

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560143

研究課題名（和文）火星表面の地形を実験室で再現する

研究課題名（英文）Laboratory simulations of Martian landforms

研究代表者

松岡 憲知（MATSUOKA, Norikazu）

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：10209512

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000 円

研究成果の概要（和文）：低温恒温室と二方向振動板装置を利用した地形モデル実験，火星の地表環境に近い北極圏での野外実験を実施した。火星を模した低温・乾燥環境下での塩類風化実験では，岩石や塩の種類，最低温度，湿度条件による破壊様式や破壊速度の差が判明した。火星上の礫の環状配置を調べる実験では，礫の大きさと比率による淘汰プロセスや淘汰速度の違いが判明した。ネットワーク型砂丘の再現実験では，振動速度，継続時間，振動のなす角により地形が異なることがわかった。多角形土に関する野外実験により，火星上で多角形土が割れる条件とその発現区域を推定した。実験成果と火星表面での最新の地形プロセス研究をまとめた地学雑誌の特集号を出版した。

研究成果の概要（英文）：Laboratory experiments were conducted to simulate small-scale geomorphic processes possibly operating on the Martian surface, using low-temperature climate cabinets and two-directional vibration boards. Field experiments were also undertaken in a High Arctic site that represents Martian environments. Experiments on salt weathering indicate that rock comminution depends on the type of rock and salt, minimum temperature and humidity change. Experiments on sorted patterned ground suggest that sorting process depends on slope gradient, sizes and ratio of stones and cooling intensity. Vibration experiments show that dune forms depend on the rate and duration of vibration and intersection angles of vibration. Field experiments on thermal contraction cracking allow us to evaluate the threshold for cracking and the possible extent of polygons on Mars. These results and reviews of recent studies on Martian surface processes are combined to publish a special issue of Journal of Geography.

研究分野：地形学

キーワード：火星 地形 室内実験 惑星探査 永久凍土 堆積作用 風化作用

1. 研究開始当初の背景

1960～1970年代のマリナー計画やバイキング計画ではじまった火星の地学研究では、火山、断層崖、衝突クレーター、大規模洪水に伴う流路、巨大風成砂丘などの大地形が発見された。その後、半世紀の間に火星の地形探査は革命的な進歩を遂げた。2004年には地上を走行する2台の探査車が着陸し、岩石や堆積物の移動調査・分析を実行するとともに、広範囲の地上写真を送信してきた。そして、2006年から探査を開始した軌道衛星に搭載されたHiRISEカメラは解像度0.3mの衛星画像を提供するようになり、メートルスケールの地形まで判明した。その画像には地球と共通する多種多様な地形が認定されるようになった。

高精度で膨大な量の火星の地形情報が提供されるようになった結果、侵食・堆積作用による細かい地形、とくに水や氷の存在を示唆する地形、現成の可能性のある新鮮な地形が続々と判明した。地形の中身(構成岩石や堆積構造)や環境条件もわかるようになった。

しかし、火星表面に見られる地表景観の成因については、地形プロセスの直接観測は不可能なため、理論的研究や地球上の類似現象からの類推に基づく議論にとどまっている。より現実的な成因論を展開するためには、火星の地表条件を考慮した室内実験、地球上で火星の環境に近い寒冷砂漠での野外実験が有効であろう。

2. 研究の目的

本研究では、火星にみられる岩石風化、構造土、舌状地形、ガリー、砂丘、氷冠等の地表現象を再現する一連の室内実験に挑戦する。特に、火星表面に近い「低温乾燥下での地形の動き」を再現する。

次の4項目を対象に、実験装置を作成し、実験方法を開拓し、実験を試行する。低温乾燥下での岩石の風化。凍上・沈下に伴う礫の淘汰と構造土の発達。多方向振動板による砂丘形成。さらに、小規模な地形のGISを利用した形態分析、実験室では扱いの難しい氷楔破壊については、北極圏での野外実験で検証する。

実験の主目的は、第一に火星表面の地形のシミュレーション実験方法を確立し、火星研究コミュニティへの普及を図ること、第二に火星表面にみられる各種の地形形成に必要な環境条件・表層物質条件を探ることにある。

また、近年火星の地形研究が急速に進歩したにもかかわらず、国内では火星の地形に関するまとまったレビューがないために、火星の地形の理解が進んでいない。そこで、火星の諸地形現象について、徹底的なレビューを行い、研究の進展状況を取りまとめる。

3. 研究の方法

筑波大学地形学研究室が管理する低温恒

温室、小型低温恒温恒湿槽、二方向振動板装置を利用した4種の地形モデル実験、火星の寒冷乾燥環境に近い北極圏スバル諸島での野外実験を行う。

(1) 低温乾燥下での岩石の風化実験：火星の土壤中に硫酸塩の存在が広く認められることから、低温恒温恒湿室で、低温・乾燥環境下での昇華による岩石試料の塩類風化実験を行う。特に、火星表面の地上画像や遠隔分析機器により判明した、岩石表面に見られる小穴の発達や表土の粒度組成変化に着目する。また、低温下での硫酸塩による岩石破壊力の変化も調べる。風化には長時間を要するため、温度・湿度変化の周期を短く設定するとともに、実験を長期継続する。

(2) 淘汰構造土の発達過程に関する実験：永久凍土の熱的破壊現象を実験室で再現する。地球と火星の主な相違点は、永久凍土の含水率と冷却条件にある。そこで、凍土の含水率と室内の冷却速度を変えて、破壊発生の臨界水分条件と臨界冷却速度を探る。また、クラック発生の同時性と階層性をインターバルカメラの画像から解析し、火星表面での多角形網の平面形状の発達過程を考察する。

(3) 多方向振動板による砂丘形成：火星に認められる多様な砂丘について再現実験を行う。火星においては、複雑な風向変化を反映すると考えられている複合砂丘がクレーター内を中心に存在するほか、氷冠上には氷粒からなる砂丘が存在する。砂丘の形状・規模に対する風向・風速の多様性や構成物質の影響に着目し、流体の密度や粘性の相違に配慮した上で、水中での二方向振動板実験を行う。これにより各種砂丘の形成条件について検討する。

(4) 火星の小スケール地形に関する地形分析：HiRISEが撮影した高解像度の火星表面の衛星画像から、対象とする地形情報を分析・定量化し、実験条件を決めるとともに、実験室で形成される地形と現実の地形との比較を行う。

(5) 氷楔多角形土の破壊発生に関する野外実験：変位計・破壊ケーブル、加速度センサを用いた冬季の熱収縮破壊の検知、地温・土壌水分の通年データ取得を行う。

4. 研究成果

(1) 低温乾燥下での岩石の風化実験：火星の土壤中に硫酸塩の存在が広く認められることから、低温恒温恒湿室で、低温・乾燥環境下での岩石試料の塩類風化実験を行った。塩の種類(硫酸ナトリウム、硫酸マグネシウム、塩化ナトリウム)、温度、湿度条件を変数とする多孔質凝灰岩と砂岩の塩類風化実験を長期間継続した結果、風化速度は小さいが、

岩石や塩の種類による、低温下での岩石の凍結温度や破壊力の差が判明した。

(2) 淘汰構造土の平面形の発達に関する実験：火星表面に見られる礫の環状配置の成因を調べるために、低温実験室内で霜柱を発生させて礫の運動を解析した。実験条件に関しては、北極圏周氷河地域での構造土地形の観測結果に基づいて設定した。礫の大きさ、被覆率、斜面傾斜を変数とする実験により、礫が淘汰されるプロセスと形状の違いが判明した。

(3) 縞状構造土の淘汰過程に関する実験：火星のクレーター斜面などに見られる礫の縦列配置の成因を推定するために、2の実験を傾斜面で実施した。傾斜を3段階に設定し、礫の被覆率、大小の礫の混入効果を検討するために、霜柱による礫の運動を解析した。斜面傾斜、礫の大きさと比率、凍結深度を関数とした実験で、淘汰プロセスや淘汰速度の違いが判明した。

(4) 二方向振動板によるベッドフォーム形成：火星に認められるネットワーク型砂丘について再現実験を行った。砂丘状地形の形状・規模に対する流向・流速の多様性や構成物質の影響に着目し、水中での二方向振動板実験を行い、各種砂丘の形成条件を調べた。多方向対称振動実験と非対称振動実験では、各振動の振動速度、継続時間、振動のなす角により形成される地形が異なることが明らかになった。

(5) 多角形土の動態に関する野外実験：火星表面に広く見られる多角形土が割れる条件を解明するために、地形変化と形成環境に関する多角的観測を実施し、現在の火星環境下で多角形土が割れる火星の区域を推定した。また、最近10年間の多角形土研究のレビューを行い、火星の多角形土研究の課題と可能性について総括した。

(6) 火星表面の地形プロセスに関する最新の研究をまとめた書物が国内に存在しないことから、地学雑誌の特集号として、本テーマに関する研究成果と今後の研究課題をまとめた特集号を編集して出版した。当グループからも風化、周氷河プロセス、ガリーに関する実験結果を含めた総説論文3編、火星の地形研究を総括する序説を出版した。

(7) 国際惑星地形学研究グループがSpringer社から発行した「惑星地形学辞典」において、「周氷河地形」と「岩石氷河」の項目の執筆、寒冷地形寒冷の諸項目のレビューを行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計12件)

Christiansen, H.H., Matsuoka, N. and Watanabe, T. (2016). Progress in dynamics, internal structure and palaeoenvironmental potential of ice and sand wedges research. *Permafrost and Periglacial Processes*, 査読有, in press.

Watanabe, T., Matsuoka, N. and Christiansen, H.H. (2016). Soil physical and environmental conditions controlling patterned ground variability at a continuous permafrost site, Svalbard. *Permafrost and Periglacial Processes*, 査読有, in press.

Matsuoka, N., Yokokawa, M., Naruse, H. and Sekiguchi, T. (2016). Overview of the special issue “Martian surface processes”. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 査読無, 125(1), 1-5. DOI: org/10.5026/jgeography.125.1.

松岡憲知 (2016). 火星表面の永久凍土と周氷河作用. *地学雑誌*, 査読有, 125(1), 63-90. DOI: org/10.5026/jgeography.125.63.

佐藤昌人・八反地剛・松岡憲知 (2016). 火星表面における岩石の風化プロセスと風化生成物. *地学雑誌*, 査読有, 125(1), 133-153. DOI: org/10.5026/jgeography.125.133.

Parkner, T. (2016). Gullies on Mars. *Journal of Geography*, 査読有, 125(1), 155-161. DOI: org/10.5026/jgeography.125.155.

Yamagishi, C. and Matsuoka, N. (2015). Laboratory frost sorting by needle ice: a pilot experiment on the effects of stone size and extent of surface stone cover. *Earth Surface Processes and Landforms*, 査読有, 40(4), 502-521. DOI: 10.1002/esp.3653

Perillo, M.M., Best, J.L., Yokokawa, M., Sekiguchi, T., Takagawa, T., Garcia, M.H. (2014). A unified model for bedform development and equilibrium under unidirectional, oscillatory and combined-flows. *Sedimentology*, 査読有, 61, 2063-2085. DOI: 10.1111/sed.12129.

池田 敦 (2013). 岩石氷河のかたち. *雪氷*, 査読有, 75(5), 315-324.

池田 敦 (2013). 岩石氷河の成因. *雪氷*, 査読有, 75(5), 325-342.

Matsuoka, N. (2013). Cold region geomorphology in Japan. *Geographical Review of Japan*, 査読有, 86B, 22-32. DOI: 10.4157/geogrevjapanb.86.22.

Watanabe, T., Matsuoka, N. and Christiansen, H.H. (2013). Ice- and soil-wedge dynamics in the Kapp Linné area, Svalbard, investigated by two and three dimensional ground-penetrating radar and ground thermal and acceleration regimes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 査読有, 24, 39-55. DOI: 10.1002/ppp.1767.

〔学会発表〕(計10件)

Matsuoka, N., Watanabe, T., Ikeda, A., Christiansen, H.H. and Humlum, O. Slow, but steady movement of an Arctic rock glacier: 10

years of movements and thermal conditions. XI International Conference on Permafrost, 2016 年 06 月 23 日, ポツダム (ドイツ). 佐藤昌人・八反地 剛: 火星・南極露岩地域での塩類風化に関する室内実験. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 05 月 23 日, 幕張メッセ (千葉県千葉市).

Ikeda, A. Glacial and permafrost landforms during the last glacial period in the southern Japanese Alps. XIX INQUA Congress, 2015 年 7 月 31 日, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市).

Parkner, T.: Gully development on unstable slopes in the Mangaoporo catchment, North Island, New Zealand. 11th Annual Meeting of the Asia Oceania Geoscience Society, 2014 年 07 月 28 日 ~ 2014 年 08 月 01 日, ロイトン札幌 (北海道札幌市).

Matsuoka, N., Christiansen, H.H. and Watanabe, T.: Interannual variability of ice wedge dynamics in Adventdalen, central Spitsbergen. 第 4 回ヨーロッパ永久凍土会議, 2014 年 6 月 21 日, エヴォラ (ポルトガル).

Ikeda, A., Iwahana, G. and Sueyoshi, T.: Permafrost mapping and monitoring on Mt. Fuji. 第 4 回ヨーロッパ永久凍土会議, 2014 年 6 月 21 日, エヴォラ (ポルトガル).

Matsuoka, N.: From kinematics to dynamics: significance of field and laboratory approaches to understand periglacial mass movements. 第 4 回ヨーロッパ永久凍土会議, 2014 年 6 月 20 日 (招待講演), エヴォラ (ポルトガル). 佐藤昌人・八反地剛: 寒冷環境における塩類風化実験 凍結破碎作用におよぼす溶解塩の影響. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014 年 04 月 30 日, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市).

松岡憲知: 火星の周氷河的地形 - 地球の類似地形との比較 -. 第 16 回凍土のモニタリングと変動に関する研究集会, 2014 年 2 月 21 日, 北海道大学 (北海道札幌市).

Yamagishi, C. and Matsuoka, N.: Laboratory-produced sorted patterned ground by repeated frost heaving. ヨーロッパ地球科学連合総会 2013, 2013 年 04 月 12 日, ウィーン (オーストリア).

〔図書〕(計 1 件)

Matsuoka, N. Encyclopedia of Planetary Landforms (partial contribution: periglacial landforms, rock glacier/debris-covered glacier). Springer. DOI: 10.1007/978-1-4614-9213-9.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松岡 憲知 (MATSUOKA, Norikazu)
筑波大学・生命環境系・教授
研究者番号: 10209512

(2) 研究分担者

八反地 剛 (HATTANJI, Tsuyoshi)
筑波大学・生命環境系・講師
研究者番号: 00418625

池田 敦 (IKEDA, Atsushi)
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号: 60431657

関口 智寛 (SEKIGUCHI, Tomohiro)
筑波大学・生命環境系・講師
研究者番号: 90400647

パークナー トーマス (PARKNER, Thomas)
筑波大学・生命環境系・助教
研究者番号: 90589996

(3) 研究協力者

佐藤 昌人 (SATO Masato)