

東京大学大学院新領域創成科学研究科
複雑理工学専攻

平成 29 年度

修士論文

火星衛星フォボスの高解像度画像の解析と
数値計算による表面ラフネスの評価

Evaluation of surface roughness of Phobos based on
high-resolution image analyses and numerical simulations

2018 年 3 月 9 日提出
指導教員 宮本 英昭 教授

小島 平

要 旨

小天体は、原始太陽系の情報を保持していると考えられており、太陽系の起源や形成過程を明らかにする上で重要な天体である。これまでにフライバイやランデブーの観測によって様々な小天体の姿が明らかになってきた。近年では、NEARシューメーカーによる小惑星エロスの探査、はやぶさによる小惑星イトカワの探査、ロゼッタによる（フィラエ）によるチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の着陸探査によって、これまでの探査では獲得できなかった非常に高精細な画像やサンプルなどの情報を取得し成功を収めたことで、着陸探査が重要視されるようになってきた。しかし着陸探査では、着陸時に天体表面の傾斜や起伏によって探査機の転倒などのトラブルが発生するなど、大きな危険を伴う。こうした危険を回避し安全に運用するためには目標天体の表面を正確に把握する必要がある[Rodgers et al., 2016]。天体表面の起伏（ラフネス）を変化させる大きな要因となるのは表面に存在する多数の衝突クレーターやボルダーと呼ばれる岩塊であるため、これらの影響について理解することが重要である。

現在、2014年にフォボスとダイモスの接近観測、フォボスへの着陸及びサンプルリターンを目的とした探査機MMX (Martian Moons eXploration) の打ち上げがJAXAによって計画されている。この二つの火星衛星から得られる情報は、火星圏の進化や太陽系形成過程への理解を深める上で重要であるが、未だに着陸探査は行われていない。MMXでは高解像度の画像やフォボスのサンプルの解析による新しい研究成果が期待されている。

MMXの着陸探査を成功させる上で、フォボスの表面に関する詳細な情報が求められている。探査機の着陸時の安全性に影響を与える高低差は数十cm-数m程度であると考えられており、表面のラフネスの安全性を確かめるためには少なくとも $\sim 10\text{cm/pixel}$ 程度の画像が必要である。しかし、現在得られている最も良い画像の一つであるMars Global Surveyor(MGS)搭載のMars Orbiter Camera(MOC)であっても $\sim 1.5\text{ m/pixel}$ であるという現状がある[Thomas et al., 2000; Karachevtseva et al., 2014]。

本研究では、観測が困難な数mスケール以下のラフネスが、主に衝突クレーターやボルダーによる影響が大きいと仮定し、それらが作り出す天体表面のラフネスを観測と数値計算を用いて定量的に把握することを目的とした。まずMOCが撮像したフォボスの高解像度画像を用いて、ボルダーが比較的多く見える1 km四方の領域に限定し、クレーター及びボルダーをサブピクセルスケール

のものまで極めて詳細にマッピングした。その結果、確実にクレーターと思われるものが332個、クレーター候補が1133個、確実にボルダーと思われるものが242個、ボルダー候補が2479個見つかり、これをもとに累積サイズ頻度分布 (Cumulative Size-Frequency Distribution, CSFD)を求めた。また、同じ領域で 5.8m/pixelの解像度のMars Reconnaissance Orbiter(MRO)搭載のHigh Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE)で撮像された画像を用いてCSFDを求めた結果、高解像度画像から得られた結果にある程度外挿できることが示唆された。次に、観測が困難なスケール(0.2-1m)のボルダーの頻度分布を、マッピングから得られたCSFDから推定し、それに従ってモンテカルロ法を用いて模擬的なボルダーを配置することで、10 cmメッシュの数値地形モデルを構築した。これにより探査機の着陸に影響するスケールのラフネスを定量的に議論できるようにした。地形モデルを解析した結果、ラフネスが工学的要求（高低差40cm以下）を満たす4m四方の正方形領域（着陸脚が接地しうる範囲）が37%程度の割合で存在していることがわかった。また、クレーターの深さ d と直径 D の比を、先行研究[Basilevsky et al., 2014]から想定される範囲内で変化させたところ、最大で46%程度の差があることから、表面ラフネスはクレーターの d/D に大きく影響を受けることが示唆された。さらに、天体表面のラフネスはボルダーによるラフネスよりもクレーターによるラフネスの影響が支配的であるという結果が得られ、実際の着陸においてクレーターが存在しない地域への着陸が可能な場合、95%以上の割合でラフネス40cm以下の条件を満たす4m四方の正方形領域が存在することを示した。これらの結果が、フォボス表面で比較的ボルダーが多く観測できる地域を選定している点、不明瞭なクレーターやボルダーまで考慮している点を考慮すると、実際のフォボスの表面はさらにラフネスが小さく、着陸可能な領域が多い可能性がある。

今回作成した数値地形モデルと実際のマッピング結果を目視で比較すると、特にクレーターの形状が類似していないものが多く見受けられた。これは、衝突による地震動やイジェクタの埋積によるクレーターの緩和が大きな要因であると考えられる。こうした物理現象を数値計算により再現することは困難であるが、拡散方程式を用いることで、クレーターの緩和に似た地形変化をある程度再現することができた[Richardson et al., 2009; Fassett and Thomson, 2014]。こうした物理現象を含め、より多くの要素を考慮した再現性の高い数値地形モデルの作成については、今後のさらなる検討が必要である。

目次

1. はじめに	1
1.1 小天体探査	1
1.2 フォボスの探査意義	2
1.3 天体表面に存在するラフネス	3
1.4 クレーターとボルダーの累積サイズ頻度分布	5
1.5 先行研究における問題点	7
1.6 本研究の目的	9
2. マッピング	10
2.1 マッピング画像の選定	10
2.2 手法	13
2.3 結果	16
3. 数値計算による地形モデルの構築	21
3.1 手法	22
3.1.1 クレーターの形成	22
3.1.2 ボルダーの形成	30
3.2 模擬天体表面の構築	33
3.2.1 クレーターの形成	33
3.2.2 ボルダーの形成	34
3.2.3 人工的なボルダーの形成	34
3.3 結果	36
4. 考察	38
4.1 ラフネスの解析手法	40
4.2 着陸精度を考慮した場合のラフネスの評価	41
4.3 ボルダーとクレーターの有無によるラフネスの変化	42
4.4 クレーターの d/D を変化させた場合のラフネスの変化	45
4.5 サブピクセルスケールのマッピングの妥当性	48
5. 展望	51
6. 結論	54
謝辞	55
引用文献	56

1. はじめに

1.1 小天体探査

太陽系には、彗星や小惑星など、惑星ほどの大きさを持たない小規模な天体が存在している。こうした小天体は、惑星やある程度大きな月などの衛星のように集積熱や崩壊熱による高温状態を経験していないことから、原始太陽系の情報を保持しているものが多いと考えられている。そのため、小天体の探査は太陽系の起源や形成過程を明らかにする上で重要な意味を持つ。中でも、目標天体の表面に着陸しサンプル採取などを行う着陸探査は、天体表層の環境や表層物質を詳細に調査する上で有用な手段である。近年、小天体への着陸探査により、これまでの地上観測やフライバイによる観測からでは得られなかった情報が得られてきている。現在までに3つの探査機が小天体への着陸探査を行っている[Rodgers et al., 2016]。2001年には、探査機 NEAR シューメーカーがおおよそ1年間にわたるエロスの接近観測を終え、エロス表面への着陸を行う間に70枚の接近観測画像（最高解像度 1cm/pixel）を取得することに成功した[Veverka et al., 2001]。2005年には、探査機はやぶさによってイトカワへの着陸が行われ、イトカワの表面物質と思われる微粒子を持ち帰ることに成功した。サンプルの解析から、イトカワが普通コンドライト隕石の化学組成と類似しており、隕石の起源が小惑星であることを示唆した[Nakamura et al., 2011, Yurimoto et al., 2011]。2014年には探査機ロゼッタの着陸機フィラエにより、チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星への着陸が行われ、フィラエに搭載された質量分析計により、16種類の有機化合物が発見された[Goesmann et al., 2015]。

現在では、探査機はやぶさ2によるリュウグウの探査、探査機 OSIRIS-REx によるベヌスの探査が進行しており、2024年には、火星衛星であるフォボスとダイモスの接近観測、フォボスへの着陸及びサンプルリターンを目的とする探査機 MMX (Martian Moons eXploration) の打ち上げが計画されている。フォボスへの着陸を予定していた探査としては、ソ連の探査機フォボス2号(1988年)、ロシアの探査機フォボスグレント(2011年)などが挙げられるが、いずれも失敗に終わり、十分な成果が得られなかった。MMXでは、高解像度の画像やフォボスのサンプルの解析による新しい研究成果が期待されている。

1.2 フォボスの探査意義

火星にはフォボスとダイモスと呼ばれる二つの衛星が存在する。どちらも地球の衛星である月と比較すると非常に小さく、いびつな形状をした小天体である（フォボス三軸径： $26.06 \times 22.80 \times 18.28$ km [Willner et al., 2014]、ダイモス三軸径： $15.0 \times 12.2 \times 10.4$ km [Thomas, 1993]）。フォボスとダイモスの起源として、火星の重力によって捕獲された小惑星であるとする小惑星捕獲説[e.g., Pang et al., 1978; Pollack et al., 1978]と、火星への巨大な天体衝突によって生じた破片が集積して形成されたとする巨大天体衝突説 [e.g., Craddock, 2011] の主に二つが提唱されている。小惑星捕獲説は、二つの衛星の反射スペクトルが小惑星の分類の一つである D 型小惑星と類似しているという特徴[Rivkin et al., 2002]と一致しているが、二つの衛星の軌道（火星の赤道面ではほぼ完全な円軌道[Jacobson and Lainey, 2014]）の説明が困難であった。一方で、巨大天体衝突説は、衛星の軌道の説明ができる反面、反射スペクトルの特徴を明確に説明できなかった。近年では、数値シミュレーションを用いて、火星への巨大天体衝突から二つの衛星が形成される可能性が示唆されている[Rosenblatt et al., 2016, Hesselbrock and Minton, 2017]が、未だ議論がなされている。もし火星衛星のサンプルを得ることができれば、その物質が小惑星由来、または火星由来であるかを分析することで、起源を明らかにするための重要な証拠となる得るため、フォボスへの着陸探査は大きな意味を持つと言える。

また、フォボスの表面には、火星表面の天体衝突で生じたイジェクタ（放出物）が堆積していると考えられている（ <250 ppm[Ramsley and Head., 2013]； $50\text{mg}/200\text{g}$ [Chappaz et al., 2012]）ことや、巨大天体衝突起源の場合、火星衛星を構成する物質の多く（ $>35\%$ ）が火星由来の物質であり、衝突当時の火星のマントル物質が存在することが示唆されている[Hyodo et al., 2017]ことなどから、フォボスからのサンプルリターンは、現在の火星、または火星形成初期の物質を地球に持ち帰ることができる可能性が高いと言える。

こうした背景から、フォボスの探査は、火星衛星の起源と進化だけではなく、火星形成過程の解明にもつながると考えられ、惑星科学において重要な天体であると言える。

表 1. フォボスとダイモスの物理的性質 [Murchie et al., 2015]

	フォボス	ダイモス
軌道長半径	9,377 km	23,460 km
公転周期	7.66 h	30.3 h
軌道離心率	0.0151	0.0003
軌道傾斜角	1.093 °	0.93 °
自転周期	公転と同期	公転と同期
三軸径	26.06 × 22.80 × 18.28 km	15.0 × 12.2 × 10.4 km
密度	1860 ± 13 kg/m ³	1490 ± 190 kg/m ³
重力	3-8 × 10 ⁻³ m/s ²	2 × 10 ⁻³ m/s ²
アルベド(0.55 μm)	0.071 ± 0.012	0.068 ± 0.007

1.3 天体表面に存在するラフネス

着陸探査を行う上で問題となってくるのが、天体表面に存在する起伏（ラフネス）である。着陸する領域のラフネスが大きくなるほど、転倒などの危険が大きくなるからである[Rodgers et al., 2016]。探査機フィラエではチュリユモフ・ゲラシメンコ彗星への着陸の際に二度バウンドしており、目標としていた着陸地点から 1km ほど離れたラフネスの大きい地点に着陸した[Biele et al., 2015]。その結果、3本の着陸脚のうちの2つしか接地しておらず不安定な姿勢となってしまったことに加え、着陸地点の地形が原因で太陽光が遮られ発電が制限されてしまった。こうしたトラブルを防ぐために、目標天体表面に存在するラフネスを正確に把握することが必要である。

固体天体の表面では、天体衝突によって形成された衝突クレーター（図 1-1）や、その衝突イベントで生じた破砕片などがボルダーと呼ばれる岩塊（図 1-2）として存在している。惑星やある程度大きな衛星とは違い、質量が小さい小天体では集積熱や崩壊熱がほとんど発生しないことから、表面ラフネスは内的な要因による地形変化よりも衝突クレーターとボルダーによる影響が大きいと考えられる。つまり、着陸探査をより安全に行う上で、実際の目標天体において衝突クレーターとボルダーが表面ラフネスに与える影響について理解する必要がある。

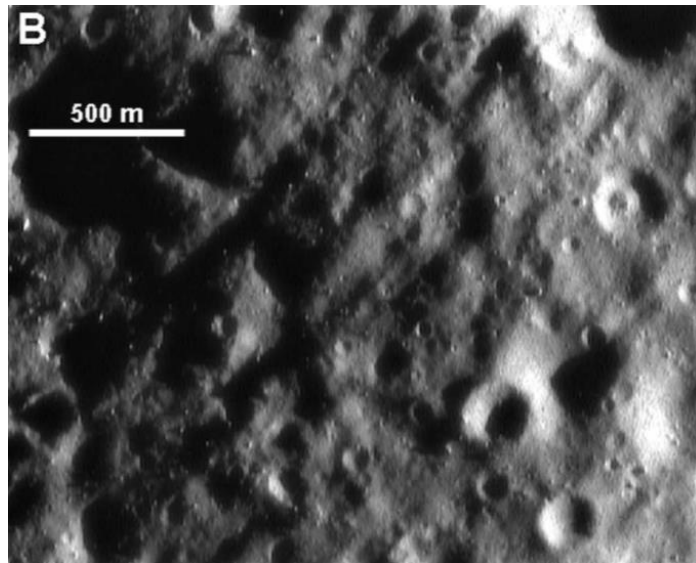


図 1-1. NEAR シューメーカーによって撮像されたエロスの表面
多くの衝突クレーターが確認できる
(MET 136266921, 4.58 m/pixel) [Richardson et al., 2005; Fig.3]

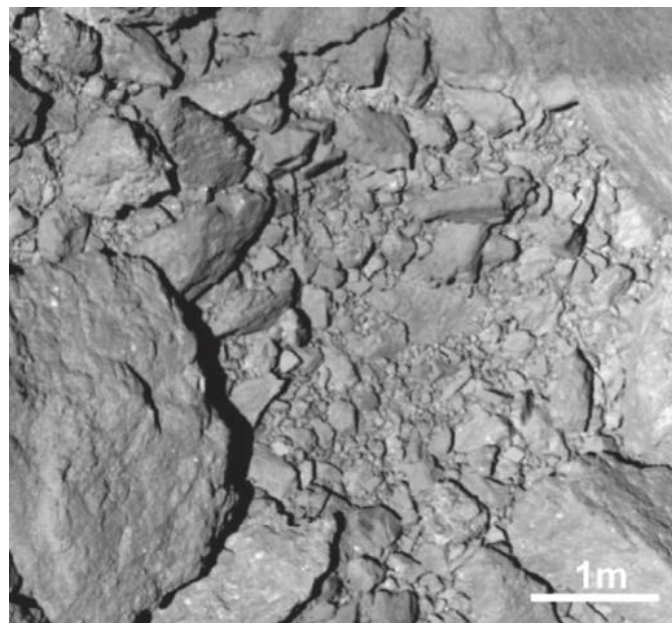


図 1-2. はやぶさによって撮像されたイトカワの表面
大小様々なボルダーが存在している
(ST_2539444467, 6 mm/pixel) [Miyamoto, 2014; Fig.1]

1.4 クレーターとボルダーの累積サイズ頻度分布

天体表面に存在する衝突クレーターとボルダーの分布は、その表面の形成年代や進化過程を理解する上で有用であり、これまでに様々な天体で解析が行なわれている[Murdoch et al., 2015]。それぞれの分布の特徴を議論する際、累積サイズ頻度分布（Cumulative Size Frequency Distribution : CSFD）が用いられることが多い。本研究におけるCSFDは、横軸に直径のサイズ D をとり、縦軸に D 以上のサイズを持つ場合の数密度 N をプロットしたものを指す。クレーターとボルダーのCSFDは、これまでの探査からおおよそ以下のべき乗の式に従うことが分かっている。

$$N = BD^{-a}$$

D はクレーターの直径、 N は単位面積当たりの D 以上のクレーターの累積数密度を表し、係数 B とべき数 $-a$ は定数である。これを書き換えると、

$$\log N = -a \log D + b$$

と表される。つまり、CSFDを両対数グラフでプロットした場合、おおよそ直線上に乗るという特徴を持つ。これは、固体天体に共通する特徴であることがわかっている。Karachevsteva et al. (2014)は、フォボスにおけるクレーターの累積サイズ頻度分布を解析し、 $a=-1.9$ というべき数を得ている。

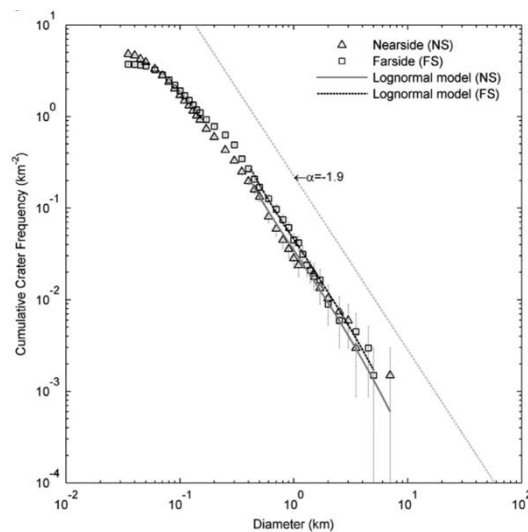


図 1-3. フォボスのクレーターの CSFD[Karachevsteva et al., 2014; Fig.7]

天体表面のクレーターの数密度は、時間とともに増加していき、ある時点から生成されるクレーターの数と、それによって消去されるクレーターの数が等しくなる、平衡状態に達する。Gault (1970)の室内実験では、平衡状態にあるクレーターの CSFD のべき数は、-2 に近い値をとることが示唆されている。

図 1-4 は、4 種類の小天体（イトカワ、エロス、ルテティア、フォボス）のボルダーの CSFD の比較である。この結果からも示唆されるように、固体天体表面に存在するボルダーのべき数は-3 付近の値を持つことが多い。

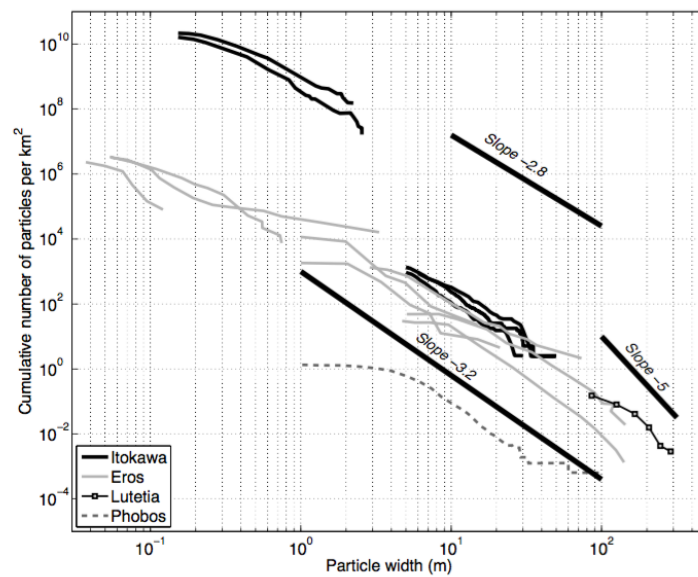


図 1-4. 小天体のボルダーの CSFD の比較[Murdoch et al., 2014; Fig.3]

1.5 先行研究における問題点

MMX の運用に向け、フォボスの表面に存在するラフネスの要因であると考えられるクレーターとボルダーについて考慮する。Karachevsteva et al. (2014) は、フォボスのクレーターを全球的にマッピングし、MGS 搭載の MOC が撮像した高解像度画像 (SP255103, 1.5 m/pixel) を用いて、スティックニークレーターの北東 15km² の領域において、2.3 ~ 28.8 m までのサイズ範囲で 1379 個のボルダーをカウントした (図 1-5, 図 1-6 左)。Thomas et al. (2000) は、MOC 画像を用いてボルダーを 2000 個程度カウントし、べき数-3.2 を得た (図 1-6 右)。このように、フォボスのクレーターとボルダーについての解析は行われているが、ボルダーのマッピングに着目してそれぞれの解析結果 (図 1-6) を観察すると、どちらの結果においてもボルダーのサイズが 5m 付近から小さいサイズ範囲において CSFD の傾きが平坦になっていることがわかる。つまり、5m よりも小さいサイズ (図 1-6 赤色部) のボルダーがほとんどカウントされていないということである。これは、使用したフォボス表面の画像解像度 (~1.5m/pixel) の影響により、小さいサイズのボルダーを判定するための十分なピクセル数が不足していることに起因していると考えられる。しかし、5m 以下のクレーターやボルダーが観測できない場合、探査機の着陸脚のスケール (2-4m) を考慮すると、着陸時の安全性に影響を与えられと考えられるスケール (数十 cm-数 m) のラフネスを議論することができないという問題が生じる。

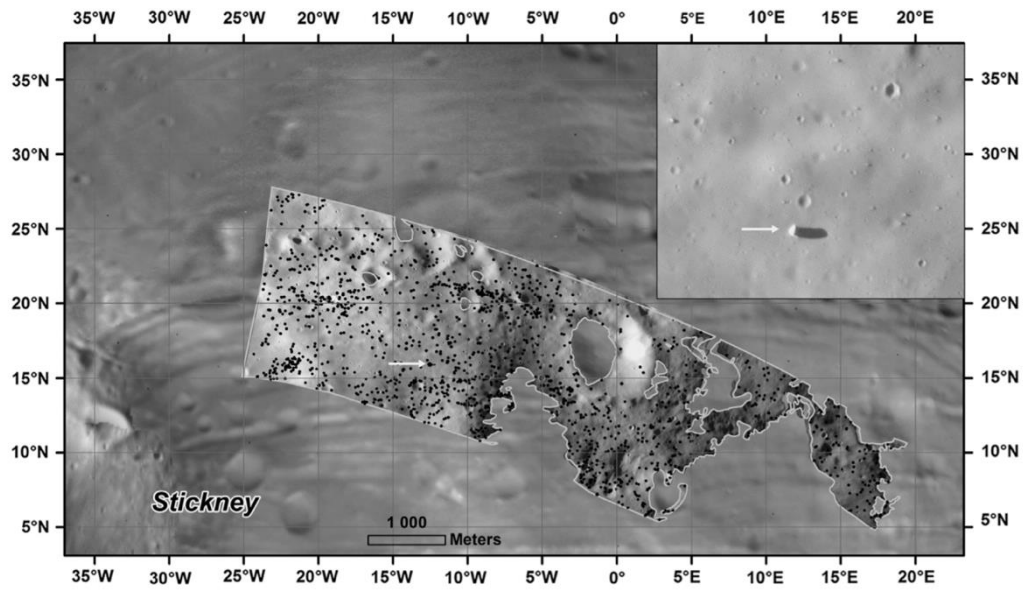


図 1-5. 15km² の範囲のボルダーのマッピング (SP255103, 1.5cm/pixel)

[Karachevsteva et al., 2014; Fig.10]

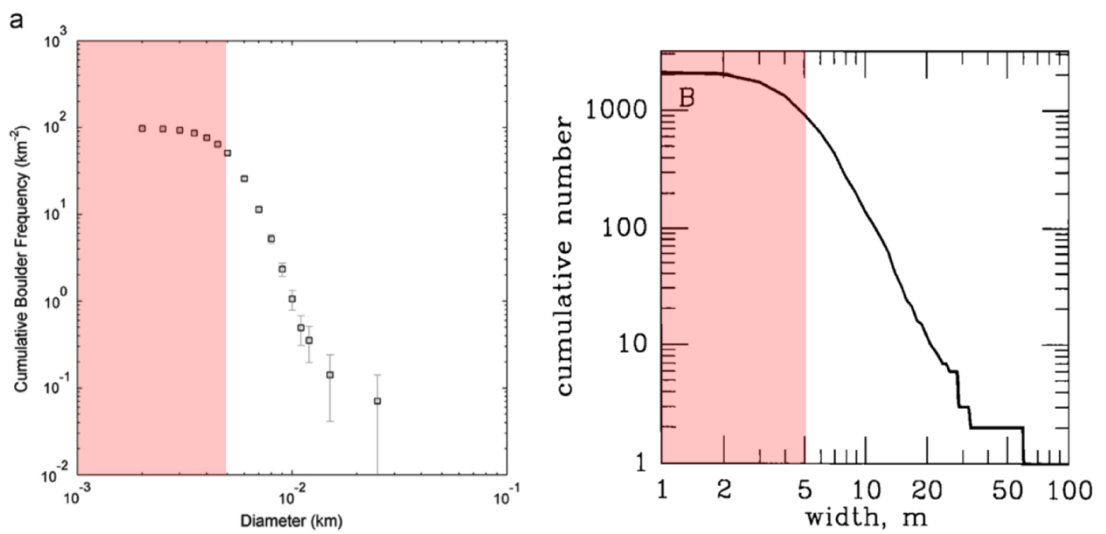


図 1-6. フォボスのボルダーの累積サイズ頻度分布

左) Karachevtseva et al., 2014; Fig.11 を改変

右) Thomas et al., 2000; Fig.7 を改変

赤色部) CSFD が平坦になっていく 5m 以下の領域

1.6 本研究の目的

前述したように、現在得られているフォボスの高解像度画像を用いても、フォボス表面の直径数 m 以下のスケールのクレーターやボルダーの観測は困難であり、探査機の着陸脚のスケール(2-4m)に影響を与えるラフネスを評価できないという現状がある。そこで、本研究では、着陸に影響を与えるラフネスが、主に衝突クレーターやボルダーによる寄与が大きいと仮定し、それらが作り出す天体表面のラフネス(高低差)を定量的に把握することを目指した。また、そのラフネスが着陸探査における安全性にどの程度影響を与えるのかを推定することを目指した。

2. マッピング

本研究は、大きく2つのステップに分けることができる。大まかな研究手法の概要を以下に述べる。

(1) マッピング

フォボスの高解像度画像を用いてクレーターとボルダーを数 m 以下のスケールまでサブピクセルの精度でマッピングする。

(2) 数値計算による地形モデルの作成

(1) で得た CSFD を用いて、数値計算によって仮想天体表面の地形モデルを構築する。さらにその地形モデルに対して CSFD と調和的な数十 cm スケールのボルダーを、モンテカルロ法を用いてランダムに配置し、フォボスの模擬天体表面を構築する。

本章では、(1) マッピングについて、その手法と結果を詳細に述べる。

2.1 マッピング画像の選定

フォボス表面に存在するクレーターとボルダーを詳細に把握するために、研究の第1ステップとして、探査機によって撮像されたフォボス表面の画像のマッピングを行う。図 2-1 に、フォボスの全球モザイク画像と今回用いたマッピング領域の位置関係を示す。本研究では、MGS 搭載の MOC で撮像されたフォボス表面の画像 (SP255103) を用いた (図 2-2)。この画像は現在取得されている中でも特に高解像 (~1.5m/pixel) であり、先行研究[Thomas et al., 2000, Karachevtseva et al., 2014]においても解析が行われている。この画像はフォボスの最大のクレーターであるスティックニークレーターの北東 (緯度: 28.61° N, 経度: 20.16° W) の地域を撮像したものであるため、スティックニークレーターからのイジェクタとしてボルダーが多く存在していると考えられる[Thomas et al., 2000]。本研究では、SP255103 から比較的ボルダーが多く観察された 1km 四方の地域をトリミングし、この領域に対してマッピングを行う (図 2-3)。

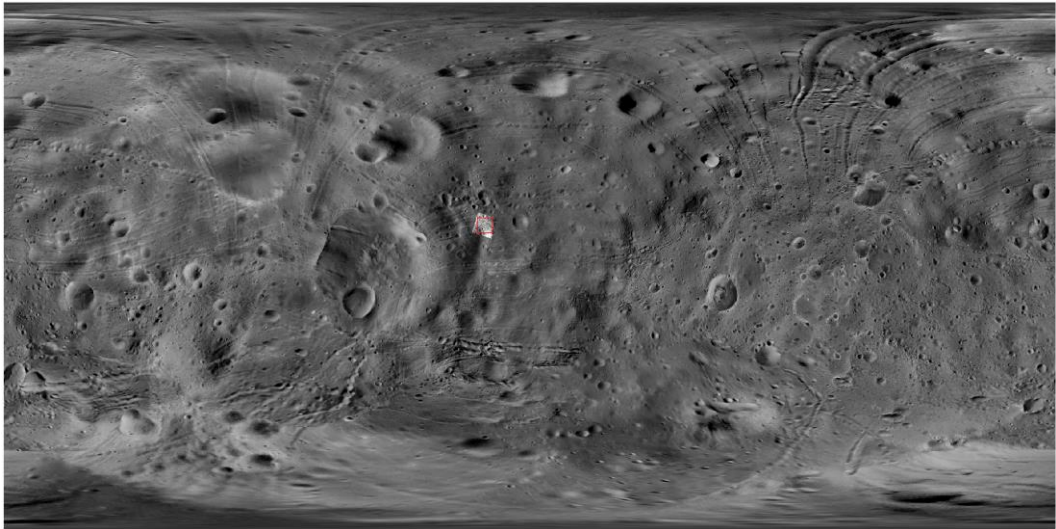


図 2-1. フォボスの全球モザイク画像とマッピング領域（赤四角）

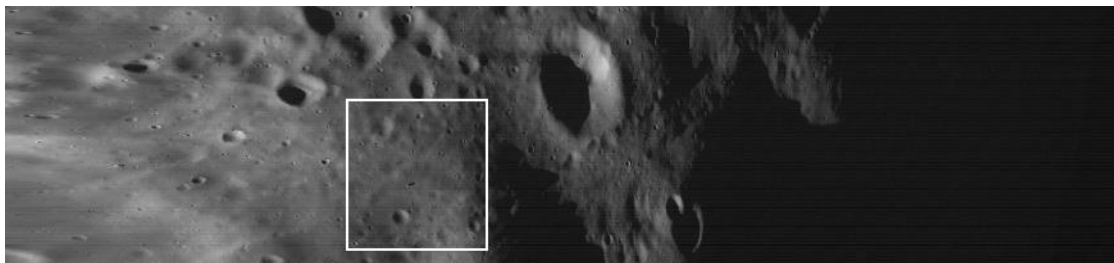


図 2-2. マッピングに使用した画像(SP255103, 1.5cm/pixel) とトリミング範囲
incident angle は画像全体の平均で 43.57° (NASA)

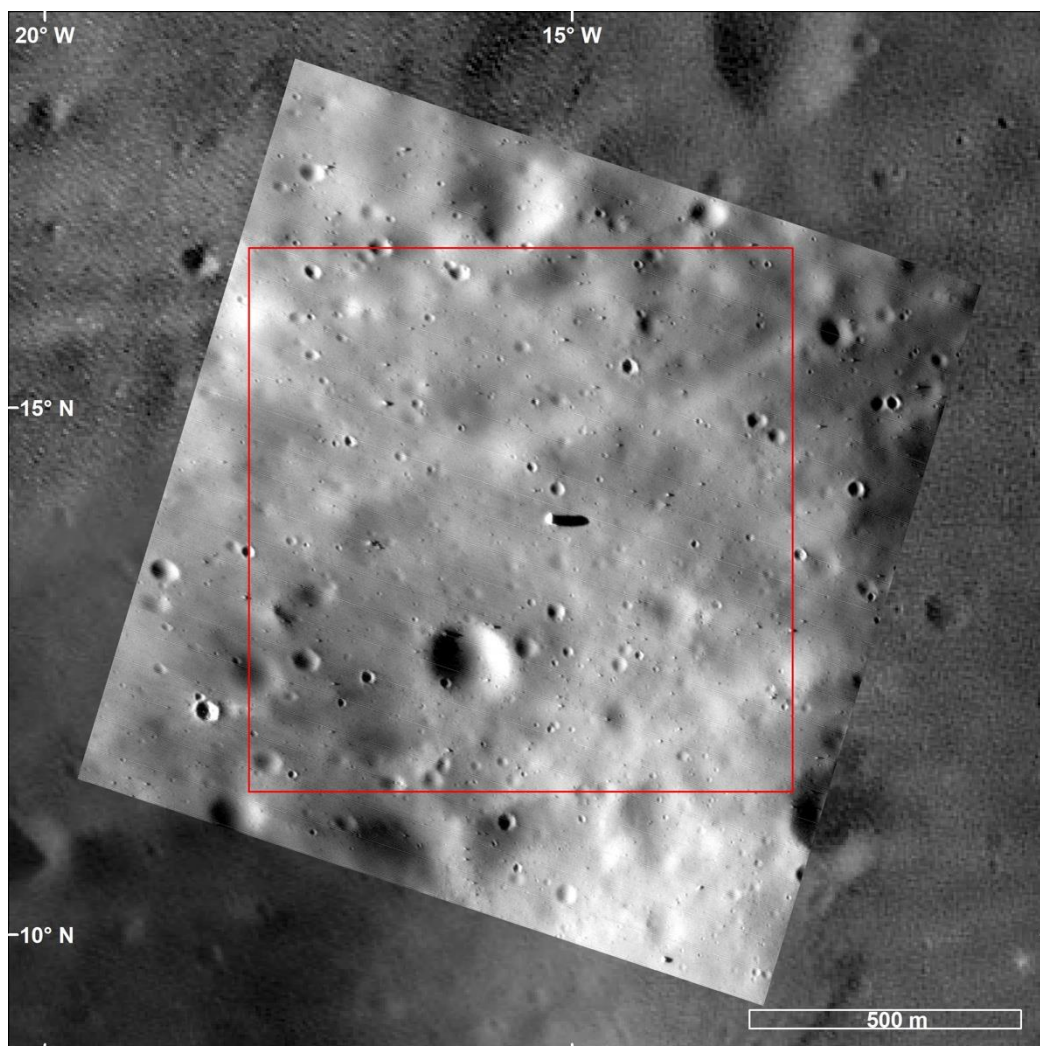


図 2-3. 図 2-2 からトリミングしたマッピング領域（赤四角, 1km 四方）

2.2 手法

マッピングには、地理情報解析ソフトウェア ArcGIS を用いた。CraterTools [Kneissl et al., 2011] を使用し、クレーターまたはボルダーと認識した地形に対して、輪郭の 3 点を選択することで、それぞれ色分けされた円がその点を通るようにマッピングされる。これにより、クレーター及びボルダーの位置座標（円の中心）と直径のデータ（円の直径）を抽出した。本研究では、地形を以下の 4 つに分類してマッピングを行った。

- ① クレーター（確実）：確実にクレーターと認識できるもの
- ② クレーター（候補）：不明瞭だが、クレーターである可能性があるもの
- ③ ボルダー（確実）：確実にボルダーと認識できるもの
- ④ ボルダー（候補）：不明瞭だが、ボルダーである可能性があるもの

図 2-4 は、①～④を識別するにあたって用いた前提のイメージ図である。マッピング領域では、左側から太陽光が入射しているため、クレーターのようにくぼんだ地形（図 2-4 左）が存在した場合、左側が暗く、反対側が明るくなる。逆に、ボルダーのような出っ張った地形（図 2-4 右）が存在した場合、左側が明るく、反対側が暗くなることわかる。その前提から、①～④それぞれの判定基準を以下に述べる。

- ① 左側が暗く、反対側が明るい領域であり、その明暗がはっきりしているもの。また、明暗の領域全体が円形に近いもの。
- ② 左側が暗く、反対側が明るい領域であり、その明暗が不明瞭であるもの。また、明暗の領域全体が円形に近いもの。
- ③ 左側が明るく、反対側が暗い領域であり、その明暗がはっきりしているもの。
- ④ 左側が明るく、反対側が暗い領域であり、その明暗が不明瞭であるもの。

ただし、これらのマッピングが必ずしも実際の地形に即していると言い切ることとはできないことに注意する。特に、②④については、画像上に存在するノイズや、異なる地形（例えば、クレーターのリムをボルダーと誤認するなど）をマッピングしてしまうなどの不確実性が大きい。

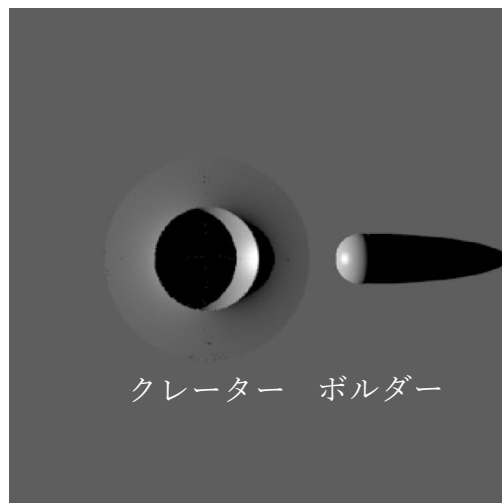
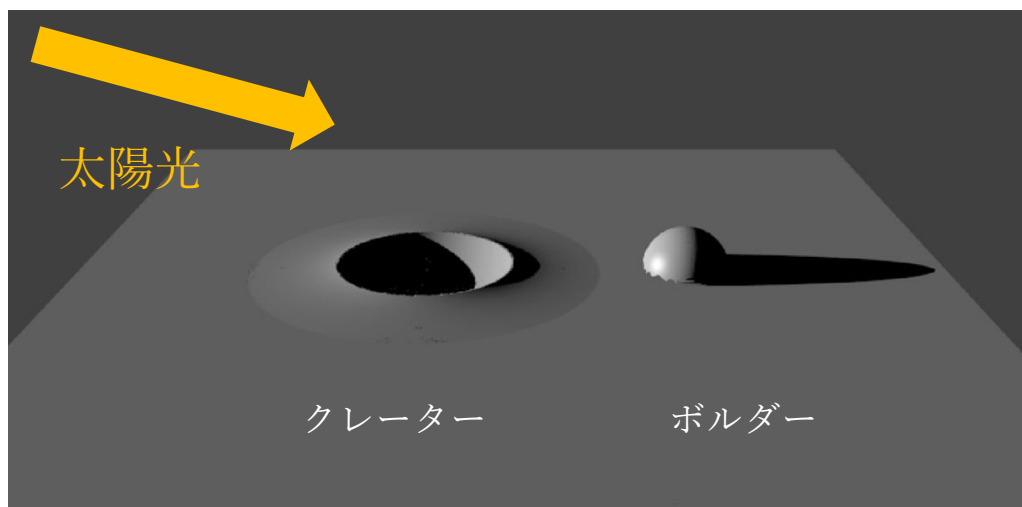


図 2-4. マッピング判定の模式図

左側の地形がクレーター、右側の地形がボルダーを表す。

上) 横から見た場合の光と影

下) 真上から見た場合の光と影

図 2-5 に、マッピングの例を示す。マッピング領域において①～④の地形をそれぞれマッピングしたものを抜粋した。また本研究では、より細かいスケールのラフネスを評価することを目指し、サブピクセルスケール（1-3m）のものまでマッピングを行った。この有効性については 議論で述べる。

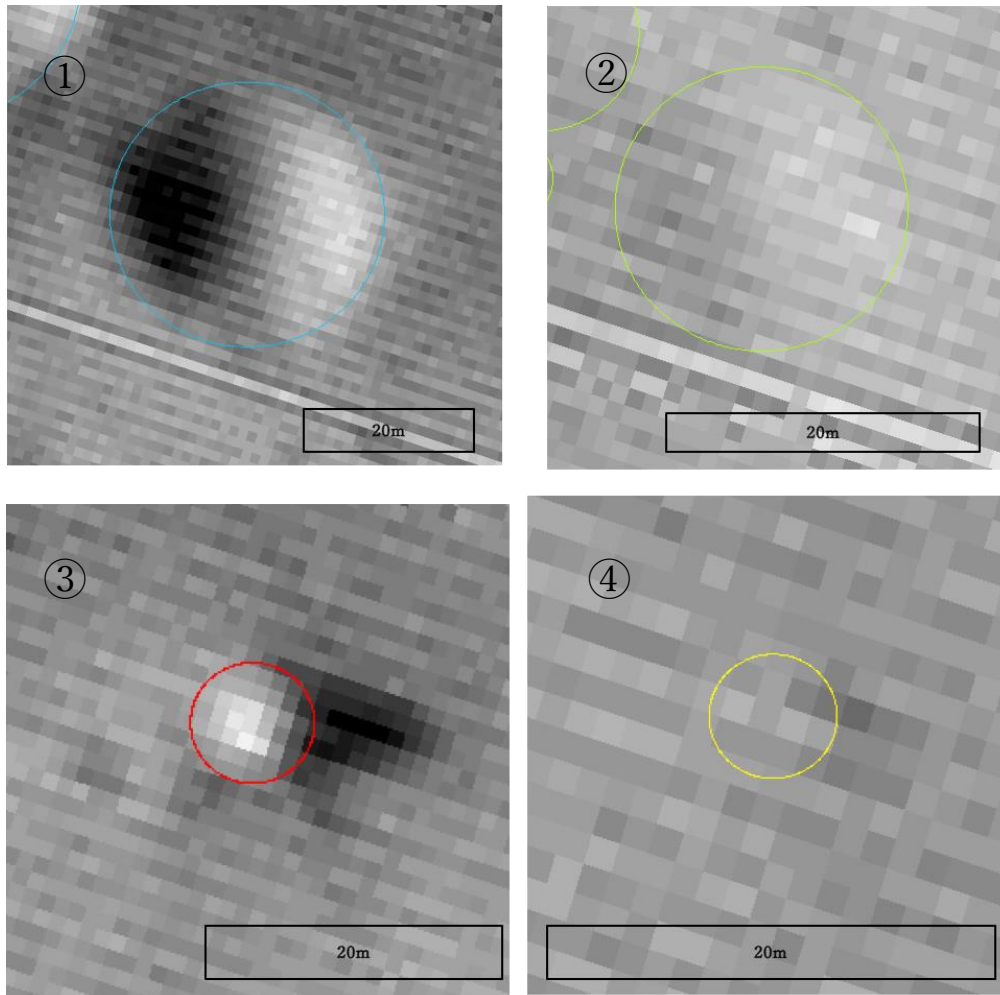


図 2-5. マッピングの例（図 2-3 のマッピング画像の一部）

- ① クレーター（確実）
- ② クレーター（候補）
- ③ ボルダー（確実）
- ④ ボルダー（候補）

2.3 結果

図 2-6 にマッピング結果を示す。クレーター(確実)を 332 個、クレーター(候補)を 1133 個、ボルダー(確実)を 242 個、ボルダー(候補)を 2479 個マッピングした。

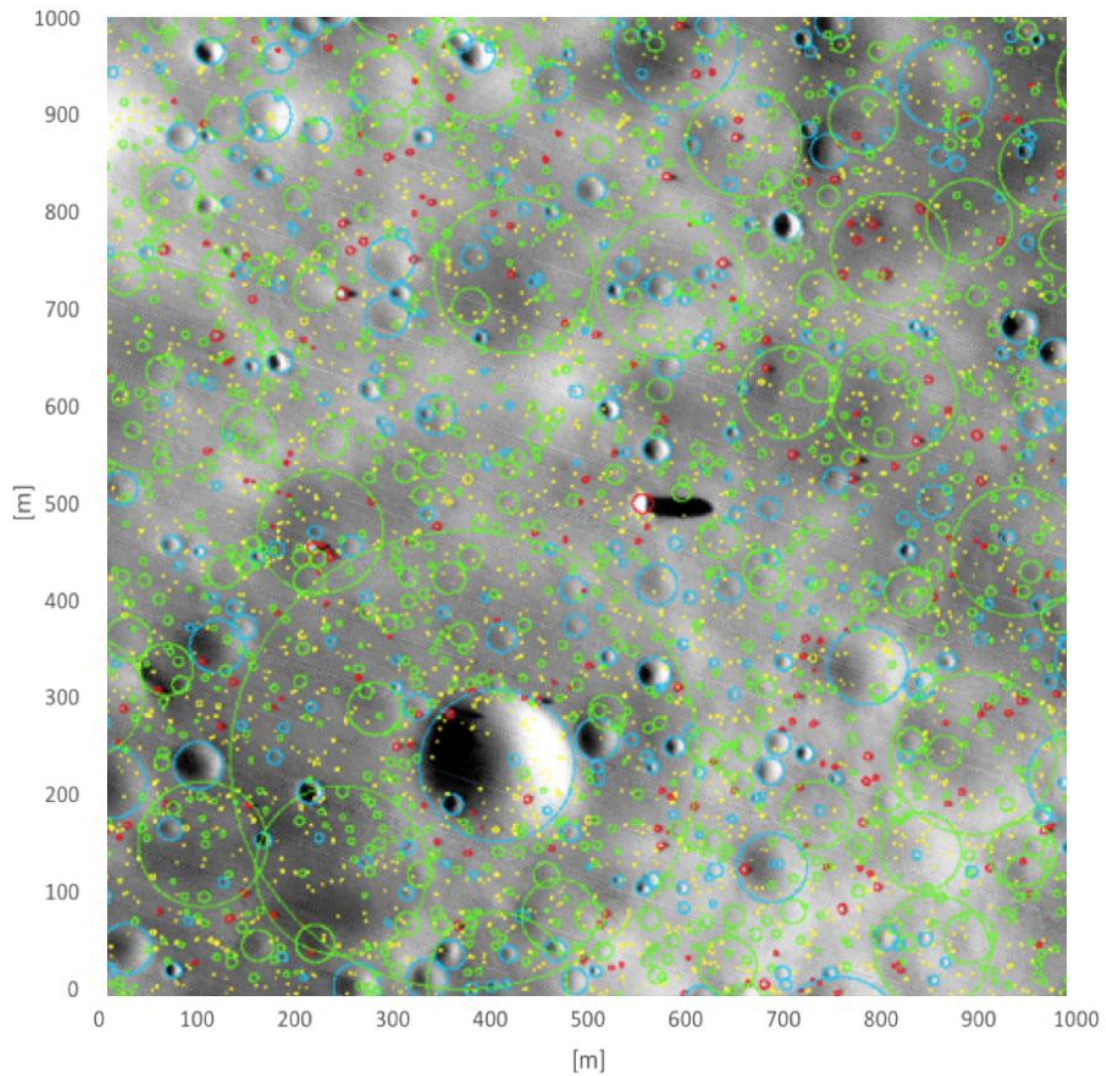


図 2-6. マッピング領域 (図 2-3) にマッピングを行ったもの (1km 四方)

青：クレーター (確実)

緑：クレーター (候補)

赤：ボルダー (確実)

黄：ボルダー (候補)

図 2-7 は、マッピングしたクレーター（CSFD）である。詳細な値は表 2 に示す。赤のプロットは、クレーター（確実）の CSFD を示し、青のプロットは、全てのクレーター（クレーター（確実）+クレーター（候補））の CSFD を示す。クレーター（確実）は 10m 付近、全てのクレーターは 5m 付近から小さいスケールになるにつれて CSFD が平坦になっていることが見て取れる。これは解像度の影響により観測ができなかったことに起因すると考えられるため、その領域を除外して累乗近似を行った。その結果、クレーター（確実）のべき数が -1.63、全てのクレーターのべき数が -1.54 という値を得た。

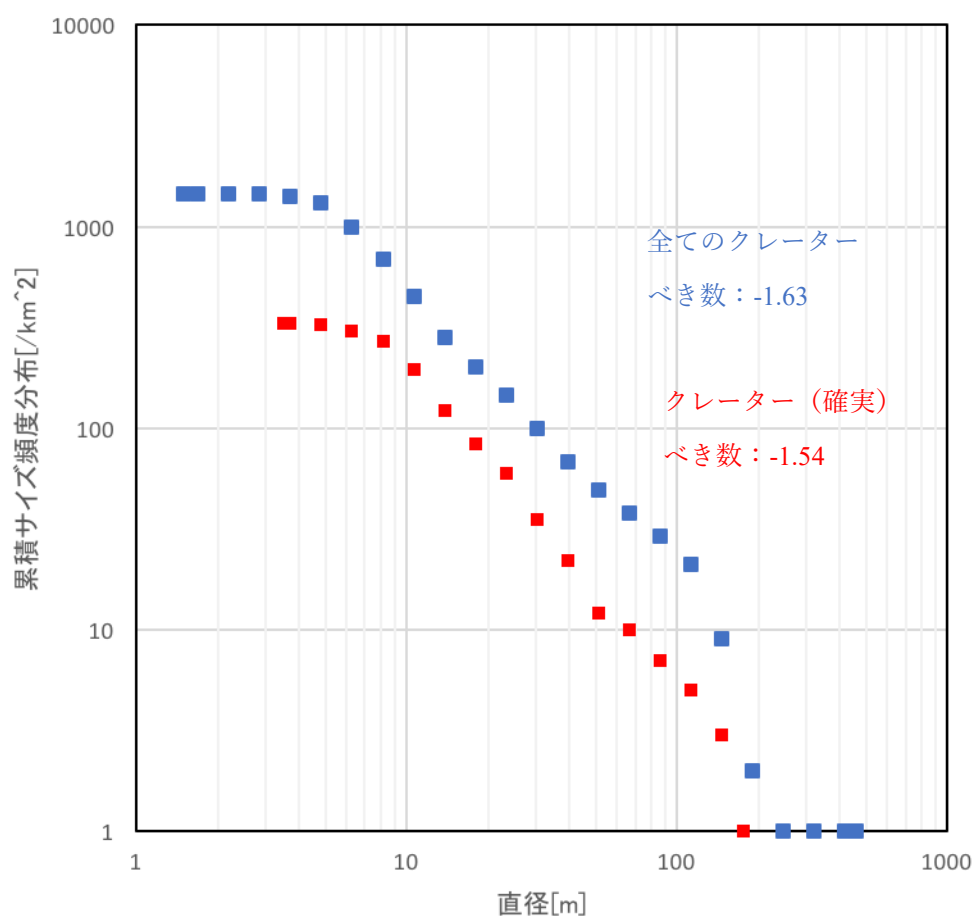


図 2-7. クレーターの累積サイズ頻度分布

表 2 クレーターのサイズ分布

直径[m]	確実＋候補[個]	確実[個]	候補[個]
0~1	0	0	0
1~2	4	0	4
2~4	68	2	66
4~8	685	57	628
8~16	482	178	304
16~32	136	63	73
32~64	49	21	28
64~128	27	7	20
128~256	13	4	9
256~512	1	0	1
512~	0	0	0
合計	1465	332	1133
最大	461.3 [m]	176.2 [m]	461.3 [m]
最小	1.5 [m]	3.5 [m]	1.5 [m]
べき数	-1.63	-1.54	-1.57

図 2-8 は、マッピングしたボルダーの累積サイズ頻度分布である。詳細な値は表 3 に示す。クレーターと同様に、赤のプロットは、ボルダー（確実）の CSFD を示し、青のプロットは、すべてのボルダー（ボルダー（確実）＋ボルダー（候補））の CSFD を示す。ボルダー（確実）の CSFD は 3m 付近、すべてのボルダーの CSFD は 1m 付近から平坦になっているため、その領域を除外して累乗近似を行った。その結果、ボルダー（確実）のべき数が-3.62、全てのクレーターのべき数が-2.95 という値を得た。

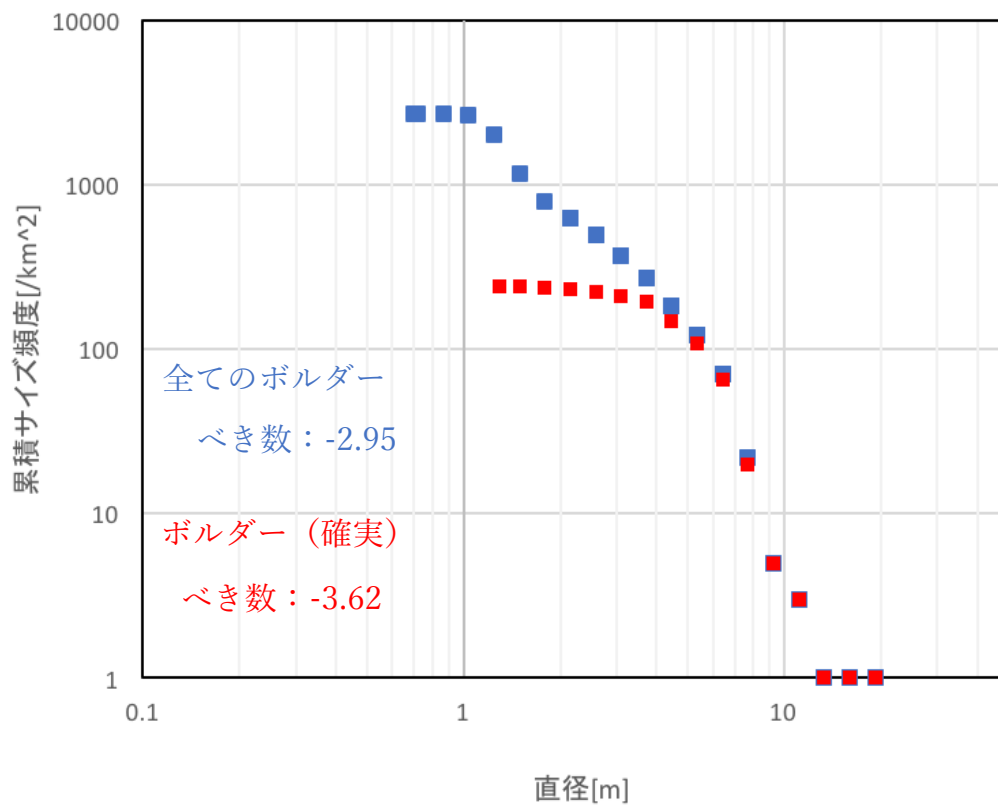


図 2-8. ボルダーの累積サイズ頻度分布

表 3 ボルダーのサイズ分布

直径[m]	確実＋候補[個]	確実[個]	候補[個]
0~0.5	0	0	0
0.5~1	41	0	41
1~1.5	1523	2	1521
1.5~2	465	7	458
2~4	466	66	400
4~8	206	149	57
8~16	19	17	2
16~32	1	1	0
32~	0	0	0
合計	2721	242	2479
最大	19.3 [m]	19.3 [m]	8.5 [m]
最小	0.71 [m]	1.3 [m]	0.71 [m]
べき数	-2.95	-3.62	-3.23

3. 数値計算による地形モデルの構築

2 章では、1km 四方の限定された領域に対して、サブピクセルのスケールまでクレーターとボルダーをマッピングした。これにより、先行研究よりも小さいスケールの CSFD を求めることができた。しかし、CSFD が得られただけではフォボスの表面ラフネスについて議論することができない。そのため、本研究の第 2 ステップとして、2 章で得られたクレーター及びボルダーの CSFD を用いて、数値計算によって模擬天体表面の地形モデルを構築する。これにより、実際のフォボスの地形情報をある程度推定し、MMX の運用に向けた表面ラフネスの評価を行うことを目指した。本章で行う手法のイメージを図 3-1 に示す。

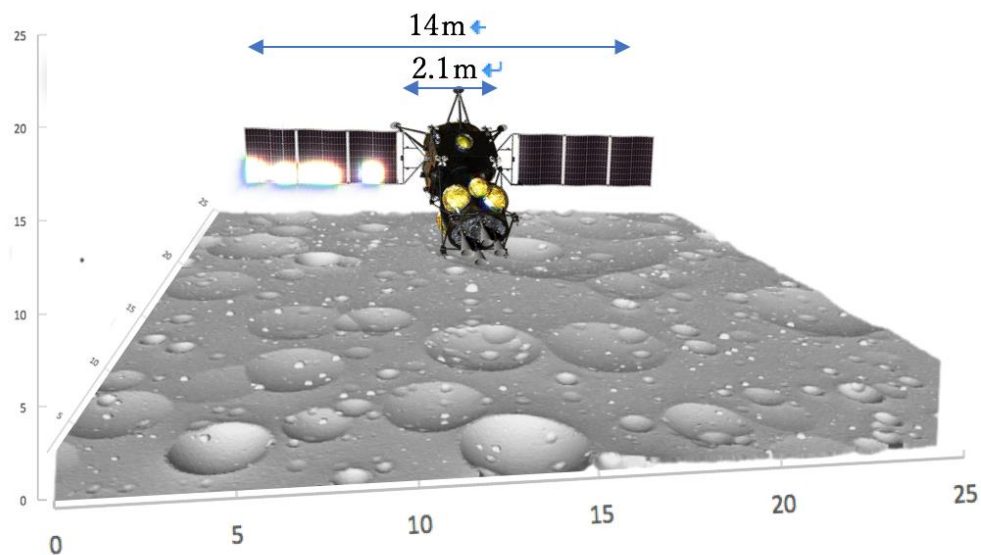


図 3-1. MMX の仮想天体表面への着陸イメージ

3.1 手法

ここでは、数値計算により仮想天体表面の地形モデルを構築する手法について述べる。数値計算ではC言語を用い、仮想的な3次元空間上に (x, y, z) の格子点を並べることで、地形モデルを構築する。はじめに、図3-2のような仮想天体表面の初期状態を準備する。これは、全ての格子点において $z=0$ である xy 平面を表している。つまり、 xy 平面が天体表面、 z は地形の高度を表すようになっている。ここでは、 x, y 座標がそれぞれ一定の間隔で0~1000の格子点を用意した。つまり1001個 \times 1001個=102001個の格子点が存在している。用意した格子点の合計と x, y 座標は変化せず、 z の値のみ変化させることで、地形モデルを変形させていくという手法になっている。格子点のメッシュ化、可視化には、Paraview5.2、Meshlab、Blender2.78の3つを用いた。

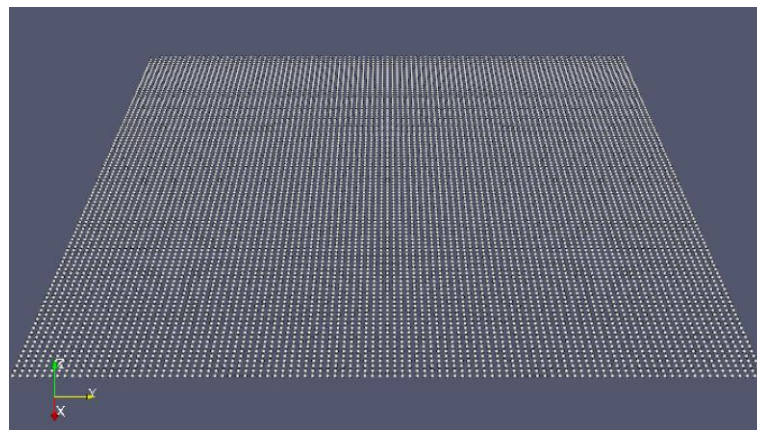


図 3-2. 仮想天体表面の初期状態 ($x : 1-1000, y : 1-1000, z=0$, 格子数 102001 個)
Paraview で可視化したもの

3.1.1 クレーターの形成

次に、用意した仮想天体表面の初期状態に対してクレーターを形成していく。ここではその計算の手順について述べる。この数値計算では、地点 (x, y) における z を二次元配列に格納し、衝突クレーターを1回形成するたびに z を変化させていくアルゴリズムになっている。以下の①～⑥を繰り返すことで、任

意の数の衝突クレーターを形成した地形モデルが得られる。ここでは、地点 (x,y) における z を $z[x][y]$ と表すことにする。

① 衝突位置 (x_c, y_c, z_c) の決定

まず、初期状態の地形モデルに対して乱数を生成することでランダムに衝突位置を決定する。衝突位置とは形成される衝突クレーターの中心、つまり宇宙空間から飛来した天体がターゲット天体表面と衝突する位置を想定しているが、この計算では衝突する天体の物性や速度などのパラメータは考慮していない。衝突位置の x 座標を x_c 、 y 座標を y_c 、 z 座標を z_c とすると、 x_c, y_c のみ乱数生成によってランダムに決定した後、 x_c, y_c における z の値を読み込むことで z_c を決定する。例えば、 N 回目の衝突位置 (x_c, y_c) を決定した時、 $N-1$ 回目の地形モデルに格納された $z[x_c][y_c]$ が z_c となる。図 3-3 は、初期状態の xy 平面に対して、ランダムに衝突位置 $(x_c, y_c, z_c)=(0, 0, 0)$ が決定されたと仮定した場合のイメージである。ここで想定しているのは初期状態の地形モデル (xy 平面) であるため、必ず $z_c=0$ になる。クレーター数密度は、その天体の軌道や自転の影響によって、地域によって偏りがあることがわかっている。例えば、自転と公転が同期している天体の場合、先行半球にクレーターが多く見られる傾向にある。しかし今回想定している 1km 四方のスケールでは、そのようなクレーター数密度の偏りがほとんど影響しないと仮定して x_c, y_c の乱数生成は、それぞれ $0-1000$ の値を均一な確率で生成するようにした。

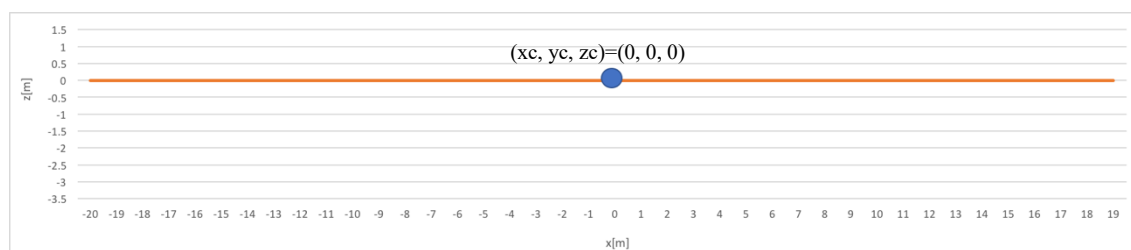


図 3-3. 仮想天体表面の断面図イメージ ($y=0$) : 衝突位置の決定

② クレーター直径 D の決定

地形モデルに形成するクレーターの直径を決定するにあたり、1.4 で述べた CSFD の特徴を考慮する必要がある。詳しい計算方法は省略するが、モンテカルロ法を用いた計算を行うことで、クレーターの CSFD の近似式に従うようにランダムにクレーター直径 D を生成するプログラムを構築した。図 3-4 は、べき数を-2、クレーターの直径の最小値を 10m に設定し数値計算で生成したクレーター直径の CSFD である。

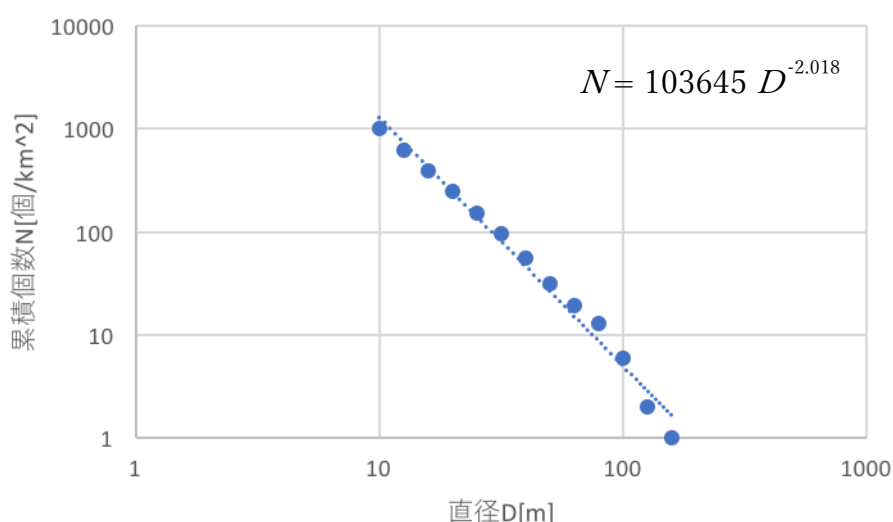


図 3-4. 数値計算で生成したクレーター直径の CSFD（べき数：-2）

③ 衝突位置から H 高い地点（xc,yc,zc+H）を中心に持つ半径 R の球を設定

衝突位置と形成されるクレーターの直径をモンテカルロ法で生成した後、地形モデルを変化させていく。クレーターの形状は、お椀型の単純クレーターと、底が平らになっている平底クレーター、多重リングクレーターなどの複雑クレーターに分類することができる。比較的大きなクレーター（~15km<）で複雑クレーターがよく観測されるが、本研究の対象はフォボス（26.06×22.80×18.28 km [Willner et al., 2014]）であり、生成する地形モデルも 1km 四方のため、すべて単純クレーターと仮定して形状を決定した。計算の簡略化のため、お椀型は真球の下部を切り取った形に統一した。図 3-5 は、地形モデルを変化

させるにあたって仮想的に設定した球のイメージである。クレーターの深さを d 、クレーターの直径を D とした時、その比 d/D も重要なパラメータである。月では、新鮮なクレーターにおける d/D は 0.2 に近い値を示すことが知られている[Pike, 1974]。フォボスでも同様に d/D の解析がなされており、おおよそ 0.02-0.2 の間に収まることがわかっている[Kokhanov et al., 2014, Basilevsky et al., 2014]。そのため、本研究では d/D が 0.02 から 0.2 の間までランダムに変化するように設定した。この時、任意の d/D でクレーターを形成するために必要な仮想的な球の半径 R と中心座標 (x_c, y_c, z_c+H) の H は、以下の式で表される。

$$R = \frac{4r_d^2 + 1}{8r_d} D$$

$$H = R - r_d D$$

ここで、 $r_d = d/D$ とする。図 3-5 は、ランダムに $r_d = 0.2$, $D = 20$ [m] と設定された場合の仮想的な球を表す。ここで、 $R = 14.5$ [m], $H = 10.5$ [m] と計算されるため、半径 14.5 m の球が中心座標 $(0, 0, 10.5)$ にある時、球の下部と仮想天体表面によって作られたお椀型の図形は、高さ 4 [m]、幅 20 [m] となる。

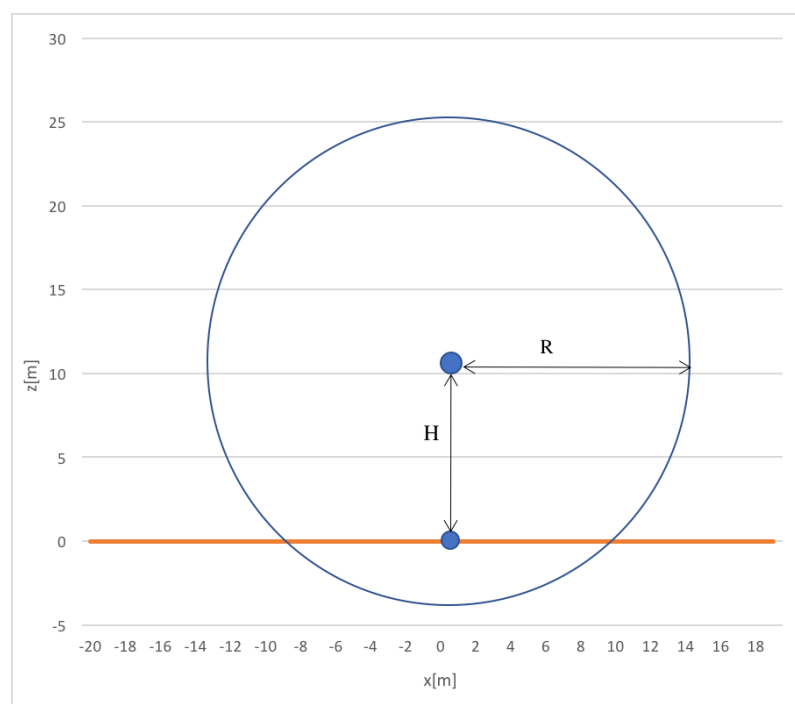


図 3-5. 地形モデルの断面図イメージ：球の設定

④ クレーターのお椀型形状を再現

地形モデルの格子点の中から、③で設定した球の内側に存在する格子点の z を球の座標に変更する。これにより、直径 20 m、 $r_d = 0.2$ ($d = 4$ [m]) のクレーターを形成することができる。

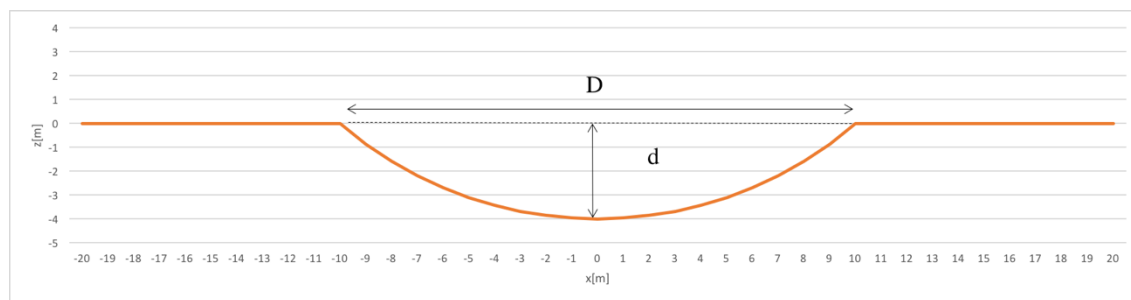


図 3-6. 地形モデルの断面図イメージ：お椀型形状の再現
(点線が変更前の z 、橙線が変更後の z)

⑤ クレーター部分の z にリムの高さ h_{rim} を加える

衝突クレーターにはリムと呼ばれる部分が存在する。これは、お椀型の形状の外側に円環状に広がる盛り上がった地形のことである。実際のクレーターの地形に近づけるために、本研究ではリムの再現を目指した。リムの高さを h_{rim} とした時、④でお椀型を形成する部分の z に均等に h_{rim} を加算することで、図 3-7 のようになる。ここで h_{rim} は、深さ d に依存するように $h_{rim} = a \times d$ とした。 a の値は、Pike (1967)が行った月のクレーター形状の研究に基づき 1/4 に設定した。しかし、フォボスにおけるクレーターの深さとリムの関係性に関する研究はなされていないため、この値が実際のフォボス表面のクレーターに即したものではない可能性があるが、便宜的にこの値を使うことにする。

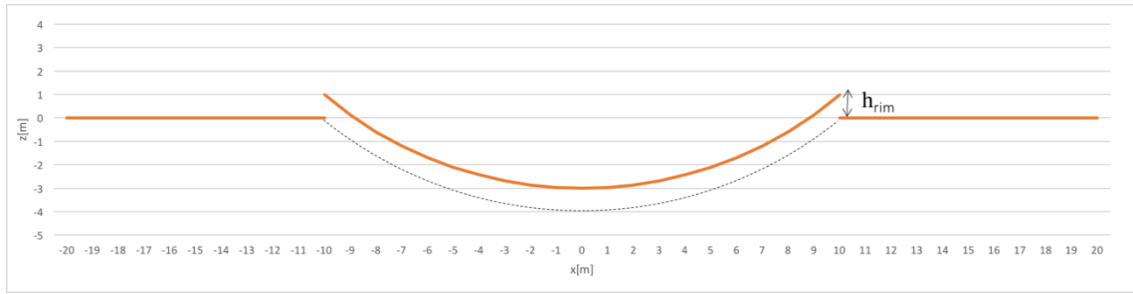


図 3-7. 地形モデルの断面図イメージ：リムの高さを加える

⑥ リムを形成する

クレーターのリムは、クレーターの縁で最大の高さ h_{rim} を持ち、クレーター中心から遠ざかるに従って緩やかに平坦になっていく。⑤の $x = -10, x = 10$ の地点で存在している、クレーターの縁と平坦な領域との隔たりを緩やかに繋げるために、縁よりも外側の領域に l_{rim} を加算する。 l_{rim} が影響を与える範囲は、衝突位置から距離 W 以内とした時、 $W = D$ として計算した。 l_{rim} はそれぞれのクレーターによって多様性があり、関数として導出することは困難であるが、本研究で数値計算を行うにあたって、便宜的にクレーター中心からの距離 r の関数として以下の式で設定した。

$$l_{rim} = \frac{5ar_d D(D - r)}{8(r - 0.2D)}$$

ここで、 r は衝突位置(x_c, y_c)からの距離を表し、 $r = \{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2\}^{1/2}$ である。この式に従ってリムを形成すると、クレーターの縁である $r = 2/D$ において $l_{rim} \doteq h_{rim}$ となり、リムの影響範囲である $r = W = D$ において、 $l_{rim} = 0$ となる。 $2/D < r < D$ の領域で、 z に l_{rim} を加えた場合の地形モデルを図 3-8 に示す。

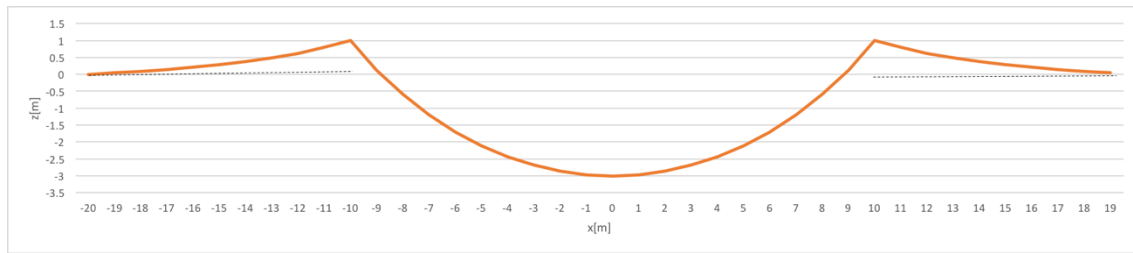


図 3-8. 地形モデルの断面図イメージ：リムの形成

以上に述べた①～⑥のステップでクレーターの形成を完了した。このステップを繰り返すことで複数のクレーターが存在する仮想天体の地形モデルを形成していくことができる。ここでは初期状態の xy 平面で説明したが、クレーターやボルダーなどによる凹凸が存在する地形に対しても①～⑥の行程を経ることでクレーターを形成し、既存の地形と連続的につながるようになっている。

衝突位置と直径をそれぞれ $(x_c, y_c) = (500, 500)$, $D=500$ として①～⑥のステップを経て形成した地形モデルを図 3-9, 図 3-10 に示す。

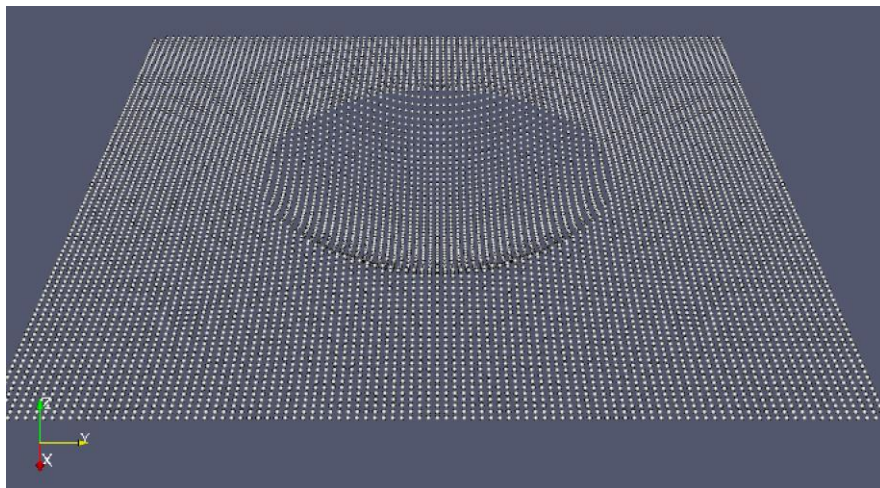


図 3-9. 仮想天体表面の初期状態に 1 個のクレーターを形成した時の地形モデル

Paraview で可視化

$(x_c, y_c, z_c) = (500, 500, 0)$, $D = 500$

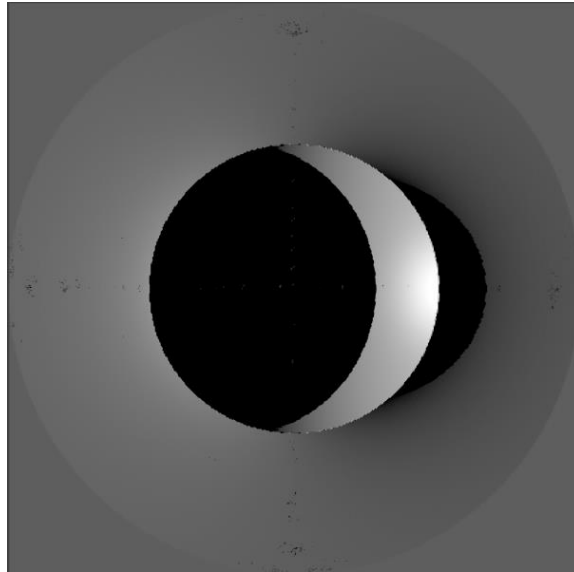


図 3-10. 仮想天体表面の初期状態に 1 個のクレーターを形成した時の地形モデル
Blender で可視化、incident angle は 80°
 $(x_c, y_c, z_c) = (500, 500, 0)$, $D=500$

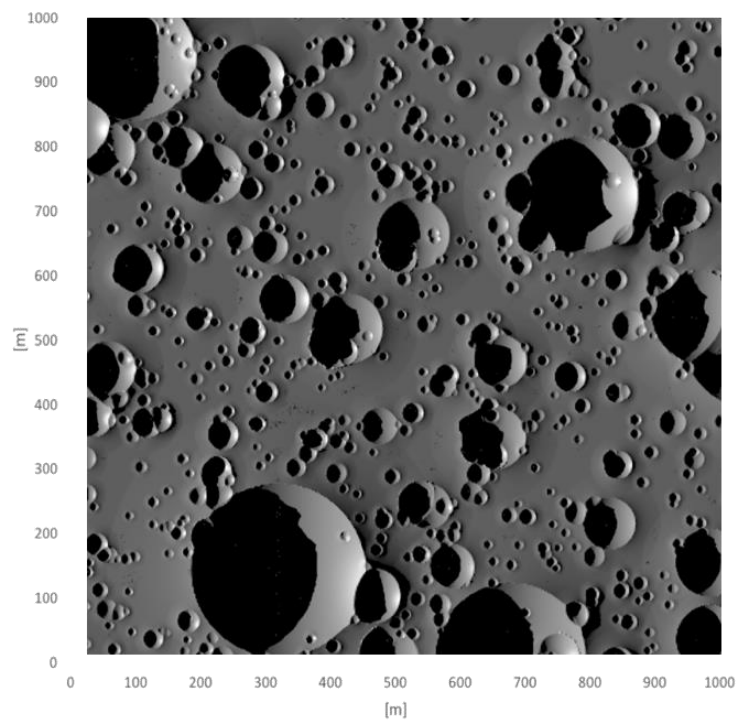


図 3-11. CSFD のべき数を-2 に設定しランダムに 500 個のクレーターを
形成した場合の地形モデル
Blender で可視化

3.1.2 ボルダーの形成

次に、ボルダーの形成手法を述べる。3.1.1 では初期状態の平面に対してクレーターを形成したが、ボルダーに関しては初期状態ではなくクレーターを形成した地形モデルに対して配置していく。天体表面上に存在するボルダーは、多種多様な形状をしているため、これらの複雑な形状を数値計算により構築することは非常に困難である。そのため、本研究におけるボルダーは、一様な形状に統一して再現することにする。計算の簡略化のために、ボルダーは真球の上部を切り取った形状に設定した。ボルダーの形成を行う計算手法を以下に述べる。

① ボルダーの中心位置 (x_b, y_b, z_b) の決定

3.1.1 の①で述べた手法と同じように、ボルダーの中心位置 (x_b, y_b, z_b) を乱数生成によって決定する。これにより、既にクレーターの形成によって多くのラフネスが存在している地形の上にボルダーが配置される。

② 直径の決定

これまでに様々な天体に存在するボルダーが解析されている[e.g., Dombard et al., 2010]。ボルダーの累積サイズ頻度分布は、1.4 で述べたように、累乗近似することが可能であることが知られていることから、クレーターの形成における直径の決定手法 (3.1.1②) と同様に、モンテカルロ法を用いて、任意の累積サイズ頻度分布の直線に乗るようにボルダーの直径を決定する。

③ 中心位置から H 低い地点 (x_b, y_b, z_b-H) を中心に持つ半径 R の球を設定

ボルダーの形状は、真球の上部を切り取った形状に統一するため、3.1.1 の③と同様に球を設定する。しかしクレーターのような凹んだ地形とは反対に、ボルダーによって盛り上がった地形を再現するため、中心位置 (x_b, y_b, z_b) から H だけ低い地点 (x_b, y_b, z_b-H) に球を設定する。3.1.1 ではクレーターの深さを d としたが、ここではボルダーの高さを d とすると、ここで $r_d = d/D$ を考慮する必要がある。Thomas et al. (2000)によると、フォボスのボルダーの直径と高さの

関係は図 3-12 のような分布を持つ。計測された 124 個ボルダーの平均のアスペクト比 (height/width) は 0.25 となっている。この値を用いて、 $r_d = 0.25$ に設定した。ボルダーの直径を $D = 20$ に設定した場合の地形モデルの断面図イメージを図 3-13 に示す。

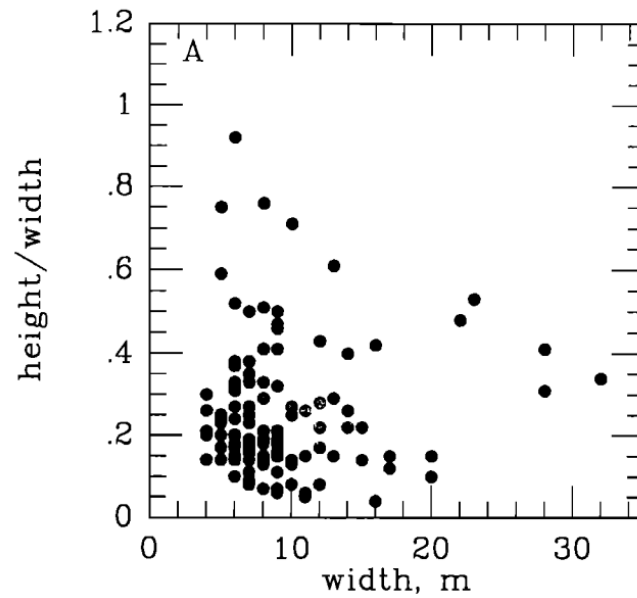


図 3-12. フォボスのボルダーのアスペクト比[Thomas et al., 2000; Fig.7]
124 個のボルダーを解析、平均アスペクト比 (height/width) は 0.25

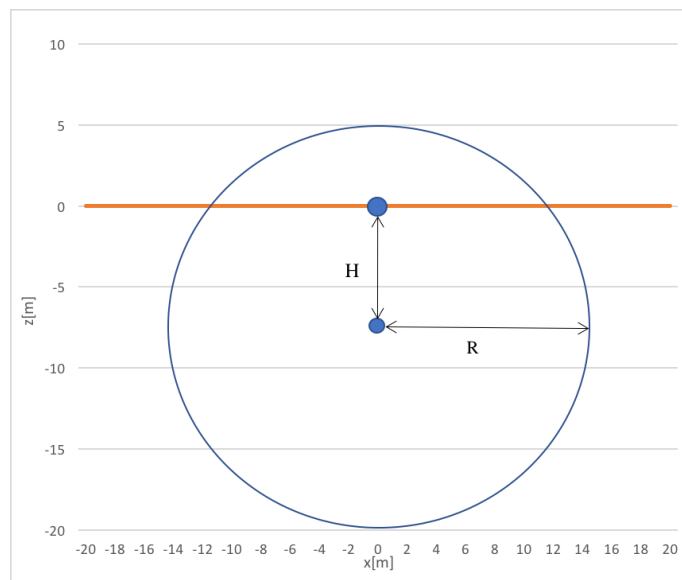


図 3-13. 地形モデルの断面図イメージ：球の設定
 $(x_b, y_b, z_b) = (0, 0, 0)$, $D = 20$, $r_d = 0.25$

④ 球面で設定したボルダー型形状の再現

3.1.1 の④と同様に、③で設定した球の内側に存在する z を球の座標に変更することで、直径 20 m、 $r_d = 0.25$ ($d = 5$ m) のボルダーを形成した（図 3-14）。

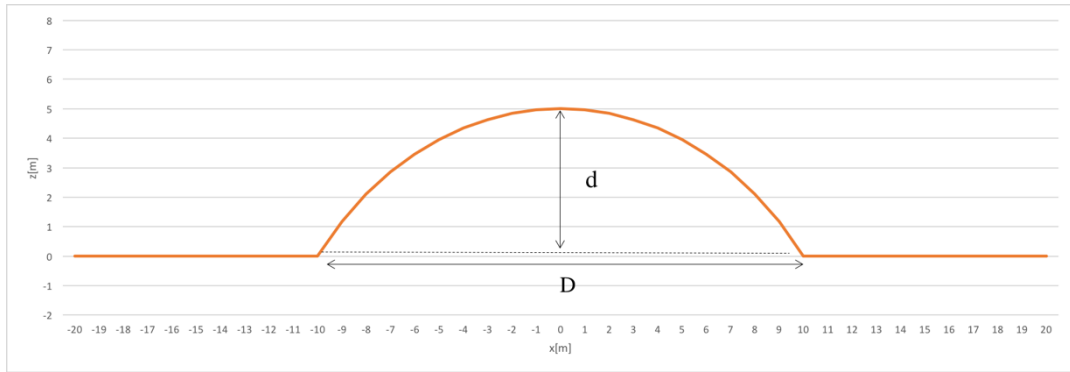


図 3-14. 地形モデルの断面図イメージ：ボルダー型形状の再現
(点線が変更前の z 、橙線が変更後の z)

ボルダーには、クレーターにおけるリムのような形状がないため、①～④のステップでボルダーの形成を完了した。平面にランダムにボルダーを複数配置した地形モデルの例を図 3-15 に示す。

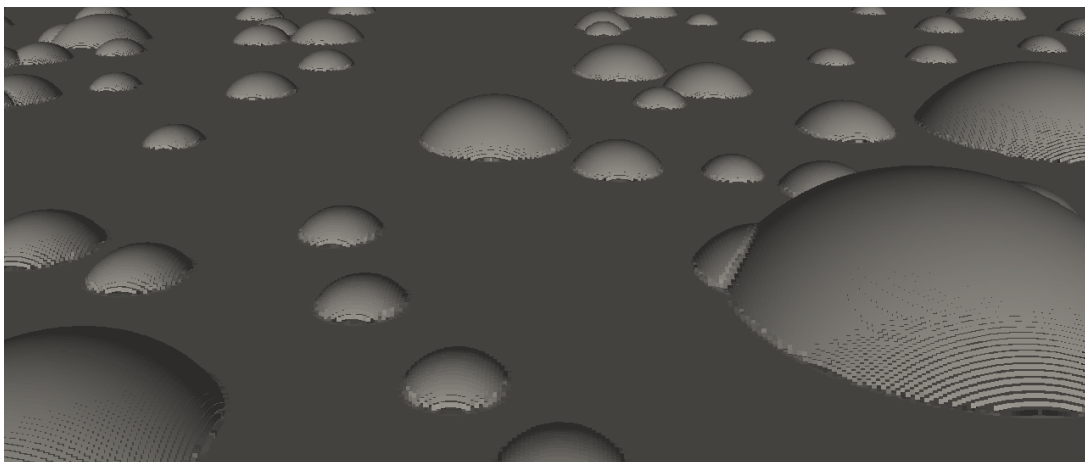


図 3-15. 仮想天体表面の初期状態に複数ボルダーを形成した場合の地形モデル
Meshlab で可視化

3.2 模擬天体表面の構築

3.1 で述べたクレーターとボルダーを形成する計算手法にしたがって、2 章で扱った画像（図 2-6）の模擬天体表面の地形モデルを構築する。3.1 では、 x, y 座標がそれぞれ 0~1000 の格子点を用意し説明したが、本研究では数十 cm スケールのラフネスを把握するため、 x, y 座標がそれぞれ 0~10000 の格子点を用意する。つまり 10001 個×10001 個 = 100020001 個の格子点が、10cm の間隔を持って存在することになる。

3.2.1 クレーターの形成

2 章では、332 個のクレーター（確実）と 1133 個のクレーター（候補）をマッピングした。ここで得られたクレーターの位置と直径のデータを、3.1 で述べた x_c, y_c, D に代入して計算することで、マッピング領域と同様の位置、直径のクレーターを形成し、模擬的な地形モデルを構築する。ここで、マッピング時にはっきりと認識することができたクレーター（確実）は、クレーター（候補）に比べて r_d が大きいと仮定した。図 3-16 に、Basilebsky et al. (2014)によって得られたフォボスのクレーターの d/D の分布を示す。この分布を見ると、フォボスのクレーターの d/D がおよそ 0.02-0.2 の間に収まることが示唆されている。また、この結果は Kokhanov et al. (2014)が行った研究においても類似した結果が得られている。そのため、クレーター（確実）の r_d が 0.1-0.2、クレーター（候補）が 0.02-0.1 の間の値を持つと仮定し、それぞれその範囲内で r_d の値をランダムに決定するように設定した。

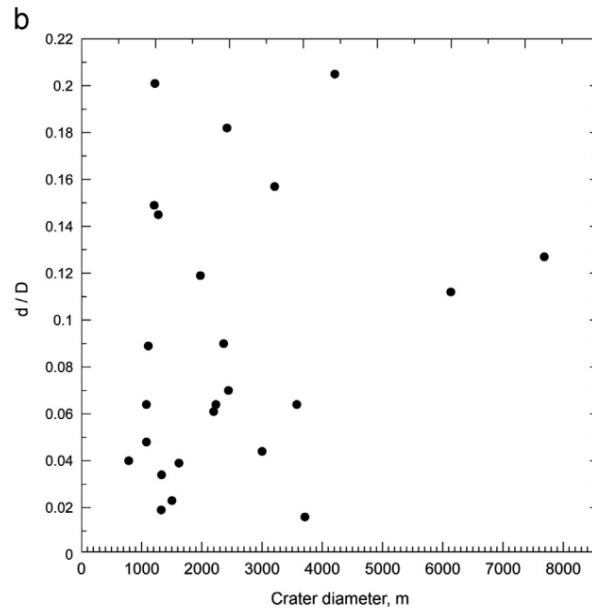


図 3-16. フォボスのクレーターの d/D [Basilevsky et al., 2014; Fig.5]

3.2.2 ボルダーの形成

2章では、242個のボルダー（確実）と2479個のボルダー（候補）をマッピングした。クレーターと同様に、マッピングで得たボルダーの位置、直径を x_b, y_b, D に代入してボルダーを形成する。ここでは、3.2.1で構築した地形モデルに対してボルダーを配置する。これにより、2章で得た全てのクレーターとボルダーを1km四方の仮想天体表面に形成することができた。

3.2.3 人工的なボルダーの形成

本研究では、観測が困難な数十cm-数mスケールのラフネスを再現することを目指している。1km四方で詳細にマッピングを行った結果（図2-7、図2-8）では、クレーターは5-10m付近、ボルダーは1-3m付近でCSFDが平坦になっている。解像度の影響で実際のクレーターやボルダーがマッピングできていないことが原因であると考え、3.2.1と3.2.2で構築した地形モデルでは、細かいスケールのラフネスを評価する上で不十分であると考えられる。そのた

め、ここでは、図 2-8 のボルダーの CSFD の累乗近似直線を外挿し、20cm-1m のスケールのボルダーを人工的に形成することで、実際の天体表面に近づけた地形モデルを構築することを目指した。

マッピングしたボルダーと人工的に形成したボルダーの CSFD を図 3-17 に示す。ここで使用した累乗近似の式は、

$$N = 6176 D^{-2.95}$$

この式は図 2-8 において、すべてのボルダーにおける 1m 以下の平坦な領域のデータを除外した時の累乗近似式である。この式に従うように、モンテカルロ法を用いて 20cm-1m の人工的なボルダーの位置、直径を生成した。この計算により生成したボルダーは 71 万個となった。

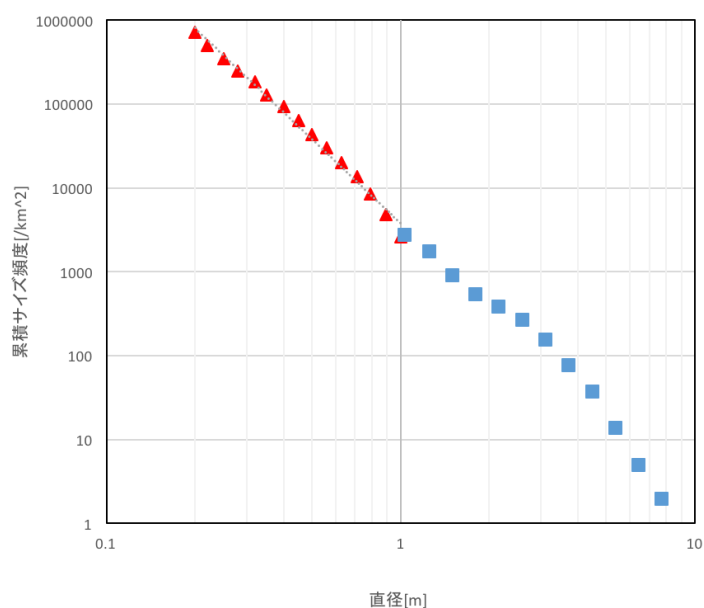


図 3-17. 地形モデルに形成したボルダーの CSFD

青：マッピングしたボルダー（確実＋候補）

赤：人工的に生成したボルダー

3.3 結果

3.2 でマッピングしたクレーターとボルダー、CSFD の外挿によって想定される人工的なボルダーを形成して構築した地形モデルを図 3-18 に示す。これにより、マッピング領域（図 2-3）と類似した地形を再現することができた。地形モデルの可視化には Blender2.78 を用いており、線光源が左側から入射するように設定した。元画像である SP255103 は、太陽光入射角の画像全体の平均が 43.57° となっているが、マッピング領域における部分的な太陽光入射角は明らかになっていない。そのため、可視化では明暗がはっきりと見えるように入射角を 80° に設定した。

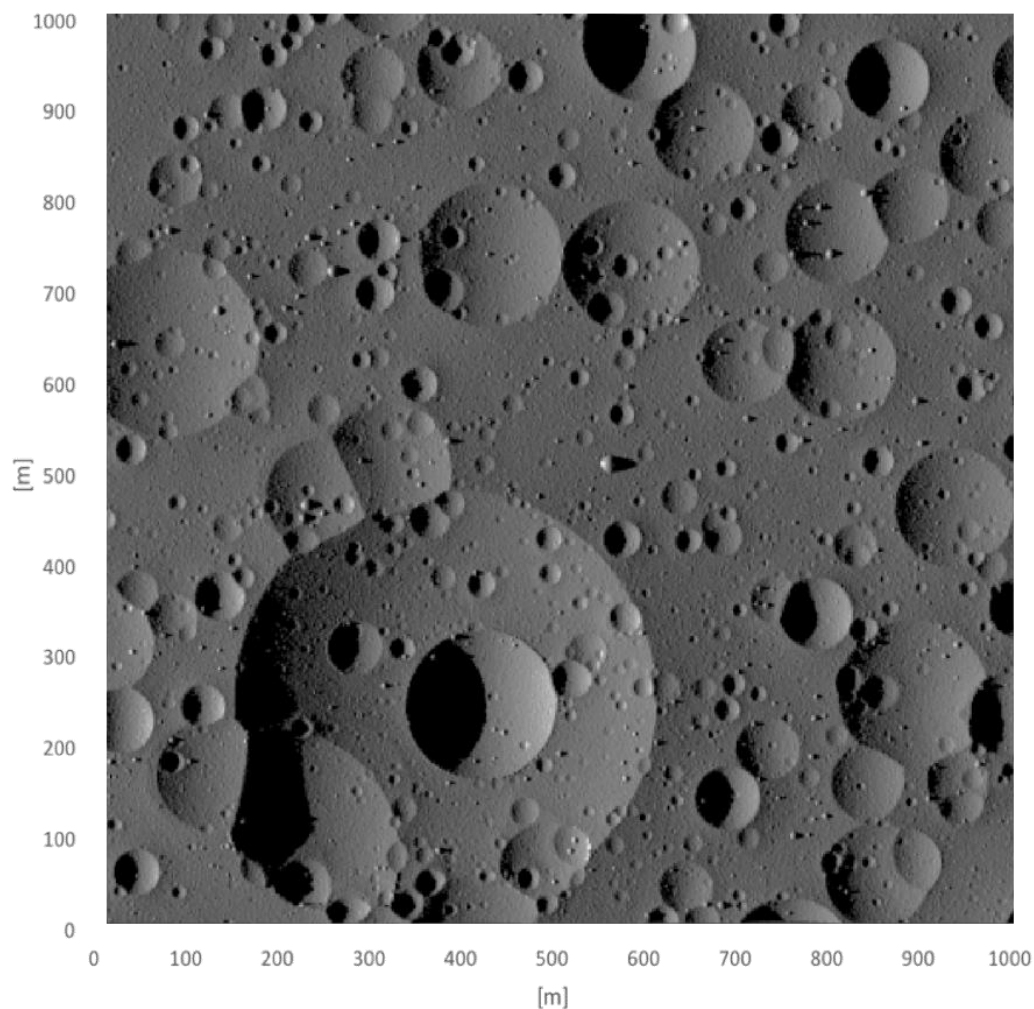


図 3-18. 数値計算によって構築した模擬天体表面
Blender で可視化

図 3-19 は、図 3-18 の地形モデルの高度 ($z[m]$)マップである。可視化には gnuplot 5.2 を用いた。

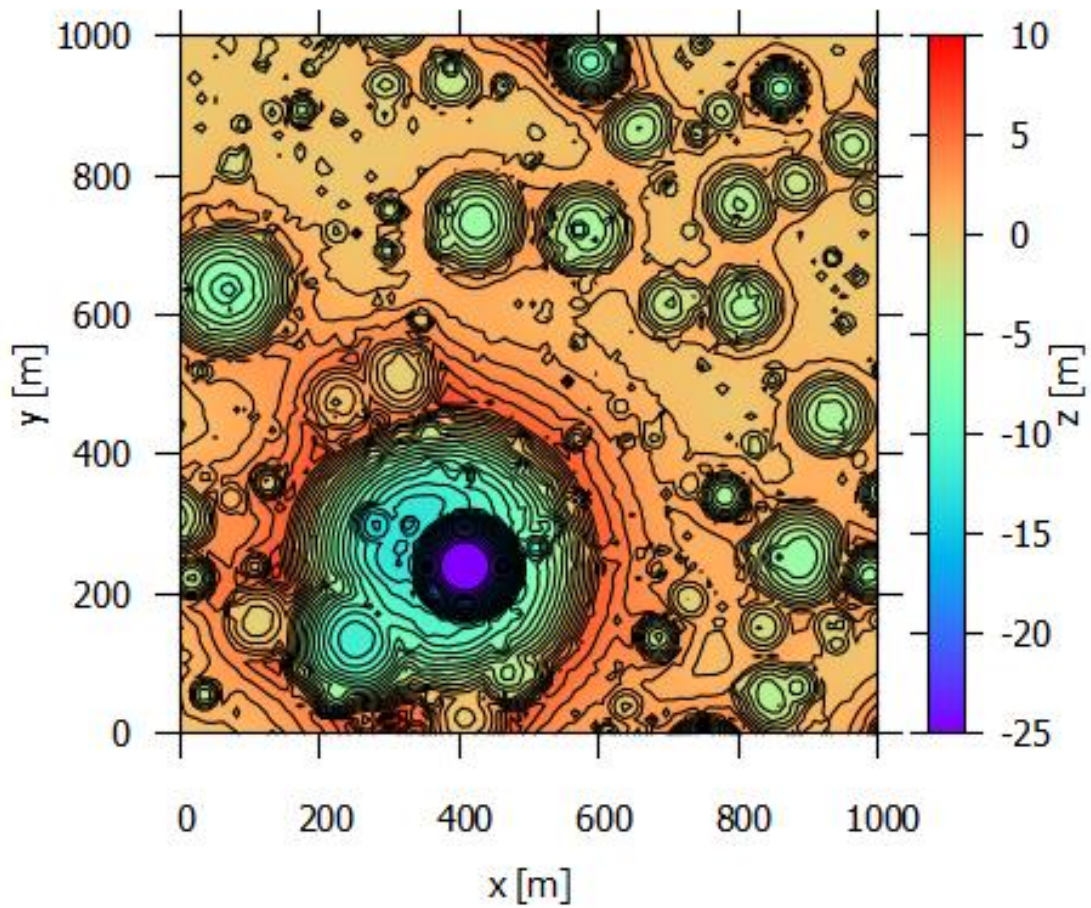


図 3-19. 数値地形モデルの高度マップ
gnuplot で可視化

4. 考察

2 章及び 3 章で、1km 四方の領域のマッピングと、数値計算による地形モデルの構築を行った。本章では、構築した地形モデル（図 3-18）の地形データ（ x, y, z ）を解析し、着陸探査を前提としたラフネスの評価を行う。

本研究では、数 m スケールの着陸脚を持つ探査機を想定している。図 4-1 から見てわかるように、着陸脚を持つ探査機の着陸では、ラフネスが大きい地形に着陸脚が接地すると探査機が傾き転倒する危険性や、探査機本体が接地してしまうことで、想定していた探査を行うにあたり支障が出る可能性がある。

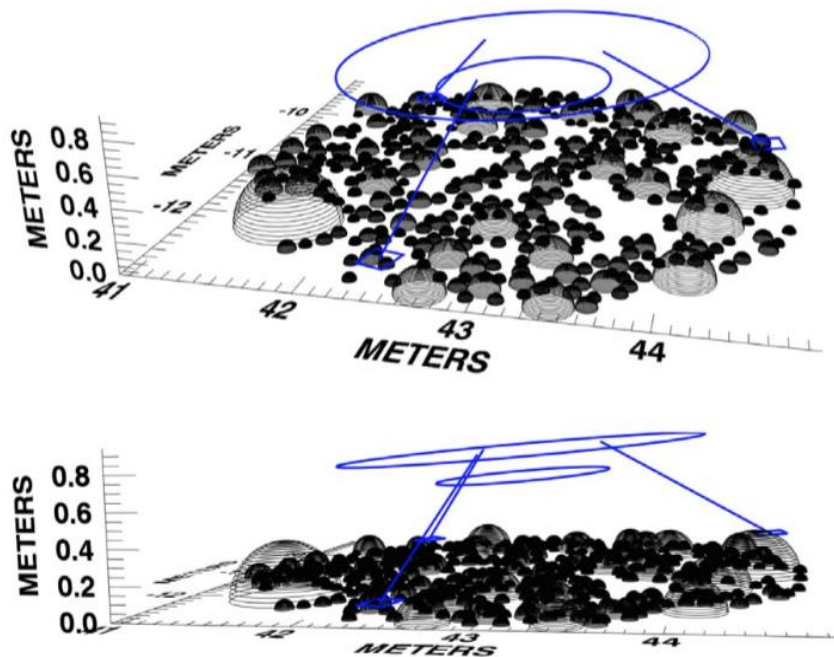


図 4-1. ラフネスが存在する天体表面への探査機の着陸時イメージ
[Rodgers et al., 2016; Fig.8]

図 4-2 に、MMX のスケールを示す。この設計から、MMX における着陸脚の接地点の 2 点間距離は 3-5m 程度であることが予想される。

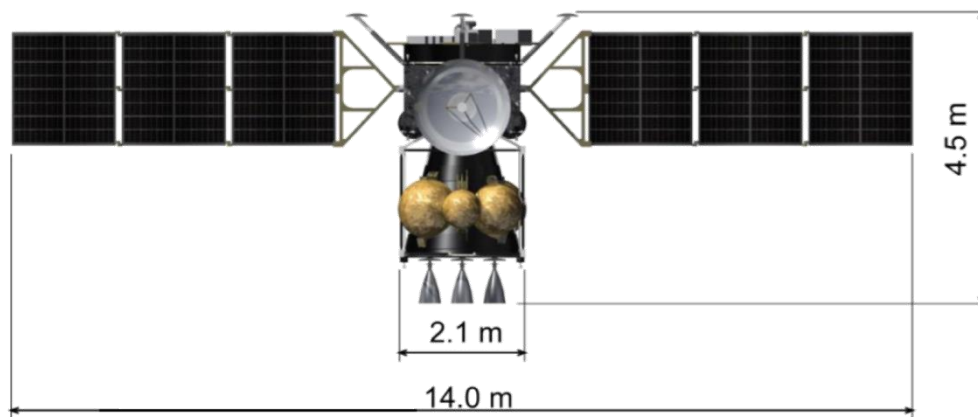


図 4-2. 探査機 MMX のスケール

着陸探査機が目標とする着陸地点に着陸を試みる時、必ずしも正確に目標地点に着陸することができるとは限らない。これまでの着陸探査機でも、目標地点から数十 m-数百 m の誤差が生じてしまう場合があった。特に、小天体探査においては、微小重力のために探査機がバウンドし、全く想定していなかった地域へ降り立ってしまう場合も想定する必要がある。本章ではこうした状況を考慮し、地形モデルのラフネスを解析する。MMX の着陸探査では、工学的要求として、着陸脚の接地しうる範囲で 40cm 以下の起伏であれば安全な着陸が行うことができる可能性が高い、という前提のもと考察を行っていく。

4.1 ラフネスの解析手法

図 4-1 のように、着陸脚が接する地点の高度に違いがあることで、探査機は不安定な姿勢になってしまう。つまり、ある領域内における高度差を解析することで、探査機の着陸時の危険性を推定することが可能である。本研究では、図 4-3 のように、正方形領域における最大の高度から最小の高度の差をラフネスと定義して、地形モデルのすべての領域を含むように正方形領域を移動させ、それぞれの正方形領域における任意のラフネスが存在する確率を統計的に解析していくことを目指した。ここで正方形領域の一辺の長さを L [m] とする。

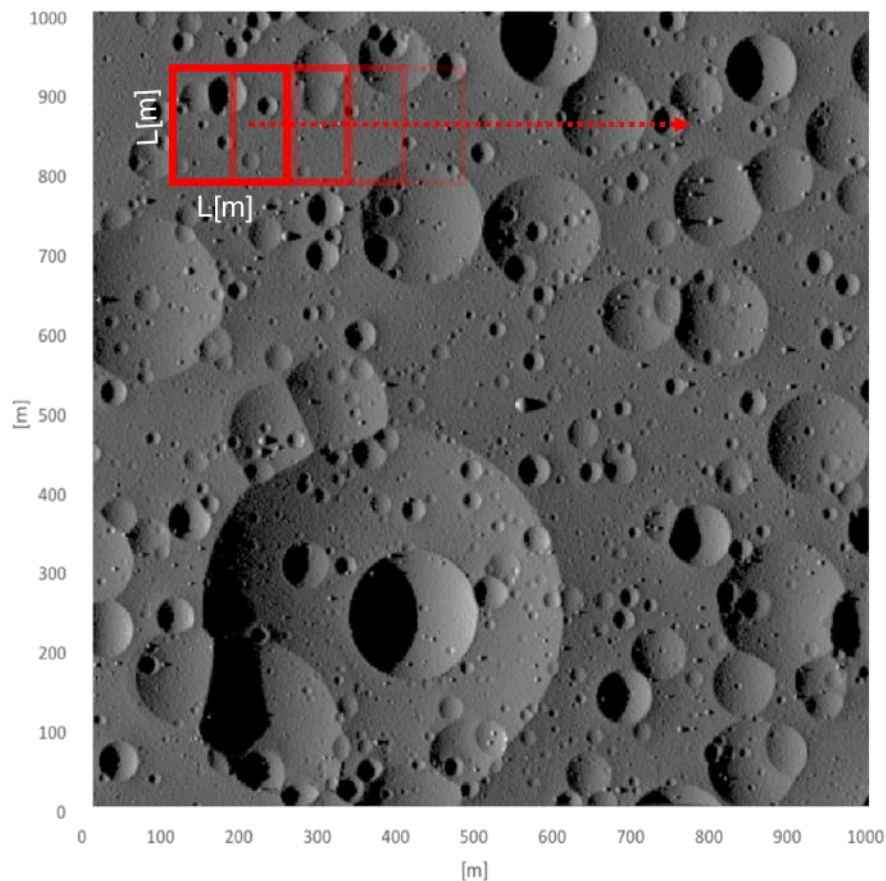


図 4-3. 地形モデルの解析イメージ

4.2 着陸精度を考慮した場合のラフネスの評価

本章では、探査機の着陸精度を考慮し、正方形領域の一辺の長さを、 $L = 4$ [m], 10 [m], 20 [m]と変化させ、それぞれのラフネスの累積確率を求めた（図 4-4）。横軸はラフネス [m]（正方形領域内の最大の高度と最小の高度の差）、縦軸はマッピング領域（図 2-3）内においてそのラフネス以下の領域（ L [m]四方）が存在する累積確率を示す。

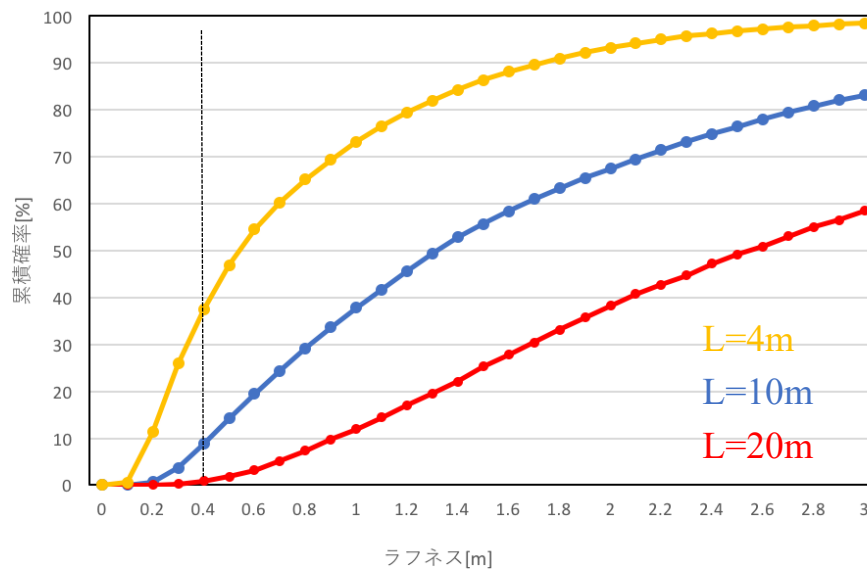


図 4-4. $L = 4$ [m], 10 [m], 20 [m]の正方形領域におけるラフネスの累

結果として、着陸許容範囲内のラフネス（40cm 以下）である確率はそれぞれ、 $L = 4$ [m]で 37%、 $L = 10$ [m] で 8.7%、 $L = 20$ [m] で 0.9%となった（点線）。 $L = 4$ [m] の場合を例に挙げて説明すると、探査機が 4×4 [m²]の正方形領域内に正確に着陸を行うことができる精度を持っているならば、フォボスの天体表面では 37%が着陸候補となりうるという解釈ができる。 L が大きくなるにつれ、累積確率はすべてのラフネス範囲（0~3 [m]）で累積確率が低くなっていることから、探査機の着陸精度が低くなるにつれ、フォボスの天体表面で安全な着陸を行うことができる範囲の選定が困難になることが定量的に示唆された。

また、本研究では 10 cm の間隔で格子点を配置していることから、最低でも 10 cm/pixel よりも良い解像度の画像を取得することができれば、着陸候補地の選定を行うに十分であると解釈することもできる。

4.3 ボルダーとクレーターの有無によるラフネスの変化

4.2 では、クレーターとボルダーが再現された地形モデルのラフネスを、着陸精度の違いを考慮して評価したが、ここでは、クレーターとボルダーがそれぞれ独立してラフネスに与える影響を評価することを目指す。クレーターとボルダーが形成された地形モデル、クレーターのみ形成された地形モデル、ボルダーのみ形成された地形モデルの 3 パターンを構築し、それぞれの条件について、 $L=4$ [m] の正方形領域におけるラフネス（高低差）を求める。

クレーターとボルダーを形成した地形モデルを図 4-5 に示す。ここでは、乱数による誤差を与えないために、クレーター（候補）の d/D を 0.05、クレーター（確実）の d/D を 0.1 に固定して形成した。また、乱数によって人工的に形成したボルダーの x 座標、 y 座標は、3 パターンすべてで同じものを用いた。

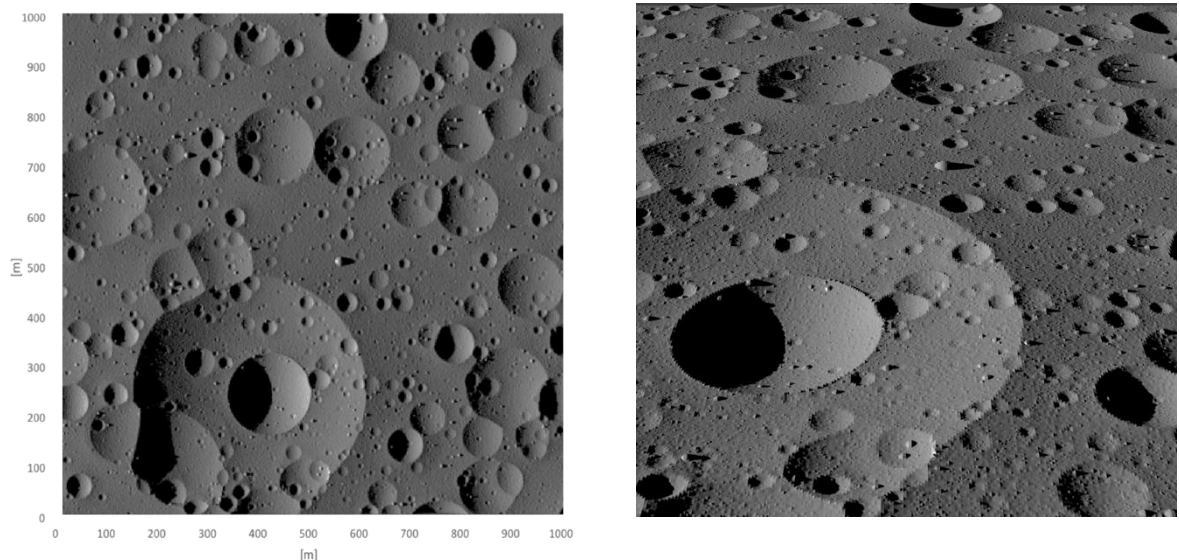


図 4-5. クレーターとボルダーを形成した地形モデル
真上から見た時（左）、横から見た時（右）

クレーターのみ形成した地形モデル、ボルダーのみを形成した地形モデルを
図 4-6、図 4-7 に示す。

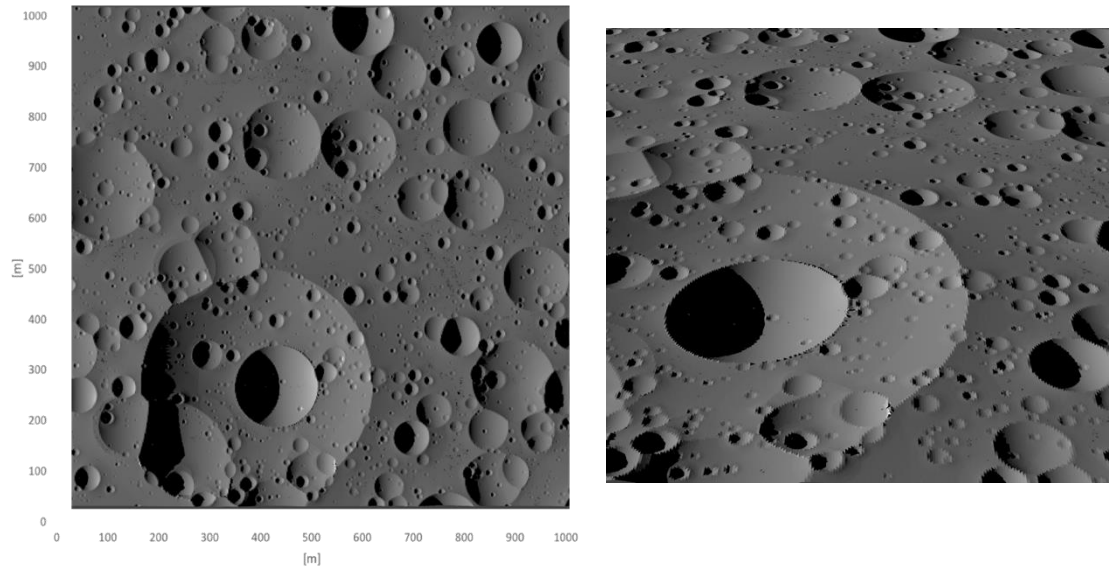


図 4-6. クレーターのみを形成した地形モデル
真上から見た時（左）、横から見た時（右）

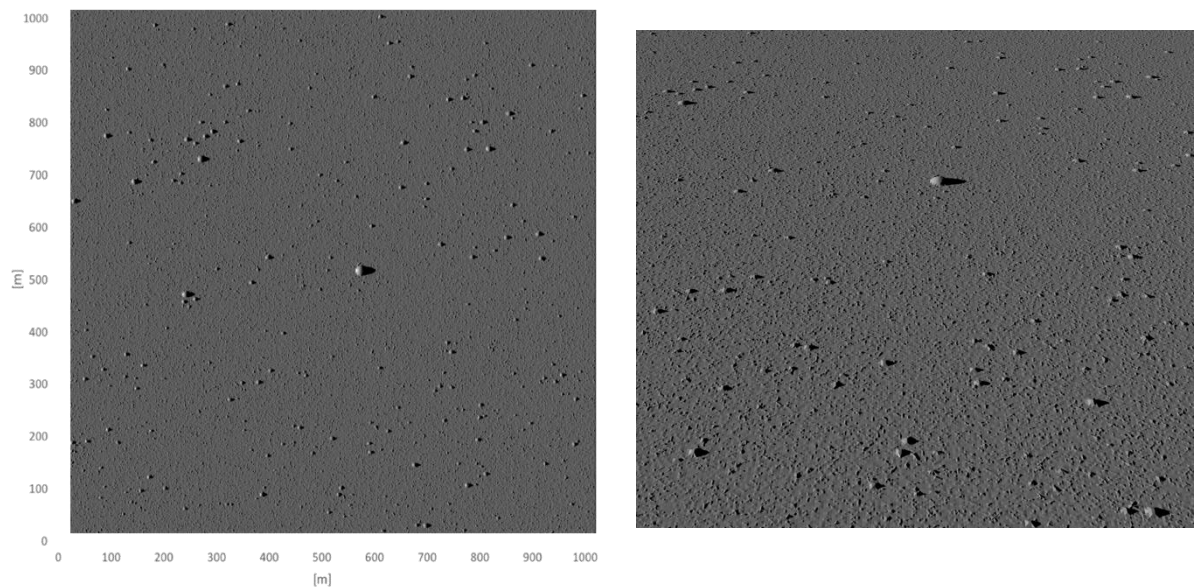


図 4-7. ボルダーのみを形成した地形モデル
真上から見た時（左）、横から見た時（右）

図 4-8 に、3 パターンの地形モデルのラフネスを比較した解析結果を示す。

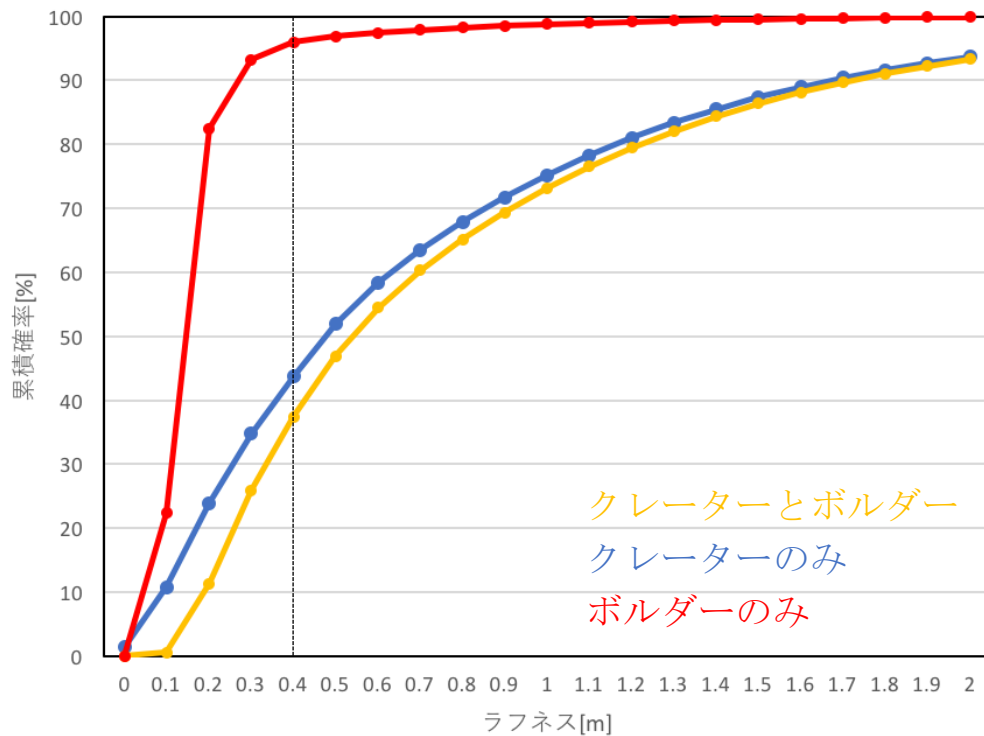


図 4-8. $L = 4$ [m] の正方形領域におけるラフネスの累積確率

黄：クレーターとボルダーを形成した地形モデル

青：クレーターのみ形成した地形モデル

赤：ボルダーのみ形成した地形モデル

結果として、 $L = 4$ [m] でラフネスが 40 cm 以下となる累積確率（点線）は、それぞれ 37%（クレーターとボルダー）、43%（クレーターのみのみ）、95%（ボルダーのみのみ）となった。クレーターとボルダーを形成した地形モデル（黄）は、クレーターのみのみ（青）、ボルダーのみのみ（赤）の地形モデルと比較すると、どのラフネス範囲においても累積確率が下回っている。クレーターとボルダーの両方を形成した地形モデルでは、クレーターによるラフネスと、ボルダーによるラフネスを併せ持っているため、この結果はおおよそ想定されるものである。

グラフ全体の傾向を観察すると、クレーターとボルダーを形成した地形モデルのラフネスは、クレーターのみのラフネスに類似していることが見てとれる。すなわち、フォボスの天体表面において、着陸探査に影響を与えるのは、ボルダーよりもクレーターによるラフネスが支配的であることが示唆される。しかし、これは Basilevsky et al. 2014 で解析された d/D を前提としており、もしマッピング領域における d/D が設定した値よりも小さい場合、必ずしもこう結論づけることはできない。ラフネスとクレーターの d/D の関係性については 4.4 で議論する。

ボルダーのみのラフネス（赤）は、マッピングから推定された 20cm 以上の全てのボルダー（710000 個）を考慮したとしても、安全な着陸地点が非常に広範囲であることが示している。この結果は、フォボス表面でクレーターがほとんど存在しない地域へ着陸する場合、ボルダーの分布が同様の CSFD を持つならば、天体表面の 95% で安全な着陸領域（4m 四方）が存在することが示唆されている。

4.4 クレーターの d/D を変化させた場合のラフネスの変化

3.2.1 では、フォボスのクレーターの d/D が 0.02-0.2 の間に存在することが先行研究から示唆されていることを述べた。しかし、マッピング領域で実際のクレーターの d/D がどの程度の値をとるのかは明らかになっていない。ここではクレーターの d/D がどの程度ラフネスに寄与するのかを把握するため、 d/D が異なる 3 パターンの地形モデルを構築した（図 4-9）。構築したパターンは、① $d/D=0.2$ （確実）, 0.1（候補）② $d/D=0.1$ （確実）, 0.2（候補）③ $d/D=0.05$ （確実）, 0.025（候補）の 3 つである。クレーター（候補）の d/D については、クレーター（確実）よりも小さいという推定から、クレーター（確実）の 1/2 倍に設定した。ここではボルダーを形成せず、クレーターのみ再現した。

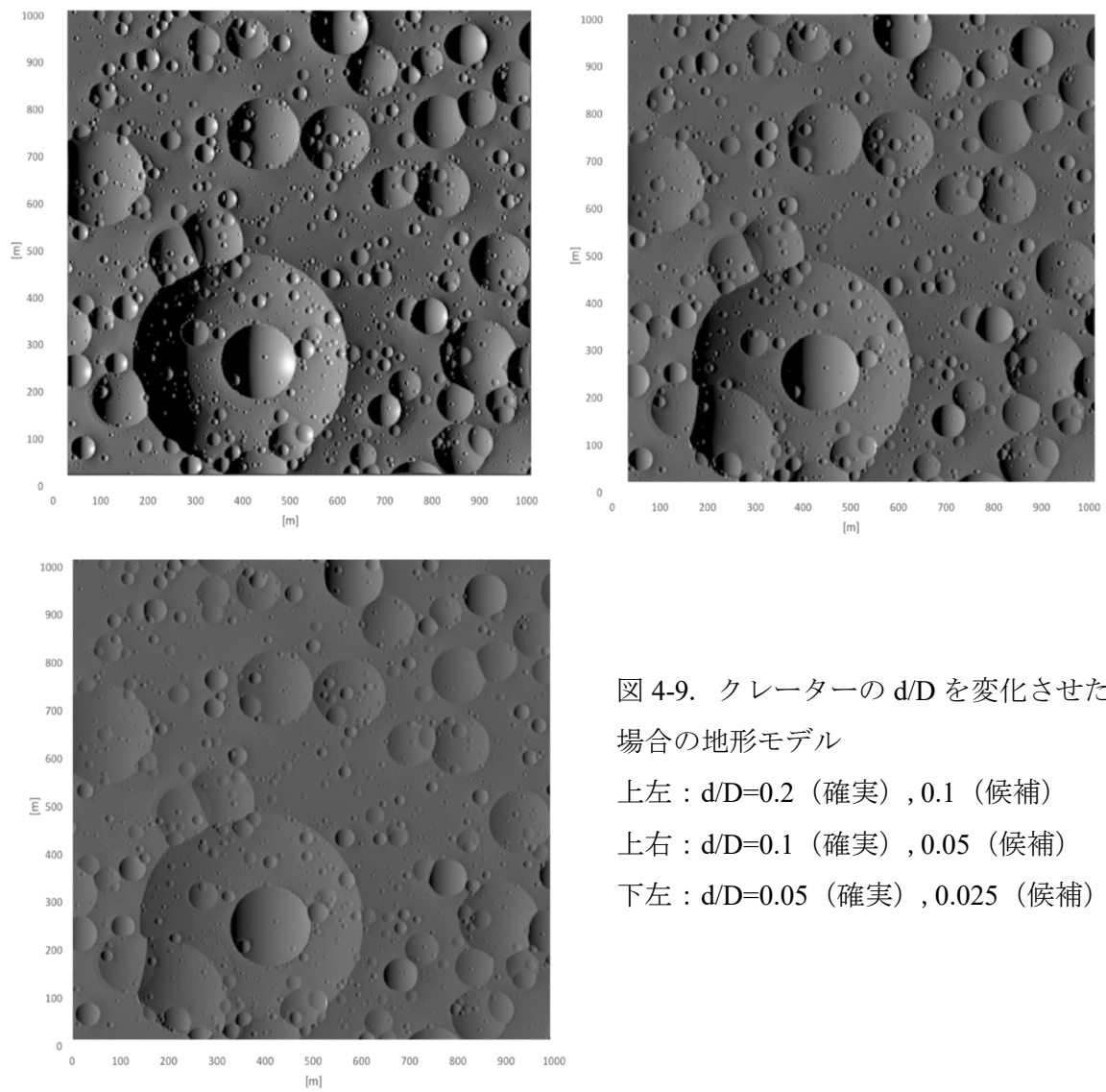


図 4-9. クレーターの d/D を変化させた場合の地形モデル

上左 : $d/D=0.2$ (確実) , 0.1 (候補)

上右 : $d/D=0.1$ (確実) , 0.05 (候補)

下左 : $d/D=0.05$ (確実) , 0.025 (候補)

クレーターの d/D を変化させた 3 パターンのラフネスの累積確率を図 4-10 に示す。

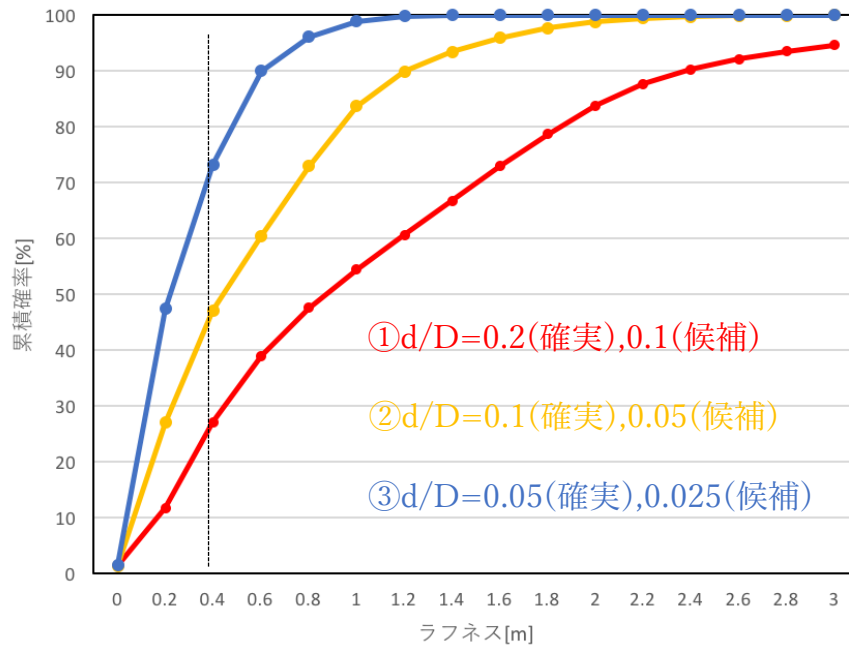


図 4-10. $L=4[m]$ の正方形領域におけるラフネスの累積確率

赤：① $d/D=0.2$ （確実）， 0.1 （候補）

黄：② $d/D=0.1$ （確実）， 0.05 （候補）

青：③ $d/D=0.05$ （確実）， 0.025 （候補）

結果として、 $L=4[m]$ でラフネスが 40cm 以下となる累積確率（点線）は、それぞれ① 27%、② 47%、③ 73%となった。全体的な傾向として、 d/D が大きくなるにつれ、ラフネスが大きくなっている。これは、 d/D が大きいクレーターになるにつれ、クレーターの内壁の傾斜が急になるため、ラフネスが必然的に大きくなったと推察される。この結果から、先行研究[Basilevsky et al., 2014]から想定される d/D の範囲内であっても、その違いによって最大で 46% の誤差が生じてしまうことになる。そのため、着陸に影響するラフネスの評価をするにあたり、 d/D を正確に推定することが非常に重要であると言える。

4.5 サブピクセルスケールのマッピングの妥当性

2 章では、より小さいスケールのクレーターとボルダーをマッピングし正確な CSFD を得るために、サブピクセルスケール (1-3m) のものまでマッピングを行った。しかし、サブピクセルスケールのクレーター (候補) やボルダー (候補) は、画像上のノイズや、異なる地形 (クレーターのリムをボルダーと誤認してしまう等) をマッピングしてしまった可能性がある。そのため、このマッピングから得られた CSFD をそのまま用いて良いのか疑わしい。ここでは、2 章で使用した MOC 画像 (1.5m/pixel) よりも解像度が低い HiRISE 画像 (5.8m/pixel) を用いて同様にマッピングを行い、サブピクセルスケールでのマッピングの妥当性を確かめる。

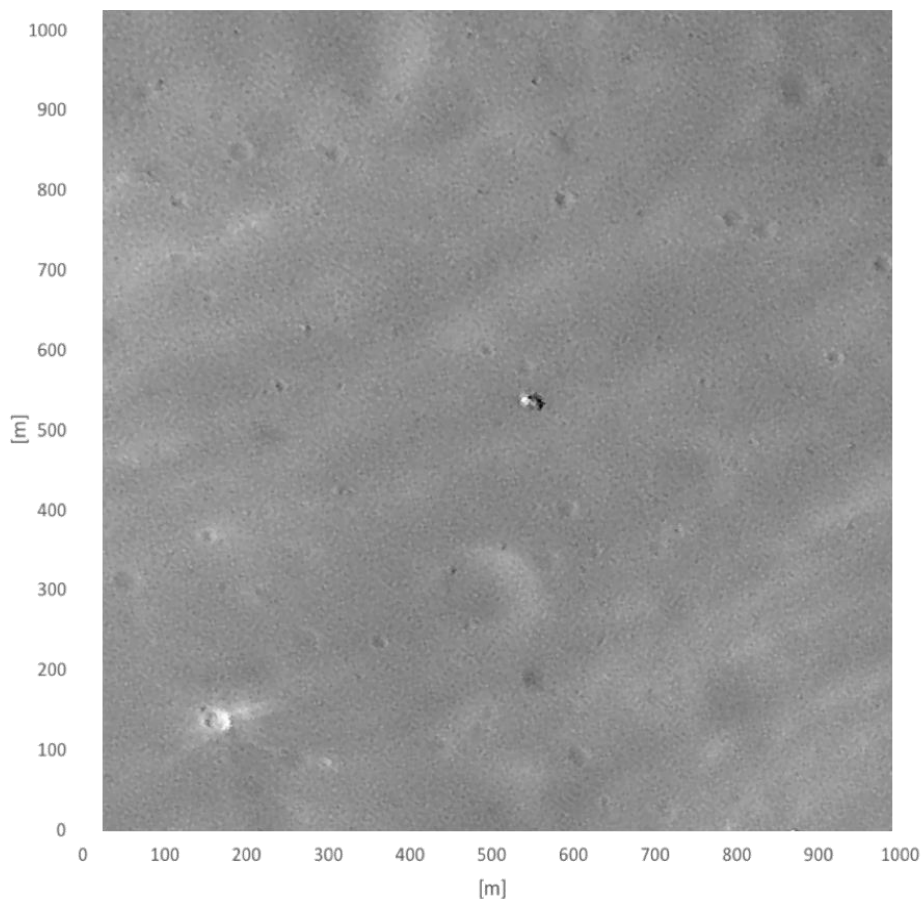


図 4-11. MRO 搭載の HiRISE 画像 (5.8m/pixel)

図 4-11 をマッピングしたものを図 4-12 に示す。結果として、クレーター（確実）を 21 個、クレーター（候補）を 363 個、ボルダー（確実）を 5 個、ボルダー（候補）を 261 個マッピングした。

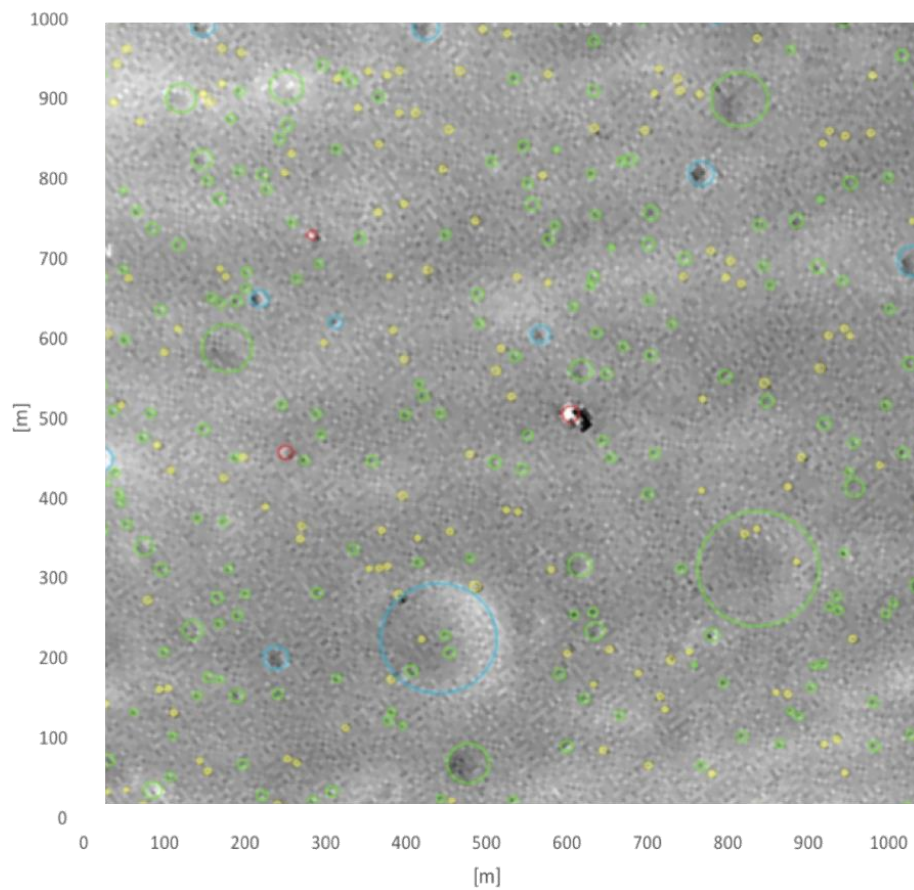


図 4-12. 図 4-11 にマッピングを行ったもの（1km 四方）

青：クレーター（確実）

緑：クレーター（候補）

赤：ボルダー（確実）

黄：ボルダー（候補）

HiRISE 画像と MOC 画像それぞれから得られたボルダーの累積サイズ頻度分布を図 4-13 に示す。この結果から、MOC 画像と HiRISE 画像の CSFD が調和的であることがわかる。HiRISE 画像からマッピングしたボルダーの総数は 266 個、最小のボルダーは 2.8m であった。MOC 画像において 2.8m 以上の全てのボルダーは 360 個、クレーター（確実）は 220 個であったため、MOC 画像で確実にクレーターと認識したものを包括してマッピングが行えていると考えることができる。低解像度の HiRISE 画像におけるサブピクセルスケールのマッピング結果が、高解像度の MOC 画像におけるマッピング結果に調和的であるということは、MOC 画像におけるサブピクセルスケールのマッピングに関しても実際の CSFD に近い値を得ることができると推察される。

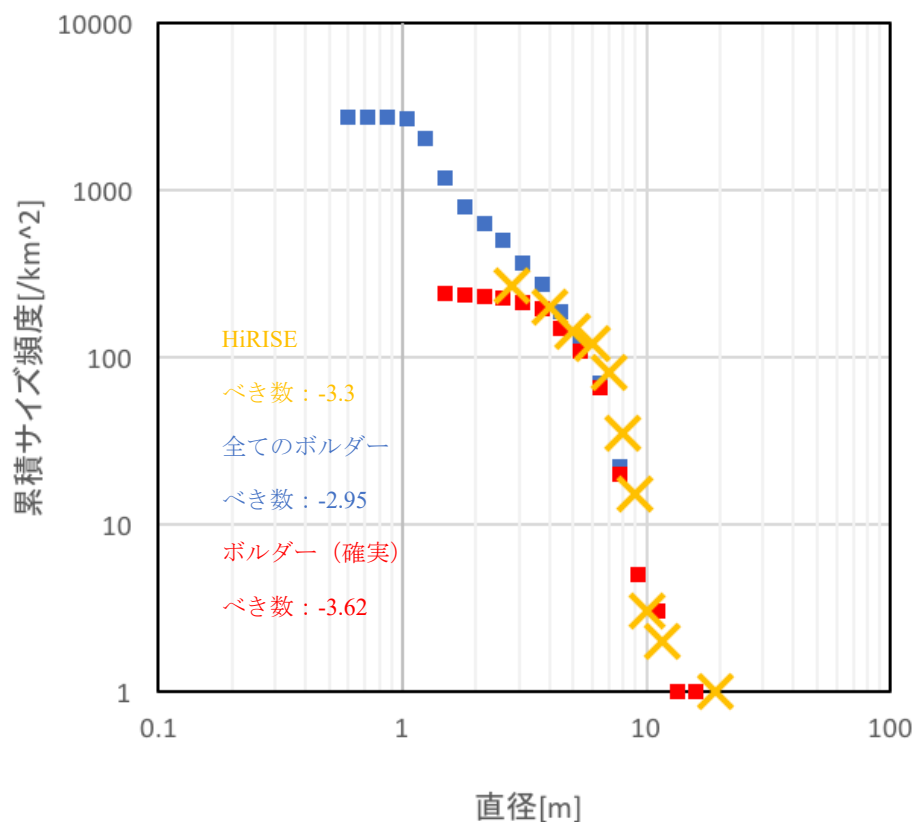


図 4-13. MOC 画像と HiRISE 画像でマッピングしたボルダーの CSFD

5. 展望

本研究では、クレーターとボルダーを数値計算によって再現し、実際の天体表面に類似した地形モデルの再現を試みた。しかし、マッピング領域（図 2-3）と数値計算によって得た地形モデル（図 4-1）を目視で比較すると、特にクレーターの形状が類似していないものが多く見受けられた。これは、クレーターの形状が天体表層での地質現象によって緩和することに起因すると考えられる。具体的には、周囲の天体衝突により掘削された物質の堆積 [e.g., Soderblom, 1970] や、地震動によるがけ崩れ [e.g., Richardson et al., 2005] など、複雑な地質現象の影響によって、クレーターは時間が経過するにつれて浅くなだらかに地形変化する。マッピング領域においても、比較的新鮮なクレーターや、古いクレーターと思われる地形が見受けられた（図 5-1）。しかし、こうした複雑な物理現象を数値計算により再現することは困難である。

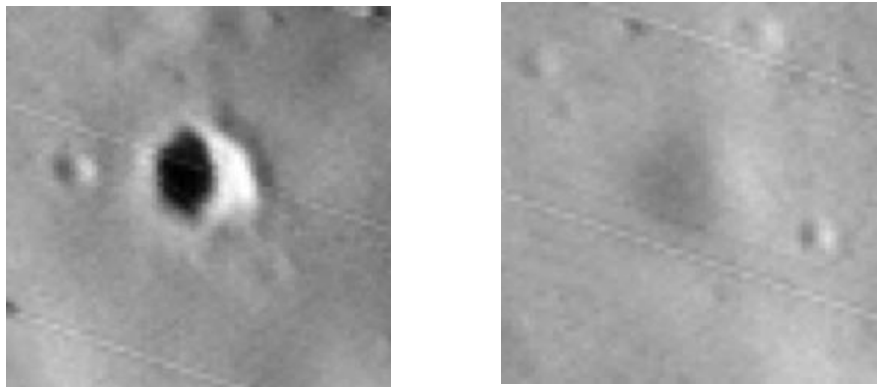


図 5-1. 比較的新しいと思われる明瞭なクレーター（左）

比較的古く緩和していると思われる不明瞭なクレーター（右）

Richardson, (2009) や Fassett and Thomson, (2014) は、以下のような拡散方程式を用いることで、クレーターの緩和に似た地形変化をある程度再現している。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = K_d \left[\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right]$$

ここで、 K_d を拡散定数、 x, y を位置座標、 z を x, y における高度とする。同様に計算を試みたところ、図 5-2, 図 5-3 のような地形モデルが得られた。形成されたクレーターが徐々に緩和していき、次第に消えていく様子がわかる。しか

し、この地形モデルがどの程度実際の地形を表現できているのかが不明であり、天体によってクレーター地形の緩和速度や緩和過程が異なる可能性を考慮すると不確定性が大きいと考え、本研究ではこうした地形変化を考慮していない。今後、天体表面における地形変化プロセスに関する理解が深まることで、クレーターの緩和を高いレベルで再現することができ、より正確な表面ラフネスの推定につながると期待される。また、本研究ではボルダーとクレーターの形状(3.1)に関して多くの仮定を用いている。フォボスの天体表面に存在するクレーターやボルダー、または別の地形に関するさらなる研究の発展によって、マッピング手法や数値計算手法に新しい知見を取り入れることができ、より再現性の高い地形モデルの構築及び表面ラフネスの推定が可能になることが期待される。

本研究で行った地形モデルの構築は、フォボス以外の天体にも応用が可能であり、表面ラフネスの推定という目的以外にも、クレーターとボルダーの特性(クレーターの飽和など[Gault, 1970])を理解するための一つのツールとしても用いることが可能である。

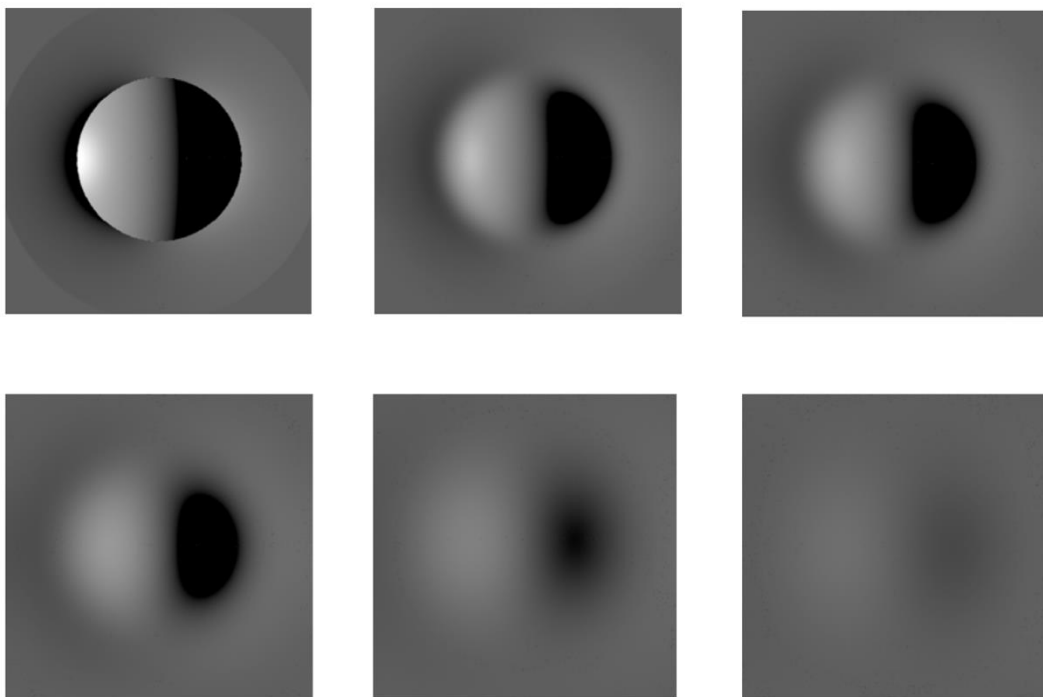


図 5-2. 拡散方程式を用いて再現したクレーターの緩和

左上が形成時のクレーター、徐々にクレーターがぼやけていく様子がわかる

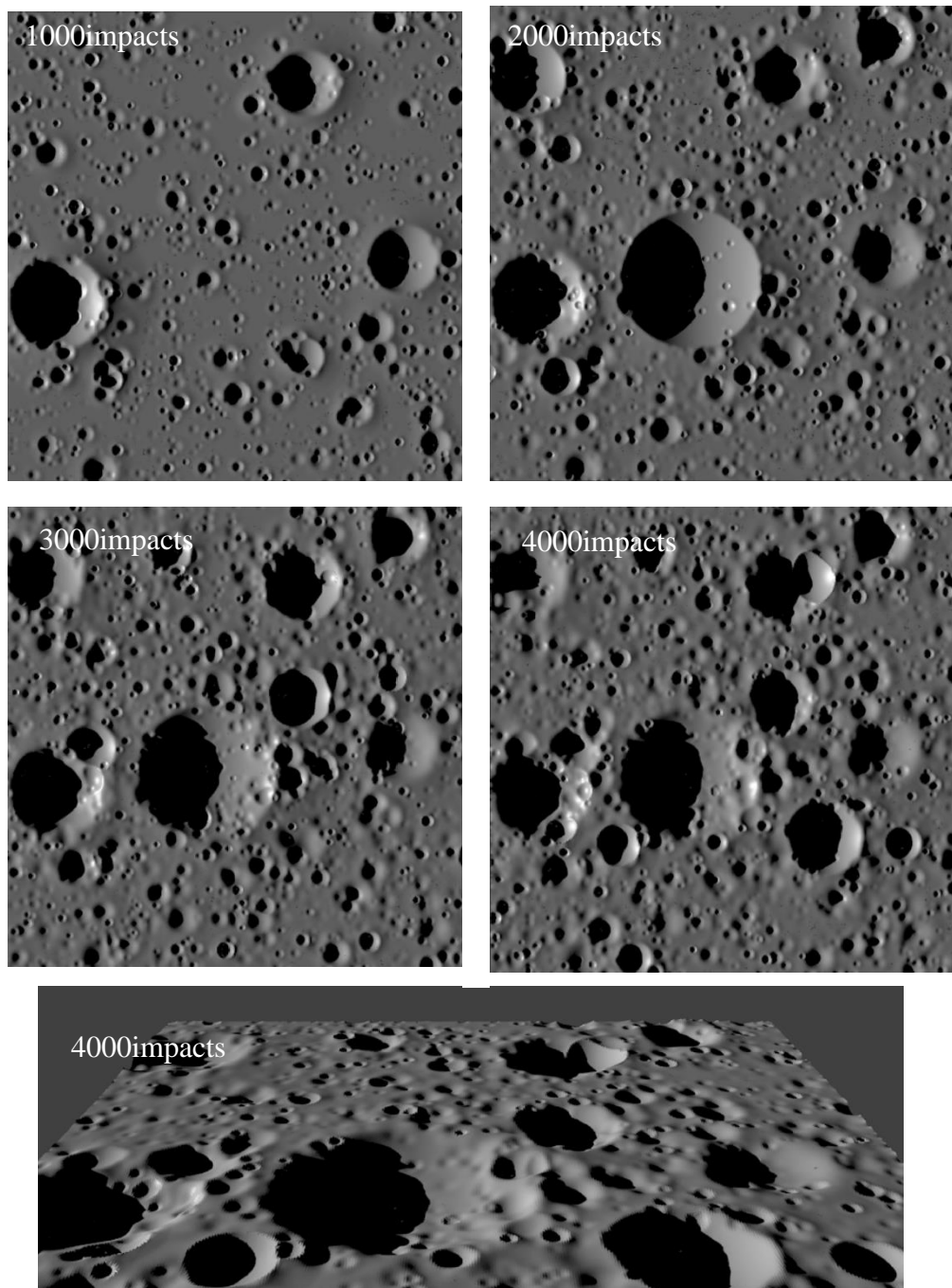


図 5-3. 拡散方程式を用いてクレーターを 4000 回形成した時の地形モデルの変化

6. 結論

本研究では、MMXの運用に向けて、マッピングと数値計算の二つの手法によってフォボスの表面のラフネスを推定した。マッピングでは、MGS搭載のMOCが撮像した高解像度画像（1.5m/pixel）における1km四方のエリアをトリミングし、クレーター及びボルダーを可能な限り詳細にマッピングを行った。その結果、1465個のクレーター、2721個のボルダーの座標と直径のデータを抽出し、累積サイズ頻度分布を得た。累乗近似した結果、べき数はそれぞれ-1.63、-2.95となった。数値計算では、マッピングで得た座標と直径のデータを用い、マッピング領域の表面を模擬した仮想天体表面の数値地形モデルを構築した。さらにその地形モデルに対して、マッピングから得たボルダーの累積サイズ頻度分布を外挿することで、解像度の影響により観測が困難なスケール（1m以下）におけるボルダーを推定し、モンテカルロ法を用いて形成した。得られた地形モデルを解析し表面ラフネスを定量的に求めたところ、ラフネスが工学的要求（高低差40cm以下）を満たす4m四方の正方形領域（着陸脚が接地しうる範囲）が37%程度の割合で存在していることがわかった。しかし、クレーターの深さ d と直径 D の比を想定される範囲内で変化させたところ、最大で46%程度の差があり、表面ラフネスがクレーターの d/D に大きく影響を受けることが示唆された。また、 d/D を0.02から0.2の間でランダムに変化させた場合では、天体表面のラフネスはボルダーによるラフネスよりもクレーターによるラフネスの影響が支配的であるという結果が得られた。これらの結果が、フォボス表面で比較的ボルダーが多く観測できる地域を選定している点、不明瞭なクレーターやボルダーまで考慮している点を考慮すると、実際のフォボスの表面ではさらにラフネスが小さく、着陸可能な領域が多い可能性がある。

今回は正方形領域内の最大の高度と最小の高度の差をラフネスとしたが、検討するラフネスの定義によって安全性の評価が変わり得る。そのため、より適当なラフネスの評価の方法を模索する必要性がある。

本研究ではボルダーとクレーターの形状に関して多くの仮定を用いている点、クレーターの緩和などの現象を考慮していない点など、幾つかの課題があると言える。より多くの要素を考慮した上で、マッピング手法や数値計算手法の改善を行っていくことで、より再現性の高い地形モデルの構築、表面ラフネスの推定が可能になることが期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である宮本英昭教授には、多岐にわたり幅広いご指導を頂きましたことに、深く感謝致します。

また、宮本研究室の新原隆史特任助教、洪鵬特任研究員、逸見良道学術支援専門職員、菊地紘研究員には、様々な場面で丁寧かつ熱心にご助言を頂き、お力添えをして頂いたことに心より感謝致します。

最後に、ここまで支えて頂いた家族、友人、後輩達に感謝の意を表します。

引用文献

- Basilevsky, A.T., Lorenz, C.A., Shingareva, T.V., Head, J.W., Ramsley, K.R., Zubarev, A.E., 2014. The surface geology and geomorphology of Phobos. *Planet. Space Sci.* 102, 95–118.
- Biele, J., Ulamec, S., Maibaum, M., Roll, R., Witte, L., Jurado, E., Muñoz, P., Arnold, W., Auster, H.-U., Casas, C., Faber, C., Fantinati, C., Finke, F., Fischer, H.-H., Geurts, K., Güttler, C., Heinisch, P., Herique, A., Hviid, S., Kargl, G., Knapmeyer, M., Knollenberg, J., Kofman, W., Kömle, N., Kührt, E., Lommatsch, V., Mottola, S., Pardo de Santayana, R., Remetean, E., Scholten, F., Seidensticker, K.J., Sierks, H., Spohn, T., 2015. The landing(s) of Philae and inferences about comet surface mechanical properties, *Science* 349, aaa9816-1-6.
- Chappaz, L., Melosh, H.J., Vaquero, M., Howell, K.C., 2012. Transfer of Impact Ejecta Fragments Material from the Surface of Mars to Phobos and Deimos, *AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting* 12–212, 1–20.
- Craddock R. A., 2011. Are Phobos and Deimos the result of a giant impact? *Icarus* 211, 1150–1161.
- Dombard, A.J., Barnouin, O.S., Prockter, L.M., Thomas, P.C., 2010. Boulders and ponds on the Asteroid 433 Eros. *Icarus* 210, 713–721.
- Fassett, C.I., Thomson, B.J., 2014. Crater degradation of the lunar maria: Topographic diffusion and the rate of erosion on the Moon. *J. Geophys. Res.* 119, 2255–2271.
- Gault, D.E., 1970. Saturation and equilibrium conditions for impact cratering on the lunar surface: Criteria and implications. *Radio Sci.* 5, 273–291.
- Goesmann, F., Rosenbauer, H., Bredehoft, J.H., Cabane, M., Ehrenfreund, P., Gautier, T., Giri, C., Krger, H., Le Roy, L., MacDermott, A.J., McKenna-Lawlor, S., Meierhenrich, U.J., Caro, G.M.M., Raulin, F., Roll, R., Steele, A., Steininger, H., Sternberg, R., Szopa, C., Thiemann, W., Ulamec, S., 2015. Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry. *Science* 349 (6247)
- Hesselbrock, A., & Minton, D. A., 2017. An ongoing satellite–ring cycle of Mars and the origins of Phobos and Deimos. *Nat. Geosci.* 10, 266–269.

- Hyodo, R., Genda, H., Rosenblatt, P., & Charnoz, S., 2017. On the Impact Origin of Phobos and Deimos. I. Thermodynamic and Physical Aspects. *Astrophys. J.*, 845, 125
- Jacobson, R. and Lainey, V., 2014. Martian Satellite Orbits and Ephemerides. *Planet. Space Sci.* 102, 35–44
- Karachevtseva, I.P., Oberst, J., Zubarev, A.E., Nadezhkina, I.E., Kokhanov, A.A., Garov, A.S., Uchaev, D.V., Uchaev, Dm.V., Malinnikov, V.A., Klimkin, N.D., 2014. The Phobos information system. *Planet. Space Sci.* 102, 74–85.
- Kneissl, T., van Gasselt, S., Neukum, G., 2011. Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments - New software tool for ArcGIS. *Planet. Space Sci.* 59, 1243–1254.
- Kokhanov, A.A., Kreslavsky, M.A., Basilevsky, A.T., Karachevtseva, I.P., Zubarev, A.E., 2014. Morphometry of large craters on Phobos and comparison with other bodies. Abstracts of 45th LPSC. In: Proceedings of 45th Lunar and Planetary Science Conference, 1084.
- Miyamoto, H., 2014. Unconsolidated boulders on the surface of Itokawa. *Planet. Space Sci.* 95 94-102
- Murchie, S. L., Thomas, P. C., Rivkin, A. S. & Chabot, N. L., 2015. Phobos and Deimos. *Asteroids IV*, 451–467.
- Murdoch, N., Sa´nchez, P., Schwartz, S.R., Miyamoto, H., 2015. Asteroid surface geophysics. In: Michel, P., DeMeo, F., Bottke, W.F. (Eds.), *Asteroids IV*. Univ. Arizona Press, Tucson, pp. 767–792.
- Nakamura, T., Noguchi, T., Tanaka, M., Zolensky, M.E., Kimura, M., Tsuchiyama, A., Nakato, A., Ogami, T., Ishida, H., Uesugi, M., Yada, T., Shirai, K., Fujimura, A., Okazaki, R., Sandford, S.A., Ishibashi, Y., Abe, M., Okada, T., Ueno, M., Mukai, T., Yoshikawa, M., Kawaguchi, J., 2011. Itokawa dust particles: a direct link between S-type asteroids and ordinary Chondrites. *Science* 333, 1113–1116.
- O’Brien D.P., Greenberg, R., Richardson J.E., 2006 . Craters on asteroids: reconciling diverse impact records with a common impacting population. *Icarus* 183, 79–92.
- Pang K., Pollack J., Veverka J., Lane A., and Ajello J., 1978. The composition of Phobos: Evidence for carbonaceous chondrite surface from spectral analysis. *Science* 199, 64–66.

- Pike, R. J., 1974. Depth/diameter relations of fresh lunar craters: Revision from spacecraft data. *Geophys. Res. Lett.* 1, 291-294.
- Pike, R. J., 1967. Schroeter's rule and the modification of lunar crater impact morphology, *J. Geophys. Res.*, 72, 2099-2106.
- Pollack J. B., Veverka J., Pang K. D., Colburn D. S., Lane A. L., and Ajello J. M., 1978. Multicolor observations of Phobos with the Viking lander cameras — evidence for a carbonaceous chondritic composition. *Science* 199, 66–69.
- Ramsey, K.R., Head III, J.W., 2013. Mars impact ejecta in the regolith of Phobos: bulk concentration and distribution. *Planet. Space Sci.* 87, 115–129.
- Richardson, J.E., 2009. Cratering saturation and equilibrium: A new model looks at an old problem. *Icarus* 204, 697-715.
- Richardson, J.E., Melosh, H.J., Greenberg, R.J., O'Brien, D.P., 2005. The global effects of impact-induced seismic activity on fractured asteroid surface morphology. *Icarus* 179, 325–349.
- Rivkin A. S., Brown R. H., Trilling D. E., Bell J. F. III, and Plassmann J. H., 2002. Near-infrared spectrophotometry of Phobos and Deimos. *Icarus* 156, 64–75.
- Rodgers, D.J., Ernst, C.M., Barnouin, O.S., Murchie, S.L., Chabot, N.L., 2016. Methodology for finding and evaluating safe landing sites on small bodies. *Planet. Space Sci.* 134, 71-81.
- Rosenblatt, P., Charnoz, S., Dunseath, K.M., Terao-Dunseath, M., Trinh, A., Hyodo, R., Genda, H., Toupin, S., 2016. Accretion of Phobos and Deimos in an extended debris disc stirred by transient moons. *Nat. Geosci.* 9, 581–583.
- Soderblom, L.A., 1970. A model for small-impact erosion applied to the lunar surface. *J. Geophys. Res.* 75 (14), 2655–2661.
- Thomas P. C., 1993. Gravity, tides, and topography on small satellites and asteroids — Application to surface features of the martian satellites. *Icarus* 105, 326.
- Thomas, P.C., Veverka, J., Sullivan, R., Simonelli, D.P., Malin, M.C., Caplinger, M., Hartmann, W.K., James, P.B., 2000. Phobos: regolith and ejecta blocks investigated with Mars Orbiter Camera images. *J. Geophys. Res.* 105, 15091–15106.
- Veverka, J., Farquhar, B., Robinson, M., Thomas, P., Murchie, S., Harch, A., Antreasian, P.G., Chesley, S.R., Miller, J.K., Owen, W.M., Jr, Williams, B.G., Yeomans, D., Dunham, D., Heyler, G., Holdridge, M., Nelson, R.L., Whittenburg,

- K.E., Ray, J.C., Carcich, B., Cheng, A., Chapman, C., Bell, J.F., III, Bell, M., Bussey, B., Clark, B., Domingue, D., Gaffey, M.J., Hawkins, E., Izenberg, N., Joseph, J., Kirk, R., Lucey, P., Malin, M., McFadden, L., Merline, W.J., Peterson, C., Prockter, L., Warren, J., Wellnitz, D., 2001. The landing of the NEAR-Shoemaker spacecraft on asteroid 433 Eros. *Nature* 413, 390–393.
- Willner K., Shi X., and Oberst J., 2014. Phobos' shape and topography models. *Planet. Space Sci.* 102, 52–59.
- Yurimoto, H., Abe, K., Abe, M., Ebihara, M., Fujimura, A., Hashiguchi, M., Hashizume, K., Ireland, T.R., Itoh, S., Katayama, J., Kato, C., Kawaguchi, J., Kawasaki, N., Kitajima, F., Kobayashi, S., Meike, T., Mukai, T., Nagao, K., Nakamura, T., Naraoka, H., Noguchi, T., Okazaki, R., Park, C., Sakamoto, N., Seto, Y., Takei, M., Tsuchiyama, A., Uesugi, M., Wakaki, S., Yada, T., Yamamoto, K., Yoshikawa, M., Zolensky, M.E., 2011. Oxygen isotopic compositions of asteroidal materials returned from Itokawa by the Hayabusa mission. *Science* 333, 1116–1119.