

火星の衛星 Phobos の
可視・近赤外反射スペクトル

岡山大学 理学部 地球科学科

05429514 高橋 明歩

2020/04/10

要旨

火星の衛星 Phobos の起源を説明する説のひとつに巨大衝突説がある。Phobos の反射スペクトルは巨大衝突説と整合的ではないとされていたが、Phobos が宇宙風化した斜長岩できていると仮定すると巨大衝突説でも説明できるという説が提唱された (Yamamoto et al., 2018)。しかし、宇宙風化は岩石の見た目を変えるため、宇宙風化したものから物質に関する情報を抽出することは難しく、Phobos の表層が宇宙風化した斜長岩であるか否かは明らかにされていない。本研究は、Phobos にある比較的若いクレーターである Stickney とそれ以外を比較することで、Phobos に斜長石の吸収が見られるか否かを調べることを目標にして、Phobos の分光観測を行った。Stickney とその周辺は宇宙風化の影響が小さいと考えられ、それ以外の強く宇宙風化を受けた地域と比べることで、斜長石の吸収を同定することができるかもしれないと考えた。

観測は、火星が大接近した 2018 年 7 月から 8 月にかけて、広島大学のかなた望遠鏡に取り付けた可視近赤外分光カメラ (HONIR) を用いて行った。取得したデータは、バイアス/ダークを引き、フラット割りを行った後、Phobos が写っている位置を特定した。Phobos の光に重なって観測される空の明るさは、Phobos の近傍で空の明るさを評価して引き算した。その後、Phobos の前後に観測した標準星を用いて、Phobos の反射率を求めた。

観測から求めた可視光反射スペクトルは、Stickney が見えているときは見えていないときに比べて右下がり（波長が長くなると反射率が下がる）になった。一般に、宇宙風化が進むほど、反射スペクトルは右上がりになることから、Stickney が見えているときの方が見えていないときに比べて右下がりであることは、Stickney が比較的若いとされることと整合的であると言える。

火星の衛星 Phobos

Phobos は火星の衛星の1つである。ほぼ円軌道で公転しており、可視光の反射スペクトルはD型に似たスペクトルを持つ。反射スペクトルは反射率の波長に対する依存性である。D型は、小惑星の反射スペクトルの分類のひとつで、有機物を含んだものが持つスペクトルだと考えられている。

捕獲説と巨大衝突説

Phobos がどのように形成したのかは、未だ明らかになっていない。Phobos の形成を説明する有力な説に、捕獲説と巨大衝突説がある。捕獲説は、火星の近傍を通過した小天体が火星の重力に捕らえられたとする説で、巨大衝突説は、巨大衝突で火星から飛び出した物質から Phobos が形成されたとする説である。

捕獲説は、D型小惑星を捕獲したと考えることで、Phobos の反射スペクトルを説明することができるが、捕獲された小惑星の軌道が赤道面内円軌道になる可能性は低いことが問題である。

一方、巨大衝突説は、Phobos の軌道を自然に説明することができるが、衝突の際に物質は強く加熱されるため、巨大衝突を経験した物質からは有機物が失われ、D型に似たスペクトルを説明することは難しいとされている。

斜長岩と D 型スペクトル

巨大衝突説は Phobos の反射スペクトルが D 型に似ていることと矛盾するとされていたが、近年、巨大衝突説で Phobos の反射スペクトルを説明する新しい仮説「斜長岩仮説」が提唱された (Yamamoto et al., 2018)。斜長岩仮説は Phobos の表面が斜長岩で構成されているとする仮説である。斜長岩は宇宙風化が進むと、D 型に似た反射スペクトルを示すため、Phobos の表層が斜長岩であるなら、Phobos の反射スペクトルは自然に説明することができる。斜長岩仮説を検証するためには、Phobos の表層に斜長岩が存在するか否かを明らかにすればよい。

反射スペクトルの観測は、遠隔測定によって天体表層に存在する物質を調べる方法のひとつである。しかしながら、宇宙風化が進むと反射スペクトルに含まれる物質に固有の情報は見えにくくなっていく。物質に関する情報を抽出するためには、宇宙風化の影響が小さいものを観測する必要がある。Phobos には比較的最近に深くまで掘り返された Stickney と呼ばれるクレーターが存在する。Stickney とその周辺には宇宙風化の影響をあまり受けていない物質が露出していると考えられ、そこでは宇宙風化される前のスペクトルが見える可能性がある。

本研究は、Stickney クレーターと、それ以外の場所について、反射スペクトルを比較することで、(1) Phobos に斜長岩はあるのか、(2) Phobos の表層はどれくらい宇宙風化の影響を受けているのか、について調べた。

観測

観測地点

観測は東広島天文台で行った（図1）。東広島天文台は広島大学宇宙科学センター附属の天文台である。



図1 東広島天文台 (https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/hho_kanata)

観測機器

観測で使用した東広島天文台かなた望遠鏡は、口径 1.5 m の国内最大級の望遠鏡である（図2）。可視と近赤外の分光観測は、可視近赤外分光カメラ（HONIR）を用いて行った。分光とは、光を波長ごとに分けることである。

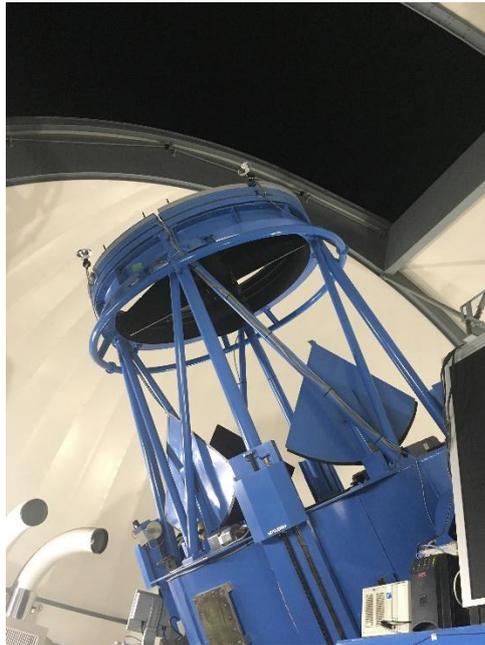


図 2 かなた望遠鏡
2019年6月11日撮影.

観測日

観測は、火星が大接近した2018年7月末から8月にかけて行った。観測してデータが取得された日と、観測した面を表1にまとめる。

Phobosは火星の衛星であるため、常に火星の近傍にある。火星はPhobosに比べると圧倒的に明るいため、Phobosの観測は常に火星の光による妨害を受ける。火星の光の影響を低減するため、Phobosの観測は最大離角を中心に行う。Phobosは自転と公転が同期しているため、Phobosは常に同じ面を火星に向けている。そのため、最大離角に観測を行うと、Phobosの先行半球か後行半球のいずれかが観測されることになる。Stickneyクレーターは先行半球のほぼ中央に位置しているため、先行半球が地球を向いているときに観測するとStickneyを含む面が観測され、後行半球が地球を向いているときに観測するとStickneyを含まない面が観測される。

表 1 観測してデータがとれた日と観測した面

データ取得日	観測した面
7/31	先行半球 (Stickney あり), 後行半球 (Stickney なし)
8/1	先行半球
8/18	先行半球
8/19	先行半球

解析

一次処理

一般的な処理であるダーク引きとフラット割を行った。スリット分光をしているので、データは波長と空間の 2 次元である。

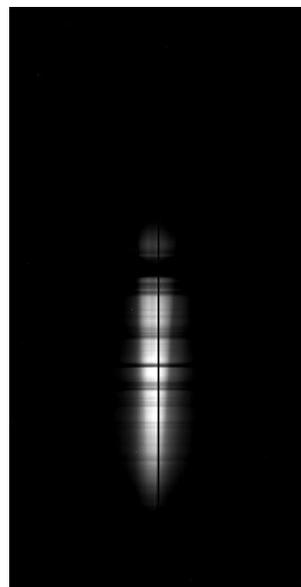


図 3 可視の分光データ (HN0141820).
縦は波長. 横は空間.

Phobos の光の抽出

図3に写っている光のほとんどは、地球大気に散乱された火星の光である。Phobos は火星に比べるとだいぶ暗いため、近傍にある火星の散乱光に埋もれている。そこで、Phobos の位置を特定するために、波長方向に足し算した図を作成した（図4）。

空間方向になだらかに広がっている光は、地球大気で散乱された火星の光である。1020～1036番目のピクセルには、このなだらかに広がる火星の光に加えて別の成分があるように見える。これが Phobos の光である。本研究では、中心から±3ピクセル以内を Phobos の光とした。ただし、これには地球大気に散乱された火星の光が重なっているため、火星の光を除去する必要がある。

火星の光を除去するにあたっては、火星の光は Phobos の近傍で空間方向には線形に変化していると仮定した。Phobos の光の中心から、-8～-5ピクセルと、5～8ピクセル離れた領域を抽出して、それぞれの平均をとり、それらを線形補間して Phobos の光が写っている各ピクセルの位置における火星の光を推定した。

以上によって得られた Phobos のスペクトルを図5に示す。

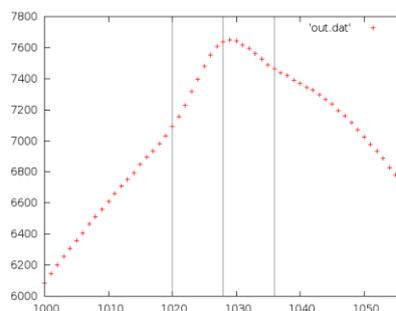


図4 波長方向に足し算した図
縦軸は明るさ。横軸は空間

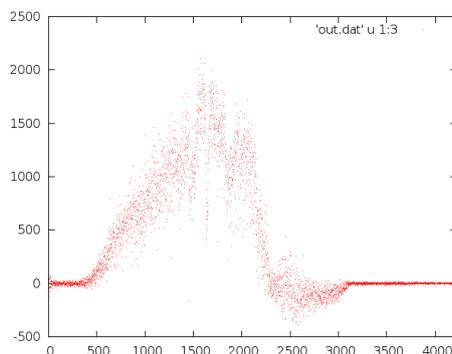


図 5 抽出された Phobos のスペクトル
縦軸は明るさ．横軸は空間．

反射率の計算

反射率 r は、入射する光の輻射束密度を F_{in} 、対象によって反射した光の輻射束密度を F_{out} とすると、

$$r(\lambda) = \frac{F_{out}(\lambda)}{F_{in}(\lambda)}$$

ここで λ は波長である．反射スペクトルの形だけを議論することにして、波長 λ_0 での反射率で規格化した反射率

$$R(\lambda) = \frac{r(\lambda)}{r(\lambda_0)}$$

を、Phobos とその近傍にある標準星の観測から求める．

地上で観測される Phobos の明るさ i_p は、

$$i_p(\lambda, Z_p) = F_{out}(\lambda) \cdot f_p \cdot p \cdot t(\lambda, Z_p)$$

ここで、 f_p は地球と Phobos の距離による明るさの変化、 p は太陽と Phobos と地球のなす角の違いによる変化、 t は地球大気の透過率、 $Z_p = 1/\cos\theta_p$ 、 θ_p は観測時の Phobos の天頂角である．

また、太陽から Phobos に入射する光の輻射束密度は、

$$F_{in}(\lambda) = S_s(\lambda) \cdot f_s$$

S_s は太陽の輻射輝度、 f_s は Phobos と太陽の距離による明るさの変化である．これらを規格化された反射率の式に代入すると、

$$R(\lambda) = \frac{i_P(\lambda, Z_P)/t(\lambda, Z_P) S_s(\lambda_0)}{i_P(\lambda_0, Z_P)/t(\lambda_0, Z_P) S_s(\lambda)}$$

を得る。この式には地球大気の透過率 t が含まれているため、標準星の観測を用いて t を消去する。地上で観測される標準星の明るさ i_* は、

$$i_*(\lambda, Z_*) = S_*(\lambda) \cdot f_* \cdot t(\lambda, Z_*)$$

ここで S_* は標準星の輻射輝度、 f_* は地球と標準星の距離による明るさの変化、 $Z_* = 1/\cos\theta_*$ 、 θ_* は観測時の標準星の天頂角である。

Phobos の十分近傍にある標準星を観測しているなら、 $Z_* \cong Z_P$ であり、 $t(\lambda, Z_*) \cong t(\lambda, Z_P)$ である。

よって、規格化された反射率は、

$$R(\lambda) = \frac{i_P(\lambda, Z_P) i_*(\lambda_0, Z_*) S_*(\lambda) S_s(\lambda_0)}{i_P(\lambda_0, Z_P) i_*(\lambda, Z_*) S_*(\lambda_0) S_s(\lambda)}$$

S_* と S_s はカタログに載っている値を用いるとすると、観測から反射スペクトルを求めることができる。

結果

反射率を求めると、以下の図6のようになった。

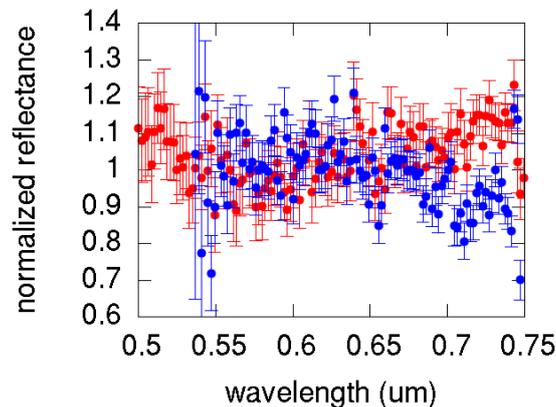


図 6 反射率

横軸は波長 (μm)。縦軸は $0.55 \mu\text{m}$ で規格化した反射率。

青色が 8/19 に観測した Stickney, 赤色が 7/31 に観測したその他の場所

Stickney がある面はない面に比べると、スペクトルが右下がりになっている。一般に宇宙風化が進むとスペクトルは右上がりになることが知られている。本研究の結果は、Stickney が比較的若いクレーターであることを支持するものである。

まとめ

2018年7月から8月にかけて、広島大学のかなた望遠鏡を用いて Phobos の観測を行い、Phobos の反射率を求めた。Stickney のある面はない面に比べてスペクトルが右下がりであるという結果が得られ、これを宇宙風化の違いによって説明するなら、Stickney はそれ以外の場所に比べて宇宙風化の影響が小さいことになる。この結果は、Stickney は比較的若いクレーターであると考えられていることと矛盾しない。

現在までに反射率を求めたのは7/31のStickneyのない面のデータと8/19のデータのみである。残るデータも解析することで、結果の信頼性を評価するとともに、斜長石の吸収の同定を行って斜長岩仮説を検証する予定である。

謝辞

本研究をおこなうにあたり、ご指導いただきました指導教官である はしもと じょーじ 准教授に心より感謝致します。