

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

新領域創成科学研究科複雑理工学専攻 宮本研究室 47-166096 小島 平

提出：2018 年 3 月 9 日 指導教員：宮本英昭 教授

【背景】

小天体は、原始太陽系の情報を保持していると考えられ、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。近年では、はやぶさによる小惑星イトカワのサンプルリターン、ロゼッタ(フィラエ)によるチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星のその場観測が行われ、それらの成果から着陸探査の重要性が注目され始めている。しかし着陸を行う上で、目標天体表面の傾斜や起伏が探査機の転倒などのトラブルを引き起こし、想定していた探査が行えないなどの危険が伴う[1]。そのため、目標天体表面の正確な表面状態の把握が必要である[2]。

将来的な小天体への着陸探査として、JAXAでは2024年に火星衛星フォボスとダイモスの接近観測及びフォボスのサンプルリターンを行う火星衛星探査計画 MMX(Martian Moon eXploration)が進行中である。この着陸探査を成功させる上で、先に述べたようにフォボス表面の詳細な情報が求められている。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り[図 1]、これらの影響について理解することが重要であるが、現在得られているフォボスの高解像度画像(1.5 m/pixel)を用いた解析においても、探査機の着陸に影響する数 m スケール以下の表面ラフネスを評価するための詳細なサイズ分布が得られていないという現状がある[3,4]。

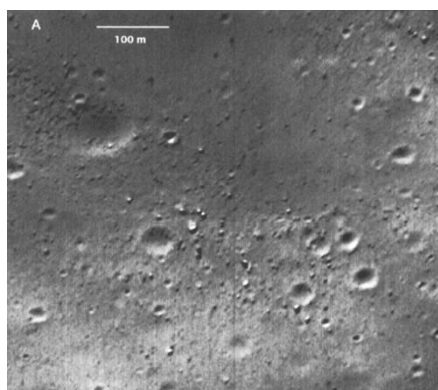


図 1. フォボス表面のクレーターとボルダー[3]

【目的】

本研究では、フォボスの衝突クレーターとボルダーによって形成される表面ラフネスを定量的に評価し、その表面ラフネスによる MMX 着陸探査への影響を推定することを目指した。

【クレーターとボルダーのマッピング】

第一ステップとして、先行研究[3,4]においても解析が行われている Mars Global Surveyor 搭載の Mars Orbiter Camera が撮像したフォボスの高解像度画像(1.5 m/pixel)を用いて、ボルダーが比較的多く見られる 1 km 四方の領域をトリミングし、クレーター及びボルダーを、数 m 以下のスケールまで詳細にマッピングした[図 2]。これにより、これまで行われていなかった数 m スケール以下の詳細な累積サイズ頻度分布(Cumulative Size Frequency Distribution, CSFD)を得た[図 3]。

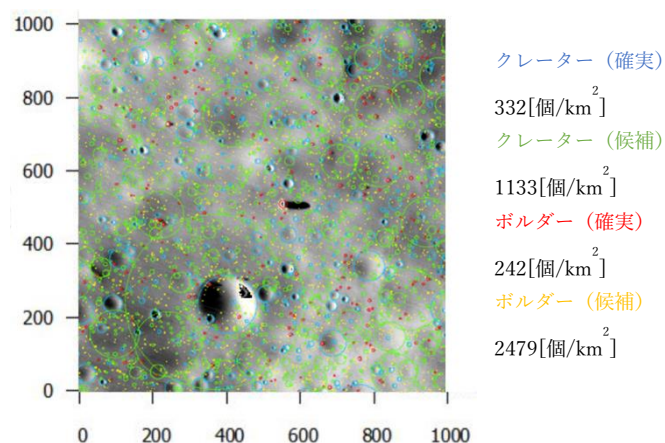


図 2. マッピングしたフォボス表面の 1km² 四方の領域

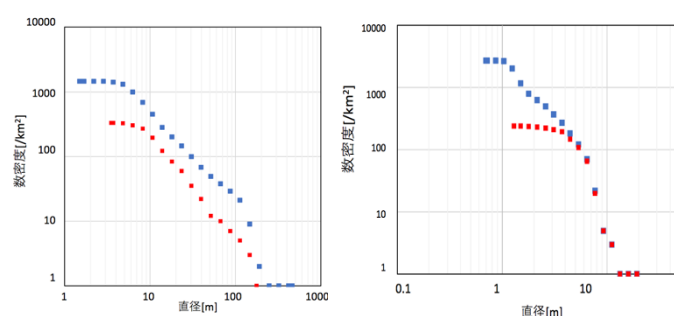


図 3. マッピングしたクレーター(左)とボルダー(右)の累積サイズ頻度分布

【数値計算による地形モデルの構築】

マッピングから得られた位置座標と直径のデータ、CSFD を用いて、クレーターとボルダーを数値計算により再現し、マッピング領域の数値地形モデルを構築した[図 4]。観測が困難なスケール(0.2-1 m)のボルダーは、マッピングから得られた CSFD の累乗近似式 (1) から推定し、それに従ってモンテカルロ法を用いて仮想的なボルダー(~71 万個)を配置した。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(数 m 以下)の再現を狙った。

$$N = 6176 D^{-2.95} \quad (1)$$

D : 直径 [m]

N : 直径 D 以上のボルダーの数密度 [km^2]

【解析、考察】

MMX の機体では、工学的要求として、着陸脚が接地しうる範囲内(~4 m 四方)で、高低差 40 cm 以下であることが求められている。構築した地形モデルを解析した結果、表面ラフネス(高低差)が工学的要求を満たす 4 m 四方の正方形領域が 37 %程度の割合で存在していることがわかった[図 5]。探査機の着陸の精度を考慮し、着陸脚が接地しうる範囲の正方形領域を 10 m 四方、20 m 四方と変化させた時、すべての領域で高低差 40 cm 以下である領域は 8.7 %、

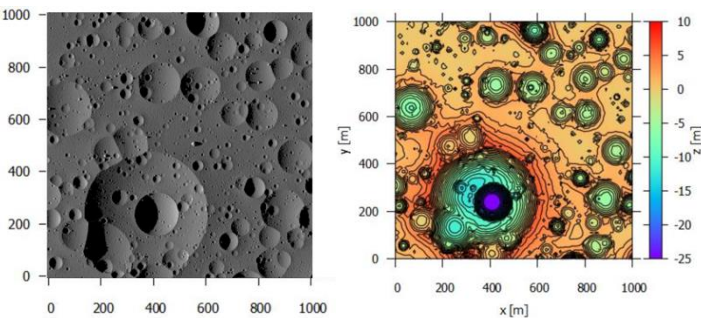


図 4. 構築した数値地形モデルの陰影起伏図(左)と高度マップ(右)

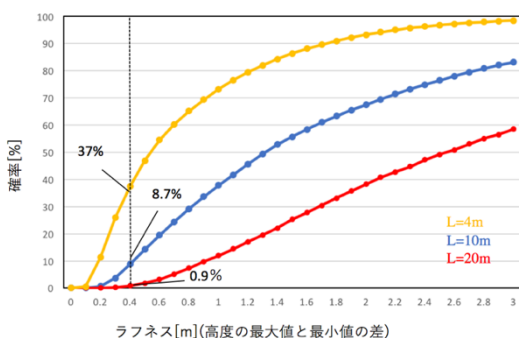


図 5. L [m] 四方の正方形領域に存在するラフネス以下の累積確率

0.9 %と減少した。また、クレーターの深さ d と直径 D の比を、先行研究[5]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、クレーターのみ、ボルダーのみによる地形モデルを構築し表面ラフネスを解析したところ、天体表面のラフネスはボルダー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 %以上の割合で高低差 40 cm 以下の条件を満たす 4 m 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。

【結論、展望】

本研究では、マッピングと数値計算により、フォボスの表面を模擬した地形モデルを構築し、その表面ラフネスを評価した。その結果、着陸が安全に行うことができる領域が十分存在する(37 %)ことが示唆された。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[6])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。しかし、今回の数値計算では多くの仮定を用いており、クレーターの緩和[7,8]などの地質現象を考慮していない。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。

【参考文献】

- [1] Biele et al., 2011. *Science* 349, aaa9816-1-6.
- [2] Rodgers et al., 2016. *Planet. Space Sci.* 134, 71-81.
- [3] Thomas et al., 2001. *Icarus* 105, 326.
- [4] Karachevsteva et al., 2015. *Planet. Space Sci.* 102, 74-85.
- [5] Basilevsky et al., 2014. *Planet. Space Sci.* 102, 95-118.
- [6] Gault, 1970. *Radio Sci.* 5, 273-291.
- [7] Richardson et al., 2009. *Icarus* 179, 325-349.
- [8] Fassett and Thomson, 2014. *J. Geophys. Res.* 119, 2255-2271.

【キーワード】 フォボス 表層環境 クレーター ボルダー 着陸