^{特集「火星圏のサイエンス」} 地形変化から見る現在の火星の地質現象と 将来の火星探査の展望

逸見 良道¹, 宮本 英昭^{1,2}, Reid Parsons¹

2018年6月29日受領, 査読を経て2018年7月31日受理.

(要旨)火星の表面進化史の理解に重要となる地質区分のうち,アマゾニアンは約30億年前から現在までに 相当する.しかし,現在の地質現象はアマゾニアンに分類されない地域でも活発に起こっている.現在の火 星の活動度を理解するには,まずこうした個々の現象の詳細を理解することが重要である.そこで本稿では, 火星周回機によって近年観測された現在の表面変化を概観する.さらに現在の帯水層やメタンの放出に関与 する可能性がある地形的特徴を検討し今後の火星探査ミッションの展望を概観する.

1. これまでの火星の地質学

バイキング計画以降の火星周回機が、火星表面全体 について1画素あたり数十~数百mのリモートセンシ ングデータを得たことで、全球的な地質マッピングが 可能になった、火星表面はクレーター年代学と層序関 係に基づき地域ごとに表面更新の時系列が整理され、 古い順にノアキアン(Noachian)、ヘスペリアン (Hesperian)、アマゾニアン(Amazonian)と分類され た(e.g.[1])、特にクレーター年代学に関しては、各地 質ユニットの表面に残された直径16 km、5 km、2、 1、0.5 kmでのクレーター数密度の累積サイズ頻度分 布とクレーター年代関数との比較[2]から、ノアキア ンーへスペリアン境界は約37億年前、ヘスペリアン - アマゾニアン境界は約33 - 29億年前に相当すると 考えられている.

ノアキアンでは、温暖湿潤な気候による表層水・地 下水と活発な火山活動・熱水活動の環境条件の下、天 体衝突による巨大盆地、巨大火山帯であるターシス山 群(Tharsis Montes) やオリンポス山(Olympus Mons)一帯の大部分、バレーネットワークが生じた. ノアキアンに形成した表面の大部分は現在の南部高地 に残されている。 ヘスペリアンでも引き続き火山活動と表層水の影響が 大きく,大規模な溶岩平原,アウトフローチャネル, 峡谷が形成した.北部低地の大部分と南部高地の一部 の火山地域と衝突盆地の底がヘスペリアンに対応する.

こうした時代に対し,アマゾニアンでは火山活動は 火山地帯の局所的な地域に限られ,テクトニクスや天 体衝突の頻度,表層水の活動度は時間とともに著しく 低下し,地形変化の規模は極めて小さくなったと考え られた.

図1に米国地質調査所(USGS)が作成した最新の地 質図[2]のうち,アマゾニアンとして分類された地域 を示した.特に最も新しいアマゾニアン後期(約3億 年前~現在)に分類される地域は,南北極冠のみである.

その一方で,高い時間分解能・空間分解能をもつ近 年の火星周回機の観測データの増大に伴い,現在の火 星表面で生じる多様な地質現象の詳細が明らかになり つつある.アマゾニアンは定義の上では現在を含む一 方で,現在の地質現象の観測地点を地図上にプロット すると,アマゾニアンに分類された地域とは必ずしも 一致しない(図1).これは,数kmに満たない範囲で 発生する地形変化が,地質区分に用いられる直径数 km以上のクレーター数に影響を与えないことに起因 しており,これまで使用されてきた地質区分が「表面 年代」ではなく,どちらかというと地殻あるいは上部 地殻の形成年代に相当することを表している.

このような背景を考慮すると,現在の地質現象を理

^{1.} 東京大学総合研究博物館

^{2.} 東京大学大学院工学系研究科

hemmi@seed.um.u-tokyo.ac.jp

解するには従来の巨視的な表層進化史とは異なる時間 軸や空間スケールでの見方を必要とする.また,現在 でも活動度の高い領域は,将来の火星探査ミッション においても重要度の高い探査対象となる.

そこで本稿では,現在の火星表面の地質現象の詳細 (地形的特徴,発生地域,生成プロセスなど)を概説し, アマゾニアン以前には無視できるほど小規模だった地 質現象が現在の表面では地形変化の主因であることを 明らかにする.

次に,近年観測された季節変動する大気メタンがど のようなプロセスを経て発生しているのか,また帯水 層がどのような形で地下に現存しうるかというテーマ に対して,特定の地形や現在の表面変化との関係性に ついて筆者らが行った予備的研究の結果を踏まえなが ら検討する.

最後に、今後の火星探査計画ではどのような地質現 象の観測が期待されるか概説する.なお、ダスト・デ ビルと呼ばれる塵旋風が通過した跡や、表面ダスト粒 子が風で飛ばされて生じるウィンド・ストリークのよ うな表面変化は、地下深部との相互作用や地形変化へ の寄与が比較的乏しいため本稿では扱わない.

2. 大規模な表面変化

規模という点で現在の表面変化で突出するのは,ア マゾニアン後期の地域に分類された,季節により変化 する南極冠表面と砂丘地帯である.

2.1 南極冠

火星の南極冠は下位から順に, $H_2O \times \mathcal{V} \times \mathcal{V} \times \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 体とする層状堆積物(直径約1000 km,厚さ数km), $CO_2 \times (覆われた(その下はH_2O \times)残留極冠(幅約400$ km,厚さ5-10 m)で構成される.さらに南極冠は毎 年冬に CO_2 の霜でできた季節性極冠(最大直径約5000 km,厚さ数m以下)に覆われる[3].

季節性極冠は、CO₂の昇華によって、南半球の秋か ら春にかけて南極冠の表面に生じ、夏季になると後退 (消失)する(消失しきらなかった部分が残留極冠とな る)という現象を1火星年ごとに繰り返す、そのため、 残留極冠や季節性極冠の表面では、不規則形状の地形 的変化が観察される.

残留極冠に生じる虫食い状の凹地(その形態から「ス



図1:現在生じている地質現象の観測された地点およびアマゾニアンに分類された地域と代表的な地名¹. 背景画像は火星全 球のマーズ・グローバル・サーベイヤーのレーザー高度計MOLAの標高図に基づく陰影起伏図. カラーの図は電子版を 参照されたい. Courtesy USGS Astrogeology Science Center, http://astrogeology.usgs.gov

注1: 筆者らは昨年度,大学院講義にてIAU Gazetteer of Planetary Nomenclatureに掲載されている火星の各地名に対 応する日本語表記の一覧を独自に作成した.本稿の本文中・図中ではそれらを使用して記載している.なお,各地形 (Feature Types)は元来の定義や代表的な産状を反映させるため,Chasmaは「大峡谷」,Mensaeは「台地群」,Mons (Montes)は「山(山群)」,Planitiaは「平原」,Planumは「高原」,Terraは「高地」,Vallesは「大峡谷」と訳した.固有名 詞については,欧米の出身者が大半を占める火星研究者コミュニティの間で最も頻繁に発話される発音に近い形でカ タカナ表記した.



図2: 大規模に変化する表面を撮像したHiRISE画像. (a) 一部昇華した南極冠(0.94°W, 85.84°S), (b) スパイ ダー (127.42°E, 87.01°S), (c) オリンピア砂丘(116.03° E, 79.94°N), (d) ダーク・デューン・スポット(179.32°E, 71.97°S). 画像提供: NASA/JPL/University of Arizona.

イス・チーズ」(Swiss cheese)とも表現される)が時 間とともに個々の窪地が広がり互いにつながってゆく (図2a)[4]. これは昇華に伴う体積の減少で説明される.

季節性極冠の表面に生じる特徴として、樹枝状の亀 裂からの暗い物質の放出現象である「スパイダー」(蜘 蛛状の形状から英語ではspiderあるいはaraneiform と表現する)も知られる(図2b) [5]. 図1にスパイダー の最新の分布データを示した[6]. これは透明な氷の 層を透過した太陽光が地下のCO₂氷を昇華し圧力上昇 を経て上面を突破してジェットとして噴出する現象に よって生じたと解釈される. いずれにしても、極冠は 地形変化が数千kmの範囲で見られるものの、せいぜ い深さ数mでドライアイスが太陽光輻射を受けて相 変化することで生じている現象と考えられている.

2.2 砂丘地帯

火星には大小さまざまな規模の砂丘が存在するが, ここではUSGSの火星全球砂丘データベース[6]に基 づき,個々の砂丘が集まり砂丘地帯となった面積1 km²以上の大規模な砂丘地帯(図1)を紹介する.砂丘 地帯の分布は,北極冠の周囲に発達するものが目立つ が,高緯度域から赤道域においても,局所的に衝突盆 地やカルデラの底といった地形的に周囲より低い地域 に点在する傾向がある.地球上で見られる砂砂漠の見 かけと類似した形状(バルハン,星型,長細いもの等 を含む)を持つ.構成粒子は石英粒子でなく玄武岩質 の母岩が風化した暗色の粒子と考えられている.

砂丘地帯は全体が移動しており,例えばニリ・パテ ラ(Nili Patera;シルティス・メイジャー高原の火山カ ルデラ)の底に分布する砂丘一帯の移動速度から推測 される砂のフラックスは,地球上の南極ビクトリア谷 の砂丘地帯と同程度である[7].これは大気圧がわず か40-8.7 hPa(地球大気の約150分の1)とはいえ,大 気と表面の相互作用が活発なことを示しており,ダス ト・ストームやダスト・デビルといった全球的に生じ るダスト粒子の頻繁な巻き上げ現象からも推察できる. ただし,火星表面でもダストの被覆量が多い地域と砂 丘地帯は必ずしも一致しない.

北極冠を取り囲むように分布する砂丘地帯はオリン ピア砂丘(Olympia Undae;図2c)と呼ばれ,分光観測 から石こう(gypsum)が検出された[9]. 北極冠あるい は基盤岩から流れ出た硫酸を含む融水が表面水あるい は地下水としてこの地域に流入・沈殿し,西向き(時 計回り)の卓越風により風食し風下方向に向かって濃 度が減少するように堆積したと考えられている.しか し,現在までこの一帯にだけ砂丘が留まり続けている 理由はわかっていない.

緯度60度以上の高緯度域の砂丘では、代表的な表 面変化としてダーク・デューン・スポット(dark dune spot)が見られる(図2d).秋から冬にかけて砂丘全体 がCO₂の霜(季節性極冠)に覆われ白くなるが、これが 春になり昇華すると幅数m~数十mの暗い斑点模様 が砂丘の峰や谷に発生する.これは、先述のスパイダ ーと同様のプロセスで形成されたと考えられている. 砂丘の斜面では粒子流を引き起こし後述のデューン・ ガリーに類似する地形を形成する[10].

3. 斜面上での変化

火星の表面には衝突クレーターや火山, 丘, 風成地 形, 谷などが存在し, それにともない大小さまざまな 斜面が無数に存在する. そうした斜面上では, 火星周 回機が取得した高解像度画像から現在も新たに生じて いる表面変化が確認されている. ここでは特によく知 られたスロープ・ストリーク, RSL, ガリーの特徴を 詳説する.

3.1 スロープ・ストリーク

スロープ・ストリークあるいはダーク・スロープ・ ストリーク((dark) slope streak)は、幅数十m ~数百 m、長さ数百m ~数十kmに及ぶ、周囲よりも暗い筋 状の特徴である(図3a) [11]. 同様の形状で周囲より明 るいものも一部存在し、ブライト・スロープ・ストリ ーク(bright slope streak)と区別することもある. バ イキング探査機の観測によりその存在は知られていた ものの、現在も発生していることはマーズ・グローバ ル・サーベイヤー探査機の高解像度カメラ MOC によ る観測で判明した.

斜面上の微地形の影響を受けて屈曲・分岐・合流し ながら,重力方向に流れ下る形状を持ち,発生地点は 数m以内に収まるほど極端に小さい.発生以降は形 状を変えないが,時間の経過とともに暗い色が薄まり 周囲の色に近づく.

形成プロセスとして現在有力視される乾燥粒子流モ デル(dry granular flow)では,一定量以上に堆積した ダストが表層数m以内の層理面で閾値を超えてダス トなだれ(dust avalanche)として流れ去り,地下の新 鮮な暗い面を露出するマス・ムーブメントと考えられ た.

一方で,高々数度の傾斜角しかない斜面でも生じる スロープ・ストリークを粒子流のみで説明するのは困 難であるため[12],液体の水が関与する可能性も排除 できない.そこで提案された「湿った」流体モデルの うち代表的なものでは,斜面表層下の塩化物(水和塩) により大気中の水分が融解して塩水となり,斜面を不 安定化させて流動を引き起こすと解釈された[13].

類似の現象は地球の南極大陸で観測されている.ス ロープ・ストリークの全球的な分布[14](図1)につい ては、ダストの被覆量が多いターシス(Tharsis)地域 やエリジウム(Elysium)地域、アレイビア高地(Arabia Terra)に集中する一方で、こうした地域は水蒸気圧 の高い地域ともよく一致するため[15]、どちらの仮説 (あるいは両方の組み合わせによる可能性)もいまだに 有力である.



図3:斜面上の変化を撮像したHiRISE画像. (a)スロープ・スト リーク(17.96°E, 5.8°S), (b)RSL(9.54°E, 45.95°S), (c)ガリー (37.27°W, 36.49°S), (d)デューン・ガリー (20.13°E, 46.73°S). 画像提供:NASA/JPL/University of Arizona.

3.2 RSL

Recurring Slope Lineae(RSL)は、斜面上で季節ご とに変化する、線状に暗くなる特徴(幅数m、長さ数 百m程度)である(図3b).最高解像度25 cm/pixelの マーズ・リコネッサンス・オービター(MRO)の HiRISEカメラで撮像された複数の高解像度写真を比 較することによって初めて発見された[16].

春から夏にかけて長さが時間とともに斜面下方向に 徐々に伸びるように成長し,秋から冬にかけては逆に 徐々に後退してゆく(先端側から消失する)というパタ ーンを毎火星年に同一地点で繰り返す.スロープ・ス トリークと異なり,1火星年の間に形状を変えるだけ でなく,個々の線状の地形が分岐や合流を繰り返す特 徴が見られる.

2火星年以上の複数回の観測によって、長さの漸増、 同一地点での複数年の発生、冬季の消失という3つの 条件を満たすものは、特にコンファームドRSL (confirmed RSL)として判別され、これまでに南部高 地の南緯30-60度の範囲、赤道域のマリネレス大峡谷 (Valles Marineris)やアレイビア平原(Arabia Terra)、 北部低地のアセデリア平原(Acidalia Planitia)に位置 する、衝突クレーターの内壁や中央丘、および谷をな す側面の崖や底面の残丘において確認された[17]. 図 1に示したのは、これまでに報告された(コンファー ムド) RSLおよびRSLの条件を1つでも満たす類似の 地形が発見された地点である.

高解像度の分光観測によるRSL発生箇所で水和塩 (特に過塩素酸塩・塩素酸塩・塩化物の水和物)が発見 され[18], 凝固点効果により一時的に液体になった塩 水が斜面を流れ下ったと解釈された.

さらに,火星大気圧下で水氷から融解した水を砂で できた傾斜面に浸透させる室内実験では,沸騰した水 が表面の砂粒子を吹き飛ばしながら前進する現象が確 認された[19].水和塩の潮解によって土壌の反射率の 低さを再現した実験結果[20]とともに,液体の水の影 響が有力視されている.

その一方,高解像度数値標高モデルの解析からRSL 末端部の勾配が乾燥した粒子流によってできた安息角 と調和的という研究が昨年発表された[21].

一部の地域のRSLについてはTHEMIS表面温度デ ータの解析結果が水の関与が非常に小さいことを示し ており[22], 完全に乾燥した環境での形成も排除しき れない.また,発見地域の地質学的産状が大きく異な るためRSLの生成プロセスが地域ごとに異なる可能 性すらある.

3.3 ガリー

ガリーは、幅数m~数百m、長さ100 m~数km, 深さ数十m未満の削剥された小規模な谷地形である (図3c).ガリーは次の3つの要素で構成される[23]. (1)削剥の起点となった崖上部でシャープな輪郭を持 つ峰に挟まれた「アルコーヴ」(alcove),(2)削剥され た物質を運搬する「チャネル」(channel),(3)崖下部 に運搬された物質が堆積し緩斜面になった「エプロン」 (apron).エプロンの形状からガリーの大半は単独の イベントではなく多数の堆積イベントによって現在み られる地形を形成したと考えられる.高解像度カメラ 画像の比較から,特にエプロン部において明るい物質 が現在も近年新たに堆積する様子が報告されている.

図1に示すように、ガリーの多くは南北両半球の緯 度30-60度の範囲に位置するクレーター内の壁面や中 央丘に見られ、南半球の方が北半球に比べて発見数が 多く、緯度が高くなるにつれて赤道向きに流下するガ リーが増加する傾向にある[24].

これまで南半球では南緯30度よりも高緯度域で小 規模な表面ラフネスが減少し、これは厚さ数メートル の水氷主体の堆積物で高緯度域が覆われることが原因 と考えられてきたが[25]、これはガリーの数が南緯30 度から増加する傾向とも調和的である。

地球のガリーと同様に火星表面でも液体の水が関与 した土石流として,特に地下水(塩水を含む)の帯水層 からの湧水,地軸傾斜角が大きい時期の雪解け水や地 下氷の融解が起源に挙げられたが,現在の気候条件で は液体の水が持続的に存在することは難しい.そこで 風成堆積物の乾燥粒子流や液体のCO₂に駆動される流 れ等の水の関与しない説も提唱されてきた.

高い時間・空間分解能のリモートセンシングデータ が充実してきた昨今,ガリーのチャネル内にCO₂の霜 が発生する様子が観測された.熱力学に基づく数値計 算から冬季に大気中から凝縮されるCO₂氷がレゴリス の表面を覆うだけでなくレゴリス内の間隙を満たし, 昇華する際にCO₂ガスと土壌が混合して土石流が生じ るという説も提案された[26].

上記とは異なる特徴を持つガリーとして分類された のが,砂丘の峰から風下斜面に分布するもので[27], 特にデューン・ガリー(dune gully)と呼ばれる(図3d). デューン・ガリーは幅数m程度で小規模なアルコー ヴに対して,リムを持ったチャネルが数百m~数km と直線状あるいは屈曲を繰り返しながら延びる[28]. 末端部では明瞭なエプロンを持たない代わりに,ガリ ー先端から数mほど離れた地点に数m大の複数の穴 (ターミナルピット; terminal pitと呼ばれる)を伴う ことが多い.

通常のガリーと同様に土壌中のCO₂昇華により土石 流が生じると考えられた.低温低圧環境の下で砂で覆 われた表面にドライアイスを放置する近年の実験では, ドライアイスが土壌内にもぐり込み,昇華に伴いリム を持つチャネル状の構造ができるだけでなくターミナ ルピットに類似する穴を生じる現象が確認されている [29].そのため,ドライアイスの関与が有力視されるが, 実スケールで砂丘内部で数百m大のガリーと数m大 のターミナルピットが生じうるのか,詳細な形成過程 は今のところわかっていない.



図4: 衝突クレーター (拡大図)によって新たに生じたスロープ・ ストリークを撮像したHiRISE画像(14.77°E, 11.81°N). 画像提供: NASA/JPL/University of Arizona.



図5:エリジウム平原(Elysium Planitia)にてリッジに沿って新 しく生じた暗い斑点(矢印の地点).aとb(158.94°E, 4.44° N),cとd(149.56°E, 5.23°N)がそれぞれ同じ場所での 形成前後のCTX画像.画像提供:NASA/JPL-Caltech/ MSSS.

4. 地下物質の放出

天体衝突は小規模ながら現在の火星表面で生じており、衝突によって生じるクレーターや放出物、衝突が もたらす衝撃や熱に誘発する地質現象(例:衝突による スロープ・ストリークの発生;図4)は現在の表面を変 化させる[30].

現在の衝突クレーターは直径数m程度であったとしても放出物は直径数十~数百mの範囲に広がるため、MRO CTXカメラ画像(5~6 m/pixel)では大きさ数ピクセル以上の暗い斑点模様として観測できる. 2006年から2012年までに同一地点を複数回観測したCTX画像を比較することで現在の衝突頻度が1.65× 10^{-6} /km²/yrと推定された[31]. これは理論計算に基づく衝突フラックスの値($10^{-8} - 10^{-6}$ /km²/yr)[32]と調和的であった.

しかし, 筆者らは衝突以外の現象(たとえば揮発性 物質の放出)によっても表面に同様の暗い模様が生じ うるという仮説を立て[33],のべ3万人以上の市民と 20名以上のボランティア,4名の研究者の協力のもと, 2017年までに撮像されたCTX画像を使用し,計3,549 組の画像ペアの解析を行った.

北半球の低緯度領域(総面積 1.0 × 10⁷ km²; 火星全体 の7.06 %に相当)について調査し,計477個の新たに 生じた暗い点を判別した.そこから推定した生成率は 1.3 × 10⁻⁵/km²/yrで,過去の推定値よりも1桁大きい 値が得られた.

過去の推定よりも調査面積が1桁小さく,画像の撮 像期間や対象地域の違いから先行研究と単純に比較す ることは難しいが,過去の推定よりも多くの衝突が少 なくともある領域では生じているという解釈が成り立 つデータが得られた.

その一方で, 天体衝突とは全く異なり, こうした現 象のいくつかは火星の地下の活動度に起因する可能性 も捨てきれない. 具体的には, 現在でも温度勾配が局 所的に高い領域が存在することで, 地下の氷や揮発性 物質が短期間に表面に噴出し同様の陥没地形や放出物 を形成するというものだ. 言い換えれば低緯度域でも スパイダーやダーク・デューン・スポットと同様の現 象が起きうるともいえる.

予察的な画像解析ではリッジのような構造地形に沿 って生じているものも見つかった(図5).引き続き対 象領域・観測期間を広げ、より正確な統計データを得 るとともに,高解像度画像を用いた詳細な解析により 衝突クレーター以外の成因がありえないか,今後慎重 に検討する必要がある.

5. 地下に帯水層は現存するか?

前節までで,現在の火星表面の地質現象が理解され つつあり,液体の水の関与の可能性は排除されていな いことを示した.本節では過去の水(氷)の挙動がどう に考えられてきたのか,現在の地下や表面の地形とど う関連しうるのかを整理する.

現在火星表面に露出する水氷の大部分は極冠として 存在する. Cliffordは地殻表層が氷で飽和状態にある のに対して,深部では氷が地熱によって溶融し帯水層 として全球水循環に関わると提唱した[34]. 地下水が 赤道域に向かって流動し,赤道域では上昇して一部が 表面に現れ気化して大気中へ移動し最終的には極冠と して固定されるという説である.

マーズ・エクスプレスの地中レーダー MARSIS(周 波数帯は1.3-2.3 MHz, 2.5-3.5 MHz, 3.5-4.5 MHz, 4.5-5.5 MHzの4バンド,自由空間での深さ方向の分 解能は約150 m,地上でのフットプリントの大きさは アクロストラック方向に10-20 km,アロングトラ ック方向に5-10 km)は、2017年まで地下深部に帯 水層の反射面を検出できていなかった.

これは少なくとも地下400 mの範囲には地下水面が 存在しない可能性,あるいは存在する場合でも空間分 解能以下のサイズである可能性を示す一方,深さ約 300m以深でシグナルが減衰している可能性があり, より深部での地下水面の存在は否定できないと考えら れてきた[35].

そして,2018年7月,MARSIS観測データの解析に よって,南極冠(193°E,81°S)の層状堆積物(深さ1.5 km)の直下に周囲よりも極めて明るい反射面(幅20 km)が存在し,液体の水と調和的である(比誘電率 >15)と初めて報告された[36].今後別の地域について も同様の報告が続く可能性がある.

数値モデルからは、火星の地殻熱流量に関して約 44億年前の60-70 mW/m²から現在の10-20 mW/ m²に減少したと考えられる[37]. しかしより最近の研 究では、地殻の厚さの変動とマントルの熱フラックス の変動によって現在の熱フラックスには地域差が生じ



図6:プロトニルス台地群(Protonilus Mensae)にみられる典 型的なGLFのCTX画像(50.53°E, 42.23°N). 画像提供: NASA/JPL-Caltech/MSSS.

るとも言われる[38]. こうした地域的な変動は火星レ ゴリス,特に低い透気係数で断熱材の役割を果たす未 固結のダスト堆積物で覆われた地域では,永久凍土が 溶融する深さを推定するのに重要といえよう.

最近両半球の高緯度域(約55度付近)の露頭に,水 水が大量に含まれる画像をHiRISEカメラが撮像した と報告された[39]. これは大量の氷が火星の地下に貯 留している可能性を示唆し,これが地下深部において 溶融したり,地軸傾斜角が現在と異なる時期に溶融す ることで地形変化を引き起こす可能性がある.

中緯度域では、地下氷の厚い堆積物(厚さ~700m) が薄いレゴリス層(厚さ10m未満)に覆われてできた、 過去の氷河流動の痕跡とされる地形が多数みられる。 Viscous Flow Feature(VFF)、Lobate Debris Aprons (LDA), Lineated Valley Fill (LVF)などと分類され たが、ここでは[40]にならい総称してGLF(Glacier-like Forms)とする(図6).

図1にGLFの分布[40]を示すと、北半球ではデュテ ロニルス台地群(Deuteronilus Mensae)、プロトニル ス台地群(Protonilus Mensae)、南半球ではヘラス平 原(Hellas Planitia)の東側に集中して見られた、70年 代のバイキング探査機画像からLDAは水氷でできた と考えられ、MROのレーダーサウンダー SHARAD による観測では、最大のLDAがほぼ純粋な氷ででき ているとわかったが[41],水の純度や厚さについては 不明である.

現在の気候条件下で氷が不安定であるため,過去に 地軸傾斜角の変化によって大量の氷が極域から中緯度 域に再配置されたと考えられている.この氷堆積物表 面のクレーター数密度から,氷の再堆積が起こったの はアマゾニアンの後半ごろ(約3億年前)と考えられる が,この堆積物が周期的に生じた可能性もある.

降雪の量や時期に制約を与えるため,氷の蓄積と流 れに関する数値シミュレーションがGLFに適用され たが[42],統一的な結果は得られておらず,降雪量や 岩屑物の変位量が地域的に変動するせいで,ごく限ら れた地域のみから地軸の変動史を制約するのは困難で ある.

以上のように,現在火星の地下に帯水層が存在する か否かは多角的な面から検討され,最新の観測データ やモデル計算から少なくとも地下水の存在を否定する 結果は出ていない.特に中緯度から高緯度域に見つか った地下氷が溶融することで生じた地形は,地下水の 供給源と関連が深い可能性がある.

6. メタンの放出源はどこなのか?

前節では地下の液体の水や氷の挙動が現在も表面地 形の変化に影響を及ぼす可能性を述べた.本節では, 揮発性物質の放出などの形で現在の地形変化に寄与す る可能性がある揮発性物質の中でも特に重要視される 大気メタンについて筆者らの予察的観察とともにこれ までの研究を概説する.

メタンは現在の火星大気中では比較的短命と考えら れていて,供給されることがなければせいぜい約300 年,場合によってはわずか200日間から数時間で分解 されるといわれている[43].

これまで火星大気中のメタンの検出は複数の火星周 回機・探査車の機器を用いた観測および地上観測によ り報告された.特にキュリオシティ探査車は試料分析 装置SAM (Sample Analysis at Mars)を用いてメタ ンのその場観測を行い,2015年の約1か月間に~7.2 ppbv [44](2014年3月から2017年5月のバックグラウ ンドレベルが平均して0.41 ppbv [45])という,短期間 のメタン濃度の急上昇が観測された.

これは単にメタンの大気中への急速な放出を示唆す



図7:メラス大峡谷 (Melas Chasma) の丘状の地形 (69.41°W, 11.52°S) のHiRISE画像と対応する数値地形モデルから抽 出した2次元地形断面. 頂上のくぼ地, 直径約500-1000 m, 高さ約50-150 mという特徴は地球の泥火山と調和的であ る. 画像提供: NASA/JPL/University of Arizona.

るだけでなく、メタンの貯留や分解についてまだ知ら れていないプロセスが存在する可能性がある.あるい は濃度が急上昇した期間に、メタンの噴出がキュリオ シティ探査車の近傍で連続して起こったことで噴出が 停止して拡散する前に検出できたのかもしれない.

全球的にはMummaらの2003年のメタン濃度の観 測[46]では、夏に最大45 ppbv程度のメタンの濃集域 が赤道付近で検出された.これはサバヤ高地(Terra Sabaea)、ニリ・フォッサ(Nili Fossae)、シルティス・ メイジャー高原(Syrtis Major Planum)の各地域にメ タン源が存在する可能性を示唆している.しかし、こ うした地上観測のデータに対しては地球大気のメタン の吸収が影響するとも反論されている[47].

メタンの発生プロセスとしては有機物の紫外線によ る分解や岩石の熱水変成が考えられるが、生じたメタ ンはクラスレート(メタンハイドレート)として地下の 永久凍土層に貯留し、ここから現在もメタンが表面へ と漏れ出ている可能性がある.しかし、メタンが火星 地殻中のメタン生成菌によって生じた可能性も排除で きない.

メタン放出に伴う地形的特徴の探索も続いているが、 今のところ決定的なものはなく、いくつかメタンガス の抜け穴(地球上ではmacroseepageやmicroseepage と呼ばれる)に類似する特徴が報告されている[43].

また地球上のメタンガスの放出源として知られる泥 火山(地下深部の細粒物質・液体の水・ガスの混合流 体が過剰圧力を受けて噴出し堆積してできる山体)に 類似する直径数十m ~数kmの山体が火星の各地で多 数報告されてきた[48].

もしこうした地形からメタン放出に伴い形成された とすると、その地下に貯留したメタンが今も地下から 地上の噴出口へ直結する経路を通して放出を続けてい る可能性すらあるため[49],地下深部の物質のサンプ リングの容易さも考慮すると、将来の重要な探査対象 になる.

実際,筆者らは将来の探査候補地点として、マリネ レス大峡谷(Valles Marineris)内側のメラス大峡谷 (Melas Chasma)東部を提案してきた[33].メラス大 峡谷では,RSL,泥火山状の丘(図7),地すべり堆積物, 水和した硫酸塩鉱物が全て観測できるため,各地形が 相互にどのように関係するのかについて、より詳細な 調査を現在進めている.

7. 火星探査の展望とまとめ

ここまでで列挙した現在の表面変化が地下物質の相 変化や移動を反映している可能性を示唆している.現 在活動中の火星探査機と将来の火星探査機は,こうし た地質現象に対して,高い分解能(時間・空間・波長) で周回軌道上から観測したり,対象地形に接近しその 場観測を行う絶好の機会を迎える.

2012年8月にゲール・クレーター(Gale crater)に着 陸したキュリオシティは、現在クレーター中央丘の斜 面を登りながら南下しているが、その予定進路には HiRISE 画像の観測から RSLが報告されている[50]. これまで探査車や着陸機による RSL のその場観測の 例はないため、RSL に接近し高解像度の画像やレーザ ー光を照射する化学分析カメラなどでの観測により液 体の水の関与について制約を与えるような結果が期待 される.

2016年10月に火星に到着したエクソマーズ計画の



図8:エリジウム平原 (Elysium Planitia)の斜面に近年生じた暗 い表面 (矢印の地点)のCTX画像 (163.17°E, 14.85°N). 左 が変化前,右が変化後. 画像提供:NASA/JPL-Caltech/ MSSS.

火星周回機トレース・ガス・オービター(TGO)は, 軌道の調整期間を経て2018年5月から本格的に観測を 開始した.TGOによってメタン放出イベントの時間・ 場所・濃度を高い分解能で観測できる.これにより火 星表面のメタン放出の発生源や発生プロセスをより制 約できると期待される.

また,2018年5月に打ち上げられた火星着陸機イン サイトは2018年11月末にエリジウム平原(Elysium Planitia)に着陸し(図1),内部構造や地殻熱流量,火 震を計測する予定である.筆者らの予備的な観測では, エリジウム平原に存在する斜面上にて,近年アルベド が極端に低くなる現象がCTX画像の比較により確認 された(図8).

こうした特徴は一般的には砂丘を構成する暗い粒子 の堆積として認識されてきた.しかし,なぜ周辺域一 帯にではなく斜面上にのみ集中するのか説明がつかな い.近傍には過去のスコリア丘あるいはルートレス・ コーン(溶岩流と水の接触による爆発で生じる小丘)と 類似する地形も観察できたため,局所的な温度勾配に よる液体の水の滲出と解釈することも可能である.イ ンサイトによってこうした地質活動が観測されること が期待される.

また、筆者らはアレイビア平原でも同様の現象を確

認しているため、このような地形変化が全球規模でど のような地域に分布するのか、また他の地形変化とど う関連するのか、あるいは単なる表面ラフネスの変化 で説明可能かを今後の研究課題として検討している.

最後に,現在の地質現象の発生地点を特定するには, 周回機によって2回以上(可能であれば複数年にわた り複数の季節で)同じ地点を観測するデータが必要で ある.加えて数十mスケールの地形解析においては 高い空間解像度をもつ画像や高解像度ステレオペア画 像に基づく超高解像度(1画素あたり最高で1 m)の数 値標高モデルが必要である[51].

そのうえ,こうした地形変化の判別には,画像解析・ 惑星地質学・野外調査のエキスパートによる肉眼での 徹底的な観察が欠かせない[52].実際,RSLが報告さ れたのはHiRISEカメラの観測が開始されてから約5 年が経過した時期であった.

今後こうした研究を続けていくことで、火星表面お よび地下環境についてより正確な地形変化の記載が可 能になり、表面と大気および地下物質の相互作用や流 動に関する理論モデルが進展し、Mars 2020をはじめ とする将来の着陸探査計画に対して有望な着陸候補地 が提案されると期待できそうだ。

謝 辞

ゲストエディターの玄田英典博士からは、本稿を執 筆する機会と原稿への助言・コメントを頂きました. 査読者の小川佳子博士からは、有益なコメントを頂き ました.本稿の改訂を助けて頂いたことを深く感謝い たします.本研究は科研費16K13890,17H02953と株 式会社東京ドーム/宇宙ミュージアムTeNQの支援 を得ています.

参考文献

- [1] 後藤和久,小松吾郎, 2012, 地質学雑誌 118, 618.
- [2] Tanaka, K. L. et al., 2014, USGS Sci. Inv. Map 3292.
- [3] Byrne, S., 2009, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 37, 535.
- [4] Thomas, P. C. et al., 2000, Nature 404, 161.
- [5] Kieffer, H. H. et al., 2006, Nature 442, 793.
- [6] Schwamb, M. E. et al., 2018, Icarus 308, 148.
- [7] The Mars Global Digital Dune Database (MGD³),

https://astrogeology.usgs.gov/geology/mars-dunes/themars-global-digital-dune-database

- [8] Bridges, N. T. et al., 2012, Nature 485, 339.
- [9] Langevin, Y. et al., 2005, Science 307, 1584.
- [10] Hansen, C. J. et al., 2011, Science 331, 575.
- [11] Sullivan, R. et al., 2001, J. Geophys. Res. 106, 23607.
- [12] Miyamoto, H. et al., 2004, J. Geophys. Res. 109, E06008.
- [13] Kreslavsky, M. A. and Head, J. W., 2009, Icarus 201, 517.
- [14] Schorghofer, N., 2007, Icarus 191, 132.
- [15] Bhardwaj, A. et al., 2017, Sci. Rep. 7, 7074.
- [16] McEwen, A. S. et al., 2011, Science 333, 740.
- [17] Stillman, D. E. et al., 2017, Icarus 285, 195.
- [18] Ojha, L. et al., 2015, Nat. Geosci. 8, 829.
- [19] Massé, M. et al., 2016, Nat. Geosci. 9, 425.
- [20] Heinz, J. et al., 2016, Geophys. Res. Lett. 43, 4880.
- [21] Dundas, C. M. et al. 2017, Nat. Geosci. 10, 903.
- [22] Edwards, C. S. and Piqueux, S., 2016, Geophys. Res. Lett. 43, 8912.
- [23] Malin, M. C. and Edgett, K. S., 2000, Science 288, 2330.
- [24] Harrison, T. N. et al., 2015, Icarus 252, 236.
- [25] Kreslavsky, M. A. and Head, J. W., 2000, J. Geophys. Res. 105, 26695.
- [26] Piloget, C. and Forget, F., 2016, Nat. Geosci. 9, 65.
- [27] Mangold, N. et al., 2003, J. Geophys. Res. 108, 5027.
- [28] Miyamoto, H. et al., 2004, Geophys. Res. Lett. 31, L13701.
- [29] McKeown, L. E. et al., 2017, Sci. Rep. 7, 14181.
- [30] Malin, C. M. et al., 2006, Science 314, 1573.
- [31] Daubar, I. J. et al., 2013, Icarus 225, 506.
- [32] JeongAhn, Y. and Malhotra, R., 2015, Icarus 262, 140.
- [33] 宮本英昭ほか, 2016, 地学雑誌 125, 171.
- [34] Clifford, S. M., 1993, J. Geophys. Res. 98, 10973.
- [35] Farrell, W. M., 2009, Geophys. Res. Lett. 36, L15206.
- [36] Orosei, R. et al., 2018, Science 361, 490.
- [37] Hauck, S. A. and Phillips, R. J., 2002, J. Geophys. Res. 107, 5052.
- [38] Plesa, A. C. et al., 2016, J. Geophys. Res. 121, 2386.
- [39] Dundas, C. M. et al., 2018, Science 359, 199.
- [40] Souness, C. et al., 2012, Icarus 217, 243.

- [41] Holt, J. W., 2005, Science 322, 1235.
- [42] Parsons, R. and Holt, J., 2016, J. Geophys. Res. Planets 121, 432.
- [43] Oehler, D. Z. and Etiope, G., 2017, Astrobiology 17, 1233.
- [44] Webster, C. R. et al., 2015, Science 347, 415.
- [45] Webster, C. R. et al., 2018, Science 360, 1093.
- [46] Mumma, M. J. et al., 2009, Science 323, 1041.
- [47] 石丸亮ほか, 2012, 地質学雑誌 118, 664.
- [48] Hemmi, R. and Miyamoto, H., 2017, Prog. Earth Planet. Sci. 4, 1.
- [49] Komatsu, G. et al., 2011, Planet. Space Sci. 59, 169.
- [50] Dundas, C. M. and McEwen, A. S., 2015, Icarus 254, 213.
- [51] Hemmi, R. and Miyamoto, H., 2018, Geosciences 8, 152.
- [52] 小松吾郎, 2012, 地質学雑誌 118, 597.