-----	14
3.3 測光-----	15

第4章 大気減光の補正

4.1 機器等級への変換-----	17
4.2 大気減光の補正方法-----	17
4.2.1 大気減光係数-----	17

第5章 反射率

5.1 小惑星の明るさ-----	19
5.2 G2V 型星の明るさ-----	20
5.3 反射率の算出-----	20

第 6 章 結果・考察

6.1 3447 Burckhalter の反射率スペクトル-----	22
6.2 1656 Suomi の反射率スペクトル-----	23

謝辞

参考文献

図録

第 1 章 序章

1.1 小惑星

小惑星は惑星が形成された時代の記録を保持しているものもあると考えられており、惑星の材料物質や惑星形成時の太陽系の状態に関する情報を得ることを目的とした小惑星の観測がおこなわれている(臼井 他, 2013). なかでも反射率スペクトルの観測は、地上観測によって実施することができ、小惑星の表面物質を簡便に推定する有効な手段のひとつと考えられている.

1.1.1 反射率スペクトル

反射率スペクトルとは反射率の波長依存性のことである. 反射率スペクトルは物質によって異なるため、反射率スペクトルを見ることである程度まで物質を絞り込むことができる(Bus, 2002).

本研究では、反射率の絶対値については議論せず、反射率スペクトルの形のみを扱った. 反射率の絶対値を求めるためには小惑星の大きさが必要になるが、小惑星はその大きさがわかっていないものも多く、観測時の断面積を精密に決めるのは困難である. 一方で、反射率スペクトルの形だけであれば、比較的簡単に精度よく求めることができる. また、反射率の形を見るだけでもある程度物質を推定することは可能である.

反射率スペクトルは以下の式で求めることができる.

$$\text{反射率スペクトル} = \frac{\text{反射光(小惑星)スペクトル}}{\text{入射光(太陽)スペクトル}}$$

本研究では、太陽光は明るすぎるため、小惑星と同じ観測機材では観測できなかった. そのため、太陽と似たスペクトルの恒星である G2V 型星を観測して、それを入射光スペクトルの代替とした.

$$\text{反射率スペクトル} \cong \frac{\text{反射光(小惑星)スペクトル}}{\text{G2V 型星スペクトル}}$$

1.2 研究概要

本研究では、小惑星を構成する物質に関する情報を取得することを目的として、1656 Suomi と 3447 Burckhalter という 2 つの小惑星を多色測光観測して、その反射率スペクトルを推定した。

星空公園の 60cm 反射望遠鏡と冷却 CCD カメラと B,V,R,IR の 4 つのフィルターを用いて、1656 Suomi と 3447 Burckhalter を 2014 年 12 月 28 日から 2015 年 9 月 21 日に計 20 夜かけて観測した。解析では、2015 年 9 月 13 日から 9 月 21 日の計 3 夜のデータを使用し、小惑星の反射率スペクトルを算出し、過去の観測結果と比較した。

第 2 章 観測

2.1 観測機器

2.1.1 60cm 反射望遠鏡

本研究の観測は，星空公園にある 60cm の反射望遠鏡を使用した．天文台は井原市美星町大倉龍王山の頂上付近(東経 133° 34' 18, 北緯 34° 40' 48, 標高 538m)に位置している(星空公園 HP, <http://www.bao.go.jp/hoshizora/>)．

2015 年 9 月は望遠鏡の追尾機能の調子が悪く，露出時間を 20 秒にすると半分以上のデータが使えないものとなった．そのため，本研究では露出時間を最大で 20 秒とした．



図 2.1 星空公園 60cm 反射望遠鏡

2.1.2 冷却 CCD カメラ

CCD カメラ(以下 CCD)は，シャッターを開いている間に入射した光子を電子として蓄え，その電子の数を数えることによって明るさを測定する．電子の数を数えることをカウントするといい，測定した電子の数をカウント値という．

横尾(1991)によると CCD の特徴として量子効率がよいことがあげられ，CCD の量子効率は 90%にもなる．量子効率とは光に対する感度のことである．比較として人の目の量子効率は 1%以下で写真乾板でも数%である．

本研究では SBIG STL-1001E(<http://www.sbig-japan.com/STL-1001E.html>)を冷却 CCD カメラとして使用した。画素数は 1024×1024 である。画素数とは電子を蓄える容器の数のことである。この容器一つのことを素子といい、画素数が 1024×1024 であるということは素子が 1024×1024 あるということである。一つの素子に最大約 63000 個の電子を蓄えることができる。冷却能力は、外気温より最大で -40°C 冷却できる。CCD を冷却することにより、ダークノイズ(ダークノイズについては 3.1.1 で説明する)を軽減することができる。露出時間は最短で 0.12 秒、最長 3600 秒である。



図 2.2 本研究で使用した冷却 CCD カメラ
(画像は <http://www.sbig-japan.com/STL-1001E.html> から引用)

2.1.3 フィルター

本研究では、B, V, R, I の 4 つのフィルターを使用した。フィルターの透過特性は図 2.3 に示すとおりである。

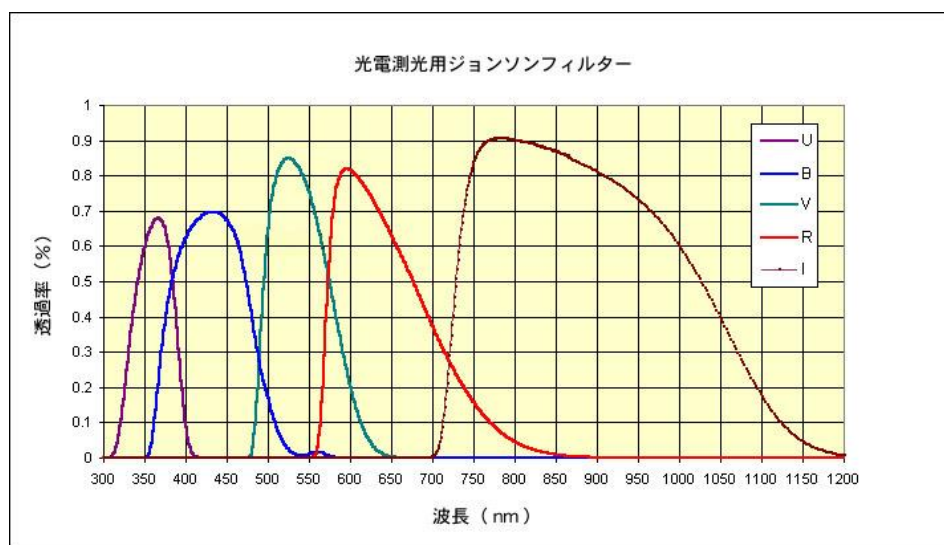


図 2.3 本研究で使用したフィルターの透過特性

(http://www.sbig-japan.com/UBVRI/ubvri_m.html#Anchor:CSbvriG から引用)

2.2 小惑星の観測

2.2.1 観測前の準備

小惑星のスペクトルを観測するにあたっていくつか準備が必要なためそれを説明していく。

小惑星は地球とは違う公転周期で太陽の周りを公転しているため、太陽と地球と小惑星の位置関係によってそれぞれの距離も変化する。そのため、観測する時期によって地球から観測される小惑星の明るさは変化する。観測期間内で観測可能な明るさの小惑星を探す必要がある。

本研究では NASA JPL HORISONS System (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>)を使用した。Observer Location(観測地)は美星スペースガードセンターの番号である **Bisei Spaceguard Center-BATTeRS [300]**を使用した。本研究では 9 月から 12 月の間に 15 等星より明るくなる小惑星として、観測対象を 1656 Suomi と 3447 Burckhalter に決定した。

また、小惑星は太陽の周りを公転しているため、惑星と同様に天球上を移動している。そのため、小惑星の天球上の位置は観測する時期によって異なる。そのため、観測時の小惑星の赤経、緯度を知る必要がある。観測時の小惑星の赤経、緯度も同様に NASA JPL HORISONS System から得た。

小惑星の天球上の位置は観測する時期によって異なるため、観測した時に観

測しているものが対象の小惑星であるかを確認する方法が困難である．本研究では対象の小惑星を観測できているかの確認に Asteroid Finder Chart (<http://asteroid.lowell.edu/cgi-bin/astfinder>)を使用した．Observatory(観測地)は美星スペースガードセンターの番号である 300 を使用した．

作業としては，小惑星の位置に望遠鏡を向け，画像を撮る(図 2.4)．それを Asteroid Finder Chart で同時刻に見えるとされる画像と比較する(図 2.5)．図 2.4 と図 2.5 の比較より，赤丸で囲んだものが 1656 Suomi と判別される．

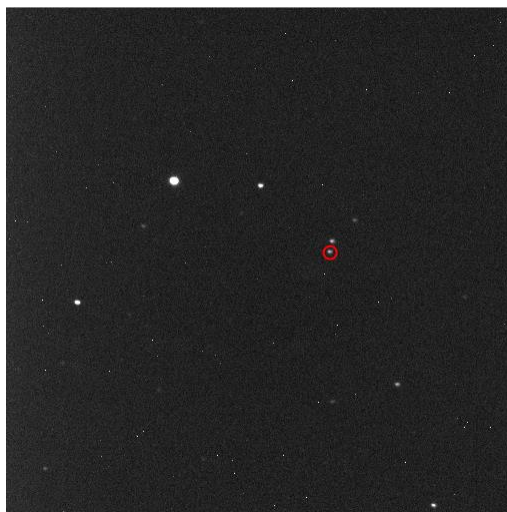


図 2.4: 世界時で 2014 年 9 月 13 日 11 時 26 分(UT)に赤経 23:02:42 赤緯 1:00:15 の方向を撮像して得た画像．

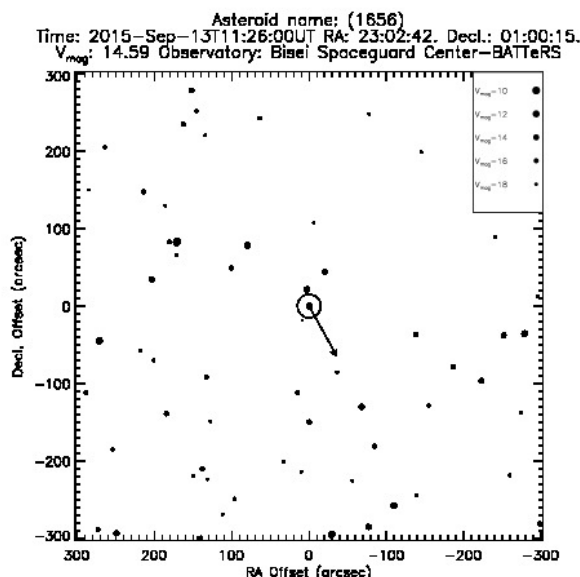


図 2.5: Asteroid Finder Chart の検索結果

本研究は反射率を算出するために，太陽の代わりに G2V 型星を使用した．観

測する G2V 型星は G2V Stars from the Hipparcos Catalog (https://web.njit.edu/~gary/322/G2V_stars.html)の中から観測時に小惑星の近くにあるものを選んだ。今回は、1656 Suomi と 3447 Burckhalter のどちらでも HIP 682 を使うことにした。

観測の際に望遠鏡が G2V 型星を見ているかどうかを確認するためにまわりの星との位置関係等を知る必要がある。そのため、ESO Online Digitized Sky Survey (<http://archive.eso.org/dss/dss>)を用いて G2V 型星の他の星との位置関係を確認した。

図 2.7 は本研究で露出時間 10 秒の画像を B, V, R, I の 4 つのフィルターで 10 枚ずつ撮像したものを重ね合わせた画像である。画像の中心にあるのが HIP 682 である。本研究の視野角は 8.977 分角である。図 2.6 は HIP 682 の検索結果で、視野角は観測時の視野角の約 1.5 倍の 13.5 分角である。図 2.6 と図 2.7 はスケールをほぼそろえている。本研究の画像からは 4 つの星しか確認できないが、4 つの星の角度と距離間から赤い丸で囲んだ星が HIP 682 であると確認できる。

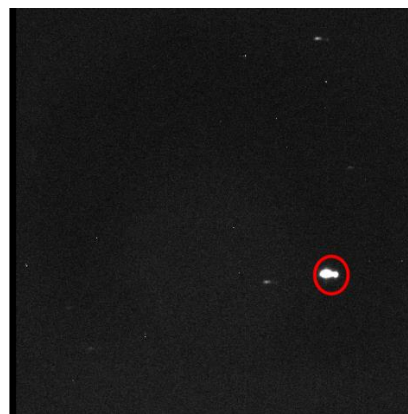
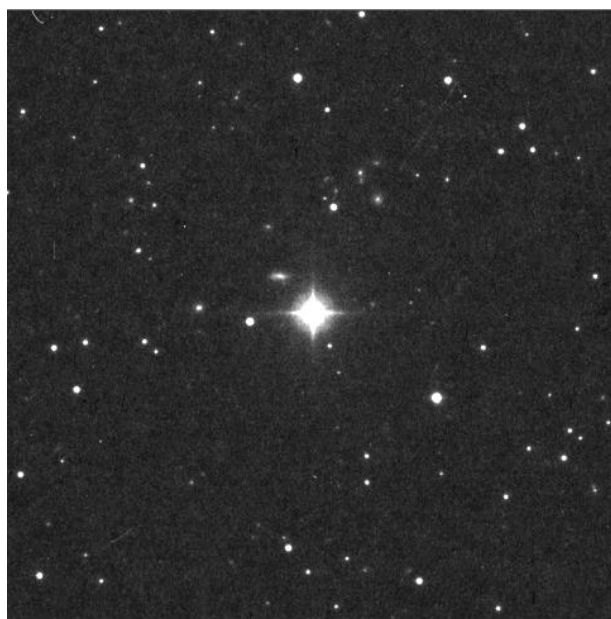


図 2.6: ESO Online Digitized Sky Survey による HIP 682 の検索結果 図 2.7: HIP 682 の観測結果

2.2.2 観測

本研究では、陽が沈んだ直後と夜明け前のトワイライトを撮像した画像から

フラット画像を合成した．フラットの観測は，露出時間は 1(s)，CCD の冷却温度は小惑星を観測する温度と同じ -20°C とした．フラットについては 3.1.2 で詳しく説明する．

小惑星は B バンドで 10 枚，V，R，I バンドでそれぞれ 5 枚ずつ撮像したものを 1 セットとした．小惑星の観測を 3 セット行い，その後 G2V 型星の観測を B,V,R,I，で 10 枚ずつ撮像し，その後また小惑星を 3 セット，G2V 型星…というのを繰り返し行った(図)．細かい設定は以下の表に示しておく(表)．

2015 年 9 月に行った観測では 1656 Suomi は 5 セット，3447 Burckhalter は 16 セット，それぞれデータを取得することができた．

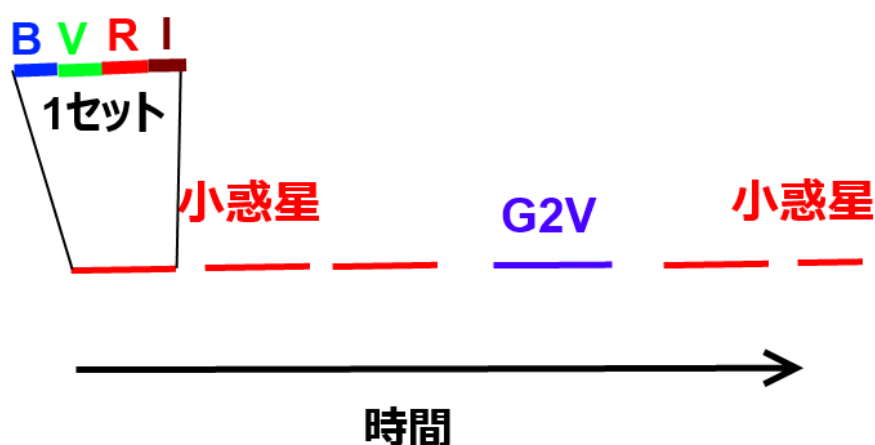


図 2.8:観測方法の概略図．1 セットは B, V, R, I の 4 つのバンドでの撮像からなる．小惑星を 3 セット観測した後に G2V 型星を 1 セット観測，これを繰り返した．

2.3 大気減光補正の観測

2.3.1 大気減光

地上で観測する際，宇宙から来た光は大気によって吸収・散乱されるため減光する．これを大気減光という．大気減光の大きさは，光が通過した大気のみでなく，観測場所，観測時の空の状態によっても変わる．

光が通過した大気のみを表わすものとして，エアマス X が使われる．エアマスとは，天頂にある星の光が通過する大気のみを表わす．観測する天体の地平高度が下がるとエアマスは増加する．その関係は以下の式で表される．

$$X = \frac{1}{\sin \theta}$$

θ : 地平高度

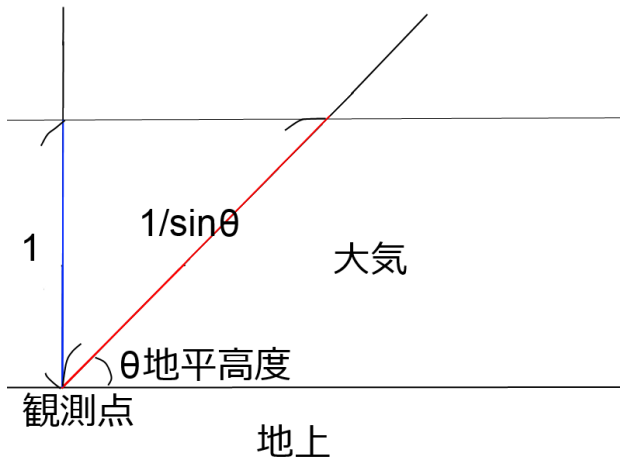


図 2.9 エアマス

2.3.2 大気減光の補正のための観測

本研究では、様々なエアマスで標準星を観測し、エアマスと大気減光の関係を調べることで、大気減光の補正を行った。

大気減光の補正のための観測は、2015 年 9 月 21 日におこなった。これは Suomi と Burckhalter を観測した日から数えてそれぞれ 8 日後と 3 日後である。

標準星は Landolt (1992) の Landolt Equatorial Standards (www.cfht.hawaii.edu/ObsInfo/Standards/Landolt/)より、観測時により長く観測できるものを探し、標準星 114 750 を対象とした。

観測は 2014 年 9 月 21 日の日本時間の 19:20-26:20 に、標準星 114 750 を B, V, R, I の 4 つのフィルターで 5 枚ずつ撮像することを繰り返した。露出時間は 10 秒で、CCD の冷却温度は -20°C とした。

この観測で、4 つのフィルターでそれぞれ 45 個のデータを得ることができた。

第 3 章 解析

本研究では撮影した星の画像を解析するのに、フリーソフトウェアマカリィ (<http://www.nao.ac.jp/others/Makalii/index.html>)を使用した。

3.1 一次処理

CCD で撮影した画像はダークノイズと CCD の素子の感度ムラの補正をする必要がある。この補正を一次処理という。一次処理の方法については Minor Planets at 366(<http://www.toybox.rgr.jp/mp366/>)のライトカーブ解析の手引きを参考にした。

3.1.1 ダーク

CCD は光が全く入らない状態にしているにもかかわらず電子の熱運動(暗電流ノイズ)によって放出された電子をカウントしてしまう。これをダークノイズという。ダークノイズの大きさは、露出時間と CCD の冷却温度によって決まる。ダークノイズのみを撮像した画像(ダーク・フレーム)を作成し、観測した画像(オブジェクト・フレーム)から引き算することでダークノイズを補正する。この作業をダーク引きという。

ダーク・フレームの撮像方法は CCD に全く光が入らない状態で撮像する。ダークノイズの大きさは、露出時間と CCD の冷却温度によって決まるため、オブジェクト・フレームを撮影した時の露出時間と CCD 冷却温度で撮像した。

本研究では、望遠鏡の中蓋を閉じた状態で 100 枚のダーク・フレームを撮像し、撮像した 100 枚のダーク・フレームの中央値をとって、ダーク引きに使用する合成ダーク・フレームを作成した。

本研究では、ダークノイズの特性は短期間には変化しないと考え、2015 年 9 月 13 から 21 日の観測データはすべて 2015 年 9 月 12 日から 13 日の間に撮像したダーク画像を使用した。本研究ではフラット用の 1 秒、G2V 型星用の 10 秒、小惑星用の 20 秒の露出時間で撮像した合成ダーク・フレームを作成し、使用した(図 3.1-3)。

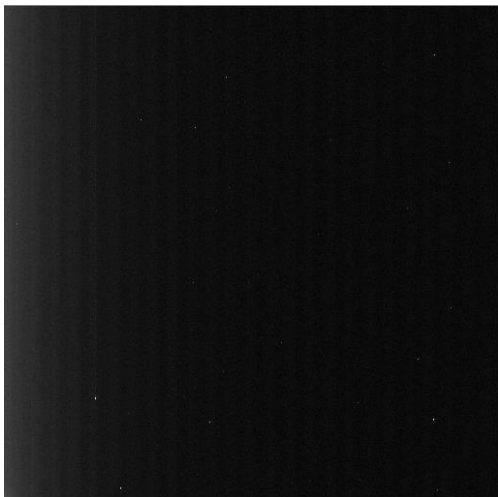


図 3.1: 1 秒ダーク中央値合成

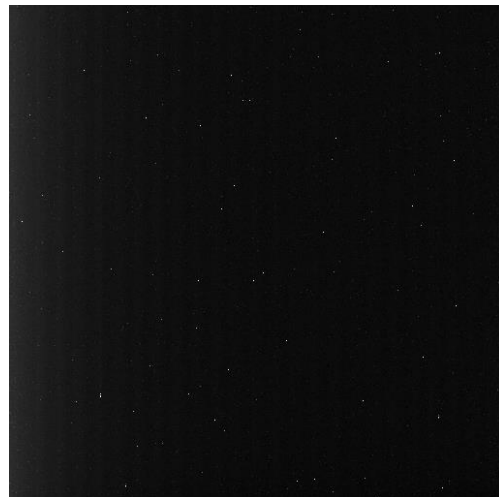


図 3.2: 10 秒ダーク中央値合成

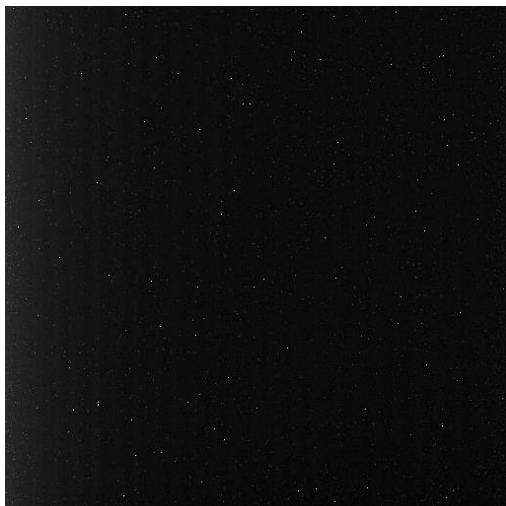


図 3.3: 20 秒ダーク中央値合成

3.1.2 フラット

CCD で撮像した画像には大きく分けて 2 種類のムラがある．一つ目は CCD の感度のムラで，二つ目はフィルターや CCD についたゴミや，周縁減光による光学系による感度のムラである．周縁減光とは，光が鏡筒などによって遮られ画像の周辺部が暗くなってしまうことである．これら 2 種類のムラを補正するため一様な明るさのものを撮像した画像(フラット・フレーム)で割り算する．この作業をフラット割という．

本研究では，観測当日の日の入り直後と夜明け前の空，いわゆるトワイライトを撮影し，それをフラット・フレームとした．観測は露出時間を 1 秒，CCD の冷却温度を小惑星の観測と同じ -20°C とし，B, V, R, IR の各フィルターで 10 枚ずつ撮像するのを，空が暗くなるか，明るくなる(画像が飽和する)まで行

った．取得した画像の中から，カウント値の平均が 10000 から 40000 までのものを使用してフラット・フレームを合成した．

2015 年 9 月 13 日の観測で R, V で 20 枚ずつ，2015 年 9 月 18 日の観測で B, V, I, R でそれぞれ 10 枚ずつ，2015 年 9 月 21 日の観測で B, V, I, R でそれぞれ 10 枚ずつ撮像することができた．2015 年 9 月 13 日の観測では B, I のフラットを得ることができなかったため，2015 年 9 月 18 日に観測したものを代用した．18 日のフラット・フレームを 13 日のものとして使用することは，13 日から 18 日の間に冷却 CCD と望遠鏡は同じ状態を保っており，望遠鏡のフォーカスも変えていない．

フラット・フレームにもダークノイズが含まれている．そのため，露出時間を 1 秒にして撮像したダーク・フレームから作成した合成ダーク・フレームを使ってダーク引きをおこなった．

ダーク引きしたフラット・フレームの中央値をとって合成フラットを作成したいが，トワイライトを撮像したフラットは時刻によって明るさが変化していくため，フラット・フレームの平均カウント値にはばらつきがある．フラット・フレームを平均カウント値で割り算して規格化してから，複数枚の画像の中央値をとって合成フラット・フレームを作成した．

以上から作成した合成フラット・フレームが図 3.4 から図 3.13 である．これらの合成フラット・フレームからは中心部と隅の方が暗くなっていることがわかる．リング状に見える黒い粒はフィルターについた埃と推測される．リング状になっているのは埃にピントが合っていない為である．

2015 年 9 月 13 日

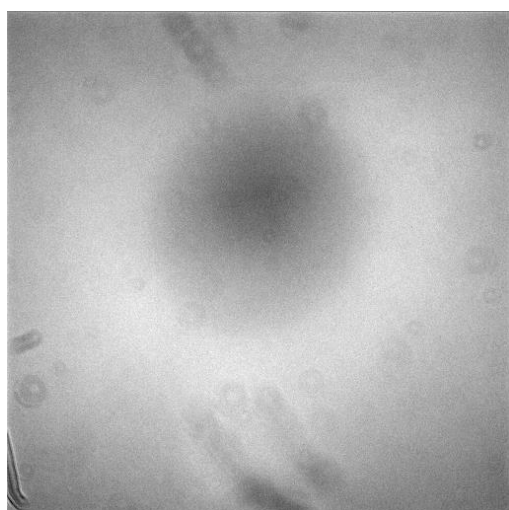


図 3.4: V バンド

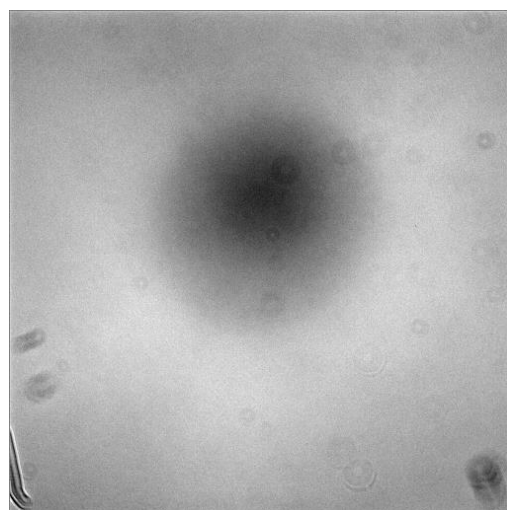


図 3.5: R バンド

2015 年 9 月 18 日

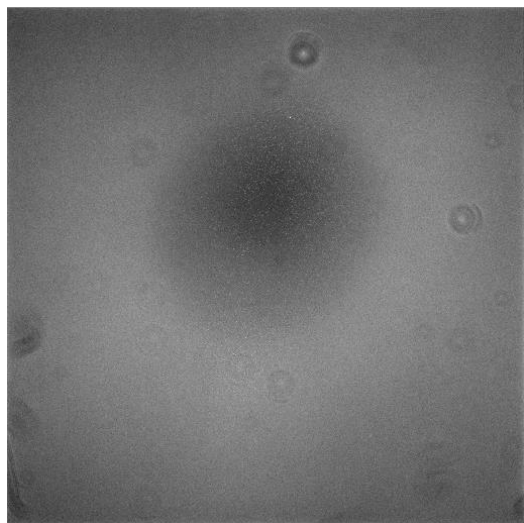


図 3.6: B バンド

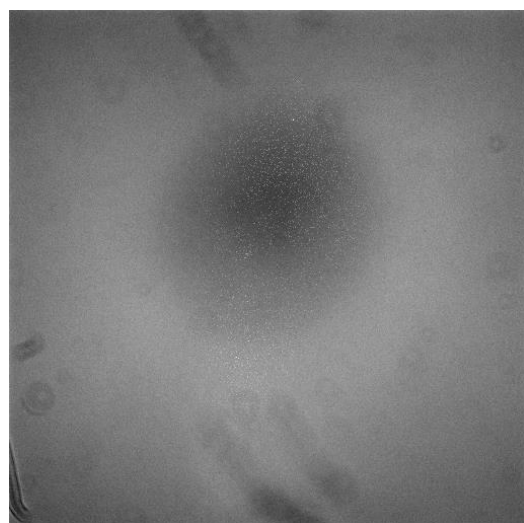


図 3.7: V バンド

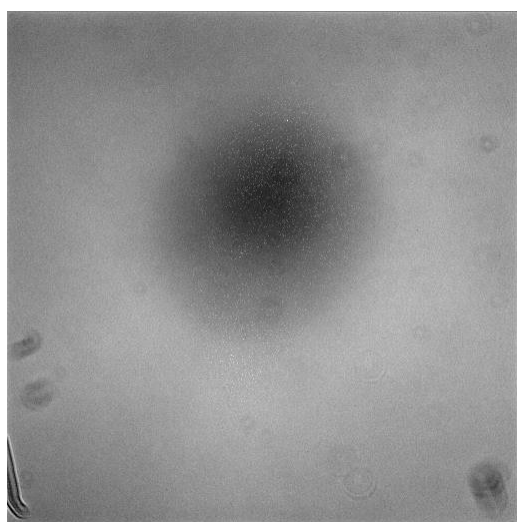


図 3.8: R バンド

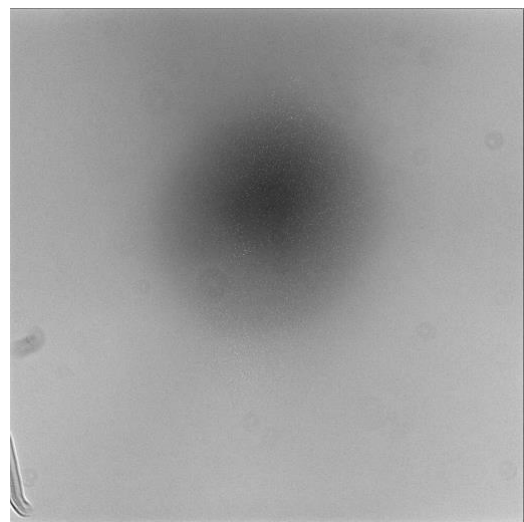


図 3.9: I バンド

2015 年 9 月 21 日

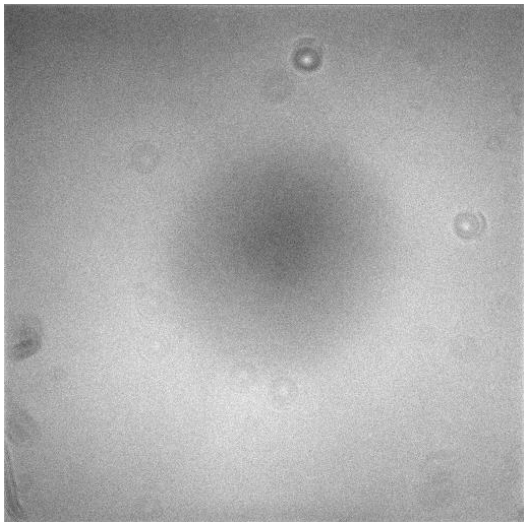


図 3.10: B バンド

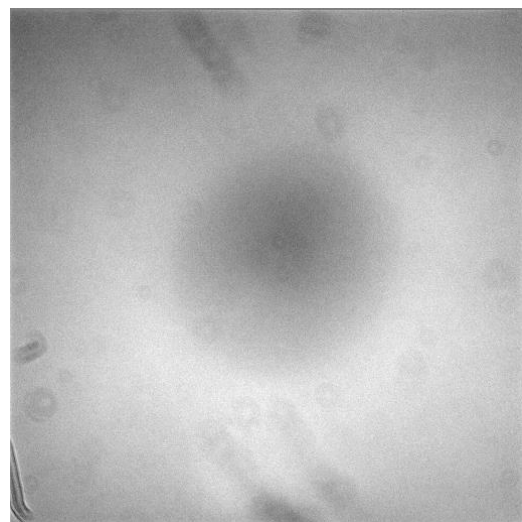


図 3.11: V バンド

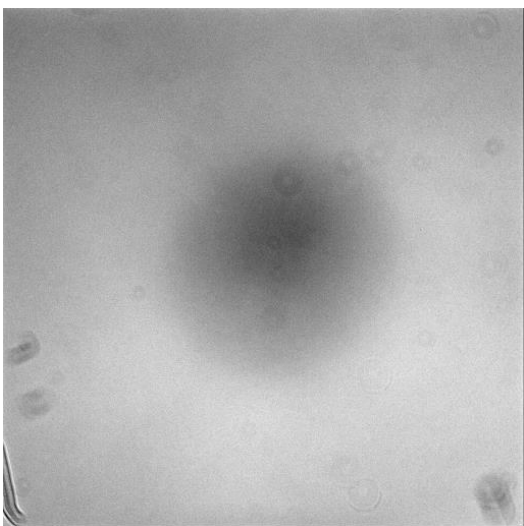


図 3.12: R バンド

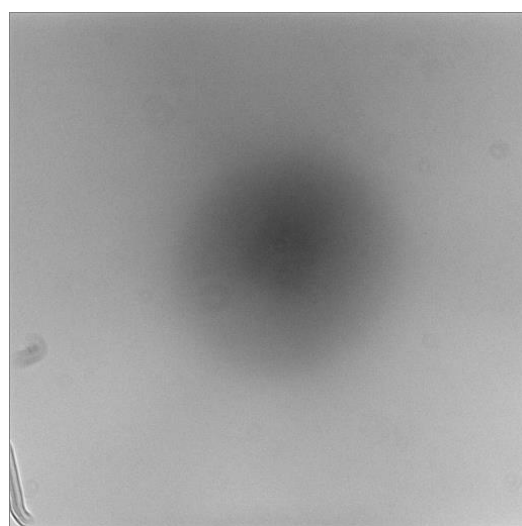


図 3.13: I バンド

3.2 品質管理

天候の影響を明らかに受けていると判断されるものは除いた.

また, 本研究の観測期間では星空公園の 60cm 反射望遠鏡は追尾機能の調子が悪く, 露出時間を 20 秒で撮像すると 2 枚に 1 枚くらいがぶれてしまった. そのため, 画像を見てぶれているものを捨てた.

3.3 測光

測光とは天体の明るさを求めることである．図 3.17 が Makali で測光している様子である．ピンクのサークル内の明るさが星の明るさ+空の明るさ，青の2つのサークルの間の明るさが空の明るさとして，ピンクのサークルから求めた明るさから空の明るさを引くことによって，星の明るさを求める．

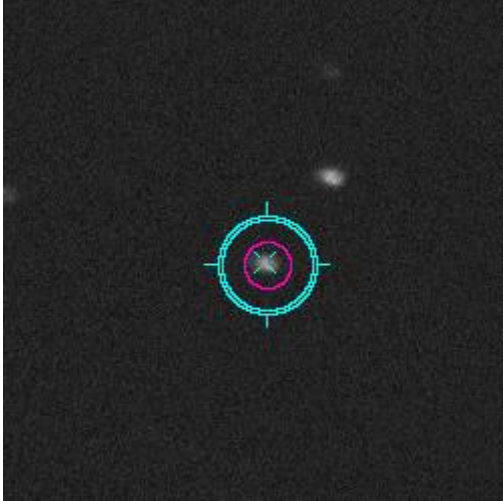


図 3.17: Makali で測光している様子

第 4 章 大気減光の補正

2.3.1 で説明したように観測した明るさは大気減光の影響を受けている．ここでは木下(2003)を参考に大気減光の補正をおこなった．

4.1 機械等級への変換

観測で得られたカウント値 C は観測時の露出時間 t も考慮して，以下の式で機械等級 v に変換される．

$$v = -2.5 \log_{10} \left(\frac{C}{t} \right)$$

4.2 大気減光の補正方法

以下の式を用いて大気減光の補正をおこなった． v_0 は大気減光を受けていない等級である． k は大気減光係数で， X はエアマスである．

$$v_0 = v - kX$$

4.2.1 大気減光係数

大気減光の補正をするためには大気減光係数 k を求める必要がある．本研究では，2.3.2 の観測データをもとに縦軸を等級，横軸をエアマスとした図を作成し，回帰直線を求めることで大気減光係数 k を決定した．

大気減光係数の誤差 ε_t は以下の式より求めた．

$$\varepsilon_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 2}}$$

ここで n は測光した数， y_i は i 番目の測光で得た明るさ， $\bar{y}$ はすべての測光を平均した明るさである．

2015 年 9 月 21 日の観測から求めた B, V, R, I 各バンドの大気減光係数 k_b , k_v , k_r , k_i は以下ようになった．

$$k_b = 0.4243 \pm 0.0167$$

$$k_v = 0.2905 \pm 0.0143$$

$$k_r = 0.2317 \pm 0.0097$$

$$k_i = 0.2798 \pm 0.0111$$

図 4.1 は, 図 4.2 の観測について大気減光補正をおこなった結果である.

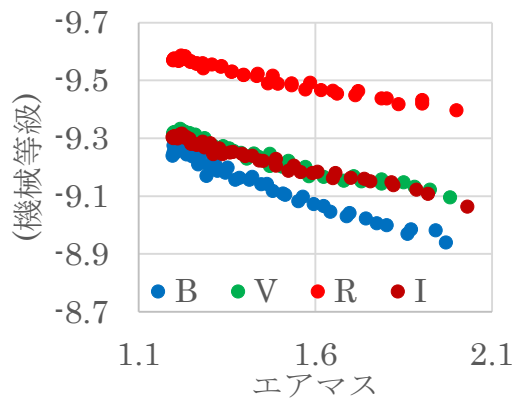


図 4.1 エアマスと明るさ

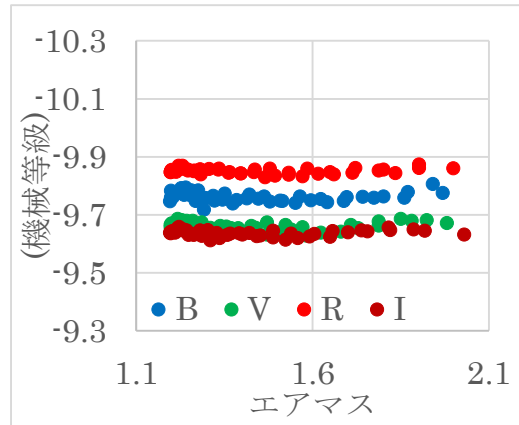


図 4.2 図 4.1 の大気減光補正後の明るさ

第 5 章 反射率

大気減光の補正を行った後，小惑星と G2V 型星それぞれの明るさを求め，それらから反射率を求めた．以下，小惑星と G2V 型星の明るさの求め方について説明する．

5.1 小惑星の明るさ

表 5.1 と 5.2 は測光することのできた小惑星の画像の枚数をまとめたものである．小文字のアルファベットは 2.2.2 節の観測法で定義したセットを表わす．各セットは同じ枚数ずつ撮像をおこなっているが，望遠鏡の追尾精度の問題などがあり，解析に使える枚数は表のようにばらついた．

表 5.1: 1656 Siomi の測光した画像の枚数

		a	b	c	d	e
1656 Suomi のデータ残数	B	6	3	7	6	7
	V	2	4	3	4	3
	R	2	3	2	2	2
	I	3	2	3	2	4

表 5.2: 3447 Burckhalter の測光した画像の枚数

		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
3447 Burckhalter のデータ残数	B	6	4	3	5	5	6	4	4	5	6	6	9	5	4	5	2	3
	V	3	3	3	3	3	3	2	2	4	4	3	3	3	3	4	5	2
	R	5	2	2	3	3	4	3	4	5	6	3	4	7	0	2	3	3
	I	3	0	2	2	2	2	2	4	2	4	2	4	3	3	5	5	4

小惑星は自転しているため，観測した時刻によって観測される明るさが変化する可能性がある．そこで各セットごとに各バンドの明るさを求めるものとする．複数の画像が取得されている場合には，各画像から得られた明るさの平均値をそのセットのそのバンドにおける明るさとした．

i 番目のセットのバンド j の明るさ C_{ij} とその観測誤差 ε_{ij} は以下の式で求めた．

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{ij}} C_{ijk}}{n_{ij}}, \quad \varepsilon_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_{ij}} (C_{ijk} - C_{ij})^2}{n_{ij} - 1}}$$

ここで n_{ij} は i 番目のセットの j バンドの画像枚数， C_{ijk} は i 番目のセットの j バンド

の k 番目の画像における小惑星の明るさである。

以上の作業により，Suomi は各バンドで 5 個，Burckhalter は B,V バンドで 15 個，R, I バンドで 14 個の明るさを得た。

5.2 G2V 型星の明るさ

G2V 型星は小惑星と異なり，星そのものの明るさは変化しない．そこで，セットごとにデータを分けることはせず，全セットのデータを各バンドごとにまとめて星の明るさを求めた。

$$C_j = \frac{\sum_{k=1}^{n_j} C_{jk}}{n_j}, \quad \varepsilon_j = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_j} (C_{jk} - C_j)^2}{n_j - 1}}$$

ここで C_j はバンド j の明るさ， ε_j はその観測誤差， n_j はバンド j の画像枚数， C_{jk} はバンド j の k 番目の画像における G2V 型星の明るさである。

以上の作業によって G2V 型星の明るさは 13 日と 18 日に観測したものそれぞれにおいて，B, V, R, I の各バンドで 1 つずつの明るさを得た。

5.3 反射率の算出

小惑星の明るさを G2V 型星の明るさで割ることによって，入射光のスペクトルによらない反射率のスペクトルを求めることができる。

$$r_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_i}, \quad e_{ij} = r_{ij} \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{ij}}{C_{ij}}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_j}{C_j}\right)^2}$$

ここで r_{ij} は i 番目のセットの j バンドの相対的な反射率， ε_{ij} はその観測誤差である。

この反射率スペクトルは入射光の大きさや小惑星の大きさを規格化されていないため，反射率の絶対値として見ることはできない． r_{ij} を使ってセット内において他バンドとの相対的な反射率について議論することはできるが，このままではセット間の比較には使えないので，V バンドの反射率で規格化した以下の反射率 R_{ij} を定義する。

$$R_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{iv}}, \quad E_{ij} = R_{ij} \sqrt{\left(\frac{e_{ij}}{r_{ij}}\right)^2 + \left(\frac{e_{iv}}{r_{iv}}\right)^2}$$

以上の作業によって，各バンドにおいて Suomi は 5 つ，Burckhalter は 17 の規格化した反射率を得た

第 6 章 結果と考察

6.1 3447 Burckhalter の反射率スペクトル

本研究で求めた 3447 Burckhalter の反射率スペクトルを Fornasier et.al. (2011)の観測による反射率スペクトルと比較する．ここでは，全セットの結果を平均して算出した反射率 R_j を用いた．平均とその誤差 E_j の算出方法は以下のとおりである．

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^{m_j} \left(\frac{1}{E_{ij}^2} R_{ij} \right)}{\sum_{i=1}^{m_j} \left(\frac{1}{E_{ij}^2} \right)}, \quad E_j = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{m_j} \left(\frac{1}{E_{ij}^2} \right)}}$$

m_j はバンド j で求めた反射率 R_{ij} の数である．

黒の線は Fornasier et.al. (2011)らが観測した結果で，赤は本研究で求めた反射率である．本研究の横の範囲はフィルターの透過率の半値幅で，縦の範囲は観測のばらつきを示している．

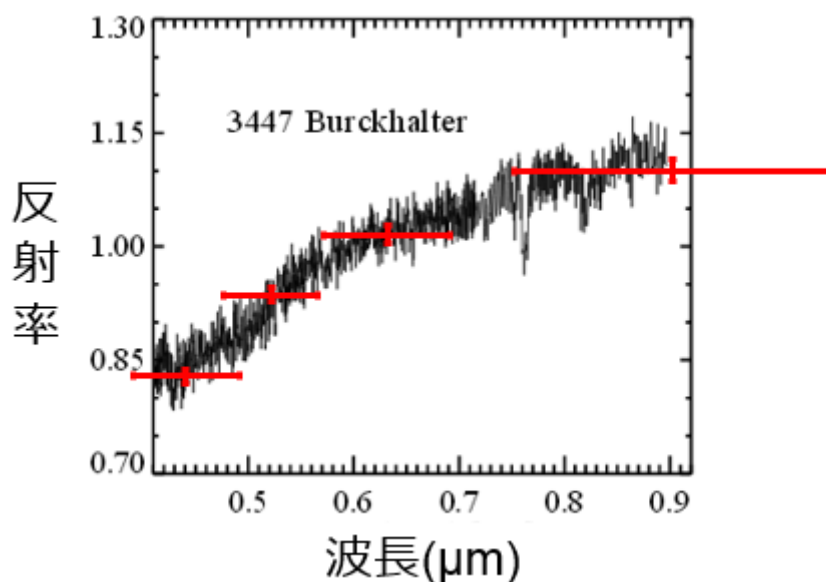


図 6.1: 3447 Burckhalter の反射率の比較．赤は本研究，黒は Fornasier et.al. (2011)．本研究の横の範囲はフィルターの透過特性の半値幅，縦の範囲は観測誤差を表わす．

本研究の観測結果は概ね, Fornasier et.al. (2011)の観測の反射率スペクトルと整合的であるといえる.

6.2 1656 Suomi の反射率スペクトル

ここでは, 本研究で求めた 1656 Suomi の反射率スペクトルを Sanchez et.al. (2013)の観測による反射率スペクトルと比較する. 黒の線は Sanchez et.al. (2013)が観測した結果で, 赤は本研究で求めた反射率である. 本研究の反射率は 3447 Burckhalter で行ったのと同様の方法で全セットの反射率の平均をとったものである. 本研究の横の範囲はフィルターの透過率の半値幅で, 縦の範囲は観測のばらつきを示している.

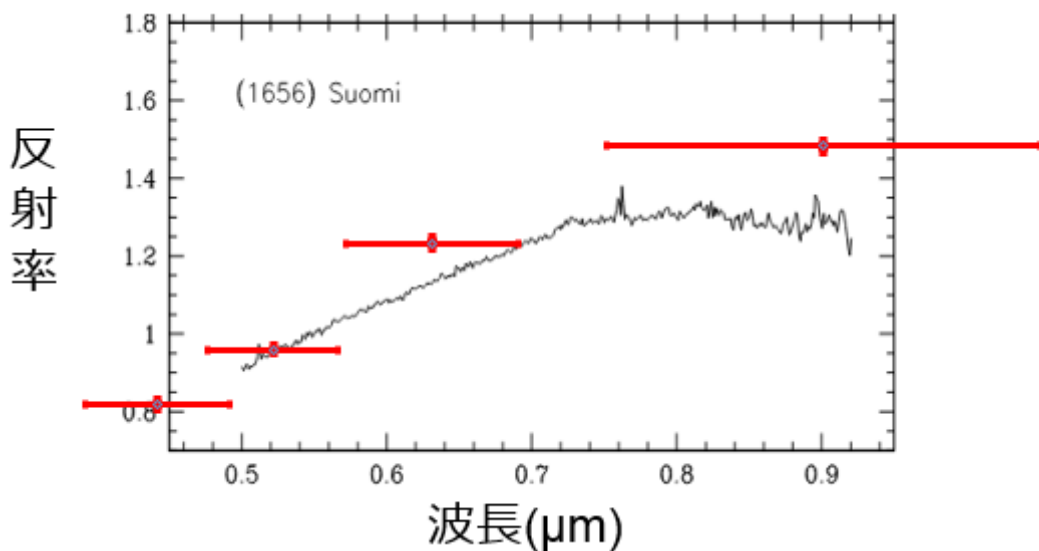


図 6.2: 1656 Suomi の反射率の比較. 赤は本研究, 黒は Sanchez et.al. (2013). 本研究の横の範囲はフィルターの透過特性の半値幅, 縦の範囲は観測誤差を表わす.

観測した結果は Sanchez et.al. (2013)が観測した反射率スペクトルは整合的ではあるとは言えない.

本研究で得られた反射率スペクトルが Sanchez et.al. (2013)の結果と一致しない原因として, 自転の影響の可能性が考えられる. 小惑星は自転しているため, 観測している時期によって見ている面が異なる. 小惑星の表面にある物質が場所によって異なっている場合, 観測する時期によって異なる反射率スペクトルが観測される. 1656 Suomi は見る面によって表面物質が大きく異なっているという特異な天体であったとすると, 本研究で観測された反射率スペクトルは Sanchez et.al. (2013)の結果とずれる可能性がある. 1656 Suomi の自転

周期 2.58 時間に対して, Sanchez et.al. (2013)の観測では 900 秒露出の観測しかしていないため, 1656 Suomi の一部の面しか見ることができない.

一方で, 本研究は 1.7 時間観測をおこなっており, 自転によって観測中に見ている面が変わっている. 図(6.3)は各セットの反射率を平均せず, それぞれのセットで V バンドで規格化した反射率スペクトルを描いたものである. これを見ると時間が経過するにつれ反射率スペクトルの角度が急になっているのがわかる. また, 日本時間の 22 : 34 と 22:49 に取得されたスペクトルは, Sanchez et.al. (2013)の反射スペクトルに近いものであることがわかる.

以上の結果より, 1656 Suomi は見る面によって表面物質が大きく異なっている可能性を指摘することができる.

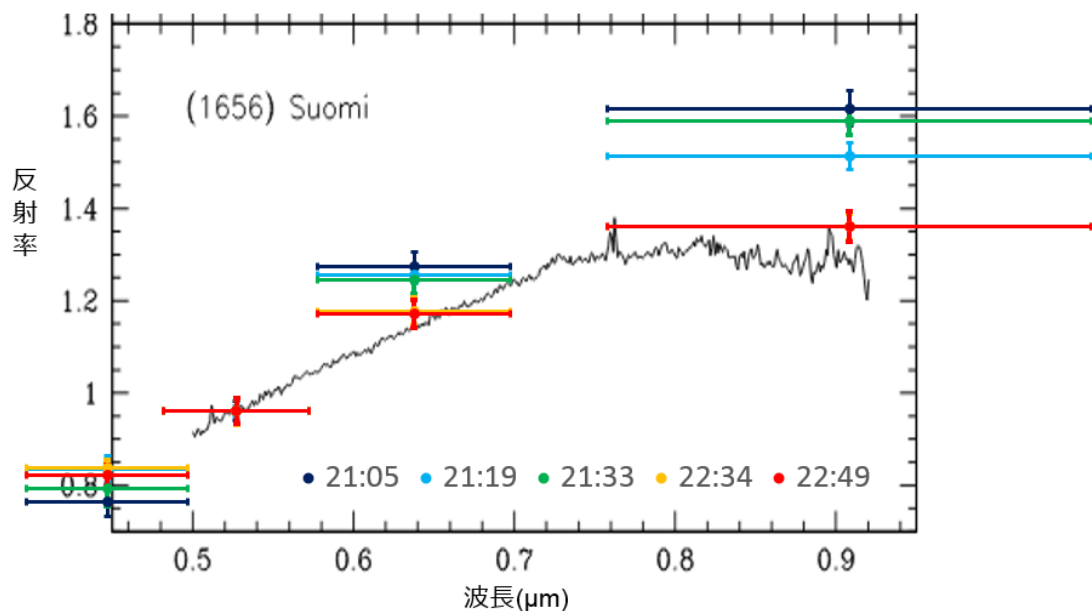


図 6.3: Suomi の各時刻の反射率スペクトル

謝辞

本研究を行うにあたり、御指導いただきました指導教員であるはしもとじょーじ准教授に心より感謝いたします。

スペースガードセンターの浦川聖太郎さんには、天文に対する基礎的な知識から観測に必要な知識等を教えていただきました。

美星天文台綾仁一哉台長、前野将太技師には星空公園の望遠鏡の整備をしていただき、また整備方法について教えていただきました。

同研究室の田中さんには観測を行う上で様々なお手伝いをしていただき、観測時の研究を進める上でのアドバイスをいただきました。戸田晃太さんには天文学における基礎知識から観測の仕方までご指導いただきました。石岡翔さんには研究を進める上で様々なアドバイスをいただき、本研究を支えていただきました。

参考文献

安部正真 (2010) 小惑星の可視測光観測から何がわかるか, ライトカーブ観測の手法, 第4回系外惑星トランジット観測研究会・第7回小惑星ライトカーブ研究会合同研究会,

http://www.toybox.rgr.jp/mp366/lightcurve/workshop/workshop2010/2010_Abe.pdf

Asteroid Finder Chart, <http://asteroid.lowell.edu/cgi-bin/astfinder>

Bus, S. J., F. Vilas, M. A. Barucci (2002) Visible-Wavelength Spectroscopy of Asteroids, In Asteroids III(W.F Bottke Jr. et al., eds.), pp.169-182.

ESO Online Digitized Sky Survey, <http://archive.eso.org/dss/dss>

Fornasier, S., B. E. Clark, E. Dotto (2011) Spectroscopic Survey of X-type Asteroids, Icarus, 214, 131-146.

福島英雄 (2004) 冷却CCDカメラによる観測入門, 彗星観測ハンドブック 2004, pp167-208.

フリーソフトウェアマカリィ, <http://www.nao.ac.jp/others/Makalii/index.html>

G2V Stars from the Hipparcos Catalog,
https://web.njit.edu/~gary/322/G2V_stars.html

浜野和弘巳 (2010) ライトカーブ観測の手法, 第4回系外惑星トランジット観測研究会・第7回小惑星ライトカーブ研究会合同研究会,
http://www.toybox.rgr.jp/mp366/lightcurve/workshop/workshop2010/2010_Hamanowa_A.pdf

星空公園HP, <http://www.bao.go.jp/hoshizora/>

木下大輔 (2003) 標準システムへの変換, 彗星観測ハンドブック 2004, pp209-211.

Landolt (1992) Landolt Equatorial Standards,
www.cfht.hawaii.edu/ObsInfo/Standards/Landolt/

宮坂正大, ライトカーブの観測の手引き, Minor Planets at 366,
<http://www.toybox.rgr.jp/mp366/>

NASA JPL HORISONS System, <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

Sanchez, J. A., R. Michelsen, V. Reddy, A. Nathues (2013) Surface composition and taxonomic classification of a group of near-Earth and Mars-crossing asteroids, *Icarus*, 225, 131–140.

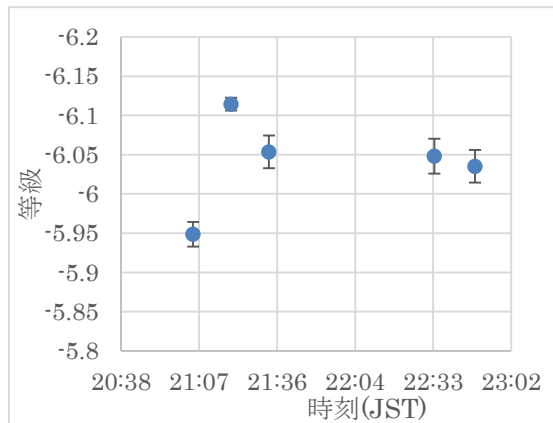
SBIG ジャパン(SBIG STL-1001E), <http://www.sbig-japan.com/STL-1001E.html>

臼井文彦, 長谷川直 春日敏測, 石黒正晃, 黒田大介, 大坪貴文 (2013) 多様なカタログデータから見えてくる小惑星帯の姿, *Spaceguard Research*, 5, 52-55.

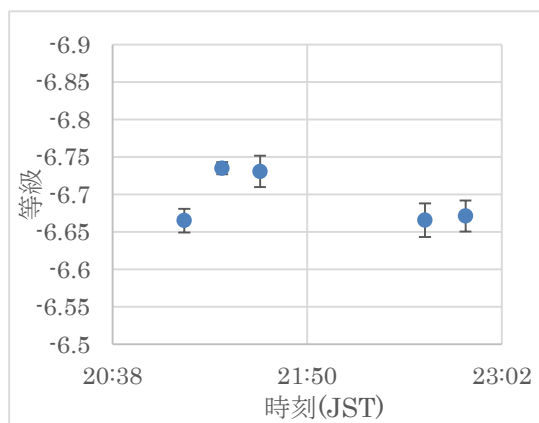
横尾武夫(1991) 宇宙を見るⅡ<応用編>, pp.319, 恒星社.

図録

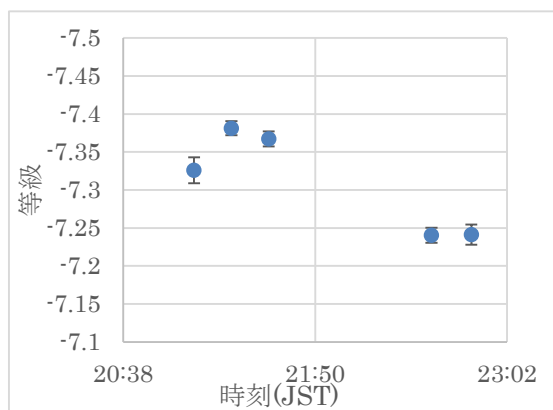
1656 Suomi 明るさと時間



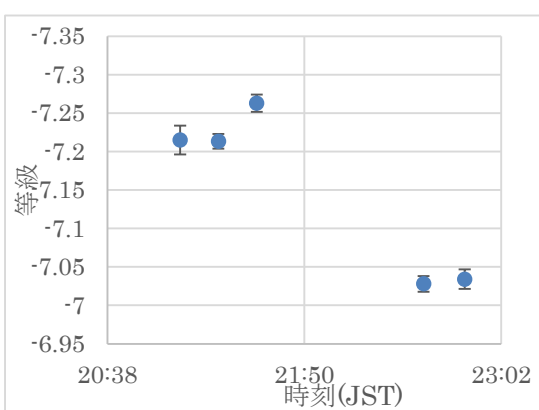
B バンド



V バンド

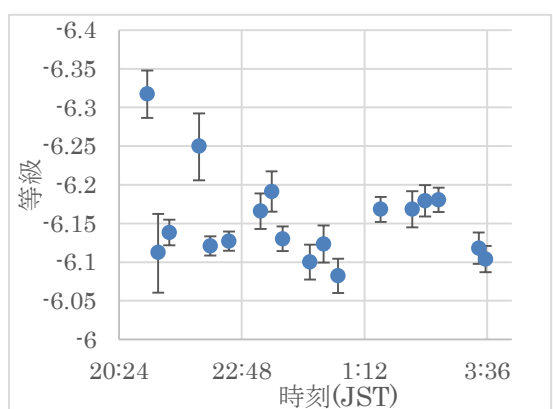


R バンド

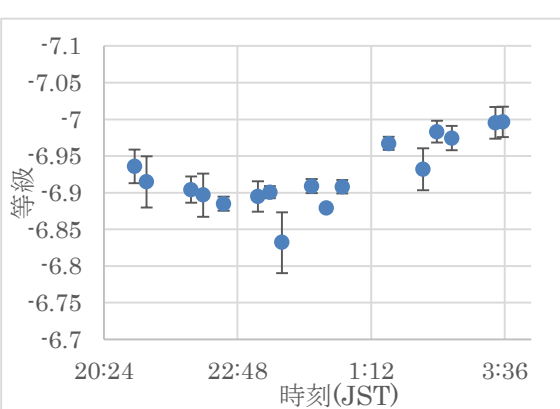


I バンド

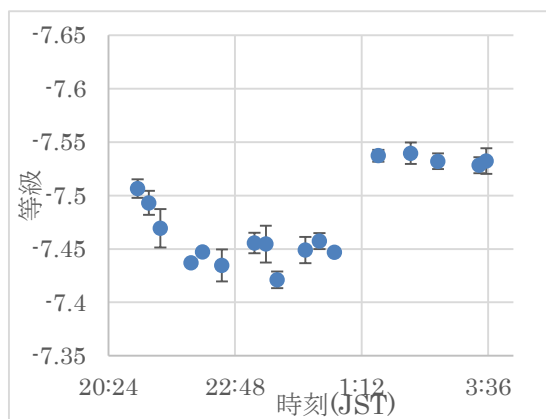
3447 Burckhalter 明るさと時間



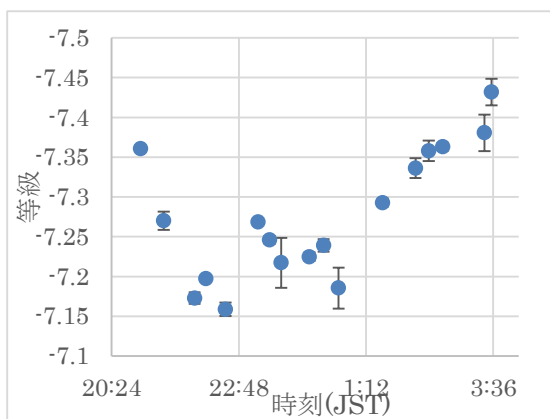
B バンド



V バンド



R バンド



I バンド