

## 論文の内容の要旨

論文題目 Morphological diversity of Martian landslide and implications for the evolution of Martian environment  
火星地すべり地形の多様性の研究、～火星環境変動への意義～

氏名 佐藤 広幸

火星のマリネリス溪谷内部に多数存在する地すべり地形について、その形成メカニズムと形成当時の環境条件を地形解析および数値実験の2つのアプローチによって検証した。その結果、地形解析・数値実験両方が一致して、火星地すべりが乾燥した粉体流で形成されたことを示唆した。同時に地すべり形成当時、マリネリス溪谷内が乾燥状態にあったことが示された。

まず地形解析では、堆積物表面の模様注目した。火星地すべりは表面に崩壊物の流動方向に沿った直線的でかつ規則的な縦筋が卓越しており、地球地すべりとは形状において決定的に異なっている[1]。地球でこのようなパターンを示す例はほとんど見つかっておらず、形成プロセスについてこれまでほとんど議論が行われていない状況にある。しかしこの縦筋模様は、崩壊物の流れの物理を強く反映したものであり、崩壊物質の物性や地すべり発生当時の周辺環境を示唆する重要な鍵となりうる。そこで本研究では火星地すべりに特有の縦筋について、地形観測からその構造や発生条件を明らかにし、どのような物質が、どのような流れの物理で形成されたのかを初めに検証した。

縦筋は火星地すべりに特有の形状であるが、マリネリス溪谷内の全ての地すべりに縦筋があるわけではない。縦筋があるものの他に、筋がなく表面がブロック状の起伏に富んでいるものが存在する。これらを **Lineated** タイプ(図 1 左)・**Blocky** タイプ(図 1 右)として分類し、分布や形状を比較することで発生条件を検証した。

地理的な分布では特に明確な違いは見られないため、地域的な地質構造の違いや火山活動の影響ではないと考えられる。体積とみかけの摩擦係数  $H_{max}$ (最大落差)/ $L_{max}$ (最大移動距離)の関係では、**Lineated** タイプは比較的体積が小さく、地球の乾燥した斜面崩壊と同様な負の相関が見られた(図 2 左)。一方 **Blocky** タイプは体積が大きい領域に集中し、摩擦係数との明確な傾向は見られなかった。堆積物のアスペクト比を、横軸に面積の平方根、縦軸に平均厚さをとって、比較してみると(図 2 右)、**Lineated** タイプはほぼ線形の分布を示し、最終形状が常に相似形を保っている事が分かった。一方 **Blocky** タイプは相似形状を保たず、面積一定で厚さだけ増えるという傾向が見て取れる。これらの結果から、**Lineated** タイプは流れが十分に発達し、崩壊物が一様に流れた

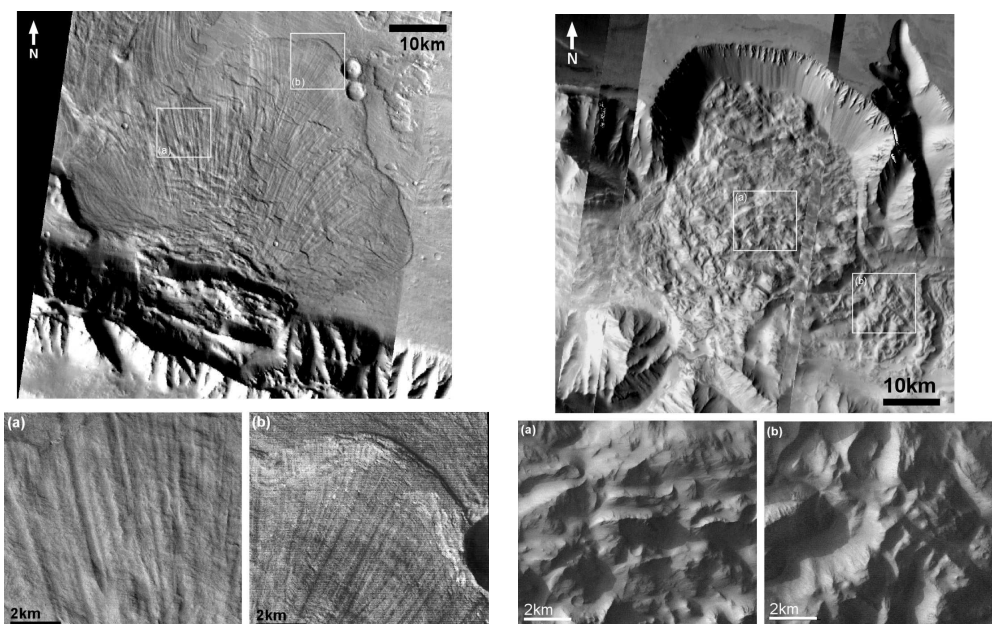


図 1. マリネリス溪谷内の地滑り地形の例. Linedated タイプ(左)と Blocky タイプ(右).

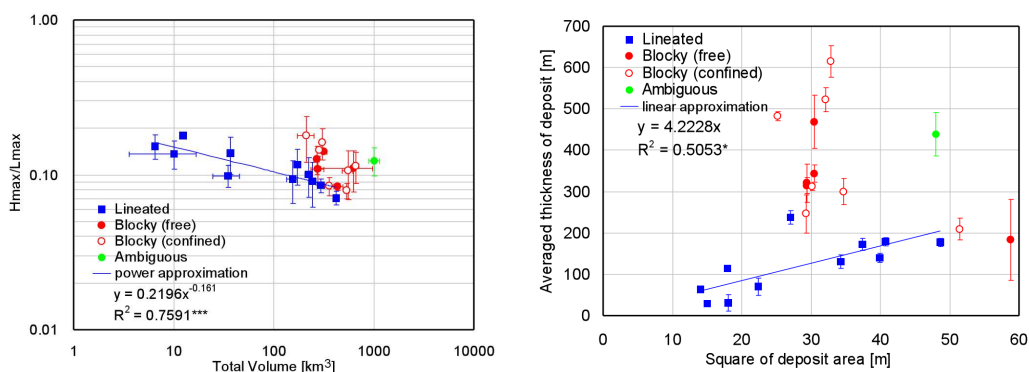


図 2. 地滑り堆積物の体積と見かけの摩擦係数(Hmax/Lmax) (左), および面積の平方根と平均厚さ (右)の関係

のに対し, Blocky タイプは流れが未発達で, 崩壊物の破碎があまり進まず不均一な状態で停止した, という印象を受ける. つまり縦筋は, 流れが十分に発達した地滑りに形成されると考えられる.

縦筋の組織や構造を詳細に観察すると, 筋は崩壊部から放射状に伸び, 直線性および連続性が非常に良いことがわかる. また筋は深く狭い溝と幅の広い凸部の連続から出来ており, 堆積物末端で扇状に張り出した構造にそれぞれ繋がっている(図 3 左). つまり筋は規則的なセル構造によって形成されている. 一つ一つのセル構造について幅( $\lambda$ )と厚さ( $h$ )を計測すると,  $\lambda = 2.24h$  という明確な相関関係があることがわかった(図 3 右). つまりセルは断面構造が常に自己相似性を保っており, 流れの中で自発的にセル構造を形成するプロセスが働いたことを示唆している.

地球では縦筋を持つ地滑りの存在が非常に稀なため, 地形学的研究はほとんど行われておらず, その形成プロセスもわかっていない. よって本研究では, 室内実験でよく知られている縦筋形成プロセスの中から, 前述した観測事実に最も適合するプロセスを検証した.

ゲルトラー渦, サフマン・テラー不安定, レイリー・テイラー不安定, 粉体流などの中で, 最もふさわしいのは粉体流における, 縦渦[2]と, 先端部の不安定[3]によってできる縦筋であると考えられる. 粉体が加速状態である程度の距離を流れ粒子が十分な粉体温度を持つと, 粉体流表層には

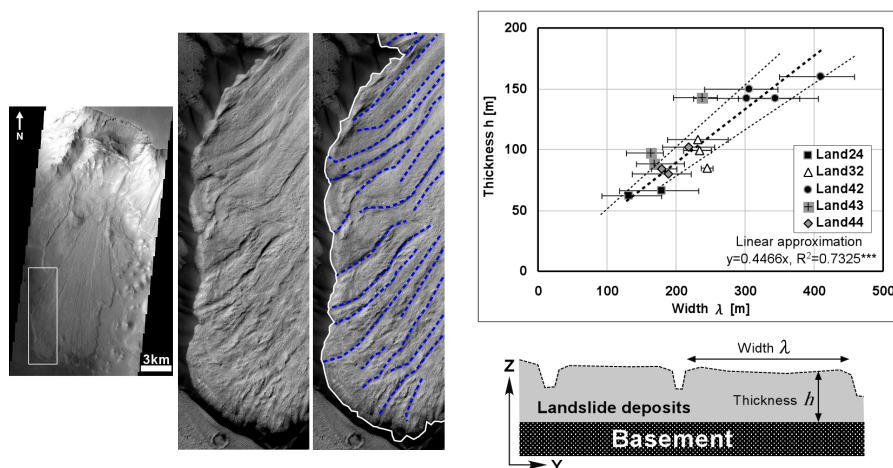


図 3. 地滑り堆積物末端の拡大図(左), および断面形状の計測結果(右)

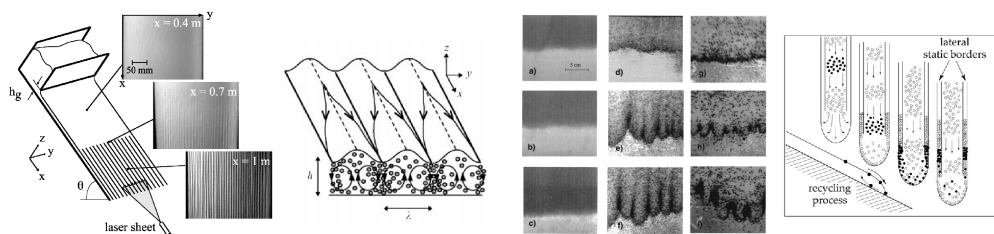


図 4. Forterre and Pouliquen (2001)[2]の縦渦(左), および Pouliquen et al. (1997)[3]の先端部の指状分岐(右)の実験.

非常に直線性がよく、高さ( $h$ )と幅( $\lambda$ )の関係が、 $\lambda=2\sim 4h$  という強い相似性を持つ筋が形成されることが知られている[2](図 4 左). 一方減速状態では、粒子サイズ分離によって先端部分が指状に割れ、扇状に張り出した形状を作る(図 4 右). 重要なのは、この縦縞構造が液体を含む粉体では形成されないという点である。つまり火星の縦縞を持つ地滑りは乾燥した粉体流で形成され、形成当時周囲が乾燥状態にあったことが示唆される。

しかし一方で、乾燥流では観測されている火星地滑りの高い流動性を説明できないという問題点が以前から指摘されている。この問題を解決する唯一の鍵が、体積の効果である。崩壊物の体積の増加と共に、流動性の指標となる摩擦係数が減少することが地球の乾燥した斜面崩壊から経験的に知られている(図 5)が、未だにその原因は明らかになっていない。また、地球の乾燥した斜面崩壊のトレンドに比べ、火星地滑りは系統的に大きい摩擦係数を示す側にシフトしている[4](図 5). 最も大きな原因として重力の違いが上げられるが、単純な摩擦構成則では重力項は相殺されるため、乾燥流における重力の影響はこれまできちんと検証されてこなかった。

そこで本研究では 2 つ目のアプローチとして、崩壊物の流動性に対する体積および重力の影響と、その原因を明らかにするために、個別要素法を用いた粉体流の数値実験を行った。実験は Campbell et al.(1995)[5]らが行った実験条件を参考に、2 次元斜面において同じ形状を相対的に維持しながら粒子量や重力を変化させ、全体の崩壊および流れの様子を観察した。結果として、見かけの摩擦係数および重心の移動で算出した真の摩擦係数は、粒子数や重力が増えるに従い減少する傾向が確認された。流れが進行中の歪速度の分布をみると(図 6), 粒子が多くなるに従い歪速度の大きい領域が流動層底部に集中し、上層の粒子は運動エネルギーの散逸を抑えなが

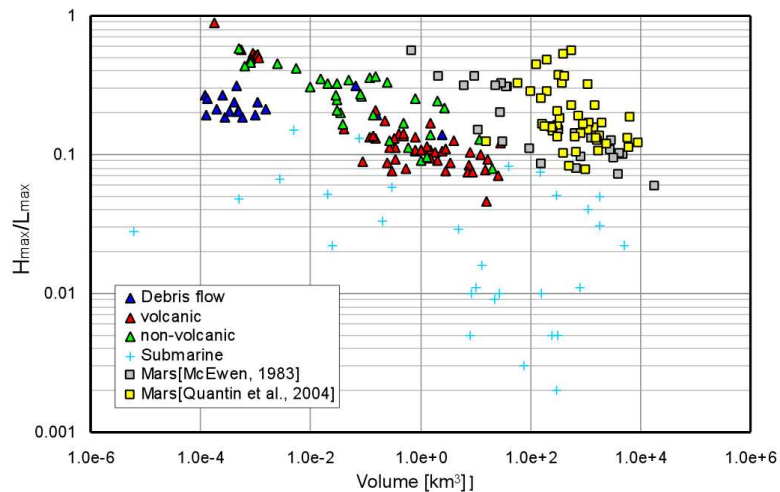


図 5. 火星および地球の様々な種類の斜面崩壊における、見掛けの摩擦係数と体積の関係

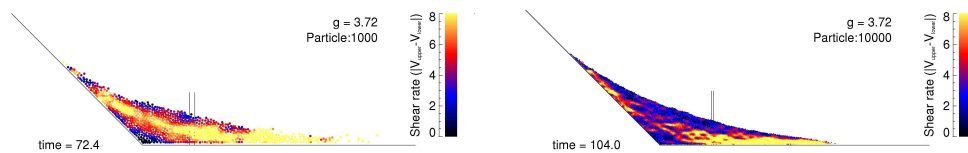


図 6. 流動中の粉体の歪速度. 粒子 1000 個(左)と 10000 個(右)の場合.

ら滑動する状態に遷移している。重力が大きい場合にも同じ効果が確認された。つまり体積や重力の増加に伴い粒子層内部の歪状態が遷移するために、摩擦係数の減少が引き起こされていることがわかった。この結果は、崩壊物の体積の増加とともに摩擦係数が減少し、かつ火星地滑りが系統的に大きな摩擦係数を示す図 5 の傾向とよく一致する。

これまで火星地滑りの研究では、wet か dry かという2択の議論が続いていた。しかし本研究ではその特徴的な表面形態に着目し、分類することによって Lineated タイプについては少なくとも dry だった、という新しい見解を示した。同時に数値実験により、流動性という点からも火星地滑りが乾燥流で説明できることが示された。Quantin et al. (2004)[6] の地滑り形成年代を見ると、Lineated タイプは前期アマゾニア代で急激に発生頻度が増加している。つまりこの時代、特にマリネリス溪谷内部は乾燥状態にあったことが推測される。

#### References:

- [1] Lucchitta, B. K., *Geological society of America bulletin* **89**, 1601 (1978).
- [2] Forterre, Y., and O. Pouliquen, *Physical Review Letters* **86**, 5886 (2001).
- [3] Pouliquen, O., J. Delour, and S. B. Savage, *Nature* **386**, 816 (1997).
- [4] McEwen, A. S., *Geology* **17**, 1111 (1989).
- [5] Campbell, C. S., P. W. Cleary, and M. Hopkins, *JGR-Solid Earth* **100**, 8267 (1995).
- [6] Quantin, Q., C., P. Allemand, N. Mangold, and C. Delacourt, *Icarus* **172**, No. 2, 555–572 (2004b).