

惑星の地すべり

Planetary landslides

小松吾郎／国際惑星大学院，ペスカーラ，イタリア

Goro KOMATSU／International Research School of Planetary Sciences, Pescara, Italy

キーワード：惑星，地すべり，金星，火星

Key words : planets, landslides, Mars, Venus

1. 惑星の比較地すべり学

地すべり現象は太陽系の固体地表のある天体ではどこでも起こり得る。しかしながら水星と外惑星の衛星，それに小惑星や彗星の核では今まで取得されている探査機の画像の解像度が低いためもあり，地すべり現象として研究できるはっきりした地形が見つかっていないか，存在していてもあまり研究対象として取り上げられていない。もちろん例外もあり，木星の衛星のイオには長さ70 km，幅200kmの巨大地すべり地形が見つかった（Schenk and Bulmer, 1998）。地球の月は高解像度の画像も存在するが，重力が小さいため地すべりが起きにくいことと，たえず降り注ぐ微隕石の侵食作用で地形が均され古い地すべり地形が判別しにくい。そのため，月面上の地すべりの研究もそれほど進んでいない。よってこの講座では火星と金星を主な対象とする。しかしながらその他の天体の地すべりは，比較惑星学の観点から非常に面白い可能性を持っていることを指摘しておく。これは重力，温度，大気条件，そして地形を形成する物質の成分が非常に広範囲に渡るためである。例えば，月や水星のように乾いてしかもほとんど真空の世界では地球のように大気や水が大きな影響を及ぼす地すべりとは必然的に違った作用になることが予想される。また，外惑星の衛星群の表面は一部の例外を除いてそのほとんどが水の氷できていて，しかも極低温で真空に近い環境である。このような条件下では氷は岩石のような性質を示すと考えられる。しかも，それらの衛星群の氷成分にはメタンやアンモニアが含まれているのもあり，そのため水の氷とは違った粘性率や降伏値を持つ可能性があり，崩壊したり流れる条件が違ってくると思われる。

これらの様々な条件の影響について分析する紙面はないので，ここでは重力の影響のみ少し考察する。地すべりの条件を決めるファクターでまず重要なのは摩擦係数 f (friction coefficient) と粘着力 (cohesion) である。粘着力が無い条件では摩擦係数と斜面の最大角度の関係は次の式で示される。

$$f = \tan \alpha \dots \dots \dots (1)$$

この角度 α は崩壊の限界角度 (angle of repose) と呼ばれる。つまり乾いた砂など粒子の結合力がほとんどない物質がつくる小山では，崩れる斜面の角度はどの惑星や月でも同じである。ただし，現実には物質は粒子の結合を持ち，次の式で表される関係を持つ。

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \dots \dots \dots (2)$$

この式では τ は最大せん断応力 (critical shear stress), C は粘着力 (cohesion), σ はすべり面上の垂直応力 (normal stress), ϕ は内部摩擦力 (apparent angle of internal friction) である。この関係式に地すべりブロックが動き出す時の力のバランスを考慮すると，

$$\tan \alpha = \frac{C}{\rho g y \cos^2 \alpha} + \tan \phi \dots \dots \dots (3)$$

という基本式 (α : 斜面角度, ρ : 地すべりブロックの密度, g : 重力, y : 地面に垂直方向に測った地すべりブロックの厚さ, Allen, 1997) になり, C と ϕ の大きさにもよるが, 実際には重力の大きさが崩壊する時の斜面角度の大きさに効いてくる。月の重力は地球の約6分の1, 火星は地球の3分の1強であり, その影響は大きい。金星は地球とほとんど同じ重力を持つ。小惑星や彗星の核のように重力が極端に小さい場合, 地すべりの起きる可能性自体がほとんど無いであろう。また崩壊した後の現象, 例えば土石流 (debris flow) の移動速度にも重力が影響を持つ。土石流がビンガム塑性変形すると仮定したモデル (Bingham plastic model) では, 速度は重力に比例する。よって月や火星では流れ速度が地球に比べて遅い。

金星, 地球, 及び火星の地すべりを比較するのに便利なのが, 地すべりの起きた崖の高さ (H) に対する地すべりの移動距離 (L) の相関図 (図-1) である。地すべりの動く距離はその落下高度と密接な関係があることが知られているが, 惑星によってある程度のばらつきがある。重力の違いが原因の一つであるが, それ以外の要素も影響を及ぼしている。例えば, 地球上の水中で起きる地すべりはその崖の高さに対して長大な距離を動き, その理由としては土石中の水が潤滑油の役割をしている

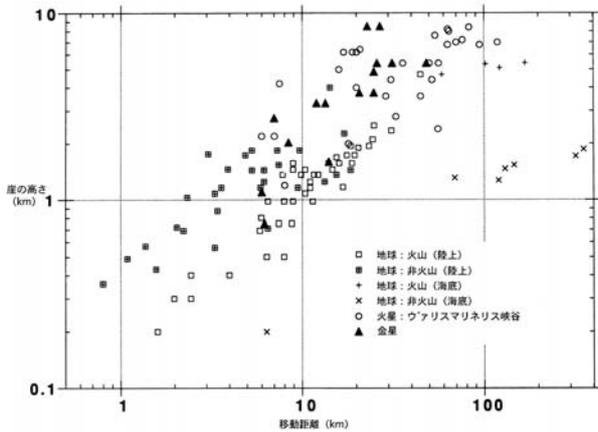


図-1 金星，地球，火星の地すべりの比較。ここでは，地すべりの起きた崖の高さと地すべりの移動距離の関係を示す。基本的には崖の高さ（ポテンシャルエネルギー）と地すべりの動く距離は対数グラフで正の関係を持つが，これらのファクターの範囲は惑星によって変わる。Malin (1992) より。

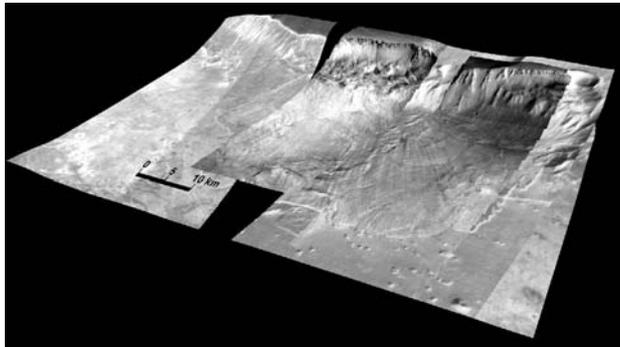


図-2 火星のヴァリスマリネリス峡谷内には巨大地すべりが起きた証拠が存在する。ガンジス峡谷。崖の高さは約5000m。マースオデッセイ (Mars Odyssey) 搭載のTHEMIS (Thermal Emission Imaging System) 画像とマースグローバルサーベイヤー (Mars Global Surveyor) 搭載のMOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) 地形図の3次元合成画像。高度誇張度は1.5倍。

ためと考えられている。

2. 火星の地すべり

重力の観点から言えば火星は，地球に比べて地すべりが起きにくいと言える。実際，赤道域に存在する巨大なヴァリスマリネリス峡谷 (Valles Marineris) の斜面が25度以上の角度で最大8-9キロの高さまで聳え立っているのも，小さい重力の影響であろう。しかし，過去の探査機の調べで火星に様々な地すべり地形が見つかった (e.g., Shaller and Komatsu, 1994)。それも長さ数百キロに及ぶものから，最高解像度約1.5mの画像によって見つかった小地すべりまで多い。巨大な地すべり (図-2) はやはり大きな斜面のあるヴァリスマリネリスに多く分布している (Lucchitta, 1979)。最大の地すべり群の体積はそれぞれ1000km³を越え，移動距離

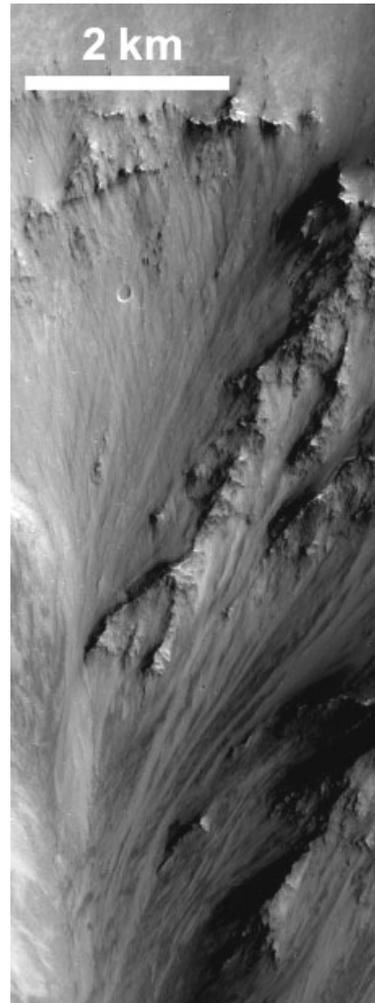


図-3 ヴァリスマリネリス峡谷の内壁に発達するクリープ地形。マースグローバルサーベイヤー (Mars Global Surveyor) 搭載のMOC (Mars Orbiter Camera) 狭角カメラ画像。

も100kmに及ぶものが見つかった。これらの地すべりの中には放射線状の溝が表面に存在するのがある (図-2)，その形成要因が議論になってきた。地球の地すべりでこのような溝を示すのは，氷河や雪の上を移動した場合や，水をはじめとする流体に富む火山性の地すべりなどである。これらの地すべりの場合，氷や液体の水が摩擦を下げ，地すべり体の各部分が相互にずれ易くなって溝を形成したものと考えられている。もし，そうなら火星の放射状の溝を持つ地すべりも何らかの原因で摩擦が下がった可能性が高い。火星の大気は非常に薄く，これが摩擦を下げる役割をしたかどうかは疑問が残る。水や氷も現在の火星条件では非常に少なく，過去に地表水が豊かだった時期がなければならぬか，あるいは地中にかなりの量が存在していた必要がある。

ヴァリスマリネリスの内壁には斜面堆積物がゆっくり流れたような地形が見られる (図-3)。これらの堆積物は交互に繰り返す明暗色の細長いバンド群からなり，中には流れ方向 (斜面の下方向) に沿って変形している衝突クレーターが載っていたり，堆積物が鋭い尾根で二

つに別れている場合もある。後者は氷河地形の痩せ尾根に酷似している。また堆積物の源に氷河地形のカルドに似た地形が存在しているケースも見つかっている。最近の研究によってこのような斜面堆積物は、ヴァリスマリネリスのみならず火星の中緯度帯にも類似した地形が多数存在することが分ってきた。地球上で岩屑堆積物がこのような特徴を示す現象はクリープ (creep) と呼ばれ変形速度が非常に遅い。クリープ堆積物の中には内部で氷が固体変形しているケースがあるが、そのような流れ地形は岩屑氷河 (rock glacier) と呼ばれ、火星にも存在している可能性がある (Rossi *et al.*, 2000)。また、氷が霜として形成と消滅を繰り返すことによって岩屑が下方に動き、流れ地形が発達する霜クリープ (frost creep) という現象も知られているが、これまた火星の流れ地形の説明として提唱されている (Perron *et al.*, 2003)。

オリンパス山の周囲に発達する最長で約1000kmにも及ぶオリオール (aureole - 後光や光輪と訳される) と呼ばれる堆積物の地形は興味深い (図-4)。背後にそびえるオリンパス山の崖の高さは6 kmにも及ぶ。高解像度画像でみると多数の峰が発達しているオリオールは、火砕流だとか氷床下で固まった溶岩流だとか過去にいろいろ仮説が提唱されてきたが、大規模な地すべり地形であるという立場をとる研究者が多い。Hayashi and Mouginis-Mark (1992) はオリオールが由来したと考えられる背後の崖の高さと移動距離の比 (H/L) に対する

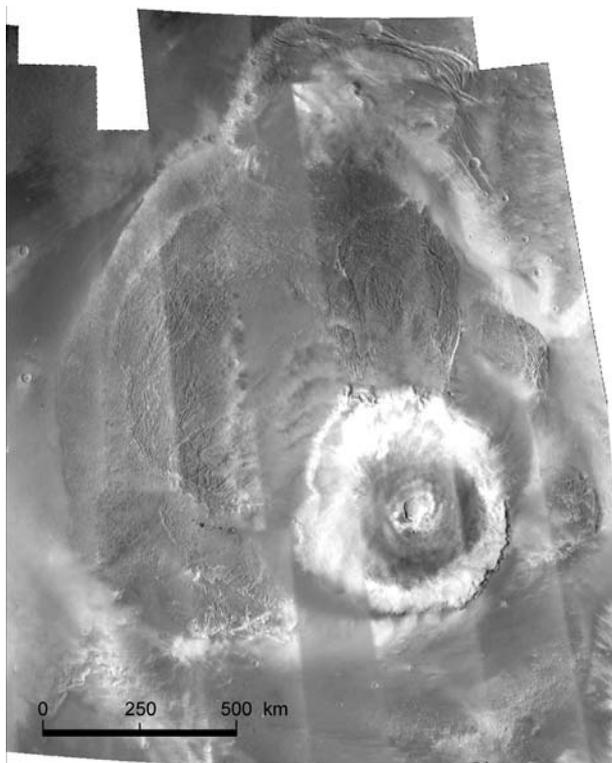


図-4 太陽系最大の火山オリンパス山とその周囲に発達するオリオール (aureole)。マーズグローバルサーベイヤー (Mars Global Surveyor) 搭載のMOC (Mars Orbiter Camera) 広角カメラモザイク画像。

堆積物の体積 (V) の関係がハワイ島の周囲に発達する巨大海底地すべりによく似ていることに気づき、オリオールも古代の火星に存在した可能性のある海洋の底で起きた地すべりの堆積物であるという仮説を発表した。

3. 金星の地すべり

金星では、90年代初頭にマゼラン探査機搭載の最高解像度約100mの合成開口レーダーによるほぼ全球の調査が行なわれて多数の地すべり地形が見つかった。特に、Malin (1992) は地すべり (rock slump, rock/block slide)、地崩れ (rock/debris avalanche)、そして土石流 (debris flow) と解釈できる地形を同定した。金星の地すべりは高度と長さの (H/L) 比において地球と火星の中間に位置する (図-1)。金星の地すべりは地球の地すべりよりやや大きい、火星のよりは小さい。断層形成や地震が構造的なトラフ内に多く存在する非火山性の地すべり (図-5) の形成理由と考えられ、また火山体の形成による山体の急傾斜化が火山性の地すべり (図-6) の原因と考えられている。金星の環境 (温度は摂氏500度近く、大気圧は約90気圧にもなる) がどのように地すべりに影響を与えるかはよく分っていない。一般には高温は物質の塑性変形を促すので速度の非常に遅い流れ現象 (creep) が増える可能性がある。しかし金星はまた極度に乾燥しているのが特徴である。このため、物質の強度が逆に高い可能性もある。金星の地すべりが高い崖から起きるという特徴はこのためかもしれない。

4. 将来の研究課題

惑星表面で起きる地すべりの研究の歴史は浅いが、それでも多様な形態の地すべりが実に広範囲の環境・条件

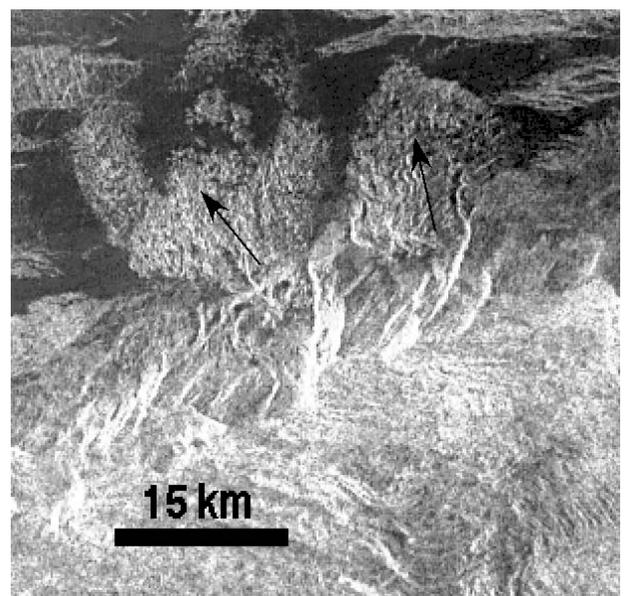


図-5 金星の非火山性地すべり堆積物。マゼラン (Magellan) 探査機の合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) 画像。

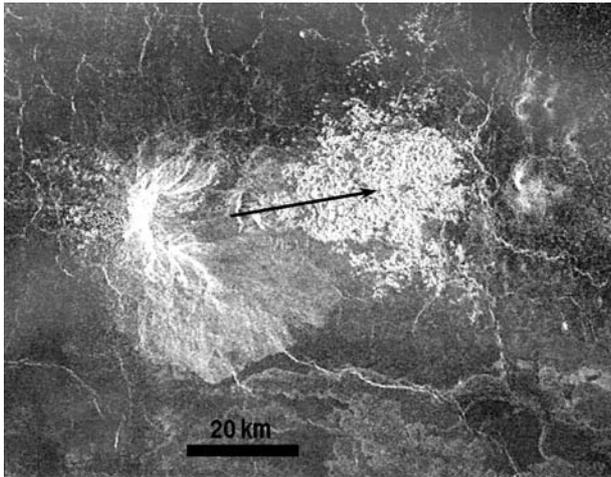


図-6 金星の火山性地すべり堆積物。マゼラン探査機の合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) 画像。

下でおきることが、わかってきた。そのため多様な要素が極端な形で地すべりの形成に与える様子を観察できる。いわば天然の実験室の結果が手に入るわけで、地球の地すべり研究にも大きな影響を与えるかもしれない。今までは軌道上からの画像による研究が中心だったが、最近、特に火星では探査機搭載のレーザー高度計によって得られた高精度の地形データを元に地すべりをかなり正確に定量化できる可能性が出てきた。しかし、地すべりを起こした物質の物理化学的な情報は現在のところほとんど存在していない。地すべりのメカニズムを知るためにもそうした情報は必要だ。今のところ入手できるデータはリモートセンシングのみに限られているが、将来は着陸機や自走行車による詳細な現地調査が望まれる。地すべ

りは起きた時代の気候や水などの古環境を知る手がかりを与えることができるので、惑星の地表条件の変遷を考えるのに将来大事な研究対象となるに違いない。惑星の地すべりを研究する科学者は非常に少ない。地球の研究者たちがもっと関わることを期待している。

謝 辞

国際惑星大学院のアンジェロ・ロッシとステファノ・デイ ロレンツォには図-2, 3, 4の準備を手伝って頂いた。

参考文献

- Allen, P.A. (1997) : Earth surface processes, Blackwell Science, Oxford, 404p.
- Hayashi, J. and Mougini-Mark, P.(1992) : The mobility of the Olympus Mons aureole deposits versus Valles Marineris landslides and terrestrial subaerial and submarine landslides, EOS supp., Fall American Geophysical Union, 323.
- Lucchitta, B.K.(1979) : Landslides in Valles Marineris, Mars, J. Geophys. Res., 84, 8097-8113.
- Malin, M.C.(1992) : Mass movements on Venus: Preliminary results from Magellan cycle 1 observations, J. Geophys. Res., 97, 16, 337-16, 352.
- Perron, T., Dietrich, W.E., Howard, A.D., McKean, J.A., Pettinga, J. R.(2003) : Ice-driven creep on Martian debris slopes, Geophys. Res. Lett., 30 (14), 1747, doi : 10.1029/2003GL017603.
- Rossi, A.P., Komatsu, G., and Kargel, J.S.,(2000) : Rock glacier-like landforms in Valles Marineris, Mars. In Lunar and Planetary Science Conference XXXI, Abstract # 1587, Lunar and Planetary Institute, Houston (CD-ROM).
- Schenk, P.M., and Bulmer, M.H.(1998) : Origin of mountains on Io by thrust faulting and large-scale mass movements. Science, 279, 1514-1517.
- Shaller, P.J., and Komatsu, G.(1994) : Landslides on Mars. Landslide News, 8, 18-22.
- (原稿受付2003年12月11日, 原稿受理2004年2月29日)