

# 光度変化から分かる小惑星の形状

## ～微弱な変化から、全体の形状を推定する～

愛媛県立松山南高等学校

マイナープラネット班

理数科3年 北本 菜々花 徳永 優希  
山本 千聖 吉岡 爽

### 1 概要

小惑星を実際に観測し、その観測した画像から光度変化のグラフを作成する。次に、推定されるモデルを作成し、室内で自転させて光度変化を捉える。その2つのグラフを比較・検討し、より近いモデルを作成していく。画像から数値に変換する過程、近似したモデルを理論的に導くことに工夫を凝らした。結果は、小惑星 Vaticana と小惑星 2014J025 の2つの小惑星の観測に成功し、さらにそれらの光度変化を捉えることに成功した。また、光度変化の精度を、観測日時ごと、推定されるモデルごとに検証することができた。小惑星の形状の候補の1つに光度変化に対応した多面体が考えられる。本研究が、観測・処理技術の向上に貢献できれば幸いである。

### 2 動機と目的

近年、小惑星探査機「はやぶさ」が小惑星イトカワの粒子を採取することに成功し、さらに、「はやぶさII」によって、小惑星リュウグウの物質を採取することに挑戦している。小惑星は、原始太陽系の構成物質がそのまま保存されており、その起源の解明に期待が寄せられている。小惑星は、光度が低く観測が難しい。しかし、条件を絞り、対象となる小惑星を選定すれば、観測できることが分かった。本研究では、実際に小惑星を観測し、その形状についての考察を行った。

先行研究では、小惑星のライトカーブ（時間経過にともなう反射光の光度変化を表したグラフ）を利用して、小惑星の自転周期などを調べていた。そこで、私たちも同じ手法を利用して、小惑星の形状を推測しようと考えた。現在、小惑星の形状を調べる方法としてレーダー観測が挙げられるが、これは莫大な費用と特殊な装置を必要とし、さらに小惑星と地球との距離がある程度近づかなければ行えない。一方、ライトカーブは、天体望遠鏡と冷却 CCD カメラがあれば比較的手軽に行える。また、この手法を確立することができれば、小惑星や他の天体に関する研究の進展にも貢献できると考えた。

### 3 基礎

- 小惑星…火星と木星の軌道間に存在し、約 60 万個が確認されている。質量が小さいため、多くは歪な形をしており、不明なものも多い。数十年に渡って最も広く使われている分類法は、デイヴィッド・トーレン（英語版）が 1984 年に発表した分類法がある。
- ライトカーブ…小惑星の自転に伴う太陽の反射光の明るさの周期的な時間変化をグラフに示したもの。

### 4 研究内容

(1) 実験 I 小惑星 Vaticana(416) のライトカーブの作成

ア 方法

(ア) 小惑星の選定

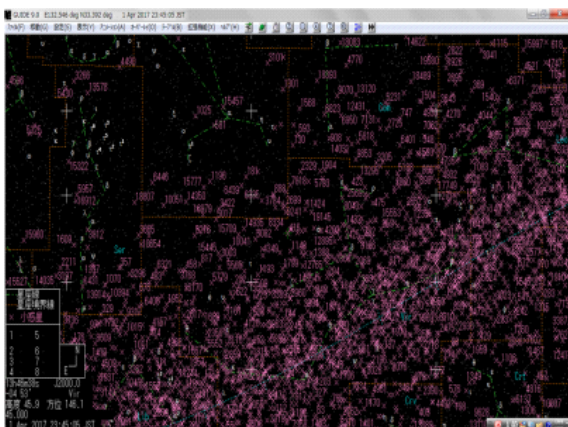


図1 「guide9」による小惑星分布

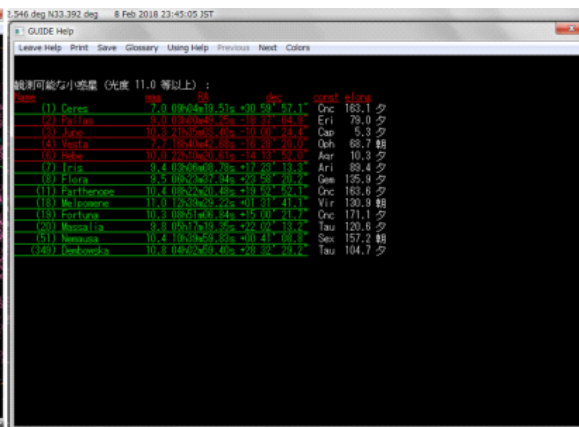


図2 「guide9」による小惑星表示

観測日時や場所に適した小惑星を探すために、書籍「天文年鑑 2017」と天文シミュレーションソフト「guide9」を用いた。図1は guide9 中の無数の点々が当時の小惑星の分布である。図2は観測可能な小惑星が緑色、不可能な小惑星が赤色で示されている。選定条件は以下の通りである。

- ・南中高度が高く、出現から出沒までの時間が長い。
- ・光度 12 より小さい（明るい天体である）。
- ・惑星や他の天体と重ならない。

そのため、当日の観測対象は小惑星 Vaticana(416) となった。

(イ) 撮影

2017年3月30日、及び4月2日に、愛媛県久万高原町にある久万高原天体観測館を訪れ、職員のご厚意により天体望遠鏡と冷却 CCD カメラをお借りして、撮影を行った。23時から2時までの3時間、露出時間は60秒、合計180枚撮影した。



図3 口径 60cm の反射望遠鏡

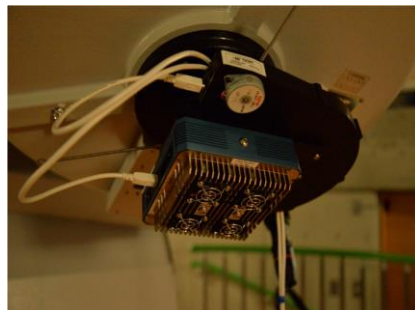


図4 冷却 CCD カメラ

(ウ)画像処理

撮影した画像には多くのノイズが映り込んでおり、わずかな光度変化の観測に支障をきたしてしまふ。そのため、撮影した画像をすばる画像解析ソフト「Makari' i」を使用し、ダーク、バイアス、フラットという減算処理を行い、画像を精練する。



図5 画像処理

(エ)測光

すばる画像解析ソフト「Makari' i」を使用し、さきほどの画像から開口測光で Vaticana の明るさを測定した。この際、小惑星の相対的な光度変化を調べるため、一緒に撮影した恒星の明るさも測定しておく。この恒星を比較星とし、それらが変光星ではないことを「guide9」や後の操作で確認する。写真1枚につき、小惑星と比較星を1～3個の光度を測定する。



図6 開口測光の様子

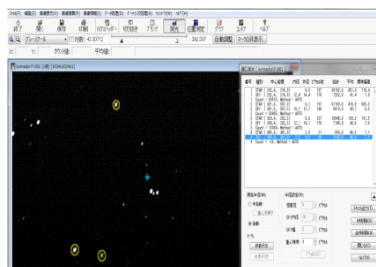


図7 撮影した星空

(オ)ライトカーブの作成

先ほどの「Makari' i」で測光した小惑星 Vaticana、数個の恒星の光度を

「Excel」に入力する。恒星の標準偏差をそれぞれ求め、最も小さいものを光度変化の小さい比較星とする。小惑星 Vaticaana の光度を比較星の光度でそれぞれ割っていく。その値を比較星に対する相対的な光度とする。相対的な光度と時間経過をもとにグラフを作成し、ライトカーブとする。

#### イ 仮説

選定した小惑星 Vaticaana は直径が 90km 前後であり、直径が 500 km 以下の天体の多くは形状が球体から外れていることから、Vaticaana のライトカーブは直線ではなく起伏のある形になると考えられる。

#### ウ 結果

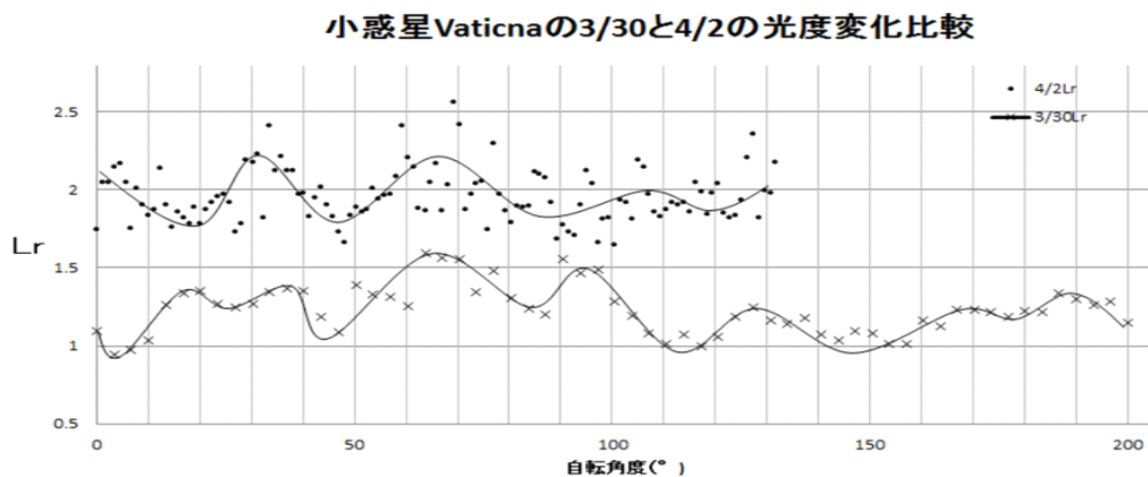


図 8 3/30 (上) と 4/2 (下) の小惑星 Vaticaana のライトカーブ

図 8 のように小惑星 Vaticaana のライトカーブは起伏に富んでいる。図 9 より、3 月 30 日と 4 月 2 日の小惑星 Vaticaana のグラフにおいて一致する部分が確認できる。

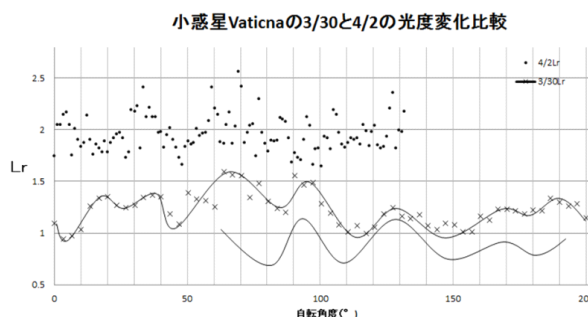


図 9 3/30 のグラフを移動したもの

#### エ 考察

小惑星 Vaticaana のライトカーブは、起伏に富んでおり複雑な形であると考えられる。また、3 月 30 日と 4 月 2 日の小惑星 Vaticaana の波形がほぼ一致していることから、同じ面における反射光だと考えられる。今回の検証を通し

て、私たちが行った観測や、様々なデータ処理によるライトカーブ作成の精度が保証されたことになる。

## (2) 実験Ⅱ 実際の観測とモデル実験の比較

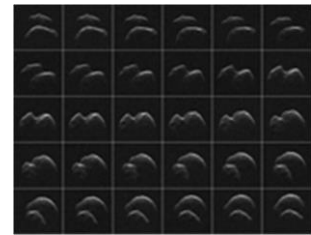
### ア 仮説

未知の小惑星 Vaticana の形状をモデル実験と比較しても、その整合性については想像の域を出ない。そこで、形状がすでに分かっている小惑星のモデルを作成し、そのモデルと実際の観測を比較すると近似したライトカーブができるのではないかと考えた。また、それができれば、整合性についても議論ができるはずである。

### イ 方法

#### (ア)小惑星の選定

私たちが小惑星 Vaticana を観測した数日後の 2017 年 4 月 19 日に、小惑星 2014J025 が地球に最接近するニュースを耳にした。地球との距離は 180 万 km。アポロ群に属される小惑星で、直径は 650m 程度で、最接近時の明るさが 11 等級になり、小型望遠鏡でも観測できる。そこで、この小惑星の撮影に挑んだ。また、NASA によるレーダー観測も行われており、**図 10** のように形状が確認できた。



**図 10** 小惑星 2014J025 のレーダー画像

#### (イ)撮影

この撮影は、時間、天候などの条件から、久万高原天体観測館の職員の藤田さんに行っていただいた。露出時間は 3 秒で統一した。23 時～翌朝 1 時まで行い、2400 枚の画像が得られた。

#### (ウ)画像処理、測光

実験Ⅰと同様に行った。

#### (エ)ライトカーブ作成

基本的に実験Ⅰと同様に行ったが、2014J025 は地球に最接近していたため、見かけ上の移動速度が大きく、追尾していくと、比較星がフレームアウトしてしまうという問題が発生した。



**図 11** フレームアウトの様子

そのため、小惑星 2014J025 の周囲では、次々に新しい恒星が映り込み、比較星が複数出現してしまった。そこで、複数の比較星の光度を1つに統一するために次の作業を行った。

- ・比較星 1、比較星 2、比較星 n があるとする。全ての比較星を比較星 1 に規格化する。
- ・比較星 n を比較星 1 に規格化する手順を以下に示す。
- ・比較星 n の光度を比較星 1 の光度で割る。その値を光度比  $\Delta L$  とする。

$$\Delta L = \frac{L_{sn}}{L_{s1}} \dots (1) \quad (L_{sn}, L_{s1} \text{ をそれぞれ比較星 1、比較星 n の光度とする。})$$

次に、比較星 n の光度を先ほどの光度比  $\Delta L$  で割る。その値を比較星 1 で規格化した比較星 n の光度  $L_{sn}'$  とする。

$$L_{sn}' = \frac{L_{sn}}{\Delta L} \dots (2)$$

この計算の根拠は、シュティファン・ボルツマンの法則にある。シュティファン・ボルツマンの法則とは、

$$L_s = \frac{4 \pi R^2 \cdot \sigma T^4}{D^2} \dots (3)$$

$$L_s = \frac{4 \pi \cdot \sigma}{D^2} \times R^2 \cdot T^4 \dots (3)'$$

定数 × 変数

( $L_s$  : 恒星の光度、 $\sigma$  : シュティファン・ボルツマン定数、 $T$  : 表面温度、 $R$  ; 恒星の半径、 $D$  : 恒星までの距離)

式(3)' が示すように恒星の光度は、定数と変数の積で示されることがわかる。つまり、比較星を規格する場合、規格化する恒星との光度比で計算すればよいことになる。式(1)、(2)の計算を 2400 枚の画像から得られた値全てにおいて行った。

#### (オ) 反射光の変化の測定

NASA のレーダー観測により公表された 2014J025 の画像を元に紙粘土で模型を作成した。この模型を回転台に乗せ、光源と光センサー「Dr. dack」を用いて模型の測光を行った (図 12)。このとき、周囲の明かりの影響を受けないようにするために、光の入らない暗室で実験を行った。自転軸の傾きが未知であるため、模型の赤道面に対する反射光の角度を 4 段階 ( $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ ) に変えて測光を行った。



図 12 実験器具

(カ) 模型のライトカーブ作成

得られた値を元にライトカーブをそれぞれ作成した。

ウ 結果



図 13 2014J025 の模型

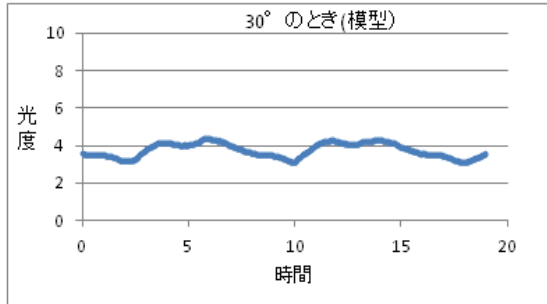


図 14 2014J025 の模型のライトカーブ

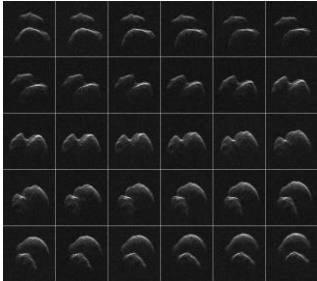


図 15 2014J025

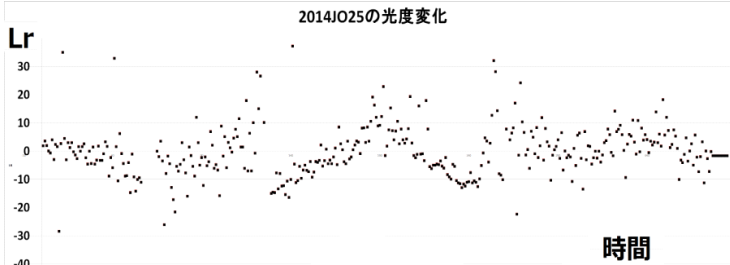


図 16 2014J025 の実際のライトカーブ

反射光の角度が  $30^\circ$  のとき、2014J025 の模型と実際に観測した 2014J025 のライトカーブに近似する部分が現れた(図 14)。

エ 考察

小惑星 2014J025 の 1 周期分のデータが無いので、完全に一致するとは言えないが、2014J025 の模型と近似する部分が現れたため、私たちのライトカーブの作成方法はそれほど外れてはいないと考えられる。

(3) 実験Ⅲ 小惑星 Vaticana の形状の推測

ア 方法

(ア) 模型の作製

小惑星の形状とライトカーブの関係性を調べるために、様々な形の模型を作った。これを模型 A~F とする。また、模型 E、F については実験 I の Vaticana のライトカーブ(図 8、9)を再現することを目標に作成した。

(イ) 反射光の変化の測定

実験 II (オ)と同様に 3 周分の測光を行った。

(ウ) ライトカーブ作成

(イ)で得られた値を元にライトカーブを作成した。ただし、値の変化の近似部分から周期を推測し、一周分に分けて直してグラフにした。

(エ) 反射面積変化の測定

「Jimage」というソフトを使用して 2014J025 の模型の回転に伴う面積変化を調べた。10° ごとに回転させた模型をデジタルカメラで撮影し、同時に画面にスケールを写し、ピクセル比から面積を導出する。

#### イ 仮説

模型が球の一部を持つ場合、この部分は回転によって面積が変化しないため、ライトカーブに平坦な部分が見られると推測する。また、反射光の変化は、模型が光を反射している面の面積の変化に伴うと考えられるため、反射面積変化を示したグラフとライトカーブには類似する部分が見られると考えられる。

#### ウ 結果

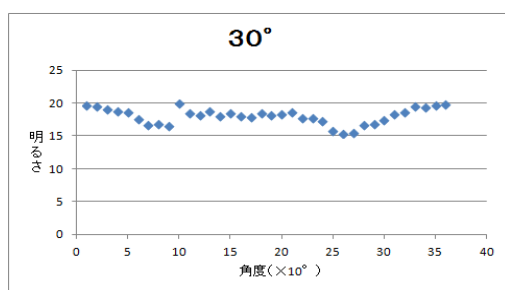


図 17 模型の回転に伴う面積変化

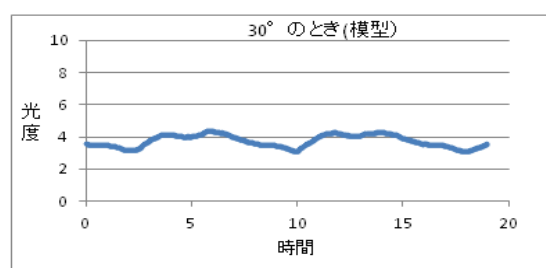


図 18 実験から作成したライトカーブ

上のような起伏のある形を持ったライトカーブが得られた (図 18)。仮説に反し、球体の一部を持つ模型 A や B、D のライトカーブに、横軸に平行な直線部分は見られなかった。模型 E、F のライトカーブで Vaticana のライトカーブ (図 8、9) を再現することはできなかった。さらに、2014J025 の模型の面積変化のグラフとライトカーブの形状は類似しているとは言えず、この間に相関は見られなかった。

#### エ 考察

実験 I で作成した Vaticana のライトカーブ (図 8、9) は、自転角度にしておよそ 130 度分の範囲に 4 個のピークが見られた。これは、自転一周周期分に換算すると、約 12 個のピークが見られると考えられる。しかし、この実験でそのようなライトカーブは得られなかった。そこで、最も多くのピークを持っていた模型 F に着目すると、複数の突起を持つような形状であったため、Vaticana も多くの突起を持つ形状なのではないかと推測した。

#### (4) 実験Ⅳ 模型の突起数とピーク数の関係性の推測

##### ア 方法

##### (ア) 模型の作製

赤道面に 1~5 個の突起を持つ模型を作製した。

##### (イ) 反射光の変化の測定、ライトカーブ作成



実験Ⅲ(イ)(ウ)と同様に行った。

イ 仮説

実験Ⅲの模型Fは、突起が4つありライトカーブのピークも4つだったので、突起数とピーク数は対応していると考えた。

ウ 結果

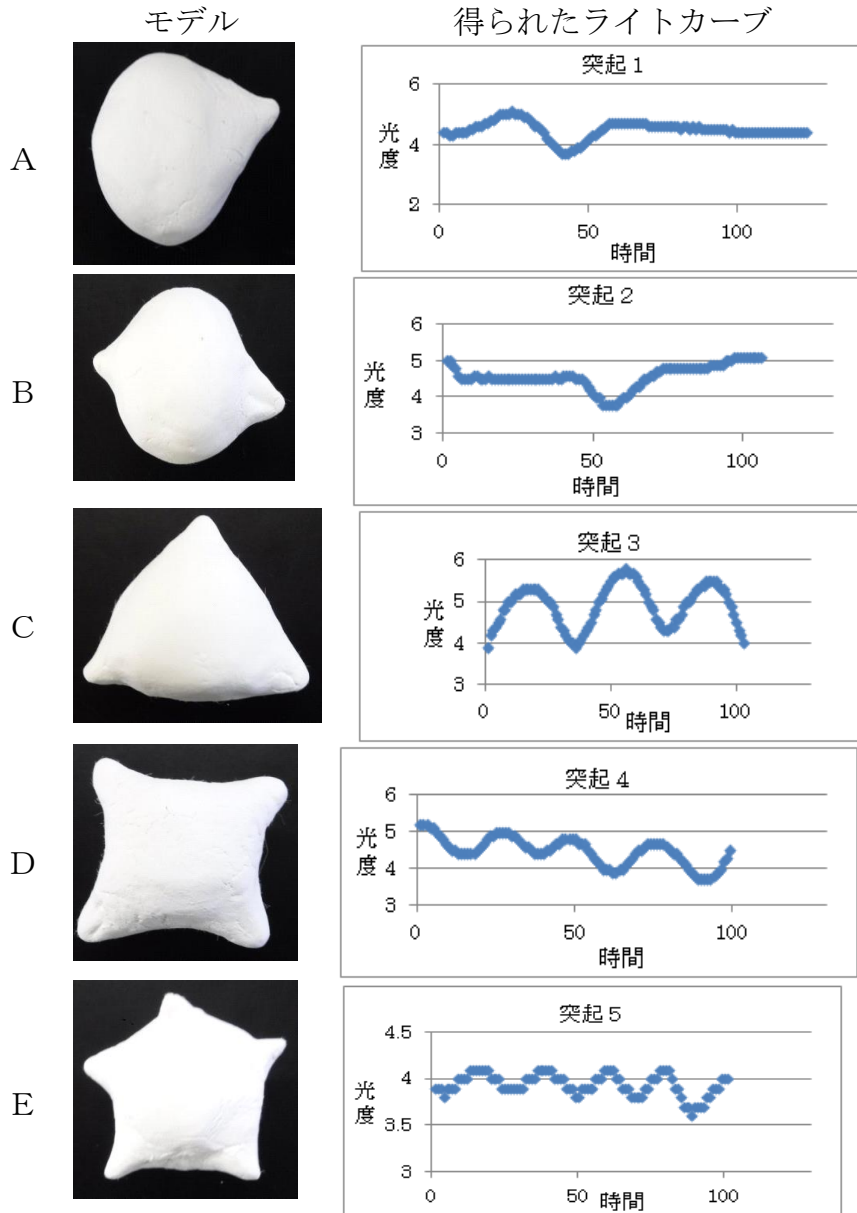


図 19 モデルとライトカーブの関係

エ 考察

図 19 より、突起数が3以上のモデルについては、突起数とライトカーブのピークの数是一致的である。しかし、突起数1と2については突起の数に関係しない。そこで、ライトカーブのピーク数は模型の突起数ではなく模型の突起

と突起の間の面の数に対応しているのではないかと考えた。

## 5 結論と展望

実験Ⅳの考察より、小惑星の自転一周分分のデータが得られた場合、ライトカーブのピーク数から小惑星の面の数が推測できる。そこで、ピーク同士の間隔からその面が赤道面方向に占める角度が求められる。さらに、小惑星全体が同じ材質で組成されており、アルベドが同じであると仮定した場合、ピークの数値は小惑星の受光面（または反射光の面）と同じになると考えられる。このような手順で、ライトカーブから自転軸が1つの小惑星の形状を推測することは可能であると考えた。

しかし、この手法は自転軸を中心とする赤道面の形が円に内接する多角形でなければ成立しない。そのため今後は、この赤道面がどのような形になるのかを推定する方法や、自転軸方向の長さを決定する手法について研究していきたい。さらに、実際に未知の小惑星を自転1周期分以上を観測し、形状を推測したい。

## 6 謝辞

本研究にあたりご指導、ご協力をいただいた久万高原天体観測館の藤田様にこの場をお借りいたしましてお礼申し上げます。

## 7 参考文献

- 「はやぶさ後継機に向けた小惑星(162173)1999JU3の観測」  
川上恭子 安部正真 長谷川直 春日敏測(2010)
- 「多色測光観測による小惑星反射率スペクトルの測定」 矢野和希(2016)
- Dr. Lance. A. M. Benner(2017).  
Goldstone Radar Observations Planning:Asteroids 2014J025. (2017)
- 「M67とNGC7790のCCD測光観測」  
中野仁 小野智子 志岐成友 佐藤公彦 石田俊人 山岡均
- 「自主学習型 天文解析体験プログラム」  
伊藤信成 山縣朋彦 濱部勝 西浦慎悟 三戸洋之
- 「天文学入門Ⅰ 観測実習」  
国立天文台 岡山天体物理観測所
- 「小惑星の自転軸と光度変化」  
「自転軸を用いた小惑星の形状決定の手法の確立」  
福岡県立小倉高等学校 SS 天文研究会