

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

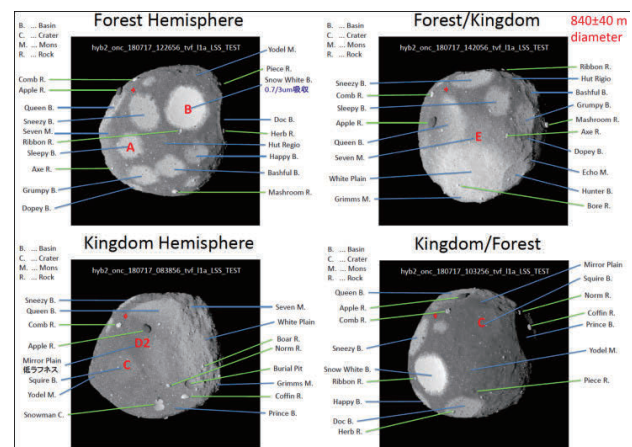


図 1: LSS 訓練用画像の例 [4]

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)

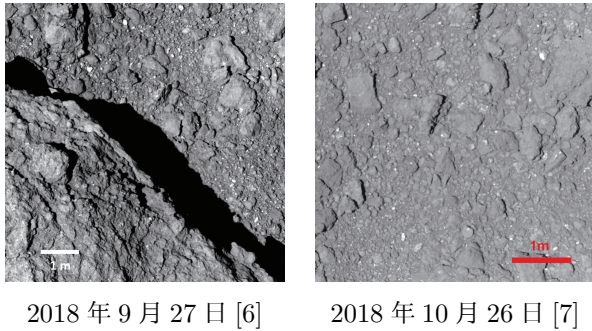


図 2: ONC-T 実画像の例

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。

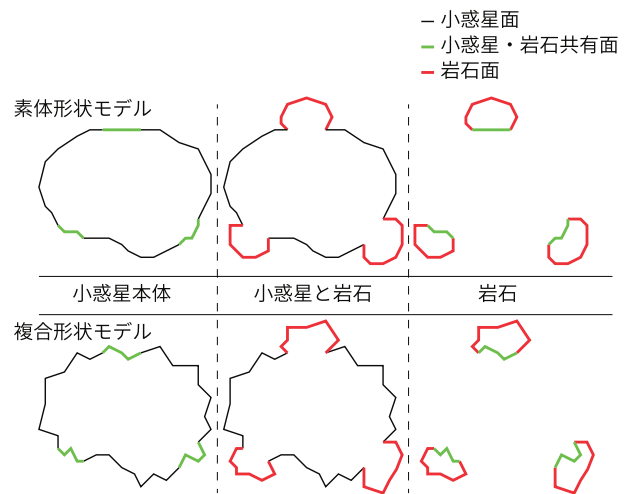


図 3: 形状モデルの構成要素と、その分類

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。

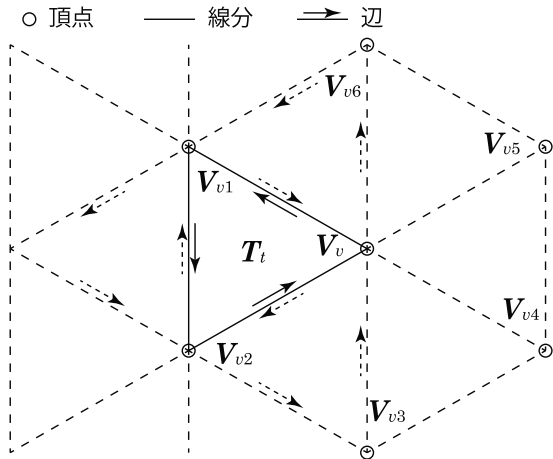


図 4: ポリゴンの基本構造

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。

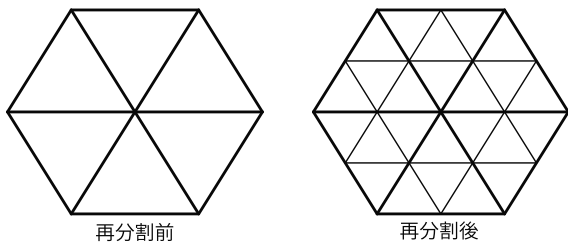


図 5: ポリゴンの再分割

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。

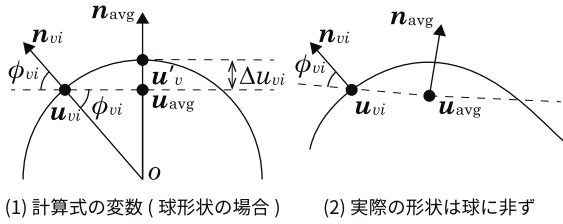


図 6: 素体形状モデルの平滑化

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。

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

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

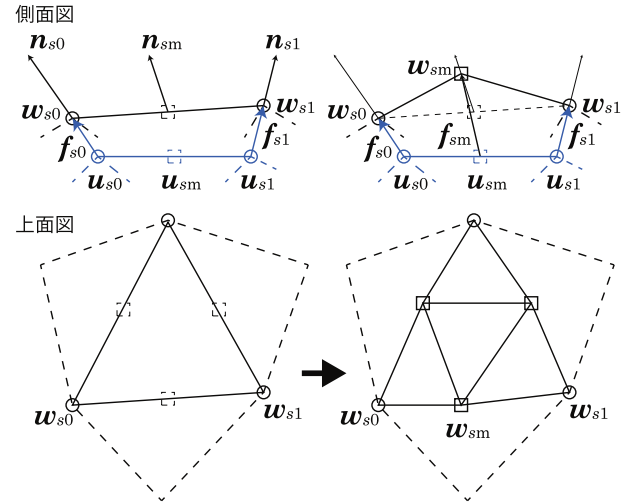


図 7: 中点変位法

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)

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

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。

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

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。

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

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。

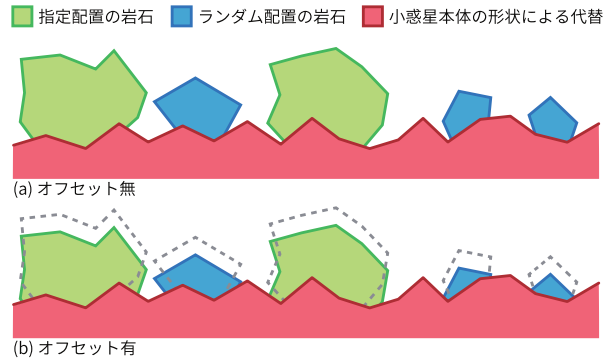


図 8: 岩石の配置

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。

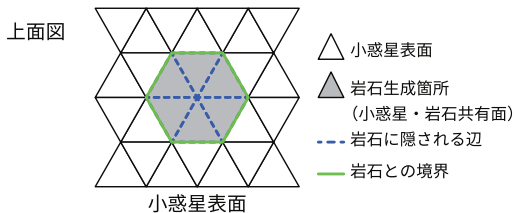


図 9: 岩石の生成（小惑星面）

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。

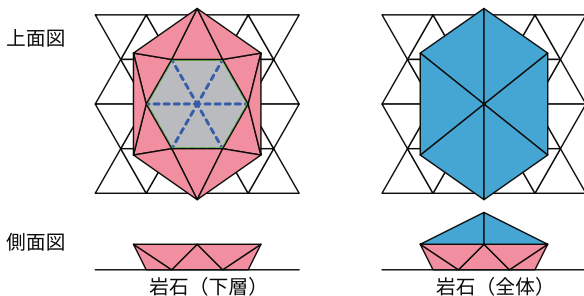


図 10: 岩石の生成（Ryugoid 生成時の手法）

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。

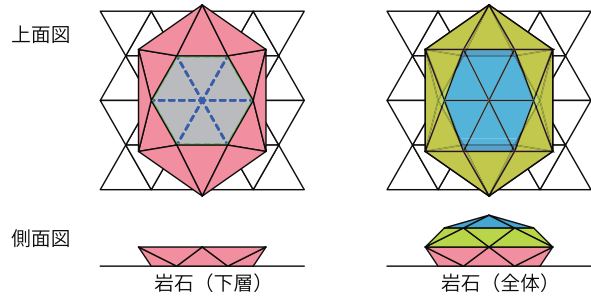


図 11: 岩石の生成（本手法）

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。

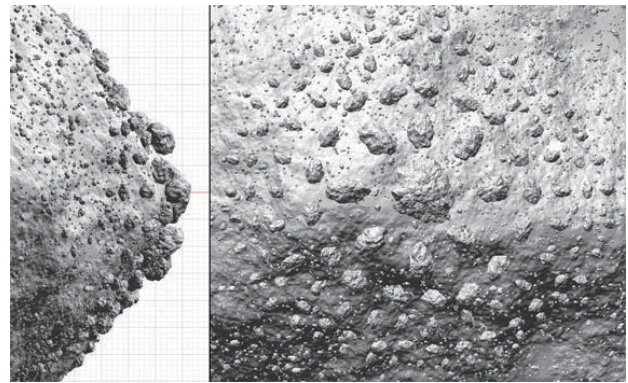


図 13: 岩石生成 (複合形状モデル)

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。

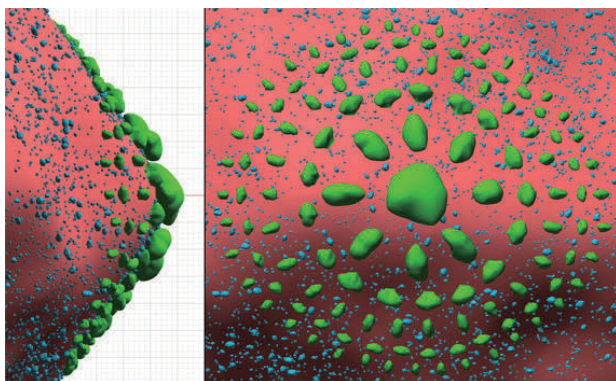


図 12: 岩石生成 (素体形状モデル)

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。

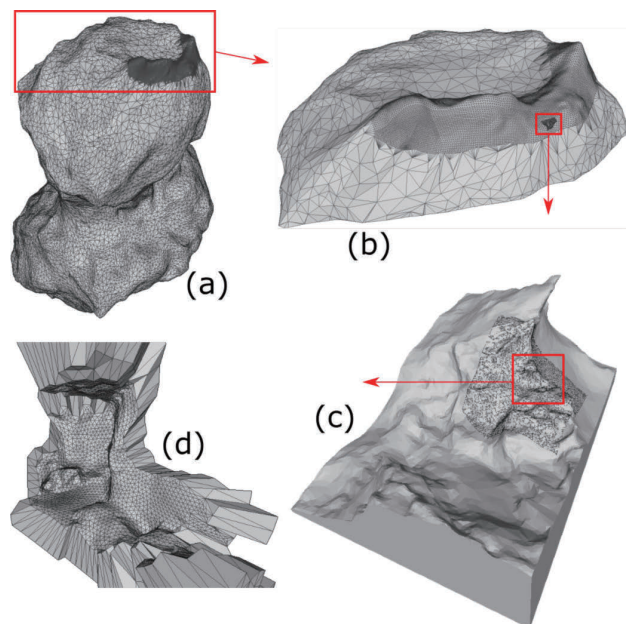


図 14: チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の例 [9]

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。

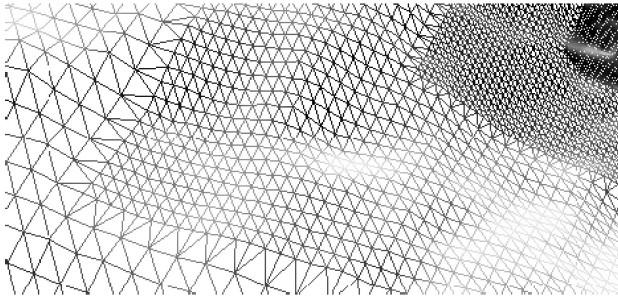


図 15: PANGU を用いた事例 [10]

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。

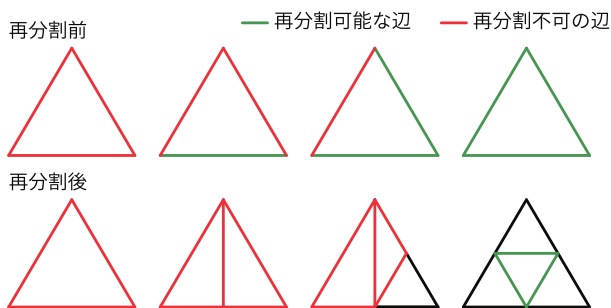


図 16: 局所的再分割 1

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。

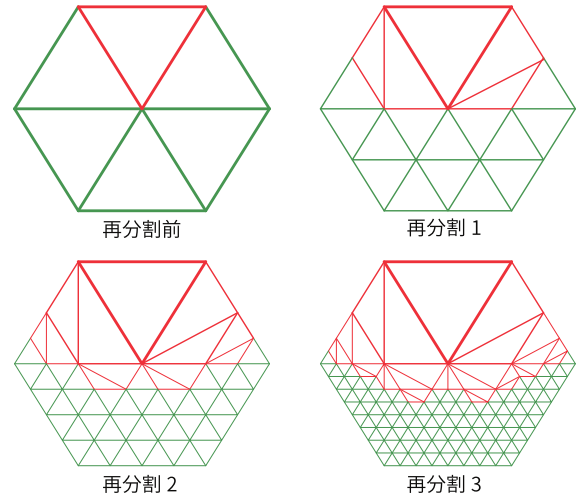


図 17: 局所的再分割 2

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。

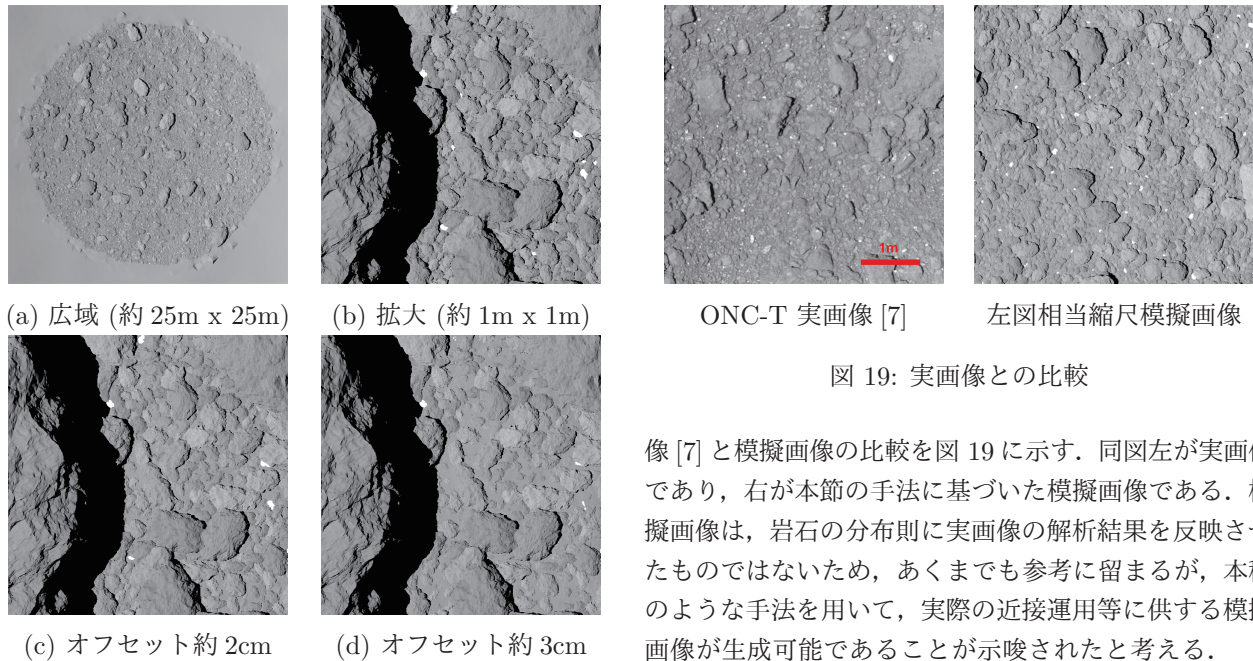


図 19: 実画像との比較

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

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

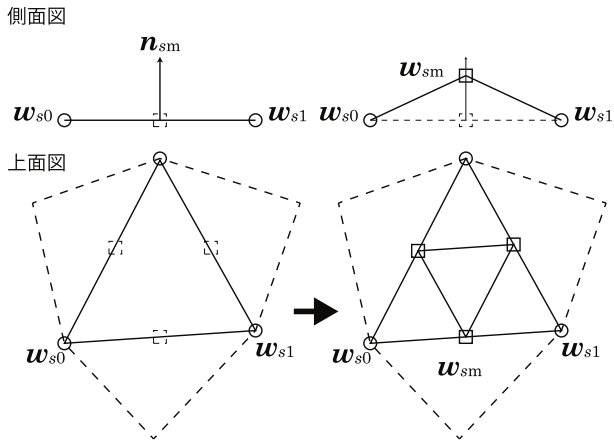


図 20: レンダリング時の中点変位法計算

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。

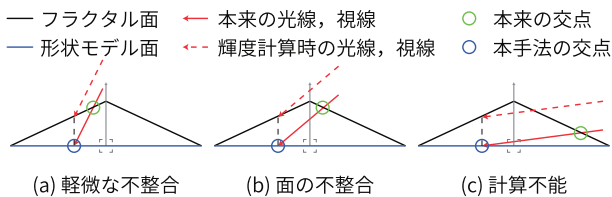
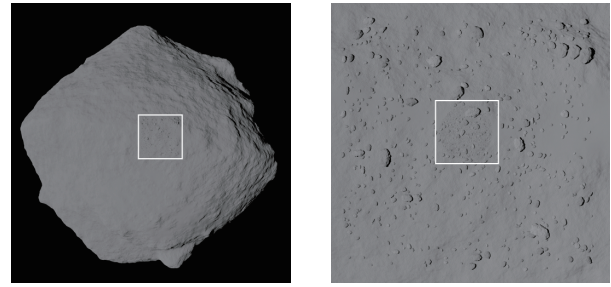


図 21: レンダリング時の中点変位法計算（交点計算）

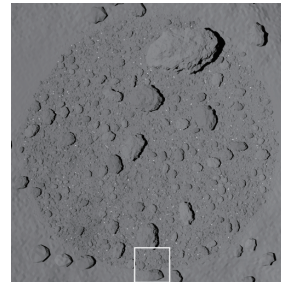
中点変位法により生成された形状モデルと光線や視線との交点は、厳密には同図中 緑丸の箇所となる。対して本手法においては、中点変位法計算前のポリゴンに基づいて交点を計算する。すなわち同図中の青丸が交点となる。これは形状の変化によって生じうるレイトレーシングの様々な追加処理を抑制してレンダリング時間を抑えるためである。そのため本手法で計算する「交点」における反射特性は、厳密に交点を計算した場合とは必ずしも一致しない。

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。中央付近の白杵は、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、その中央付近の白杵は、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。

その下中央の白杵、ポリゴン再分割回数が増加す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。

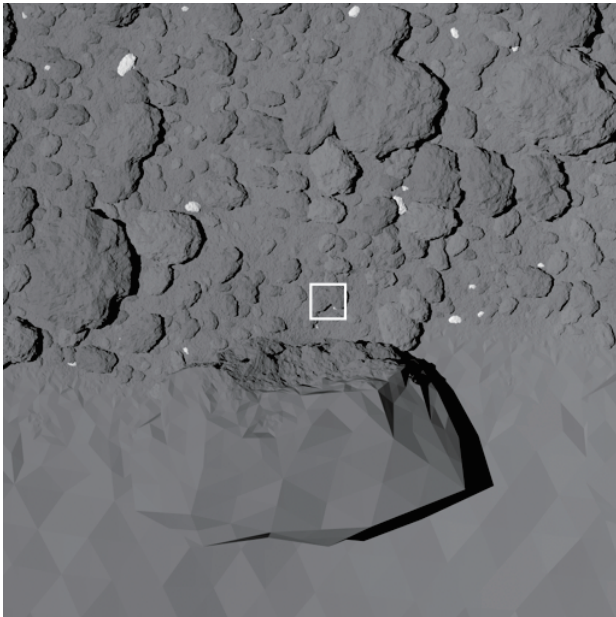


図 23: 近接撮像の例 (拡大)[11]

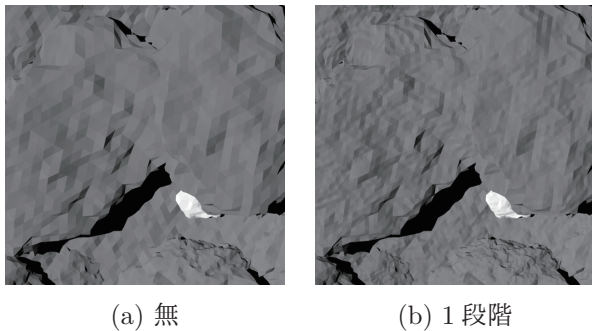


図 24: レンダリング時のポリゴン再分割 [11]

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。

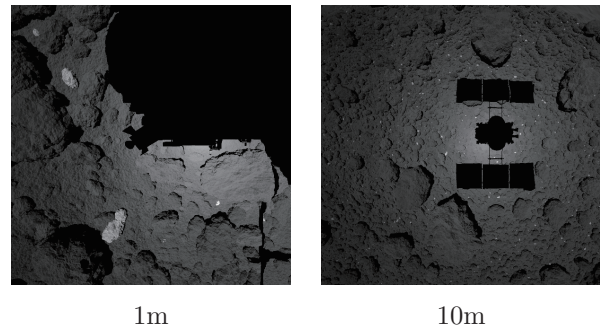


図 25: 近接撮像の例 [11]

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.