

Medusae Fossae Formation (MFF) および MFF 周辺地域での slope streak 形成における水の役割について

三平舜^{1,2}, Trishit Ruj³, 白井寛裕²

¹東京大学理学系研究科, ²JAXA 宇宙科学研究所, ³岡山大学惑星物質研究所

1. Introduction

Slope streak とは火星中低緯度の斜面に分布する, 暗いアルベドを示す細い筋状の地形である (Kreslavsky and Head, 2009). Slope streak は比較的若い地形であり, 数年から数十年以内に形成されたと考えられている. その存在と進化は火星で現在進行中の地質学的プロセス, さらには大気プロセスについて重要な知見を与えることが見込まれる.

火星斜面の上部から下部に向かって伸びる slope streak の形態的な特徴は, slope streak が重力による物質移動によって形成されたことを示唆しているが, その形成過程については複数の仮説が議論されており, 未だ明らかでない. Sullivan et al. (2001) では全球的な slope streak の分布, 形態的特徴を初めて集約し, slope streak が低熱慣性地域にのみ分布する傾向があることから, 急傾斜におけるダスト堆積物の斜面降下による形成仮説を提案した. このようなダストの降下に伴う形成過程仮説は DRY メカニズムと呼ばれている. 一方で, 近年 slope streak の形成における水やその他の揮発性物質の役割についても議論がされている. Schorghofer et al. (2002) は 23,000 枚以上の火星表層の画像を解析し, slope streak が最高温度 275K 以上の地域に分布する傾向があることを示した. これにより, 火星地表における水の相転移が質量運動を引き起こす可能性が提案された. このような液体の水が関与する形成過程仮説を WET メカニズムと呼ぶ. さらに, Bhardwaj et al. (2017) は slope streak の全球分布が中性子分光計によって観測された水等価水素 (WEH) 量が高い領域と広く一致することを報告し, WET メカニズムを支持している.

しかし, 中性子分光計の空間解像度が 300 km/pix であることから, 個々の slope streak に対応した水素量の観測は行われておらず, slope streak 形成過程における物理的な水の役割は解明されていない. そこで本研究では, 水素マップ 1 ピクセルあたりの slope streak の密度を計測することで, slope streak 形成における水素量の影響を調査した. 調査地域として, 火星赤道上に位置する Medusae Fossae Formation (MFF) とその周辺領域を選んだ. この地域は slope streak が最も多く分布する地域の一つであり (Bhardwaj et al., 2017), さらに, 中性子分光計のデータは, この調査領域が火星赤道域において水素存在量が最も高い領域と最も低い領域の両方を含むことを示している (Wilson et al., 2018) .

2. Method

本研究の画像データは主に Context camera (CTX) (Malin et al., 2007)のデータを用いた。CTX は 6m/pix の空間解像度を持ち、火星全球をカバーしている。本研究では 135°E ~ -170°E, 10°N ~ -15°N の地域の CTX データを ArcGIS 上に投影し利用した。次に、水素量が 9 Wt.%以上の領域から 30 カ所, 4-9 Wt.%の領域から 30 カ所, 4 Wt.%以下の領域 30 カ所を調査領域として抽出した。調査領域において斜面を下方に向かう暗い筋状の地形を確認し、陰やノイズではないと判断できたものを slope streak として ArcGIS 上にプロットした。本研究では各調査エリアの slope streak の数を各調査エリアの斜面の長さで規格化した値 (slope streak 密度) を用いて水素マップ 1pix 辺りの slope streak 密度と水素量の関係を比較した。

水素マップの作成には ExoMars Trace gas orbiter(TGO)に搭載された中性子分光計 Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FREND)を用いた。本研究では FREND のデータベースから 135°E ~ -170°E, 10°N ~ -15°E のデータを抽出し、ArcGIS 上に投影した。

さらに、調査領域内の全てのクレータ壁の熱慣性値を計測し、slope streak 分布との対応を調査した。熱慣性値は Thermal Emission Imaging System (THEMIS)のデータを用いた。

3. Results

3.1 熱慣性と slope streak の関係

調査地域において熱慣性値は $27\sim 388 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ と幅広い値を示したが、全体的な傾向としては $100 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ と $150 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ 付近にピークがみられ、全クレータの 81% は $60\sim 200 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ の範囲内の値を示した。

また、熱慣性 160 以下の値を示したクレータでは約 9 割のクレータ内に slope streak の分布が確認された。一方で熱慣性が 160 以上の値を示したクレータでは slope streak の存在率が著しく減少し、約 5 割のクレータにしか slope streak が分布していなかった(Fig 1)。この結果、slope streak が低熱慣性地域に分布する傾向があるという先行研究の報告(Sullivan et al., 2001)と一致する結果である。

3.2 水素量と slope streak の関係

調査地域において観測された WEH 量は最も高い領域で 12.88 Wt.%、最も低い領域は 2.16 Wt.%であった。WEH 量が高い領域では、slope streak 密度は 0.0046 /m 以下と比較的低い値を示した。一方で WEH 量の低い領域では slope streak の密度は 0~0.016 /m と幅広い値を示した(Fig 2)。両者の間に明確な相関関係は見られず、この結果は、高水素領域と slope streak の分布が一致するという先行研究から予測される結果とは一致しない結果であった。

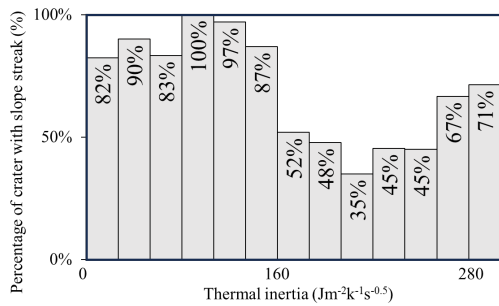


Fig 1. 熱慣性と slope streak の関係

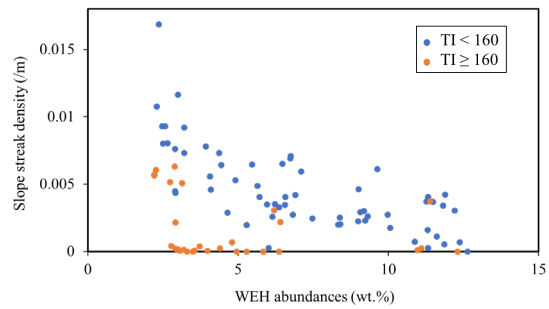


Fig 2. WEH 量と slope streak の関係

4. Discussion

4.1 Slope streak は斜面上の物質の挙動を粒子間固着力が支配する地域に形成する

Slope streak が熱慣性の低い地域に分布することはこれまでも様々な研究で明らかにされてきた. Sullivan et al. (2001) では slope streak と低熱慣性地域の分布一致から, ダストの降下による slope streak の形成過程 (DRY メカニズム) を提唱し, 現在までその可能性が議論されている. 本研究でも先行研究と同じ傾向が得られたが, さらに, 熱慣性 $160 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ 以下の地域では約 9 割のクレータに slope streak が存在する一方で熱慣性が $160 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ を超えると slope streak の存在率が著しく減少することが明らかとなった. この結果から, 熱慣性の値が $160 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ を閾値として, それ以下の地域では熱慣性の値による slope streak 形成への影響がみられないことが分かる.

一般に火星地表の熱慣性値は地表物質の大きさを反映していると考えられる. Presley and Christensen (1997) のモデルによると, 火星気圧が一様に 0.6 気圧であると仮定した場合, 本研究で得られた熱慣性 $160 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ という閾値はレゴリスの粒径が $40 \mu\text{m}$ であることを示す. つまり, slope streak は粒径 $40 \mu\text{m}$ 以下の地域に密集して分布し, それ以上の地域では急激に形成しにくくなる傾向があることを示している.

また, 傾斜面に堆積する物質は安息角と呼ばれる一定の傾斜角度を保つことが知られている. 安息角は粒径が小さくなるほど大きくなり, 特に粒径 $50 \mu\text{m}$ よりも小さくなると斜面上の物質の粒子間固着力が卓越することで急激に安息角が上昇することが示されている (Lumay et al., 2012). このことは slope streak は斜面上の物質の挙動が粒子間固着力によって支配されている環境でのみ形成される可能性を示唆している. 斜面上の物質の挙動が slope streak の形成に関与するとする本研究の結果は DRY メカニズムを支持している.

4.2 Slope streak 形成における寄与率は水素量よりも熱慣性の方が大きい

熱慣性 $160 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ 以上の地域では slope streak が形成しにくいことが示されたため, WEH 量と slope streak 密度を比較する際, 熱慣性の影響を取り除く必要がある. Slope streak 密度は WEH 量の少ない地域では $0 \sim 0.016 /\text{m}$ と幅広い値を示し, 両者の間に明確な相関関係は見られなかったが, 熱慣性 $160 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ 以下の地域のみを比較

した場合、WEH 量と slope streak 密度の間には明確な負の相関関係が見られた(Fig 2). これは、高 WEH 地域に slope streak が分布するとした先行研究と相反する結果である.

先行研究では全球的な slope streak の密集地域が高い WEH 量の地域をカバーしていることを示したが、slope streak の密集地域は低熱慣性地域とも一致しているため、高 WEH 領域と slope streak 分布の因果関係を示すことはできていない. 本研究において、WEH 量に関わらず高熱慣性地域では slope streak が分布しなかったことから、slope streak の形成は WEH 量よりも熱慣性に因果関係を持つ可能性が高い. ただし、slope streak 密度と WEH 量の間には負の相関関係が見られたことから、slope streak の形成に水の関与があることは否定できない.

4.3 Slope streak 形成における水の役割

熱慣性と slope streak の関係から、slope streak は斜面の物質の挙動を粒子間固着力が支配する地域に形成することが示唆された. 粒子間固着力は水分量に応じて上昇することが知られている. WEH 量の高い地域は粒子間固着力がより強く働き、粒子の移動性を低下させる. ただし、火星低緯度域の地表面に水分が安定して存在することは難しく、地表の温度変化に応じて水分は相転移を繰り返すことが予想される.

4.4 Slope streak 形成過程仮説

低 WEH 地域は高 WEH 地域と比較して、一定の水分が相転移した際の水分量の変化の割合が高くなり、粒子間固着力が大きく変動することが見込まれる. 斜面の水分が失われると、粒子間降着力の変化に応じて安息角が減少するため、水分を含んでいた状態での安息角で安定していた物質が崩れ、水分を含まない状態での安息角になるまで斜面を降下する.

本研究によって示された、熱慣性が $160 \text{ Jm}^{-2}\text{k}^{-1}\text{s}^{-0.5}$ よりも小さい地域において、WEH 量の高い地域ほど slope streak 密度が小さくなるとする結果は、slope streak は粒子間固着力が斜面の物質の挙動を支配する領域において、水分の相転移に伴う粒子間固着力の減少が slope streak 形成のトリガーとなる可能性を提案する.

5. Conclusion

Slope streak は、水に関連した現象としてしばしば議論されてきた. 火星の低緯度地域では水が不安定であるため、もし slope streak の形成に水が関与するならば、火星の水圏に関する我々の理解は大きく変わることになる. 本研究の結果は slope streak の形成過程を制約するものではないが、slope streak の密度と WEH の存在量の間には負の相関関係は、slope streak の形成過程を議論するうえでの重要な証拠となる.