JGR Planets

Research Article

Phobos Surface Sputtering as Inferred From MAVEN Ion **Observations**

Q. Nénon 🖾, A. R. Poppe, A. Rahmati, C. O. Lee, J. P. McFadden, C. M. Fowler

First published: 11 December 2019 | https://doi.org/10.1029/2019JE006197 | Citations: 2

(https://solarsystem.nasa.gov/planets/mars/overview/)



京都大学 M1 沢口航 2021/3/16 火星勉強会



Abstract Phobos is bombarded by both protons and alpha particles from the solar wind and by Martian atomic and molecular oxygen ions. A numerical model of the distribution of planetary ions has previously proposed that these ions may dominate solar wind ions in sputtering the surface of Phobos when the moon is located downstream of Mars. This conclusion suggests a unique link between planetary atmospheric escape at Mars and the surface processing of its moon yet, remains to be confirmed with in situ ion measurements. In this article, a 4-year-long average of the ion environment that Phobos is exposed to is constructed from in situ ion observations conducted by the Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) mission. In turn, the flux of material sputtered from the surface of Phobos by this environment is computed. We confirm that planetary atomic oxygen ions dominate over solar wind ions in sputtering the surface of Phobos downstream of Mars during 20% of the moon's orbit. We also reveal that molecular oxygen ions sputter the surface of Phobos as much as or more than atomic oxygen ions in the Martian magnetotail. In addition to the long-term average picture, the time variation of Phobos surface sputtered fluxes is investigated during the series of solar wind events that hit the Martian system in March 2015. We find that the flux of material liberated from Phobos' surface increased by a factor of 50 during this period.



Introduction

- フォボス地表面のスパッタリングには火星大気由来の
 イオン(惑星イオン)と太陽風イオンのどちらが支配的か?
 - 惑星イオン優勢ならば、フォボス表面の形成は火星の大気流 出を反映しているはず
- ・先行研究:
 - Cipriani + (2011)は上流太陽風の典型的なパラメータを 用いて太陽風由来のスパッタリングを計算、 微小隕石よりもイオンの方が物質放出に重要
 - → 惑星イオンやSEPイベントによる一時的な 高エネルギーイオンの寄与は未解明
 - Poppe & Curry (2014)(以下、PC14)の数値モデルでは 火星下流域において惑星起源の酸素イオンが太陽風に優越
 →観測を元にした評価は未だなされていない

(<u>https://sservi.nasa.gov/articles/</u> martian-ions-sputter-the-surface-of-phobos/)



フォボスとMAVENの軌道

- MSO座標系
 - 火星中心、x: 太陽方向、 y: 公転速度と反平行、z: 右手系補完
- ・フォボス
 - 公転周期: 7.6時間
 - 火星からの距離: 9,234 9,518 km
 - MSO緯度: ±27°以内
- 2015年1月-2019年2月のMAVEN観測
 - 2015,2016年は活動期、 2017-2019年は静穏期(Lee +, 2017)



・MAVENは期間中に全経度をカバー





MAVENのイオン観測装置

- SEP (Larson +, 2015)

 - 31°×42°×4方向、1,2,8,32秒値(高度、地球との通信状態に依存)
- SWIA (Halekas +, 2015)
 - 25 eV/q 25 keV/q
 - 360°×90°(< 5 keV/q)、4秒值
- STATIC (McFadden +, 2015)
 - 0.1 eV/q 30 keV/q
 - ΔM/M ≈ 25%の分解能でイオンの質量を特定可能
 - 360°×90°(< 5 keV/q)、4秒値、エネルギー32channels、質量64channels

- 20 keV - 6 MeV以上、プロトンのみと仮定(e.g. O+はプロトンに比べ約50 keV多くエネルギーを失う)

(https://mars.nasa.gov/)



長期平均イオン環境

- ・太陽風中ではα粒子がプロトンの約2倍の エネルギー
 - 両者がほぼ同速度であることに整合
- 600 eV/q付近にstragglers由来のノイズ
- ・O+のエネルギー-経度スペクトルはPC14 とトポロジー的に整合
- ・シース領域のO2+は広いエネルギー帯で O+と同程度に存在
 - Curry + (2014)で存在が予言されたが、 O+よりも1桁小さいと見積もられた
 - Inui + (2018, 2019)でコールドプラズマの エネルギーではO+より優位と見積もられた





長期平均イオン環境

- 太陽風中では500 eV以下は
 プロトンが支配的
 - extended hydrogen corona由来 + バウショックで反射された 太陽風プロトン
- ・テールでα粒子、O+、O₂+が4-7 eV に現れている
 - 機体の負電位を考慮していないため、 実際よりエネルギーが高く出ている
 - スパッタリングに関係するのは80 eV 以上のイオンであるため影響はない
- ・テール領域の酸素イオンの分布は
 やや西に偏っている



STATICとSWIAの比較



- ・全体的にはほぼ一致
- ・経度70°、600 eV付近でSTATICのフラックスが小さくなって いるが、これは視線方向が反太陽方向のことが多いため
- ・同じく視線方向が原因で、視野が狭くなる10 keV以上のフラ ックスはSWIAの方が大きい(Rahmati +, 2017)

→観測装置による偏りを 考慮するため、 スパッタリングの計算 には両方の値を入力

- STATICによる力学エネルギースペクトル
- ・6 eV付近のピークは機体の負電位による加速が表れ たもの
- 600 eVではプロトンが支配的

- 太陽風起源であることに整合

 3-30 keVでは α 粒子が支配的で、 ピークのエネルギーがプロトンの約4倍

- プロトンとα粒子が同速度であることに整合

- プロトンとのピークのフラックス比(≒存在比)は2.9%
- ・30 keV以上では惑星由来の<mark>酸素イオン</mark>が支配的





経度平均—STATIC, SWIA and SEP

- STATICとSWIAはほぼ一致
 - 前述の通り10 keV以上では相違
- ・20-100 keVでSEP 1F & 2Fが1R & 2Rより高くなっている
 - Front方向では火星中性コロナからのピックアップイオンが 観測されるため
- SEP Level 2データはプロトンを仮定しているが、
 前頁より20 keV/q以上では酸素イオンの影響が大きいため、
 実際には50 keV程度高くなると考えられる
- ・300 keV以上では視線方向による差異がない
 →SEPイベント由来のフラックス(Lee +, 2017)
- ・瞬間的なSEPイベントを反映した初の長期平均スペクトル (c.f. 月: Poppe +, 2018)



スパッタリング放出原子のフラックス計算

- フォボスは十分小さく、点とみなせると仮定(Cipriani +, 2011)
 - 全球面からのスパッタリングを全方向イオンフラックスで計算できる
 - 局所的なトポロジーやウェイク形成(Farrell +, 2018)は無視
- ・スパッタリング放出原子のフラックスの式(PC14): Suputtered flux $[\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}] = \int_{E} J(E_k) [\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{eV}^{-1}] \cdot Y(E_k)$ [no unit] dE_k [eV]

 $J(E_k)$: 降下イオンの畳み込み $Y(E_k)$: 総スパッタリング生成量(=降下イオン1個あたりの放出中性原子の平均数)

. プロトン、 α 粒子、O+イオンの $Y(E_k)$ の値はPC14と同じものを用いる

- O2+の値は降下時に2つのO+に分かれ、力学エネルギーを等分すると仮定して計算する

・レゴリスの孔隙率を考慮して最終的なフラックスを0.71倍する(Cassidy & Johnson, 2005)

惑星イオン vs. 太陽風 (1)

- 太陽風、シース中ではプロトンと
 α粒子が支配的
 - 経度70°付近のSTATICとSWIAの差異
 - シースではショックで散逸した太陽風に よりフラックス増加
- ・テールでは惑星イオンが支配的
 - 太陽風の約10倍であり、 $Y(E_k)$ の不確定 性による誤差(~2倍)は影響しない

A)

Sputtered flux due to: H⁺ and He⁺⁺ measured by STATIC Solar wind measured by SWIA, using the STATIC He⁺⁺ to H⁺ ratio O⁺ measured by STATIC O⁺ measured by STATIC



Poppe & Curry (2014)との比較

- ・太陽風中でもテールでも概ね整合
- テールについてはPC14でParkar Spira
 方向のIMFを仮定した時の値が近く、B
 方向を仮定するよりも長期平均放出フラ
 ックスをよく表現する
 - 酸素コロナ由来のO+プルームは あまり影響しない?(沢口の私見)
- モデルでは降下O₂+のフラックスがO+の
 0.1倍程度とされていたが、実際にはO⁻
 同程度以上の影響を持つ

al Sz ラ		本研究	PC14
	太陽風中での 太陽風による スパッタリング [cm ⁻² s ⁻¹]	4-7 × 10 ⁶	4 × 10 ⁶
	テールでの O+による スパッタリング [cm ⁻² s ⁻¹]	2 × 10 ⁶ (peak)	~4 × 10 ⁶ (for Parker Spiral IMF)



惑星イオン vs. 太陽風 (2)

- ・ (O+ + O₂+)/(H+ + He²⁺)比をプロット
- ・惑星イオンが支配的となるのはMSO 経度135°から210°
 =フォボス軌道の約20%
- →火星大気からのイオン流出の影響は 無視できない



プラズマ領域ごとの比較

- ・太陽風、シース、テールのそれぞれについて経度平均、
 E=0からの積分値(累積分布)を全体の積分値で正規化
- ・太陽風による粒子放出は狭いエネルギー帯に集中

- 太陽風中のプロトンでは全体の90%が350-1,500 eVに
- シースではエネルギー帯が広がり、 テールでは低エネルギー側にシフト
- ・火星由来の酸素イオンではエネルギー帯が広い
 - 全体の90%が80 eV-10 keVの0+による
- stragglerノイズのO+, O₂+に対する影響は25%未満
- Stragglerは太陽風とシースで卓越(テールでは無視)、 エネルギーは1 keV未満
- SEPを用いた20 keV以上のイオンの寄与は最大でも1% 未満





時間変化一太陽風イベントの影響

- ・2015年2月25日-3月13日にかけて3-4回火星を襲ったICMEs (惑星間コロナ質量放出)イベント(Jakosky, Grebowsky, Luhmann, & Brain, 2015; Lee +, 2017) のケーススタディ
- ・この間のフォボス軌道とスパッタリング放出フラックスの発展についての 解析は本研究が初
 - 火星イオンの応答については先行研究で報告・議論されている (Jakosky, Grebowsky, Luhmann, & Brain, 2015; Jakosky +, 2015; Curry +, 2015; Dong +, 2015)
- 期間中、MAVENのMSO経度は269°(2月20日)から230°(3月13日) →シース





Summary & Discussion

- ・MAVENのイオン観測によりフォボスが晒される長期平均イオン環境が明らかになった
 - 1-数10 keVのピックアップO+はローカルタイムに拘らず存在
 - PC14数値モデルの予想に反し、テールではO+と同程度の量のO2+が存在
- 理解に役立つと期待される

c.f. 月レゴリス: Poppe + (2018)

- Noguchi + (2014)
- ・フォボス地表面からスパッタリングにより放出される原子フラックスを見積もった
 - 太陽風、シース中では太陽風プロトン・α粒子の寄与が支配的
 - PC14で提唱された通り、火星下流(MSO経度135°-210°)ではO+が支配的
 - 加えて、O₂+もO+と同程度以上に寄与

本研究の長期平均イオン環境はMMXミッションで解明される予定のフォボスのレゴリスの性質の

c.f. 小惑星イトカワ: Harries & Langenhorst (2014), Keller & Berger (2014), Matsumoto + (2015),

Summary & Discussion

- フォボスの地表スパッタリングは火星大気流出と関連することを確認 - 数値モデルでは不可能な、長期平均と短期変動(大気流出やIMF)の同時検討
- - 4年間の観測データは太陽周期変動も含む
 - 太陽系形成初期には大気流出率が7倍ほど高く(Ramstad +, 2018)、火星磁気圏も大きか ったために、惑星イオンのスパッタリングへの寄与が現在より大きかった?
- ・ICMEsイベント中には最大50倍にフラックス増加
 - フォボスの中性トーラスの密度も増加する?
 - Poppe + (2016)の中性トーラス数値モデルから発展して、2015年3月のイベント時の密 度変化をモデル化(future work)
 - 太陽風イベント時であれば中性トーラスの存在を観測的に確かめられる?