

「はやぶさ 2」地球スイングバイに係る見かけの等級の変化推定

三浦 昭^{*1}, 山本 幸生^{*1}, 吉川 真^{*1}

Estimation of the Variation of Apparent Magnitude during the Earth Swing-by of "Hayabusa2"

Akira MIURA^{*1}, Yukio Yamamoto^{*1} and Makoto YOSHIKAWA^{*1}

Abstract

On December 3, 2015, an Earth Swing-by operation of the asteroid explorer "Hayabusa2" was performed. Several observatories successfully measured the brightness of "Hayabusa2". The variation of the apparent magnitude of "Hayabusa2" measured during the swing-by is hard to explain using a simple hypothesis based on the distances of the observatories and "Hayabusa2".

In this paper, apparent magnitude of "Hayabusa2" is estimated using modeling and rendering techniques based on computer graphics. The method is found to be useful to roughly estimate the variation of the magnitude, while more consideration is required to perform precise estimation.

Keywords: Hayabusa2, Earth swing-by, visualization, magnitude

概要

2015年12月3日の小惑星探査機「はやぶさ 2」地球スイングバイにおいて、各地点で観測された「はやぶさ 2」の見かけの等級の変化は、各観測地点と「はやぶさ 2」との距離のみの簡単な仮定では説明の難しいものであった。

本稿においては、「はやぶさ 2」の見かけの等級を CG 技術に基づいたモデリングとレンダリングによって推定した。その手法は、光度変化のあらましを推定するには有用である一方で、精密な推定のためには、なお一層の検討が必要であることが明らかとなった。

キーワード: はやぶさ 2, 地球スイングバイ, 可視化, 等級

1. はじめに

1.1. 背景

2015年12月3日に、小惑星探査機「はやぶさ 2」が、小惑星 Ryugu (162173, 1999 JU₃) に向かう途上で、地球スイングバイを実施した。日本上空の

通過は18:00から19:00 [JST] 頃で、19:08 [JST] 頃が最接近の時刻であった。

これに際して、はやぶさ 2 地球スイングバイ観測キャンペーン²が展開され、多くの観測地点が「はやぶさ 2」の観測に成功した。その内、いくつかの観測地点は「はやぶさ 2」の見かけの等級を測定した。その概要を図 1^[1]に示す。以後、本稿における

doi: 10.20637/JAXA-RR-17-009/0006

* 平成30年1月18日受付 (Received January 18, 2018)

^{*1} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace, Exploration Agency)

² 日本惑星協会, はやぶさ 2 地球スイングバイ観測 Campaign Site, <http://www.planetary.jp/hayabusa2/hayabusa2swingby/> (2017年10月28日現在)

時刻表示は、別段の記載が無い限り、図 1 に準じて、1 日を単位とした世界時 (UT) で表すものとする。

図中の各観測地点及び観測に使用された装置類を以下に示す。

- NHAO: 兵庫県立大学西はりま天文台³
なゆた望遠鏡 / 可視多波長撮像装置 MINT
- KISO: 東京大学木曾観測所⁴
105cm シュミット望遠鏡 / Tomo-e Gozen
- BSGC: 美星スペースガードセンター⁵
1m 望遠鏡 / Volante
- かわさき宙と緑の科学館²
20cm 屈折型望遠鏡 / WAT-902H2 ULTIMATE

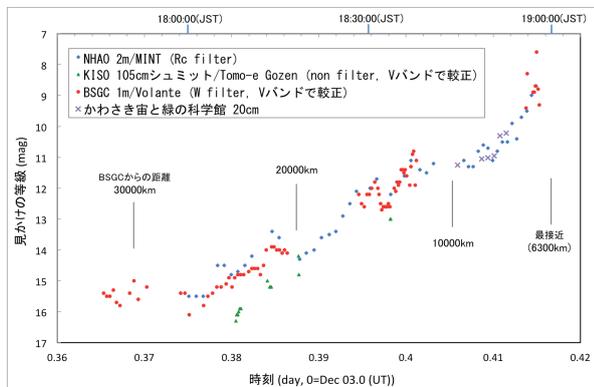


図 1 「はやぶさ 2」地球スイングバイ時の見かけの等級の変化^{[1]6}

観測結果の内、かわさき宙と緑の科学館で得られた見かけの等級については、同館の紀要において、 ± 0.5 等から ± 1.1 等のエラーが付された報告^[2]がなされている。同報告によると、ここで見積もられたエラーは、「測定誤差も含まれるが、はやぶさ 2 が非常に短時間に光度を変化させていた事実もあり、

³ 兵庫県立大学天文科学センター西はりま天文台、「ニュース： なゆた望遠鏡による地球スイングバイ中のはやぶさ 2 の撮影(まとめ)(2015/12/04)」, <http://www.nhao.jp/research/news/news151204.html>, (2017 年 10 月 28 日現在)

⁴ 東京大学木曾観測所、「はやぶさ 2 地球スイングバイ観測プロジェクト」, <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/NEWS/hayabusa2/hayabusa2.html>, (2017 年 10 月 28 日現在)

⁵ 日本スペースガード協会 はやぶさ 2 観測速報 (2015 年 12 月 3 日), <http://www.spaceguard.or.jp/RSGC/haya2.html>, (2017 年 10 月 28 日現在)

⁶ はやぶさ 2 プロジェクト, 「はやぶさ 2」アウトリーチ活動についての天文学会での発表内容, <http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20160314/>, (2017 年 10 月 28 日現在)

この 2 つの影響が値に反映していることにより少々大きな値をとっている」ものである。

図 1 の大凡の傾向としては、「はやぶさ 2」が観測地点に接近するに連れて明るくなる様が見て取れる。しかしながらその変化は、観測地点と「はやぶさ 2」との距離のみを根拠としたのでは説明のつかないものであった。

1.2. 研究の方向性と、本稿のあらまし

筆者らは従来より「はやぶさ」の小惑星イトカワ探査等で CG 技術を用いた可視化^{[3][4]}等、係る探査分野における、リアリティの高い可視化手法についての研究を進めてきた。これはアウトリーチ分野でのリアリティ向上に寄与するのみならず、探査ミッションの分野で実用に耐えうる模擬手法の確立をも目指すものである。

例えば「はやぶさ 2」探査においては、分離型の装置の幾つかが搭載カメラの撮像対象に含まれることが想定されており、事前の運用訓練においても、各機器類の形状モデルを含めて、実際の光学観測を模擬することが求められている。そのためには形状モデルやその反射特性についての検討が課題となる。

このように、CG 技術を用いた模擬手法は、本稿に述べるような、地上観測における光度変化推定にとどまらず、探査機搭載の撮像系に係る計画や訓練等においても有用であると考えられる。

そのような模擬手法の確立を目指すにあたって、本稿においては、形状モデルに主眼を置いて、「はやぶさ 2」の地球スイングバイにおける見かけの等級の変化を 3D CG ソフトウェアにて模擬し、その手法の可能性と課題について検討する。

以下、まず 2 節において CG を用いた等級の計算手法について述べる。3 節では、その手法を単純な形状モデルに適用した場合の計算について述べる。4 節では観測されたような光度変化を生じうる形状について検討し、5 節で簡易の「はやぶさ 2」形状モデルを用いた光度変化の計算について述べる。6 節で、まとめを述べる。

2. 等級の計算手法

本節では、CG を用いた等級の計算手法について述べる。

2.1. 計算手法の概要

本稿における「はやぶさ 2」の見かけの等級の求め方を以下に示す。

- 「はやぶさ 2」地球スイングバイの各時点における「はやぶさ 2」や太陽、観測地点等の位置・姿

勢情報等に基づいて、それらの位置関係を CG ソフトウェアを用いて再現し、観測地点 (CG ソフトウェアにおける視点) から見た「はやぶさ 2」の形状モデルをレンダリングする。

- 各シーンにおける視線方向は、「はやぶさ 2」形状モデルの原点が視野中心となるように計算する。
- レンダリング結果の画像について、全画素の明るさを合計したものを、そのシーンにおける「はやぶさ 2」の明るさとする。
- 計算された明るさに基づいて、等級を計算する。

次節以降に、各要素の概要を示す。

2.2. CG ソフトウェア

CG ソフトウェアとしては POV-Ray⁷ を用いる。POV-Ray はスクリプト (テキスト) で記述されたシーンファイルに基づいて レイトレーシング を実行するソフトウェアである。

2.3. 各種パラメータ

本稿においては、3次元空間上に観測地点 (CG における視点位置) と「はやぶさ 2」(次節に述べるような、種々の形状モデル) を配置したスクリプトを作成し、それぞれの時刻に観測地点から見た形状モデルをレンダリングする。

観測地点に関する値を表 1 に示す。本稿において、地球は球で近似し、その球上の緯度・経度に基づいて観測地点の座標を定める。本稿においては、係る緯度・経度は美星スペースガードセンター付近を採用する。

表 1 観測地点に関する値

項目	値
観測地点	北緯 34° 40′ 19″ 東経 133° 32′ 35″ (美星)
地球の半径	6,356.752314 [km] ⁸

各時刻における「はやぶさ 2」の位置・姿勢、太陽の位置、地球の自転は SPICE カーネルから求める。「はやぶさ 2」の位置・姿勢は Hayabusa2 Science Data Archives から公開されている SPICE カーネ

ル⁹を用いる。太陽・地球の位置や自転は、NASA の NAIF (Navigation and Ancillary Information Facility)¹⁰ から公開されている SPICE カーネルを用いる。それぞれの SPICE カーネルを表 2 に示す。

表 2 座標計算に用いる SPICE カーネル

項目	SPICE カーネル
「はやぶさ 2」の位置	hyb2_20151123-20151213_0001m_final_ver1.oem.bsp ⁹
「はやぶさ 2」の姿勢	hyb2_aocsc_2015_v01.bc hyb2_hk_2015_v01.bc ⁹
太陽・地球の位置	de432s.bsp ¹⁰
地球の自転	earth_000101_151229_151007.bpc ¹⁰

2.4. 形状モデルの倍率

現実の「はやぶさ 2」のサイズと位置情報を用いると、本稿で用いたソフトウェアとスクリプトの組み合わせでは正常にレンダリングされなかったため、計算される軌道等に対して、レンダリングされる「はやぶさ 2」の縮尺は元の形状モデルの 10,000 倍とすることとした。この場合、最接近時の「はやぶさ 2」の見かけの大きさは、視野角にして 0.7 度程度となる。これは「はやぶさ 2」の形状をレンダリングするにあたって若干の誤差を生じるものであるが、次節以降に述べるように、本稿の手法はそれ以上にモデリングの誤差が見込まれるため、本稿における検証の範囲では 10,000 倍の拡大は支障のないものであると判断した。また本稿で計算対象とした時間帯 (時刻 0.36 から 0.42 の範囲) において、レンダリングされた「はやぶさ 2」の 10,000 倍の形状モデルが地球の形状モデルに隠蔽されないことを、事前に確認した。

視野角は、別途記載する場合を除いて、原則として 0.7 度の設定とする。これは計算対象とする時間帯に渡って「はやぶさ 2」全体が視野内に収まるようにするためである。

⁷ Persistence of Vision Raytracer Pty. Ltd., POV-Ray - The Persistence of Vision Raytracer, <http://www.povray.org/> (2017 年 10 月 28 日現在)

⁸ Wikipedia, 地球, <https://ja.wikipedia.org/wiki/地球> (2017 年 10 月 28 日現在)

⁹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, Hayabusa2 Science Data Archives, <https://www.darts.isas.jaxa.jp/planet/project/hayabusa2/> (2017 年 10 月 28 日現在)

¹⁰ NASA, SPICE An Observation Geometry System for Space Science Missions, <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/> (2017 年 10 月 28 日現在)

2.5. 輝度・反射モデル

レンダリングにあたって、背景は黒色とする。

反射モデルは、「拡散反射」もしくは「鏡面反射」を用いる。また、反射モデルでの表現が困難と思われる場合や、比較の目的等では、陰影やハイライト等を伴わない単色のレンダリングを併用する。

本稿において、各反射モデルの実装方法は次のように定めた。これらの反射モデルや各属性値は経験的に定めたものであり、本稿で示すような初歩的な検討を対象としたものである。将来、厳密な等級計算をする段階に至った場合は、係る属性値のみでなく、各部品の素材に対していかなる反射モデルを採用するかを含めた個別検討が必要になると考えられる。

● 拡散反射

拡散反射の計算にあたっては、POV-Rayにおけるdiffuse属性を用いる。diffuse属性は、拡散反射モデルに基づいて明るさを計算するための属性である。diffuse属性の値は、計算結果の画像の各画素が飽和しない程度の値とする。

● 鏡面反射

鏡面反射で近似できるオブジェクトに光源が反射される様（ハイライト）を計算するため、POV-Rayにおけるspecular属性とroughness属性を用いる。この内、specular属性はハイライトの明るさを計算するための属性である。roughness属性は、その「鏡面」の粗さを指定する属性である。本稿においては、鏡面反射は原則として光源（太陽）の映り込みのみ考慮し、他のオブジェクトが映り込む様は計算対象外とする。

Specular属性の値は、計算結果の画像の各画素が飽和しない程度の値とし、roughness属性の値は、原則として0.003とする。

● 単色

陰影を考慮しない、もしくは考慮することが困難と思われるオブジェクトについては、単色で表現する。単色の計算にあたっては、POV-Rayにおけるemission属性を用いる。emission属性は、発光による明るさを計算するための属性であり、光源の影響を受けない。

2.6. 等級の計算

以上の条件でレンダリングしたCG画像について、画像内の全画素の明るさを合計した値をその画像の明るさとして等級に換算する。等級に換算するにあたっては、天文の等級表現と同様に、等級差が5のときに明るさが100倍となるように対数計算する。

等級換算の根拠となる明るさがCG画像由来であるため、結果として得られる等級の絶対値は実際に観測された見かけの等級と直接比較できるものではない。また各部品の反射特性を厳密にモデリングしたものではないため、本稿においては異なる部品同士の等級を絶対値で比較することも控えることとする。

以後、等級に関する図には、傾向を比較するために、同時刻に実際に観測された見かけの等級として、図1に示した観測結果を重ねて表示するが、これらは直接明るさを比較するためのものではない。

3. 単純な形状モデル

本節では、単純な形状モデルを用いた計算について述べる。

3.1. 形状モデル

等級の算出にあたっては、2節の手法に以下の形状モデルを適用する。

● 立方体（鏡面反射）

鏡面反射の立方体で近似したモデルである。立方体の各面は、直方体で近似される「はやぶさ2」筐体の各面に並行とする。

● 立方体（拡散反射）

拡散反射の立方体で近似したモデルである。立方体の各面は、直方体で近似される「はやぶさ2」筐体の各面に並行とする。

● 球体（単色）

単色の球体（レンダリング結果としては、単色の円）で近似したモデルである。

● 球体（拡散反射）

拡散反射の球体で近似したモデルである。

3.2. 計算結果

図2に、前述の単純な形状モデルを用いて等級の変化を計算した結果を示す。図示した等級は、実際に観測された等級と傾向を比較しやすいようにオフセットを加えてある。

以下、幾つかの時刻に分けて考察する。

実際に観測された等級の傾向としては、時刻0.375付近までは殆ど増光しない、もしくは観測誤差が小さいのであれば、減光傾向にあると読み取れる。この傾向を説明できる可能性があるのは球体（単色）もしくは球体（拡散反射）であるが、いずれも「はやぶさ2」が接近するにつれ増光する傾向にあり、仮に減光があったとしたら、それがどのような原因によるものか検証する必要があると考えられる。

時刻 0.375 付近から時刻 0.4 付近までは不規則な増光と減光を繰り返しており、そのゆらぎが観測誤差によるものなのか、探査機の形状に由来するものなのかは、観測誤差・形状モデル双方からの検討が必要であると考えられる。おおまかな傾斜は立方体（拡散反射）の傾斜と似ているが、本稿の対象とする時間帯においては、「はやぶさ 2」の+Z 面は太陽に対してほぼ垂直となっていたため、+Z 面が観測地点を向いていなかった、時刻 0.392 付近までは立方体（拡散反射）をほとんど視認できない状態となり、立方体（拡散反射）のみで現実の光度変化を説明するのは困難である。

実際に観測された等級では、時刻 0.405 から 0.412 付近の間は、再び立方体（拡散反射）の傾斜と同様の増光が見て取れる。0.413 以降の急激な増光は、立方体（鏡面反射）の類似で説明できる可能性がある。

仮に、これらの単純な形状モデルを組み合わせる実際に観測された光度変化を説明するとしたら、図 3 のような加算の例が考えられるが、細部については、さらに詳細な形状モデルの検討が必要であると考えられる。

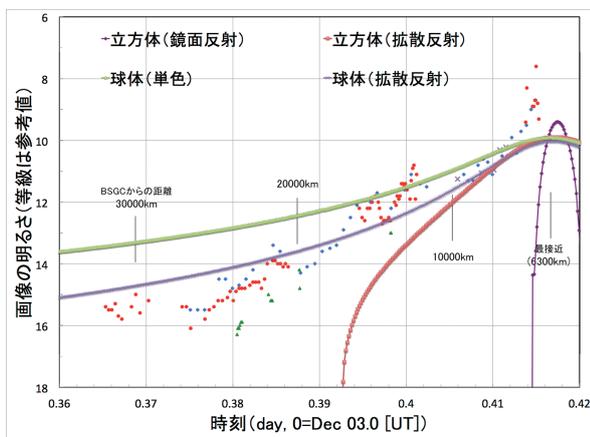


図 2 単純な形状モデル（単体）

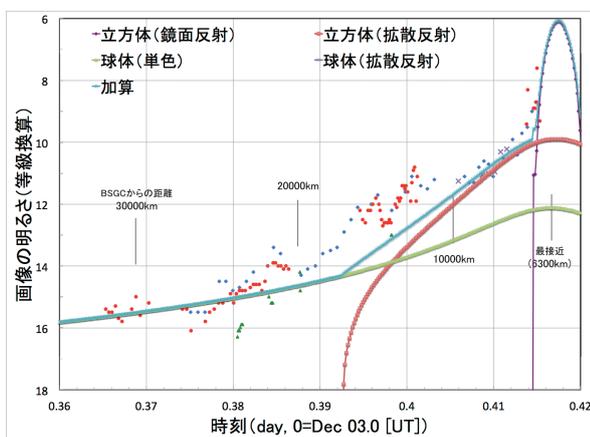


図 3 単純な形状モデル（加算）

4. 特定時間帯の増光

本節では、3 節に挙げたような単純な形状モデルの組み合わせでは説明困難と思われる、時刻 0.39 付近から 0.4 付近の光度変化について、別の形状モデルを用いた検討を行う。

4.1. 円錐を用いた形状モデル

「はやぶさ 2」の筐体、特に+Z 側の面には、様々な部品が取り付けられており、さらに各々の部品は多層断熱材 (Multi-Layer Insulation: MLI) 等の柔軟な素材で覆われて不定形の外観となっている。このような形状を CG モデルで再現するのは容易ではないため、本稿においては、近似モデルを用いて、時刻 0.39 付近から 0.4 付近にかけて増光するようなパターンがありうるかの検討を行う。

以下に近似モデルの作成方法を示す。数値は「はやぶさ 2」形状モデルにおける 1m を単位とする。

- 構成要素は底面が-Z 方向を向いた円錐とし、その高さを 0.01 とする。
- 円錐の底面(円)の半径を r とすると、間隔 $\sqrt{2}r$ の正方格子の、各格子点上に円錐を配置する。
- 原点から半径 1 以下の範囲にある円錐は鏡面反射とし、原点から半径 1 を超えて 2 以下の範囲にある円錐は黒色（反射しない）とする。
- 他の格子点には円錐を配置しない。

以上の手順により、概ね半径 1、高さ 0.01 の円状で、+Z 方向（太陽方向）に対して一定角度の面を持つ鏡面反射オブジェクトを作成できる。

4.2. 計算結果

図 4 に、円錐の頂角を 170 度から 80 度まで 10 度刻みで変化させた場合の、係るオブジェクトの光度変化を示す。比較のために、平面（半径 1 の円）で構成された鏡面反射オブジェクトも示す。またオブジェクトの見え方の例を図 5 に示す。係る視野角は 0.7/3 度とした。

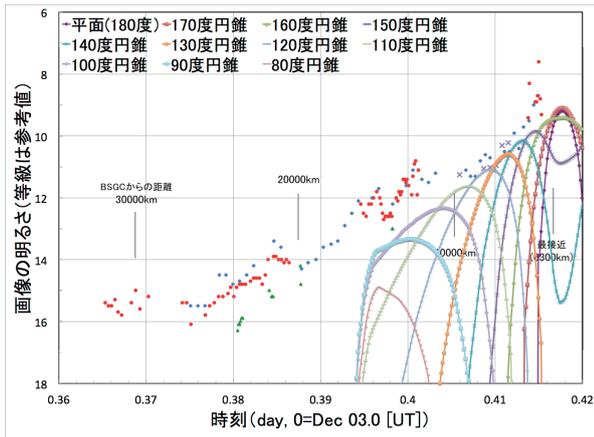


図 4 円錐を用いた形状モデル

この結果より、例えば頂角 90 度の円錐を構成要素とするオブジェクトは、0.395 から 0.45 付近で増光することが見て取れる。また他の、頂角を変えたオブジェクトも、特定の時間帯に増光する様子が見て取れる。

本節の結果から即断できるものではないが、「はやぶさ 2」の +Z 面に取り付けられた様々な構造物は、その取付角度（もしくは貼り付けられたシートがなす角度）に応じて、特定の時間帯に増光する要因となっている可能性があると考えられる。



頂角 90 度 時刻 0.395 頂角 90 度 時刻 0.400 頂角 160 度 時刻 0.420

図 5 オブジェクトの見え方の例

5. 「はやぶさ 2」形状モデル

本節では、「はやぶさ 2」の CG モデルを用いた光度計算について述べる。

5.1. 形状モデルの概要

図 6 に、使用した形状の概略を示す。図中の矢印は、「はやぶさ 2」形状モデルの座標系における +X 方向、+Y 方向、+Z 方向を示している。なお図中の色は各部品の形状や位置関係を視認しやすくするために着色したものであり、実際の計算に用いた反射モデルを反映したものではない。実際の計算に用いた反射モデルの使い分けは 5.2 に示す。

対象時刻における姿勢に基づいて計算した場合に太陽光が届かないと思われる部品は、原則として割愛している。現実には多重反射により太陽光が届く

範囲があると考えられるが、本稿の反射モデルでは多重反射を考慮していないため割愛した部品も存在する。形状モデルの源泉となったデータは CAD データであるため、筐体の多くを覆っている MLI の形状は再現されていない。+Z 面に置かれた種々の部品の多くは割愛し、4 節で述べたような円錐での近似を用いた。図 6 では円錐の配置が不明瞭であるため、図 7 に詳細を示す。

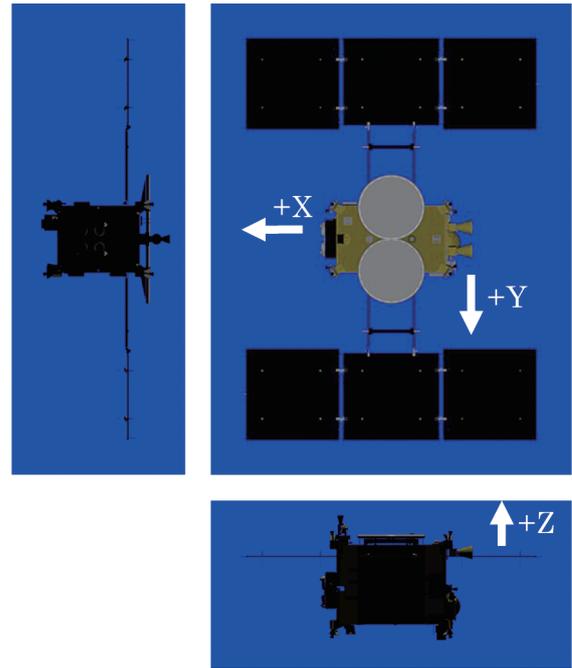


図 6 「はやぶさ 2」形状モデル

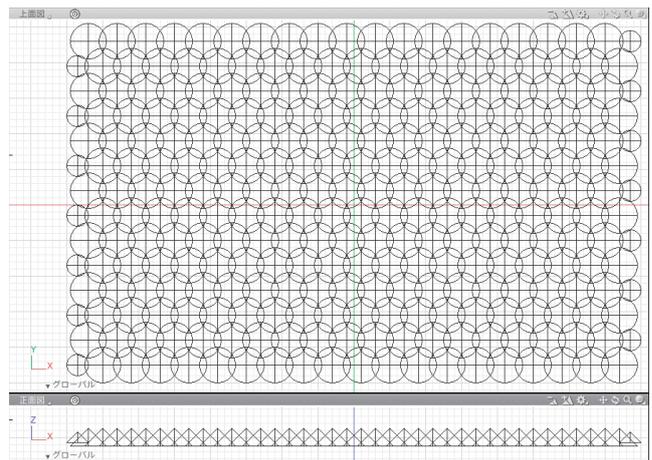


図 7 「はやぶさ 2」形状モデル+Z 面の円錐配置

5.2. 形状の構成要素(部品)と反射モデル

「はやぶさ 2」の形状は、以下の部品群に分けて光度計算を行う。部品名称の後に、各部品の光度計算に用いる反射モデルを記す。

- 鏡面反射 (+Z): 鏡面反射
+Z 側に位置する鏡面反射的要素の内、平面で近似

しうるものを対象とする。太陽電池パドル、高利得アンテナを覆うゲルマニウム蒸着カプトンシート等が想定される。高利得アンテナのシートは、地上で撮影された写真においては、シートの自重により下の構造が浮き出ているが、重力の影響が異なる宇宙空間での形状を表しているとは限らないため、本稿においては特別な凹凸は仮定しないこととする。

● 銀色（平面）：鏡面反射

他で特筆されていない、平面で構成される銀色の素材（露出部分）を対象とする。

● MLI（平面）：鏡面反射

MLI で覆われた部分の内、比較的平面で近似できると思われる範囲を対象とする。

● IES：鏡面反射・拡散反射（混在）

イオンエンジン（Ion Engine System: IES）関係の部品を対象とする。

● MLI (+Z 側)：鏡面反射

筐体の+Z 側を覆う MLI を角度 45 度の円錐の集合で模擬した場合の計算結果を示す。その形状を図 7 に示す。これは実際の MLI の形状を再現したものではないため、相応の誤差が見込まれる。

● HGA（縁）：鏡面反射

高利得アンテナ（High-Gain Antenna: HGA）の縁を覆うシートを模擬している。図 6 に示すように、不規則な形状をトーラス状のモデルで模擬しているため、MLI 同様に、相応の誤差が見込まれる。

● MLI (MGA)：鏡面反射

中利得アンテナ（Medium Gain Antenna: MGA）の MLI 部分の形状を対象とする。

● MGA Horn：単色

中利得アンテナの矩形ホーンを対象とし、最大限見えた場合の計算結果を示す。実際には、その多くが暗色のシートで覆われているため、レンダリングされる面積ほどの影響は無いと考えられる。

● SAP（拡散反射）：拡散反射

太陽電池パドル（Solar Array Panel: SAP）の拡散反射成分を対象とする。太陽電池パドルも暗色であるため、レンダリングされる面積ほどの影響は無いと考えられる。

● STT：鏡面反射

スタートラッカ（Star Tracker: STT）を対象とする。

● HGA (-Z 側)：単色

高利得アンテナの裏側（-Z 側）の構造物を対象とする。この部分は、本来であれば、筐体の+Z 側を

覆う MLI や高利得アンテナの裏側等で太陽光が複数回反射したものを計算する必要がある。しかしながら、いずれも複雑な形状となっており、詳細な計算は困難である。そのため本稿においては、高利得アンテナの背面が見える領域を面積計算し、明るさの代替とする。

● その他：鏡面反射・拡散反射（混在）

上記以外の諸々の部品を包含する。

5.3. レンダリング事例

図 8 に、時刻 0.4 付近におけるレンダリングの例を示す。

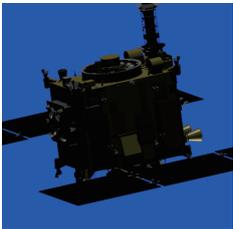
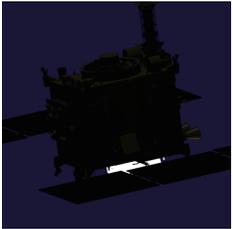
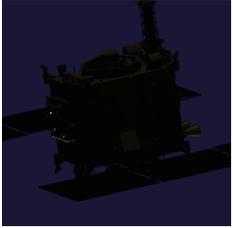
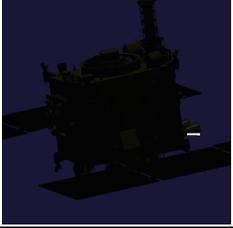
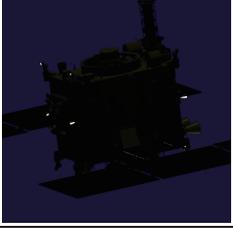
レンダリング例	該当する位置
参考形状	
高利得アンテナ (HGA)	
イオンエンジン (IES)	
スタートラッカ (STT)	
その他	

図 8 レンダリングの例（時刻 0.4 付近）

参考形状は、当該時刻に美星スペースガードセンターから観測したと仮定した場合の「はやぶさ 2」の概要を示している。その形状モデルやレンダリング

結果は図中で形状を確認するために調整したものであり、等級の計算に用いられたものとは異なる。それより下は、各部品毎のレンダリング例と、「はやぶさ2」の参考形状における該当箇所を示す。レンダリング例の視野範囲や明るさは、例示として印刷用に調整している。

5.4. 計算結果(部品毎)

図9, 図10, 図11に、各レンダリング結果から計算した等級を示す。

● 鏡面反射 (+Z), 銀色 (平面), MLI (平面), IES

図9に、鏡面反射 (+Z), 銀色 (平面), MLI (平面), IES の計算結果を示す。

鏡面反射 (+Z), 銀色 (平面), MLI (平面) の3者については、再接近付近で急激に明るくなる様子が見て取れる。実際に観測された見かけの等級も、再接近付近で急激に増光していると考えられ、上記のような部品が寄与していることが示唆される。

MLI (平面) で時刻 0.41 付近から増光しているのは、-X+Z 側の筐体に取り付けられたスラスターの台座からの反射が計算されたものである。

IES については、0.396 から 0.4 付近でイオンエンジン関係の部品が太陽電池パドルに隠されたことにより、減光が計算されている。実際に観測された見かけの等級にも、同じタイミングで同じような傾向の減光が見て取れるが、イオンエンジン関係の部品は、計算された画像中では大きな面積を占めておらず、また暗色の部品も少なからぬ割合で存在するため、この結果のみで両者の因果関係を見極めることは困難である。

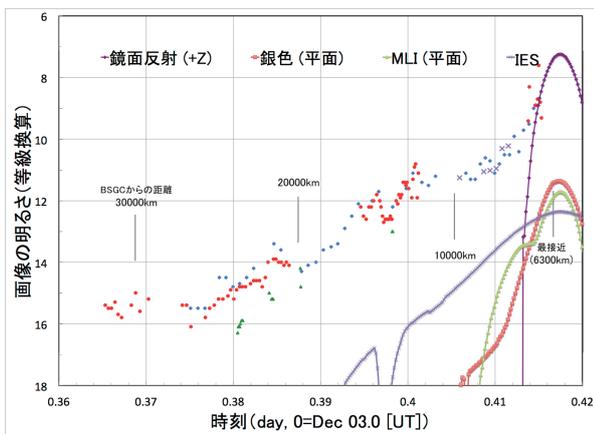


図9 鏡面反射 (+Z), 銀色 (平面), MLI (平面), IES

● MLI (+Z 側), HGA (縁), MLI (MGA), MGA Horn

図10に、MLI (+Z 側), HGA (縁), MLI (MGA), MGA Horn の計算結果を示す。

MLI (+Z 側) の計算結果は、時刻 0.39 から 0.4 付近までの増光を説明できる可能性がある。前述の

ように、この部品は円錐による近似で形状モデルが構成されているため、具体的な明るさの変化を論じるためには、形状モデルの詳細な検討が必要となる。

HGA (縁), MLI (MGA), MGA (Horn) は、いずれも類似の傾向にあり、0.38 付近で、それまで太陽電池パドルに遮られていたものが現われている。実際に観測された明るさが 0.38 付近で増光していることを説明できる可能性がある。

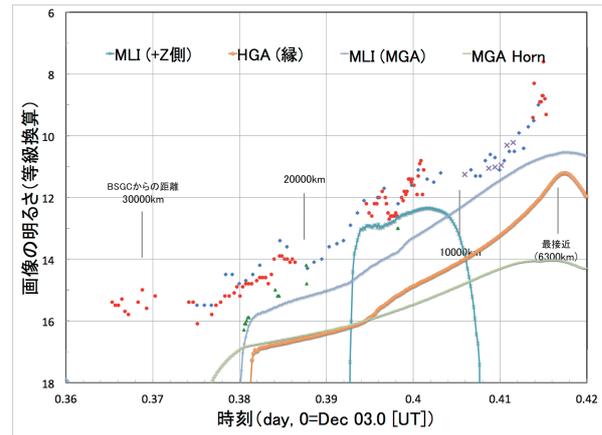


図10 MLI (+Z 側), HGA (縁), MLI (MGA), MGA Horn

● SAP (拡散反射), STT, HGA (-Z 側), その他

図11に、SAP (拡散反射), STT, HGA (-Z 側), その他の計算結果を示す。

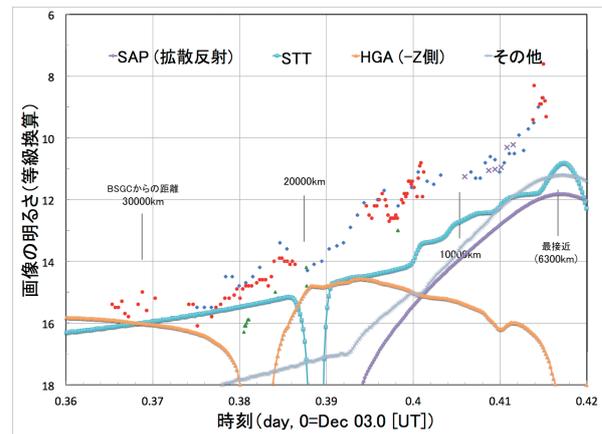


図11 SAP (拡散反射), STT, HGA (-Z 側), その他

SAP (拡散反射) は、時刻 0.41 付近の明るさの傾斜を説明できる可能性があるが、太陽電池パドル自身は暗色であり、また他にも類似の傾向を示す部品があるため、寄与の程度は不明である。

STT は時刻 0.39 付近で太陽電池パドルに隠されることにより、急激な減光が計算されている。同時刻帯に実際の観測でも減光しており、その現象を説明できる可能性がある。また時刻 0.4 付近から階段状に増光しており、これは川崎市青少年科学館 (か

わさき宙と緑の科学館)における観測で、「はやぶさ2」が短時間に光度を変化させていた[2]との記述や同科学館で計測された等級の変化を説明できる可能性もある。しかしながら本稿のモデルで簡略化した、MLI に代表される複雑な鏡面反射が影響している可能性もあり、STT が光度変化の主因であると断じることにはできない。

HGA (-Z 側) の見え方の変化を図 12 に示す。図中の黄色で示された領域が、HGA (-Z 側) の見える領域である。この領域は、時刻 0.38 付近までの接近に伴い徐々に太陽電池パドルに隠蔽され、時刻 0.38 以降、暫くの間は殆ど見えなくなる。その影響が大きかったと仮定すると、この時間帯には接近に伴い「はやぶさ2」が減光した可能性が示唆される。これは、実際に観測された見かけの等級が、係る時間帯において増光しない、もしくは減光の傾向にあったことと矛盾しない。

その他については、0.39 を過ぎた辺りから増光している。これは、係る時刻から、太陽光を受けていた+Z 面が見え始めたことにより、関連する部品が増光したためと考えられる。

時刻 HGA (-Z 側) の見え方 (黄色部分)

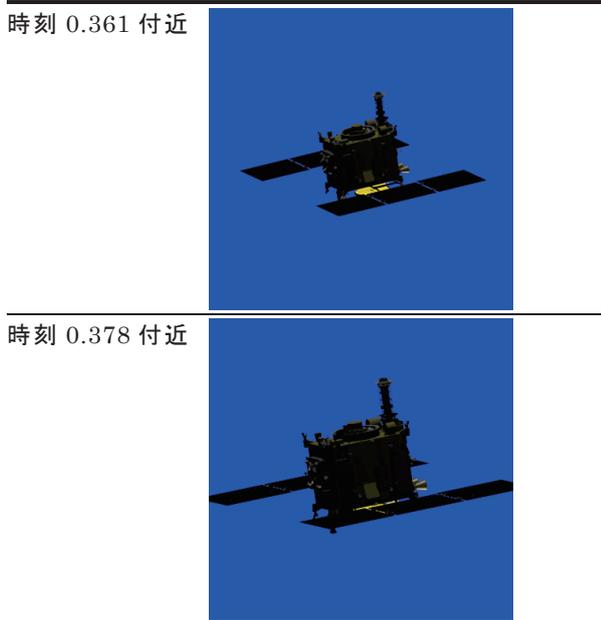


図 12 HGA (-Z 側) の見え方 (黄色部分)

5.5. 計算結果 (全体)

5.4 に述べた要素を加算した一例を図 13 に示す。前述のように、各部品が「はやぶさ2」全体の明るさの変化に対してどのように寄与したかは、この比較だけでは明らかではないので、本稿の範囲では、あくまでも例示となる。

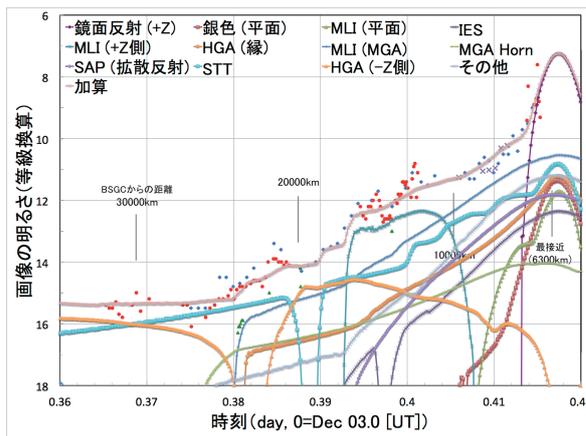


図 13 各部品の明るさの加算例

その結果として、本稿に述べた各部品によって大まかな変化が説明できると思われる時間帯がある一方で、時刻 0.385 前後の増光や時刻 0.395 から 0.4 前後の不規則な変化等は、観測誤差の詳細を吟味しつつ、その妥当性を検証する必要があると思われる。

6. おわりに

「はやぶさ2」の地球スイングバイにあたって、CG モデルを用いた、見かけの等級の変化推定を行った。その結果、「はやぶさ2」を構成する各部品の明るさの変化の計算結果から、実際に観測された見かけの等級の変化を大まかには説明しうることが示唆された。

その一方で、詳細な変化を説明するためには幾つかの課題が残された。それらの課題を以下に示す。

本稿で対象とした「はやぶさ2」地球スイングバイは、観測地点に対する「はやぶさ2」の相対的な姿勢は急激に変化していないにも関わらず、実際に観測された見かけの等級は短時間に変化していたことが見て取れる。また「非常に短時間に光度を変化させていた」[2]ことも報告されており、これを説明するためには、本稿で検証したような各部品のモデリングに加えて、複雑な鏡面反射を如何に考慮するかが課題となると考えられる。そのためには、詳細な部品配置の再現、MLI に代表される柔軟な構造物のモデリング、多重反射の考慮等、解決すべき要因が複数存在している。

また明るさの変化が類似している部品も存在しているため、全体の明るさに対する各部品の寄与の程度を示すためには、汎用の CG ソフトの反射モデルに依らず、個々の部品の表面材質に応じた反射モデルを構築する必要があると考えられる。

これらの課題を考慮しつつ、各観測地点における観測条件や、見かけの等級を計算した際の誤差の評

価等，総合的に検討することが，さらに詳細な推定につながると考えられる。

謝辞

本研究に際して、「はやぶさ 2」の見かけの等級観測にご尽力いただいた，兵庫県立大学西はりま天文台，東京大学木曾観測所，美星スペースガードセンターおよび川崎市青少年科学館（かわさき宙と緑の科学館）の各位に感謝致します。

参考文献

1. 「はやぶさ 2」地球スイングバイ観測キャンペーンデータの解析. 吉川真, ほか. 2016 年, 日本天文学会 2016 年春季年会, ページ: Y01a.
2. 川崎で捉えた小惑星探査機「はやぶさ 2」のスイングバイの観測. 佐藤幹哉, 弘田澄人, 成瀬裕子. 2017 年, 川崎市青少年科学館紀要 第 27 号.
3. 「はやぶさ」の小惑星イトカワ探査軌道・姿勢の可視化. 三浦昭, 山本幸生, 吉川真. 2014 年, 宇宙科学情報解析論文誌 第 3 号, ページ: 7-15.
4. はやぶさの軌跡の可視化: タッチダウン時の位置推定. 三浦昭, 山本幸生, 吉川真. 4, 2015 年, 宇宙科学情報解析論文誌 第 4 号, ページ: 173-183.