

火星のローブ状地形の成因

— 土石流堆積物逆解析による予察的検討 —

成 瀬 元*

Origins of Lobate Landforms on Mars: Preliminary Examination from an Inverse Analysis of Debris-flow Deposits

Hajime NARUSE*

[Received 11 November, 2015; Accepted 24 November, 2015]

Abstract

Gullies and lobate deposits commonly occur on the flanks of craters and dune foresets on Mars. These topographic features are thought to have been formed by debris-flow processes. Debris-flow processes suggest the existence of liquid water on the surface of Mars, which is believed to have an extremely cold and dry environment. Debris flows occur when masses of poorly sorted sediment, agitated and saturated with water, surge down slopes in response to gravitational attraction. Thus, recent activities of debris flows imply the existence of liquid water phase materials on the Martian surface. However, the dry granular flow caused by a slope avalanche can also form gullies and lobate deposits, which resemble debris-flow deposits, so there are still uncertainties over the occurrence and origins of liquid water on the modern Martian surface. This study proposes a method for estimating debris-flow properties, in order to distinguish debris-flow processes on Mars. Preliminary results suggest that a lobate deposit on Mars can be formed by a debris flow that shows flow properties similar to water-saturated debris flows on the Earth. If rheological parameters of the flows can be determined from the surface morphology of lobate deposits, it would be helpful for distinguishing debris-flow processes from dry-granular flows. Although our method is in the course of development and it is still difficult to determine flow types from rheological parameters alone, future field surveys and experimental studies will provide criteria for identifying debris flows.

Key words : Bingham plastic flow, debris flow, inversion, liquid water phase on Mars, Martian gully, numerical model

キーワード : ビンガム流体, 土石流, 逆解析, 火星の液相の水, 火星のガリー地形, 数値モデル

I. はじめに

近年に, NASA の惑星探査機 *Curiosity* による表層の過塩素酸塩分析結果などから, 火星の表層

に現在も水が液相として存在している可能性が示唆され注目を集めている (Martín-Torres *et al.*, 2015)。液相の水の起源については, 地下水の湧出 (Michalski *et al.*, 2013), 降水 (Craddock and

* 京都大学大学院理学研究科

* Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto, 606-8502, Japan

Howard, 2002), 雪の融解 (Clow, 1987), など諸説あり, はっきりしていない。そもそも, 火星表層環境の気温・気圧を考えると, 液相の水が常時存在していることは考えづらい (Martín-Torres *et al.*, 2015)。したがって, 液相の水はたとえ存在するとしても, 表層に出現するのは何らかの理由で間欠的であることが予想される。しかしながら, その具体的な出現頻度や分布, 例えば生物相を維持できるほど出現が頻繁であるのか, などの詳細については未知のままである。

この火星表層における液相の分布や湧出頻度に関連した重要な地形が, 火星の斜面 (デューンのフォーセットやクレーター外縁) に発達するローブ状地形である (図 1)。火星表層の斜面 (デューンのフォーセットやクレーター外縁) には直線的な谷地形 (ガリー) がしばしば観察され, その末端にはローブ状 (舌状) の地形が広がることが多い (Milliken, 2003; Malin *et al.*, 2006a)。火星には地球上の周氷河地形 (ソリフラクション・ローブ) とよく類似したローブ状地形も観察されているが, 本研究がとり扱うのはこのガリーに伴う扇状地構成要素としてのローブ状地形である。なお, 周氷河性のローブは本特集号の松岡 (2016) が対象としている。

本研究でとり扱うガリーを伴うローブ状地形の形状は, 地球上における土石流地形とよく類似していることが指摘されてきた (Costard *et al.*, 2002)。土石流は岩石などの固体粒子が流体と混合されることで発生する流れである (Iverson, 1997)。しかも, 火星表層のガリーおよびローブ状地形は, 現在も活動的に形成されている地形であることが示唆されている (Mellon and Phillips, 2001; Malin *et al.*, 2006b)。すなわち, 火星のローブ状地形の存在は, 火星表層での流体の出現頻度や分布の指標となる可能性がある。

ただし, 火星のローブ状地形がすべて水を含んだ土石流によってつくられたという仮説が完全に支持を受けているわけではない。例えば, Shinbrot *et al.* (2004) や Pelletier *et al.* (2008) は, 水を含まない乾燥粒子流であっても火星のローブ状地形とよく類似した地形を形成しうることを報



図 1 火星表層のガリーとローブ状地形の例. Mars Global Surveyor (MGS) の Mars Orbiter Camera (MOC) 画像 PIA08105 より引用 (Malin *et al.*, 2006a). 画像の幅は約 3 km. Terra Cimmeria クレーター (33.5° S, 207.2° W) 周辺の斜面に多数のガリーが観察され, その末端にはローブ状の地形が分布している。

Fig. 1 Examples of gullies and lobate deposits on Mars. This image is from Mars Orbiter Camera (MOC) PIA0815 (Malin *et al.*, 2006a). Width of the image is about 3 km. Many gullies and lobate deposits located at the end of gullies can be observed on slopes at the fringe of Terra Cimmeria Crater (33.5° S, 207.2° W).

告している。また, 二酸化炭素の霜の雪崩説 (石井ほか, 2005), 液体 CO₂ によって駆動される土石流説 (Musselwhite *et al.*, 2001), 表面が氷に覆われて内部摩擦角が小さくなった粒子による凍結粒子流 (frosted granular flow) 説 (Hugenholtz, 2008), など数多くの仮説が提案されており, 火星表面で流体の水がどの程度ローブ状地形の形成に寄与しているかについては議論の決着がついていない。火星のローブ状地形を表層の流体相の指標として用いるためには, このローブ状地形成因論に決着をつける必要があるだろう。

この火星のローブ状地形の成因に関して, 土石

流堆積物の逆解析によって火星土石流仮説の妥当性を検討することを本論文は提案する。まず、火星の表層で起こっているのは土石流であると仮定する。そして、土石流の数値モデルを利用して、火星のローブ状地形の再現を行う。この際に、土石流の流動特性（粘性・密度など）に関連した複数のパラメーターが未知であることが問題となる。そこで、実際の火星のローブ状地形を選んで、モデルがもっともよく地形を再現するよう最適化計算によってパラメーターを算出する。最終的に、得られたパラメーターが地球上での土石流のものとかげ離れたものであれば、火星で起こっている現象は地球上の土石流とはかなり異なったものである可能性が高い。一方、地球上での水と土砂が混合された土石流と同じ特性をもった流れによって火星のローブ地形が形成されているのだとすると、火星表層には流体の水が間欠的に活動し、地形形成作用に寄与している可能性が高まるだろう。予察的な段階ではあるが、現時点でのこの火星土石流堆積物の逆解析結果について本論文は報告し、今後の課題について検討する。

II. 土石流の逆解析

本研究では、火星にみられるローブ状地形の形成過程を検討するため、堆積物の形状から土石流プロセスの逆解析を試みた。まず、土石流の挙動を示すフォワードモデルについて説明し、次に実際の地形からフォワードモデルのパラメーターを求める最適化手法について説明する。

1) フォワードモデル

本研究では、土石流の数値モデルとして BING (Imran *et al.*, 2001) を採用する (図 2)。このモデルは土石流が一定の幅で流れることを想定しており、流れのレオロジーはビンガム流体であることを仮定している。ビンガム流体は降伏応力を下回る剪断応力下では固体としてふるまう性質がある。土石流の上部では剪断応力が小さいため、剪断応力が降伏応力を下回って固体化する領域ができる可能性があり、このような固体化した領域（流速勾配が存在しなくなる領域）を栓流 (Plug flow) 部と呼ぶ (図 2)。一方、流れの下部は速度勾配

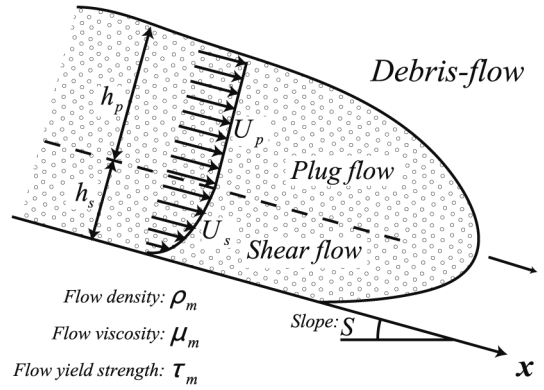


図 2 土石流モデル BING のパラメーター。

Fig. 2 Parameters of debris-flow model BING.

が大きく、剪断応力も大きいため、土石流は流体としてふるまう。この領域は、本研究では剪断流 (Shear flow) 部と呼ぶ。

土石流数値モデル BING は以下の 3 式で土石流のダイナミクスを記述する (Jiang and LeBlond, 1993; Pratson *et al.*, 2000; Imran *et al.*, 2001)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[U_p h_p + \frac{2}{3} U_p h_s \right] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial t} (U_p h_s) - U_p \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{8}{15} \frac{\partial}{\partial x} (U_p^2 h_s) \\ & - \frac{2}{3} U_p \frac{\partial}{\partial x} U_p h_s = h_s g \left[1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right] S \\ & - h_s g \left[1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right] \frac{\partial h}{\partial x} - 2 \frac{\mu_m}{\rho_m} \frac{U_p}{h_s} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (U_p h_p) - \frac{\partial}{\partial x} (U_p^2 h_p) + U_p \frac{\partial h_s}{\partial t} \\ & + \frac{2}{3} U_p \frac{\partial}{\partial x} U_p h_s = h_p g \left[1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right] S \\ & - h_p g \left[1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right] \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_m}{\rho_m} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 ρ と ρ_m はそれぞれ大気と土石流の密度であり、 S は斜面勾配である。 g は重力加速度で、 μ_m は土石流の動粘性係数、 τ_m は土石流基質

の降伏応力である。火星の大気密度 ρ は $1.76 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ (Schofield *et al.*, 1997), 重力加速度 g は 3.71 m/s^2 と設定した (Cox and Allen, 2000)。 t と x は時間および下流方向を正とする空間座標である。 h_p と h_s はそれぞれ流れのなかの栓流部と剪断流部の厚さをあらわす。 U_p は鉛直方向に平均した栓流部の流速である。式 (1) は土石流中の堆積物と流体の質量保存則をあらわしている。式 (2) と (3) はそれぞれ剪断流部と栓流部の運動量保存則をあらわす。2つのレイヤーはかなり異なる構成則をもつため別々の方程式が必要となるが、両者を駆動しているのは同じ斜面下方向の重力 (右辺第1項) である。右辺第2項は流れの厚さの変化に対応して生じる圧力差によって起こる力をあらわす。第3項は摩擦力であり、剪断流部では摩擦力が流れの粘性に関連しているのに対し、栓流部では降伏応力が摩擦力を引き起こしている。

本研究では、この式 (1～3) を数値的に解く MATLAB プログラムを独自に作成し、使用した。数値解法はスタガード格子を用いた有限差分法であり、流れとともに移動するラクランジュ基準系により計算される。数値解法の詳細は (Imran *et al.*, 2001) を参照されたい。流れの停止については、流れの先端の流速が十分に小さくなった (初期流速の 0.1%) ことで判定を行う。そして、停止した際の流れの厚さ分布を土石流堆積物の厚さ分布とみなす。

2) 目的関数と最適化計算手法

あるパラメータを与えて計算を行ったときに、フォワードモデルの計算結果が実際の地形とどれだけ適合していたかを評価するため、以下の関数を設定する。

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_{oi} - h_{mi}}{h_{oi}} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 n は測定地点数をあらわしており、 h_{oi} は i 番目のグリッド点の座標における実際のローブ状地形の厚さを示している。実際の地形データの測定点の位置は計算グリッド点の座標と一致し

ないため、各測定点でのローブ状地形の厚さはスプライン補間によって推定する。 h_{mi} はフォワードモデルによって得られた i 番目のグリッド点における計算上の土石流堆積物の厚さである。すなわち、 F は計算値と観測値の差の二乗を平均したものであり、値が小さいほど計算結果が観測値と一致していたことを示している。

本研究では、現実の地形をもっともよく再現する土石流の流動条件を探索するために、この関数 F を目的関数として非線形最適化計算を行い、 F を最小化するフォワードモデルのパラメーターの組み合わせを求めた。最適化を行ったパラメーターは、土石流基質の粘性係数・降伏応力・固体粒子濃度 (流体密度) の3つである。最適化計算のアルゴリズムとしては、Nelder-Mead のシンプレックス法を用いた (Lagarias *et al.*, 1998)。シンプレックス法は多変数関数の最適化を行うアルゴリズムであり、探索の開始点 $\mathbf{x}_0$ の周辺で目的関数の値を評価し、目的関数が最小となるパラメーターセットを反復計算によって探索する。このアルゴリズムは目的関数の勾配を必要としないなどの利点があるが、局所的最適解で計算が収束してしまう危険性がある。そのため、探索開始点 $\mathbf{x}_0$ の値を所定の範囲内において一定間隔で変化させ、最適化計算を繰り返した。最終的に、計算結果のうちで目的関数 F がもっとも小さくなった結果を採用し、大域的最適解とみなした。大域的最適解を得るために設定した初期値は合計 1000 通りであり、設定した範囲は、粘性係数は $10^{-1} \sim 10^6 \text{ Pa s}$, 降伏応力は $10^1 \sim 10^4 \text{ Pa}$, 固体粒子濃度は $0.1 \sim 0.9$ である。

3) 地形データ

この論文では、(Levy *et al.*, 2010) によって記載された火星の Protonilus Mensae (44°N , 51°E) でみられるガリーを伴うローブ状地形に対して、本研究の逆解析手法を適用した。この研究地域は台地状の地形であり、台地をとり囲む斜面には直線的な谷地形 (ガリー) が数多くみられ、麓には扇状地状地形が発達している (Carr, 2001; Head *et al.*, 2006a, b, 2010)。ガリーの幅は典型的には $5 \sim 20 \text{ m}$ であり、深さはおおよそ $5 \sim 6 \text{ m}$ 程度

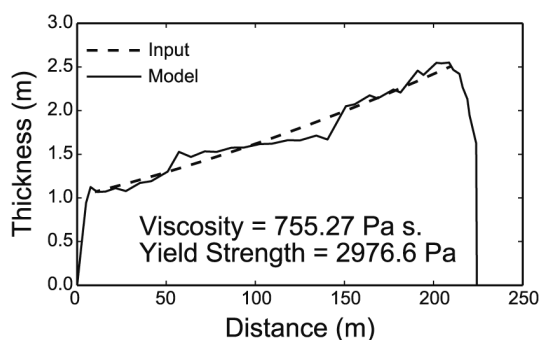


図 3 逆解析によって得られた土石流堆積物の形状. 地形データは Levy *et al.* (2010) によって報告された Protonilus Mensae (44°N, 51°E) における平均的なガリーおよびローブ状地形に基づいている.

Fig. 3 Topography of debris-flow deposit obtained with an inverse analysis. Input data of topography are based on averaged values of gullies and lobate deposits on Protonilus Mensae (44°N, 51°E) reported by Levy *et al.* (2010).

である。そして、ガリーの平均的な長さはおおよそ 200 m である (Levy *et al.*, 2010)。ガリーの傾斜は 27°で、扇状地に移行する領域で平均 21°となる。ガリーの下流の扇状地にはローブ状の地形が形成されている。ローブ状地形は全体として上に凸の縦断形を示し、その先端は垂直に近い傾斜になっている。(Levy *et al.*, 2010) によると、ローブの厚さは平均で 1.5 m であり、幅は 11 m、長さは 50 m である。ローブが堆積する場の傾斜は平均 14°となっている。本研究では、これらの地形の勾配をモデルに与えたうえで、ガリーの上流端から土石流を流した場合にはたして実際に観察されたようなローブ地形が形成されるか、逆解析によって検討した。

4) 結果

計算の結果、火星のローブ地形の代表例として与えた Protonilus Mensae のローブの平均地形と最もよく一致する地形が、特定のパラメーターセットにより再現された (図 3)。計算で得られた地形の厚さ分布は火星の Protonilus Mensae の平均地形とよく一致しており、土石流の流下距離も約 200 m と観測と一致している (図 4)。

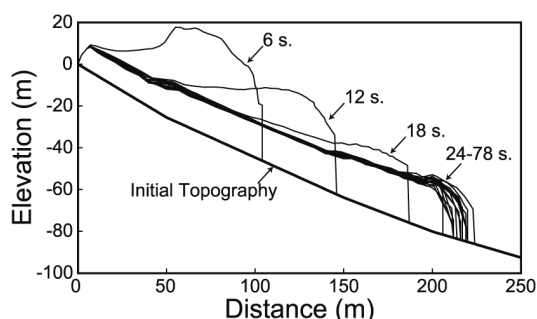


図 4 逆解析によって得られた土石流の挙動. それぞれのラインは 6 秒ごとの土石流形状のスナップショットである.

Fig. 4 Behavior of debris flow estimated with an inverse analysis. Each line indicates a snapshot of the debris flow every six seconds.

また、計算で再現された土石流堆積物の形状は下流端で急激に厚さを減じているが、この特徴も火星のローブ状地形と一致している (Levy *et al.*, 2010)。この地形を再現するために計算で使用したパラメーターは、それぞれ粘性係数が 755.27 Pa s、降伏応力が 2976.6 Pa、固体粒子濃度が 0.56 であった。

III. 議 論

今回、逆解析によって推定された火星のローブ状地形をつくった可能性のある流れの特性は、これまで観測された地球上の堆積物重力流の特性と比べてどのような特徴をもつだろうか。本研究で得られた結果を、地球上で観測されたり実験で発生させられた土石流や Hyperconcentrated 流などの流動特性と比較する (図 5)。Mangold *et al.* (2003) によってまとめられた堆積物重力流のデータには、おおよそ 4 つのクラスターがみられる (図 5)。1 つは Hyperconcentrated 流であり、固体粒子濃度は 40% 程度、粘性係数は 0.2 Pa s 程度である (Pierson, 1980)。もう 1 つはシルト質の実験土石流で、濃度は 50% 程度、粘性係数は 1.0 Pa s 程度となっている (Major and Pierson, 1992)。さらに、砂質の実験土石流はシルト質のものと類似しているが、濃度は 60% 程度と高く、粘性係数は 10 Pa s 程度となっている (Major

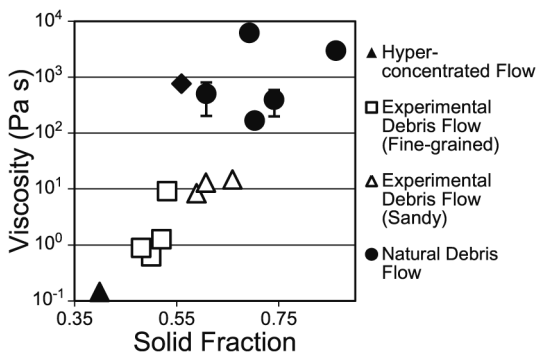


図 5 堆積物重力流の固体粒子体積濃度と粘性係数。地球上で計測された土石流, Hyperconcentrated 流, 実験土石流および本研究で推定された火星の土石流のデータが表示されている (Mangold *et al.* 2003). 本研究で推定されたパラメータは地球上の天然の土石流のパラメータとほぼ一致する。

Fig. 5 Volume fraction of solid particles and viscosity coefficients of sediment-gravity flows. Values of debris flows and hyperconcentrated flows on the Earth, experimental debris flows (Mangold *et al.*, 2003) and results of this study are plotted. Parameters estimated in this study are almost coincident with values of debris flows on the Earth.

and Pierson, 1992)。最後に、実際に観測された天然の土石流は 60 ～ 80% 程度の幅広い濃度分布をもち、 $10^2 \sim 10^4$ Pa s の範囲の粘性係数を示している (Sharp and Nobles, 1953; Curry, 1966; Morton and Campbell, 1974; Pierson, 1980; Li *et al.*, 1983)。このなかで、今回の逆解析で推定された流れの特性は、粘性係数・固体粒子濃度ともに若干低めの値ではあるが、明らかに地球上での天然の土石流と類似している (図 5)。すなわち、少なくとも地球の土石流とほぼ同じような特性の流れが火星のガリーを流下した場合、実際に観測されたものとほぼ同じようなローブ状地形を形成することは期待してもよいだろう。

今回のように最適化計算によって土石流の流動特性を自動的に求めたのははじめてのことであるが、Mangold *et al.* (2003) は本研究の手法とまったく独立な方法で火星のガリーを形成した流れの特性を求めている。まず、Mangold *et al.*

(2003) は火星表層画像の輝度値から推定される自然堤防の高さやチャンネル幅から土石流の降伏応力の範囲を 100 ～ 7000 Pa と推定し、平均で 1000 Pa という値を得ている。この際に、密度は土石流の典型的な値として 2000 kg/m^3 を仮定した。本研究で得られた値は、彼らの求めた値の範囲に収まるものである。さらに、Mangold *et al.* (2003) は火星の土石流の粘性係数をチャンネルの深さから推定し、さまざまなチャンネルから 2.8 ～ 46,000 Pa s という広い範囲の値を得ている。彼らの求めた粘性係数の平均は 740 Pa s 程度である。この値は、本研究の結果とほぼ一致している。一方、Pelletier *et al.* (2008) や Miyamoto (2004) は 1 次元および 2 次元ビンガム流体数値モデルによって火星表層のガリーならびにローブ状地形の再現を試み、乾燥粒子流であっても土石流であっても火星のローブ状地形は形成しうること示している。ただし、彼らの推定した粘性係数は 50 ～ 100 Pa s 程度であり、本研究の結果よりも小さい。

まだ予察的な段階ではあるが、地球上の土石流と同じような性質をもつ流れが火星のローブ状地形をつくったことが示唆された。この結果は、比較的新しい時代になっても、火星表層に液体の水が頻繁に湧出していることを意味するのかもしれない。土石流は固相である礫や砂が液相と混合されることで発生する流れであり、流体なしでは存在しえない (Iverson, 1997)。まったく流体相なしで固体粒子が衝突しつつ流れ下る粒子流でも、ローブ状の地形が形成されることはある (Shinbrot *et al.*, 2004)。しかしながら、粒子流が流下するためには安息角に近い斜面傾斜が必要である。今回解析対象とした火星の Protonilus Mensae のガリーの斜面勾配は最大 27° で、ローブ地形が形成された扇状地の勾配は 21° 程度である。一方、礫質碎屑物の安息角は通常 35° ～ 41° 程度であり (Hugenholtz, 2008)、明らかに今回のローブ状地形を形成した流れの流路よりも大きい。したがって、単純な粒子流よりは、土石流のような流体が関与した流れを想定した方が、火星のローブ地形を理解するためにはよいだろう。

ただし、現時点では、本研究の推定した土石流の流動特性が唯一の解であるとは限らないことには注意が必要である。今回行ったような土石流逆解析計算は非線形性が強く、同等に適切な局所的最適解が複数存在する可能性は否定できない。すなわち、今回の結果は、火星のローブ地形が土石流によるものである可能性を示唆したにすぎない。より確定的な結果を得るためには、最適化アルゴリズムを改善し、さらに網羅的な計算を行う必要があるだろう。また、火星のローブ状地形については、CO₂の関与によるとの考えや (Musielwhite *et al.*, 2001), 表面が凍結した岩石粒子による凍結粒子流によって形成されたという考えもある (Hugenholtz, 2008)。これらのうちでどれがより優れた仮説であるかを検討するためには、それぞれの仮説に関する適切なフォワードモデルを設定し、どの仮説がより妥当な地形復元を行うかを検証することも必要になるだろう。また、本研究のフォワードモデルは1次元的な流れ (すなわち側方に拡大しない流れ) を想定しているが、実際のローブ状地形は流れが側方に拡大しながら土砂を堆積させたものである。このような2次元的な流れの特徴を再現できるように、将来的にはフォワードモデルもより適切なものへと変更していく必要があるだろう。

IV. 結 論

ビンガム流体を仮定した1次元土石流モデルをフォワードモデルとして用いた逆解析を行ったところ、火星のローブ状地形は地球上の土石流と類似する特徴をもった流れから堆積した地形である可能性が示唆された。土石流が流れ下るためには、火星表層に流体相が存在している必要がある。火星のローブ状地形が頻繁に地表へ湧出する流体相の存在を示しているのかについては、今後検討していく必要があるだろう。

文 献

- Carr, M.H. (2001): Mars Global Surveyor observations of Martian fretted terrain. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991-2012), **106**, 23571-23593.
- Clow, G.D. (1987): Generation of liquid water on Mars through the melting of a dusty snowpack. *Icarus*, **72**, 95-127.
- Costard, F., Forget, F., Mangold, N. and Peulvast, J.P. (2002): Formation of recent martian debris flows by melting of near-surface ground ice at high obliquity. *Science*, **295**, 110-113.
- Cox, A.N. and Allen, C. (2000): *Astrophysical Quantities*. Springer.
- Craddock, R.A. and Howard, A.D. (2002): The case for rainfall on a warm, wet early Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991-2012), **107**, 21-1-21-36.
- Curry, R.R. (1966): Observation of alpine mudflows in the Tenmile Range, central Colorado. *Geological Society of America Bulletin*, **77**, 771-776.
- Head, J., Marchant, D., Agnew, M., Fassett, C. and Kreslavsky, M. (2006a): Extensive valley glacier deposits in the northern mid-latitudes of Mars: Evidence for Late Amazonian obliquity-driven climate change. *Earth and Planetary Science Letters*, **241**, 663-671.
- Head, J.W., Nahm, A.L., Marchant, D.R. and Neukum, G. (2006b): Modification of the dichotomy boundary on Mars by Amazonian mid-latitude regional glaciation. *Geophysical Research Letters*, **33**, doi:10.1029/2005GL024360.
- Head, J.W., Marchant, D.R., Dickson, J.L., Kress, A.M. and Baker, D.M. (2010): Northern mid-latitude glaciation in the Late Amazonian period of Mars: Criteria for the recognition of debris-covered glacier and valley glacier landsystem deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, **294**, 306-320.
- Hugenholtz, C. (2008): Frosted granular flow: A new hypothesis for mass wasting in martian gullies. *Icarus*, **197**, 65-72.
- Imran, J., Harff, P. and Parker, G. (2001): A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface. *Computers & Geosciences*, **27**, 717-729.
- 石井徹之・宮本英昭・佐々木 晶 (2005): 火星における二酸化炭素の雪崩によるガリー地形の形成. 雪氷, **67**, 123-132. [Ishii, T., Miyamoto, H. and Sasaki, S. (2005): Formation of Martian gullies by avalanches of seasonal CO₂ frost. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, **67**, 123-132. (in Japanese with English abstract)]
- Iverson, R.M. (1997): The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, **35**, 245-296.
- Jiang, L. and LeBlond, P.H. (1993): Numerical modeling of an underwater Bingham plastic mudslide and the waves which it generates. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), **98**, 10303-10317.
- Lagarias, J.C., Reeds, J.A., Wright, M.H. and Wright, P.E. (1998): Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions. *SIAM*

- Journal on Optimization*, **9**, 112–147.
- Levy, J.S., Head, J.W., Dickson, J.L., Fassett, C.I., Morgan, G.A. and Schon, S.C. (2010): Identification of gully debris flow deposits in Protonilus Mensae, Mars: Characterization of a water-bearing, energetic gully-forming process. *Earth and Planetary Science Letters*, **294**, 368–377.
- Li, J., Yuan, J., Bi, C. and Luo, D. (1983): The main features of the mudflow in Jiang-Jia Ravine. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **27**, 325–341.
- Major, J.J. and Pierson, T.C. (1992): Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resources Research*, **28**, 841–857.
- Malin, M.C., Edgett, K.S., Carr, M.H., Danielson, G.E., Davies, M.E., Hartmann, W.K., Ingersoll, A.P., James, P.B., Masursky, H., McEwen, A.S., Soderblom, L.A., Thomas, P., Veverka, J., Caplinger, M.A., Ravine, M.A., Soulanille, T.A. and Warren, J.L. (2006a): PIA08105 Gullies Galore. *NASA's Planetary Photojournal*. <http://photojournal.jpl.nasa.gov/> [Cited 2015/11/11].
- Malin, M.C., Edgett, K.S., Posiolova, L.V., McColley, S.M. and Dobrea, E.Z. (2006b): Present-day impact cratering rate and contemporary gully activity on Mars. *Science*, **314**, 1573–1577.
- Mangold, N., Costard, F. and Forget, F. (2003): Debris flows over sand dunes on Mars: Evidence for liquid water. *Journal of Geophysical Research*, **108**, doi: 10.1029/2002je001958.
- Martín-Torres, F.J., Zorzano, M.-P., Valentín-Serrano, P., Harri, A.-M., Genzer, M., Kemppinen, O., Rivera-Valentín, E.G., Jun, I., Wray, J. and Madsen, M.B. (2015): Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars. *Nature Geoscience*, **8**, 357–361.
- 松岡憲知 (2016): 火星表面の永久凍土と周氷河作用. 地学雑誌, **125**, 63–90. [Matsuoka, N. (2016): Permafrost and periglacial processes on the Martian surface. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 63–90. (in Japanese with English abstract)]
- Mellon, M.T. and Phillips, R.J. (2001): Recent gullies on Mars and the source of liquid water. *Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012)*, **106**, 23165–23179.
- Michalski, J.R., Cuadros, J., Niles, P.B., Parnell, J., Rogers, A.D. and Wright, S.P. (2013): Groundwater activity on Mars and implications for a deep biosphere. *Nature Geoscience*, **6**, 133–138.
- Milliken, R.E. (2003): Viscous flow features on the surface of Mars: Observations from high-resolution Mars Orbiter Camera (MOC) images. *Journal of Geophysical Research*, **108**, doi: 10.1029/2002je002005.
- Miyamoto, H. (2004): Dynamics of unusual debris flows on Martian sand dunes. *Geophysical Research Letters*, **31**, doi: 10.1029/2004gl020313.
- Morton, D. and Campbell, R. (1974): Spring mudflows at Wrightwood, southern California. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **7**, 377–384.
- Musselwhite, D.S., Swindle, T.D. and Lunine, J.I. (2001): Liquid CO₂ breakout and the formation of recent small gullies on Mars. *Geophysical Research Letters*, **28**, 1283–1285.
- Pelletier, J.D., Kolb, K.J., McEwen, A.S. and Kirk, R.L. (2008): Recent bright gully deposits on Mars: Wet or dry flow? *Geology*, **36**, 211.
- Pierson, T.C. (1980): Erosion and deposition by debris flows at Mt Thomas, north Canterbury, New Zealand. *Earth Surface Processes*, **5**, 227–247.
- Pratson, L., Imran, J., Parker, G., Syvitski, J.P. and Hutton, E. (2000): Debris flows vs. turbidity currents: A modeling comparison of their dynamics and deposits. *Special Publication-SEPM*, **68**, 57–72.
- Schofield, J., Barnes, J.R., Crisp, D., Haberle, R.M., Larsen, S., Magalhaes, J., Murphy, J.R., Seiff, A. and Wilson, G. (1997): The Mars Pathfinder atmospheric structure investigation/meteorology (ASI/MET) experiment. *Science*, **278**, 1752–1758.
- Sharp, R.P. and Nobles, L.H. (1953): Mudflow of 1941 at Wrightwood, southern California. *Geological Society of America Bulletin*, **64**, 547–560.
- Shinbrot, T., Duong, N.H., Kwan, L. and Alvarez, M.M. (2004): Dry granular flows can generate surface features resembling those seen in Martian gullies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **101**, 8542–8546.