

特集号「火星表面の地形プロセス」序説

松岡憲知* 横川美和**
成瀬元*** 関口智寛*

Introduction to the Special Issue “Martian Surface Processes”

Norikazu MATSUOKA*, Miwa YOKOKAWA**,
Hajime NARUSE*** and Tomohiro SEKIGUCHI*

I. 火星探査と地形研究の進展

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、着陸機の撮影した映像から着陸点付近の岩石、堆積物、風成微地形の情報が得られた（例えば、Baker, 1981; Summerfield, 1991）。これらの大地形の多くは、遠い過去に形成された地形が極度の乾燥環境下で侵食を免れて保存されたものと考えられていた。その後、1990年代の宇宙船グローバル・サーベイヤーが解像度1mの衛星写真と三次元地形情報を提供するようになり、小規模でより新鮮な地形が認定された（例えば、Malin *et al.*, 1998; Carr, 2006）。そのなかには、万年スケールの気候変動に関連して近過去に形成された、あるいは水や氷の存在を示唆する現在形成中と判断される地形も含まれており、多方面からの関心を集めるようになった（例えば、Baker, 2001）。

21世紀になり、さらに火星探査は進化する。2004年には地上を走行する2台の探査車（スピリットとオポチュニティー）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（Squyres *et al.*,

2004a, b）。そして、2006年から探査を開始した軌道衛星マーズ・リコネッサンス・オービターに搭載された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（McEwen *et al.*, 2010）。その画像には地球と共通する（一部は地球上では知られていない）多種多様な地形が認定されるようになった。一方、着陸船は高機能化し、2008年に高緯度に着陸したフェニックスによる表層掘削と凍土の発見（Smith *et al.*, 2009）、2012年に低緯度に着陸したキュリオシティーによる岩石・堆積物の採取と多種の分析（Vasavada *et al.*, 2014）など、火星表面での地学的探査は加速度的に進展している。平行して、軌道衛星の搭載機器によるリモートセンシングでは、浅層地中レーダによる内部構造、分光器や放射計による気象・地表温度・地中含水（氷）率、岩石・鉱物組成などの情報が提供されている（例えば、Holt *et al.*, 2008; Murchie *et al.*, 2009; McCleese *et al.*, 2010）。火星表面に植生がなく、細かい地形が鮮明で分析しやすいことも研究の進展に一役買っている。

これらの火星の探査機から高精度で膨大な量の地表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

* 筑波大学生命環境系

** 大阪工業大学情報科学部

*** 京都大学大学院理学研究科

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

** Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology, Osaka, 573-0196, Japan

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

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。また、火山地形や衝突クレーターについても、小規模地形や細部の形態・構造から形成要因が詳しく分析されている。しかし、火星における最新の地形研究について系統的かつ詳細に紹介した和書は実質的に出版されていない。

II. 本特集号の背景

本特集号は2011～2013年度に北海道大学低温科学研究所の共同研究の助成を受けて行われた研究集会（代表者：横川美和）での発表者を中心に、火星表面の地表プロセスに造詣の深い研究者に呼びかけて企画したものである。本特集号の背景となるこれらの研究集会の概要について以下に紹介する。プログラムなど詳細は北海道大学低温科学研究所の各年度の共同研究報告書（URL）を参照されたい。

2011年度：平成23年11月2～3日、「研究集会：サイクリックステップ—海底と火星極冠のアナロジー—」¹⁾、参加者18名。火星北極冠のスパイラルトラフがカタバ風によるサイクリックステップであるという仮説を検証しはじめたテキサス大学のIsaac B. SmithとJohn W. Holtを招いて行われた。火星極冠形成のモデリング、スパイラルトラフの詳細、地球上のさまざまな環境・底質で形成されるサイクリックステップの実験的・理論的研究、水上のステップ地形のアナログ実験の予報、南極氷床で観測されている氷のメガデューンについてのシミュレーション、地球の海底谷などで観測されているセディメントウェーブの詳細、海底谷を流れる混濁流によるサイクリックステップ形成を模した実験、岩盤や砂床に形成されるサイクリックステップ、火星の風成デューンの分布からの風系の推測、火星の風成デューンとそれを模した水路実験との比較などについて情報交換・議論が行われた。

2012年度：平成24年7月7～8日、「惑星地形・地層の成因と発達機構に関する研究集会」²⁾、参加者19名。扱う対象を火星表層のさまざまな

地形に広げ、地球表層の地形との類似点・相違点を探り、その成因と発達機構を議論した。水上のステップ形成に関するアナログ実験や理論解析、火星の風系に関するシミュレーション、氷河作用のシミュレーション、凍土、周氷河地形、土石流、礫を用いた洪水のシミュレーション、コーン地形、砂丘・デルタ地形についての実験的研究、水-流体（汽水）界面での界面波形成理論などについて議論が行われた。

2013年度：平成25年8月24日、10月25～26日（衝突研究会との合同セッション）、「惑星地形・地層の成因と発達機構に関する研究集会」³⁾、参加者延べ38名。2回の研究集会を行い、発表テーマも火星と地球の洪水地形やクレーター様地形の比較、グリーンランド氷床の変動、氷のステップ形成のアナログ実験と理論解析、雪の「ベッドフォーム」のシミュレーション、結氷河川におけるアイスジャム観測、岩盤のサイクリックステップ形成に関する実験と理論解析、波状地形形成に関する線形安定解析、混濁流による海底谷形成の実験的研究、砂丘および砂粒子の風による移動の数値シミュレーションなど多様性を増した。また、衝突研究会（研究集会タイトル：「火星の進化」）との合同開催により、ポスター発表の相互乗り入れや口頭発表の聴講などで、双方の参加者の交流をもつことができた。

以上、計4回の研究集会を通じて、惑星科学・岩石学・堆積学・地形学・雪氷学・工学など多岐にわたる分野の専門家による学際的交流が進み、火星を含めた惑星表面の地層・地形形成理解へ向けて多様なツールが存在することが認識された。北海道大学側の受け入れ教員のRalf Greve教授、泉典洋教授をはじめ、関係各位にこの場を借りて謝意を表する。

III. 本特集号の概要

本特集号では、現在または近過去（地球での第四紀に相当する時代）に活動したと考えられる多様な地形プロセスについて、とくに水や氷に関連する現象を中心として最新成果を紹介する。火星表面では風成地形（砂丘やヤルダン）も広範囲に

卓越するが、その一例として、谷口（2016）が独特な形状をもつ砂丘を実験室で復元した試みを口絵1で紹介している。収録した論文（総説・論説）は三部構成で編成した。

1) 火星の内外に原因のある地形プロセス

第I部では火星より外側（隕石衝突）または内側（火山活動）に起因する地形プロセスを対象とする。鈴木・栗田（2016）は火星の衝突クレーターに特有なエジェクタを対象に、形態分類、分布、形成過程などを総括するとともに、これまで着目されることの少なかったクレーターの劣化過程について考察している。衝突クレーターの形状から火星の地表プロセスに関する多くの情報が読みとれるという指摘は貴重である。野口・栗田（2016）は小規模なコーン地形（円錐形マウンド）を題材として、地球上の地形との比較により形態・分布を分析し、起源を考察した。火星のコーン地形には各種の火砕丘、凍結丘、泥火山、侵食残丘が含まれる可能性があり、とくに地表に流出した溶岩が水と接触して爆発することにより形成されるルートレスコーンが多いことを指摘している。これが事実であれば、火星における最近の火山活動と地表付近の水（氷）の存在を示唆することになる。

2) 火星の氷に関連する地形プロセス

第II部では、主として地表や地中に存在する氷に関する地表プロセスを扱った研究を紹介する。火星の高緯度の60%を超える地表下には含水率の高い表層物質（永久凍土ないし氷核）が広範囲に存在することが判明し、地球でみられる小規模な周氷河地形と酷似する地形も多数認定されている。猿谷（2016）は、周氷河地形の基本となる地中氷の形成メカニズムについて、現地を観察された地中氷、室内実験や数値モデルに関する最近の研究をまとめている。火星では液体水は存在しないが、塩分に富むレゴリスには273 Kをはるかに下回る環境下で不凍水が存在し、現在でも凍上が起こる条件にあると指摘されている。地球上に存在する周氷河地形（に酷似する地形）の多くが火星上でも認定されている。松岡（2016）は多角形土、淘汰構造土、凍結丘、サーモカルス

ト凹地、岩石氷河、斜面の線状地形と認定された地形について、分布・形態・規模などの特徴を総括し、各地形の形成環境や形成時代について解説している。中・高緯度地域では永久凍土（または氷核）の存在が重要な役割を果たしていること、過去の温暖湿潤環境下でつくられた化石地形だけでなく、多角形土や斜面の縦縞模様やロープ地形には現成の可能性があることについても紹介している。

火星表面を特徴づける雪氷現象の一つが両極の氷冠である。おもにH₂O氷（一部ドライアイス）で構成されるが、その範囲が著しく季節変化する点や、表面に渦巻き状の溝（スパイラルトラフ：横川ほか、2016の口絵2参照）がみられる点で、地球上の氷床と大きく異なる。最近の地中レーダ探査で氷冠の内部構造や形成史が判明するようになった。第II部の後半の論文2編はこのスパイラルトラフに焦点をあてている。横川（2016）は火星北極冠のスパイラルトラフがサイクリックステップであるとする最新の研究成果を示すとともに、氷上に水によって界面波を形成したアナログ実験について紹介している。泉（2016）は、スパイラルトラフが氷冠上を流れるカタバ風によって形成されるという前提のもとに、カタバ風によって発生する界面波の形成過程の定式化を試みている。

3) 火星の水に関連する地形プロセス

第III部では水（液体）が関与する地表プロセスを特集する。水の指標地形は生命の可能性を示唆する視覚情報となりうる点からも注目されている。その導入として、Dohm and Miyamoto（2016）は過去10億年前以降から現在にかけての火星上で水の作用を示す地学現象について概説している。過去の水の証拠として巨大な洪水流やデルタの跡、湖や海洋などの環境下で形成される鉱物の存在、最近の寒冷乾燥環境下での水の証拠としては地表下の含水層、斜面のガリーや縦縞模様が例示されている。後者については、単一の地形では乾燥なだれなど水の介在しないプロセスで説明される場合もあるが、複数の指標地形が混在する場合は水の作用を示す有力な証拠になると指摘され

ている。火星表面で起こる岩石の風化や破碎、岩屑の細片化のプロセスについては、探査機着陸地点の地表画像や鉱物の化学分析、火星環境を模した室内実験等に基づいて類推されている。佐藤ほか(2016)は、岩石の風化に関する従来の研究成果を論評している。現在の火星の環境下で起こりうる化学的風化作用としては玄武岩の酸化や少量の吸着水による溶解、その結果としての風化皮膜の形成が指摘されている。物理的風化作用では、融点の低い過塩素酸塩等の塩水の結晶化とその産物としての蜂の巣状の岩、温度の日較差の大きさに起因する熱破碎が有望視されている。

衝突クレーターの内壁斜面などにみられる鮮明なガリーやその下方に続くロープ地形は近年もともと注目される地形である。Parkner (2016)は、ガリー研究のプレクスルをもたらしした Malin and Edgett (2000) 論文とそれに続く 200 近い論文から、形態と形成プロセスに関する代表的な成果をとりまとめている。火星ではすでに数万のガリー地形が認定されており、そのなかには 3 Ma より若い地形も多数含まれる。形成プロセスとして地表流、地下水湧出による谷頭侵食、土石流、液体水の起源として地下表層または深層からの湧出、雪や地中氷の融解等が想定されている。一方で乾燥岩屑流やドライアイスのだれによる形成を提唱する研究者も多い。成瀬(2016)は、ロープ地形が土石流により形成されたという前提に立ち、土石流の数値モデルを利用して火星のロープ地形を再現できるパラメータを算出するという逆解析を行っている。計算事例は限られているが、地球上の土石流と類似する流れで堆積した地形として説明可能であることが指摘されている。

先述のように、地形情報は水、さらには生命の存在の指標となりうる。宮本ほか(2016)は大量の水が存在した過去に誕生した生命があるとすれば、その後の寒冷乾燥環境で生命活動を存続させている可能性、そして今後の生命探査の有力な候補地について論考している。例えば、地球の極限環境下に適応する無機化合物をエネルギー源とする細菌類は最低限の自由水があれば生存できるかもしれない。火山活動や泥火山などにより帯水

層からの揮発成分が放出されている場所では、このような細菌類が生き延びている可能性がある。そこで、Recurrence slope lineae など塩水の流動を示唆する地表現象がみられる場所が、着陸探査候補地として推薦されている。

注

- 1) <http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/kyoudou/report/H23/itiran.html> [Cited 2016/01/12].
- 2) <http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/kyoudou/report/H24/itiran.html> [Cited 2016/1/12].
- 3) <http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/kyoudou/report/H25/itiran.html> [Cited 2016/1/12].

文 献

- Baker, V.R. (1981): The geomorphology of Mars. *Progress in Physical Geography*, **5**, 473-513.
- Baker, V.R. (2001): Water and the Martian landscape. *Nature*, **412**, 228-236.
- Carr, M. (2006): *The Surface of Mars*. Cambridge, 307p.
- Dohm, J. and Miyamoto, H. (2016): Geomorphological indication of ancient, recent, and possibly present-day aqueous activity on Mars. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 121-132.
- 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.
- 泉 典洋 (2016): 氷床上のモルフォダイナミクス。地学雑誌, **125**, 105-119. [Izumi, N. (2016): Morphodynamics on the ice floor. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 105-119. (in Japanese with English abstract)]
- Malin, M.C. and Edgett, K.S. (2000): Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars. *Science*, **288**, 2330-2335.
- Malin, M.C., Carr, M.H., Danielson, G.M., Davies, E., Hartmann, W.K., Ingersoll, A.P.P., James, B., Marsursky, H., McEwen, A.S., Soderblom, L.A., Thomas, P., Veveka, J., Caplinger, M.A., Ravine, M.A., Soulanille, T.A. and Warren, J.L. (1998): Early views of the Martian surface from the Mars Orbiter Camera of Mars Global Surveyor. *Science*, **279**, 1681-1685.
- 松岡憲知 (2016): 火星表面の永久凍土と周氷河作用。地学雑誌, **125**, 63-90. [Matsuoka, N. (2016): Permafrost and periglacial processes on the Martian surface. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 63-90. (in Japanese with English abstract)]
- McCleese, D.J., Heavens, N.G., Schofield, J.T., Abdou, W.A., Bandfield, J.L., Calcutt, S.B., Irwin, P.G.J.,

- Kass, D.M., Kleinböhl, A., Lewis, S.R., Paige, D.A., Read, P.L., Shirley, M.I.J.H., Taylor, F.W., Teanby, N. and Zurek R.W. (2010): Structure and dynamics of the Martian lower and middle atmosphere as observed by the Mars Climate Sounder: Seasonal variations in zonal mean temperature, dust, and water ice aerosols. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E12016.
- 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., Dearn-dorff, D.G., DeJong, A., Alan, D.W., Dobra, 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.
- 宮本英昭・小松吾郎・ジェームズ・ドーム・逸見良道・白井寛裕・山岸明彦 (2016): 地形学からみた火星の表層環境史と生命探査. 地学雑誌, **125**, 171-184. [Miyamoto, H., Komatsu, G., Dohm, J., Henmi, R., Usui, T. and Yamagishi, A. (2016): Geomorphological view of the environmental history of Mars and candidate habitable environments. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 171-184. (in Japanese with English abstract)]
- Murchie, S.L., Mustard, J.F., Ehlmann, B.L., Milliken, R.E., Bishop, J.L., McKeown, N.K., Noe Dobra, E.Z., Seelos, F.P., Buczkowski, D.L., Wiseman, S.M., Arvidson, R.E., Wray, J.J., Swayze, G., Clark, R.N., Des Marais, D.J., McEwen, A.S. and Bibring J.-P. (2009): A synthesis of Martian aqueous mineralogy after 1 Mars year of observations from the Mars Reconnaissance Orbiter. *Journal of Geophysical Research*, **114**, E00D06.
- 成瀬 元 (2016): 火星のローブ状地形の成因—土石流堆積物逆解析による予察的検討—. 地学雑誌, **125**, 163-170. [Naruse, H. (2016): Origins of lobate landforms on Mars: Preliminary examination from an inverse analysis of debris-flow deposits. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 163-170. (in Japanese with English abstract)]
- 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, K. (2016): Cones on Mars with special reference to volcanic cone morphology. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 35-48. (in Japanese with English abstract)]
- Parkner, T. (2016): Gullies on Mars: A review. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 155-161.
- 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)]
- 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, **125**, 133-153. [Sato, M., Hattanji, T. and Matsuo, N. (2016): Rock weathering processes and products on Martian surface. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 133-153. (in Japanese with English abstract)]
- Smith, P.H., Tamppari, L.K., Arvidson, R.E., Bass, D., Blaney, D., Boynton W.V., Carswell, A., Catling, D.C., Clark, B.C., Duck, T., DeJong, E., Fisher, E., Goetz, W., Gunnlaugsson, H.P., Hecht, M.H., Hipkin, V., Hoffman, J., Hviid, S.F., Keller, H.U., Kou-naves, S.P., Lange, C.F., Lemmon, M.T., Madsen, M.B., Markiewicz, W.J., Marshall, J., McKay, C.P., Mellon, M.T., Ming, D.W., Morris, R.V., Pike, W.T., Renno, N., Staufer, U., Stoker, C., Taylor, P., White-way, J.A. and Zent, A.P. (2009): H₂O at the Phoenix landing site. *Science*, **325**, 58-61.
- Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Bell III J.F., Brückner, J., Cabrol, N.A., Calvin, W., Carr, M.H., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crumpler, L., Des Marais, D.J., D'Uston, C., Economou, T., Farmer, J., Farrand, W., Folkner, W., Golombek, M., Gorevan, S., Grant, J.A., Greeley, R., Grotzinger, J., Haskin, L., Herkenhoff, K.E., Hviid, S., Johnson J., Klingelhofer, G., Knoll, A., Landis, G., Lemmon, M., Li, R., Madsen, M.B., Malin, M.C., McLennan, S.M., McSween, H.Y., Ming, D.W., Moersch, J., Morris, R.V., Parker, T., Rice, J.W. Jr., Richter, L., Rieder, R., Sims, M., Smith, M., Smith, P., Soderblom, L.A., Sullivan, R., Wanke, H., Wdowiak, T., Wolff, M. and Yen, A. (2004a): The Spirit rover's Athena science investigation at Gusev crater, Mars. *Science*, **305**, 794-799.
- Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Bell III J.F., Brückner, J., Cabrol, N.A., Calvin, W., Carr, M.H., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crumpler, L., Des Marais, D.J., D'Uston, C., Economou, T., Farmer, J., Farrand, W., Folkner, W., Golombek, M., Gorevan, S., Grant, J.A., Greeley, R., Grotzinger, J., Haskin, L., Herkenhoff, K.E., Hviid, S., Johnson J., Klingelhofer, G., Knoll, A., Landis, G., Lemmon, M., Li, R., Madsen, M.B., Malin, M.C., McLennan, S.M., McSween, H.Y., Ming, D.W., Moersch, J., Morris, R.V., Parker, T., Rice, J.W. Jr., Richter, L., Rieder, R., Sims, M.,

- Smith, M., Smith, P., Soderblom, L.A., Sullivan, R., Wanke, H., Wdowiak, T., Wolff, M. and Yen, A. (2004b): The Opportunity rover's Athena science investigation at Meridiani Planum, Mars. *Science*, **306**, 1698-1703.
- Summerfield, M.A. (1991): *Global Geomorphology*. Longman, Essex, 537p.
- 鈴木絢子・栗田 敬 (2016): 火星衝突クレーターの特異なエジェクタ地形と劣化過程. 地学雑誌, **125**, 13-33. [Suzuki, A.I. and Kurita, K. (2016): Fluidized ejecta morphologies and degradation processes of Martian impact craters. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 13-33. (in Japanese with English abstract)]
- 谷口圭輔 (2016): アナログ実験で進展した砂丘形態による火星表面の風況推定. 地学雑誌, **125**, i. [Taniguchi, K. (2016): Analogue experiments using aeolian sand dunes reveal the Martian wind regime. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, i.]
- Vasavada, A.R., Grotzinger, J.P., Arvidson, R.E., Calef, F.J., Crisp, J.A., Gupta, S., Hurowitz, J., Mangold, N., Maurice, S., Schmidt, M.E., Wiens, R.C., Williams, R.M.E. and Yingst, R.A. (2014): Overview of the Mars Science Laboratory mission: Bradbury landing to Yellowknife Bay and beyond. *Journal of Geophysical Research Planets*, **119**, 1134-1161.
- 横川美和 (2016): 氷上のサイクリックステップ—火星北極冠のスパイラルトラフとアナログ実験—. 地学雑誌, **125**, 91-104. [Yokokawa, M. (2016): Cyclic steps on ice: Spiral troughs on Mars' North Polar ice cap and analogue experiments. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 91-104. (in Japanese with English abstract)]
- 横川美和・Smith, I.B.・Holt, J.W. (2016): 火星極冠上に発達するスパイラルトラフ. 地学雑誌, **125**, ii. [Yokokawa, M., Smith, I.B. and Holt, J.W. (2016): Spiral troughs formed on the polar ice caps of Mars. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, ii.]