

# 火星表面の永久凍土と周氷河作用

松 岡 憲 知\*

## Permafrost and Periglacial Processes on the Martian Surface

Norikazu MATSUOKA\*

[Received 4 April, 2015; Accepted 21 July, 2015]

### Abstract

Following the development of high-resolution imaging, digital elevation models, thermal and hydrological data, and onsite ground information during the early period of the 21st century, the periglacial geomorphology of the Martian surface advanced rapidly. Images can even resolve meter-scale landforms, enabling identification of most periglacial features and analysis of their global distributions and detailed morphologies. This review focuses on progress in research covering permafrost distribution, patterned ground, possible heave and subsidence features, lobate debris forms, and slope-lineated features during the last decade. Most of the Martian high-latitude surface is underlain by ice-rich ground called the latitude-dependent mantle (LDM), which favors permafrost-related features possibly developed under warm-humid conditions during past high-obliquity periods or partially still active under the present cold-dry conditions. Thermal contraction cracking is likely to prevail in the LDM, resulting in high-centered, flat-top polygons, possibly underlain by sublimation-type wedges or sand wedges that prevail at high latitudes. The surface patterns change into subdued or peak-top polygons toward the mid-latitudes, probably reflecting long-term sublimation of the LDM. Some researchers attribute stone circles to sorting due to freeze-thaw, but the features are much larger than candidates on the Earth. Small isolated domes with concentric cracks or craters at the top may include pingos, which also prevail at high- to mid-latitudes. Asymmetrical scalloped depressions may result from sublimation or thawing of the LDM, but there is a debate between pole-ward and equator-ward slope retreats. Lobate debris aprons may originate from creep of ice-rock mixtures or debris-covered glaciers, but the distinction between the two origins is unclear, as in the long-lasting debate on terrestrial candidates. Some thin, smaller debris lobes at high latitudes resemble stone-banked solifluction lobes on the Earth, which may indicate the occurrence of seasonal freeze-thaw cycles in the recent past. Time-series images indicate active slope features, including gullies, slope streaks, and recurrent slope lineae that develop below cliffs. These active features may originate from outflows of brine that thaws far below the melting point of water ice.

**Key words** : Mars, periglacial, permafrost, patterned ground, pingo, thermokarst

**キーワード** : 火星, 周氷河, 永久凍土, 構造土, ピンゴ, サーモカルスト

---

\* 筑波大学生命環境系

\* Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8572, Japan

## I. はじめに

### 1) 背景

寒冷で氷河に被覆されない陸域にはさまざまな周氷河地形が特徴的にみられる。周氷河地形の形態や内部構造は気候条件（温度・水環境）や地盤条件（土質や凍土の存在）を反映するため、形成時の環境指標となる（Washburn, 1980; Matsuo, 2011）。周氷河地形の種類によって形成条件が異なるため、複数の地形の組合せで環境評価の精度が向上し、また地形や堆積物の前後関係から環境変動史が解読できる。このような周氷河地形の指標性により、実地調査が困難であっても高解像度の画像が入手できる場所では環境評価が可能になる。とくに、近年、高解像度の衛星画像や数値標高データ（DEM）が入手できるようになった火星では、現在の環境や環境変動史の解明に周氷河地形が広く利用されている（例えば、Balme *et al.*, 2013）。周氷河地形を指標として、生物の存在可能性も議論されるようになった（Ulrich *et al.*, 2012）。

地球上に広く存在し、火星表面でも類似地形が指摘されている周氷河地形の種類と特徴を表1に示す。それぞれが独特な形状を呈し、規模も10 cm 程度から数10 km に及ぶ。衛星画像の解像度の向上とともに判別できる地形の小型化・鮮明化が進み、現在では主要な周氷河地形はほぼ判読可能になった。火星で指摘されている周氷河地形は、形態の観点から平面地形（構造土）、突起地形（凍結丘）、陥没地形（サーモカルスト凹地）、斜面の舌状地形（大小の岩屑ローブ）、斜面の溝状地形（ガリー）に大別される。また、形成プロセスは活動層の運動（凍結融解に伴う変位・変形・流動）、永久凍土内の運動（クリープ性変形、熱収縮破壊、融解や昇華による消耗）、永久凍土下の運動（貫入氷による隆起）に大別される。このうち活動層内や永久凍土下での運動には液体の水の存在が必須であるのに対し、永久凍土内の運動には液体の水は不要であるが高い含水率が必要となる場合が多い。このような地中情報を火星で得ることは困難なため、地球上でもっとも火星に

近い極地砂漠（低温乾燥環境）での周氷河地形の形態・構造・プロセスの調査に基づく類推が進められている。例えば、Marchant and Head (2007) は南極露岩域、Hauber *et al.* (2011) はスバルバール内陸部での調査結果を火星表面の類似地形に適用している。

火星での周氷河地形や永久凍土の存在は、1960年代のマリナー計画や1970年代のバイキング計画の時代より、衝突クレーターからの噴出物の流動形（Carr and Schaber, 1977）、岩石氷河状の舌状地形（Squyres, 1978）、多角形模様（Pechmann, 1980）などを根拠に指摘されてきたが、21世紀に入ってから報告が急増した。図1は、惑星地形学に関する論文が掲載される頻度がもっとも高い4誌（*Icarus*, *Journal of Geophysical Research Planets*, *Planetary and Space Science*, *Geomorphology*）を対象に、“Mars”と“periglacial”の2語をキーワードとして研究論文を検索し、その年間の掲載数を合計した結果を示す。1990年代は年5編程度だったが、2000年頃から年10編前後に増え、2008年以降は年50編前後と、20年ではほぼ10倍に増加したことがわかる。これは、以下に述べる最近20年間における3段階の火星探査計画の進展により、地表情報の多様化と高精度化が進んだことを反映しており（Bargery *et al.*, 2011; Balme *et al.*, 2013）、地球惑星科学のなかでも周氷河地形研究はもっとも急速な進展をみせている分野の1つといえる。

第一段階は1997～2006年、アメリカ航空宇宙局（NASA）の火星探査機マーズ・グローバル・サーベイヤー（MGS）が長期の周回観測を行い、数10 mの平面スケールでの地形可視化と3D画像の取得が可能になった時期である。MGSに搭載されたマーズ・オービター・カメラ（MOC）による地表画像（解像度1.5 m）と赤外線高度計（MOLA）による標高測定値（精度0.3 m）を組み合わせると地形図や地形数値情報が作成され、熱放射（赤外）分光器（TES）により大気や地表の組成に関するデータが提供された。2003年からは欧州宇宙機関（ESA）のマーズ・エクスプレス（ME）が周回観測を開始し、搭載された

表 1 火星で認定された周氷河地形.

Table 1 Possible periglacial landforms identified on Mars.

地形	英語名称	規模	特徴	主な分布緯度	形成期	周氷河性の解釈	主要文献	非周氷河性の解釈	主要文献
多角形土	Polygons	直径 < 25 m	下記のタイプに細分	30°-80°N, 30°-80°S	タイプにより異なる	凍土の熱収縮破壊 (氷楔, サンドウェッジ, 昇華型ウェッジ)	Mellon, 1997; Mangold, 2005; Mellon <i>et al.</i> , 2009a	乾燥割れ目 (直径 100-200 m の場合)	El Maarry <i>et al.</i> , 2010, 2013
中央上昇型 / 平頂型 / 不規則型	High-centered, Flat-top, Irregular	直径 5-18 m	トラフにリムなし	65°-73°N, 47°-80°S	50-100 ka 以降	含水凍土の熱収縮破壊 + 差別的昇華 (昇華型ウェッジの早期型)	Levy <i>et al.</i> , 2009, 2010		
突起型 / 波状型	Peak-top, Subdued	直径 9-17 m	上方に凸な曲線形	41°-62°N, 44°-71°S	~ 130 ka 以降	昇華型ウェッジの衰退型	Levy <i>et al.</i> , 2009, 2010		
混合型	Mixed center	直径 11-12 m	中央低下・中央上昇型の混在	32°-57°S, 35°-59°S	~ 1.5 Ma 以降	昇華型ウェッジの衰退型, 一部サントウェッジ	Levy <i>et al.</i> , 2009, 2010		
ガリー・ゴーン	Gullygon	直径 ~ 9 m	ガリーを伴う斜面に発達	37°-73°N, 33°-72°S	1-2 Ma 以降	融解水・ガリー侵食との相互作用, 複合ウェッジかサントウェッジ	Levy <i>et al.</i> , 2009		
中央低下型	Low-centered	直径 < 20 m	トラフにリムあり	30°-72°S	多期にわたる	急斜面での局所的融解 + 氷楔の成長によるトラフ周囲の隆起	Soare <i>et al.</i> , 2014a		
ハンモック	Basketball terrain	直径 10-30 m	突起型 / 波状型多角形土と類似	50°-70°N	情報なし	凍結攪拌	Machado <i>et al.</i> , 2012		
海浜構造土	Sorted patterned ground	直径 10-30 m	下記のタイプに細分	59°-79°N	5-10 Ma 以降	凍結融解による海法, 現在より 40-60 K 暖かい環境または 273 K 以下の塩水の凍結融解	Balme <i>et al.</i> , 2009; Gallagher & Balme, 2011	凍土の熱収縮 + 重力性落ち込みか季節的な氷被覆の組合せ	Levy <i>et al.</i> , 2010; Orloff <i>et al.</i> , 2013b
円形土 / 網状土	Sorted circles, Stone circles, Stone nets	直径 6-24 m	礫に縁取られる						
条線土	Sorted stripes	間隔 17 m	礫部と細粒部の縞模様						
ストーンアイランド	Stone islands	間隔 20-30 m	礫の集積						
半球状マウンド (ピンゴ)	Frost mounds, Pingo	直径 100-500 m 高さ < 100 m	頂上に割れ目か凹地の存在	30°-45°N, > 64°N	~ 100 ka の高地軸期	氷核の形成に伴う隆起, 閉鎖系・開放系の両者あり	Soare <i>et al.</i> , 2005, 2013a, 2014b; Dundas & McEwen, 2010	侵食残丘, 火山性コーン	Burr <i>et al.</i> , 2009; De Pablo & Komatsu, 2009
貝殻状凹地 (サーモカルスト凹地)	Scalloped depressions	直径 (S) 20-100 m (M) 100-200 m (L) 200-5000 m	非対称斜面: 極向急, 赤道向緩 小道は南北に長円, 大型は円形	30°-70°N, 30°-70°S	Late Amazonian, 最近の高地軸期 (~45°)	永久凍土の融解または昇華 (サーモカルスト)	Morgenstern <i>et al.</i> , 2007; Soare <i>et al.</i> , 2007; Séjourné <i>et al.</i> , 2011		
大型岩屑ローブ (岩石氷河)	Lobate debris aprons, Viscous flow features	長さ 2-40 km 高さ 100-800 m	極向斜面に卓越	30°-50°N, 35°-55°S	0.1-30 Ma, 一部現在?	永久凍土の塑性変形	Milliken <i>et al.</i> , 2003; Mahaney <i>et al.</i> , 2007; Van Gasselt <i>et al.</i> , 2011	岩屑被覆氷河とモレーン	Head <i>et al.</i> , 2005; Levy <i>et al.</i> , 2007; Holt <i>et al.</i> , 2008
小型岩屑ローブ (ソリフラクションローブ)	Solifluction lobes	幅・長さ 20-50 m 高さ 1-5 m	衝突クレーター内の極向斜面に卓越	50°-70°N	0.5-2 Ma	凍結融解による土質斜面の変形	Gallagher <i>et al.</i> , 2011; Johnsson <i>et al.</i> , 2012		
ガリー	Gullies	幅 < 0.7 km 長さ 0.1-2.5 km	南半球中緯度で極向斜面に卓越, 北半球では方向性なし	30°-60°N, 30°-60°S	~ 100 ka の高地軸期, 一部現在	ドライアイス, 積雪・凍土の融解または地下水浸出に伴う地表流・土石流	Malin & Edgett, 2000; Dickinson & Head, 2009; Dundas <i>et al.</i> , 2012	風成堆積物の乾燥岩屑流	Treiman, 2003
スロープ・ストリーク / 再発性縞模様	Slope streak, Recurring slope lineae	幅 0.5-20 m 長さ数 100 m	衝突クレーター内の赤道向急斜面で暖候期に出現	32°-48°S, 25°S-25°N	現在 (季節性)	塩水の浸出による地表流	Kreslavsky & Head, 2009; McEwen <i>et al.</i> , 2011, 2014		

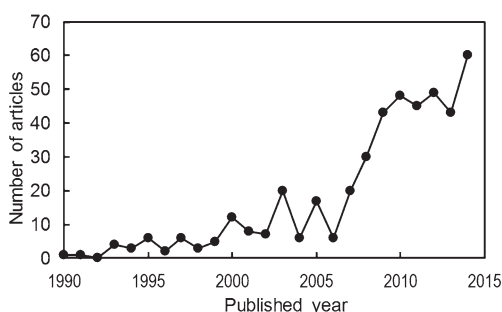


図1 “Mars and periglacial”で検索してヒットした年間論文数の変化(1990～2014)。惑星地形学に関する論文掲載数の多い上位4雑誌を対象とした。対象雑誌: *Icarus*, *Journal of Geophysical Research Planets*, *Planetary and Space Sciences*, *Geomorphology*。

Fig. 1 Interannual variations in the number of research articles hit with keywords of “Mars” and “periglacial” published in the four leading journals on planetary geomorphology: *Journal of Geophysical Research Planets*, *Planetary and Space Sciences*, and *Geomorphology*.

高精度ステレオカメラ(HRSC)が解像度2.3 mのステレオ画像, 地中レーダー(RADAR)が地下構造, 可視・赤外分光器(OMEGA)が地中水や鉱物の化学組成などの情報を提供するようになった。その結果, 直径10 mを超える多角形土(Mangold, 2005), 起伏数10 mの地形, 例えばピンゴ状のドーム(Soare *et al.*, 2005), 貝殻状凹地(Morgenstern *et al.*, 2007), 岩石氷河や岩屑被覆氷河に似たロープ(Levy *et al.*, 2007), などの断面形が図化された。また, 全球規模での地表温度や表層部の含水(氷)率分布の概要も判明した(Feldman *et al.*, 2004; Mellon *et al.*, 2004)。以下では, 1997～2006年をMGS期と称する。

第二段階では, 2006年にNASAの探査機マーズ・リコネッサンス・オービター(MRO)が周回観測を開始し, 搭載された高精度カメラHiRISEが解像度0.3 mで地表の画像を提供するようになった。これにより数mスケールの地形まで判別されるようになり, 地形の鮮明化に加えて, 淘汰構造土, 小型ロープ, ハンモック, 小型ガリー等の認定が可能になった。MROには浅層

レーダー(地下構造の解析), 可視・赤外分光器(水素濃度, 地中水分布, 凍土面深度, 鉱物等の分析), 赤外放射計(気象要素測定)も搭載され, 地形情報と環境・地盤情報が同時に提供されるようになった(例えば, McEwen *et al.*, 2010)。以下では, 2006年以降をMRO期と称する。

第三段階では, 2008年にNASAの着陸船フェニックス(Phoenix)が多角形土の発達する高緯度地域に着陸し, 現地での表層掘削(凍土観測), ステレオ画像撮影(微起伏計測), 気象観測, 土や氷の熱・気体分析や電気化学分析等を半年間にわたり行った。その結果, 種々の衛星観測結果を検証する画期的な成果が提供された(Mellon *et al.*, 2009a, b)。

衛星データに基づく研究では, 高精度の地形・環境情報が蓄積されるとともに, 各周氷河地形ごとに全球規模の分布・分類・形態・サイズの分析が進んだ。例えば, 多角形土(Levy *et al.*, 2009, 2010), ピンゴ状ドーム(Dundas and McEwen, 2010), ガリー(Dickson and Head, 2009)などに関して, 分布の緯度依存性, 地盤条件や斜面方位との関連などが明らかになった。また, 個別の地域を対象に, 地形層序やクレーター計数法(クレーター密度と絶対年代の関係を利用した年代推定)に基づく環境変動史の復元や過去の地形活動期の認定も進んだ。例えば, ①温暖湿潤期における洪水発生, ②氷河の被覆, ③氷河の停滞や融解, ④寒冷乾燥期となり氷の昇華, ⑤現在の寒冷砂漠環境へ移行, という一連の環境変動が解読された(Pacifici *et al.*, 2009)。

## 2) 本稿の目的

本稿では, 主としてMGS計画以降に取得されたデータや知見に基づく最新の周氷河地形の形態・分類・構造・形成プロセス・形成期等に関わる研究成果を総括する。地球上の類似地形との比較も加えて, これまでに判明した事実を整理し, 論争中の問題点や喫緊の課題を展望する。地形情報については高解像度画像に基づく最近約10年間(2005年頃以降)の解析結果に焦点をあてるが, 知識の集積が進んでいる火星の環境条件, 地形プロセス, 気候変動などの理論的研究に関して



は、それ以前の主要な研究も紹介する。周氷河地形の最新研究を展望した前報（松岡・池田, 2012）において、地球と比較しながら火星の周氷河地形研究の一端を紹介したが、その後の成果の蓄積は著しく、情報の大幅な追加・更新を行った。なお、前報との重複を最小限にとどめたので、本稿で紹介する各周氷河地形の基礎的な情報については前報を参照してほしい。

本稿で対象とする各周氷河地形に共通するおもしろな問題点は以下の3点である。

(1)「火星で周氷河地形形成に必要な環境条件」：周氷河地形が出現するためには、多くの場合、水氷（water ice）が表層部に集積し、それに伴って表層物質の変形・破壊・融解のいずれかが起こることが必要である。とくに、凍結融解作用を前提とする地形では「融解」の発生が最大の課題である（Balme *et al.*, 2013）。現在の火星では、大気組成の95%がCO<sub>2</sub>、火星表面を通じての平均温度は210 K、気圧は10 hPa以下、降水量は100 μm以下、水（H<sub>2</sub>O）は固体として高緯度の寒冷地に限り数年間以上安定して存在する（Balme *et al.*, 2013）という点で、地球の現況と大きく異なる。現在の火星で一時的でも273 Kを超える環境は赤道付近の一部に限定されるため、水氷の融解の発生もきわめて限定される。

(2)「地球と火星間、あるいは火星の各地域間での形態や規模の類似点と相違点」：上述のような異なる環境条件下で周氷河地形の種類・形態・規模がいかに異なっているか？

(3)「地形形成期」：火星にも気候変動が存在し、ミランコビッチサイクルに相当する数万年周期の変動、より長期（100 万年以上のスケール）の変動などが指摘されている。例えば、現在の火星での地軸の傾斜は約26°であるが、この値は25°±10°の範囲を12 万年周期で変動する一方、5 Ma 以前にはそれ以降よりも平均で約10°傾きの大きい高地軸傾斜期（35°±10°、以下高地軸期と称する）が存在した（図2；Laskar *et al.*, 2004）。地軸の傾斜が約35°以上になると、高緯度地域では夏の日射量の増加のため、温暖湿潤な環境（氷河や河川の形成期）が出現可能である（Kre-

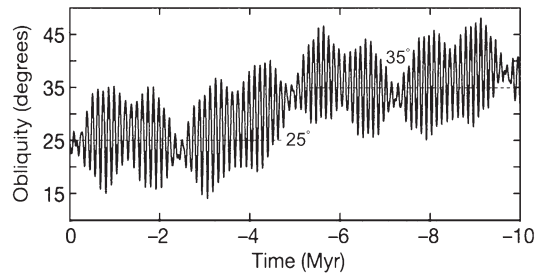


図2 火星における最近1千万年間の地軸の傾斜の変動（Laskar *et al.*, 2002 のデータによる）。

Fig. 2 History of obliquity of Mars over the last 10 Ma (data from Laskar *et al.*, 2002).

slavsky *et al.*, 2008)。そこで、現在は凍結融解サイクルが出現不可能な火星でも、12 万年周期の地軸サイクルの一時的な高地軸期（最近では数10 万年前）、5 Ma 以前には頻繁に発生した高地軸期に活動層（季節的融解層）が出現し、これらの時期に形成された化石地形が現在まで保存されているのか？あるいは、現在でも永久凍土の熱収縮や塑性変形、凍土中の塩水の融解は起こりうるのか、現在活動中の周氷河地形も存在するのか？

## II. 永久凍土と地中氷

「2 年以上継続して年平均地温が0℃以下にある地盤」を永久凍土（permafrost）とする地球上での定義にしたがえば、火星全域に永久凍土が存在することになる。しかし、その大半は含水率が0%に近い乾燥永久凍土（dry permafrost）であり、地中氷（空隙氷や塊状氷）を含んで凍結状態にある凍土（含水凍土）の分布は制約される。本章では、周氷河地形形成の前提となる後者の意味での永久凍土の全球規模での分布とその性質、現地での地形と地中氷の関係、活動層の発生条件について概略を述べる。地中氷の形成プロセスについては、本特集号の猿谷（2016）論文で詳しく解説されているので省略する。

MGSやMEに搭載された熱放射分光器により、全球規模で地表面温度や地中の含水凍土（ice-rich ground）の分布が可視化された（図3）。その結果、地表面温度は火星全体では140～300 Kの範囲（年平均値では159～234 K）で変化する

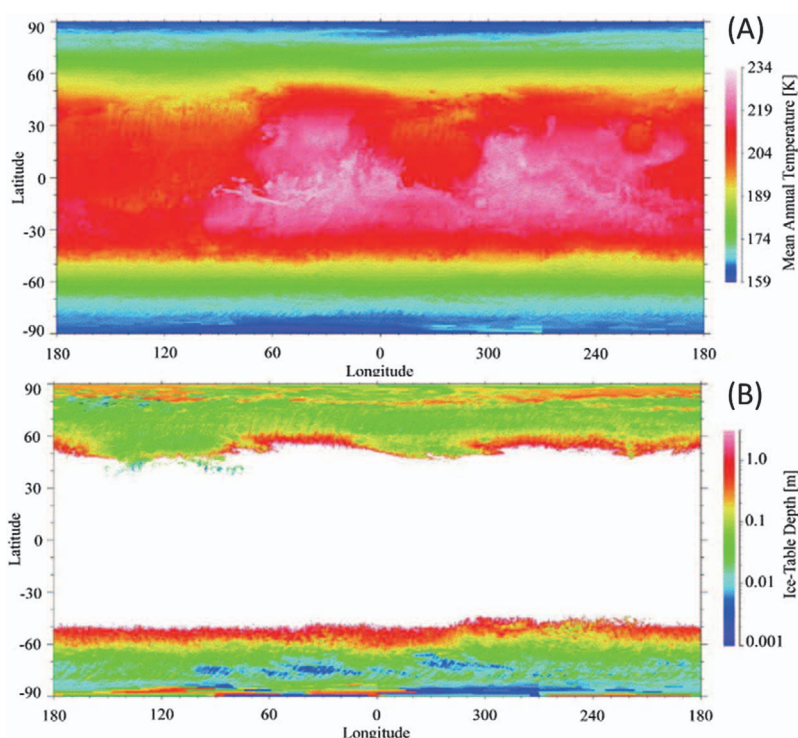


図 3 火星表層の地温状況. (A) 年平均地表面温度. (B) 地表での可降水量が  $10 \mu\text{m}$  の場合の凍土面深度. (Mellon *et al.*, 2004)

Fig. 3 Global maps illustrating the thermal regime of the Martian surface. (A) Mean annual surface temperature. (B) The ice table depth for a case of  $10 \mu\text{m}$  in precipitable water. (Mellon *et al.*, 2004)

ること、厚さ 1 m 前後の含水永久凍土が火星の地表下の 23%, 中・高緯度ではほぼ全域に広がって分布することが判明した (Mellon *et al.*, 2004)。この緯度に依存する凍土は “latitude-dependent mantle” (以下 LDM と表記) と呼ばれる (Kreslavsky and Head, 2002)。LDM は砂塵 (ダスト) と雪 (または水蒸気) からなる風成堆積物が融解-再凍結を繰り返して氷に富む凍土に成長したとされ (Soare *et al.*, 2014a), 多くの周氷河地形の分布を決める基本要因となっている (例えば, Mangold, 2005)。LDM の上面は凍土面 (ice table) と定義され、その深度は緯度に加えて、地表構成物質の熱慣性やアルベドに依存して空間的に変化する (Bandfield, 2007)。ただし、凍土面より上の表層は活動層 (融解層) ではなく、極度に含水率の低い非固結層 (乾燥永久凍土) である。

LDM の中身、すなわち地中氷の存在は「視認」もされている。時期の異なる HiRISE 画像を追跡した Byrne *et al.* (2009) や Dundas *et al.* (2014) は、北半球の中緯度 ( $39^\circ\text{N}$  以北) に出現した直径約 10 m の新しい衝突クレーター (impact crater) の底、数 10 cm 深のところに「氷核」が存在し、数か月～数年で昇華により消滅することを発見した (図 4)。クレーター底の氷は岩屑間の空隙を充填するタイプではなく、純氷に近い。氷核は基本的には地中での凍上 (アイスレンズ) や先述の融解-再凍結等によって発達したと考えられており、凍上は凍結点の低い塩水の凍結で発生した可能性もある。一部の衝突クレーターは岩屑被覆氷河の近くで生じているため、氷核は岩屑に覆われた氷河水が露出した可能性も指摘されている (Dundas *et al.*, 2010)。

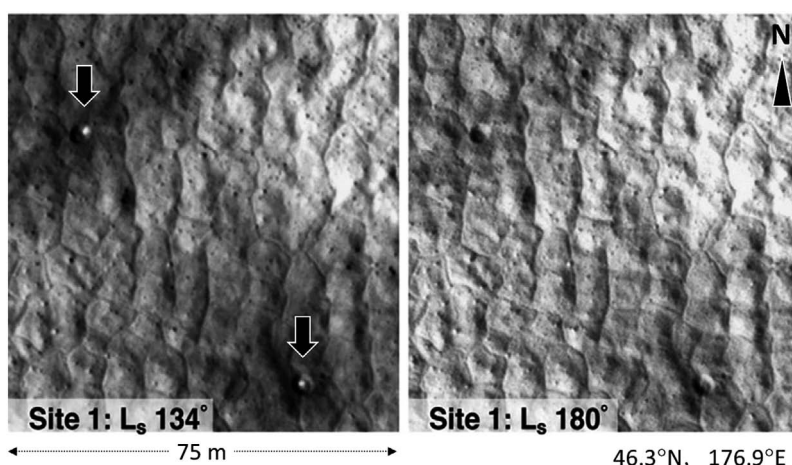


図 4 火星の多角形土地域に出現した新しい小型衝突クレーター（矢印）（Byrne *et al.*, 2009）. HiRISE の画像. 衝突間もない時期にみられた氷（左）は 140～200 日後に消滅した（右）. クレーターは直径約 4 m, 深さ約 0.5 m, 多角形土は直径 7～8 m.  $L_s$  は太陽黄経を表わす.

Fig. 4 Small impact craters newly produced in polygonal ground on Mars (Byrne *et al.*, 2009). HiRISE image. Icy material exposed by impacts (left) disappeared after 140–200 days (right). The craters are  $\sim 4$  m in diameter and  $\sim 0.5$  m in depth. The polygons are 7–8 m in diameter.  $L_s$  indicates ecliptic longitude.

LDM の内部を示す一例として、高緯度 ( $68.2^\circ$  N) での着陸船フェニックスのロボットアームによる掘削調査で含水凍土の存在が確認された (Mellon *et al.*, 2009b)。多角形土の発達する地表で掘削された 12 か所のトレンチの大半において、平均 4.6 cm 深に空隙水 (icy soil) やアイスレンズ (light-toned ice) からなる凍土面が露出したのである。この地中氷が現在も安定して存在するか、消耗過程にある過去の遺物かは不明であるが、昇華速度は遅く、厚さ 4～5 cm の消耗に 10 万年程度の期間が必要と算定された (Mellon *et al.*, 2009b)。一方、凍土の数値モデルに基づいて、高緯度では粘質土と透過性塩類の存在により、現在でも凍上 (アイスレンズ) が広範囲に発生するという見解も最近提出された (Sizemore *et al.*, 2015)。

低緯度でも氷核は点在するらしい。高緯度では冬季にドライアイス ( $\text{CO}_2$  ice) が広く地表を覆うことが知られている (例えば, Smith *et al.*, 2001) が, Vincendon *et al.* (2010) は  $25^\circ\text{S}$  付近の衝突クレーターの赤道向斜面上に季節的に出現するドライアイスを発見した。理論上、その形

成には地中浅部 (1 m 以内) の埋没氷の存在が必要とされ、そのような氷はかつての氷河形成期からの名残りであることが推定された。

過去数百万年間に於いて地形変化の主要活動期であった可能性の高い、湿潤な活動層 (季節的融解層) の出現期も議論された。公転軌道変化の計算に基づいて活動層形成期を判定した Kreslavsky *et al.* (2008) によると、日射量が極大となる高地軸期の夏季に、中・高緯度の極向斜面で融解が発生する条件が広範囲で出現した。そのため表土は流動しやすくなり、極向斜面は緩傾斜化したとされる。活動層は 5～10 Ma には 20% の気候 (地軸) サイクルで発生したが、5 Ma 以降にはほとんど出現しなかった可能性がある (図 2)。また、今後 1000 万年間は、広範囲での融解の発生は見込まれていない。

### III. 構造土

#### 1) 多角形土 (熱収縮割れ目)

地球の高緯度地域では、冬季の冷却によって永久凍土に生じる熱収縮割れ目が地表で網状に連なる多角形土 (polygon) が遍在する (例えば,



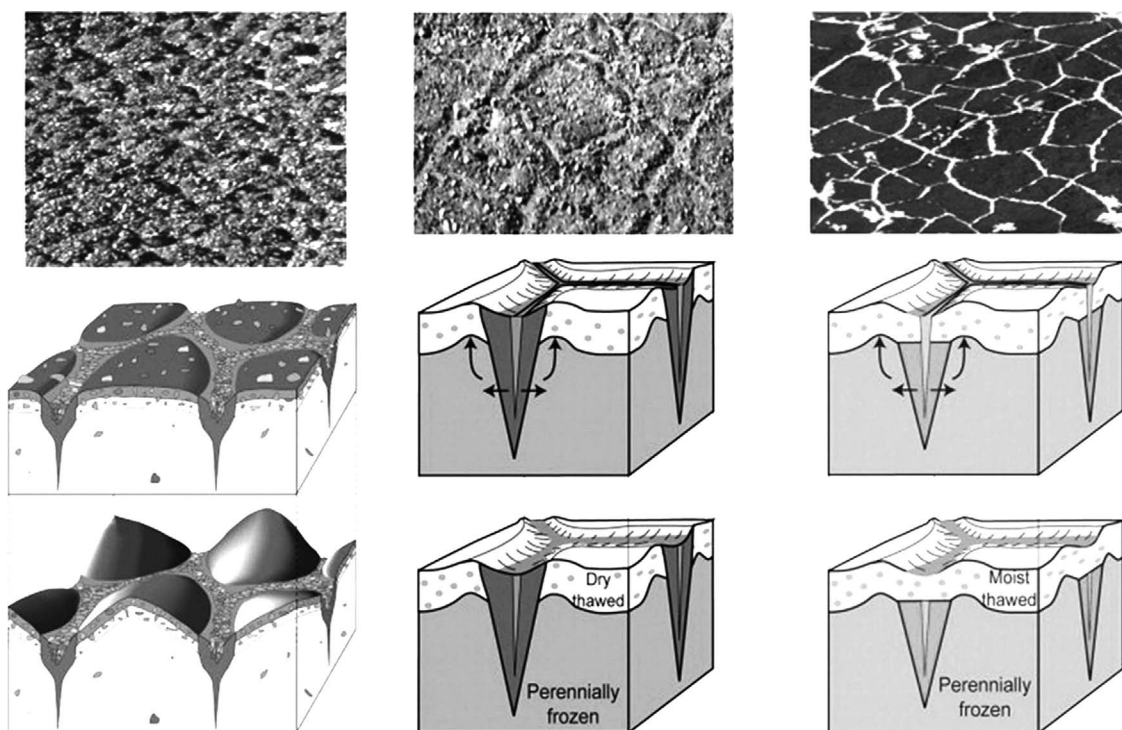


図 5 地球の南極・ドライバレー地域の多角形土と楔構造 (Marchant and Head, 2007). 左から右へ昇華型ウェッジ, サンドウェッジ, 氷楔の順. 上から下へ地表の景観, 発達期の内部構造, 消耗期の内部構造の順.

Fig. 5 Polygons and frost wedges in the terrestrial Antarctic Dry Valleys (Marchant and Head, 2007). From left to right: sublimation-type wedge, sand wedge, and ice wedge. From top to bottom: landscape, internal structure at growing stage, and internal structure at degrading stage.

Mackay, 2000)。多角形土の周囲を縁取るトラフ（溝）の地下には破壊の繰り返しによって楔形に広がった割れ目の充填物がある。楔の充填物により、氷楔（ice wedge：融解水が浸透して凍結）、サンドウェッジ（sand wedge：融解水の欠如により細かい砂が落ち込む）、複合ウェッジ（composite wedge：氷と土が混在）、活動層ソイルウェッジ（割れ目が永久凍土に達せず、表土が落ち込む）に分かれる（例えば、French, 2007; Murton, 2013）。南極内陸部のように、極端な乾燥のために凍土の含水率が低く脆性破壊が起こらない場合には、地下浅部に氷核がある場合だけ熱収縮破壊が発生し、割れ目周囲の氷核の昇華に伴って表層物質が落ち込む昇華型ウェッジ（sublimation-type wedge）も形成される（図 5; Marchant *et al.*,

2002）。形態からは、トラフの両側にリム（高まり）をもち多角形土の中心部が低い中央低下型（low-centered polygon）とリムをもたずトラフだけが低い中央上昇型（high-centered polygon）に大別される。リムはトラフの充填物の拡大に伴って発達するため、中央低下型は多角形土の成長期にあり（氷楔やサンドウェッジの成長）、中央上昇型は氷楔多角形土が衰退期にあるか昇華型ウェッジの場合と解釈されることが多い（例えば、Marchant and Head, 2007）。トラフの内部構造に関する情報のない火星では、おもに表面形態と分布から構造（地中氷の状態）・成因・発達段階などが議論されている。

### 1-1) 形態区分と緯度分布

地球の永久凍土地域にみられる多角形土よりも



大規模な、直径 ( $D$ ) が 1 km を超える大型多角形模様の存在は、マリナーやバイキング計画の時期に判明し、断層地形の可能性が指摘されていた (Pechmann, 1980)。MGS 期に MOC の高解像度画像が提供されるようになり、地球と同等の規模の多角形土 ( $D < 50$  m) が広範囲に存在することが判明した。そして、MRO 期の HiRISE 画像の取得により、多角形土の細かい起伏まで認定され、形態の分類が可能になった (表 1)。

MGS 期に多角形の輪郭 (大きさと幾何模様) はほぼ判明した。Seibert and Kargel (2001) は MOC 画像で多角形土を抽出し、中高緯度、とくにユートピア平原の貝殻状凹地 (IV 章 2) 節で詳述) 周辺に集中することを報告した。多角形に割れる原因として熱収縮と乾燥収縮の可能性があるが、ほかの周氷河地形と共存することから前者を支持し、地中には氷核が氷に富む凍土が存在することを示唆した。より詳しい分析は Mangold (2005) によってなされた。彼は MOC 画像で高緯度 ( $> 55^\circ$ ) に多数の多角形土 ( $D = 15 \sim 300$  m) を認定し、それが TES の熱放射分光器に基づく地下水分布と整合すること、気温の季節変動 (熱収縮破壊) で形成可能であることを指摘した。次に、小型 ( $D = 15 \sim 40$  m) の多角形土はより新しいが乾燥や昇華により衰退中であり、とくにハンモック形状 (後述の SUB 型) は多角形土の割れ目が昇華で広がったものと考えた。一方、大型 ( $D = 50 \sim 200$  m) の多角形土は南極の  $\text{CO}_2$  氷冠の周囲だけに分布することから、氷冠の後退に伴う水供給が形成に関わったと考えた。形成期については、多角形土が条線土やソリフラクション・ロープに類似する地形と共存するので、最近の高地軸期 ( $< 10$  Ma) に凍結融解が繰り返され、ほかの周氷河地形とともに氷楔多角形土が発達し、その後の低温・乾燥化で氷楔が昇華してハンモック形に変化したと説明した。

MRO 期になると地球の南極での多角形土に関する知見に基づいて、J. Levy らが多角形土に関する詳しい分布調査を実施した。全球規模で HiRISE 画像を分析した Levy *et al.* (2009) は多角形土が両半球で  $30^\circ \sim 80^\circ$  の緯度範囲に卓越

し、南北対称的な分布をすることから、第一に気候への依存性 (とくに LDM との関連) を指摘した。また、小型多角形土 ( $D < 25$  m) を 7 類型に分類し、緯度による形態の変化を調べた。高緯度では高起伏型 (HR:  $D = 5$  m 前後), 平頂型 (FTS:  $D = 5 \sim 10$  m), 不規則型 (IRR:  $D = 5 \sim 18$  m), 中・高緯度にまたがって波型 (SUB:  $D = 16$  m 前後), ガリー付随型 (G:  $D = 10$  m 前後), 中緯度では突出型 (PT:  $D = 9$  m 前後), 混合型 (MX:  $D = 10$  m 前後) が卓越する (図 6)。7 種のうち 6 種は液体の水の関与しない熱収縮破壊と昇華で説明できるとし、中緯度の G 型のみに流水 (融解水) が介在する可能性を指摘した。クレーター計数法によると、形成時間は  $0.1 \sim 1$  Ma 以上と見積もられ、高緯度に向かうほど新しい。しかし、新しい多角形土でも、地球では発達初期の多角形土に多くみられる中央低下型は少なく、HR 型や FTS 型のような中央上昇型でリムを欠く形が卓越する。中央上昇型が多い原因について、彼らは、LDM の浅い部分に氷核ないし高含水率の凍土があるため、昇華型ウェッジの性格をもつ楔構造になりやすいと考えた。

HiRISE の画像解析に加えて、フェニックス着陸点および地球上でもっとも火星に近い環境にある南極・ドライバレー地域 (Antarctic Dry Valleys, 以下ドライバレーと表記) における現地情報を総括した Levy *et al.* (2010) は、多量の地中氷の存在が必要なることを改めて強調し、緯度による形態の変化は気候変動に伴う LDM の形成と氷の消耗の歴史を反映すると考えた。すなわち、地中氷の昇華に伴って FTS 型から PT 型ないし SUB 型へと変化すること、言い換えれば、低緯度側ほど氷の消耗が進んでおり、次第に消耗域が高緯度に波及していることを示唆する。昇華は 2 段階で起こる。まず、熱収縮割れ目の周囲で昇華が進み、そのトラフに周囲の堆積物が落ち込んで昇華型ウェッジが形成され、厚みを増すと下の氷を保護するようになる。その結果、逆に多角形土の中心部で昇華が進み、地形が逆転して楔の部分に岩屑の高まりが形成されることもあると指摘した。楔の種類に関しては、液体の

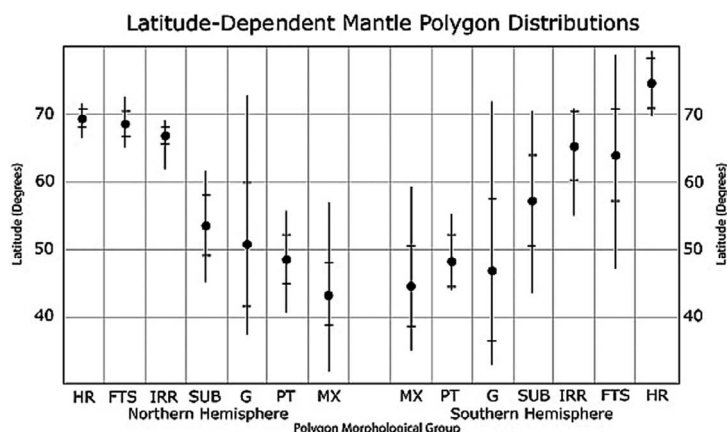


図 6 火星の小型多角形土の形態別緯度分布 (Levy *et al.*, 2009). 黒丸は平均緯度, 縦棒は分布範囲, 横棒は  $1\sigma$  値を表わす. 多角形土の類型については本文を参照. 北半球 (左) と南半球 (右) で対称的な分布を示す.

Fig. 6 Global distribution of small Martian polygons plotted by latitude and morphological group (Levy *et al.*, 2009). Symbols denote mean latitude of occurrence (bold circle), range of occurrence (vertical bars), and one standard deviation of range of occurrence (horizontal cross bars). See explanations in the text for polygon morphological groups. The distribution is largely symmetrical across northern and southern hemispheres.

水の介在の可能性がある G 型のみが複合ウェッジないしサンドウェッジで, IRR 型と MX 型はサンドウェッジないし昇華型ウェッジ, ほかはすべて昇華型ウェッジであると考えた。

以上のような分布・形態特性は広く認められている。集約すると, 狭く明瞭なトラフをもつ小型 ( $D < 10$  m, 現成の可能性あり) はおもに  $60^\circ\text{N}$  以北に多く, 緩やかなトラフとマウンドからなるハンモック状の大型 ( $D = 15 \sim 30$  m, 化石形) は  $60^\circ\text{N}$  以南に多いということになり, 前者が後者を分割して発達する複合形もある (例えば, Korteniemi and Kreslavsky, 2013; Orloff *et al.*, 2013a)。しかし, 地球での調査に基づく異論もある。ドライバレーのモレーン原で中央上昇型 ( $D = 9 \sim 16$  m) を掘削して楔構造 (サンドウェッジや複合ウェッジ) や凍土状況を記載した Bockheim *et al.* (2009) によると, 昇華の進んだ古い時代のモレーンほど多角形模様が不明瞭となり, ハンモック形にはならない。昇華による乾燥とともに地盤の熱膨張率 (ないし脆性) が低下し, その結果張力も低下して割れにくくなることがその原因とされた。

一方, 赤道付近でも多角形土が局地的に分布す

る。例えば, Fairén *et al.* (2014) は, 2012 年より探査機キュリオシティが活動するゲール・クレーター ( $4.5^\circ\text{S}$ ) の底部において, 蛇行流路の周囲に化石多角形土 ( $D = 10$  m 前後) を認定した。

中央低下型も一部で報告されている。Soare *et al.* (2014a) は南半球のアルギイレ盆地 ( $30^\circ \sim 72^\circ\text{S}$ ) において, 分布は限定されるが, ガリー谷壁下など融解水が集まりやすい位置に中央低下型が集中することを指摘した。これらの中央低下型は小型 ( $D < 20$  m) で中心が低く, 周囲に高さ 1 m 程度のリムをもつ。彼らは, 高含水率で厚い LDM 中に熱収縮割れ目が発生し, 日射を受ける急斜面のガリーからの局所的な融解水の供給で氷楔が形成され, 中央低下型が発達したと考えた。後述のように, Séjourné *et al.* (2011) も中緯度の貝殻状凹地の一部に新しい中央低下型を認定し, 氷楔の可能性を指摘した。

### 1-2) フェニックス着陸地点 ( $68.2^\circ\text{N}$ ) の多角形土

小型多角形土が発達するフェニックス着陸地点では, 前述の掘削調査に加えて地上ステレオ画像に基づく微地形計測が行われた。Levy *et al.* (2008) は着陸前の定性的分析により, ①大きさ

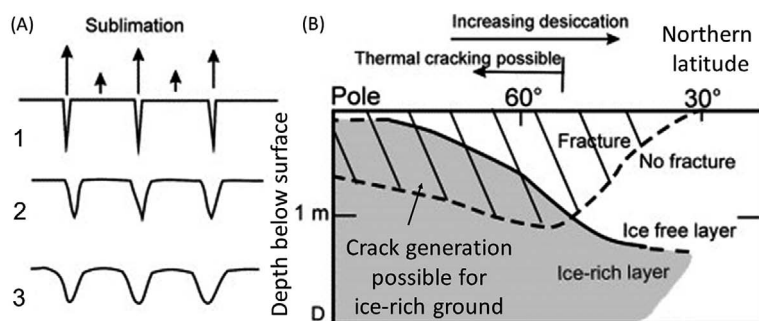


図 7 (A) 凍土の昇華に伴う多角形土の形態変化. (B) 緯度方向の模式断面に表した熱応力と氷に富む地盤の分布 (灰色部, 上限が凍土面深度を表す) の理論的計算に基づく熱収縮破壊の発生域 (斜線). (Mangold, 2005 に加筆)

Fig. 7 (A) Morphological changes to polygons caused by sublimation of interstitial ice. (B) Theoretical comparison of thermal stress required to produce cracks (striped) and the extent of ice-rich ground (gray, the upper line represents the ice table depth), shown in the latitudinal section. (Modified from Mangold, 2005)

や横断形の点でドライバレーの昇華型多角形土と類似する, ②日射に依存した昇華速度の違いを反映してトラフは赤道向きが緩く極向きが急という非対称断面を示す, という特徴から昇華型ウェッジが存在する可能性が高いと判断した。そして, 表層は乾燥しているが, 空隙水の体積を超える過剰地中水 (excess ice) が存在することを指摘した。一方, 着陸後の Mellon *et al.* (2009a) の詳しい分析では, 形態・構造・プロセス・形成時間に関して以下の特徴が指摘された。①多角形土 ( $D = 3 \sim 7$  m, 平均 4.3 m) は U 型トラフ (深さ平均 17 cm) と円頂形マウンドで構成される中央上昇型で, 一部でより大きい多角形土 ( $D = 20 \sim 25$  m) を再分割する。②浅いトラフと小型のマウンドという特徴は, 氷楔の昇華によるトラフの陥没よりもサンドウェッジの成長に伴うマウンドの隆起による説明の方が整合的である。③トラフ内に幅数 cm の溝や割れ目がみられるので熱収縮破壊は現在も発生しており, トラフに礫が多いことから凍結攪拌 (cryoturbation) による淘汰も起こっているかもしれない。④解像度 1 mm/pixel の DEM を生成した結果, 三交点型 (六角形に近い) のトラフが 94% (交角  $105^\circ \sim 150^\circ$  に最頻値) であり, 平面形の点から成熟期に達しており, 形成開始より 0.1 ~ 1 Ma 程度経過していると考えられる。このように, 火星上で現地情

報がもっとも充実しているフェニックス着陸地点でも, 楔の種類や形成プロセスに見解の一致をみるまでには至っていない。

### 1-3) 形成メカニズム

Mellon (1997) は Maxwell 粘弾性モデルに基づいて地中熱応力の緯度分布を計算し, 含水凍土が割れる条件を検討した結果, 現在の地表面温度の季節変化で熱収縮破壊が発生しうること (図 7), 高緯度ほど張力 (温度振幅) と地盤の脆性が増加するため, 多角形の直径も減少する (割れ目の間隔を小さくすることでひずみを解消する) ことを主張した。Mangold (2005) は, さらに粘性的挙動から弾性的挙動に変化する臨界粘性率 (Malloof *et al.*, 2002) を導入して熱収縮割れ目が達する深度を求めた。その結果,  $55^\circ$  より高緯度側で小型多角形土 ( $D < 40$  m) が卓越するのは, 緯度と含水率の組合せ, すなわち温度の季節変動の振幅と含水率が大きい地盤の存在で熱収縮破壊発生領域が決まることによると説明した。この形成条件は, Feldman *et al.* (2004) の全球水分分布図 (本特集号猿谷, 2016 の図 2 参照) では質量含水率 20% 以上の領域に相当する。

### 1-4) 乾燥収縮破壊の可能性

火星の全球規模で地温の季節変動による張力分布を解析した El Maarry *et al.* (2010) によると, 熱収縮で割れる多角形土の直径は最大で 75 m 程



度であり、一部の衝突クレーター底にみられる大型多角形土 ( $D = 100 \sim 200 \text{ m}$ ) は熱収縮では説明できず、むしろ地球の温暖砂漠の盆地底 (ブラヤ) にみられるような乾燥収縮割れ目と類似する。さらに El Maarry *et al.* (2013) は、大型多角形土は低緯度にも多く分布し、かつて存在した湖が干上がった後の乾燥収縮起源であること、とくに塩性土やスメクタイトを含有する粘質土が破壊に有利である点を強調した。この結果は、水分拡散と弾性理論を組み合わせたモデル計算とも整合する (El Maarry *et al.*, 2012)。

このように、直径  $100 \text{ m}$  を超える多角形土は乾燥収縮起源の可能性があるが、「中・高緯度にみられる直径  $50 \text{ m}$  以下の多角形土の多くが凍土の熱収縮起源である」という見解は、現時点では広く支持されているといえる。

## 2) 淘汰構造土

礫 (粗粒部) と土 (細粒部) のふり分けで生じる淘汰構造土 (sorted patterned ground) の直径は、地球上では多角形土より 1 桁小さいため、火星での報告例は少ない。MGS 期までは Mangold (2005) が MOC 画像で条線土状の縦縞模様が多角形土と共存することを指摘した程度であった。MRO 期になると、HiRISE 画像で数 m 規模の淘汰構造土まで判別されるようになり、大きさや構造の記載が進んでいる。Balme *et al.* (2009) は赤道付近 ( $4.5^\circ\text{N}$ ) において 200 個以上のストーンサークル (平均で  $D = 13.7 \text{ m}$ ) を発見した (図 8)。粗粒部は径  $1 \sim 2 \text{ m}$  の巨礫で構成される。比較的最近の洪水堆積物上に形成されていることから、火山活動ではなく周氷河起源の可能性が高いと指摘した。Gallagher and Balme (2011) は高緯度 ( $59^\circ \sim 79^\circ\text{N}$ ) の衝突クレーター内外の斜面に地面の融解を示唆する地形群 (淘汰構造土、小型岩屑ローブ、貝殻状凹地から流出する網状流跡) を抽出し、淘汰構造土をさらにストーンアイランド、網状土、条線土に細分した (表 1)。ストーンアイランドでは礫集積部を細粒土がとり囲むのに対し、網状土では多角形状に配列した礫が細粒土をとり囲む。これらの構造土は地球の永久凍土地域にみられるもの

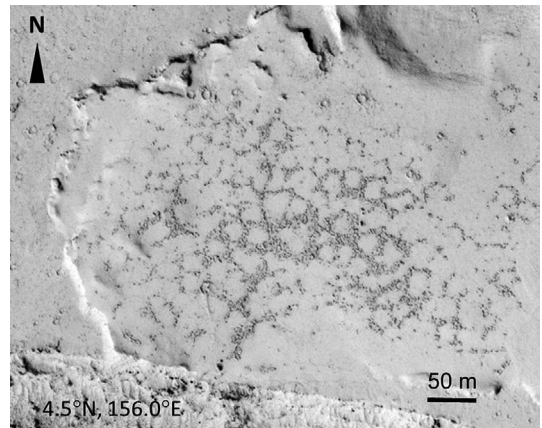


図 8 火星・エルシウム平原の旧河川流路脇にみられる淘汰構造土 (Balme *et al.*, 2009 が記載した事例)。

Fig. 8 Sorted stone circles alongside a flood-carved fluvial channel in the Elysium Planitia region of Mars (described in Balme *et al.*, 2009). HiRISE image PSP\_004072\_1845. Image credit NASA/JPL/University of Arizona.

より 1 桁大きく、ストーンアイランドでは直径  $15 \sim 30 \text{ m}$  の礫集積部 (礫径は  $2 \sim 4 \text{ m}$ ) が  $20 \sim 30 \text{ m}$  間隔で配列し、網状土は平均直径  $13 \text{ m}$  で中央が盛り上がる。傾斜地にみられる条線土では幅  $6 \sim 10 \text{ m}$  の粗粒部が平均  $17 \text{ m}$  間隔で配列する。画像の解像度を下回るサブメートル級の模様が存在する可能性も指摘された。

淘汰の原因として、過去の湿潤期での凍結融解説と現在の乾燥期での巨礫集積説が提唱された。Gallagher *et al.* (2011) は地球の北極地域のように淘汰構造土が多角形土や融解を必要とする他の地形 (ガリー、小型岩屑ローブなど) と同居することから、長期にわたる凍結融解や液体流動の発生期 (湿潤期) と熱収縮破壊の卓越期 (乾燥期) の繰り返しを提唱した。斜面でも地球と同様に下方に向かって条線土から礫質の小型岩屑ローブに変化する様子が認められるが、これも凍結融解による一連の地形として説明された。一方、Orloff *et al.* (2013b) は、現在でも礫の集積が進むメカニズムとして、熱収縮破壊と季節的なドライアイスの被覆の組み合わせを提唱した。すなわち、冬



に熱収縮で凍土が割れて開く際に地表をドライアイスが覆っていると、ドライアイスが礫を固定するために礫はもとの位置にとどまる。夏にドライアイスが昇華するときに割れ目がもとに戻り、解放された礫をわずかにトラフ方向に移動させる。その繰り返しによって次第に礫が割れ目の周辺に集積するという説である。ドライアイスは等温に保たれて収縮しないが、その下の凍土は冷却を続けて収縮すると説明されているが、これは現実的かどうか疑問が残る。地球上では、多角形土を覆う季節的な積雪は凍土と同時に割れる（例えば、Mackay, 1986）。

淘汰構造土の形成期に関しては、最近 500 万年間は融解が発生する気候条件にはなかったとされる（Kreslavsky *et al.*, 2008）ため、過去の湿潤期に形成された化石地形が保存されているとする見解が多い。例えば、10 Ma までさかのぼると、場所によっては現在より 40 ~ 60 K 暖かい条件が頻発し、地中で凍結攪拌が発生した可能性がある（Balme *et al.*, 2009）。また、最近 100 万年間でも地軸の傾斜が 40° 近くまで達した時期（図 2 参照）には、夏に 50 cm 以深まで 0℃ 以上になり、湿潤・温暖な気候下で凍結融解が発生したとする見解もある（Mangold, 2005）。高緯度では、現在の低温乾燥条件下でも融点が 240 K 前後の塩水（brine）や水和鉱物（hydrated mineral）では相変化（凍結融解）が起こりうるので、一連の周氷河地形が広域で活動中である可能性も指摘されている（Gallagher and Balme, 2011; Gallagher *et al.*, 2011）。

### 3) ハンモック

地球のツンドラ地域の湿地帯では、底径（ $D$ ）が 0.5 ~ 1.5 m、周囲からの高さ（ $H$ ）が 0.2 ~ 1 m の植被ハンモック（アースハンモック）や中央の土が露出するマッドボイルが広範囲にみられる。マッドボイルはハンモックに比べて高さは同等だが底径が大きく（最大 3 m 程度）、より扁平な断面形をもつ。これらは不淘汰円形土に含まれ、その形成には植生と凍結攪拌の相互作用が関わっている（例えば、Walker *et al.*, 2008; 詳しくは松岡・池田, 2012 のレビューを参照）。植生の

ない火星では、これらの地形は形態や色調のコントラストから認定されている。MOC 画像で地球上のハンモックより 1 桁大きい（ $D = 10 \sim 30$  m）ハンモック状の表面が観察されており、しばしばバスケットボール地形（basketball terrain）として記載されてきた。ハンモックは LDM の分布を反映して北半球の 30°N 以北に分布し（Kreslavsky and Head, 2002; Head *et al.*, 2003）、多角形土と近接して分布する例や、貝殻状凹地内に分布する例が認められる（Lefort *et al.*, 2010）。

系統的な分布調査もなされている。Machado *et al.* (2012) は画像の解像度を上げる超解像度技術を開発し、MOC や HiRISE の画像からハンモックやマッドボイルを自動的に抽出した。50° ~ 70°N の低地でハンモックと多角形土を記載した Kortenienmi and Kreslavsky (2013) によると、ハンモックはより低緯度側に多く、幅 10 ~ 20 m のマウンドと幅 3 ~ 10 m のトラフで構成され、高緯度ではマウンド中心部に巨礫が集積する例がある。ただし、ハンモックの形成プロセスに関する議論はほとんどなされていない。また、これらのハンモックの一部は Levy *et al.* (2009) の分類による SUB 型ないし PT 型の多角形土と混同されている可能性もある。

## IV. 凹凸地形

### 1) 凍結丘（ピンゴ）

本特集号の野口・栗田 (2016) 論文で記述されているように、火星における小型の孤立丘（直径 1 km 以下）として、衝突クレーター、火山（火砕丘やタフリング）、泥火山、ルートレスコーン（溶岩流が湿地を覆った際のマグマ-水蒸気爆発で形成）、侵食残丘、凍結丘（ピンゴ）などが認定されている。周氷河性の凍結丘の研究では、第一に他の孤立丘と区別する基準の設定が課題である（De Pabblo and Komatsu, 2009）。

最大公約数としての火星のピンゴの認定基準は、①孤立丘の大きさが直径数 100 m 程度で高さ数 10 m 程度、②断面形が台形ではなくドーム形、③頂部に膨張クラック（隆起による伸張亀裂）または凹地（氷の消耗による陥没）の存在、④あ

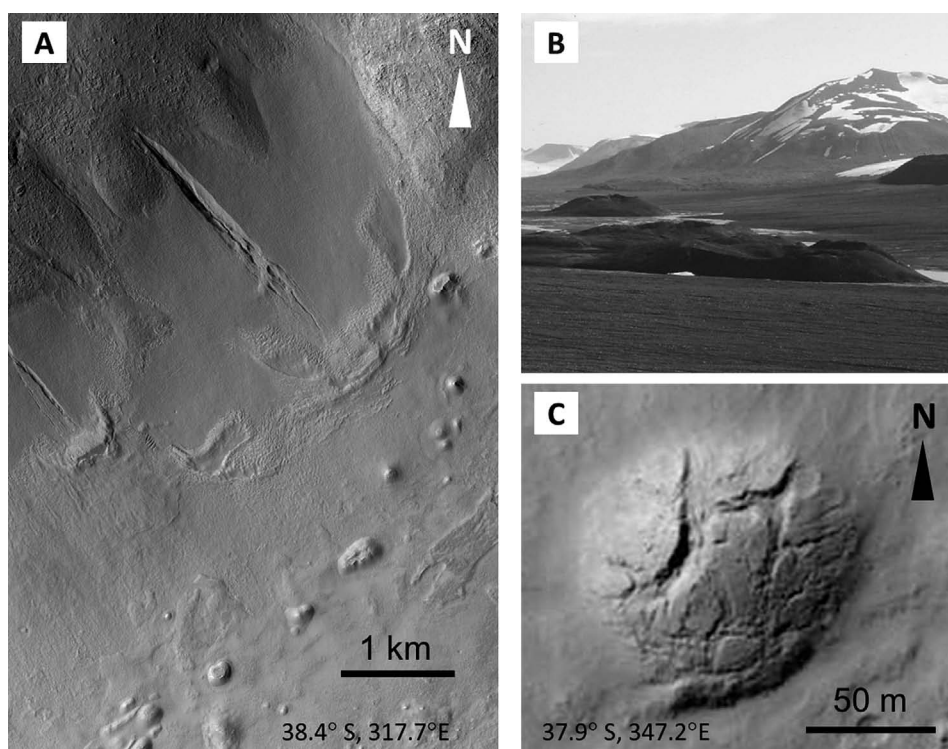


図 9 ピンゴと認定された孤立丘。(A) 火星・アギーレ盆地の斜面基部に分布する孤立丘群 (Soare *et al.*, 2014b による記載あり)。ガリーやロープの下に位置する。(B) A と類似した立地条件にある地球上 (スバルバル) の開放系ピンゴ。(C) 火星のクレーター底にみられる頂部が割れた孤立丘の例 (Dundas *et al.*, 2010 による記載あり)。

Fig. 9 Mounds identified as pingos. (A) Isolated mounds produced at the base of slopes along the Argyre basin, Mars (described in Soare *et al.*, 2014b). (B) Open-system pingos in Svalbard, a terrestrial counterpart of A. (C) A fractured mound on the floor of a Martian crater (described in Dundas *et al.*, 2010). HiRISE images: (A) ESP\_020720\_1410, (C) PSP\_002514\_1420. Image credits NASA/JPL/University of Arizona.

る程度まとまった分布、の 4 点である (例えば, Burr *et al.*, 2009; Dundas and McEwen, 2010; 図 9)。この基準に合う地形に関して、平地では湖水が干上がった後に (閉じた系のなかで) 成長する閉鎖系ピンゴ (closed-system pingo), 斜面基部, 盆地底, 氷河 (端堆石) の前面では永久凍土下の地下水流動と被圧地下水の押し上げによって成長する開放系ピンゴ (open-system pingo) が認定されている (Soare *et al.*, 2005, 2014b)。また, 火山起源の地形とは頂部クレーターの深さや溶岩状の流出物の有無で区別されるが (Soare *et al.*, 2014b), 台形の孤立丘 (平頂丘) は被覆層の侵食残丘の可能性が高いとされる (Dundas

and McEwen, 2010)。

2005 年以降, MOC や MOLA のデータが利用されるようになり, 上の基準に基づくピンゴの認定・記載が進展した。まず, ユートピア平原の衝突クレーター底での R.J. Soare らの一連の詳しい分析を紹介する。Soare *et al.* (2005) は 65°N で閉鎖系ピンゴを認定し, 最新の高地軸期に湖の形成と消滅があり, それに続く永久凍土形成時に氷核が成長して隆起したと解釈した。さらに, Soare *et al.* (2013a) はユートピア平原の高緯度側 (64° ~ 69°N) にあるクレーター ( $D = 10$  km) の底で 5 つの閉鎖系ピンゴ ( $D = 200$  m 前後,  $H = 15$  m 前後) を抽出した。付近に永久凍土の

指標となる多角形土もあることから、侵食残丘や衝突による形成よりもピングの可能性が高いと考えた。そして、60°N以北では、一部のクレーター内に氷のアイスドーム（平均で厚さ0.6 km、体積300 km<sup>3</sup>）が現存する（Conway *et al.*, 2012）ので、「①最近の高地軸期に広範囲でアイスドームが出現、②それが融解して湖水とタリクを形成、③その後の乾燥化による湖水の消滅と永久凍土発達に伴ってタリクの被圧、④貫入氷の形成により隆起」というシナリオを提唱した。一方、同平原低緯度側（30°～45°N）のクレーター内にみられる孤立丘群（ $D > 100$  m,  $H = 10 \sim 50$  m）については、①高いアルベドから構成物がレス起源と考えられる、②馬蹄形や三日月形の平面形を示す孤立丘群の配列から卓越風による侵食が想定される、等の特徴からレスの侵食起源が有望とされた（Soare *et al.*, 2013b）。ピングの認定には個人差もある。Burr *et al.* (2009) は各緯度帯にみられる孤立丘について、高緯度ではLDMの侵食残丘（側面に層状堆積物がみられる）か火山性の平頂丘が一般的で、低緯度では土石流や火山性起源が多く、北半球中緯度（ユートピア平原）だけに閉鎖系ピングの可能性が高い地形があると指摘した。これは、高緯度ほど閉鎖系ピングの発達に有利な条件にあるとするSoare *et al.* (2013a) と大きく異なる見解である。

斜面基部や狭い谷底に存在する孤立丘群には開放系ピングの可能性がある。Soare *et al.* (2014b) はアルギレ盆地（37°S）の斜面基部のガリーや舌状ロープの下に孤立丘群（ $D = 90 \sim 140$  m,  $H = 11 \sim 25$  m）が多数分布することを発見した（図9A）。水の供給源としては氷河融水、永久凍土地下水、構造線に沿う地下水供給の3経路が想定された。新鮮な形態を呈し、頂部にクラックや凹地をもつものが多いので、現成の可能性も指摘された。

De Pabblo and Komatsu (2009) はMOCとバイキング搭載のTHEMISの画像、そしてMOLAによるDEMデータを使用して、ユートピア平原（11°～55°N）で1129個の孤立丘を抽出し、形態・分布・構成物質を分析した。形態からドー

ム、コーン、リングの3種に分類された。3種の孤立丘は群をなす場合が多く、またドーム、コーン、リングの順に直径が大きくなる。彼らは、これらの特徴から、孤立丘の大半が開放系ピングであり、3種の形状はその発達段階を示し、隆起するドーム、頂部が割れたコーン、そして陥没形のリングと規模を拡大しながら変化すると結論した。地下水の起源としては、地下の熱源（マグマ）による凍土の融解が想定された。

Dundas and McEwen (2010) はHiRISE画像で全球的なピングの分布を分析した。頂部が割れた孤立丘（図9C）を抽出し、両半球中緯度で30°～45°に分布がほぼ限定されることを示した。割れ目があっても平頂丘の場合など侵食残丘と解釈される例もあるが、とくに南半球の衝突クレーター底にあるピングは地球の開放系ピングの特徴に近い。簡単な昇華モデルによると、現在の気温（210 K）では高さ数10 mのピングは10万年は維持される。

## 2) サーモカルスト

周囲に高まりをもたず衝突クレーターと異なる浅い陥没地形は、永久凍土の融解によるサーモカルスト凹地の可能性がある。解像度の低いバイキングの画像でも規模の大きい（kmスケール）の凹地がサーモカルスト起源として記載された（Costard and Kargel, 1995）。また、低緯度に分布する凹地について、過去の温暖期に河川洪水か氷河作用で含水率の高い土砂が広範囲に堆積し、その後の融解で陥没したと説明された（Costard and Baker, 2001）。

MGS期以降、MOCやHiRISE画像の詳しい分析により、貝殻状凹地（scalloped depression）がサーモカルスト地形として記載されるようになった（例えば、Soare *et al.*, 2007; Morgenstern *et al.*, 2007; 表1）。ユートピア平原やエリシウム平原など中緯度（南北ともに30°～70°）のLDMには、周囲に高まりのない貝殻状凹地が多角形土とともに分布する。凹地の直径は数10 m～数kmと規模の差が大きく、小型は南北に長い長円形、大型は円形に近い。凹地は南北非対称形を示し、極向斜面がより急（5°前後）、赤



道向斜面がより緩やか ( $2^\circ$  前後) で、底は平坦であることが多い。一方、南北非対称性の原因と凹地発達方向、陥没の原因、ピングや多角形土との関係については以下のように異なる解釈があり、論争が続いている。

南北非対称性と発達方向については真逆の見解がある。当初の見解は現在の火星環境に基づいている。すなわち、「赤道向きで日射量が大きく昇華・蒸発を受けやすいために、風による細粒土の飛散や斜面崩壊で緩傾斜化が進み、極側へ後退する」という説であり、シベリアのエドマ層に生じたサーモカルスト凹地に類似する形成プロセスである (Morgenstern *et al.*, 2007; Lefort *et al.*, 2009)。対抗する新しい見解は、「最近 10 Ma 間の高地軸期 (とくに離心率が大きく夏が近日点の場合) に極向斜面が日射による昇華を受けやすく崩壊や地すべりが発生し、その滑落崖が赤道側に後退する」という説である (Ulrich *et al.*, 2010; Séjourné *et al.*, 2011)。Séjourné *et al.* (2011) は極向斜面側だけに過去の移動塊を示唆する弧状の凹地列が存在し、その凹地内にある多角形土は後述のように赤道側ほど新鮮な形態 (中央低下型) を示すこと、そして凹地は赤道方向だけでなく東西方向にも拡大して合体する場合があることを指摘した (図 10)。

陥没原因には融解説と昇華説があり、これは形成期の解釈と関連する。Soare *et al.* (2007) は過去の温暖湿潤期に永久凍土が広範囲で融解して地球同様のサーモカルスト凹地が生じ、湖水の出現と排出が起こり、それに続いて多角形土やピングが発達するという、一連の地形変化を提案した。その後の乾燥化に伴う昇華による陥没も指摘されている (Lefort *et al.*, 2009)。しかし、貝殻状凹地周辺に融解を示す地形 (水路や多角形土のトラフを起源として凹地が発達するなど) が見あたらないことや、発達方向の点からも高地軸期の日射量増加に伴う昇華を陥没の原因として重視する意見も多い (Ulrich *et al.*, 2010; Zanetti *et al.*, 2010; Séjourné *et al.*, 2011)。

貝殻状凹地の内外には多角形土が分布することが多い。北半球の貝殻状凹地の底、とくに南端

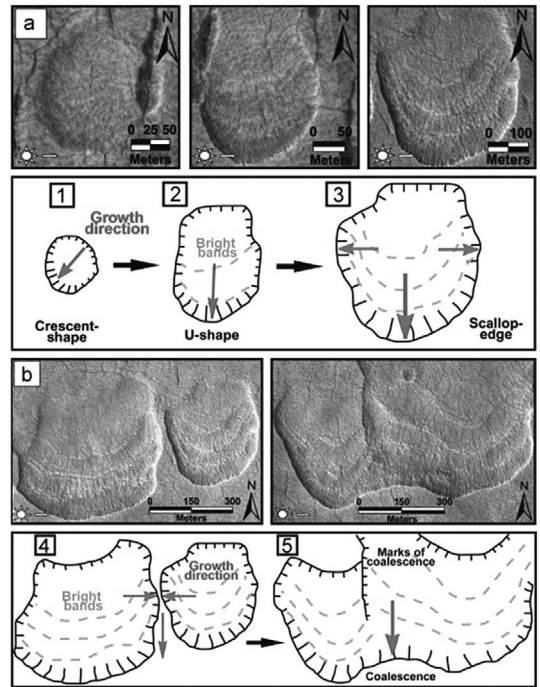


図 10 火星の北半球における貝殻状凹地の地形発達 (Séjourné, 2011)。小規模で円形の凹地が南北非対称の楕円形へ変化する。その後、一部では東西方向に合体する。赤道側への後退を示唆する弧状の帯が特徴的である。

Fig. 10 Morphological evolution of scalloped depressions in the northern hemisphere of Mars (Séjourné, 2011). Evolution runs from small circular depressions to large, oval and asymmetrical depressions with the dominant direction of elongation N-S. Eventually, the depressions coalesce, resulting in a small elongation in the E-W direction. Note bright arcuate bands indicating equatorward retreat. Image credits NASA/JPL/University of Arizona.

付近には小さい六角形の中央低下型 ( $D = 5 \sim 10$  m) が集中し、北に向かって中央上昇型に変化する。Séjourné *et al.* (2011) によると、これは湿潤環境から乾燥環境への変化、すなわち昇華によるトラフの陥没の進行 (多角形土の化石化) を示す。一方、西ユートピア平原の  $45^\circ\text{N}$  付近の貝殻状凹地と多角形土の相互関係を解析した Haltigin *et al.* (2010) は、凹地内では標高の低下に伴い多角形土の交点数が増加する、言い換え



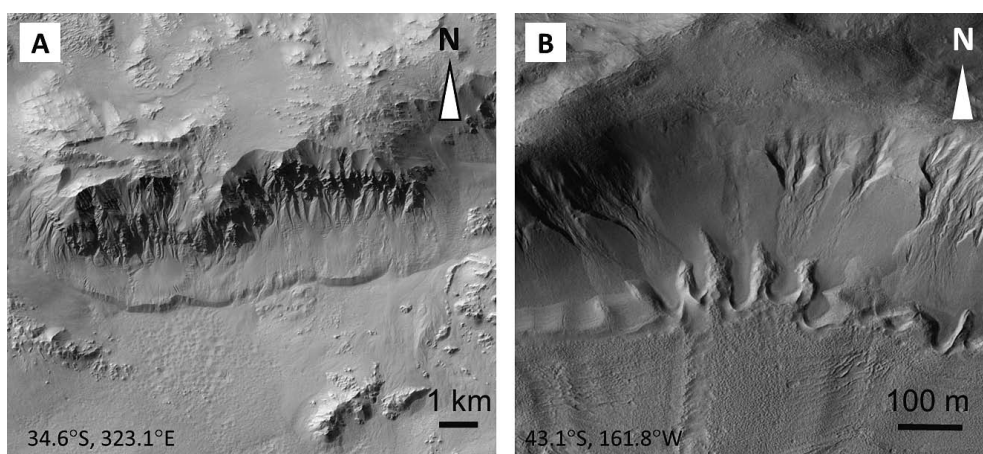


図 11 火星の衝突クレーター内にみられる大型岩屑ロープ (lobate debris aprons) の例. (A) ガリーの発達する崖錐斜面基部から張り出す岩石氷河状のロープ. (B) クレーター斜面基部にみられるモレーン状リッジをもつロープ.

Fig. 11 Lobate debris aprons developed in Martian impact craters. (A) Possible rock glaciers developed at the foot of a gullied talus slope. (B) LDA fringed by moraine-like arcuate ridges, developed at the foot of a crater slope. CTX images: (A) P15\_006756\_1454, (B) B06\_011916\_1367.

れば、「凍土の衰退による地盤沈下とともに、多角形土の化石化ではなく再分割が進む」という異なる見解を述べた。

## V. 舌状地形

### 1) 粘性流地形：岩石氷河とその疑似地形（岩屑被覆氷河，氷河痕跡）

火星表面では、衝突クレーター内外の斜面の基部やそれ以外の構造的または侵食性山地斜面の基部から、凸型の横断面とロープ状の末端をもつ堆積地形“lobate debris apron”（以下、LDAと表記）が低地側に張り出すことがある（図 11A）。これらは粘性流地形（viscous flow features）とされており、クレーター噴出物（ejecta）の先端部、岩石氷河（rock glacier）、岩屑被覆氷河（debris-covered glacier）、山体崩壊堆積物などが含まれる（例えば、Pierce and Crown, 2003; Head *et al.*, 2005; Weiss and Head, 2014）。表面に弧状のリッジ列や先端部にターミナル・モレーン状の高まりをもつ LDA もある（図 11B）。LDA に近接して、縦縞模様を呈し谷を埋積する地形“lineated valley fill”（以下、LVF と表記）

がみられることがある（Levy *et al.*, 2007）。

LDA や LVF には低解像度の画像でも視認できるキロメートル規模の地形が多い（図 11）ので、バイキング計画の時代に記載された“fretted terrain”（波状地）にはじまり、現在に至るまで研究例は多い。Squyres（1978）は波状地を氷で充填された岩屑の粘性流動、すなわち周氷河性の「岩石氷河」として説明した。その後、地球上における岩石氷河に関する論争（松岡, 1998）と同様に、永久凍土起源（周氷河性岩石氷河）から岩屑被覆氷河、そして氷河の遺物まで、周氷河説と氷河説が錯綜している（澤柿ほか, 2005）。MGS 期以降は、MOC と MOLA データによる断面形解析や MRO の SHARAD 地中レーダによる内部構造解析など、三次元での形態・構造の議論も進展した。本節では、隕石衝突時の噴出物の流動による地形、崩壊または土石流堆積物の可能性の高い地形は対象外とし、長さ（ $L$ ）が数 km、高さ（ $H$ ）が数 100 m 程度で岩石氷河や岩屑被覆氷河の可能性のあるロープ（表 1）の研究動向について概観する。平面スケールで 100 m 以下の小型岩屑ロープについては次節で述べる。

### 1-1) 周氷河説

Milliken *et al.* (2003) は全球規模で系統的な分布調査を行った。MOC (解像度<10 m/pixel) の画像 13,000 枚を調べて、146 枚の画像で粘性流地形を認定し、それらがガリー同様に南北中緯度 (40° 付近) の極向斜面に卓越することを明らかにした。また、MOLA の標高データに基づく傾斜と氷の流動則 (累乗則) から剪断応力を計算し、厚さ 10 m の凍土層 (砂塵と氷の混合物) が現在の規模に達するまでに  $10^5 \sim 10^7$  年の形成時間を要することを指摘した。

S. van Gasselt らは形態・構造・形成期に関する総合的な研究を行った。Hellas Montes 火山 (39°S) の LDA ( $L = 30$  km) の表面形を分析した van Gasselt *et al.* (2007) は、火山斜面の大崩壊 (1 Ma 頃に発生) 起源の堆積物が長期の遅いクリープで変形し、先端に弧状のリッジ群を生成したという周氷河説を提唱した。van Gasselt *et al.* (2011) は、MEX のステレオカメラ (HRSC) と MRO の Context カメラ (CTX) データに基づいて Tempe Terra (40° ~ 55°N) の侵食性山地基部にある LDA ( $L = 2 \sim 6$  km,  $H = 100 \sim 600$  m) の形態と構成物を分析し、またクレーター計数法で形成年代を推定した。その結果、山地の長期にわたる崩壊侵食だけでは LDA の規模は説明できず、200 Ma 以降の高地軸期に周期的に供給されてきた氷に富む被覆物質 (LDM) が主体を占める岩石氷河であると結論した。

LDA の形成機構については、氷や氷・岩屑の混合物のレオロジーからのアプローチが多い。Mangold and Allemand (2001) は MOLA の標高データから作成した LDA の断面形が氷の流動則から計算した断面形とよく適合することを示した。また LDA の体積を説明するには、落石だけによる岩屑の供給では不十分で、大規模な崩壊による多量の供給が必要であることを主張した。さらに Mangold *et al.* (2002) は、氷・岩屑混合物の三軸定荷重試験に基づいて、火星で LDA が形成される最低含水率を推定した。263 K に保った低温室内で含水率を 25 ~ 48% の間で変化させて試験を繰り返した結果、含水率 28% 以下あた

りに脆性-塑性境界があることが判明した。すなわち、LDA の高さから判断すると永久凍土は深さ 1 km 程度で変形しているようにみえるが、この底部の含水率が 28% を超えないと変形を生じないと説明した。Mahaney *et al.* (2007) は MOC 画像上で LDA を探査した結果、30° ~ 47° S の区域に分布が集中することがわかり、過去の寒冷湿潤気候下での形成説を採用した。また氷の流動則から発達過程をモデル化し地球の条件と比較したところ、地球の方が重力が大きいため長く薄いロープになることがわかった。

### 1-2) 氷河説

崖基部にある LDA を除き、何列もの弧状リッジをもつ舌状ロープ、山麓に広がる巨大なロープ、モレーン状の高まりで縁取られた陥没ロープなどは氷河起源とする見解が最近増加している。周氷河性岩石氷河を否定するにあたり、ロープに見合う体積の岩屑供給源の欠除や、付近に崖錐がみられないことなどが根拠とされている (Pearce *et al.*, 2011)。

氷河起源のロープを総合的に研究した Head *et al.* (2005, 2010) は、ME の HRSC ステレオ画像を中心とする火星に関する各種データ、地球上の寒冷氷河の特徴を総括し、北半球中緯度各地の LDA と LVF を対象に、内部構造、両地形の関係、流動方向、潤滑剤、起源 (岩石クリープ、斜面崩壊、岩石氷河、岩屑被覆氷河)、形成期などを分析した。地球のドライバレーの岩屑被覆氷河や氷河起源の岩石氷河との形態の類似性、昇華起源とみられる多数の窪みと高まりの存在、融解による氷の消耗が皆無に等しいドライバレーでは昇華ティルの下で氷体が数百万年間保存されることなどを考慮して、次のシナリオを提唱した。①早期アマゾニアン紀 (およそ 3 ~ 1 Ga) に降水起源の雪氷が中緯度の高地や谷に広範囲に発達し、氷河システムを形成した。②後期アマゾニアン紀 (およそ 1 Ga 以降) になると、谷壁起源の昇華ティルに覆われた氷体が岩屑被覆氷河システム (山岳寒冷氷河) として流動した。氷河の流動は高地軸期 (約 35°) に砂塵の多い環境下で起こった。③現在でも表層下に大量の水が保存されている。

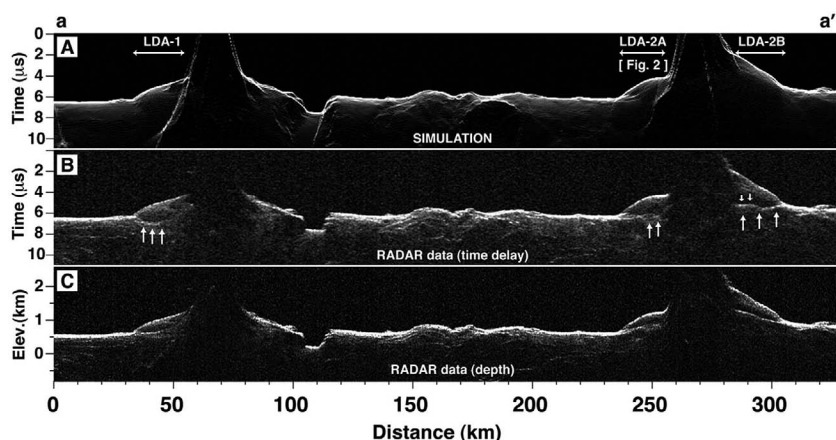


図 12 衛星搭載レーダ SHARAD による火星の大型岩屑ロープの断面構造解析例 (Holt *et al.*, 2008). (A) 地表での散乱で起こる反射のシミュレーション. (B) 電磁波の到達時間計測結果 (SHARAD orbit 6830) で検出された地下の反射面 (矢印). (C) 含水率を仮定して B のデータを深度に換算した断面構造.

Fig. 12 Internal structure of large lobate debris aprons analyzed with Mars Reconnaissance Orbiter's radar (SHARAD). (A) Simulated surface echoes (clutter). (B) Subsurface echoes identified from radar returns (vertical arrows) in one-way travel time (from SHARAD orbit 6830). (C) Radar data converted into depth, assuming that water-ice composition provides the internal structure. (Holt *et al.*, 2008)

詳しい形態・構造の解析も進んでいる。Levy *et al.* (2007) は波状地が卓越する Nilosyrtis Mensae 地域 (30° ~ 35°N) の LDA と LVF について、両者の層序・形態・構造上の関係を調べた。地形を広域型 LVF, 積層型 LVF (山麓氷河状), 小規模積層型 LVF, LDA の 4 形態に分類し、それぞれの特徴と重なり方を記載した。積層型とは、支谷からより大規模な LVF に覆い被さる地形を指す。Levy らは、これらの 4 形態は岩屑被覆氷河による氷河作用の異なる段階を反映しており、乾燥化とともに次第に活動が縮小した結果であると考えた。すなわち、広域型 LVF 形成後、氷の供給が減少するとともに含水率の高い LVF の昇華による衰退が進み、次第に岩屑を多く含む氷河が増加して LDA が前進するようになったという説明である。Holt *et al.* (2008) は Hellas 盆地東縁 (40° ~ 45°S), Plaut *et al.* (2009) は Deuteronilus Mensae 地域 (41°N) において、MRO の SHARAD 地中レーダ (垂直解像度 15 m) の計測に基づく山地基部に張り出す LDA の内部構造を解析した (図 12)。両者ともに、深さ数 100 m に検出された反射面が LDA の

底面を示し、内部は岩石物質の少ないほぼ純粋な氷核からなることを指摘し、寒冷氷河が岩屑被覆で昇華から保護されるという Head *et al.* (2010) の見解を支持した。

低緯度にみられる古い地形に関する記載もある。Hauber *et al.* (2008) は南北 30° 以内の低緯度には、メサや卓上地などの古期侵食山地をとり囲む凹地が存在することを指摘した。その外観から 1 Ga 頃に現在と異なる気候条件下で LDA (氷と碎屑の混合物) が発達し、その後昇華やデフレーションにより陥没帯 (幅数キロ、深さ 50 m) が形成されたと主張した。Fairén *et al.* (2014) はゲール・クレーター (4.5°S) の HiRISE および HRSC 画像データを解析し、クレーター北側には岩石氷河、南側にはモレーンやエスカーの存在を認定した。そして、後期ヘスペリアン紀以降 (およそ 3.5 Ga 以降) の湿潤環境下で氷河や永久凍土 (地中氷) が広範囲に存在し、岩石氷河も形成され、その後の氷河の融解で谷や湖が形成され、さらに液体の水や地下水の消失後の乾燥環境下で多角形土や砂丘が発達したというストーリーを提案した。



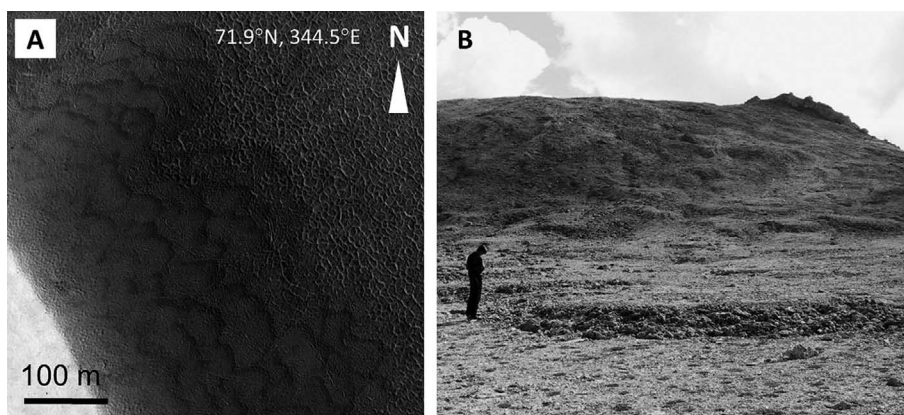


図 13 (A) 火星の衝突クレーター内斜面（傾斜 25°）にみられるロープ地形と小型多角形土（Johnsson *et al.*, 2012 による記述あり）。(B) スイスアルプスの石灰岩斜面に発達する礫質ソリフラクション・ロープ。

Fig. 13 (A) Small-scale lobes and polygons on a slope (inclination 25°) observed in a Martian impact crater (described in Johnsson *et al.*, 2012). HiRISE image: PSP\_010077\_2520. Image credits NASA/JPL/University of Arizona. (B) Gravelly solifluction lobes that developed on a limestone slope in the Swiss Alps.

以上を総括すると、岩屑供給域の地形（奥行きのある谷頭か直線的な岩壁か）、流動域の位置（谷底か崖錐基部か）、流動体の表面形（縦長か幅広か、圧縮性リッジかモレーン列か）、流動体の内部構造（氷と岩屑の比率）などの情報を組み合わせ、氷河起源か周氷河起源かが判断されているが、両者を区別する明確な基準がないために、同じ対象に異なる解釈がなされる場合もあるようである。

## 2) 粘性流地形：小型岩屑ロープ

最近の火星の周氷河地形研究で注目すべき報告の 1 つは、飽和に近い土の融解を前提とするソリフラクション・ロープに酷似する新鮮な小型岩屑ロープが見つかったことである。Mangold (2005) および Gallagher *et al.* (2011) による高緯度におけるロープ群の記載に引き続き、Johnsson *et al.* (2012) は 50°～70°N にわたりクレーター斜面を中心として HiRISE 画像上で小型ロープの分布を精査した。とくに 2 つのクレーターで詳しい分布・形態の分析を行い、地球上のソリフラクション・ロープと比較した (表 1)。クレーター上部の北西向きと北東向きの傾斜 15°～25°の斜面にロープが分布し、一部は下端が礫で縁取られた stone-banked の形態を示す (図 13)。

ロープの大きさは幅 20～50 m（一部で幅 50～200 m）、長さ 50～70 m、末端高 1～5 m で、斜面下方に向かって規模が増大する。条線土、背後に移動痕跡（溝）をもつ ploughing boulders など、ほかの周氷河地形との共存も認められ、多角形土の発達する地表を覆うように下方に延びるものもある。ロープの高さから、活動層厚が 1 m 程度に達した時期に積雪の融解水の浸透によって活動層が変形したこと、さらにそのような条件は最近数百万年間の温暖期に発生したことが推定された。

これらのロープが、活動層底面からの上方凍結によって底面付近にアイスレンズが形成され、夏にそれが融解して活動層全体が動く「プラグ流」形式のソリフラクション (Matsuoka, 2001) が繰り返し発生して形成された可能性はあるだろう。

## VI. 凍結融解に伴う線状地形

斜面にみられる線状地形については本特集号の Parkner (2016) で詳述されるが、ここではほかの周氷河地形との関連が深い、凍結融解起源の可能性がある線状地形について、形成条件に関する要点を述べる。対象となる地形には、明瞭な溝を伴うガリー (gully; Malin and Edgett, 2000) と



溝が不明瞭な縦縞模様（周囲より暗色ないし明色を呈する）があり、後者には、より大型で再現性のないスロープ・ストリーク（slope streak）と小型で毎年出現を繰り返す再発性縞模様（recurring slope lineae）の2種がある（McEwen *et al.*, 2011）（表1）。

### 1) ガリー

ガリーは発生域（alcove）・流送域（channel）・堆積域（fan）で構成される。発生域での幅は100～700 m、全長は1 km 以下が多いが、地球上のガリーと比べると一般に大規模である。ほかの周氷河地形同様、ガリーの分布は緯度と方位に依存する。Dickson *et al.*（2007）およびDickson and Head（2009）による全球規模での分布解析によると、ガリーは南北両半球ともに緯度30°～42°の極向斜面に集中し、北半球高緯度では70°付近にも分布のピークがある。ガリーの大半は傾斜20°を超える斜面で発生し、ほかの地形を切り、新鮮な形態を示すものが多い。以上の特徴から、ガリー形成には第一に日射と融解水（大気起源の水氷か雪）の存在が必要とされ、最近の高地軸期の突発的融解による発生が重視された。ガリーの溝は雪氷の保存庫となりうるので（Dickson *et al.* 2015）、ガリーの下方はピングなど水を必要とする周氷河地形の形成に有利である（Soare *et al.*, 2014b）。

現在の環境下でのガリーの地形変化も確認されている。Dundas *et al.*（2012）は70°Sにある砂丘に生じたガリーと衝突クレーター壁のガリーを対象に、撮影時期の異なるHiRISE画像でメートルスケールの地形変化を追跡した結果、現在も成長中のガリーがあるのをみつけた。彼らは、この地形変化はおもにドライアイスの季節的な凍結融解で説明できること、そして塩水の融解や地下水浸出、あるいは過去の温暖期における形成を想定する必要がないことを強調した。水質に関しては、塩水の融解量は小さいのでガリー形成には至らないと考えた。

### 2) そのほかの縦縞模様（スロープ・ストリークと再発性縞模様）

スロープ・ストリークは現在も頻発する斜面

の縞模様（幅<数100 m、長さ<数km）である。HiRISE画像に基づいて詳細な分析を行ったKreslavsky and Head（2009）は、ストリークが①低緯度に特異的な現象である、②明るい砂塵からなる地表に出現することが多く、従来は乾燥岩屑流起源（例えば、Treiman, 2003）とされてきたが融解説が妥当である、③高濃度の塩化物（CaCl<sub>2</sub> または FeCl<sub>3</sub>）の季節的融解と浸透フロントの斜面下方への流下によって形成された、と述べた。さらに、この「湿潤流」の発生条件は圧力と温度に依存するという前提に立って、地中の粒子間を埋める高濃度の塩水が融点を超えて流れ出す臨界条件を図示した。

再発性縞模様は異なる季節のHiRISE画像解析によって発見された。McEwen *et al.*（2011）は中緯度（32°～48°S）の赤道向急斜面（傾斜25°～40°）上に出没する小規模で暗色の再発性縞模様（幅0.5～5 m、長さ<数100 m）を追跡した。RSLは基盤岩直下から発生し、暖候期に次第に斜面下方に延びる（最大速度20 m/day）が、寒候期には消滅する。湿潤なため暗色を呈し、流れが止まると蒸発する。彼らは地表に浸出した塩水の流動で説明したが、塩水の起源は不明である。McEwen *et al.*（2014）の続報では、赤道付近のマリネリス溪谷での再発性縞模様（幅1～20 m）の分布が追加され、斜面が太陽側を向く季節に最大成長し、間欠的な塩水の流れに関連することが指摘された。規模の点では、地球上のガリーに近い。最近、MRO搭載の赤外線分光器により、RSLの暗色部でMgやNaの過塩素酸塩（凍結点206～236 K）が広く検出され、塩水の流動起源である可能性が高まった（Ojha *et al.*, 2015）。

### 3) 室内モデル実験

ガリーやスロープ・ストリークを火星の条件を模した低温・低圧実験室で再現する試みもはじまった。Conway *et al.*（2011）は、低温・低圧（-20℃, 7 hPa）の室内（直径1 m、長さ2 m）に傾斜14°の土槽を設置し、3種の物質（細粒土、中粒土、碎石）を敷き詰めて、その上に水を流して斜面侵食を発生させるという実験を行った。そ

して、常温・常圧の地球条件（+20℃, 1000 hPa）や常温・低圧条件（+20℃, 7 hPa）とも比較した。その結果、低温・低圧下では水は不安定なため、凍結と沸騰がおもなプロセスとなり、地球条件と同等以上の侵食が発生した。常温・低圧下でも地球条件よりも侵食速度は大きかった。この結果について、彼女らは、凍結層や沸騰で生じる気泡が下層への浸透を妨害したために水の流動速度が増加し、表層物質の移動速度・流下距離も増大したと説明した。そして、火星上での地表流侵食や土石流に関して、底面凍結と低圧（気泡発生）の効果を考慮する必要を強調した。実験の続報（Conway *et al.*, 2014）では塩水の効果が検討された。塩水（濃度 0, 10, 25% の  $\text{MgSO}_4$  水溶液）を使った低温・低圧下での実験で、塩水は低温下での安定性が高い（水より浸透しにくい）ため、凍結層上の土砂の流動速度・侵食量が增大することが示された。「火星のような低温・低圧条件が地表流や土砂侵食発生に不利にならない」という結果は注目される。

## VII. 総 括

21 世紀になり、高解像度画像や地形の三次元数値情報、地表の環境条件や表層物質等に関する観測データが急増したことにより、火星の地形に関して取得可能な情報量は、地球上の踏査困難な場所と比べて遜色ないレベルに達した。一部では地上での無人探査情報も加わることで、衛星観測結果が裏づけされるようになった。これらの観測技術の進展や情報の質・量の加速的な増加により、メートル規模の微地形に至るまで、周氷河地形の理解は最近 10 年間に格段に進歩した。しかし、火星上での観測・調査には制約が大きいというのに、地球上でも未解決の問題が少なくないために、地形の認定や成因に関しては、研究者間での合意形成が進み信頼度の高い知見から、異論が多く課題が山積している対象まで入り交じっているのが現状である。最後に、本稿で対象とした周氷河現象に関して、より確実性の高い知見、未解決の問題、そして今後検討すべき課題についてとりまとめる。

（1）高緯度では、薄く乾燥した表土の下に、 $\text{H}_2\text{O}$  の氷に富む凍土ないし氷核（LDM）が広範囲に存在するのはほぼ確実である。氷の融解が起こりにくい現在の環境において、表土に保護された LDM の氷は非常に遅い速度で昇華により消耗しているようだ。LDM で構成される地表には、過去の高地軸期の温暖湿潤環境、一部は現在の乾燥寒冷環境において、各種の周氷河地形が形成され、一部は変形を受けながら長期にわたり保存されてきたらしい。

（2）直径 50 m 以下の多角形土の多くは、冬季の冷却で LDM の凍結地盤が繰り返し割れて形成されたといえそうである。割れ目に砂塵が落ち込んでサンドウェッジ（凍土の場合）、あるいは割れ目周囲の氷の昇華による表土の落ち込みで昇華型ウェッジ（氷核の場合）を成長させている可能性が高い。その結果、中央部が平坦で高まった中央上昇型の多角形土になりやすい。現在でも急冷が起こる条件があれば、成長は続いているだろう。過去の温暖湿潤期には、融解水の浸透・再凍結で氷楔が形成され、トラフの周囲が盛り上がった中央低下型の多角形土が広くみられたかもしれない。トラフが陥没した波形や突起型の多角形土が卓越する中緯度では、最近では凍結地盤の昇華による乾燥化が進み、熱収縮破壊は不活発になっているようだ。多角形土の形態と楔構造の間には地球上でも一義的な対応関係が認められていないので、地中の楔の種類やその変化の歴史を復元するには、まず地球上（とくに南極の露岩域）でのより詳しい調査が望まれる。

（3）過去の温暖湿潤期には主として地中氷の融解により、また最近の寒冷乾燥期では主として地中氷の昇華により、陥没（サーモカルスト）が生じた場所もあるらしい。貝殻状凹地がその代表的な地形として認定されている。陥没で不安定になった斜面では、日射を受けやすい向き（現在は赤道向き、高地軸期は極向き）で氷が消耗しやすいために、後退性の地すべり・崩壊が発生し、その方向に貝殻状凹地が広がったと説明されている。ただし、凹地が後退する方向については形成期をいつとするかにより、真逆の見解がある。こ

これらの問題の解決には、地球のツンドラや極地砂漠環境において、永久凍土の消耗が著しい地域での地形変化の詳しい調査が役立つであろう。

(4) 底径 1 km 以下の孤立丘がまとまって存在する場合、周囲にはほかの永久凍土の指標となる地形が分布し、かつ孤立丘の頂部に膨張性の亀裂またはクレーターがみられるならば、ピンゴ（凍結丘）の可能性がある。その場合、斜面の基部や谷底であれば開放性ピンゴ、貝殻状凹地のなかであれば閉鎖性ピンゴと考えられる。ただし、現在でもピンゴの形成に必要とされる薄い永久凍土底面への被圧地下水の供給があり、隆起を続けているかどうかは不明である。

(5) 中・高緯度の山地の斜面基部から張り出すロープ（LDA）や谷中を埋める堆積物（LVF）は、水で充填された岩屑からなる永久凍土や氷河の流動起源と認定される場合が多い。地球上でも、永久凍土起源の岩石氷河と岩屑被覆氷河とでは、形態・表面の構成物・供給源の状態などから区別されるが、岩石氷河の起源については内部構造のデータがなければ特定が困難である（池田, 2013）。そのため、火星の LDA の起源についてはしばしば研究者間で異なる解釈がなされている。遠隔レーザ探査による内部構造解析の進展が期待される。

(6) 火星でみられるもっとも予想外の周氷河地形が、凍結融解の繰り返し、すなわち活動層の微小な動きの積み重ねで成長する淘汰構造土やソリフラクション・ロープ（小型岩屑ロープ）に類似する地形である。外観が新鮮なため、比較的最近に形成されたとする見解が多い。淘汰構造土は地球上の地形よりも規模が 1 桁大きく多角形土と同等の規模なので、凍結融解起源は必ずしも支持されていない。一方で、ソリフラクション・ロープと認定された地形は地球上のものと規模や形態が類似し、ほかの周氷河地形とも共存することなどから、現成か否かは別として、活動層底面付近でのアイスレンズ形成と融解の繰り返しで形成された可能性はあるだろう。

(7) 衛星画像を時系列で追跡することにより、現在も「凍土の融解」に伴う地表流や地形変化が

確実に起こっていることがわかった。一部のガリーにみられる土砂移動、急斜面で流出する地表流がつくるスロープ・ストリークや再発性縞模様である。火星の低温低圧条件は地表流の発生に有利であることを示す室内実験もある。流出する液体については塩水を支持する見解が多いが、その供給源や化学成分、融解流出がはじまる条件などは今後の検討課題である。

(8) 火星の周氷河地形研究は、認定の段階から、形態や構造の定量化や形成条件の推定の段階に進展してきた。これまでは衛星画像から「地球との類似地形を探し出す」ことに主眼が置かれてきたが、火星の現在の地表環境そして長期の環境変動史をより正しく理解するには、次の段階として、各地形をつくるプロセスが「局地的・限定的に発現するのか、普遍的に卓越するのか」という点に着目する必要があるだろう。さらに、より困難ではあるが、これらの地形プロセスが「現在も起こっているか否か」、現成とすれば「動かす媒体は何か」という問いに答える試みにも期待したい。

## 謝 辞

本稿の作成にあたり、日本学術振興会の科学研究費補助金（課題番号 25560143）を使用した。査読者からの有益なご指摘により、原稿は大いに改善されました。ここに謝意を表します。

## 文 献

- Balme, M.R., Gallagher, C., Page, D.P., Murraya, J.B. and Muller J.-P. (2009): Sorted stone circles in Elysium Planitia, Mars: Implications for recent martian climate. *Icarus*, **200**, 30–38.
- Balme, M.R., Gallagher, C.J. and Hauber, E. (2013): Morphological evidence for geologically young thaw of ice on Mars: A review of recent studies using high-resolution imaging data. *Progress in Physical Geography*, **37**, 289–324.
- Bandfield, J.L. (2007): High resolution subsurface water-ice distribution on Mars. *Nature*, **447**, 64–67.
- Bargery, A., Balme, M.R., Warner, N., Gallagher, C. and Gupta, S. (2011): A background to Mars exploration and research. in *Martian Geomorphology* edited by Balme, M.R., Bargery, A., Gallagher, C. and Gupta, S., Geological Society of London, Special Publications, 5–20.
- Bockheim, J.G., Kurz, M.D., Soule, S.A. and Burke, A.



- (2009): Genesis of active sand-filled polygons in lower and central Beacon Valley, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*, **20**, 235–313.
- Burr, D.M., Tanaka, K.L. and Yoshikawa, K. (2009): Pingos on Earth and Mars. *Planetary and Space Science*, **57**, 541–555.
- Byrne, S., Dundas, C.M., Kennedy, M.R., Mellon, M.T., McEwen, A.S., Cull, S.C., Daubar, I.J., Shean, D.E., Seelos, K.D., Murchie, S.L., Cantor, B.A., Arvidson, R.E., Edgett, K.S., Reufer, A., Thomas, N., Harrison, T.N., Posiolova, L.V. and Seelos, F.P. (2009): Distribution of mid-latitude ground ice on Mars from new impact craters. *Science*, **325**, 1674–1676.
- Carr, M.H. and Schaber, G.G. (1977): Martian permafrost features. *Journal of Geophysical Research*, **82**, 4039–4054.
- Conway, S.J., Lamb, M.P., Balme, M.R., Towner, M.C. and Murray, J.B. (2011): Enhanced runoff and erosion by overland flow at low pressure and sub-freezing conditions: Experiments and application to Mars. *Icarus*, **211**, 443–457.
- Conway, S.J., Hovius, N., Barnie, T., Besserer, J., Le Mouélic, S., Orosei, R. and Read, N.A. (2012): Climate-driven deposition of water ice and the formation of mounds in craters in Mars' north polar region. *Icarus*, **220**, 174–193.
- Conway, S.J., Gourronc, M. and Patel, M. (2014): Laboratory Simulations of the transport capacity of water and brines under Martian conditions. *45th Lunar and Planetary Science Conference Abstracts*, 2458.
- Costard, F. and Baker, V.R. (2001): Thermokarst landforms and processes in Ares Vallis, Mars. *Geomorphology*, **37**, 289–301.
- Costard, F.M. and Kargel, J.S. (1995): Outwash plains and thermokarst on Mars. *Icarus*, **114**, 93–112.
- De Pablo, M.A. and Komatsu, G. (2009): Possible pingo fields in the Utopia basin, Mars: Geological and climatic implications. *Icarus*, **199**, 49–74.
- Dickson, J.L. and Head, J.W. (2009): The formation and evolution of youthful gullies on Mars: Gullies as the late-stage phase of Mars' most recent ice age. *Icarus*, **204**, 63–86.
- Dickson, J.L., Head, J.W. and Kreslavsky, M.A. (2007): Martian gullies in the southern mid-latitudes of Mars: Evidence for climate-controlled formation of young fluvial features based upon local and global topography. *Icarus*, **188**, 315–323.
- Dickson, J.L., Head, J.W., Goudge, T.A. and Barbieri, L. (2015): Recent climate cycles on Mars: Stratigraphic relationships between multiple generations of gullies and the latitude dependent mantle. *Icarus*, **252**, 83–94.
- Dundas, C.M. and McEwen, A.S. (2010): An assessment of evidence for pingos on Mars using HiRISE. *Icarus*, **205**, 244–258.
- Dundas, C.M., McEwen, A.S., Diniega, S., Byrne, S. and Martinez-Alonso, S. (2010): New and recent gully activity on Mars as seen by HiRISE. *Geophysical Research Letters*, **37**, L07202.
- Dundas, C.M., Diniega, S., Hansen, C.J., Byrne, S. and McEwen, A.S. (2012): Seasonal activity and morphological changes in martian gullies. *Icarus*, **220**, 124–143.
- Dundas, C.M., Byrne, S., McEwen, A.S., Mellon, M.T., Kennedy, M.R., Daubar, I.J. and Saper, L. (2014): HiRISE observations of new impact craters exposing Martian ground ice. *Journal of Geophysical Research Planets*, **119**, 109–127.
- El Maarry, M.R., Markiewicz, W.J., Mellon, M.T., Goetz, W., Dohm, J. and Pack, A. (2010): Crater floor polygons: Desiccation patterns of ancient lakes on Mars?. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E10006.
- El Maarry, M.R., Kodikara, J., Wijessoriya, S., Markiewicz, W.J. and Thomas, N. (2012): Desiccation mechanism for formation of giant polygons on Earth and intermediate-sized polygons on Mars: Results from a pre-fracture model. *Earth and Planetary Science Letters*, **323**, 19–26.
- El Maarry, M.R., Pommerol, A. and Thomas, N. (2013): Analysis of polygonal cracking patterns in chloride-bearing terrains on Mars: Indicators of ancient playa settings. *Journal of Geophysical Research Planets*, **118**, 2263–2278.
- Fairén, A.G., Stokes, C.R., Davies, N., Schulze-Makuch, D., Rodríguez J.A.P., Davila, A.F., Uceda, E.R., Dohm, J.M., Baker, B.R., Clifford, S.M., McKay, C.P. and Squyres, S.W. (2014): A cold hydrological system in Gale Crater, Mars. *Planetary and Space Science*, **93–94**, 101–118.
- Feldman, W.C., Prettyman, T.H., Maurice, S., Plaut, J.J., Bish, D.L., Vaniman, D.T., Mellon, M.T., Metzger, A.E., Squyres, S.W., Karunatillake, S., Boynton, W.V., Elphic, R.C., Funsten, H.O., Lawrence, D.J. and Tokar, R.L. (2004): Global distribution of near-surface hydrogen on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **109**, E09006.
- French, H.M. (2007): *The Periglacial Environment, Third Edition*. Wiley, Chichester.
- Gallagher, C. and Balme, M.R. (2011): Landforms indicative of ground-ice thaw in the northern high latitudes of Mars. in *Martian Geomorphology* edited by Balme, M.R., Barger, A., Gallagher, C. and Gupta, S., Geological Society of London, Special Publications, 87–110.
- Gallagher, C., Balme, M.R., Conway, S.J. and Grindrod, P.M. (2011): Sorted clastic stripes, lobes and associated gullies in high-latitude. *Icarus*, **211**, 458–471.
- Haltigin, T.W., Pollard, W.H. and Dutilleul, P. (2010): Comparison of ground- and aerial-based approaches for quantifying polygonal terrain network geometry on Earth and Mars via spatial point pattern



- analysis. *Planetary and Space Science*, **58**, 1636–1649.
- Hauber, E., van Gasselt, S., Chapman, M.G. and Neukum, G. (2008): Geomorphic evidence for former lobate debris aprons at low latitudes on Mars: Indicators of the Martian paleoclimate. *Journal of Geophysical Research*, **113**, E02007.
- Hauber, E., Reiss, D., Ulrich, M., Preusker, F., Trauth, F., Zanetti, M., Hiesinger, H., Jaumann, R., Johansson, L., Johnsson, A., van Gasselt, S. and Ollmo, M. (2011): Landscape evolution in Martian mid-latitude regions: Insights from analogous periglacial landforms in Svalbard. in *Martian Geomorphology* edited by Balme, M.R., Bargery, A., Gallagher, C. and Gupta, S., Geological Society of London, Special Publications, 111–131.
- Head, J.W., Mustard, J.F., Kreslavsky, M.A., Milliken, R.E. and Marchant, D.R. (2003): Recent ice ages on Mars. *Nature*, **426**, 797–802.
- Head, J.W., Neukum, G., Jaumann, R., Hiesinger, H., Hauber, E., Carr, M., Masson, P., Foing, B., Hoffmann, H., Kreslavsky, M., Werner, S., Milkovich, S., van Gasselt, S. and The HRSC Co-Investigator Team (2005): Tropical to mid-latitude snow and ice accumulations, flow and glaciations on Mars. *Nature*, **434**, 346–351.
- Head, J.W., Marchant, D.R., Dickson, J.L., Kress, A. and Baker, D.M.H. (2010): Northern mid-latitude glaciation in the 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.
- Holt, J.W., Safaeinili, A., Plaut, J.J., Head, J.W., Phillips, R.J., Seu, R., Kempf, S.D., Choudhary, P., Young, D.A., Putzig, N.E., Biccari, D. and Gim, Y. (2008): Radar sounding evidence for buried glaciers in the southern mid-latitudes of Mars. *Science*, **322**, 1235–1238.
- 池田 敦 (2013): 岩石氷河の成因. 雪氷, **75**, 325–342. [Ikeda, A. (2013): Origins of rock glaciers: A review. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, **75**, 325–342. (in Japanese with English abstract)]
- Johnsson, A., Reiss, D., Hauber, E., Zanetti, M., Hiesinger, H., Johansson, L. and Ollmo, M. (2012): Periglacial mass-wasting landforms on Mars suggestive of transient liquid water in the recent past: Insights from solifluction lobes on Svalbard. *Icarus*, **218**, 489–505.
- Korteniemi, J. and Kreslavsky, M.A. (2013): Patterned ground in Martian high northern latitudes: Morphology and age constraints. *Icarus*, **225**, 960–970.
- Kreslavsky, M.A. and Head, J.W. (2002): Mars: Nature and evolution of young latitude dependent water-ice-rich mantle. *Geophysical Research Letters*, **29**, 1719.
- Kreslavsky, M.A. and Head, J.W. (2009): Slope streaks on Mars: A new “wet” mechanism. *Icarus*, **201**, 517–527.
- Kreslavsky, M.A., Head, J.W. and Marchant, D.R. (2008): Periods of active permafrost layer formation during the geological history of Mars: Implications for circumpolar and mid-latitude surface processes. *Planetary and Space Science*, **56**, 289–302.
- Laskar, J., Levrard, B. and Mustard, J.F. (2002): Orbital forcing of the martian polar layered deposits. *Nature*, **419**, 375–377.
- Laskar, J., Correia, A.C.M., Gastineau, M., Joutel, F., Levrard, B. and Robutel, P. (2004): Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. *Icarus*, **170**, 343–364.
- Lefort, A., Russell, P.S., Thomas, N., McEwen, A.S., Dundas, C.M. and Kirk, R.L. (2009): Observations of periglacial landforms in Utopia Planitia with the High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE). *Journal of Geophysical Research*, **114**, E04005.
- Lefort, A., Russell, P.S. and Thomas, N. (2010): Scaloped terrain in Peneus and Amphitrites Paterae region of Mars as observed by HiRISE. *Icarus*, **205**, 259–268.
- Levy, J.S., Head, J.W. and Marchant, D.R. (2007): Lineated valley fill and lobate debris apron stratigraphy in Nilosyrtis Mensae, Mars: Evidence for phases of glacial modification of the dichotomy boundary. *Journal of Geophysical Research*, **112**, E08004.
- Levy, J.S., Head, J.W., Marchant, D.R. and Kowalewski, D.E. (2008): Identification of sublimation-type thermal contraction crack polygons at the proposed NASA Phoenix landing site: Implications for substrate properties and climate-driven morphological evolution. *Geophysical Research Letters*, **35**, L04202.
- Levy, J.S., Head, J.W. and Marchant, D.R. (2009): Thermal contraction crack polygons on Mars: Classification, distribution, and climate implications from HiRISE observations. *Journal of Geophysical Research*, **114**, E01007.
- Levy, J.S., Marchant, D.R. and Head, J.W. (2010): Thermal contraction crack polygons on Mars: A synthesis from HiRISE, Phoenix, and terrestrial analog studies. *Icarus*, **206**, 229–252.
- Machado, A., Barata, T., Alves, E.I. and Cunha, P.P. (2012): Mars periglacial punctual features analyses. *Planetary and Space Science*, **72**, 53–61.
- Mackay, J.R. (1986): The first 7 years (1978–1985) of ice wedge growth, Illisarvik experimental drained lake site, western Arctic coast. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **23**, 1782–1795.
- Mackay, J.R. (2000): Thermally induced movements in ice-wedge polygons, western arctic coast: A long-term study. *Géographie Physique et Quaternaire*, **54**, 41–68.

- Mahaney, W.C., Miyamoto, H., Dohm, J., Baker, V., Cabrol, N., Grin, E. and Berman, D. (2007): Rock glaciers on Mars: Earth-based clues to Mars' recent paleoclimatic history. *Planetary and Space Sciences*, **55**, 181-192.
- Malin, M.C. and Edgett, K.S. (2000): Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars. *Science*, **288**, 2330-2335.
- Maloof, A.C., Kellog, J.B. and Anders, A.M. (2002): Neoproterozoic sand wedges: Crack formation in frozen soils under diurnal forcing during a snow ball Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, **204**, 1-15.
- Mangold, N. (2005): High latitude patterned ground on Mars: Classification, distribution and climate control. *Icarus*, **174**, 336-359.
- Mangold, N. and Allemand, P. (2001): Topographic analysis of features related to ice on Mars. *Geophysical Research Letters*, **28**, 407-411.
- Mangold, N., Allemand, P., Duval, P., Géraud, Y. and Thomas, P. (2002): Experimental and theoretical deformation of ice-rock mixtures: Implications on rheology and ice content of martian permafrost. *Planetary and Space Sciences*, **50**, 385-401.
- Marchant, D.R. and Head, J.W. (2007): Antarctic Dry Valleys: Microclimate zonation, variable geomorphic processes, and implications for assessing climate change on Mars. *Icarus*, **192**, 187-222.
- Marchant, D.R., Lewis, A.R., Phillips, W.M., Moore, E.J., Souchez, R.A., Denton, G.H., Sugden, D.E., Potter, N.J. and Landis, G.P. (2002): Formation of patterned ground and sublimation till over Miocene glacier ice in Beacon Valley, southern Victoria Land, Antarctica. *Geological Society of America Bulletin*, **114**, 718-730.
- 松岡憲知 (1998): 岩石氷河—氷河説と周氷河説—。地学雑誌, **107**, 1-24. [Matsuoka, N. (1998): Rock glaciers: Glacial or periglacial?. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **107**, 1-24. (in Japanese with English abstract)]
- Matsuoka, N. (2001): Solifluction rates, processes and landforms: A global review. *Earth-Science Reviews*, **55**, 107-133.
- Matsuoka, N. (2011): Climate and material controls on periglacial soil processes: Toward improving periglacial climate indicators. *Quaternary Research*, **75**, 356-365.
- 松岡憲知・池田 敦 (2012): 周氷河プロセス研究最新線。地学雑誌, **121**, 269-305. [Matsuoka, N. and Ikeda, A. (2012): Research frontier in periglacial processes. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **121**, 269-305. (in Japanese with English abstract)]
- McEwen, A.S., Banks, M.E., Baugh, N., Becker, K., Boyd, A., Bergstrom, J.W., Beyer, R.A., Bortolini, E., Bridges, N.T., Byrne, S., Castalia, B., Chuang, F.C., Crumpler, L.S., Daubar, I., Davatzes, A.K., Dear-dorff, D.G., DeJong, A., Alan, D.W., Dobrea, E.N., Dundas, C.M., Eliason, E.M., Espinoza, Y., Fenne-ma, A., Fishbaugh, K.E., Forrester, T., Geissler, P.E., Grant, J.A., Griffes, J.L., Grotzinger, J.P., Gulick, V.C., Hansen, C.J., Herkenhoff, K.E., Heyd, R., Jaeger, W.L., Jones, D., Kanefsky, B., Keszthelyi, L., King, R., Kirk, R.L., Kolb, K.J., Lasco, J., Lefort, A., Leis, R., Lewis, K.W., Martinez-Alonso, S., Mattson, S., McArthur, G., Mellon, M.T., Metz, J.M., Milazzo, M.P., Milliken, R.E., Motazedian, T., Okubo, C.H., Ortiz, A., Philippoff, A.J., Plassmann, J., Polit, A., Russell, P.S., Schaller, C., Searls, M.L., Spriggs, T., Squyres, S.W., Tarr, S., Thomas, N., Thomson, B.J., Tornabene, L.L., Van Houten, C., Verba, C., Weitz, C.M. and Wray, J.J. (2010): The High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) during MRO's Primary Science Phase (PSP). *Icarus*, **205**, 2-37.
- McEwen, A.S., Ojha, L., Dundas, C.M., Mattson, S.S., Byrne, S., Wray, J.J., Cull, S.C., Murchie, S.L., Thomas, N. and Gulick, V.C. (2011): Seasonal flows on warm Martian slopes. *Science*, **333**, 740-743.
- McEwen, A.S., Dundas, C.M., Mattson, S.S., Toigo, A.D., Ojha, L., Wray, J.J., Chojnacki, M., Byrne, S., Murchie, S.L. and Thomas, N. (2014): Recurring slope lineae in equatorial regions of Mars. *Nature Geoscience*, **7**, 53-58.
- Mellon, M.T. (1997): Small-scale polygonal features on Mars: Seasonal thermal contraction cracks in permafrost. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 25617-25628.
- Mellon, M.T., Feldman, W.C. and Prettyman, T.H. (2004): The presence and stability of ground ice in the southern hemisphere of Mars. *Icarus*, **169**, 324-340.
- Mellon, M.T., Malin, M.C., Arvidson, R.E., Searls, M.L., Sizemore, H.G., Heet, T.L., Lemmon, M.T., Keller, H.U. and Marshall, J. (2009a): The periglacial landscape at the Phoenix landing site. *Journal of Geophysical Research*, **114**, E00E06.
- Mellon, M.T., Arvidson, R.E., Sizemore, H.G., Searls, M., Blaney, D., Cull, S., Hecht, M., Heet, T., Keller, H., Lemmon, M., Markiewicz, W., Ming, D., Morris, R., Pike, W. and Zent, A. (2009b): Ground ice at the Phoenix landing site: Stability state and origin. *Journal of Geophysical Research*, **114**, E00E07.
- Milliken, R.E., Mustard, J.F. and Goldsby, D.L. (2003): Viscous flow features on the surface of Mars: Observation from high-resolution Mars Orbiter Camera (MOC) images. *Journal of Geophysical Research*, **108**(E6), 5057.
- Morgenstern, A., Hauber, E., Reiss, D., van Gasselt, S., Grosse, G. and Schirrmeyer, L. (2007): Deposition and degradation of a volatile-rich layer in Utopia Planitia, and implications for climate history on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **112**, E06010.
- Murton, J. (2013): Ice wedges and ice-wedge casts. in *Encyclopedia of Quaternary Science* edited by Elias,

- S.A. and Mock, C.J., Elsevier, Amsterdam, 436-451.
- 野口里奈・栗田 敬 (2016): 火星におけるコーン地形—とくに火山起源のコーン地形の特徴について—. 地学雑誌, **125**, 35-48. [Noguchi, R. and Kurita, Ke. (2016): Cones on Mars with special reference to volcanic cone morphology. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 35-48. (in Japanese with English abstract)]
- Ojha, L., Wilhelm, M.B., Murchie, S.L., McEwen, A.S., Wray, J.J., Hanley, J., Massé, M. and Chojnacki, M. (2015): Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2546.
- Orloff, T., Kreslavsky, M. and Asphaug, E. (2013a): Distribution of polygon characteristic scale in Martian patterned ground terrain in the northern hemisphere using the Fourier transform. *Journal of Geophysical Research Planets*, **118**, 1558-1566.
- Orloff, T., Kreslavsky, M. and Asphaug, E. (2013b): Possible mechanism of boulder clustering on Mars. *Icarus*, **225**, 992-999.
- Pacifici, A., Komatsu, G. and Pondrelli, M. (2009): Geological evolution of Ares Vallis on Mars: Formation by multiple events of catastrophic flooding, glacial and periglacial processes. *Icarus*, **202**, 60-77.
- Parkner, T. (2016): Gullies on Mars: A review. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 155-161.
- Pearce, G., Osinski, G.R. and Soare, R.J. (2011): Intra-crater glacial processes in central Utopia Planitia, Mars. *Icarus*, **212**, 86-95.
- Pechmann, J.C. (1980): The origin of polygonal troughs on the northern plains of Mars. *Icarus*, **42**, 185-210.
- Pierce, T.L. and Crown, D.A. (2003): Morphologic and topographic analyses of debris aprons in the eastern Hellas region, Mars. *Icarus*, **163**, 46-65.
- Plaut, J.J., Safaeinili, A., Holt, J.W., Phillips, R.J., Head III, J.W., Seu, R., Putzig, N.E. and Frigeri, A. (2009): Radar evidence for ice in lobate debris aprons in the mid-northern latitudes of Mars. *Geophysical Research Letters*, **36**, L02203.
- 猿谷友孝 (2016): 火星における不凍水とその役割. 地学雑誌, **125**, 49-62. [Saruya, T. (2016): Premelting water and its role on Mars. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 49-62. (in Japanese with English abstract)]
- 澤村教伸・福井幸太郎・岩田修二 (2005): 地球の地形から火星を読み解く—巨大洪水地形と氷河地形—. 雪氷, **67**, 163-178. [Sawagaki, T., Fukui, K. and Iwata, S. (2005): Terrestrial investigation of the Martian landscape: Flow-generated landforms by water and ice. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, **67**, 163-178. (in Japanese with English abstract)]
- Seibert, N.M. and Kargel, J.S. (2001): Small-scale martian polygonal terrain: Implications for liquid surface water. *Geophysical Research Letters*, **28**, 899-902.
- Séjourné, A., Costard, F., Gargani, J., Soare, R., Fedorov, A. and Marmo, C. (2011): Scalloped depressions and small-sized polygons in western Utopia Planitia, Mars: A new formation hypothesis. *Planetary and Space Science*, **59**, 412-422.
- Sizemore, H.G., Zent, A.P. and Rempel, A.W. (2015): Initiation and growth of martian ice lenses. *Icarus*, **251**, 191-210.
- Smith, D.E., Zuber, M.T., Frey, H.V., Garvin, J.B., Head III, J.W., Muhleman, D.O., Pettengill, G.H., Phillips, R.J., Solomon, S.C., Zwally, H.J., Banerdt, W.B., Duxbury, T.C., Golombek, M.P., Lemoine, F.G., Neumann, G.A., Rowlands, D.D., Aharonson, O., Ford, P.G., Ivanov, A.B., Johnson, C.L., McGovern, P.J., Abshire, J.B., Afzal, R.S. and Sun, X. (2001): Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars. *Journal of Geophysical Research*, **106**(E10), 23689-23722.
- Soare, R.J., Burr, D.M. and Wan Bun Tseung, J.-M. (2005): Possible pingos and a periglacial landscape in northwest Utopia Planitia. *Icarus*, **174**, 373-382.
- Soare, R.J., Kargel, J.S., Osinski, G.R. and Costard, F. (2007): Thermokarst processes and the origin of crater-rim gullies in Utopia and western Elysium Planitia. *Icarus*, **191**, 95-112.
- Soare, R.J., Conway, S.J., Pearce, G., Dohm, J.M. and Grindrod, P.M. (2013a): Possible crater-based pingos, paleolakes and periglacial landscapes in the high latitude of Utopia Planitia, Mars. *Icarus*, **225**, 971-981.
- Soare, R.J., Conway, S.J., Pearce, G.D., Costard, F. and Séjourné, A. (2013b): Sub-kilometre (intra-crater) mounds in Utopia Planitia, Mars: Character, occurrence and possible formation hypotheses. *Icarus*, **225**, 982-991.
- Soare, R.J., Conway, S.J. and Dohm, J.M. (2014a): Possible ice-wedge polygons and recent landscape modification by "wet" periglacial processes in and around the Argyre impact basin, Mars. *Icarus*, **233**, 214-228.
- Soare, R.J., Conway, S.J., Dohm, J.M. and El-Maarry, M.R. (2014b): Possible open-system (hydraulic) pingos in and around the Argyre impact regions of Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, **398**, 25-36.
- Squyres, S.W. (1978): Martian fretted terrain: Flow of erosional debris. *Icarus*, **34**, 600-613.
- Treiman, A.H. (2003): Geologic settings of Martian gullies: Implications for their origins. *Journal of Geophysical Research*, **108**(E4), 8031.
- Ulrich, M., Morgenstern, A., Günther, F., Reiss, D., Bauch, K.E., Hauber, E., Rössler, S. and Schirrmeister, L. (2010): Thermokarst in Siberian ice-rich permafrost: comparison to asymmetric scalloped



- depressions on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E10009.
- Ulrich, M., Wagner, D., Hauber, E., de Vera, J.-P. and Schirrmeyer, L. (2012): Habitable periglacial landscapes in Martian mid-latitudes. *Icarus*, **219**, 304–357.
- van Gasselt, S., Hauber, E. and Neukum, G. (2007): Cold-climate modification of Martian landscapes: A case study of a spatulate debris landform in the Hellas Montes Region, Mars. *Journal of Geophysical Research Planets*, **112**, E09006.
- van Gasselt, S., Hauber, E., Rossi, A.P., Dumke, A., Orosei, R. and Neukum, G. (2011): Periglacial geomorphology and landscape evolution of the Tempe Terra region, Mars. in *Martian Geomorphology* edited by Balme, M.R., Bargery, A., Gallagher, C. and Gupta, S., Geological Society of London, Special Publications, 43–67.
- Vincendon, M., Mustard, J., Forget, F., Kreslavsky, M., Spiga, A., Murchie, S. and Bibring, J.-P. (2010): Near-tropical subsurface ice on Mars. *Geophysical Research Letters*, **37**, L01202.
- Walker, D.A., Epstein, H.E., Romanovsky, V.E., Ping, C.L., Michaelson, G.J., Daanen, R.P., Shur, Y., Peterson, R.A., Krantz, W.B., Raynolds, M.K., Gould, W.A., Gonzalez, G., Nicolsky, D.J., Vonlanthen, C.M., Kade, A.N., Kuss, P., Kelley, A.M., Munger, C.A., Tarnocai, C.T., Matveyeva, N.V. and Daniëls, F.J.A. (2008): Arctic patterned-ground ecosystems: A synthesis of field studies and models along a North American Arctic Transect. *Journal of Geophysical Research*, **113**, G03S00.
- Washburn, A.L. (1980): Permafrost features as evidence of climatic change. *Earth Science Reviews*, **15**, 327–402.
- Weiss, D.K. and Head, J.W. (2014): Ejecta mobility of layered ejecta craters on Mars: Assessing the influence of snow and ice deposits. *Icarus*, **233**, 131–146.
- Zanetti, M., Hiesinger, H., Reiss, D., Hauber, E. and Neukum, G. (2010): Distribution and evolution of scalloped terrain in the southern hemisphere. *Icarus*, **206**, 691–706.