



ISSN 2433-2216(Online)
JAXA-RR-19-006

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

宇宙科学情報解析論文誌 第九号
Journal of Space Science Informatics Japan Volume 9

2020年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1. スパースモデリングを用いた逆畳み込みによる「あかり」遠赤外線銀河画像の高解像度化
村田 一心 1
2. 月極域探査における月面探査機の着陸地点の候補の探索手法の提案
中島 康平, 井上 博夏, 山本 光生, 山本 幸生, 大嶽 久志, 荒木 徹也, 廣田 雅春,
石川 博 13
3. 機械学習による月面 DEM の高解像化
小野寺 康祐, 井上 博夏, 山本 光生, 山本 幸生, 大嶽 久志, 荒木 徹也, 廣田 雅春,
石川 博 21
4. 局所的に高解像度化した小惑星形状モデルの生成について
三浦 昭, 坂谷 尚哉, 横田 康弘, 本田 理恵 33
5. 論文要旨のテキストマイニング分析による天文衛星の測定データを基にした研究動向の把握
中村 匡佑, 水上 祐治, 大島 昭子, 本多 啓介, 中野 純司 45

スパースモデリングを用いた逆畳み込みによる 「あかり」遠赤外線銀河画像の高解像度化

村田 一心 ^{*1}

Resolution enhancement with sparse modelling for galaxies detected with AKARI/FIS

MURATA Kazumi ^{*1}

ABSTRACT

This work enhances the spatial resolution of nearby-galaxy images with AKARI Far-infrared surveyor (FIS) via a de-convolution algorithm with a sparse modelling. The resolution of the FIS is about 80 arcsec, which is not enough to measure size of galaxies, so that AKARI/FIS has been used only for a point source analysis in galaxy studies. Hence, in this work, a de-blurring analysis with sparse modelling was performed to enhance the spatial resolution of AKARI/FIS images. The analysis was conducted to reduce an objective function with a data fidelity term, higher degree total variation, and positivity constraint. As a result, the spatial resolution was improved by about twice.

Keywords: AKARI, resolution enhancement, Far-infrared, galaxies, size measurement.

概 要

本研究では、赤外線天文衛星「あかり」の遠赤外線サーベイヤー (FIS) で検出された近傍銀河の高解像度化を行った。FIS の空間分解能は 80 arcsec 程度と非常に悪く、近傍銀河のサイズ測定は難しい。そのため、これまでの研究では主として FIS で検出された天体は点源として扱われてきた。しかし、分解能を改善できれば、いくつもの新しいサイエンスを広げることができる。そこで本研究では、スパースモデリングを用いた逆畳み込みを行い、FIS 画像の高解像度化を実現した。画像の高解像度化は、観測データと PSF との整合性および「天体画像は滑らか」「フラックスは非負」という先見情報をコスト関数に組み込み、コスト関数を最小にする画像を求めることによって行った。この方法により、空間分解能は 2 倍程度改善された。

doi: 10.20637/JAXA-RR-19-006/0001

* 2019 年 12 月 17 日受付 (Received December 17, 2019)

^{*1} 法政大学 理工学部 (Faculty of Science and Engineering, Hosei University)

1 はじめに

「あかり」は日本初の本格的赤外線天文衛星で、60-180 μm の遠赤外線ですべての全天サーベイを行った。遠赤外線での観測は銀河進化の観点からも重要である。星を活発に形成する銀河からは大量の紫外線が放射されるが、それらの光の大部分は塵に吸収され、減衰してしまう。一方、紫外線を吸収した塵は温度が上昇し、遠赤外線帯で熱放射を行う。そのため、銀河を遠赤外線でも観測することにより、塵に隠された星形成活動のエネルギーを測定することができる。

「あかり」は従来の赤外線全天サーベイ衛星 IRAS より、感度も高く、数倍の解像度を持つ¹⁾。しかし解像度が高いと言っても「あかり」遠赤外線全天サーベイにおける空間分解能は 70-90 arcsec 程度である²⁾。そのため、赤方偏移 $z=0.01$ の銀河（見かけの大きさが 50 arcsec 程度¹⁾）を分解することができない。実際、「あかり」の遠赤外線観測を用いた銀河形成の研究では、銀河を点源として扱うことがほとんどである^{3,4)}。したがって、画像処理によって「あかり」遠赤外線画像の分解能を改善することができれば、さまざまな新しいサイエンスが開拓されることが期待される。

空間分解能を改善する方法としては、画像の点広がり関数 (PSF) を用いた逆畳み込みを行うことが考えられる。画像のボケ具合のパターンを逆算することで、高解像度の画像を得るというものである。しかし単純な逆畳み込みはノイズに対して非常に弱いため、様々な方法が開発されている。例えば、近年の赤外線全天サーベイ WISE の研究チームが用いている、最大相関法 (Maximum correlation method; MCM⁵⁾) である。これは光子の分布がポアソン分布に従うことを仮定し、最大事後確率推定により、PSF を考慮した時の観測画像と矛盾のない高解像度の画像を得る方法である²⁾。

しかし、この方法を適用するには正確な PSF が必要な上、ノイズが低く抑えられている必要がある。WISE のように PSF が安定していてノイズが低い画像に対しては極めて有効であるが、「あかり」に適用するのは難しい。また、MCM は他の類似方法と同様、一定以上の解像度を得ようとすると、リング状のアーチファクトが出現してしまう。

このような問題を解決するために有効なのが、先見情報を用いる方法である。ノイズ有り画像を逆畳み込みする場合、観測画像と誤差の範囲で矛盾しない画像は無数に存在するため、最適解を一意に決めることができない。そこで別の情報を追加することで、よりそれらしい解を求めることができる。このように、先見情報を用いて最適解を求める方法を正則化という。詳しくは次節で説明するが、正則化にしばしば用いられる方法の 1 つがスパースモデリングである。

スパースモデリングは、画像にある変換 (恒等変換を含む) を加えることで、非ゼロ成分が少ないスパースな画像を作成するモデルである。実際の観測データは、情報の欠陥やノイズなどの原因により、このような変換をしてもスパースにはならない。しかし、変換後の画像がスパースになるように画像を再構成することで、より現実に近い解を得ることができる。スパースモデリングは、EHT (Event Horizon Telescope) によるブラックホール直接撮像の成功によって一時に有名になった。彼らのデータには電波干渉計特有の、周波数空間における不足データが存在するため、再構成画像を一意に決めることができない。そこで彼らは先見情報を用いることで、観測と矛盾のない高解像度の画像を再構成している^{7,8)}。

本研究では、スパースモデリングを用いた逆畳み込みにより「あかり」遠赤外線画像の分解能を改善し、近傍銀河のサイズ測定を可能にすることを目的とする。本研究で用いるスパースモデリングは、EHT のものと異なり、他の望遠鏡での観測にも適用できる。EHT での解析は、電波干渉計特有のデータ欠損

¹⁾ 銀河の大きさを 10 kpc とした時の見かけの大きさ。赤方偏移 $z=0.01$ は銀河が近傍にあるかどうかを分別する一つの指標である。

²⁾ ほとんど同じ方法が、核医学における放射線断層画像の推定に用いられている。最尤推定・期待値最大化法 (ML-EM 法) という⁶⁾。

を補うためのものであったが、本研究で用いるものはノイズによって失われた画像の各画素値の信頼性を補うためのものだからである。また、EHT で使われていた正則化項にも改良を加えた。本論文における手法を適用すれば、他の多くの観測画像を高解像度にできると期待できる。

本論文は次のように構成されている。第 2 節では、スパースモデリングを用いた高解像度化方法を解説する。第 3 節では、本研究で用いたデータおよび銀河サンプルについて述べる。第 4 節では画像再構成の結果を示し、銀河サイズの測定確度が向上したことを示す。第 5 節では本手法の応用やさらなる画質向上の可能性について述べる。

2 スパースモデリングを用いた画像の逆畳み込み方法

本節では、スパースモデリングを用いて画像を高解像化する手法について述べる。その概要を述べると、観測データとの整合性と正則化項を用いたコスト関数を定義し (2.1, 2.2 節)、そのコスト関数が最小になる解を推定する (2.3 節) ということになる。ここで、正則化項としては高階全変動の L1 ノルム (2.2 節) を用いることで、より適切な再構成画像を作成した。以下、それぞれについて述べる。

2.1 正則化項を用いたコスト関数の定義

観測データから PSF の影響を取り除き、高解像画像を作成するには、PSF を畳み込んだときに観測画像と矛盾しない画像を作成すれば良いと考えられる。言い換えると、観測データおよび PSF との整合性を示す、次のようなコスト関数を最小にすれば良いと考えられる。

$$f = \frac{1}{2} \|\mathbf{Ax} - \mathbf{y}\|_2^2 \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{A} は PSF を表す行列、 \mathbf{x} は再構成画像、 \mathbf{y} は観測データである。しかし、観測データにノイズが乗っていると、多くの場合 \mathbf{x} は発散してしまう。

そこで、先見情報を用いた正則化を行う。一般に天体画像は滑らかなはずである。言い換えると、隣接ピクセル同士の画素値の差分はゼロに近い。隣接画素の差分の L2 ノルムを全変動 (Total Variation; TV) と言い、その画素値 $X_{TV,i,j}$ は次のように表される。

$$X_{TV,i,j} = \sqrt{(x_{i,j} - x_{i+1,j})^2 + (x_{i,j} - x_{i,j+1})^2} \quad (2)$$

このようにして得られる TV 画像は画素値のほとんどがゼロに近く、非ゼロの値を持つ画素は非常に少ないはずである。つまり、スパースモデリングを適用できる。通常、スパースな解を得るには L1 ノルムが適していることが知られている。TV の L1 ノルムは次のように表すことができる⁹⁾。

$$\|\mathbf{x}\|_{TV} = \sum_i \sum_j \sqrt{(x_{i,j} - x_{i-1,j})^2 + (x_{i,j} - x_{i,j-1})^2} \quad (3)$$

また、銀河のフラックスは正の値を持つはずである。これらの条件を考慮すると、推定すべき再構成画像は次のように表される。

$$\mathbf{x} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} \{ \|\mathbf{Ax} - \mathbf{y}\|_2^2 + 2\lambda \|\mathbf{x}\|_{TV} \} \text{ s.t. } \mathbf{x} > 0 \quad (4)$$

ここで、 λ は観測データとの整合性と全変動正則化の重みを決定する正則化パラメータである。 $\operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} \{ \cdot \}$ は $\{ \cdot \}$ を最小にする \mathbf{x} を求める演算子である。

2.2 高階全変動を用いた正則化

画像再構成における全変動正則化は非常に簡単で有効性もあるため、様々な研究分野で応用されている¹⁰⁾。しかしその一方、全変動は隣接画素の値の差分であるため、それをゼロにすることは画像が階段関数状 (Cartoon 化) になることを意味する。これは全変動が多く用いられる医用画像では大きな問題に

はならないが、天体画像では望ましくない。それを防ぐため、Kuramochi らは、全変動の L2 ノルムの 2 乗を正則化に用いている⁸⁾。しかし、L2 ノルムの正則化ではスパースな解を得ることは難しく、画像の復元力が弱まってしまうことが広く知られている。

そこで本研究では、高階全変動の L1 ノルムを正則化に用いることにした。全変動は画像の一階微分に対応するため、これがゼロになるということは画像が定数であることを意味する。しかし天体画像は滑らかな曲線の集まりである。そこで画像を二次関数の集まりと捉え、三階微分がゼロ、すなわち全三階変動 (Total 3rd degree variation; T3V) を正則化に用いた。微分階数が大きすぎてもパラメータの個数が増えてしまうことを考えると、曲線を最も単純に表すことのできる T3V 変換を適用することは自然の帰結と言える。T3V の L1 ノルムは次のように表すことができる。

$$\|x\|_{T3V} = \sum_i \sum_j Sqrt \left\{ (3x_{i,j} - x_{i+1,j} - 3x_{i-1,j} + x_{i-2,j})^2 + (3x_{i,j} - x_{i,j+1} - 3x_{i,j-1} + x_{i,j-2})^2 + (3x_{i,j} - x_{i+1,j+1} - 3x_{i-1,j-1} + x_{i-2,j-2})^2 + (3x_{i,j} - x_{i-1,j+1} - 3x_{i+1,j-1} + x_{i+2,j-2})^2 \right\} \quad (5)$$

ここで、平方根内の第 3、4 項はそれぞれ、右上方向、右下方向の 3 階微分成分である。全変動の代わりに T3V の L1 ノルムを正則化に用いることで、画像のフラット化を防ぎつつスパースな解を得ることができる。T3V を用いたコスト関数を改めて示すと、次のようになる。

$$x = \operatorname{argmin}_x \{ \|Ax - y\|_2^2 + 2\lambda \|x\|_{T3V} \} \text{ s.t. } x > 0 \quad (6)$$

2.3 交互方向乗数法を用いた最適化

前節までで最小にすべきコスト関数は得られた。本節ではコスト関数の解法について述べる。本研究では速度と安定性を考慮して、交互方向乗数法 (Alternating Direction Method of Multipliers; ADMM¹¹⁾) を用いた。

交互方向乗数法は拡張ラグランジュ法³⁾を応用したもので、複数の項を持つコスト関数のそれぞれを双対問題に置き換え、各変数を交互に更新する。ここでは、非負の条件をコスト関数に組み込むため、次のようなコスト関数を考える。

$$t_{[0,\infty]}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \geq 0 \\ \infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

このコスト関数を用いて式(6)を変形させると、次のようになる。

$$\operatorname{argmin}_{u,z_1,z_2} \left\{ \|Au - y\|_2^2 + 2\lambda \|z_1\|_{L_{1,2}} + t_{[0,\infty]}(z_2) \right\} \text{ s.t. } z_1 = B_{T3V}x, z_2 = x \quad (8)$$

ここで、 B_{T3V} は 3 階微分全変動の各方向成分への変換行列である。

$$B_{T3V}x = \begin{pmatrix} 3x_{i,j} - x_{i+1,j} - 3x_{i-1,j} + x_{i-2,j}, \\ 3x_{i,j} - x_{i,j+1} - 3x_{i,j-1} + x_{i,j-2}, \\ 3x_{i,j} - x_{i+1,j+1} - 3x_{i-1,j-1} + x_{i-2,j-2} \\ 3x_{i,j} - x_{i-1,j+1} - 3x_{i+1,j-1} + x_{i+2,j-2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

³⁾ ラグランジュの未定乗数法と罰金法を組み合わせた方法。罰金項の係数を大きくする代わりに未定乗数を更新することで制約条件を満たすように仕向けることができる。

また、式(8)第二項の下付きの L1,2 は混合 L1,2 ノルムを表している。T3V そのものは L2 ノルムで、その L1 ノルムを取ることで混合ノルムとなる。ここで、 $\mathbf{z1}$ と $\mathbf{z2}$ という新たなパラメータを導入した。これらに関する制約条件に対して拡張ラグランジュ法を適用し、それぞれに対する未定乗数を $\mathbf{d1}$, $\mathbf{d2}$ とする。

このように変換すると、観測値との整合性を \mathbf{u} で、T3V の正則化を $\mathbf{z1}$ で、非負制限を $\mathbf{z2}$ の変数で表し、 $\mathbf{d1}$, $\mathbf{d2}$ と合わせて順番に更新していくことができる。具体的には次のように更新する。

$$\mathbf{u}^{(n+1)} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} / \lambda + \mu \mathbf{B}_{T3V}^T \mathbf{B}_{T3V} + \mu \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{y} / \lambda + \mu \mathbf{B}_{T3V}^T (\mathbf{z1} - \mathbf{d1}) + \mu (\mathbf{z2} - \mathbf{d2})) \quad (10)$$

$$\mathbf{z1}^{(n+1)} = \text{GST} \left(\mathbf{D} \mathbf{u}^{(n+1)} + \mathbf{d1}^{(n)}, \frac{1}{\mu} \right) \quad (11)$$

$$\mathbf{z2}^{(n+1)} = \text{P}_{[0, \infty]} (\mathbf{u}^{(n+1)} + \mathbf{d2}^{(n)}) \quad (12)$$

$$\mathbf{d1}^{(n+1)} = \mathbf{d1}^{(n)} + \mathbf{B}_{T3V} \mathbf{u}^{(n+1)} - \mathbf{z1}^{(n+1)} \quad (13)$$

$$\mathbf{d2}^{(n+1)} = \mathbf{d2}^{(n)} + \mathbf{u}^{(n+1)} - \mathbf{z2}^{(n+1)} \quad (14)$$

ここで、 \mathbf{u} に関する部分は 2 次関数であることから解析的に解け、 $\mathbf{z1}$, $\mathbf{z2}$ に関する部分は近接写像の結果として、グループ軟閾値処理 (GST)、凸射影 ($\text{P}_{[0, \infty]}$; 負の値を 0 にする) でそれぞれ計算している。 μ は反復処理する上でのパラメータである (勾配法における更新率に相当)。グループ軟閾値処理とは、LASSO 型の問題⁴の解として知られる軟閾値判定処理の拡張版である。 $\mathbf{z1}$ は LASSO 型と異なり L1 ノルムではなく L1,2 混合ノルム、すなわち二乗和の平方根 (L2 ノルム) の絶対値の和 (L1 ノルム) で与えられている。このような問題の解を与えるのがグループ軟閾値処理で、以下のように与えられる。

$$\text{GST}(\mathbf{x}, \gamma) = \max \left\{ 0, 1 - \frac{\gamma}{\sqrt{\sum_j x_j^2}} \right\} \mathbf{x} \quad (15)$$

ここで、 j はグループ番号すなわち混合ノルムにおける各 L2 ノルム成分の番号、 i は画素番号に対応する。

ADMM の最大の利点は、それぞれの更新に解析解が存在するため、非常に安定で高速に収束することである。一方、デメリットは観測との整合性を示す 2 次関数の解析解を求めるには逆行列の計算が必要 (式 10) になり、膨大なメモリを消費することである。ただし、本研究で用いる画像は 128x128 画素と比較的小さいため、メモリの消費量は大きな問題にはならない⁵。

3 研究に用いたデータ

3.1 赤外線天文衛星「あかり」遠赤外線全天サーベイマップ

本研究では、「あかり」遠赤外線サーベイヤー (Far-Infrared Surveyor; FIS¹²) での全天サーベイマップ¹³を使用した。FIS には、N60, Wide-S, Wide-L, N160 の 4 バンドが存在するが、もっとも感度の高い Wide-S (参照波長 $90 \mu\text{m}$ ⁶) のデータのみを用いた。Wide-S の典型的な感度は 3 MJy/str 程度である²。

FIS 全天サーベイにおける PSF は有松らによって調べられている¹⁴。彼らは多数の恒星に対してスタッキング解析を行い、10 Jy より暗い天体については PSF の明るさ依存性がないことを確認し

⁴ 残差の二乗和と L1 ノルムすなわち解の絶対値の総和を最小にする問題を指す。

⁵ 1G バイト程度である。

⁶ キャリブレーションを行なった波長帯のことである。

た. それより明るい天体については定かではないが、これは第 5 章で議論する.

PSF の構築は多数の天体で行われているが、当然ノイズは存在する. そこで本研究では白旗らの研究¹⁵⁾ に従い、PSF を 2 つのガウス関数で近似した (図 1). 幅の狭い主成分と、広い裾野を持つサブ成分とに分け、 xy 両方向の幅をフリーパラメータとしてフィッティングした. ここで、 x, y 方向は検出器座標の横・縦成分であり、 y 方向はスキャン方向 (黄緯方向) に対応する. 得られた関数の主・サブ成分の幅 (FWHM) は x 方向が 53.3, 118.3 arcsec, y 方向が 92.2, 224.3 arcsec であった. 一部フィッティング関数と観測値とが合っていない部分があるが、これは不安定な背景光と PSF 作成時のサブサンプリングによって発生するピクセル間の相関に由来するものと思われる.

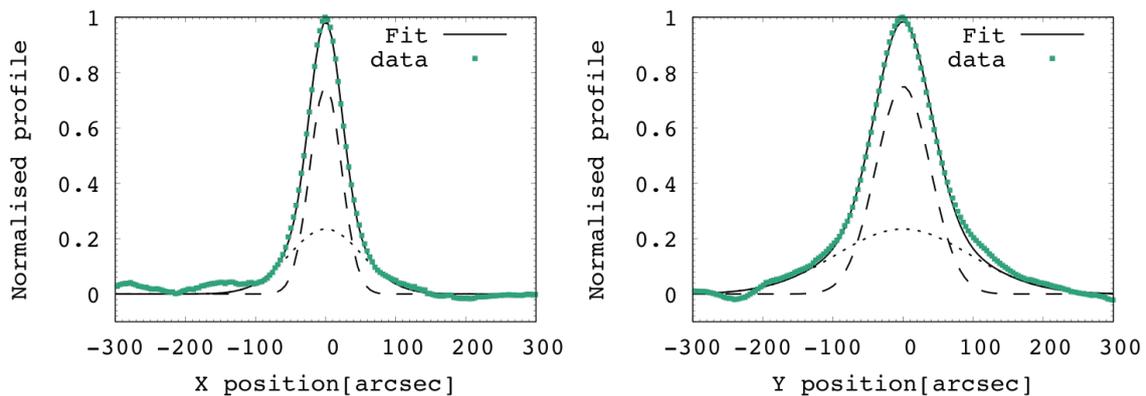


図 1 「あかり」 FIS Wide-S バンドの x 方向 (左)、 y 方向 (右) のプロファイル. データ点は Arimatsu et al. (2014) で提供されているものを使用した. 黒の実線が 2 つのガウス関数でのフィッティング結果. 破線および点線はそれぞれ主・サブ成分を示す. 測定された FWHM は x 方向が 61.9, y 方向が 108.5 arcsec であった.

公開されている PSF はスタッキング解析を用いて求められているため、本来の PSF よりも座標測定誤差の分だけ広がっていると考えられる⁷. 本来の PSF よりも広がった PSF で逆畳み込みを実行すると解が求まらず、発散してしまう可能性がある. そこで本研究では、フィッティングにより得られたガウシアンを x 方向に 0.5 pixel, y 方向に 1 pixel 縮小した PSF を用いた. この値は座標決定精度が典型的には 0.5 ~ 1 pixel 未満であること、 y 方向は x 方向に比べて広がり度が 2 倍程度であることに由来する. ただし、縮小の有無によって本研究の結論に大きな影響はないことは確認した.

3.2 IRAS Revised Bright Galaxy Sample

本研究では IRAS 衛星によって作成された Revised Bright Galaxy Sample (RBGS¹⁶⁾) の 629 天体を銀河サンプルとして用いた. このカタログは、IRAS の $60 \mu\text{m}$ バンドで 5.24 Jy 以上の明るさを持つ銀河全てが収録されており、近傍赤外線銀河の研究に非常に多く使われている. 本研究の目的は、「あかり」遠赤外線画像の解像度を向上させ、近傍銀河のサイズを測定できるようにすることであるので、その試金石として RBGS は最適な銀河サンプルである.

⁷ 公開されている PSF の README より.

4 結果

「あかり」遠赤外線全天サーベイマップで観測された IRAS RBGS に収録されている銀河 629 天体に対し、本研究での提案手法で高解像度化を行った。その際サブピクセルサンプリングを行い、64x64 画素 (1 画素は 15 arcsec) に切り出した銀河の画像を、128x128 画素 (1 画素は 7.5 arcsec) で出力した。正規化パラメータ λ は 0.1 とした。

高解像度化の例を図 2, 3 に示す。図 2 は M51 への適用で、もともと PSF でぼやけていた画像 (左) がシャープになり、渦巻き模様や伴銀河の光もよく見えるようになった (中央) ことがわかる。ただし、*Herschel*/PACS の画像 (右) と比較すると、課題が残っていることがわかる。ここで、*Herschel* の画像は $70 \mu\text{m}$ 帯の画像 (PACS / green) をピクセルサイズ、分解能共に FIS の高解像度画像に揃えたものである。両者を比較すると、渦巻き模様のパターンは類似しているが、FIS 画像では中心付近での凹みが見られる。これは、本研究で用いた PSF と実際の PSF との差異から生じると考えられる。詳しくは次節で議論する。なお、渦巻きの腕の一部や伴銀河において PACS と FIS とでコントラストが異なるのは、観測波長の違い ($70 \mu\text{m}$ と $90 \mu\text{m}$) に由来すると考えられる。図 3 は IRAS09022-3615 への適用前後の y 方向のプロファイルを示している。もともと 4 arcmin 程度に広がっていたプロファイル (ピンク) が、2 arcmin 以下に抑えられている (緑) ことが見て取れる。

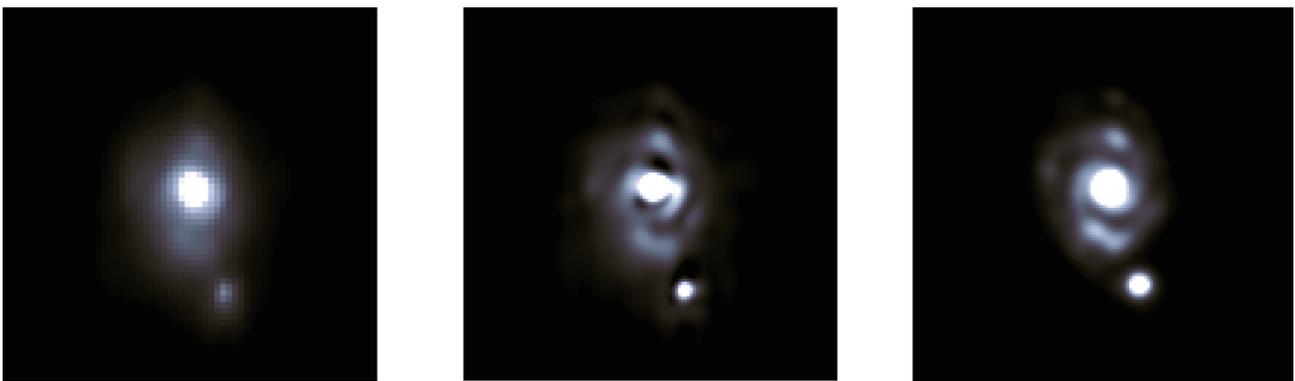


図 2 M51 の画像の比較. 元々の画像 (左) ではぼやけていた渦巻き模様が、高解像度化した画像 (中央) では見えていることがわかる. 参考のため、*Herschel*/PACS の画像を FWHM 40 arcsec のガウシアンでぼかした画像 (右) を示した。

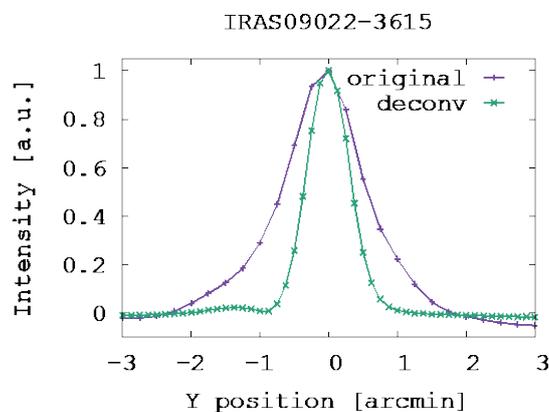


図 3 IRAS09022-3615 の強度プロファイル. 元々 (緑) は 4 arcmin ほど広がっていたが、高解像度化後 (ピンク) は 2 arcmin 程度の広がりになっていることがわかる。

本研究の最大の目的は、近傍銀河の遠赤外線帯でのサイズを測定できるようにすることである。そこで、銀河のサイズを測定した結果を文献値と比較した。本研究では、銀河のサイズとして全フラックスの半分が入る半径 (R50) とした。全フラックスは簡単のため、座標中心から平均が Wide-S バンドの検出感度 (3 MJy/str) になる領域までの半径に含まれる総フラックスとした。サイズの測定では、切り出した視野内 (128 x128 pixel; 16 arcmin に相当) に複数の天体が写っているデータや、視野をはみ出すほど大きい天体、視野内にデータ欠損が含まれるデータ、100 μ m 帯で 100 Jy 以上明るく PSF の差異が目立つ銀河は、逆畳み込みとは別の不定性が乗ってしまうため除外した。一方、文献値としては SIMBAD⁸で示されている値を用いた。文献値が入手できなかったサンプルも除外し、最終的にサイズの比較に用いたサンプル数は 479 天体であった。

SIMBAD で示されているサイズは測定方法が異なるが、主として可視光で一定以上暗くなるまでの領域として定義されている。銀河の主軸・短軸共に測定されているので、簡単のため両者の平均を用いた。文献値と「あかり」による銀河サイズとでは観測波長が異なるため、放射源も異なる。さらに、サイズの定義も異なるため、直接の比較は難しい。しかし、銀河全体で見た場合には放射源の違いは緩和されると考えられる。何より近傍銀河においては、見かけのサイズが銀河までの距離に反比例するため⁹、サイズの定義が異なっても両者は相関するはずである。

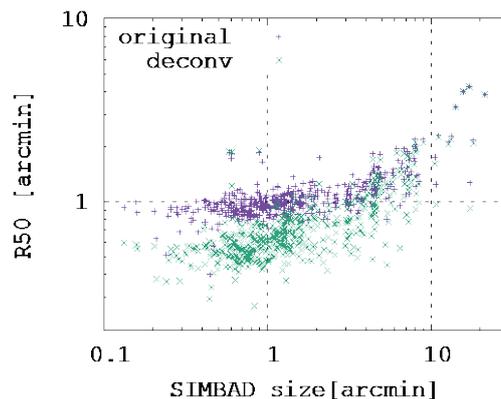


図 4 「あかり」で測定した銀河のサイズと、文献値との比較。元々の画像 (ピンク) より、高解像度化を適用したもの (緑) の方がより小さなサイズまで測定できていることがわかる。

銀河サイズの測定・比較結果を図 4 に示す。予想通り一対一の関係にはならないが、両者には確かに相関が見られる。したがって、SIMBAD が提供する銀河サイズは、本研究で測定したサイズを議論する上で、定性的な比較対象にできる。SIMBAD size が 4 arcmin 程度で傾きが変わっているのは、遠い銀河ほど暗く、SIMBAD で主に使われているサイズの定義では原理的にサイズを過小評価してしまうためと考えられる。

元々の画像でのサイズ測定との比較 (ピンク) を見ると、SIMBAD で 2 arcmin 以上の銀河では相関が見られるが、それより小さい銀河についてはほぼ無相関で $R50 \sim 1$ arcmin となっている。一方、逆畳み込みをした結果 (緑) では、外れ値を持つ天体はいるものの、SIMBAD でのサイズが 1 arcmin 以下の銀河でも相関を示している。これを見ると、逆畳み込みにより $R50 = 0.6$ arcmin 程度までサイズ測定可能になったと考えられる。つまり、本研究の手法により、空間分解能は 2 倍程度改善されたことになる。

⁸ <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

⁹ ユークリッド幾何学で近似できる範囲に限る。赤方偏移 $z=0.01$ までであれば十分に近似できる。

5 議論・今後の展望

本研究での提案手法により、「あかり」遠赤外線画像を高解像度化し、近傍銀河のサイズが測定できるようになった。本節では、本研究によって可能になるサイエンス、さらなる高解像度化への課題、他の望遠鏡への応用について議論する。

5.1 新しく広がるサイエンス

これまでの「あかり」遠赤外線画像は主として点源として扱われてきた。そのため、銀河のサイズ測定は他の波長帯での観測に頼らざるを得なかった。しかし、遠赤外線と他の波長帯とでは放射源が異なる。そのため、銀河のサイズも異なると考えられる。

例えば、活動銀河核 (AGN) を持つ銀河は、中間赤外線帯ではダストトラスからの放射が支配的であるため、ほぼ点源となるはずである。しかし、遠赤外線帯ではダストトラスの放射よりも星形成に由来する成分が卓越することが一般的なため、放射源はより広がっていると考えられる。それを検証する研究は *Herschel*¹⁷⁾ を用いて行われている¹⁸⁾ が、一部の AGN についてしか行われていない。そこで全天サーベイである「あかり」を活用することで、より多くの一般的な AGN についても研究できるようになると考えられる。

また、遠赤外線光度面密度の測定や合体過程にある銀河の分離は、銀河形成を理解する上で重要だと考えられているが¹⁹⁾、そのような研究は「あかり」の空間分解能によって制限されてきた。本研究での提案手法を適用すれば空間分解能は 40 arcsec 程度まで改善できる。空間分解能 40 arcsec は赤方偏移 $z = 0.01$ (距離 40 Mpc 程度) における 8 kpc に対応する。つまり、遠赤外線光度密度の測定も、合体する直前の銀河の分離も $z = 0.01$ より手前の銀河については可能になったと考えられる。

5.2 さらなる精度向上、およびアーチファクトの除去

本研究では、全天体の PSF は一定として逆畳み込み演算を行った。しかし、特に明るい天体については PSF の違いが影響を及ぼしている可能性がある。図 3 を見ると、逆畳み込み後のプロファイル (緑) では $y = -1.5$ arcmin のあたりで凹凸が見える。これはよく見ると元々のプロファイル (ピンク) がやや左側に尾を引いているためである。このようなプロファイルは他の多数の天体にも見られたので、個々の天体の PSF が異なることを示唆している。

図 2 で示した M51 の *Herschel* 画像との比較では、この PSF の差異が影響していると考えられる。PSF の差異が無視できない状態で逆畳み込みを適用すると、適用後のプロファイルには負の値が生じやすくなる。しかしフラックスは非負の値を持つ条件を課しているため、値は 0 に補正される。その代わりに 0 付近の値を持つ領域が広がることになる。その結果、明るい領域の周辺で本来よりも低い値が生じやすくなると考えられる。この現象はあくまでサブ成分であるので、天体のサイズ測定には大きな影響はないが、分解した天体の詳しい形状測定への影響は無視できない。

この原因の一つは、FIS の検出器特性である、slow transient response¹⁵⁾にあると考えられる。これは検出器の応答が入射光に対して遅れる現象で、FIS のようにスキャン観測を行う場合に影響を及ぼす。もちろんデータ処理の段階でこの現象は考慮されているが¹³⁾、補正しきれていない、あるいは過補正している成分があっても不思議ではない。また、有松らは PSF の明るさ依存性は確認しているが¹⁴⁾、10 Jy より暗い天体のみを対象にしているだけでなく、スタッキング解析を行っているため、個々の分散は打ち消されていると考えられる。個々の PSF がどれだけ異なるかは本研究での解析だけではわからないが、

これらを適切に考慮した PSF の逆畳み込みができれば、より鮮明な画像を作成できると考えられる。

天体ごとの PSF の違いを考慮する上でもう一つ重要な事象がある。それは光学系以外に依存する成分、すなわち画像処理段階で発生する PSF である。「あかり」全天サーベイマップは、スキャンデータをスタックする際、近傍画素にも FWHM=30 arcsec のガウス関数で重みをつけて足し合わせている¹³⁾。「あかり」の PSF の FWHM は 50-100 arcsec 程度²⁾であるので、大きな影響はないように見える。しかし、この処理によりノイズまでも広がってしまうことに問題がある。本来、式 (6) によって計算されるコスト関数は、ピクセルごとにノイズが独立であることが前提になっている。その場合、単純な逆畳み込みによって増幅されるノイズも高周波成分が支配的になるため、TV や T3V のような正則化で打ち消すことができる。しかし、ノイズが平均化されピクセル同士が独立でなくなると、逆畳み込みによって増幅されるノイズは低周波成分を持つため、正則化で打ち消すのが難しくなる。その結果、強めの正則化パラメータを設定することになり、高解像度化はそれによって制限されてしまう。この現象はノイズが大きい天体、つまり明るい天体で特に影響が出てしまう。これを解決するには、明るさごとに PSF の成分を変えるなどの操作が必要になるため、より高度な最適化関数の開発が必要である。

5.3 他の望遠鏡への応用

本研究では、「あかり」遠赤外線銀河画像に対する逆畳み込み演算を行った。しかし、本手法は他の天文衛星はもちろん、地上望遠鏡による観測データにも適用できる。そのためには、前節で述べたような処理が必要になる。すなわち、地上望遠鏡ではシーイングが観測ごと、場所ごとに異なるため、天体ごとに適切な PSF で逆畳み込みを実装する必要がある。

また、他の望遠鏡に応用する場合に興味深いのが、他波長間での解像度を揃えることである。天文学の研究においては、他波長間で分解能を揃える際には、分解能が悪い方に合わせるのが一般的である。一般に、カラー画像に単純なモデルを適用すると、画像が滲んでしまうことが知られている。このような状況に加え、天体画像においては波長ごとに PSF の形状が大きく異なる。これらの課題を解決し、空間分解能を改善しつつ解像度を揃えることができれば、応用面でも価値が高い。

6 まとめ

本研究では「あかり」遠赤外線銀河画像を高解像度化することで、これまでできなかった、近傍銀河のサイズ測定を可能にした。画像の高解像度化には、観測データと PSF との整合性および「天体画像は滑らか」「フラックスは非負」という先見情報をコスト関数に組み込み、コスト関数を最小にする画像を推定することで実現した。「あかり」遠赤外線近傍銀河のサイズ測定が可能になったことにより、遠赤外線光度面密度の測定、AGN 天体の遠赤外線帯での広がりなどの新しいサイエンスが進展することが期待できる。本研究をさらに発展させるには、1. 天体ごとに適切な PSF を作成すること、2. ノイズがばかされている状況でもより適切な高解像度処理を行えるようにすること、3. 異なる波長間で分解能を改善しつつ揃えること、が考えられる。これらの課題を解決することで、銀河のより細かい構造が見えるようになるだけでなく、他の望遠鏡への応用もできると期待される。

謝辞

This research is based on observations with AKARI, a JAXA project with the participation of ESA.

参考文献

- 1) Yamamura I. et al., 2010, “AKARI/FIS All-Sky Survey Point Source Catalogue”, VizieR Online Data catalog, 2298, ISAS/JAXA, 2010,
- 2) Takita S. et al., “Calibration of the AKARI far-infrared all-sky survey maps”, PASJ, Volume 67, Issue 3, id.51, 2015, 8 pp
- 3) Koyama Y. et al., “On the different levels of dust attenuation to nebular and stellar light in star-forming galaxies”, PASJ, Volume 71, Issue 1, id.8, 2019, 14pp
- 4) Matsuki Y. et al., “Environmental impacts on dust temperature of star-forming galaxies in the local Universe”, MNRAS, Volume 466, Issue 3, 2017, p.2517-2528
- 5) Masci F. J. and Fowler J. W., “AWAIC: A WISE Astronomical Image Co-adder”, Proceedings of Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII, 67, 2009, 16pp
- 6) 篠原広行 他, “ML-EM 法と Maximum a Posterior-EM (MAP-EM)法”, 断層映像法の基礎 第40回, 2013年, 11pp
- 7) Homma M. et al., “Super-resolution imaging with radio interferometry using sparse modeling”, PASJ, Volume 66, Issue 5, id.95, 2014, 14pp
- 8) Kuramochi et al., “Superresolution Interferometric Imaging with Sparse Modeling Using Total Squared Variation: Application to Imaging the Black Hole Shadow”, APJ, 858, 56, 2018, 14pp
- 9) Sidky E. Y., “Accurate image reconstruction from few-views and limited-angle data in divergent-beam CT”, arXiv 0904.4495, 2009, 30pp
- 10) Paleo P. and Mirone A., “Ring artifacts correction in compressed sensing tomographic reconstruction”, Journal of Synchrotron Radiation, 22, 2015, 1268-1278
- 11) Boyd S., “Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers”, Foundations and Trends in Machine Learning, Vol. 3, No. 1, 2010, 1-122
- 12) Kawada et al., “The Far-Infrared Surveyor (FIS) for AKARI”, PASJ, volume 59, 389, 2007, 23pp
- 13) Doi Y. et al., “The AKARI far-infrared all-sky survey maps”, PASJ, volume 67, Issue 3, id.50, 2015, 22pp
- 14) Arimatsu K. et al., “Point source calibration of the AKARI/FIS all-sky survey maps for stacking analysis”, PASJ, Volume 66, Issue 2, id. 47, 2014, 15pp
- 15) Shirahata M. et al., “Calibration and Performance of the AKARI Far-Infrared Surveyor (FIS) – Slow-Scan Observation Mode for Point-Sources”, PASJ, 61, 2009, 737-750
- 16) Sanders D. B. et al., “The IRAS Revised Bright Galaxy Sample (RBGS)”, AJ, Volume 126, Issue 124, 2003, pp.1607-1664
- 17) Pilbratt G. L., “Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy”, A&A Volume 518, id. L1, 2010, 6pp
- 18) Mushotzky R. F. et al., “Do most active galactic nuclei live in high star formation nuclear cusps?”, APJ, Volume 781, Issue 2, ID.34, 2013, 6pp
- 19) Elbaz D. et al., “GOODS-Herschel: an infrared main sequence for star-forming galaxies”, A&A, Volume 533, A.119, 2011, 26pp

月極域探査における月面探査機の 着陸地点の候補の探索手法の提案

中島 康平^{*1}, 井上 博夏^{*2}, 山本 光生^{*2}, 山本 幸生^{*2}, 大嶽 久志^{*2}
荒木 徹也^{*3}, 廣田 雅春^{*4}, 石川 博^{*1}

Proposal of search method of landing site in lunar polar exploration

NAKAJIMA Kouhei^{*1}, INOUE Hiroka^{*2}, YAMAMOTO Mitsuo^{*2}, YAMAMOTO Yukio^{*2},
OTAKE Hisashi^{*2}, ARAKI Tetsuya^{*3}, HIROTA Masaharu^{*4}, ISHIKAWA Hiroshi^{*1}

ABSTRACT

In recent years, the existence of volatile substances such as water ice has been confirmed in the lunar polar region, and the exploration plan of lunar polar is processing in each country. In Japan, JAXA plans a lunar polar exploration mission in the 2020s. One of the important factors to success the mission is the selection of the landing site of the lunar probe. On the moon, the locations where the spacecraft can land are limited because of spacecraft specification. Furthermore, after landing on the moon, spacecraft should reach from the landing site to the destination point. Here, spacecraft can travel only through the points that satisfy spacecraft traveling condition. Additionally, we should consider the time change of the lunar environment. Also, we assume that landing error will occur when spacecraft lands on the moon. Therefore, we propose the method to search for the landing point of the spacecraft considering moving route and the landing error.

Keywords: Landing Site Selection, Path Planning

概 要

近年、月極域にて水氷などの揮発性物質の存在が確認され、各国で月極域探査計画が進められている。日本でも、JAXAが2020年代に月極域探査ミッションを予定している。ミッションを成功させるための重要な要素として、月面探査機の着陸地点の選定があげられる。月面上において、探査機が着陸可能な地点は限られている。さらに、月面に着陸後は、探査機の走行条件を満たした地点のみを通り、着陸地点から調査目的地点まで到達できる必要がある。経路を検討するときには、月面の環境が時間変化することも考慮する必要がある。また、実際の着陸時には、着陸誤差が生じることが想定される。そこで本研究では、探査機の走行経路及び、着陸誤差を考慮した月面探査機の着陸地点の選定手法を提案する。

doi: 10.20637/JAXA-RR-19-006/0002

^{*} 2019年12月17日受付 (Received December 17, 2019)

^{*1} 首都大学東京大学院 システムデザイン研究科 (Graduate School of Systems Design, Tokyo Metropolitan University)

^{*2} 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)

^{*3} 群馬大学 理工学部 (School of Science and Technology, Gunma University)

^{*4} 岡山理科大学 総合情報学部 (Faculty of Informatics, Okayama University of Science)

1 はじめに

月極域に存在するクレーターの内部には、永久影と呼ばれる領域が存在する [1]。永久影は、一年を通して太陽光が全く当たらない領域である。そのため領域内部の温度は常に低温で保たれている。これまでの研究 [2], [3] により、永久影内とその周辺において、水氷などの揮発性物質の存在が指摘されている。しかし現状では、水氷の正確な分量や分布、エネルギー資源としての利用可能性などについては明らかになっていない。水氷は、将来の有人月面探査や深宇宙探査においてエネルギー資源としての利用が期待されている。また、月面に存在する水氷を解析することで、月や地球に存在する水の起源に関する知見の獲得が期待されている。そのため、2020 年以降、世界各国の企業や研究機関が月極域の探査計画を予定している [4], [5]。日本では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が 2020 年代前半に、月極域探査ミッション [6] を検討している。

月極域探査ミッションを成功させるための重要な要素の一つとして、探査機の着陸地点の選定があげられる。現段階では、月南極域における地質や環境が特徴的な地点を調査目的地点として、その周辺領域を着陸候補領域とする予定である。着陸地点は、月面の傾斜角度、着陸後に日照を確保可能な期間、着陸後に地球との通信が可能な期間などの月面の環境が探査機の着陸条件を満たした地点から選出することが望ましい。また、着陸時には、着陸誤差が生じるため、着陸地点として定めた地点に正確に着陸することは困難である。よって、着陸地点の選定は、着陸誤差も考慮して行う必要がある。

月面に着陸後、探査機は調査目的地点まで移動する必要がある。探査機の走行経路は、月面の傾斜角度、日照、地球との通信など、月面の環境が探査機の走行条件を満たした地点を通ることが求められる。経路の探索では、日照の当たる場所、地球と通信が可能な場所などの月面環境の時間変化も考慮して行う必要がある。

以上より、探査機の着陸地点の選定には、着陸地点の環境、着陸誤差、着陸した地点から調査目的地点までの探査機の走行経路の環境の 3 つの要素を考慮する必要がある。そこで本研究では、これら 3 つの要素を考慮した月面探査機の着陸地点の候補の選定手法を提案する。提案手法により、探査機が着陸可能であり、着陸後に探査機が走行可能な地点のみを通り調査目的地点まで到達可能である地点の抽出を行う。

本論文の構成は次の通りである。2 章では、着陸地点の環境、着陸誤差、探査機の走行経路の 3 点を考慮した探査機の着陸地点の選定手法を提案する。3 章では、2 章で述べる提案手法に基づいた着陸地点の選定を行い、その結果の考察を行う。4 章では、本論文のまとめを述べる。

2 着陸地点の候補の選定手法

本章では、月面探査機の着陸地点の候補の選定手法について述べる。

2.1 着陸候補地点の抽出の流れ

探査機の着陸地点の候補の選定の流れについて説明する。はじめに、着陸地点の選定のため、探査機の着陸可能な地点、走行可能な地点をそれぞれ定義する。次に、着陸候補領域の中から、探査機が着陸可能な地点を抽出する。抽出された地点の中から、着陸後に探査機が調査目的地点まで到達可能な地点を抽出する。ここで、着陸地点から調査目的地点までの経路は、月面環境の時間変化を考慮する必要があるため、静的環境を想定したアルゴリズムで求めることは難しい。探査機は、調査目的地点に到達するまでに通る全ての地点に対して、その地点が探査機の走行可能条件を満たしたタイミングで通らなければならない。そこで、本研究では、幅優先探索 [7] を元とした時間変化を考慮したアルゴリズムを提案し、経路の探索を行う。最後に、着陸誤差円を考慮して、想定される着陸誤差円領域に含まれる全ての地点が探査機の着陸条件を満たしてかつ、着陸後

に探査機が調査地点まで到達可能な地点を着陸地点の候補として抽出する。

2.2 探査機の着陸可能な地点の定義・抽出

探査機の着陸地点の候補を絞るため、探査機の着陸可能地点を定義する。実際のミッションにおける、探査機の着陸可能な地点の条件は確定していないが、おおよそ次のような条件が検討されている。

- 1) 傾斜角度が10度以下である地点
- 2) 探査機が着陸後、1週間以上連続で日照が確保可能な地点
- 3) 探査機が着陸後、1週間以上連続で地球と通信が可能な地点

本研究では、上記の3つの条件を全て満たした地点を探査機が着陸可能な地点として抽出を行う。

2.3 探査機が走行可能な地点の定義・抽出

本研究における探査機が走行可能な地点は、次の3つの条件を全て満たす地点とする。探査機が走行可能な地点も、実際のミッションにおける条件は確定していないが、おおよそ次のような条件が検討されている。

- 1) 傾斜角度が25度以下である地点
- 2) 日照が確保可能な地点
- 3) 地球と通信が可能な地点

1)の条件は、傾斜角度が大きい場合、探査機の転倒確率が大きく上昇するためである。2)の条件は、探査機の稼働エネルギーが太陽光発電に依存するためである。3)の条件は、探査機の現在地や観測データを地球と送受信するために、常に地球と通信可能な状態であることが望ましいためである。本研究では、上記の3つの条件を全て満たした地点を探査機が走行可能な地点とする。2.2の条件で抽出した着陸候補地点の中から目的地点までの経路が確保可能な地点を抽出する。経路が確保可能であるかの判定は、後述する環境の時間変化を考慮した経路探索アルゴリズムを用いて行う。

2.4 着陸誤差を考慮した着陸地点の抽出

1章で述べたように、実際の着陸時には、着陸誤差が生じることが予想される。本研究では、着陸地点として定めた地点を中心とした着陸誤差円が発生することを想定する。よって、ある地点を着陸地点として定めるときに、想定される着陸誤差円領域に含まれる地点全てが着陸地点としての条件を満たしてかつ、着陸後に調査目標地点まで到達可能な地点を着陸地点の候補として抽出する。

2.5 環境の時間変化を考慮した経路探索アルゴリズム

本研究は、 k m四方の領域における月面環境が時間ごとに記録されているデータを利用することを想定する。ここで、 k mという長さは、探査機を走行させたとき、探査機の走行方向と垂直に動く幅よりも大きい任意の値と考える。この k m四方の領域を本研究では一つの地点として定義する。着陸候補領域はこの k m四方の領域から構成されると考えて、図1のように各地点に座標を与える。探査機の1回の移動は、各地点の中心から隣接する地点の中心に移動すると考える。

日照が当たる地点、地球と通信が可能な地点など、一部の月面環境は時間変化する。そのため本研究では、環境の時間変化を考慮した経路探索アルゴリズムを用いる。アルゴリズムのフローチャートを図2に示す。通常、幅優先探索を用いた経路探索では、待ち行列を用いて位置に関する情報を保持するが、このアルゴリズム

では、探査機の位置情報に加えて、探査開始からの経過時間を待ち行列で保持することで、環境の時間変化に対応した経路の探索を行う。

次に、このアルゴリズムの入力と出力について説明する。着陸地点 (sx, sy) 、調査目的地点 (gx, gy) 、探査開始時刻 T_s 、探査機が一時間あたりに移動可能な回数 v 、制限時刻 T_l を入力として、探査機が走行可能な地点のみを通り、制限時間内に着陸地点から調査目的地点まで到達可能であるかの判定を出力とする。ここで、探査開始時刻 T_s と制限時刻 T_l はそれぞれ日時を示しており、探査機が移動可能な時間は、 T_l と T_s の差で表せる。探査機が一時間あたりに移動可能な回数 v と探査機が移動可能な時間から、探査機が移動可能な回数を N とすると、次のように表すことができる。

$$N = v(T_l - T_s) \quad (1)$$

これらの値を用いて、アルゴリズムの処理の流れを説明する。はじめに、着陸候補領域内の全ての地点を非探索済みとする。次に、待ち行列に [探査機の位置 (x 座標), 探査機の位置 (y 座標), 探査機の移動回数 (n)] の 3 つのデータからなる要素を加える。ここで、初期の探査機の位置は着陸地点 (sx, sy) であり、探査機の移動回数は 0 である。その後、探査機の現在地を探索済みとする。以降、以下の処理を繰り返す。

1. 待ち行列の先頭の要素を取り出し、[探査機の位置 (x 座標), 探査機の位置 (y 座標), 探査機の移動回数 (n)] とする。
2. 探査機の移動回数 (n) が移動回数の上限と等しい ($n = N$) 場合、処理を終了する。
3. 探査機の位置と上下左右に隣接する地点で、探査機の走行条件を満たして、かつ探索済みでない全ての地点を探査機の遷移先とする。全ての探査機の遷移先に対して、[探査機の遷移先 (x 座標), 探査機の遷移先 (y 座標), 探査機の移動回数] を待ち行列に入れる。ここで、探査機の移動回数には $n + 1$ を設定する。また、探査機の遷移先を全て探索済みとする。
4. 探査機の遷移先に調査目的地点が含まれている場合、処理を終了する。
5. 探査機の現在地に隣接する地点が全て探索済みでない場合、[探査機の位置 (x 座標), 探査機の位置 (y 座標), 探査機の移動回数] を待ち行列に入力する。ここで、探査機の移動回数には $n + 1$ を設定する。
6. 処理 1 に戻る。

使用するデータは、 h 時間ごとの月面環境が記録されているとする。このとき実験では、 h 時間ごとに月面環境が変化すること考える。探査機が一時間あたりに移動できる回数は v で与えられているため、探査機が hv 回移動するたびに月面環境は変化する。処理 5 では、探査機は移動せずに、探査機の 1 回の移動に要する時間だけ、その地点で時間経過を待つ処理である。よって、探査機の位置は変化しないが、移動回数は 1 増える。これにより、環境の時間変化を考慮して、探査機が制限時間内に到達可能な地点全てが検出される。処理 4 で終了したときは、調査目的地点まで到達可能であると判定し、処理 2 で終了したときは、調査目的地点まで到達不可能であると判定する。

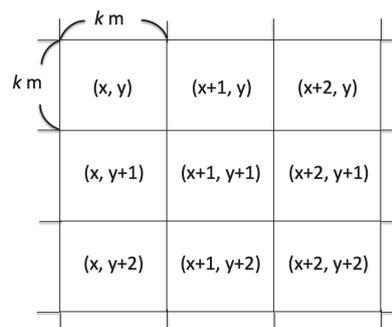


図 1 着陸候補領域のイメージ

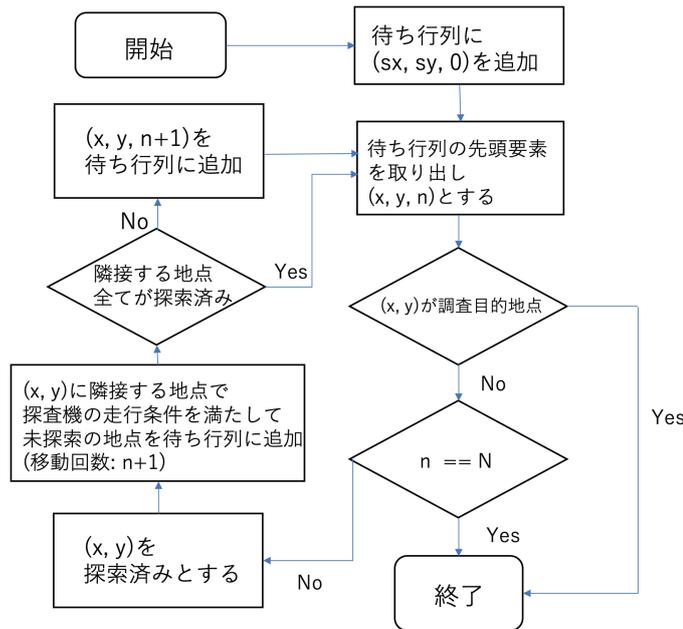


図2 環境の変化を考慮したアルゴリズムのフローチャート

3 実験結果

本章では、3章で述べた手法を用いて行なった実験の結果を記す。実験では、着陸候補領域内から2つの地点を抽出して、それぞれの地点を調査目的地点とした時の着陸地点の候補の探索を行なった。

3.1 実験に用いたデータ

実験に用いたデータの詳細を表1に示す。それぞれの月面環境のデータの記録方法は、井上ら[9]の論文にて記載されている。このデータは、2020年10月1日0時から2020年12月31日24時までの着陸候補領域内の月面環境をシミュレーションしたデータである。1ピクセルあたりに10m四方の領域に関するデータが記録されている。本研究では、この10m四方の領域を1地点とする。着陸候補領域は、縦横301×301の地点からなり、地点数は、90,601地点である。記録されているデータは着陸候補領域内のそれぞれの地点における日照強度、地球との通信の可否、傾斜角度である。日照強度は、着陸候補領域内の各地点における太陽光の強度が12段階で3時間ごとに記録されている。日照強度は、太陽を12の光源から構成されているとして、任意の地点における日照強度は、その地点の地表から高度1mの位置から観測可能な光源数である。12の光源の配置については、[9]に記載されている。地球との通信の可否は、着陸候補領域内の各地点と地球上の各基地局が通信可能であるかが2値で3時間ごとに記録されている。傾斜角度は、着陸候補領域内の各地点における月表面の傾斜角度が記録されている。

3.2 実験設定

実験設定を表2に示す。探査開始時刻は、探査機が着陸可能な地点が多数存在する時期である2020年11月6日6時として、制限時刻は、1週間後の2020年11月13日6時とした。よって探査機が探査可能な時間は168時間である。探査機が1時間あたりに移動可能な回数は、探査機の移動速度を時速0.06kmと想定して、10mの地点間の移動を1時間あたりに6回移動可能であると設定した。よって探査機が期間内に移動できる回数は最大で1,008回である。調査目的地点の正確な位置は現状では確定していない。そのため、調査目的地

点の対象となる地点を含むとされる領域の中から 2 地点をランダムに抽出して、それぞれの地点を地点 A、地点 B として実験を行う。CR1(89.4391S, 137.1345W) を原点とした座標系における地点 A、地点 B の座標と緯度経度を表 3 に示す。日照は、現段階のミッション検討状況 [9] と同様に、日照強度が 12 段階中 6 以上の地点を日照が当たる地点と定義した。通信は、地球上の 4 つの基地局の内、1 つ以上と通信が可能な地点を通信可能な地点と定義した。また、実装は、Python の数値計算ライブラリである SciPy[8] を用いて行った。

3.3 実験結果

着陸候補領域内で、2 章で述べた探査機が着陸条件を全て満たした地点を抽出する。着陸候補領域内で、本実験で設定した探査開始時刻における探査機が着陸可能地点を図 3 に示す。抽出された地点数は 1,726 地点である。

はじめに、地点 A に対する結果について述べる。地点 A の位置は、図 3 に調査目的地点として示している。地点 A に対して、2 章で述べた経路探索アルゴリズムを用いて、調査地点まで経路を確保可能な地点を抽出する。着陸条件を満たした地点に対して、それぞれ調査目的地点までの経路が確保可能である地点を図 4 に示す。抽出された地点数は 856 地点である。最後に、着陸誤差円を考慮した抽出を行う。着陸誤差円の直径を 100 m として、着陸候補地点の抽出を行った結果を図 5 に示す。抽出された地点数は 30 地点であった。実験の結果として、地点 A を調査目的地点とした場合、90,601 地点からなる着陸候補領域の中から、30 地点まで着陸候補地点を絞ることができた。地点 B についても同様の手順で着陸候補地点の抽出を行った。地点 B の位置を図 6 に調査目的地点として示し、地点 B に対する結果を表 3、図 7、図 8 に示す。

表 1 実験データの詳細

着陸候補領域	CR1(89.4391S, 137.1345W) を中心とした 3 km 四方の領域
通信基地局の所在地	臼田, ゴールドストーン, キャンベラ, マドリッド
シミュレーション期間	2020 年 10 月 1 日 0 時 - 2020 年 12 月 31 日 24 時
記録間隔	3 時間ごと
1 地点	10 m 四方の領域

表 2 実験設定

探査開始時刻	2020 年 11 月 6 日 6 時
制限時刻	2020 年 11 月 13 日 6 時
探査機の移動速度	1 時間に 6 回移動可能
日照が当たる地点	日照強度が 6 以上の地点
通信可能な地点	通信基地局 1 つ以上と通信が可能な地点
着陸誤差円の直径	100 m

表 3 調査目的地点の座標・緯度経度と実験結果

調査目的地点	地点 A	地点 B
調査目的地点の座標 (x, y)	(69, -99)	(36, -49)
調査目的地点の緯度経度	(89.4734S, 134.6922W)	(89.4591S, 135.6508W)
調査目的地点までの経路が確保可能な地点数	856 地点	1,665 地点
着陸誤差円を考慮した着陸地点の候補数	30 地点	102 地点

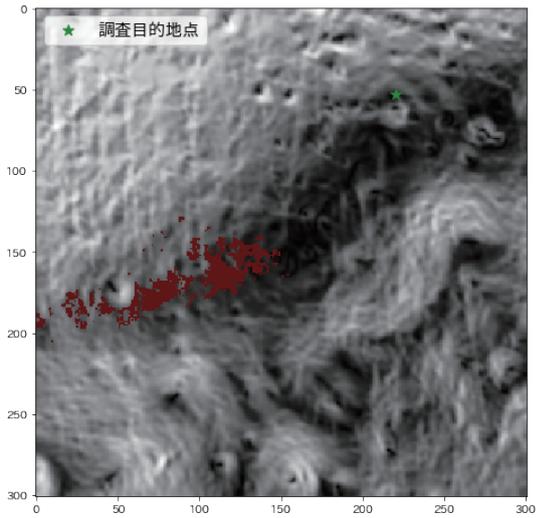


図3 探査機が着陸可能な地点と調査目的地点 A (地点数: 1,726 地点)

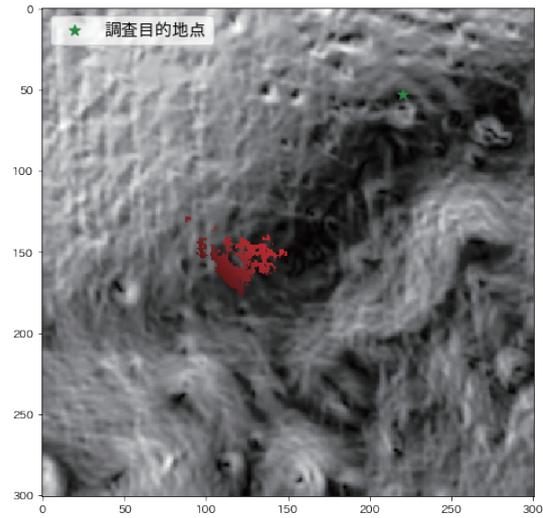


図4 地点 A までの経路が確保可能な地点 (地点数: 856 地点)

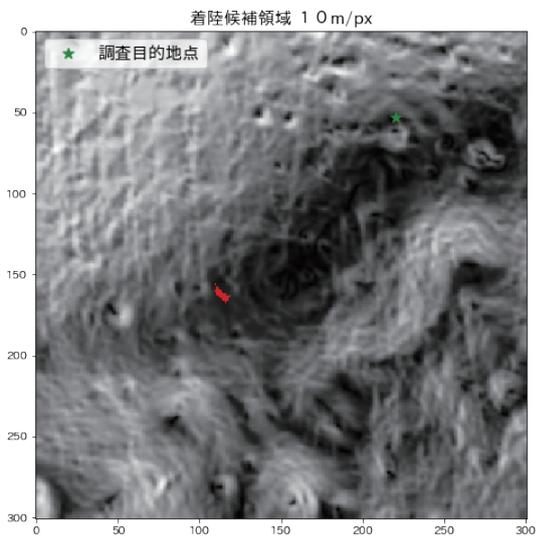


図5 地点 A に対して着陸誤差円を考慮した着陸地点の候補 (地点数: 30 地点)

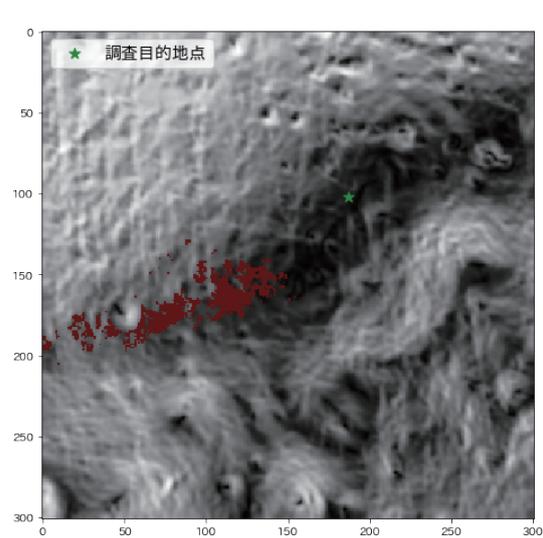


図6 探査機が着陸可能な地点と調査目的地点 B (地点数: 1,726 地点)

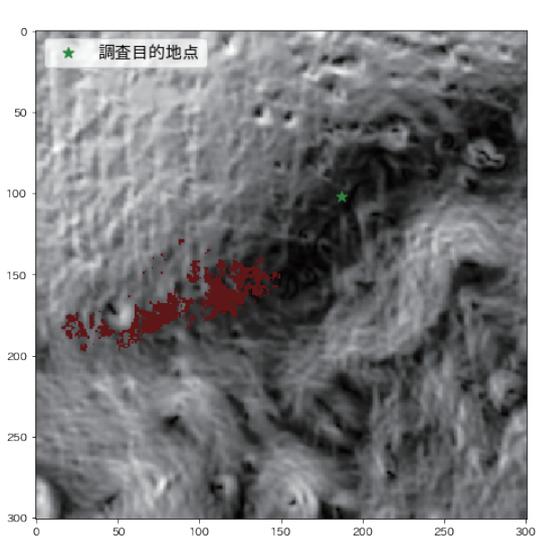


図7 地点 B までの経路が確保可能な地点 (地点数: 1,665 地点)

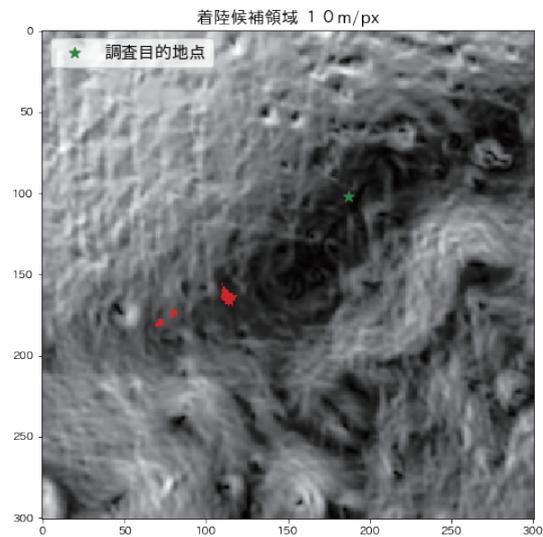


図8 地点 B に対して着陸誤差円を考慮した着陸地点の候補 (地点数: 102 地点)

4 まとめ

本研究では、月極域探査ミッションにおける月面探査機の着陸地点の選定手法を提案した。手法としては、月面環境から探査機が着陸可能、探査機が走行可能な地点を定義し、探査機が着陸可能でかつ、着陸後に調査目的地点まで到達可能な地点の抽出を行った。最後に着陸誤差円を考慮し、その地点を着陸地点として定めたときに、想定される着陸誤差円領域に含まれる地点は全て着陸可能でかつ、調査目的地点まで到達可能な地点を抽出した。今後の課題として、探査機の走行経路の探索手法の再検討があげられる。本研究で提案した手法では、傾斜角度、日照、地球との通信といった全ての月面環境が良好な地点のみを探査機が走行可能であると定義した。月面環境の中でも、日照に関する条件は、太陽光が探査機の稼働エネルギーの確保に必要なため設定した。しかし、調査目的地点に到達するまでに必要な分の稼働エネルギーを確保できれば良いため、常に日照が当たる地点のみを通る必要はない。そのため今後は、日照の条件を重みとした探査機の走行経路の探索手法を検討する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] Bussey, D Ben J and Lucey, Paul G and Steutel, Donovan and Robinson, Mark S and Spudis, Paul D and Edwards, Kay D. Permanent shadow in simple craters near the lunar poles. *Geophysical Research Letters*, Vol.30, No.6, 2003. DOI:10.1029/2002GL016180
- [2] Miller, RS and Nerurkar, G and Lawrence, DJ. Enhanced hydrogen at the lunar poles: New insights from the detection of epithermal and fast neutron signatures. *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol.117, No.E11, 2012. DOI:10.1029/2012JE004112
- [3] Deutsch, Ariel N and Chabot, Nancy L and Mazarico, Erwan and Ernst, Carolyn M and Head, James W and Neumann, Gregory A and Solomon, Sean C. Comparison of areas in shadow from imaging and altimetry in the north polar region of Mercury and implications for polar ice deposits. *Icarus*, Vol.280, pp.158-171, 2016. DOI:10.1016/j.icarus.2016.06.015.
- [4] Colaprete, Anthony and Elphic, Richard C and Andrews, Daniel and Bluethmann, William and Quinn, Jacqueline and Chavers, D Greg. Resource prospector: Evaluating the ISRU potential of the lunar poles. presentation to the Lunar Exploration Analysis Group (LEAG), 2016.
- [5] Djachkova, MV and Litvak, ML and Mitrofanov, IG and Sanin, AB. Selection of Luna-25 landing sites in the South Polar Region of the Moon. *Solar System Research*, Vol.51, No.3, pp.185-195, 2017. DOI:10.1134/S0038094617030029
- [6] Hashimoto, Tatsuaki and Hoshino, Takeshi and Wakabayashi, Sachiko and Otake, Hisashi and Ohtake, Makiko and Tanaka, Satoshi and Morimoto, Hitoshi and Masuda, Koichi and Shimada, Takano and Sutoh, Masataku and others. Lunar polar Exploration Mission. *Proceedings of the 17th Space Science Symposium*, 2017.
- [7] Lee, Chin Yang. An algorithm for path connections and its applications. *IRE transactions on electronic computers*, No.3, pp346-365, 1961. DOI:10.1109/TEC.1961.5219222
- [8] Jones, Eric and Oliphant, Travis and Peterson, Pearu and others. {SciPy}: Open source scientific tools for {Python}, 2001–.
- [9] 井上博夏, 山本光生, 大竹真紀子, 大嶽久志, 星野健. 月極域探査におけるミッション検討状況 (着陸地点), 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 2018.

機械学習による月面 DEM の高解像化

小野寺 康祐^{*1}, 井上 博夏^{*2}, 山本 光生^{*2}, 山本 幸生^{*2}, 大嶽 久志^{*2},
荒木 徹也^{*3}, 廣田 雅春^{*4}, 石川 博^{*1}

Resolution enhancement of DEM of the lunar surface using machine learning

ONODERA Kosuke^{*1}, INOUE Hiroka^{*2}, YAMAMOTO Mitsuo^{*2}, YAMAMOTO Yukio^{*2},
OTAKE Hisashi^{*2}, ARAKI Tetsuya^{*3}, HIROTA Masaharu^{*4}, ISHIKAWA Hiroshi^{*1}

ABSTRACT

Digital Elevation Model (DEM) of the lunar surface is one of the data used to discuss landing sites and travel route candidates for the lunar probe. When using DEM, if the DEM resolution is low, cannot grasp the detail for the terrain. However, the creation of a high-resolution DEM of the lunar surface is expensive because it requires manual work. In this paper, we aim to generate a high-resolution DEM without manual work by using a low-resolution DEM that exists for the entire lunar. In general, the interpolation method is used to generate a higher resolution DEM from the existing DEM. However, the interpolation method is not sufficient for use to discuss the landing site of the lunar explorer and moving path candidates. In this paper, we consider that a method using deep learning that achieves high performance in image super-resolution can be applied and verified the effectiveness of the method. In the evaluation based on the mean of mean error and the mean of maximum error, the verified method generated a DEM with higher accuracy than the general interpolation method. However, we consider that the performance is insufficient for discussing the landing site of the lunar probe and travel route candidates for the lunar probe.

Keywords: Digital Elevation Model, Deep Learning, Neural Network

概 要

月面の数値標高モデル (Digital Elevation Model; DEM) は、月面探査機の着陸地点や移動経路候補を検討するために用いるデータの一つである。DEM を使用する際、DEM の解像度が低いと詳細な地形を把握することができない。しかし、月面の高解像度の DEM の作成は人手による作業を必要とするため、高いコストがかかる。そこで本研究では、月の全球分存在する低解像度の DEM を用いて、人手を介さずに高解像度の DEM を生成することを目標とする。一般的に既存の DEM からより解像度の高い DEM を生成するという目的には補間手法が用いられるが、月面探査機の着陸地点や移動経路候補の検討という目的に用いるには十分でない。そこで本研究では、画像の超解像において高い性能を実現している深層学習の技術を用いた手法が適用できると考え、その手法の有効性を検証した。平均平均誤差および平均最大誤差による評価では、検証した手法は一般的な補間手法よりも高精度な DEM が生成された。しかし、月面探査機の着陸地点や移動経路候補の検討のためには不十分な性能であると考えられる。

doi: 10.20637/JAXA-RR-19-006/0003

^{*} 2019 年 12 月 17 日受付 (Received December 17, 2019)

^{*1} 首都大学東京大学院 システムデザイン研究科 (Graduate School of Systems Design, Tokyo Metropolitan University)

^{*2} 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)

^{*3} 群馬大学 理工学部 (School of Science and Technology, Gunma University)

^{*4} 岡山理科大学 総合情報学部 (Faculty of Informatics, Okayama University of Science)

1 はじめに

月面探査機の着陸地点や移動経路候補を検討するために用いるデータのの一つとして、月面の数値標高モデル (Digital Elevation Model; DEM) がある。DEM はピクセルごとに標高値を持つデータである。一つのピクセルが表す地域が小さく空間分解能 (以下、解像度と呼称する) が高い DEM でなければ、詳細な地形を把握することができない。月面の DEM を可視化した例を図 1, 図 2 に示す。それぞれの図において、各ピクセルの色はその DEM 内における標高値の大きさを表しており、色が明るいピクセルほど標高値が大きいことを表している。

月面の DEM には SLDEM2013¹⁾ (以下、SLDEM と呼称する) などが存在する。SLDEM は JAXA の月周回衛星「かぐや (SELENE)」の地形カメラ (Terrain Camera; TC) によって収集されたデータによるステレオ視に加え、LOLA²⁾ のデータによる全体調整や、TC の欠損部分の補完などを施して構築された DEM である。また、SLDEM と比較して高解像度な DEM として、LRO NAC DEM³⁾ (以下、NACDEM と呼称する) が存在する。しかし、NACDEM はある程度の質と量の月面画像が揃っている領域でなければ作成することができず、月面の一部のものしか公開されていない。加えて、NACDEM の作成には人手による作業が必要となる。そのため、3km 四方の DEM の作成にも三ヶ月以上の作業を必要とし、その作業には専門的な知識と作業に対する熟練が求められることから、高いコストがかかるという問題が存在する。SLDEM と NACDEM の諸元を表 1, 表 2 に示す。

表 1 SLDEM2013 の諸元

DATA SET ID	データ数	MAP SCALE [m/pixel]
SLN-L-TC-5-SLDEM2013-V1.0	64800	7.4031617246699464

表 2 LRO NAC DEM の諸元

DATA SET ID	データ数	MAP SCALE [m/pixel]
LRO-L-LROC-5-RDR-V1.0	464	2 ~

そこで本研究では、すでに月の全球分存在する低解像度の DEM (SLDEM) を用いて、人手を介さずに高解像度の DEM を生成することを目標とする。地球の地理データにおいては、既存の DEM からより解像度の高い DEM を生成するという目的に補間手法が用いられている。補間手法では、与えられた関数によって既知部分の標高値から未知部分の標高値の推定を行う。しかし、補間手法を月面に適用する場合、未知部分に標高の変化が急な小さなクレーターなどの地形が存在すると、その地形を推定することが難しい。よって、月面探査機の着陸地点や移動経路候補の検討という目的に用いるには十分でない。そこで、本研究では、超解像において高い性能を実現している深層学習の手法を適用し、低解像度の DEM から高解像度の DEM を生成する。この結果を公開されている高解像度の DEM と比較することで、検証手法の性能を生成された DEM の精度と、着陸地点選定や移動経路設計に対する有効性の二つの観点から検証する。

本論文は、以下の構成に従う。2 章では、本研究に関連する研究について述べる。3 章では、本研究で有効性の検証を行う、具体的な手法を説明する。4 章では、3 章で示した手法に基づいた実験とその結果についての考察を行う。5 章では、本論文のまとめ及び今後の課題について述べる。

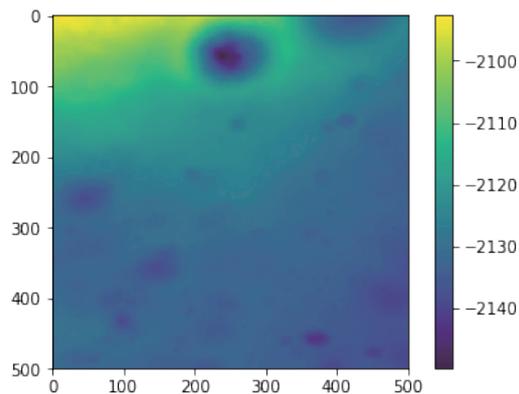


図1 DEMの可視化例(2D)

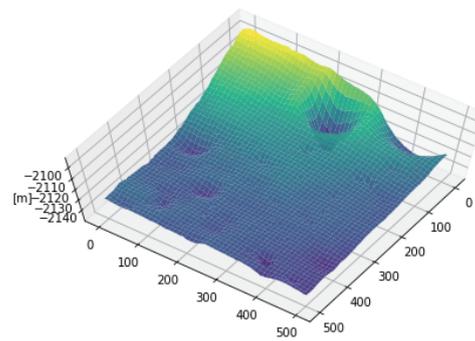


図2 DEMの可視化例(3D)

2 関連研究

2.1 DEMの補間

地球上においては、航空機に搭載されたレーザスキャナなどによって地形の点群データを取得し、その点群データからDEMを作成することが行われており、その際に補間手法が用いられている。点群データは、航空機の撮影位置などの影響により、場所によっては密にデータを取得できないことがある。そのような、点群データが疎な場所ではDEMの標高値を精度良く内挿できていない可能性がある。そのため、点群データが密な場所から得られたDEMの標高値から、点群データが疎な場所のDEMの標高値を補間することが行われている⁴⁾。しかし、データが疎な場所の範囲が大きいくほど、補間の精度が悪くなることも報告されている。

また、本研究と類似した目的である、既存のDEMからより解像度の高いDEMを生成するという目的にも補間手法が用いられている。古館らの研究⁵⁾においては、線形補間^{6,7)}やスプライン補間⁸⁾、Akimaの補間⁹⁾などがその代表的な手法として挙げられ、性能の比較が行われている。

本研究では、深層学習の技術を用いた手法の有効性の検証を、古館らの研究で挙げられている手法と比較をすることで行う。

2.2 単一画像超解像

本研究は低解像度のDEMを用いて高解像度のDEMを生成することを目的としているが、画像を取り扱った研究において、本研究と類似した目的を持つ単一画像超解像(Single image super-resolution; SISR)の研究が存在する。

SISRは1枚の低解像度(LR)の画像から高解像度(HR)の画像を生成することを目的とした研究である。高い知覚品質を持つ高解像度画像からは価値のある情報を得られるため、医療用画像処理や衛生画像処理、セキュリティ画像処理のような多くの分野において広く応用されている研究である。

初期のSISRの主な手法はBicubic補間¹⁰⁾などの補間ベースの手法、再構成ベースの手法¹¹⁾、スパースコーディングを用いた学習ベースの手法¹²⁾の3つが存在していた。しかし、最近では深層学習ベースの手法が他の手法よりも優位性を示している¹³⁾。

深層学習ベースの手法では主に畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network; CNN)を用いる。CNNは主に画像認識に応用されるニューラルネットワークの一種である。隣接した層間の特定のユ

ニットのみの結合を持つ層を持っており、これは生物の脳の視覚野に関する神経科学の知見を元に考案されている。また、CNN は画像認識だけではなく、セグメンテーション、姿勢推定など様々なタスクを解くためのベースネットワークとしても広く利用されている¹⁴⁾。

Chao ら^{15,16)} は 3 層の CNN を用いた超解像手法 (SRCNN) を提案し、高性能な SISR を実現した。また、CNN の層をより深くした VDSR¹⁷⁾ や RED¹⁸⁾、EDSR¹⁹⁾ などが提案されている。

多くの CNN による超解像手法では、低解像度の画像を Bicubic 補間などの補間手法で拡大した後、CNN によるモデルの入力とすることで高解像度の画像を生成する。学習段階では、元となる画像を用意し、それらを縮小した後に再び Bicubic 補間などの補間手法で拡大することで、低解像度の画像を生成する。そうして用意した低解像度の画像を入力データ、元の画像を正解データとして扱いモデルの学習を行う。

DEM も画像と同じくピクセルごとに値を持つデータである。そのため、DEM に対しても CNN を適用することが可能である。そこで、本研究では SISR の研究を参考にした手法を用いて実験を行う。

3 検証手法

本研究では、CNN による SISR の手法を参考にし、任意の地域の低解像度の DEM から、その地域の高解像度の DEM を得る手法を検証する。

本研究では画像ではなく DEM を用いるが、基本的には SISR の場合と同様に低解像度の DEM を入力データ、高解像度の DEM を正解データとしてモデルを学習する。SISR の手法と異なる点としては、本研究の場合は月面の全球分存在する低解像度の DEM (SLDEM) と、月面の一部分だけ作成されている高解像度の DEM (NACDEM) が別々のデータとして公開されている。そのため、高解像度の DEM から低解像度の DEM を作成するのではなく、NACDEM と、それに対応する座標の SLDEM を補間手法によって拡大したデータを高解像度の DEM と低解像度の DEM のペアとして学習を行う。この方法は、高解像度の DEM からダウンサンプリングによって低解像度の DEM を得る場合に比べ、高解像度の DEM に対応する座標の低解像度の DEM を切り出すという処理が必要となる。

しかし、実際に高解像度の DEM を生成する際に用いる SLDEM を用いることで、より実用に適するモデルとして学習することが期待できる。

3.1 モデルの概要

本研究で参考にした CNN による SISR の手法である VDSR と RED について説明する。

VDSR は Jiwon ら¹⁷⁾ によって提案されたモデルである。図 3 に VDSR のモデルの概要を示す。非常に深い層のネットワークを用いることで高い性能を実現している。深い層を用いるモデルの問題点として、学習が収束するまでに時間がかかってしまうことが挙げられる。しかしこのモデルでは、出力層で入力データを足し合わせることにより、中間層では目標データと入力データの差のみを学習させるようにすることで、学習の早い収束を実現している。

RED は Mao ら¹⁸⁾ によって、超解像やノイズ除去などを含む画像復元の手法として提案されたモデルである。図 4 に RED のモデルの概要を示す。対称的な畳み込み層と逆畳み込み層からなるモデルであり、畳み込み層では入力データを抽象化した特徴を得る。一方、逆畳み込み層では得られた特徴マップをアップサンプリングすることで画像の細部を復元する。この対となる畳み込み層と逆畳み込み層を接続することで、勾配消失の問題を防ぎ、深い層の学習を可能とする。また、この接続によって畳み込み層側から逆畳み込み層側へ特徴マップを渡すことになる。これにより、畳み込み処理によって抽象化される前の元の入力画像に近い特徴マップも保持される。そのため、綺麗な画像を復元することにも寄与する。

この二つの手法を利用した理由は、低解像度の画像を高解像度の画像と同じサイズに拡大してからネッ

トワークの入力とするため、低解像度の DEM の解像度と高解像度の DEM の解像度の倍率が異なるペアを同一のネットワークで学習することが可能ということにある。高い性能を実現しているモデルの他の例として EDSR などがある。これらのモデルは Sub-pixel convolution²⁰⁾ という手法を用いている。Sub-pixel convolution は、入力時点では低解像度の画像を拡大せずにそのまま入力し、得られた特徴マップをネットワーク内で並び替えることで、最終的に拡大された画像を出力する手法である。この手法は Deconvolution と比較して効率的な拡大を可能とするとされているが、ネットワーク内で拡大を行うため、拡大率はあらかじめ設定した倍率で固定となる。そのため、Sub-pixel convolution を用いるモデルの場合、入力データの解像度と出力データの解像度の倍率が異なるペアを同一のネットワークで学習することができない。一方、今回用いるデータセットでは、低解像度の DEM (SLDEM) の解像度が全ての地域で一定であるのに対し、高解像度の DEM (NACDEM) は地域ごとに解像度がある程度異なっており、解像度の倍率が異なるペアを学習で使用することになる。そのため、EDSR などの Sub-pixel convolution を用いる手法は今回使用するデータセットには適さない。

また、VDSR と RED の両者を利用した理由は、VDSR が画像の超解像のみを目的とした手法であるのに対して、RED は超解像のみならず、ノイズ除去なども含む画像復元を目的とした手法であるという違いにある。この違いが高解像度の DEM の生成の影響する可能性を考え、比較のために両者を利用して実験を行なった。

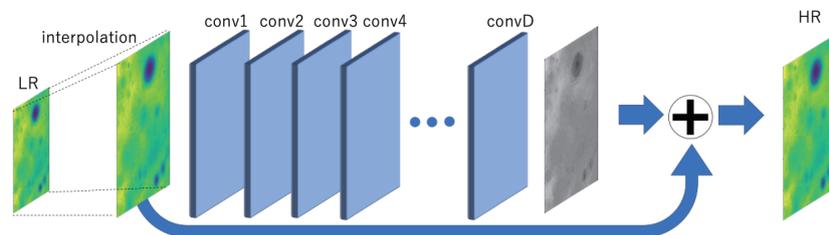


図3 VDSR の概要図

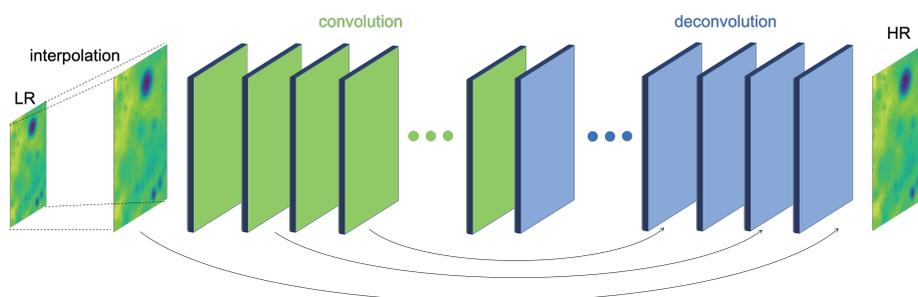


図4 RED の概要図

3.2 モデルの構造

今回使用したモデルの構造を表 3, 表 4 に示す. それぞれの表において, **Number** はモデルの各層に割り当てた番号, **Type** は層の種類を表している. 層の種類としては, **Convolution** が畳み込み層, **Deconvolution** が逆畳み込み層, **Add** が入力を足し合わせて出力する層を表している. また, **Kernel** は畳み込み層におけるフィルタのサイズ, **Stride** は畳み込み層においてフィルタを入力に対して適用していく間隔, **Filters** は畳み込み層におけるフィルタの数を表している. **Activation** は活性化関数を表しており, 本研究のモデルでは正規化線形関数 (Rectified Linear Unit; ReLU) を用いている.

表 3 本研究で使用した VDSR の構造

Number	Type	Kernel	Stride	Filters	Activation
Input					
1	Convolution	3×3	1	128	
2	Convolution	3×3	1	96	ReLU
3 - 20	Convolution	3×3	1	64	ReLU
21	Convolution	3×3	1	1	
22	Add(input,21)				

表 4 本研究で使用した RED の構造

Number	Type	Kernel	Stride	Filters	Activation
Input					
1 - 12	Convolution	3×3	3	64	
13,14	Deconvolution	3×3	3	64	
15	Add(14,11)				ReLU
16,17	Deconvolution	3×3	3	64	
18	Add(17,9)				ReLU
19,20	Deconvolution	3×3	3	64	
21	Add(20,7)				ReLU
22,23	Deconvolution	3×3	3	64	
24	Add(23,5)				ReLU
25,26	Deconvolution	3×3	3	64	
27	Add(26,3)				ReLU
28,29	Deconvolution	3×3	3	64	
30	Add(29,Input)				ReLU

3.3 学習

ネットワークのパラメータを最適化するために最小化する対象となる関数について説明する.

補間手法によって拡大した低解像度の DEM を \mathbf{x} , 高解像度の DEM を \mathbf{y} , 各 DEM のピクセル数を n とする. 学習するためのデータセットとして座標が対応した \mathbf{x} と \mathbf{y} が与えられた場合に, 目標となるのは値 $\hat{\mathbf{y}} = f(\mathbf{x})$ を予測する, 関数 f を最適化することである. ここで $\hat{\mathbf{y}}$ は目標となる \mathbf{y} に対する推定値であり, 関

数 f はネットワークそのものを示している。

学習のために用いる損失関数として平均二乗誤差 (Mean Squared Error; MSE) $\frac{1}{n}(\mathbf{y} - f(\mathbf{x}))^2$ を用いる。ここで、MSE は目標データである \mathbf{y} と低解像度 DEM をネットワークに入力した結果得られる出力 $f(\mathbf{x})$ の誤差を評価する関数として用いており、MSE が小さいほど目標データに近い出力が得られていることを意味する。この損失関数を最小化するようにネットワークのパラメータを最適化する。

4 評価実験

4.1 データセット

実験に使うデータセットとして、低解像度の DEM には DARTS at ISAS/JAXA (<https://www.darts.isas.jaxa.jp>) で公開されている SLDEM を使用した。また、高解像度の DEM としては NACDEM³⁾ を使用した。SLDEM の解像度は約 7.4m/pixel であり、NACDEM においては公開されているもののうち、解像度が約 2m/pixel のものを使用した。

NACDEM は欠損値も含んでいるため、欠損値を除く部分から 500 × 500 ピクセルごとにデータを切り出した。その後、切り出した NACDEM の座標に対応する地域の SLDEM を切り出し、高解像度の DEM と低解像度の DEM のペアのデータセットを作成した。

使用したデータの内訳は、トレーニングデータが 16,000 ペア、バリデーションデータが 4,000 ペア、テストデータが 4,000 ペアとなっている。トレーニングデータは学習に用いるデータであり、バリデーションデータは学習中にモデルの評価を行うために用いるデータである。また、テストデータはそれぞれの手法の評価を行うために用いるデータである。

また、実験環境には NVIDIA GeForce 1080Ti を使用し、GPU 環境において実験を行った。

4.2 比較手法

実験では、古舘らの研究⁵⁾ で挙げられている、既存の DEM からより解像度の高い DEM を生成する際に用いられている、以下に示す補間手法と比較を行い、有効性の検証を行う。

- スプライン補間
- Akima 補間
- 線形補間
- 最近傍補間

スプライン補間は、データ点 (ピクセル) で区分される小区間ごとに、多項式を定めて補間を行う手法である。ここで、多項式の係数は 2 階までの導関数が連続となるように決定する。本研究では 3 次以下の多項式を定めて補間を行う 3 次スプライン補間を用いる。Akima の補間はスプライン補間と同様に小区間ごとに 3 次以下の多項式を定めて補間を行う手法だが、1 階までの導関数が連続であれば良いという点が異なっている。そのため、スプライン補間に比べて振動しにくいとされている。また、線形補間は小区間ごとに 1 次の多項式を定めて補間を行う手法であり、最近傍補間は最も近くに存在するピクセルの値をそのまま用いる手法である。

評価指標として、生成された DEM の精度の評価のためには、古舘らの研究⁵⁾ をはじめとした DEM の生成に関する多くの研究で使用されている平均誤差と最大誤差を使用する。生成されたデータと公開されている高解像度の DEM である NACDEM を比較して誤差が小さければ、精度が高い DEM を生成することができると言える。また、探査機の着陸地点の選定や移動経路の設計においては、標高の変化が急な小さなクレー

ターなどの地形の再現度合いおよび平坦度が重要となるが、これらの評価には、生成された DEM の可視化結果および高解像度の DEM との誤差をフーリエ変換し可視化した結果によってそれぞれ評価を行う。

4.3 結果

実験結果を表 5 に示す。表において、下四つが CNN を用いた手法の結果である。それら四つの手法の括弧内に記載されている補間手法は、低解像度の DEM の拡大に用いた補間手法を示している。また、評価指標の平均平均誤差は、出力されたデータと正解データである高解像度の DEM とのピクセルごとの誤差の平均値を、テストデータである 4,000 ペアで平均した値であり、平均最大誤差はピクセルごとの誤差の最大値を、テストデータである 4,000 ペアで平均した値である。

4.3.1 誤差

平均平均誤差においては、線形補間を用いた RED が、平均最大誤差においては線形補間を用いた VDSR が最も性能が良く、どちらの指標においても CNN を用いた手法の性能が良い結果となった。これらの結果から、性能の観点において一般的な補間手法と比較した場合、CNN を用いた手法は高解像度の DEM の生成において有効性があるといえる。

一般的な補間手法の中では、平均平均誤差、平均最大誤差の両方において線形補間が最も良い性能を示しており、最近傍補間は両方において最も誤差が大きい結果となった。

CNN を用いた手法の結果を比較してみると、RED、VDSR のどちらにおいても補間手法に線形補間を用いた場合の方が、最近傍補間を用いた場合よりも良い性能を示している。このことから、CNN による手法の性能には、低解像度の DEM の拡大に用いる補間手法の性能が影響することが推察される。

表 5 実験結果

	平均平均誤差 [m]	平均最大誤差 [m]
スプライン補間	5.1436	17.4075
Akima 補間	5.1422	17.3667
最近傍補間	5.1572	17.8092
線形補間	5.1396	17.4673
VDSR (最近傍補間)	5.0498	17.4673
VDSR (線形補間)	5.0392	16.9617
RED (最近傍補間)	5.0591	17.5657
RED (線形補間)	5.0387	16.9942

(小数点以下第 5 位で四捨五入している)

4.3.2 可視化

それぞれの手法を適応した結果と、正解データである高解像度の DEM の誤差を可視化した例を図 5 に示す。また、正解データである高解像度の DEM とそれに対応した座標の低解像度の DEM を可視化した例と、低解像度の DEM に対して各手法を適用した結果を可視化した例を図 6 に、それぞれの手法を適応した結果と、正解データである高解像度の DEM の誤差をフーリエ変換したものを、テストデータである 4,000 ペアで平均して可視化した結果を図 7 に示す。

図 5 における、上一列の補間手法によって生成された DEM の誤差と、下一列の CNN を用いた手法によって生成された DEM の誤差を比較すると、相対的な誤差の大きさを表す色の明るさが全体的に暗くなっている

ことから、全体的に誤差が小さくなっていることがわかる。この結果と、誤差の結果から、CNNによる手法は、一般的な補間手法よりも正確な標高値を推定できていると言える。

図6における①の高解像度のDEMと②の低解像度のDEMを比較すると、①の高解像度のDEMにおいて見られる小さな凹凸が②の低解像度のDEMにおけるでは存在していないことがわかる。このような情報が低解像度のDEMでは失われている。③から⑥はそれぞれの補間手法によって生成されたDEMを可視化した例だが、この小さな凹凸を推定できていないことがわかる。

しかし、⑦から⑩のCNNを用いた手法による結果を見ると、こちらも同様に、高解像度のDEMに見られた小さな凹凸が推定できていないことがわかる。これより、これらの手法は、月面探査機の着陸地点や移動経路候補を検討するという目的に用いるためには性能が十分ではないと言える。

小さな凹凸を推定できない理由としては、データセットにおいてこのような小さな凹凸が失われているパターンの地域が、情報が失われていない地域に対して少ないことが考えられる。解決方法としては、あらかじめ小さな凹凸が失われているパターンのデータを抽出し、そのデータ数とその他パターンのデータ数が不均衡にならないようにデータセットを作成することがある。

また、その他の解決方法として、月面の画像から地形の標高値を推定するという方法も挙げられる。この方法には、単眼深度推定 (Monocular Depth Estimation) の研究が応用できると考える。単眼深度推定は、1枚の画像からピクセルごとにそのシーンの奥行きを推定することを目的とした研究である²¹⁾。高解像度の月面画像は高解像度のDEMと比較して非常に多く存在しているため、今回の目的に有用な方法であると考えられる。

次に、図7を見ると、どの手法の誤差も比較的中心に近い低周波成分を多く含んでおり、四隅の高周波成分が少ないということがわかる。高周波成分が少ないということは、誤差が大きく変化する領域が少ないということである。つまり、データ全体としては探査機の着陸地点の選定や移動経路の設計の際に重要となる平坦度や斜度に影響するような誤差は比較的少なく、また、手法間で明確な差は見られなかった。

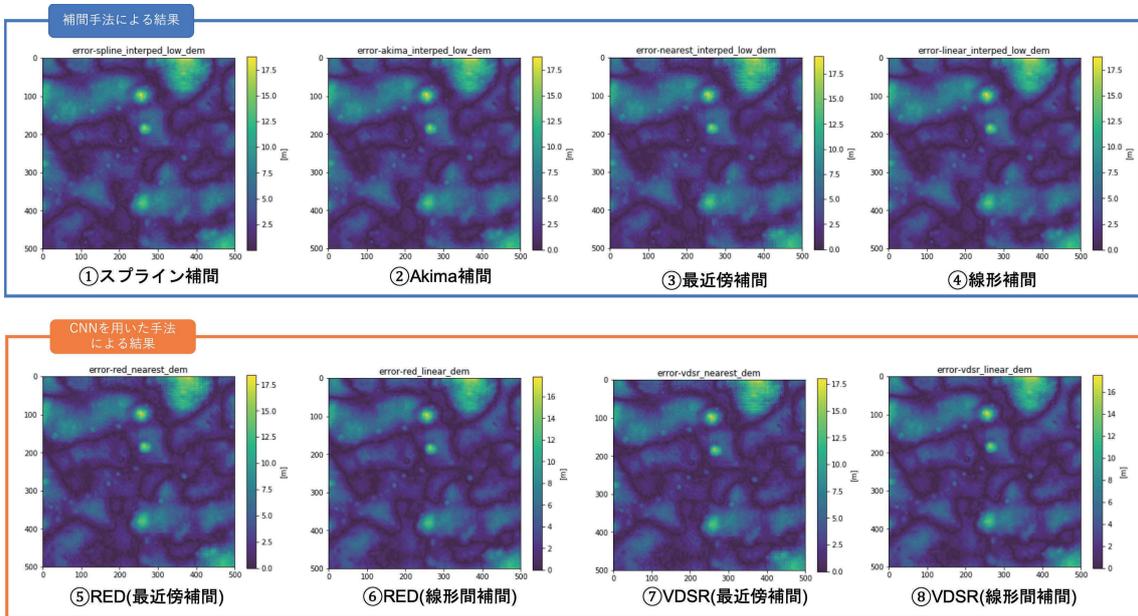


図5 実験結果例 (誤差の可視化)

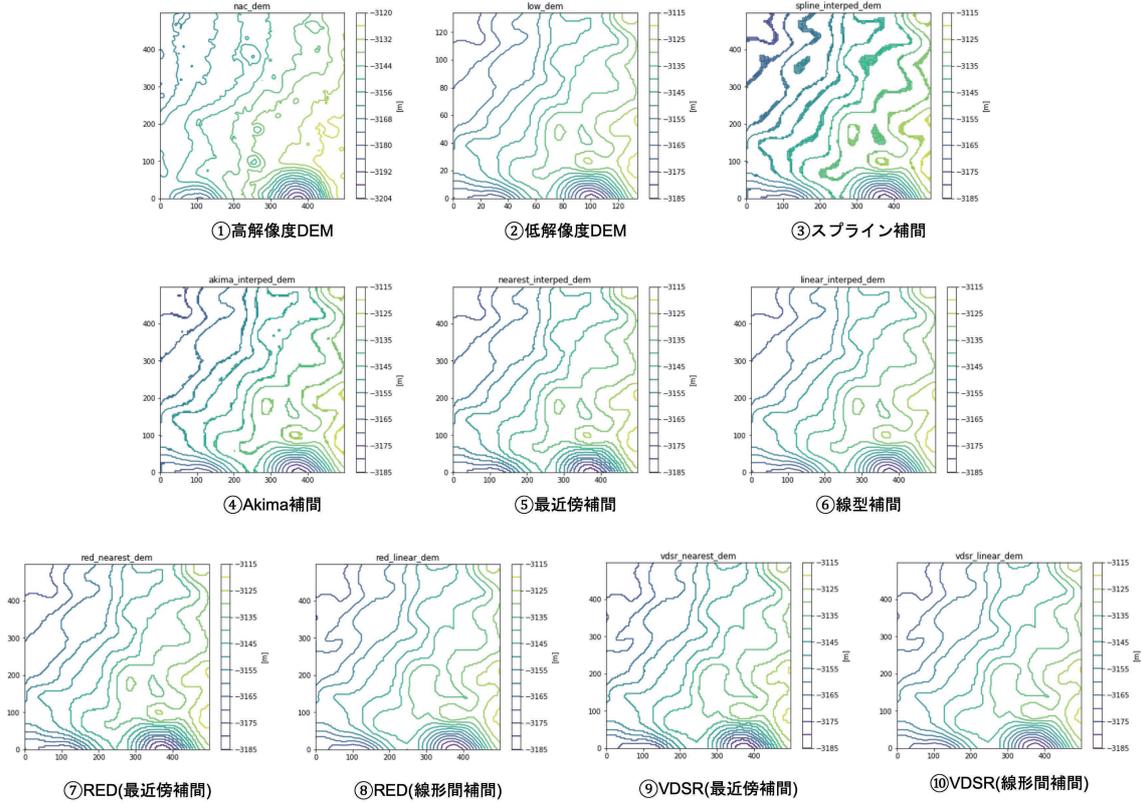


図6 実験結果例 (DEMの可視化)

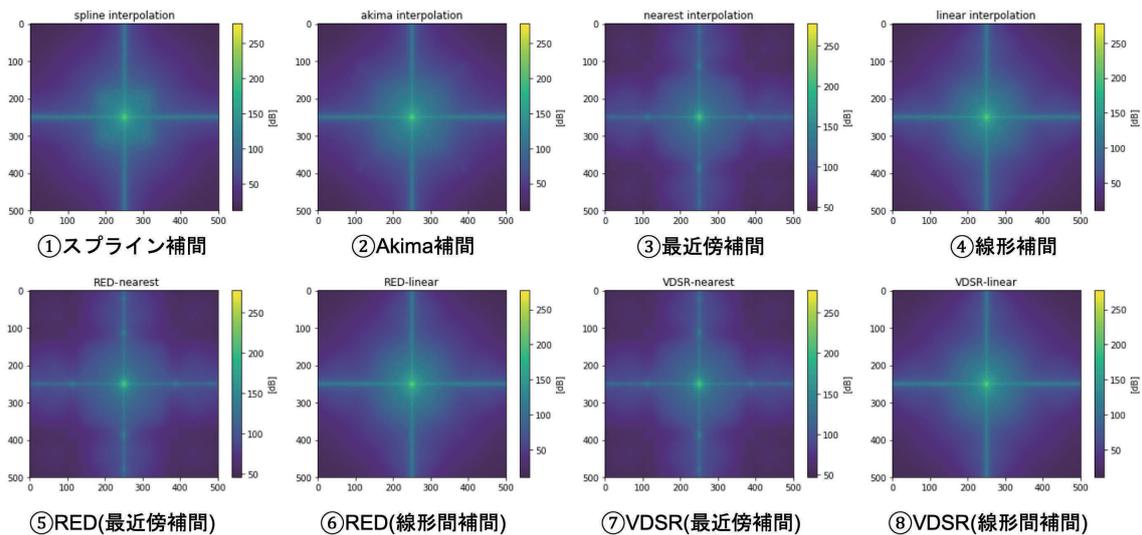


図7 実験結果例 (誤差を周波数成分ごとに可視化)

5 まとめと今後の展望

本研究では、深層学習の技術を用いて人手を介さずに月面の低解像度の DEM から高解像度の DEM を生成する手法について検証した。検証した手法は、類似した目的を持つ解像度が低い画像から解像度が高い画像を生成する画像の超解像の研究を参考にした。

スプライン補間などの地球の DEM に一般的に適用される補間手法と比較して、今回検証した手法は精度が高い DEM を生成したが、一般的な補間手法と同様に、標高の変化が急な地形の推定をすることはできず、平坦度や斜度への影響についても一般的な補間手法と比較して有意な差はなかった。そのため、月面探査機の着陸地点や移動経路候補を検討するという目的のために用いるには性能が十分ではないと言える。一般的な補間手法よりも精度が高い DEM を生成できることから、何らかの制約条件により事前に急激な変化がないことを確認した地域であれば、今回検証した手法は有効であると考えられる。しかし、標高の変化が急な地形を含む地域である場合は、地形の推定が困難であり、低解像度から補間を用いて高解像化された DEM を検討に用いるのは注意を要する。この場合、部分的に解像度の高い地形データを用いる等の対策が必須である。

今後の課題としては、高解像化対象の地域に、地形の推定が困難となる標高の変化が含まれるか否かを判別することがある。含まれる場合には、その誤差の上限を定量的に示し、作成された DEM が探査目的に利用可能かを利用者が識別できるようにすることが重要であろう。

加えて、標高の変化が急な地形の推定を可能とすることも今後の課題として挙げられる。方法としては、データセットにおける、標高の変化が急激な小さな凹凸が失われているパターンが存在するデータの数とその他のパターンのデータ数の不均衡の解消や、1枚の画像からピクセルごとに奥行きを推定することを目的とした研究である単眼深度推定の手法を参考にすることで、月面の画像から地形の標高値を推定するという方法が考えられる。

また、今回の実験で使用した DEM は等経緯度グリッドのものを使用している。等経緯度グリッドの DEM を使用する場合の問題点として、その DEM が表す地域が高緯度であるほどクレータなどの地物が歪んでしまうことがある。今回の実験では使用する DEM の緯度帯を指定していないため、歪んだ地形の入力に対しては歪んだ地形を、歪んでいない地形の入力には歪んでいない地形を出力するようモデルは学習することになる。そのため、モデルの学習や使用には問題がないと考える。しかし、高緯度域と低緯度域の DEM のデータ数のバランスが極端に悪い場合などは、モデルの性能に悪影響を及ぼす可能性があるため対策が必要になると考える。また、特定の緯度帯ごとにモデルを学習させることにより、その緯度帯に対するより高性能なモデルとして学習させることができる可能性も考えられる。

参考文献

- 1) 坪内彩音, 篠田玲奈, 郭哲也, 後藤祐紀, 春山純一, 三宅亙. Selene (かぐや) 搭載地形カメラステレオペアデータから得られた数値地形モデル (dtm) ならびに数値標高モデル (dem) プロダクトの標高値の検証報告. Technical report, 2016.
- 2) David E Smith, Maria T Zuber, Gregory A Neumann, Erwan Mazarico, Frank G Lemoine, James W Head III, Paul G Lucey, Oded Aharonson, Mark S Robinson, Xiaoli Sun, et al. Summary of the results from the lunar orbiter laser altimeter after seven years in lunar orbit. *Icarus*, Vol. 283, pp. 70–91, 2017.
- 3) MS Robinson, SM Brylow, M Tschimmel, D Humm, SJ Lawrence, PC Thomas, BW Denevi, E Bowman-Cisneros, J Zerr, MA Ravine, et al. Lunar reconnaissance orbiter camera (Iroc) instrument overview. *Space science reviews*, Vol. 150, No. 1-4, pp. 81–124, 2010.

- 4) 平岡透, 野中尋史, 亀野辰三. 結合特異値分解による dem の補間法. 写真測量とリモートセンシング, Vol. 52, No. 2, pp. 69–74, 2013.
- 5) 古館守通, 渡辺孝志, 阿部英志, 横山隆三. 数値標高モデルの生成に用いる補間手法の性能評価. GIS-理論と応用, Vol. 8, No. 1, pp. 29–38, 2000.
- 6) Gregory Cole, Scott MacInnes, and James Miller. Conversion of contoured topography to digital-terrain data. *Computers & Geosciences*, Vol. 16, No. 1, pp. 101–109, 1990.
- 7) Ben Gorte. Interpolation between isolines based on the borgfors distance transform. *ITC Journal*, Vol. 1990, No. 3, pp. 245–247, 1990.
- 8) 市田浩三. スプライン関数とその応用. シリーズ新しい応用の数字 20, 1994.
- 9) Hiroshi Akima. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *J. ACM*, Vol. 17, No. 4, pp. 589–602, October 1970.
- 10) Robert Keys. Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, Vol. 29, No. 6, pp. 1153–1160, 1981.
- 11) Kui Jia, Xiaogang Wang, and Xiaoou Tang. Image transformation based on learning dictionaries across image spaces. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 35, No. 2, pp. 367–380, 2013.
- 12) Jianchao Yang, John Wright, Thomas S Huang, and Yi Ma. Image super-resolution via sparse representation. *IEEE transactions on image processing*, Vol. 19, No. 11, pp. 2861–2873, 2010.
- 13) Wenming Yang, Xuechen Zhang, Yapeng Tian, Wei Wang, and Jing-Hao Xue. Deep learning for single image super-resolution: A brief review. *arXiv preprint arXiv:1808.03344*, 2018.
- 14) 内田祐介, 山下隆義. 畳み込みニューラルネットワークの研究動向 (パターン認識・メディア理解). 電子情報通信学会技術研究報告= IEICE technical report: 信学技報, Vol. 117, No. 362, pp. 25–38, 2017.
- 15) Chao Dong, Chen Change Loy, Kaiming He, and Xiaoou Tang. Learning a deep convolutional network for image super-resolution. In *European conference on computer vision*, pp. 184–199. Springer, 2014.
- 16) Chao Dong, Chen Change Loy, Kaiming He, and Xiaoou Tang. Image super-resolution using deep convolutional networks. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 38, No. 2, pp. 295–307, 2016.
- 17) Jiwon Kim, Jung Kwon Lee, and Kyoung Mu Lee. Accurate image super-resolution using very deep convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1646–1654, 2016.
- 18) Xiao-Jiao Mao, Chunhua Shen, and Yu-Bin Yang. Image restoration using convolutional auto-encoders with symmetric skip connections. *arXiv preprint arXiv:1606.08921*, 2016.
- 19) Bee Lim, Sanghyun Son, Heewon Kim, Seungjun Nah, and Kyoung Mu Lee. Enhanced deep residual networks for single image super-resolution. In *The IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR) workshops*, Vol. 1, p. 4, 2017.
- 20) Wenzhe Shi, Jose Caballero, Ferenc Huszár, Johannes Totz, Andrew P Aitken, Rob Bishop, Daniel Rueckert, and Zehan Wang. Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1874–1883, 2016.
- 21) Amlaan Bhoi. Monocular depth estimation: A survey. *arXiv preprint arXiv:1901.09402*, 2019.

局所的に高解像度化した小惑星形状モデルの生成について

三浦 昭*¹, 坂谷 尚哉*¹, 横田 康弘*^{1,*2}, 本田 理恵*²

A Study on Methods of Generating Locally Resolution Enhanced Asteroid Shape Models

MIURA Akira*¹, SAKATANI Naoya*¹, YOKOTA Yasuhiro*^{1,*2}, HONDA Ric*²

概要

2014年12月に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ2」は、2018年の夏に小惑星リュウグウ(162173, 1999 JU₃)の探査を開始した。「はやぶさ2」の小惑星リュウグウへの接近運用に際しては、それらの運用が適切に実施できるように、実際の観測や係る運用に先立って、小惑星の局所的な形状模擬や撮像模擬等が必要とされた。本稿においては、このような要素を実現するための、小惑星形状モデルの生成手法や可視化時の再分割手法について述べる。本手法はリュウグウに止まらず、類似の天体への応用も期待されるものである。

ABSTRACT

The Hayabusa 2 asteroid explorer was launched in December 2014 and began to explore Ryugu (162173, 1999 JU₃) in the summer of 2018. During the proximity operations around Ryugu, in order that each operation may be executed properly, it is required to simulate the local shapes of the asteroid and images of on-board cameras in advance. In this paper, we describe several methods of generating shape models of asteroids and a subdivision method during rendering. These methods are expected to be utilized in the case of other celestial objects.

Keywords: Asteroid, Shape Model Generation

1 まえがき

本稿においては、小惑星形状モデル生成手法の内、局所的な小惑星形状を模したモデリング手法やレンダリング時のポリゴン再分割に関連する手法について述べる。

小惑星探査機「はやぶさ2」に続いて開発された「はやぶさ2」は、C型小惑星のサンプルリターンミッションを担って2014年12月3日に打ち上げられた後、2018年6月に小惑星リュウグウ(162173, 1999 JU₃)に到着し、観測を開始した。

小惑星リュウグウについては、事前に把握できた情報が少なく、小惑星到着に備えた検討準備の一環として、リュウグウの模擬天体(Ryugoid)が作成され[1]、画像生成装置[2]やハードウェアシミュレータ[3]と共に、様々な訓練に供された[4][5]。図1は、タッチダウン地点選定訓練[4]の一環として作成された、Ryugoidの観測シミュレーション画像の例である。

一方で「はやぶさ2」のリュウグウ観測開始以降、様々な観測データから、リュウグウの形状や表面の状態が判明し、さらなる接近運用に向けた撮像シミュレーションが必要となった。しかしながらRyugoidの模擬画像生

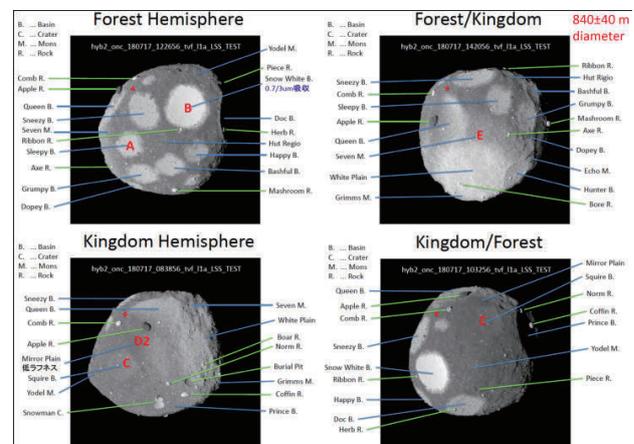


図 1: LSS 訓練用画像の例 [4]

成に用いられた形状モデル生成手法のみでは、接近運用に向けた模擬画像生成には不十分であることが判明し、新たな課題検討に入った。

Ryugoidの形状モデルは、主として高高度の任意位置関係からの撮像を想定し、全体を比較的均一のポリゴンサイズで生成することを目的としていた。そのポリゴン数は4億近くに達し、1ポリゴンのサイズは凡そ10~20cm程度となった。しかしながらタッチダウンを含めた接近撮像シミュレーションを行うためには、さらに高精細なモデルを作成する必要があった。実際に撮像され

doi: 10.20637/JAXA-RR-19-006/0004

* 2019年12月17日受付 (Received December 17, 2019)

*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 高知大学 (Kochi University)

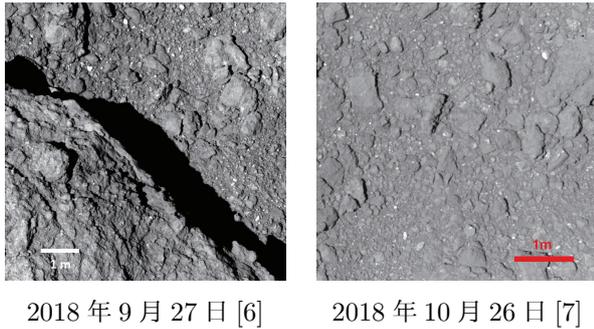


図 2: ONC-T 実画像の例

たリュウグウ表面の近接画像の例を図 2 に示す。例えばこのような解像度で模擬するためには、ポリゴンサイズは mm 単位のものが必要となる。このような分解能で、Ryugoid に用いられたような全球均一な形状モデルを作成するためには膨大なポリゴンが必要となり、現実的ではない。そのためタッチダウン地点に特化して、局所的にポリゴンサイズを細かくした形状モデルが必要となった。

一方で間接光の計算では遠方からの反射も想定しうる。またタッチダウンフェーズにあっても比較的離れた場所からの撮像に際しては小惑星の広範囲の地形が撮像対象となりうる。これらを解決するためには、粗い全体モデルと細かい局所モデルを併せ持つ形状モデルが必要となる。

タッチダウン候補地点等では、岩石の位置やサイズ等が計測された領域がある。タッチダウンフェーズの再現には、これらの計測結果を反映することが有用である。その他、近接運用時に撮影された画像によると、大きな岩石が小さな岩石に埋もれる等の、Ryugoid のモデリングで想定していなかったような位置関係も再現することが有用であると考えられた。

このような条件を考慮に入れつつ、近接撮像に適した形状生成手法を検討した。

以下、2 節にて形状モデルの基本的な構造及び形状生成手法について述べた後、3 節にて岩石の生成手法、4 節にて局所的な形状生成手法、そして 5 節にてレンダリング時のポリゴン再分割について述べる。6 節にて実際の適用例を述べた後、まとめを述べる。

なお実際の撮像シミュレーションは形状モデルの生成手法以外にも、反射特性等の地質情報や光源の特性、撮像系の特性等、様々な要素を総合して検討する必要があるが、本稿においては形状生成に関連する手法に限定して述べることとする。また本稿の手法は撮像シミュレーション、すなわち 3D CG レンダリングへの適用に特化した検討となっており、ここで述べる手法の一部は撮像シミュレーション以外の分野での利用に支障を来す可能性があることを予めお断りしておく。

2 基本的な構造及び形状生成手法

本節においては、Ryugoid の事例 [1] から踏襲する、基本的な形状生成手法について述べる。Ryugoid の形状モデル生成には、本節で述べる以外にも、クレータ等の特徴的な形状を生成する等の様々なアルゴリズムが併用されているが、本稿の手法には直接影響しないため、説明を割愛する。また形状生成に供する原初形状モデルは与えられているものとする。

2.1 形状モデルの構成要素と、その分類

図 3 に、形状モデルの構成要素を示す。

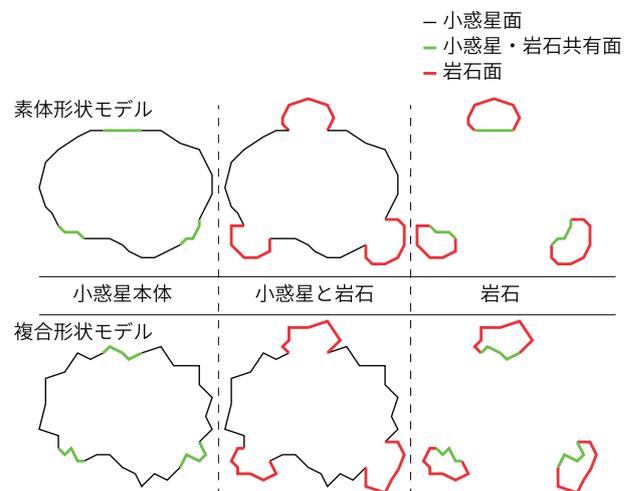


図 3: 形状モデルの構成要素と、その分類

同図の上段、素体形状モデルは、形状モデルを生成する上での、基本形状を示している。素体形状モデルは、それを構成する各頂点の座標値を保持している。下段の複合形状モデルは、素体形状モデルに対して、小惑星や岩石表面の凹凸を模した変位成分（ベクトル）を追加したモデルである。複合形状モデルの各頂点の座標値は単独では存在せず、素体形状モデルの当該頂点の座標値と変位成分の和で表される。以後、単に「座標値」と記述する場合は、素体形状モデルの座標値を指すものとする。

形状モデルを構成するポリゴンは、小惑星面（図中では黒線）、岩石面（同、赤線）および小惑星と岩石で共有する面（同、緑線）で構成される。現実の小惑星においては、このような共有面は存在しないが、Ryugoid の事例及び本稿においては、このような共有面を設けることで形状モデル生成時のポリゴン数削減を図るものである。

同図の左列は小惑星本体の形状を示している。すなわち小惑星本体は小惑星面と小惑星・岩石共有面で構成される多面体となる。右列は岩石の形状を示している。すなわち岩石は岩石面と小惑星・岩石共有面で構成される多面体となる。中央列は、Ryugoid の事例において形状

モデルとして書き出される部分を示している。生成される形状モデルは小惑星面と岩石面で構成された閉多面体となる。本稿における手法との相違は後節 (3.1 節) にて述べる。

2.2 ポリゴンの基本構造と再分割

素体形状モデルを構成するポリゴンの基本構造を図 4 に示す。

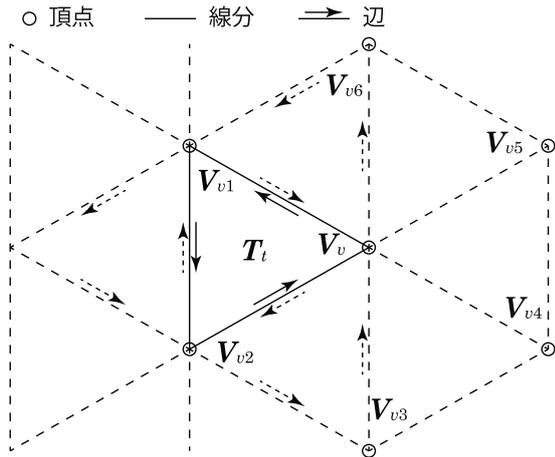


図 4: ポリゴンの基本構造

各ポリゴンは三角形 (図中の T_t) を基本単位とし、3 つの頂点と 3 つの辺を持つ。各頂点 (同、 V_v) は複数の三角形により共有されており、それら三角形の辺を介して隣接する頂点 (同、 V_{v1}, \dots, V_{vn}) を持つ。小惑星本体の形状としては、このようにして隣接する頂点数は概ね 6 となる。三角形の各辺は、それぞれの辺を介して隣接する三角形の辺と、線分を共有する。

形状モデルの再分割に際しては、粗いモデルから順に、各辺の中点を新たな頂点とするポリゴンを生成することにより、1 段階高精細なモデルが生成される。その概略を図 5 に示す。

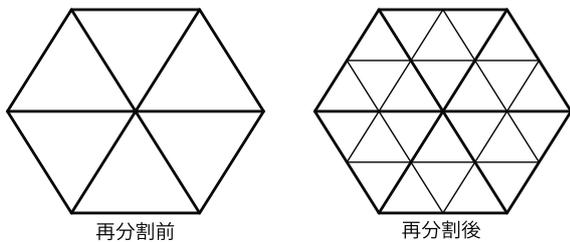


図 5: ポリゴンの再分割

ポリゴン再分割の段数や、それら再分割の結果として得られるポリゴンサイズは、要求される精細度やレンダリングの際に扱えるメモリ容量等の制約により、製作する形状モデルごとに変化する。

2.3 素体形状モデルの平滑化

単純にポリゴンを中点で再分割したのみであれば、分割前と同じ平面上にポリゴンが生成されるため、それを滑らかな形状モデルとするために、平滑化を施す。

2.3.1 平滑化の方針

図 4 の V_{v1} 等示されるような、「隣接」する頂点の選定および、それらを用いた各頂点の平滑化は、以下の方針とする。

小惑星本体の平滑化: 隣接する頂点は、小惑星本体、すなわち小惑星面と小惑星・岩石共有面の中から図 4 の $V_{vn}(n = 1, \dots)$ に相当する頂点を抽出する。

岩石の平滑化: 隣接する頂点は、岩石面と小惑星・岩石共有面の中から図 4 の $V_{vn}(n = 1, \dots)$ に相当する頂点を抽出する。小惑星・岩石共有面を構成する各頂点の座標値は、小惑星本体を生成する際に決定される。よって岩石を平滑化する段階では、それ以外の頂点、すなわち岩石面を構成する頂点の内、小惑星・岩石共有面を構成しない頂点のみが平滑化の対象となる。

2.3.2 平滑化の手順

以下に、素体形状モデルの平滑化手順を示す。そのアルゴリズムは、平滑化に伴って形状モデルが縮小することがないように調整した、経験則によるものである。これまでに試行した形状モデルに対しては目立った破綻は見受けられないが、与えられる原初形状モデルの如何によっては、異なるアルゴリズムが必要となる可能性もある。

まず v 番目の頂点 V_v の素体形状モデルにおける座標値を \mathbf{u}_v 、 V_v に隣接する各頂点 V_{vi} の素体形状モデルにおける座標値を $\mathbf{u}_{vi} (i = 1, \dots, N)$ とする。それらを平均した位置 \mathbf{u}_{avg} は、式 1 で与えられる。

$$\mathbf{u}_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{u}_{vi}}{N} \quad (1)$$

隣接する頂点の法線を $\mathbf{n}_{vi} (i = 1, \dots, N)$ とすると、それらを平均したベクトル \mathbf{n}_{avg} は式 2 で与えられる。

$$\mathbf{n}_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{n}_{vi}}{N} \quad (2)$$

ここで \mathbf{u}_{vi} と \mathbf{u}_{avg} 、 \mathbf{n}_{vi} 、 \mathbf{n}_{avg} が球体上 (図中の表現としては、円上) で図 6(1) のような位置関係にあると仮定する。 ϕ_{vi} は \mathbf{n}_{vi} と $(\mathbf{u}_{vi} - \mathbf{u}_{\text{avg}})$ とのなす角である。 \mathbf{n}_{avg} は、球の中心 \mathbf{o} と \mathbf{u}_{avg} を結ぶ線分と並行であると仮定する。

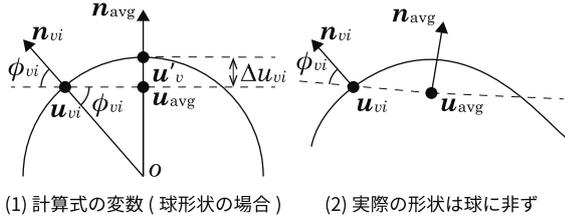


図 6: 素体形状モデルの平滑化

このとき \mathbf{u}_{avg} から球面までの距離 Δu_{vi} は、式 5 で与えられる。 Δu_{vi} を平均して、式 6 より Δu_v を得る。

$$|\mathbf{u}_{vi} - \mathbf{u}_{\text{avg}}| : |\mathbf{u}_{vi} - \mathbf{o}| : |\mathbf{u}_{\text{avg}} - \mathbf{o}| = 1 : \frac{1}{\cos \phi_{vi}} : \frac{\sin \phi_{vi}}{\cos \phi_{vi}} \quad (3)$$

$$\Delta u_{vi} = |\mathbf{u}_{vi} - \mathbf{o}| - |\mathbf{u}_{\text{avg}} - \mathbf{o}| \quad (4)$$

$$= |\mathbf{u}_{vi} - \mathbf{u}_{\text{avg}}| \left(\frac{1 - \sin \phi_{vi}}{\cos \phi_{vi}} \right) \quad (5)$$

$$\Delta u_v = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta u_{vi}}{N} \quad (6)$$

頂点 \mathbf{u}_v の平滑化後の位置 \mathbf{u}'_v は式 7 で与えるものとする。

$$\mathbf{u}'_v = (1 - C_s)\mathbf{u}_v + C_s \left(\mathbf{u}_{\text{avg}} + \frac{\mathbf{n}_{\text{avg}}}{|\mathbf{n}_{\text{avg}}|} \Delta u_v \right) \quad (7)$$

しかしながら現実の位置関係は、例えば図 6(2) にあるような歪な関係であるため、式 7 を用いて適切な滑らかさと凹凸を表現するためには、形状モデルや再分割の段階毎にパラメタの選定を慎重に行う必要がある。

2.4 変位成分の計算

前節の手法により、平滑化を伴った滑らかな素体の小惑星モデルを生成することができる。実際の小惑星を模するために、この素体形状モデルに変位成分を与える。変位成分には中点変位法 [8] や平滑化を適用し、小惑星の凹凸を模した形状を生成する。

本稿にて用いた中点変位法の概要を図 7 に示す。

同図において、素体形状モデル上で s 番目の線分を構成する頂点座標を $\mathbf{u}_{s0}, \mathbf{u}_{s1}$ とする。

素体形状モデルにおける当該線分の中点を \mathbf{u}_{sm} とする。

頂点 $\mathbf{u}_{s0}, \mathbf{u}_{s1}$ における変位成分（前段までの中点変位法や平滑化に基づいて決定された変位量）をそれぞれ $\mathbf{f}_{s0}, \mathbf{f}_{s1}$ とする。初段で中点変位法を適用する際には、 $\mathbf{f}_{s0}, \mathbf{f}_{s1}$ 共に $\mathbf{0}$ とする。

複合形状モデル上で s 番目の線分を構成する頂点座標 $\mathbf{w}_{s0}, \mathbf{w}_{s1}$ は式 8、式 9 で与えられる。

$$\mathbf{w}_{s0} = \mathbf{u}_{s0} + \mathbf{f}_{s0} \quad (8)$$

$$\mathbf{w}_{s1} = \mathbf{u}_{s1} + \mathbf{f}_{s1} \quad (9)$$

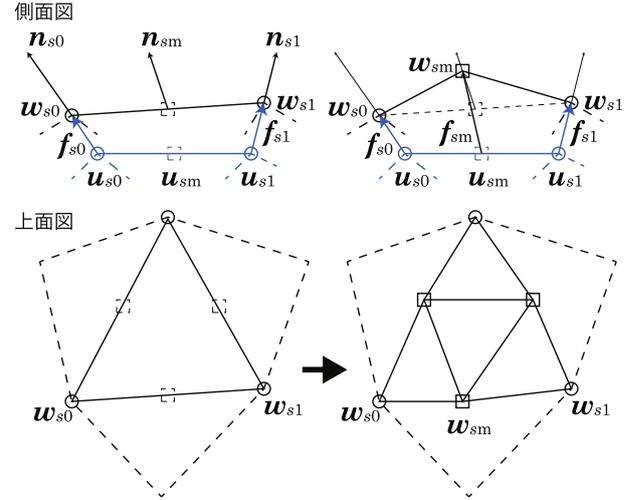


図 7: 中点変位法

それぞれの頂点座標における法線方向を $\mathbf{n}_{s0}, \mathbf{n}_{s1}$ とする。ここで頂点の「法線」は、素体形状モデル上で、その頂点を共有するポリゴンの法線方向を平均したものとす。小惑星本体の法線方向を計算する場合、頂点を共有するポリゴンは小惑星面と小惑星・岩石共有面から選ばれる。岩石の法線方向を計算する場合、頂点を共有するポリゴンは岩石面と小惑星・岩石共有面から選ばれる。

それぞれの法線を平均したベクトル \mathbf{n}_{sm} を、中点の変位方向を定めるベクトルとして扱う。(式 10)

$$\mathbf{n}_{sm} = \frac{\mathbf{n}_{s0} + \mathbf{n}_{s1}}{2} \quad (10)$$

この中点における変位成分 \mathbf{f}_{sm} は、線分長にふさわしい乱数値 r_s を用いて、式 11 で与えられる。

$$\mathbf{f}_{sm} = \frac{\mathbf{f}_{s0} + \mathbf{f}_{s1}}{2} + r_s \frac{\mathbf{n}_{sm}}{|\mathbf{n}_{sm}|} \quad (11)$$

ここで r_s の値の範囲は、現時点では生成された形状からのフィードバック等を得ながらの経験則によるものとなっている。

以上より、変位成分を付加した中点の座標 \mathbf{w}_{sm} は式 12 で与えられる。

$$\mathbf{w}_{sm} = \mathbf{u}_{sm} + \mathbf{f}_{sm} \quad (12)$$

2.5 変位成分の平滑化

中点変位法に加えて、変位成分に対する平滑化を加えた方が、小惑星面を適切に表現できる可能性があるため、必要に応じて変位成分に対する平滑化を施すこととする。

v 番目の頂点 V_v に係る、平滑化後の変位成分 \mathbf{f}'_v は式 13 で与えられる。

$$\mathbf{f}'_v = (1 - C_s)\mathbf{f}_v + C_s \sum_{i=0}^N \frac{\mathbf{f}_{vi}}{N} \quad (13)$$

ここで f_{vi} は隣接する頂点 V_{vi} の変位成分である。 f_v は、平滑化前の V_v の変位成分である。

ここで用いるパラメタも普遍的な定数ではなく、形状モデルや再分割の段階毎に検討するものである。

2.6 小惑星本体の形状モデル生成手順

前節までに述べた各手法を用いて小惑星本体の形状モデルを生成する手順を示す。

まず計算初期の形状モデルとして、原初形状モデルが与えられる。この時点で、各頂点の変位成分は0であり、素体形状モデルと複合形状モデルの各頂点の座標値は一致する。

以後、指定された再分割段数に至るまで、下記の手順を繰り返す。

1. 素体形状モデルを再分割する。(2.2 節)
2. 素体形状モデルが再分割された結果として新たに生成された頂点に対しては、中点変位法により変位成分を与える。(2.4 節)
3. 全頂点の素体形状モデル座標値に対して平滑化を行う。(2.3 節)
4. 全頂点の変位成分に対して平滑化を行う。(2.5 節)
5. 生成された全ての形状モデルは、次節で述べる岩石の生成のために保持しておく。

3 岩石の生成

3.1 岩石の配置

Ryugoid において形状モデルを生成する際には、分布則に基づいてランダムに岩石を配置する手法が用いられた。これに対して本稿における手法では、以下のような拡張を行った。

本稿において、岩石は図 8 のように分類する。以下に、その概略を述べる。

指定配置の岩石: 比較的大きな岩石は、その位置やサイズ等が計測されている場合がある。そのような岩石は、計測等に基づいて与えられた位置、サイズ、形状等の情報に基づいて、小惑星本体の形状モデル上に岩石を配置する。本稿においては、これらを「指定配置の岩石」と称する。

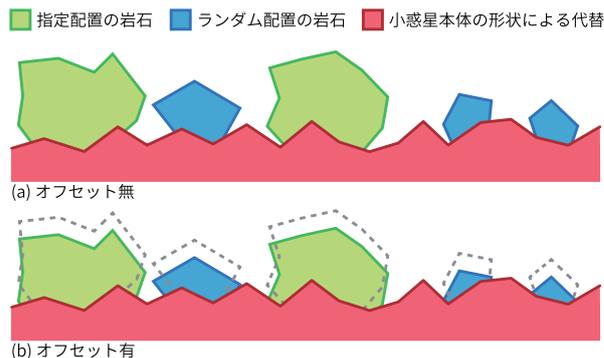


図 8: 岩石の配置

ランダム配置の岩石: 撮像された全ての岩石について詳細が計測されているとは限らない。本稿においては、詳細が計測されていない岩石の内、独立した岩石としてポリゴン化するのが適当と考えられるものについて、予め与えられた分布則に基づいて、ランダムに位置やサイズ、形状等を与える。本稿においては、これらを「ランダム配置の岩石」と称する。この岩石生成手法が、Ryugoid における岩石生成に用いられた手法に相当する。

小惑星本体の形状による代替: さらに小規模の岩石は、岩石専用のポリゴンを生成する代わりに、小惑星本体の形状モデルに凹凸を与えることで代替する。そのために用いるポリゴンは、小惑星面と小惑星・岩石共有面で構成される。リュウグウを撮影した実画像によると小規模の岩石に埋まった大規模の岩石の類も見受けられる。このような関係を表現するために、小惑星本体の形状モデルに対して、岩石が埋もれるような方向に相対的なオフセット値を与え、埋もれた岩石も表現可能とする。

このようなオフセットを用いない場合、小惑星・岩石共有面は完全に小惑星面形状と岩石形状で隠蔽されるため、出力される形状モデルは Ryugoid のケースと同様に、小惑星面と岩石面で構成される多面体で表現可能である。また岩石同士の重なりを排除できれば、熱計算や 3D プリンタ等に供する形状モデルとしても利用可能である (図 8(a))。

一方でオフセットを与えた場合は小惑星面と岩石面の境界が一致しなくなるため、出力される形状モデルは小惑星本体 (小惑星面+小惑星・岩石共有面) の形状モデルに岩石の形状を付加して表現する (図 8(b))。この場合、当初の小惑星・岩石共有面と岩石面とは不連続となる。本稿においては撮像の模擬を主眼にしているため、このようなポリゴン同士の不連続性や重なりを許容しているが、熱計算等、分野によっては、このような形状モデルの利用に支障を来す場合がある。

3.2 岩石面の生成手法

岩石は、与えられた位置、サイズ、形状比率（長径に対する短径や高さの比）、長径の方向に基づいてその配置を決定する。指定配置の岩石とランダム配置の岩石の相違は、与えられるパラメータが計測に基づいて決定されるか分布則に基づいてランダムに決定されるかの相違であって、生成アルゴリズムの相違は無い。

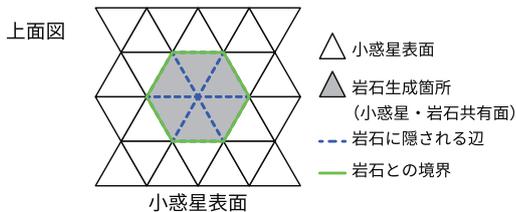


図 9: 岩石の生成（小惑星面）

まず小惑星本体のポリゴンの中から、与えられた位置情報やサイズに基づいて、適切なポリゴン再分阶段において、岩石生成箇所となるポリゴンを定める。その概念図を図 9 に示す。岩石生成箇所は、1つの頂点を共有する一連のポリゴン（三角形）で構成される。図 9 は、1つの頂点を共有する 6つのポリゴンが岩石生成箇所となった場合の例である。係る箇所は、岩石生成後には小惑星・岩石共有面となる。岩石との境界にあたる線分は、小惑星面、小惑星・岩石共有面、岩石面で共有されることとなる。

続いて、岩石との境界となる線分に沿って、岩石面のポリゴンを生成する。

Ryugoid の手法においては、図 10 のように 2層構造の岩石面を生成する。この手法では岩石上面のポリゴンが小惑星面のポリゴンと比較して大きくなりがちであり、岩石のポリゴンサイズに主眼を置く場合は必ずしも効率的に形状モデルを生成できるとは限らない。

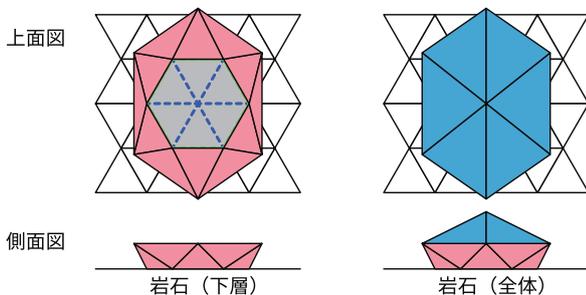


図 10: 岩石の生成（Ryugoid 生成時の手法）

これに対して本稿で用いた手法を図 11 に示す。岩石の生成は下層、中層、上層の 3層構造とする。このような構成をとることで、それぞれのポリゴンが小惑星面のポリゴンと比較して大きくなりすぎないように調整することが容易になる。

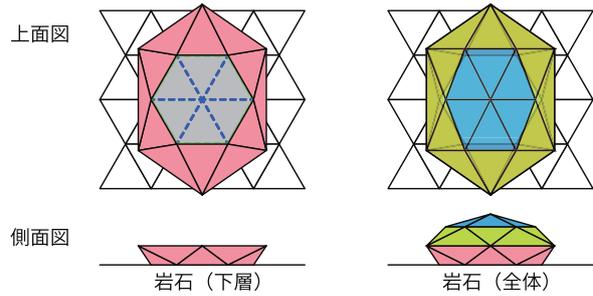


図 11: 岩石の生成（本手法）

実際の岩石生成においては、岩石の形状が画一化しないように、生成する各頂点にランダムなオフセットを付与する。

3.3 岩石の形状モデル生成手順

前節までに述べた各手法を用いて岩石の形状モデルを生成する手順を示す。

小惑星本体の形状モデルは 2.6 節の手順で生成され、保持されていることを前提とする。小惑星・岩石共有面は、該当するポリゴンの再分割後も小惑星と岩石とで共有されなければならない。また岩石面は中点変位法のみで比較的良好な形状を生成できると判断されたため、変位成分に対する平滑化は行わない。

分割の各段階では、小惑星本体の形状モデルを参照しつつ、指定された再分阶段数に至るまで、下記の手順を繰り返す。

1. 素体形状モデルの岩石面を（もし存在するならば）再分割する。（2.2 節）小惑星・岩石共有面を構成する各辺や頂点、ポリゴンについては、再分割時に新たに生成することなく、2.6 節の手順で再分割された小惑星本体側の呼応する辺や頂点、ポリゴンを共有する。この手順を踏むことにより、小惑星・岩石共有面は、小惑星本体側と岩石側とで整合性を維持することができる。以下の諸手順においても、小惑星・岩石共有面を構成する諸要素の値は変更することなく、2.6 節で生成された小惑星本体側の呼応する値を共有する。
2. 素体形状モデルの岩石面が再分割された結果として新たに生成された頂点座標に対しては、中点変位法により変位成分を与える。（2.4 節）小惑星・岩石共有面を構成する各頂点は新たに生成されるものではないため、変位成分は変更しない。
3. 岩石面を構成する頂点の内、小惑星・岩石共有面を構成しない頂点の座標値に対して平滑化を行う。（2.3 節）

4. この再分割段階で、指定配置の岩石を生成する必要があるならば、指定された位置やサイズ、形状等に従って指定個数の岩石を生成する。(3.2 節)
5. この再分割段階で、ランダム配置の岩石を生成する必要があるならば、指定された分布則に従って、必要個数の岩石を生成する。(3.2 節) ただし分布則に則って岩石を生成する余剰が無い場合は、岩石を生成しない。

このようにして形状モデルが生成された後、必要に応じて、岩石が小惑星に埋もれるような方向へのオフセットを与える。

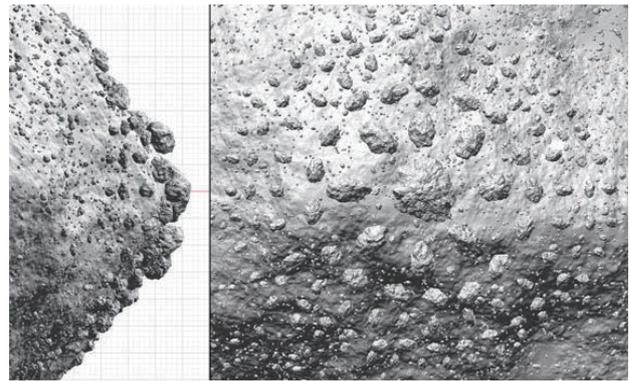


図 13: 岩石生成 (複合形状モデル)

左: 側面図, 右: 正面図

3.4 生成例

上記手法に基づいて指定配置の岩石とランダム配置の岩石を生成した例を図 12 に示す。同図は素体形状モデルに適用したものであり、オフセットは設けていない。図中の緑色は、指定配置の岩石を示している。同図の例は、円環状の配置を与えたものである。青色は、ランダム配置の岩石を示している。赤色は小惑星表面を示している。

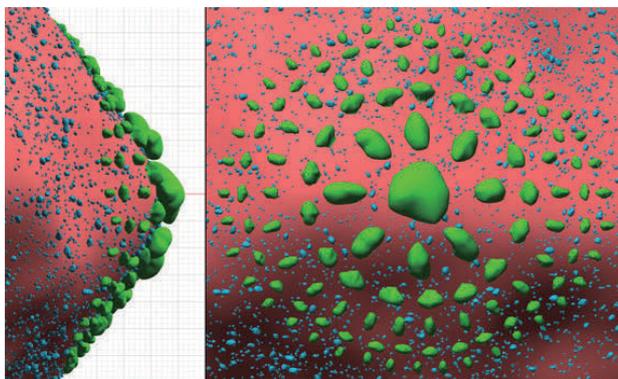


図 12: 岩石生成 (素体形状モデル)

左: 側面図, 右: 正面図

緑: 指定配置の岩石, 青: ランダム配置の岩石,
赤: 小惑星表面

図 13 に、小惑星や岩石表面の凹凸を模した形状モデルを示す。

なお、ここに示す図はいずれも配置や形状の確認を目的としたものであり、実際の小惑星の岩石分布や反射特性等を考慮したものではない。

4 ポリゴンサイズの局所的な偏り

4.1 先行事例

ポリゴンサイズが局所的に変化する例について、先行事例をいくつか紹介する。

図 14 は、チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の形状モデルの例 [9] である。粗いモデルから細かいモデルまで、順次パッチワークで接続されている様子が伺える。ポリゴンサイズが変化する境界は不定形となっており、歪なポリゴンが密集している領域が見て取れる。

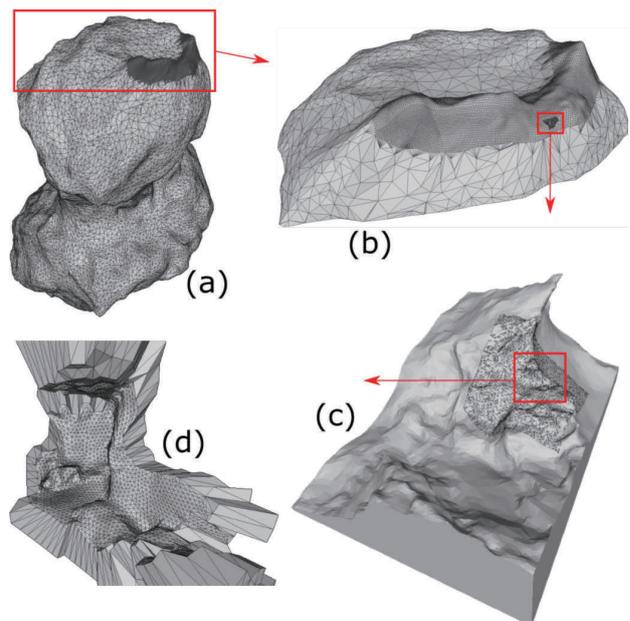


図 14: チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の例 [9]

図 15 は、天体画像生成ソフトウェアの一つである PANGU [10] の一例である。四辺形を基準とした規則的なブロック構成で、段階的にポリゴンサイズが細かくなっている。ポリゴンサイズが変化する境界も四辺形に由来する規則的なものとなっている。

これらの手法に対して、本稿においては、指定された任意形状の範囲を再分割可能であり、かつ再分割しないポリゴンとの境界に極端なポリゴン形状の歪みが生じないような手法を検討する。

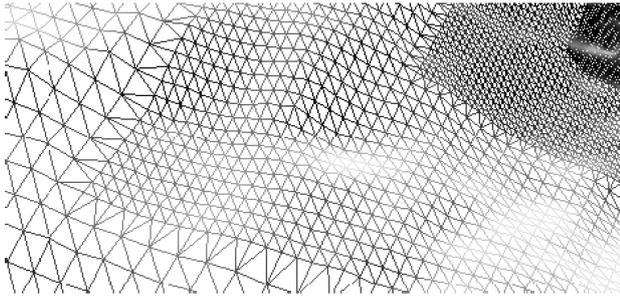


図 15: PANGU を用いた事例 [10]

4.2 局所的ポリゴン再分割の原則

本稿においては、局所的な領域のポリゴン再分割を以下の手順で実現する。

とある再分割の段階で、それ以上再分割する領域と、それ以上再分割しない領域とが与えられたとする。その場合に適用されるポリゴン分割の原則を図 16 に示す。

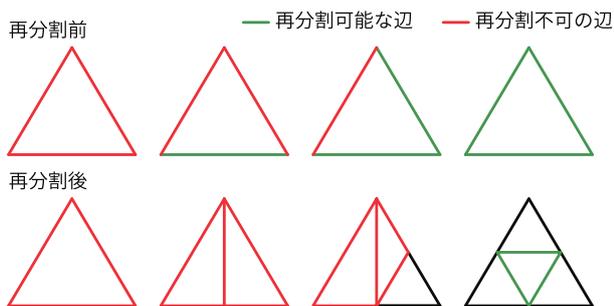


図 16: 局所的再分割 1

同図において緑線は、再分割可能な辺を表す。赤線は、再分割不可の辺を表す。再分割不可の辺については、隣接ポリゴンにて当該線分を共有する辺も再分割不可とする。黒線は、着目しているポリゴンの再分割結果としては更なる再分割が可能であるが、隣接ポリゴンにて当該線分を共有する辺が再分割不可となった場合は、連動して再分割不可となる辺を表す。

同図上段の各ポリゴンは再分割前の状態を表す。回転対称のものを除外すると、左から順に、それ以上再分割しない領域、1 辺のみ再分割する領域、2 辺のみ再分割する領域、3 辺を再分割する領域に分類される。

同図下段は、それらのポリゴンが再分割された後の状態を表す。それ以上再分割しない領域に変化は無い。以後の再分割の各段階においてもその領域が分割されることは無い。それ以外のポリゴンは、再分割可能な辺を 2 等分し、その中点を頂点とする新たなポリゴンを生成する。再分割不可の辺は、その中点に頂点を割り当てる代わりに、既存の頂点のいずれかを新たなポリゴンの頂点として割り当てる。これら再分割の結果として、頂点を再分割不可の辺と共有することとなったポリゴンは、それ以上再分割しない領域とする。(すなわち、そのポリゴ

ンを構成する 3 辺を再分割不可の辺とする。)

簡単な形状に対する再分割の例を図 17 に表す。小惑星形状のような場合は閉多面体を初期形状として扱うことが多いと考えられるが、同図に示すような開いた形状においても、本節の手法は適用可能である。

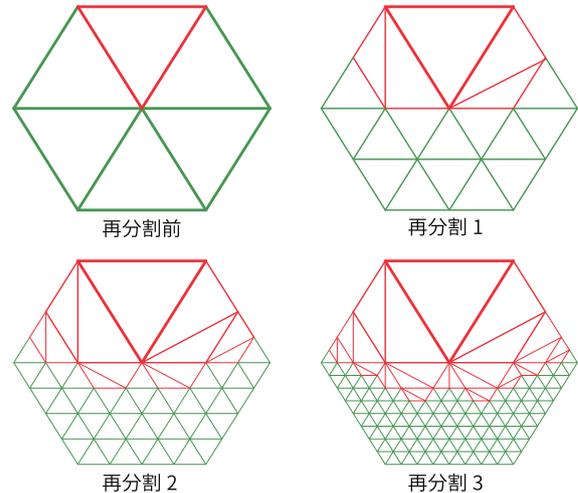


図 17: 局所的再分割 2

このような手順を踏むことによって、再分割する領域と再分割しない領域との間は、比較的無理のない形状のポリゴンで連結することが可能となる。また 1 つの頂点を共有するポリゴン数も比較的少数に抑えることができる。この図の例では、一つの頂点を共有するポリゴン数は 9 以下に抑えられている。

4.3 生成例

局所的再分割の実行例を図 18 に示す。これは小惑星のなかで、直径約 25m の円形範囲のみ再分割の段数を多くした例である。20,480 ポリゴンの原初形状モデルに対して、円形範囲の外側部分は 4 段階の再分割、内側部分は最大 12 段階の再分割を施している。そのポリゴン数は、小惑星面と岩石面の合計で約 4.6 億ポリゴン、小惑星・岩石共有面を含めると、約 5.3 億ポリゴンとなった。

この例では、5 段階以上再分割された範囲にのみ岩石を配置している。また小惑星や岩石表面の材質はランダムに割り当てられており、実在の小惑星の特性を表しているものではない。

この例で生成された岩石の最小サイズは、概ね 1cm 程度となった。なおこの例における再分割段数の区別や岩石の最小サイズは、特段のミッションに呼応したのではなく、技術的な検証のために設定したものである。実際に個々のミッションに適用する際には、実用となるポリゴン数の上限に留意しつつ、具体的な再分割段数を領域毎に定めることになる。

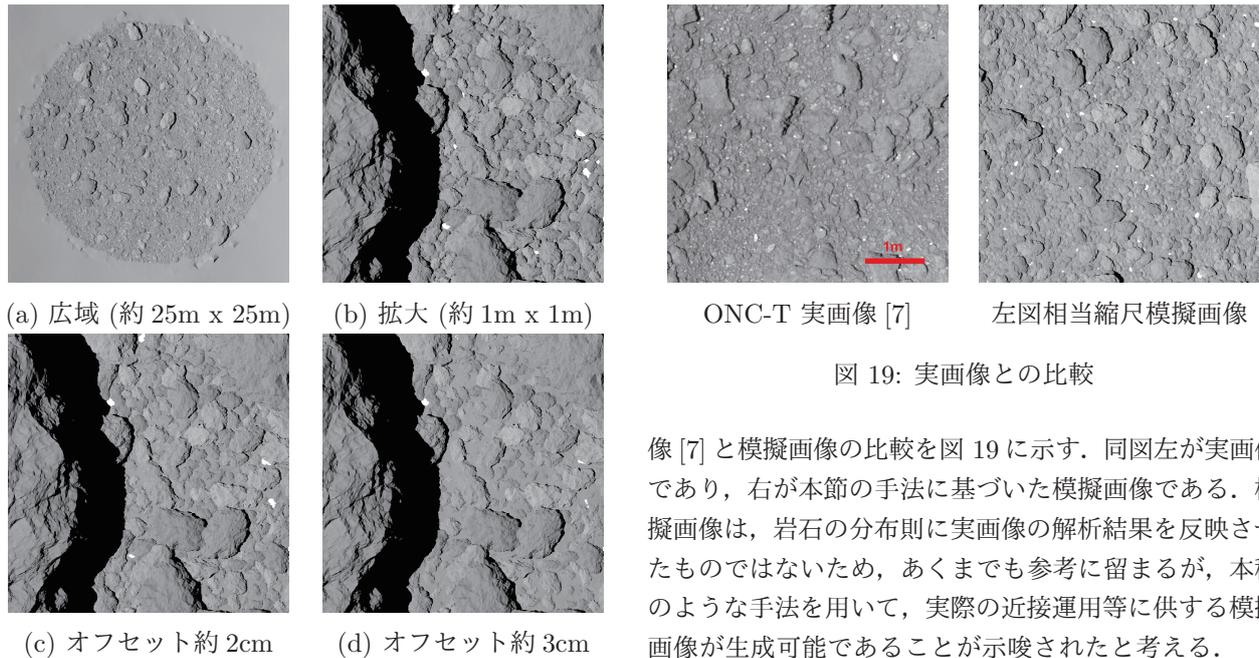


図 18: 局所的再分割の例

図 18 の内、(a) は該当する円形範囲の広域、(b) は画像の 1 辺が 1m に相当する拡大図を示している。この形状モデル生成例においては小規模の岩石を分布則に従って配置することが困難となっている。

同図の下段は岩石が小惑星表面に埋もれる向きに、相対的なオフセットを与えた例である。(c) は均等に 2cm 程度、(d) は均等に 3cm 程度のオフセットを与えている。オフセット値よりサイズの小さな岩石は小惑星本体の面に隠されることとなる。ここで隠された岩石のポリゴンを省略することにより、所要ポリゴン数の増大を抑えつつ小惑星形状を表現することが可能になると考えられる。

なお本稿における技術的な検証と実際の形状モデル生成との間には、以下のような留意点がある。

本稿においては、オフセットを与える場合も与えない場合も、同一の岩石分布則に基づいて計算しているが、オフセットを与えた結果として小惑星面下に完全に埋もれてしまう岩石は、本来は形状モデルとして生成する必要のない岩石である。これらの不要な岩石を、形状生成段階から削減するためには、与えるオフセット値を予め定めた上で、そのオフセットを施すことにより小惑星面下に完全に埋もれるような小規模の岩石を生成しない分布則に変更することが望ましい。

また本稿においては、小惑星本体の形状による代替箇所を、個別に生成した岩石と区別しやすくするために、小惑星表面の変位成分は控えめに生成している。実用的な形状を生成するために妥当となるオフセット値や小惑星表面の変位成分については、実画像等の参考情報に鑑みつつ、個別の検討が必要となる。

参考までに「はやぶさ 2」搭載カメラ ONC-T の実画

ONC-T 実画像 [7]

左図相当縮尺模擬画像

図 19: 実画像との比較

像 [7] と模擬画像の比較を図 19 に示す。同図左が実画像であり、右が本節の手法に基づいた模擬画像である。模擬画像は、岩石の分布則に実画像の解析結果を反映させたものではないため、あくまでも参考に留まるが、本稿のような手法を用いて、実際の近接運用等に供する模擬画像が生成可能であることが示唆されたと考える。

ここで用いた形状モデルも、図 18 と同一のものである。形状モデル生成に要した時間は、Xeon E5-2680 の 2 CPU 構成で概ね 2 時間程度であった。この内、デバッグ情報やファイル I/O 等を除いた、形状モデル生成自身の計算時間は、1 時間程度と見積もられる。アルゴリズムの最適化は今後の課題となっているが、現状の手法において、同等規模の形状モデル生成であれば、同等の所要時間で演算が終了することが期待される。

5 レンダリング時のポリゴン再分割

前節の生成例について述べたように、細かい形状モデルを生成するためには、膨大な量のポリゴンを必要とする。ポリゴン再分割の段数を増やす箇所を局所的に絞ったとしても、扱えるポリゴン数には限度がある。本節においては、形状モデルのポリゴン数を抑えながら小惑星や岩石表面の凹凸を模した画像を生成するために、レンダリング時に中点変位法を適用する手法について述べる。

用いるレンダリング手法はハードウェアシミュレータの一部として開発されたレイトレーシングソフトウェア [2] を基本としており、視線や光線を追跡することにより、各画素の輝度値を計算する。レンダリング時のポリゴン再分割は、このレイトレーシングのオプションとして実装する。

簡単のため、レンダリング時のポリゴン再分割の際は、視線や光線がヒットしたポリゴンのみを用いて中点変位法の計算を行う。その概要を図 20 に示す。

基本的な生成手法は 2.4 節に準じるが、以下のような相違がある。各頂点の法線方向は、当該ポリゴン面の法線方向とする。すなわち隣接するポリゴンの法線方向は考慮しない。形状モデル生成時に用いたような素体形状モデルや変位成分は参照せず、レンダリング時に与えら

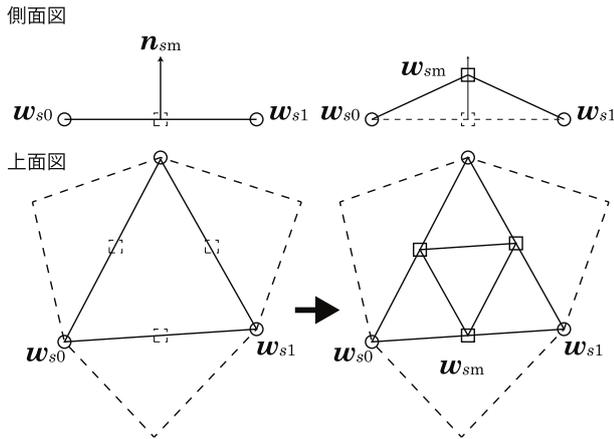


図 20: レンダリング時の中点変位法計算

れた形状モデルのみで計算する。また中点変位法で計算された各頂点の座標値は、再分割されたポリゴンの法線方向の計算のみに用い、光線や視線と当該ポリゴンとの交点計算には用いない。その概要を図 21 に示す。

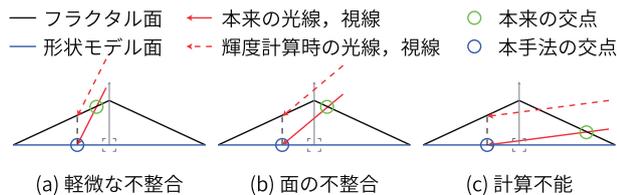
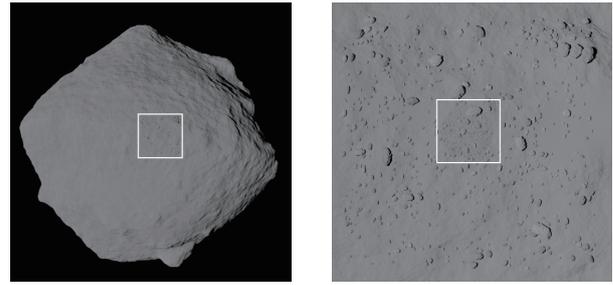


図 21: レンダリング時の中点変位法計算（交点計算）

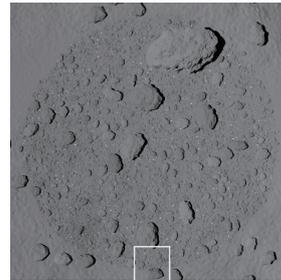
中点変位法により生成された形状モデルと光線や視線との交点は、厳密には同図中 緑丸の箇所となる。対して本手法においては、中点変位法計算前のポリゴンに基づいて交点を計算する。すなわち同図中の青丸が交点となる。これは形状の変化によって生じうるレイトレーシングの様々な追加処理を抑制してレンダリング時間を抑えるためである。そのため本手法で計算する「交点」における反射特性は、厳密に交点を計算した場合とは必ずしも一致しない。

例えば同図 (a) のような場合には、本来の交点から計算される反射特性と本手法により計算される反射特性には軽微な相違しか無いことが期待される。一方で (b) のような場合、本来の交点と本手法で計算される交点は異なる面に対応することとなり、反射特性も応分の相違が生じると考えられる。さらに (c) のような場合、本手法の交点に対応する面は、視線や光線の方向に対して裏面を示すことになり、反射特性の計算は不能となる。これらの状況に鑑み、本稿においては、(a)、(b) のような場合にのみ中点変位法計算に基づいた反射特性を求め、(c) のような場合には反射特性の計算に中点変位法を用いないこととする。(b) や (c) のようなケースは、視線や光線方向と対象ポリゴンの法線方向のなす角が大きい場合に生じやすいと考えられるが、そのような場合に、上記



(a) 全景

(b) 指定配置の岩石等



(c) ランダム配置の岩石等

図 22: 近接撮像の例 [11]

の弁別が適切であるかどうかについては、なお一層の検討が必要であると考えられる。

レンダリング時に多段階のポリゴン再分割を行う場合は、このような不整合が分割の度に発生するおそれがあるため、本稿では 1 段階の分割にとどめている。

6 適用例

図 22, 図 23, 図 24 に本手法の適用例を示す。これは、タッチダウンの事前検証として行った、タッチダウン想定地点 (L08) 付近の撮像シミュレーション [11] 画像からの引用である。

図 22(a) は、模擬した小惑星の全景を表す。その中央付近が L08 に相当する。中央付近の白枠は、L08 において計測された岩石の分布情報に基づいて指定配置された岩石 (3.1 節) が見られる領域であり、それを拡大したものが同図 (b) である。さらに、その中央付近の白枠は、局所的にポリゴン再分割 (4 節) 段数を増やして、ランダム配置の岩石を分布させた領域であり、それを拡大したものが同図 (c) である。

その下中央の白枠、ポリゴン再分割回数が増える境界付近を拡大したものが図 23 である。同図下側の大規模ポリゴンの領域から、上側の小規模ポリゴンの領域にかけて、小惑星面・岩石面共に、ポリゴンサイズが段階的に変化していることが見て取れる。下側の大規模ポリゴン領域は、20,480 ポリゴンの原初形状モデルから 5 段階分割した状態であり、上側の小規模ポリゴン領域は原初形状モデルから 12 段階分割したものである。その中間領域においては、再分割段数が徐々に増加している。

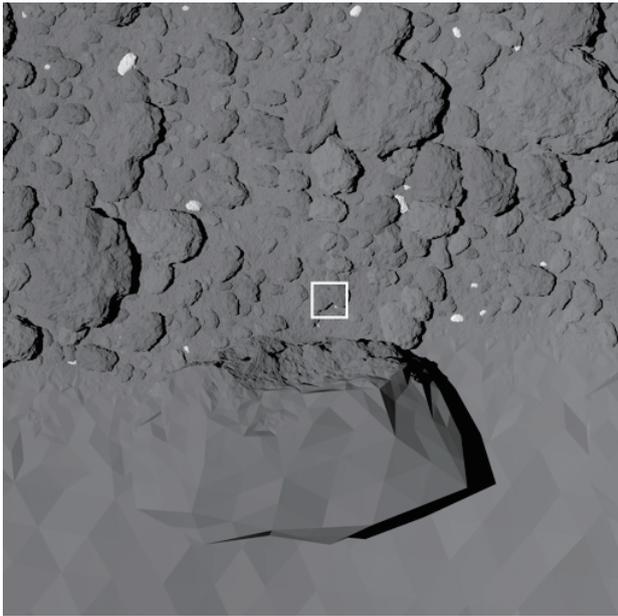


図 23: 近接撮像の例 (拡大)[11]

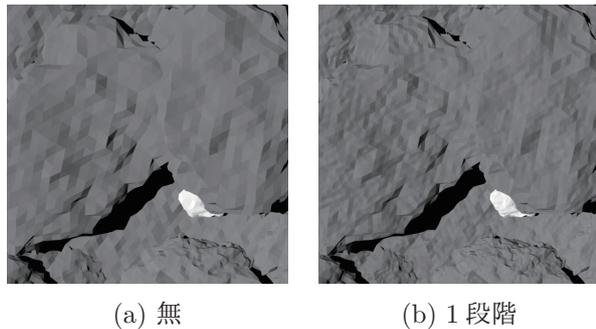


図 24: レンダリング時のポリゴン再分割 [11]

図 23 中央の白枠付近を拡大した領域が図 24 の画像である。

同図 (a) はレンダリング時のポリゴン再分割を行わず、基となった形状モデルにおけるポリゴンを反映したものである。同図 (b) の画像は、同図 (a) の画像と同一領域に対して、レンダリング時に中点変位法計算 (5 節) を 1 段階適用したものである。これらの画像を比較すると、レンダリング時に中点変位法計算を行うことにより、見かけのポリゴンサイズを 1 段階細かくできていることが見て取れる。

同図 (a) の画像生成と比較して、同図 (b) の画像生成に要する時間は、筆者らの計算環境においては、測定誤差以上の差は見受けられなかった。

図 25 には、タッチダウン時の撮像シミュレーションの

例 [11] を示す。それぞれ「はやぶさ 2」搭載カメラ ONC-W1 を模擬しており、左が高度 1m、右が高度 10m からの撮像を模擬した例である。

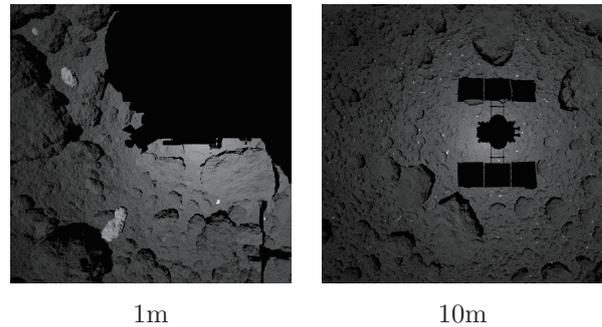


図 25: 近接撮像の例 [11]

7 あとがき

本稿においては、小惑星探査の近接運用シミュレーションにおいて必要となると考えられる、形状モデルの局所的再分割および関連する形状モデル生成手法について述べた。本稿に述べた手法を用いることにより、タッチダウン等の近接運用を想定した撮像シミュレーションに適した形状モデルを生成することが可能になると考えられる。一方で、リアリティの高い形状モデルを生成するためには、実際の観測から得られた岩石分布や表面形状等の情報が重要であり、本稿の範囲ではそのようなパラメータ設定を自動化するには至っていない。

また本稿における手法の適用範囲はリュウグウの模擬に限定されるものではないが、一方で本手法の検討は「はやぶさ 2」のリュウグウ観測データに大きく依存しているのも事実である。今後の課題としては、リュウグウ以外の天体も勘案しつつ形状モデル生成手法を検討することが、他の天体への適用も含めた形状モデル生成に寄与するものと考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、東大 杉田精司氏、JAXA 澤田弘崇氏、立教大学 亀田真吾氏、東大 諸田智克氏、会津大学 本田親寿氏、千葉工大 山田学氏および「はやぶさ 2」プロジェクト関係各位に多大なるご支援・ご協力を頂きましたことを感謝いたします。また本研究は JSPS 科研費 JP18K11610 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 三浦 昭, 山口 智宏, 本田 理恵, 横田 康弘, 千秋 博紀, 北里 宏平, 山本 幸生, 中村 智樹, 野口 高明, 本田 親寿, 山田 学, 和田 浩二, 佐伯 孝尚, 田中 智, “はやぶさ 2 着陸地点選定運用訓練のための仮想 Ryugu データ作成”, 日本惑星科学会 2017 年秋季講演会予稿集, H15, 2017.9.27-29

- [2] 三浦 昭, 武井悠人, 山口智宏, 高橋忠輝, 佐伯孝尚, “「はやぶさ 2」ハードウェアシミュレータに係るレイトレーションソフトウェアの開発と評価”, 宇宙科学情報解析論文誌 第八号, pp.27–41, 2019.
- [3] Y. Takei, T. Takahashi, T. Yamaguchi, T. Saiki, A. Miura, H. Takeuchi, Y. Tsuda, “A Hardware-in-the-loop simulator for deep space touchdown operation training of Hayabusa2”, 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, September 2017.
- [4] H. Yabuta, N. Hirata, R. Honda, Y. Ishihara, K. Kitazato, M. Komatsu, A. Miura, K. Matsumoto, T. Morota, T. Nakamura, A. Nakato, T. Noguchi, T. Okada, N. Sakatani, S. Sugita, S. Tachibana, S. Tanaka, E. Tatsumi, S. Watanabe, T. Yamaguchi, Y. Yamamoto, LSS AA Team (Hayabusa2 Project), “Hayabusa2 landing site selection (LSS) training: Summary report of scientific evaluation”, 49th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, March 2018.
- [5] 佐伯孝尚, リュウグウ近傍での運用をシミュレートする—RIO 訓練, ISAS ニュース 2018 年 4 月号, 2018.4
- [6] はやぶさ 2 プロジェクト, “これまでで最高解像度のリュウグウ地表画像”, http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180927_HighestRes/, 2019 年 10 月 1 日現在.
- [7] はやぶさ 2 プロジェクト, “リュウグウの最高解像度の画像 (解像度更新: 史上最高解像度)”, http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20181026_TD1R1A_ONCT/, 2019 年 10 月 1 日現在.
- [8] G. S. P. Miller, “The Definition and Rendering of Terrain Maps”, SIGGRAPH '86, Volume 20, Number 4, Dallas, August 1986.
- [9] Norbert I. Kömle, Wolfgang Macher, Patrick Tiefenbacher, Günter Kargl, Ivanka Pelivan, Jörg Knollenberg, Tilman Spohn, Laurent Jorda, Claire Capanna, Valentina Lommatsch, Barbara Cozzoni, Felix Finke, “Three-dimensional illumination and thermal model of the Abydos region on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 469, Issue Suppl_2, pp. S2–S19, 2017.
- [10] O. Dubois-Matra, S. Parkes, M. Dunstan, “TESTING AND VALIDATION OF PLANETARY VISION BASED NAVIGATION SYSTEMS WITH PANGU”, 21st International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD 2009). Toulouse, France, 2009.
- [11] A. Miura, N. Sakatani, Y. Yokota, R. Honda, C. Honda, T. Morota, M. Yamada, T. Michikami, N. Ogawa, H., Sawada, S. Sugita, “Simulation of proximity imaging of Ryugu’s surface during Hayabusa2 touch-down sequence”, The 50th DPS meeting, id.411.10, Knoxville, U.S.A, 2018.

論文要旨のテキストマイニング分析による 天文衛星の測定データを基にした研究動向の把握

- X線天文衛星「すざく」を題材にして -

中村 匡佑^{*1}, 水上 祐治^{*1}, 大畠 昭子^{*2}, 本多 啓介^{*3}, 中野 純司^{*3}

A Study on Grasp of Research Trend based on Measurement Data of Astronomical Satellite by Text-Mining Analysis of Abstract of Thesis: Using the Theses of X-ray Astronomical Satellite "SUZAKU"

NAKAMURA Kyosuke^{*1}, MIZUKAMI Yuji^{*1}, OHATA Akiko^{*2}, HONDA Kesuke^{*3}, NAKANO Junji^{*3}

ABSTRACT

Various observation data obtained from artificial satellites and explorers are expected to be widely used in all industry, government and academia. Meanwhile, since the space development project is large-scale activity, its contribution is required to be explained in all sessions including the National Assembly. In addition, it is said that research capability in Japan has decreased since the mid-1990s. Therefore, the improvement of research capability is urgently required and the necessity of objective explanation materials on academic contribution is increasing. This paper aims to derive a method to prepare objective information which is an auxiliary explanation of academic contribution to verify its effect. In the analysis of this paper, text mining analysis is applied to the abstract of the thesis to extract research trends per each year for 20 years and the effect of the method is verified. The academic papers related to the X-ray astronomical satellite "SUZAKU" that were collected by bibliographic databases, were used in this study.

Keywords: text mining, abstract, research trend, exploration satellite, institutional research

概要

宇宙開発プロジェクトは大規模な事業であるため、その貢献について、国会をはじめあらゆる場面で説明が求められる。特に、人工衛星・探査機から得られる様々な観測データは、産官学すべてにおいて広く活用が期待される。また、日本の研究力は1990年代中盤から低下しているとされ、研究力の向上が急務となっていることがあり、学術的貢献に関して客観的な説明資料の必要性が高くなっている。そこで本稿は、学術的貢献の補助的説明となる客観的情報を用意するための手法を導出すること、そして、その効果を検証すること目標とした。分析では、論文の要旨にテキストマイニング分析を施して年代別の研究トレンドを抽出、そして、その手法の効果を検証した。分析対象は、書誌データベースを用いて収集した

doi: 10.20637/JAXA-RR-19-006/0005

* 2019年12月17日受付 (Received December 17, 2019)

^{*1} 日本大学 生産工学部 (Nihon University, College of Industrial Technology)

^{*2} 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)

^{*3} 統計数理研究所 (The Institute of Statistical Mathematics)

X線天文衛星「すざく」関連の論文である。

1. はじめに

人工衛星・探査機から得られる様々な観測データは、広く活用が期待されている(2018)¹⁾。一方、水上ら(2019)²⁾は、宇宙開発プロジェクトは大規模な事業であるため、その貢献について、国会をはじめあらゆる場面で説明が求められているとしている。また、文部科学省(2017)³⁾は、1990年代中盤からの日本の国際的な研究力低下を指摘しており、研究力の向上が急務となっていることがあり、学術的貢献に関して客観的な補助的説明資料の必要性が高くなっている。そこで本稿は、学術的貢献の補助的説明となる客観的情報を用意するための手法を導出すること、そして、その効果を検証することを目標とした。

分析では、論文の要旨にテキストマイニング分析を施して年代別の研究トレンドを抽出、そして、その手法の効果を検証した。分析対象の論文は、X線天文衛星「すざく」関連として、書誌データベースを用いてそれら論文群を収集した。論文群を収集後、3段階で分析を行った。まず、テキストマイニングの単語抽出分析を行い、品詞別に「出現頻度の高い名詞と固有名詞の抽出」を行った。次に、テキストマイニングの共起ネットワーク分析を用いて、「すざく衛星の関連研究の研究対象と手法」を析出した。そして、テキストマイニングの対応分析を用いて「年代別の研究動向」を示した。なお、テキストマイニング分析では、KH Coder⁴⁾を用いた。

2. 関連研究レビューと本稿の目的

2.1. 研究開発成果オープン化モデルと本稿の目的

海老沢(2018)は、宇宙科学研究所 (ISAS: Institute of Space and Astronautical Science) のポリシーは、「公開データが広く利用されることが科学の進歩につながる」として、人工衛星・探査機から得られる観測データは、様々な分野での活用が期待されているとしている。図 1 に JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) の研究開発成果オープン化モデルを示す。なお、この図は、JAXA 第一宇宙技術部門 衛星利用推進 Web ページ⁵⁾をもとに筆者が作成したものである。

この研究開発成果オープン化モデルでは、まず、人工衛星・探査機から得た測定データは、生データとして蓄積される。しかし、この生データは、例えば機械的信号であること、ノイズが含まれていること、不完全なデータであること等があり、そのままでは広く活用することが難しい。そこで、この生データに対して、モデル化、複合・同化、アルゴリズム等の整理・解析の処理を施し、広く活用可能なプロダクト、データセット等の情報に加工して提供するものであり、これら情報は、データアーカイブとして JAXA 内で蓄積されている。データアーカイブとして JAXA 内で蓄積されている情報は、産学官 (産業界 (民間企業)、学术界 (教育・研究機関)、官公庁 (国・地方公共団体)) で活用され、企業戦略、派生研究、政策立案等に利用されている。また、産学官で派生した新たな知識は、JAXA へ戻り(掘り起し)、新たな活動の指針となっている。

本稿の目的は、学术界 (教育・研究機関) への貢献度を客観的に測定する手法を導出すること、そして、その効果を検証することにある。

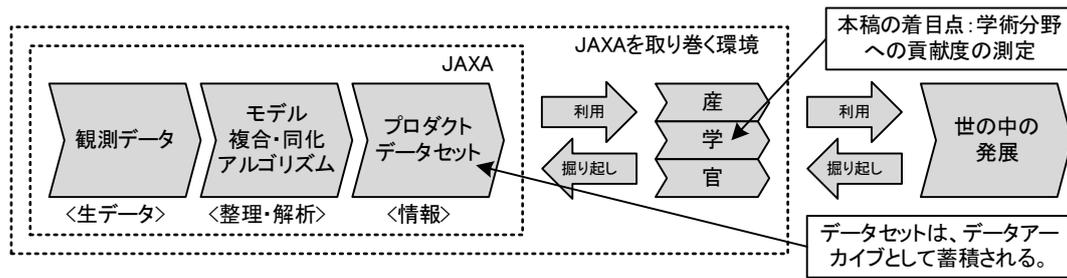


図 1 JAXA の研究開発成果オープン化モデル

JAXA 第一宇宙技術部門 衛星利用推進 Web ページをもとに筆者作成

2.2. 宇宙科学分野のデータアーカイブについて

NASA は 1990 年から X 線天文データアーカイブの開発・運用を開始⁶⁾、宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構 (ISAS/JAXA) では 1997 年から宇宙科学データアーカイブの開発・運用を開始⁷⁾している。さらに、川上ら(2017)⁸⁾は、ISAS に蓄積されている歴史的に価値のある貴重な資料を含む技術資料の散逸を防止し、情報の共有化と有効活用を図ることを目的として、2007 年度より宇宙科学資料データベースシステム DARTS (Data ARchives and Transmission System)⁹⁾及びデータ登録を続けている。

宇宙科学分野では、これら観測データの活用促進を目的とした活動が盛んであり、DARTS に続く代表例として、2009 年度から 6 カ年計画でスタートした大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」(IUGONET: Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETwork)¹⁰⁾が挙げられる。IUGONET は、複数の要因が複雑に絡み合う「超高層大気長期変動」のメカニズムを解明することを目的として、東北大学、名古屋大学、京都大学、九州大学、国立極地研究所の 5 機関が所有する多種多様な超高層大気データを統合して公開するプロジェクトである。林ら(2012)¹¹⁾によると、IUGONET プロジェクトでは、これまでに蓄積された多様な地上観測データに関するメタデータのデータベースを構築するとしており、このメタデータ・データベースによって、各機関・組織に分散して存在する観測データの横断的な検索・取得を可能にし、観測データの効率的な流通、さらには分野横断型の総合解析による新しい超高層大気研究を促進するとしている。また、田中ら(2012)¹²⁾は、IUGONET で開発された解析ソフトウェア UDAS (IUGONET Data Analysis Software)の概要を紹介しており、UDAS は、IDL (Interactive Data Language) で書かれた統合データ解析ツール TDAS (THEMIS Data Analysis Software suite)のプラグインソフトであり、TDAS の機能を利用することで、種類の異なる複数の時系列データの可視化・解析を容易にするとしている。さらに、小山ら(2012)¹³⁾は、SPASE コンソーシアムによって策定された SPASE データ・モデル/メタデータ・フォーマットをベースに、さらに拡張を施した IUGONET 共通メタデータ・フォーマットを策定した。そして、フリーのリポジトリ・ソフトウェアであり、デフォルトでは Dublin Core メタデータ・フォーマットのみを取り扱う DSpace に対し、IUGONET 共通メタデータ・フォーマットを取り扱えるようにカスタマイズを施している。また、堀ら(2012)¹⁴⁾は、IUGONET で策定・公開されたメタデータフォーマットと、そのフォーマットに沿って策定されたメタデータの登録・管理を行うシステムを構築したとしている。最後に小山ら(2014)¹⁵⁾は、IUGONET プロジェクトのメタデータ・データベースは広範な研究領域を対象としている為、専門分野外のユーザーにとって単語検索時における適切な検索語句の選択が容易でないことを指摘して、この問題を解決する連想検索の機能をシステムに付加している。

IUGONET 以外でも複数のプロジェクトがあり、北川ら(2014)¹⁶⁾は、地球惑星試料デポジトリ DREAM (Depository for references of earth and analytical materials)を整備、中川ら(2016)¹⁷⁾は、全天 X 線監視装置

表 1 研究評価の分類

系統	目的	分析手法
論文数調査	論文の生産性指数 研究活動の規模指数	単純集計
引用統計・分析	論文の消費指数 研究活動の品質指数	引用分析 共著分析 (謝辞分析) (共語分析) (共分類分析)

根岸・山崎(2001)と藤垣ら(2004)をもとに筆者作成

MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) の観測データを全世界の科学者が容易に利用できることを目的として、データ公開を進めており、2011年11月に開始したWebインタフェースを用いたオンデマンドデータの公開に続き、データを恒久的に後世に残すためのデータアーカイブの開発を進めている。さらに、高木ら(2016)¹⁸⁾は、科学衛星や探査機の運用に必要なとされる工学情報(テレメトリデータ、局設備からのデータなど)を一元的に収集管理し、また利用しやすい形で関係者に配布するための「科学衛星運用工学データベース」EDISON (Engineering Database for ISAS Spacecraft Operation Needs) の整備を進めている。そして、野口ら(2017)¹⁹⁾は、MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) 搭載の MCS (Mars Climate Sounder) による観測データの利用を広めるための環境整備を進めている。

宇宙科学分野では、IUGONETをはじめ、観測データの活用促進を目的とした複数のプロジェクトがあり、情報の公開と共に細分化が進んでしまった。そこで、根本ら(2018)²⁰⁾は、資料の種類や機関を横断した資料情報の整理を目的として、デジタルオブジェクト識別子 (DOI: Digital Object Identifier) を用いた「サブジェクトリポジトリ」の構築を推進している。

2.3. 書誌データベースを用いた研究力評価について

根岸・山崎(2001)²¹⁾は、書誌データを用いた研究評価の方法には、文献の発表数を対象に分析する論文数調査の系統と、論文への引用度数や論文刊の引用による結合関係を対象に分析する引用統計・分析の2系統があるとしている。研究評価の分類を表1に示す。根岸ら(2001)、藤垣ら(2004)²²⁾、Mizukami et al.²³⁾は、前者の「論文数調査」の目的は、論文の生産性指数、研究活動の規模指数を求めることであり、主に単純集計の手法が用いられる。一方、後者の「引用統計・分析」の目的は、論文の消費指数、研究活動の品質指数を求めることであり、引用分析、共著分析等の手法が用いられるとしている。また、少数ではあるが、謝辞分析、共語分析、共分類分析等の手法が用いられる。なお、謝辞分析は、論文中に記されている謝辞が分析対象、そして、共語分析は、論文中に記されている複数の語の間の関係が分析対象、最後に共分類分析は、分野分類の共出現現象が分析対象である。

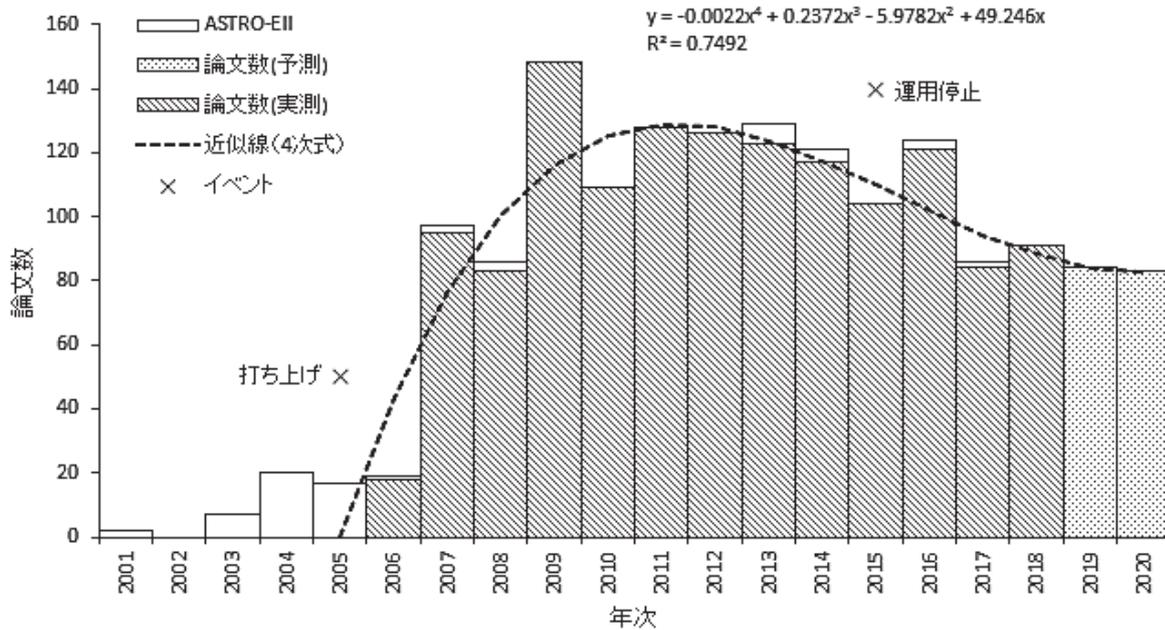


図 2 論文数の年次変化

3. 分析

3.1. 分析データ

分析対象の衛星は、X線天文衛星「すざく」である。この衛星は、遠距離にある天体のX線観測、宇宙の高温プラズマのX線分光観測等を目的としている衛星であり、2005年にM-Vロケット6号機にて内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられ、10年間の運用後、2015年に観測を完了している。分析対象の衛星の選択においてこの衛星が選ばれた理由として、比較的最近の衛星であるので、現状の把握に適していると考えられること、10年間の運用期間があるので、時系列での分析に適していること、すでに運用が完了しているので、さらに測定データが増加することがなく、恒久的な分析が可能であることが挙げられる。

分析対象の論文は、Clarivate Analytics社の論文データベースWeb of Science – Core collection (以下、WOS)を用いて収集した。なお、WOSは、Impact Factorの算出に用いる書誌データベースであり、査読論文の網羅性が高いと考えられる。表2に論文の検索条件を示す。分析対象の論文は、トピックに”SUZAKU”が含まれる英語論文であり、2001年から2019年の18年を対象とした。検索の結果、分析対象の論文は1419本であった。なお、検索条件のドキュメントタイプは、査読論文”Article”と”Review”のみとし、重複を避けるために発表論文等の査読なし論文”Proceedings”は対象外とした。

表 2 検索条件

WoS 検索条件 : (TS=(SUZAKU) OR TS=("ASTRO-E II") OR TS=("ASTRO-E 2") OR TS=("ASTROE II") OR TS=("ASTROE 2") OR TS=("ASTROEII") OR TS=("ASTROE2") OR TS=("ASTRO-EII") OR TS=("ASTRO-E2"))

AND 言語: (English) AND ドキュメントタイプ: (Article OR Review)

索引=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, ESCI タイムスパン=全範囲

表 3 対応分析の設定

集計単位と抽出語の選択			対応分析の設定	
文章と見なす単位	H5		グラフの種類	抽出語 x 外部変数
条件	出現数	≧ 350	外部変数	論文誌名
	品詞	名詞のみ	差異が顕著な語を分析に使用	上位 100 語
上記条件での対象語数		150*1	バブルプロット(円の大きさ)	語の出現回数

*1: HKCoder の推奨値は 100-150 である。

図 2 にすぎく衛星の関連論文の年次変化を示す。なお、"ASTRO-EII"は、すぎく衛星を打ち上げる前のプロジェクト名である。また、JAXA の慣習により、衛星打ち上げ後はプロジェクト名が "SUZAKU" に変更になっている。本稿では、"ASTRO-EII"で検索された論文は、すぎく衛星の観測データを使用した論文ではないと判断して分析の対象外としている。実測の論文において、論文数は、打ち上げ翌年の 2006 年に 18 編の論文が発表されており、2009 年の 149 編が最も多くその後は減少傾向を示している。式 1 にすぎく衛星関連論文の論文数年次変化の近似線の式を示す。式 1 に当てはめると、2019 年、2020 年の論文数の予測は、84.078 編、82.770 編である。

3.2. 分析手法

論文の要旨にテキストマイニング分析を施して年代別の研究トレンドを抽出、そして、その手法の効果を検証する。論文の要旨は、論文の目的、手法、結論等の概要を簡潔にまとめたものであり、論文の特徴を示すものである。また、おおよそ 500 文字で構成されており、文字数の差が原因での分析結果の偏りが少ないと考えられる。分析は 3 段階で行った。まず、単語抽出分析を行い出現頻度の高い語句を抽出、次に、対応分析を施して年次別の研究の傾向を抽出した。最後に、すぎく衛星関連論文と新たに得られた他の衛星・宇宙望遠鏡の関連論文の関係を論文数比較する。

3.2.1. 単語抽出分析について

テキストマイニングの単語抽出分析を行い、品詞別に出現頻度の高い名詞と固有名詞の抽出を行う。分析ツールは、KH Coder Ver.3.Alpha.13k²⁴⁾を用いた。なお、テキストマイニング分析は、テキストデータに対して、自然言語解析の手法を使って、文章を単語（名詞、動詞、形容詞等）に分割し、それらの出現頻度

表 4 単語抽出分析の結果

#	名詞	出現数	#	名詞	出現数	#	固有名詞	出現数	#	固有名詞	出現数
1	x-ray	3350	11	Region	760	1	SUZAKU	1608	11	Compton	172
2	emission	2023	12	Galaxy	711	2	XMM-Newton	322	12	NuSTAR	162
3	observation	1535	13	Flux	660	3	AGN*	313	13	ICM*	155
4	spectrum	1505	14	Temperature	655	4	Galactic	285	14	Telescope	149
5	source	1197	15	Accretion	556	5	Chandra	276	15	Gamma	144
6	component	916	16	Gas	551	6	NGC*	271	16	kT	129
7	datum	894	17	Disk	530	7	Seyfert	243	17	Si	121
8	energy	888	18	Density	504	8	XIS*	240	18	Spectrometer	110
9	result	887	19	Absorption	496	9	SWIFT	211	19	MG	101
10	cluster	807	20	Time	489	10	SNR*	197	20	Imaging	100

* X線を用いた分析手法の短縮形表現である。

式 1 すぎく衛星関連論文の論文数年次変化の近似線の式 (2006-2018)

$$y = -0.0022x^4 + 0.2372x^3 - 5.9782x^2 + 49.246x \quad (R^2 = 0.7492)$$

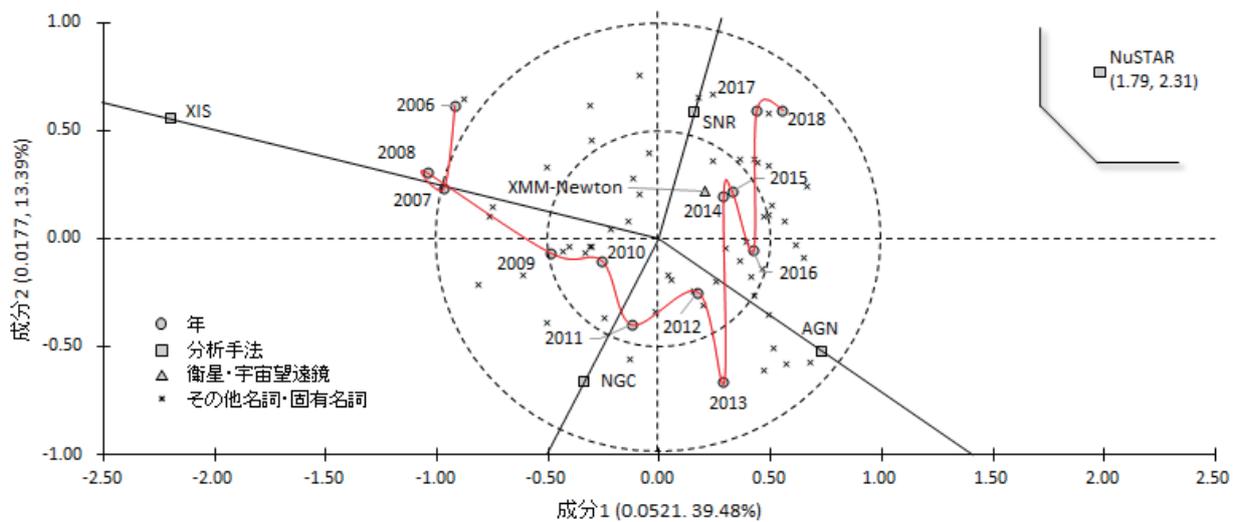


図 3 論文要旨情報の対応分析

や相関関係を分析することで有益な情報を抽出する手法である。那須川ら(2001)²⁵⁾は、テキスト・マイニングにおける分析対象は、基本的には名詞が中心であるとして、他の様々な技術を使い他の品詞を含める手法をまとめている。本稿では、分析対象を名詞と固有名詞と定めて分析した。また、1文字で抽出された語句は分析の対象外としている。

3.2.2. 対応分析について

すざく衛星関連論文の年代別の研究トレンドを示す。対応分析は、一般的にはコレスポンディング分析と言われ、クロス集計結果を2次元の散布図に展開する手法である。また、対応分析は、質的多変量解析の一種であり、数量化Ⅲ類と同等の分析が可能である。散布図は、掲載年に着目した場合、原点(0, 0)付近の年に含まれる語の分布に特徴がないこと、原点(0, 0)から遠いほどその分布に特徴があることを示す。表 3 にその対応分析の設定を示す。

3.2.3. すざく衛星と他の衛星・宇宙望遠鏡の論文数比較

すざく衛星関連論文と新たに得られた他の衛星・宇宙望遠鏡の関連論文の関係を年次比較する。対応分析で得られたすざく衛星に関連する他の衛星・宇宙望遠鏡に関して、論文数の比較を行いすざく衛星関連論文の論文数への影響を分析する。

3.3. 分析結果

3.3.1. 単語抽出分析の結果

表 4 に論文要旨情報に単語抽出分析を施した結果を示す。左側が出現頻度の高い名詞上位 20 位、右側が出現頻度の高い固有名詞上位 20 位である。左側の名詞においては、X線分析に関わる語句が多く示されている。左側の固有名詞では、衛星名の”SUZAKU”と”XMM-Newton”が上位 2 位、そして、”NuSTAR”が 11 位に入っている。なお、2 位の”XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission-Newton)”は、1999 年に欧州宇宙機関のギアナ宇宙センターからアリアン 5 ロケットで打ち上げられた X 線観測衛星である。そして、11 位の”NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array)”は、2016 年に NASA が打ち上げた高エネルギー X 線を観測するための X 線宇宙望遠鏡である。次の注目すべき点として、左側の固有名詞では、X 線分析の分析手法である AGN が 3 位、NGC が 6 位、XIS が 8 位、SNR が 10 位、ICM が 13 位に入っている。

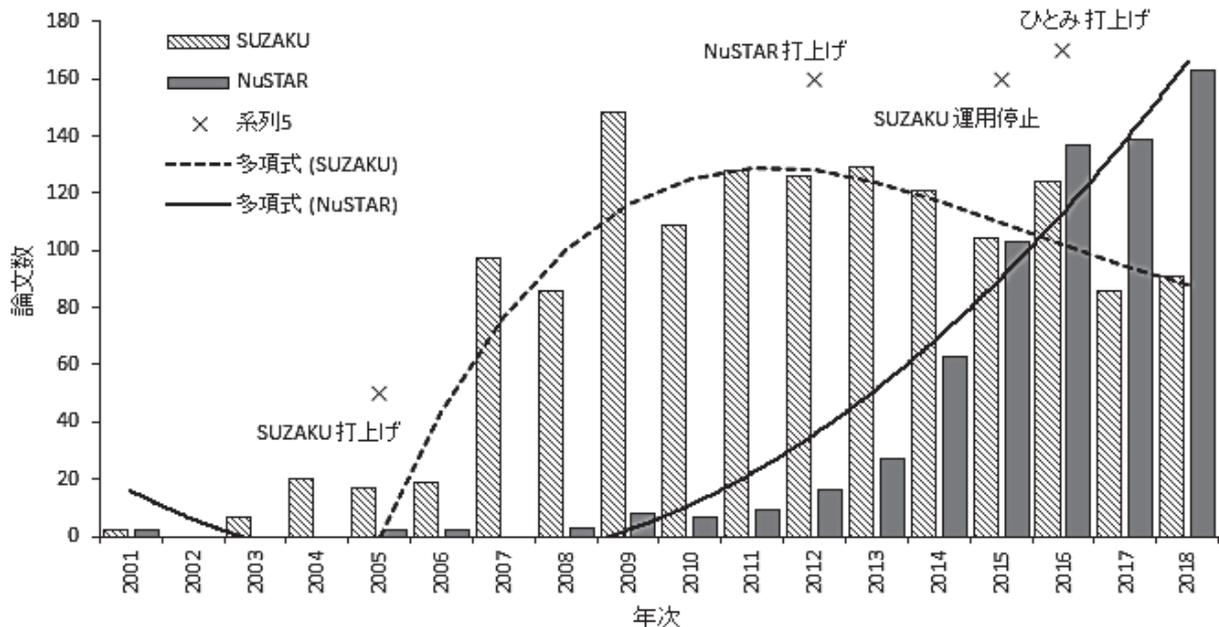


図 4 SUZAKU と NuSTAR の論文数の年次変化

3.3.2. 対応分析の結果

図 3 に論文要旨情報と論文発表年情報の対応分析の散布図を示す。この図は、第 1 成分と第 2 成分の散布図であり、全体の 52.87% (← 39.48% + 13.38%) を説明するものである。年次情報は、2006 年から 2018 年があり、分析手法として、XIS、NGC、AGN、SNR、関連の衛星・宇宙望遠鏡として、XMM-Newton, NuSTAR が示されている。また、中心からの距離を基にして、2006 から 2008 までの 3 年間は強い特性、2009, 2013, 2017, 2008 は特性、その他は、弱い特性が示されている。

3.3.3. すざく衛星と他の衛星・宇宙望遠鏡の論文数比較

図 3 の対応分析で強い特性を示した NuSTAR 宇宙望遠鏡を対象に分析を行う。図 4 にすざく衛星関連論文と NuSTAR 宇宙望遠鏡関連論文の論文数の年次別変化とその推移を示す。また、2016 年には、すざく衛星の後続衛星である ひとみ衛星の打ち上げの情報を示す。なお、ひとみ衛星は、2016 年 2 月 17 日に種子島宇宙センターから H-IIA ロケット 30 号機で打ち上げられたが、同年 3 月 26 日に通信が途絶して、4 月 28 日に運用を断念している。

すざく衛星関連論文の論文数 2009 年をピークとして、その後は減少傾向にある。一方、NuSTAR 宇宙望遠鏡関連論文は、打ち上げから 3 年の 2015 年には、すざく衛星関連論文の論文数に追いつき、その後も増加傾向がつづいている。式 2 に NuSTAR 宇宙望遠鏡関連論文の論文数年次変化の近似線の式を示す。

3.4. 考察

分析方法により年代別の特徴を 4 つのグループに分類することができる。まず、XIS (X-ray Imaging Spectrometer) グループがある。打ち上げ直後の 2006 年から 2010 年の 5 年間は、XIS 分析を中心とする

式 2 NuSTAR 宇宙望遠鏡関連論文の論文数年次変化の近似線の式 (2006-2018)

$$y = 1.1722x^2 - 13.441x + 28.181 \quad (R^2 = 0.9508)$$

グループを形成している。しかし、その特性は経年とともに減少している。松本ら(2006)²⁶⁾によるとすぎく衛星に掲載されている XIS は、撮像と X 線分光分析に同時対応した X 線 CCD カメラである。

次に、NGC (New General Catalogue) グループがある。2011 年は、NGC を中心とするグループを形成している。しかし、その特性は弱い。NGC は、星雲、星団や銀河など 7840 個の天体が載っている天体カタログである²⁷⁾

そして、AGN (Active Galactic Nuclei) グループがある。2012 年から 2013 年の 2 年間と 2016 年は、AGN を中心とするグループを形成している。しかし、2013 年以外はその特性は弱い。AGN (Active Galactic Nuclei) は、活動銀河核であり、太陽系程度の小さな領域から莫大なエネルギーを放出している天体を中心核に持つ銀河のことをいう。理化学研究所 (2014)²⁸⁾は、AGN はブラックホールにガスが激しく吸い込まれることで、強大なエネルギー量を放射していることが観測されている。

最後に SNR (Supernova Remnant) グループがある。2014 年から 2015 年の 2 年間、2017 年から 2018 年の 2 年間は、SNR を中心とするグループを形成している。しかし、2014 年から 2015 年の 2 年間はその特性が弱い。SNR は、超新星残骸であり、恒星が超新星爆発を起こし星間空間で飛び散った恒星物質が、巨大な高温プラズマ雲に形成される天体である²⁹⁾このように、すぎく関連論文の研究のトレンドは、13 年間の間に XIS、NGC、AGN、SNR にその特徴が移行した。

ここで図 3 の対応分析から NuSTAR という単語が現れた。NuSTAR とは、NASA から打ち上げられた X 線宇宙望遠鏡である。ブラックホールや超新星残骸などの高エネルギー X 線の観測が可能であり、すぎく衛星と同等の衛星であるといえる。NuSTAR は 2012 年に打ち上げられ、現在も運用中である³⁰⁾。同じ X 線天文衛星であることから、すぎく衛星と NuSTAR の比較研究など関連づけられた論文が書かれている可能性があると考えられる。

さらに、図 4 にすぎく衛星と NuSTAR の論文数の年次別変化とその推移を示した。すぎく衛星は運用が終了していることもあり、論文数は減少傾向にあるが、NuSTAR 論文は運用から 3 年ですぎく衛星の論文数に追いつき、その後も増加傾向にある。つまり SUZAKU 論文の減少とともに NuSTAR 論文が増加している。新たな性能を持った天文衛星が上げれば、その衛星の論文出版割合は増えて、それ以前の衛星の論文出版割合が減ることは自然な流れであると考えられる。

4. まとめ

人工衛星・探査機から得られる様々な観測データは、産官学すべてにおいて広く活用が期待されている。一方、宇宙開発プロジェクトは大規模な事業であるため、その貢献について、国会をはじめあらゆる場面で説明が求められている。また、日本の研究力は 1990 年代中盤から低下しているとされ、研究力の向上が急務となっていることがあり、学術的貢献に関して客観的な説明資料の必要性が高くなっている。そこで本稿は、学術的貢献の補助的説明となる客観的情報を用意するための手法を導出すること、そして、その効果を検証すること目標とした。分析では、論文の要旨にテキストマイニング分析を施して年代別の研究トレンドを抽出、そして、その手法の効果を検証した。

人工衛星・探査機の測定データの活用度を論文数とその特徴で表すことを目指し、X 線天文衛星「すぎく」プロジェクトの情報を用いて、テキストマイニング分析の適用の試行を行った。分析の結果、すぎく

衛星関連論文の研究のトレンドは、13年間の間にXIS(X線CCDカメラ)、NGC(天体カタログ関連の分析)、AGN(活動銀河核関連の分析)、SNR(超新星残骸関連の分析)にその特徴が移行していることを掴んだ。この結果から、すざく衛星は、研究のニーズに合わせた柔軟な運用が可能であったと考えられる。

次に、論文数に関する分析では、すざく衛星関連論文の論文数2009年をピークとして、その後は減少傾向にあることを掴んだ。一方、NuSTAR宇宙望遠鏡関連論文は、打ち上げから3年の2015年には、すざく衛星関連論文の論文数に追いつき、その後も増加傾向がつづいている。

すざく衛星にはないNuSTARの特長の一つに「硬X線による高精度撮像観測」がある。2016年に打ち上げられたひとみ衛星もまた「硬X線による高精度撮像観測」が可能であったが、運用期間が短く、すでに運用が断念されている。このため、高精度撮像観測の需要がNuSTARに集中しており、NuSTARの論文数が増加していると考えられる。このように、これら現在の構図は、ひとみ衛星の運用断念が影響していると考えられる。なお、ひとみ衛星は優れた分光観測性能を備えており、短期間の運用であったにも関わらず、ひとみ衛星プロジェクト関連の論文は、2015年から2019年の5年間に247編あり、その性能と注目度の高さをうかがい知ることができる。

今後の方向性として、論文要旨のテキストデータのみではなく、観測データの活用度確かめる方法を検討する。テキストマイニング分析では、分析時間が短い特徴がある。手法の精度向上とともに、特徴を生かした月報用簡易分析など、その活用方法を模索することがある。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP17K04710の助成を受けたものです。本研究は統計数理研究所共同研究プログラム(30-共研-4212 研究者の異分野融合度と多様度の客観的な評価指標研究の深化)の助成を受け、統計数理研究所の資産を活用したものです。

参考文献

- [1] 海老沢研、「[宇宙科学研究所(ISAS)のデータポリシー]策定の経緯について」、第7回 国際的動向を踏まえたオープンサイエンスの推進に関する検討会、資料2、2018
- [2] 水上祐治、中村匡佑、家富紗妃、大島昭子、中野 純司、「テキストマイニング分析による研究動向把握の簡易的手法 -衛星プロジェクトの関連論文の要旨分析-」、平成30年度「宇宙科学情報解析シンポジウム」、2019
- [3] 文部科学省(2017)、科学研究のベンチマーキング 2017 <<http://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-RM262-FullJ.pdf>> (最終確認: 2019年3月3日)
- [4] KHCoder Web ページ, <<http://khcoder.net/>> (最終確認: 2019年3月3日)
- [5] JAXA 第一宇宙技術部門 衛星利用推進 Web ページ <<http://www.sapc.jaxa.jp/use/rd/>> (最終確認: 2019年3月3日)
- [6] NASA's HEASARC-A Brief History of the High Energy Astrophysics Science Archive Research Center <<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/history.html>> (最終確認: 2019年11月23日)
- [7] ISAS PLAIN センターニュース 第39号 1997年1月20日発行

- <<http://www.isas.jaxa.jp/docs/PLAINnews/PLAINno39/PLAINno39.html#mark2>> (最終確認: 2019 年 11 月 23 日)
- [8] 川上修司, 本田秀之, 小野縁, 長木明成, 斎藤宏, 平井寿美子, 周東三和子, 竹島敏明, 「宇宙科学資料データベースの開発」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第 6 号, JAXA-RR-16-007, pp. 89-98, 2017
- [9] JAXA 宇宙科学資料データベース DARTS Web ページ <<https://www.darts.isas.jaxa.jp/index.html.ja>> (最終確認: 2019 年 3 月 3 日)
- [10] 大学間連携プロジェクト「超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究」Web ページ <<http://www.iugonet.org/index.jsp>> (最終確認: 2019 年 3 月 3 日)
- [11] 林寛生, 小山幸伸, 堀智昭, 田中良昌, 新堀淳樹, 鍵谷将人, 阿部修司, 河野貴久, 吉田大紀, 上野悟, 金田直樹, 米田瑞生, 田所裕康, 元場哲郎, 「大学間連携プロジェクト『超高層大気長期変動の全球地上ネットワーク観測・研究』」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第 1 号, JAXA-RR-11-007, pp. 113-120, 2012
- [12] 田中良昌, 新堀淳樹, 鍵谷将人, 堀智昭, 阿部修司, 小山幸伸, 林寛生, 吉田大紀, 河野貴久, 上野悟, 金田直樹, 米田瑞生, 田所裕康, 元場哲郎, 三好由純, 関華奈子, 宮下幸長, 瀬川朋紀, 小川泰信, 「IUGONET 解析ソフトウェアの開発」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第 1 号, JAXA-RR-11-007, pp. 91-98, 2012
- [13] 小山幸伸, 河野貴久, 堀智昭, 阿部修, 吉田大紀, 林寛生, 田中良昌, 新堀淳樹, 上野悟, 金田直樹, 米田瑞生, 元場哲郎, 鍵谷将人, 田所裕康, 「超高層物理学分野の為のメタデータ・データベースの開発」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第 1 号, JAXA-RR-11-007, pp. 99-104, 2012
- [14] 堀智昭, 鍵谷将人, 田中良昌, 林寛生, 上野悟, 吉田大紀, 阿部修司, 小山幸伸, 河野貴久, 金田直樹, 新堀淳樹, 田所裕康, 米田瑞生, 「IUGONET 共通メタデータフォーマットの策定とメタデータ登録管理システムの開発」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第 1 号, JAXA-RR-11-007, pp. 105-111, 2012
- [15] 小山幸伸, 阿部修司, 八木学, 梅村宜生, 堀智昭, 新堀淳樹, 佐藤由佳, 家森俊彦, 田中良昌, 橋口典子, 上野悟, 谷田貝亜紀代, 「超高層物理学分野のメタデータ・データベースへの連想検索の適用」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第 3 号, JAXA-RR-13-010, pp. 89-98, 2014
- [16] 北川宙, 谷内勇介, 国広卓也, 中村栄三, 「地球惑星試料デポジットリ DREAM の構想と現状」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第 3 号, JAXA-RR-13-010, pp. 71-78, 2014
- [17] 中川 友進, 海老沢 研, 中平 聡志, 上野 史郎, 富田 洋, 木村 公, 杉崎 睦, 芹野 素子, 三原 建弘, 根来 均, 「全天 X 線監視装置『MAXI』のデータアーカイブの開発」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第 5 号, JAXA-RR-15-006, pp. 71-80, 2016
- [18] 高木 亮治, 北條勝己, 「第二世代 EDISON (衛星運用工学データベースシステム) の開発」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第 5 号, JAXA-RR-15-006, pp. 23-28, 2016
- [19] 野口克行, 林寛生, 「火星大気データを地球大気解析ツールで解析できるようにするためのデータ整備 —MRO/MCS データの netCDF 化と GrADS による可視化—」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第 6 号, JAXA-RR-16-007, pp. 109-116, 2017
- [20] 根本しおみ, 高田良宏, 堀井洋, 堀井美里, 飯野孝浩, 林正治, 「DOI を用いた天文学研究資料の

横断的な整理・公開に向けた取り組み」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 第7号, JAXA-RR-17-009, pp. 9-18, 2018

- [21] 根岸正光, 山崎茂明, 「研究評価—研究者・研究機関・大学におけるガイドライン」, 丸善, 2001
- [22] 藤垣裕子, 平川秀幸, 富澤宏之, 調麻佐志, 林隆之, 牧野淳一郎, 「研究評価・科学論のための科学計量学入門」, 丸善, 2004
- [23] Yuji Mizukami, Yosuke Mizutani, Keisuke Honda, Shigenori Suzuki, Junji Nakano, An International Research Comparative Study of the Degree of Cooperation between disciplines within mathematics and mathematical sciences: proposal and application of new indices for identifying the specialized field of researchers, Springer, Behaviormetrika, Vol.1, 19 pages, On-line, 2017
- [24] 樋口耕一, 「社会調査のための計量テキスト分析—内容分析の継承と発展を目指して—」, ナカニシヤ出版, 2014
- [25] 那須川哲哉, 河野浩之, 有村博紀, 「テキストマイニング基盤技術」, 人工知能学会, 人工知能学会誌 Vol. 16、No.2、pp.201-211、2001
- [26] 松本浩典, 片山晴善, 山口弘悦, 田和憲明, 「X線天文衛星「すざく」搭載X線 CCD (XIS) のバックグラウンド」, 2006, <http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/matumoto/presentation/2006/XIS_bgd_20060328_HM.pdf> (最終確認 2019年3月3日)
- [27] 天文学辞典 NGC カタログ web ページ <<http://astro-dic.jp/ngc-catalogue/>> (最終確認 2019年3月3日)
- [28] 理化学研究所, 「巨大ブラックホールが支配する「AGN エンジン」の解明へ」, 2014, <http://www.riken.jp/pr/press/2014/20140918_1/> (最終確認: 2019年3月3日)
- [29] JAXA 超新星残骸の X線精密分光観測 <<http://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2014/katsuda/>> (最終確認: 2019年3月3日)
- [30] X線衛星「NuSTAR」 Web ページ <<http://www.astroarts.co.jp/news/2012/06/14nustar/index-j.shtml>> (最終確認: 2019年3月3日)

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-19-006
JAXA Research and Development Report

宇宙科学情報解析論文誌 第九号
Journal of Space Science Informatics Japan Volume 9

発行	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1 URL: http://www.jaxa.jp/
発行日	2020年3月10日
電子出版制作	松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

