

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：17501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K12971

研究課題名（和文）南極内陸部におけるポリゴンの生成プロセスの解明と火星地表環境解明への展開

研究課題名（英文）Formation process of polygons in central Dronning Maud Land, East Antarctica: Development for elucidation of Martian surface environment

研究代表者

小山 拓志 (KOYAMA, Takushi)

大分大学・教育学部・准教授

研究者番号：30553581

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：東南極の中央ドロンニングモードランドに位置するVassdalenにおいて、ポリゴンの UAV-SfM測量を実施し、詳細なデジタル地形モデル（DEM）および高精度分布図を作成した。また、地形量の一つである尾根谷度を活用することで、ポリゴンの規模および形態の把握を試みた。さらに、詳細なポリゴンの三次元形態と、地中レーダーおよびトレンチ調査によって得られた内部構造のデータを活用して、火星地表環境解明へ向けた画像解析を試行し、火星の地表環境を推定した。なお、火星のポリゴン解析にも尾根谷度を活用したことで、南極のポリゴンに類似するポリゴンを、火星の地表から抽出することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、地球上で最も火星に近い環境下（極低温乾燥環境下）にある南極の微地形は、火星の表層環境のアナログとして注目されている。ポリゴンに代表される南極の微地形の形態・規模、地下構造、およびプロセス調査に基づき火星の地表環境や浅部地下構造が類推されてきた。本研究によって、地球側（南極）の地形データが高精度化されたことで、火星の一部地域の地表環境を推定することができた。この成果は、2030年代実施予定の火星テラフォーミングの研究への貢献や火星探査機の開発などにも十分寄与できると考えている。

研究成果の概要（英文）：To address these problems, we developed an UAV-SfM survey at Vassdalen in central Dronning Maud Land, East Antarctica and produced a decimeter-scale high-resolution DEM over an area of ~1.5 km by ~3 km area that contained moraine surfaces with various abandonment ages and differing polygon development. At some key polygons on key surfaces, we produced even higher-resolution DEMs using photographs taken from a high-view camera attached to a 3.5-m high pole using SfM analysis. Additionally, we conducted pit excavations across marginal troughs in these key polygons to examine the subsurface wedge structures. We present the results of these investigations including our effort to evaluate the size distribution of the polygons using a “ridgeness” parameter l calculated from the DEMs as well as pit exposure logs and discuss the temporal changes in the polygon sizes and the relation between the subsurface wedge structures and three-dimensional form of the surfaces of the polygons.

研究分野：自然地理学

キーワード：南極 ポリゴン UAV-SfM測量 火星 地表環境 周氷河地形 リモートセンシング 尾根谷度

1. 研究開始当初の背景

申請者は第 57 次南極地域観測隊の一員として、南極の海岸から約 230km 内陸に位置するトロール基地周辺において地形調査を実施した (平成 27~28 年度)。ここには、火星の地表面でも既に発見されているポリゴンと呼ばれる微地形が広域に分布している。ポリゴンとは、冬季の冷却によって永久凍土に生じる熱収縮割れ目 (楔形の割れ目: ウェッジ) が、地表で網状に連なる微地形のことである。この楔形に広がった割れ目の充填物の種類によって、アイスウェッジ (氷) やサンドウェッジ (砂)、複合ウェッジ (氷・砂) などに分類されている。また、極端に低温・乾燥環境下では、割れ目周囲のアイスウェッジの昇華に伴って表層物質が落ち込む、昇華型ウェッジも形成される。火星には、アイス・サンドウェッジに加え、この昇華型ウェッジが存在する可能性が指摘されている (Levy et al. 2010)。

近年、地球上で最も火星に近い環境下 (極低温乾燥環境下) にある南極の周氷河地形は、火星の表層環境のアナログとして注目されている (例えば、Marchant and Head, 2007)。ポリゴンに代表される南極の周氷河地形の形態・規模、地下構造、およびプロセス調査に基づき火星の地表環境や浅部地下構造が類推されている (例えば、Balme et al. 2013; 松岡, 2016)。

南極内陸部においては、例えば東南極のセール・ロンダーネ山地において、ポリゴンの形状と内部構造の現地調査が行われ、表面露出年代と比較することにより、それらの成長プロセスについての考察が報告されている (Matsuoka and Hirakawa; 1993, 2006)。しかし、これまで南極で実施されたポリゴン研究では、ポリゴンの直径と比高が簡易的に測られる程度で、それらの三次元形態が詳細に測量された例は無い。また、広範囲をカバーしたポリゴンの分布図の作成事例も存在しない。つまり、これまでの研究では、ポリゴンの規模や形態、あるいは分布特性に関するデータが不足している状態で、それらと内部構造との関係性、あるいは生成に関する議論をしてきたため、統一的な見解が得られていないという問題があった。当然、火星の地表環境や浅部地下構造に関しても、南極のポリゴンデータを基に類推している部分が多いため、昇華型ウェッジの存在も含めて、未だに議論があり未解明な部分が多い。

そこで、近年地形学の分野で活用されている、小型 UAV (小型無人航空機) による空撮と SfM (複視点の画像から撮影場所および対象物の 3 次元位置を再現する手法) ソフトウェアを活用する着想を得た。この小型 UAV と SfM を使い、南極のポリゴンの精密測量を実施することができれば (以下、小型 UAV-SfM 測量と呼ぶ)、これまで不可能であったポリゴンの三次元形態の把握と詳細な分布図の作成 (分布特性の把握) が可能になると考えた (世界初)。そして、既往研究で進められてきた削岩機によるトレンチ掘削に加え、新たに地中レーダー (GPR) を活用して地下構造を広域的に把握することができれば、ポリゴンの形態・規模と地下構造の関係性について新たな知見が得られる可能性が高いと考えた。このような新たな技術や手法を活用し、これまで統一的な見解が得られていない南極におけるポリゴンの生成プロセスを解明できれば、火星の地表環境解明に直結するきわめて意義のある研究となる。

2. 研究の目的

- (1) これまでの研究の問題点は、掘削地点が極端に少なかったため、地下構造に関するデータが“点”でしかなかったことにある。形態・規模が変化する地点においても、連続的なデータを取得して“面的”に捉える必要があるにも関わらず、永久凍土の掘削は容易ではないため限界があった。地中レーダー (GPR) であれば、より広範囲の地下構造を面的に把握できるだけでなく、三次元で捉えることも可能となるため、新しい成果が期待できる。
- (2) 過去の研究では、ポリゴンの直径を計る程度で、正確な形態を記載し詳細な分布図を作成した事例はない。簡単な測量やスケッチではなく、高精度でポリゴンの三次元形態を把握しなければ、火星のポリゴンの生成プロセスや地下構造を推測するための比較材料とならない。また、空撮と SfM を併用すれば、高精度の三次元モデルや地形モデル、標高データを用いて歪みをなくした画像 (オルソフォト) が容易に作成できるという利点があり、リモートセンシングによる解析 (火星との比較) にも利用できる。既に申請者は予察的な解析によって、精度 50cm の地形モデルの作成に成功している。よって、より高スペックのパソコンであれば、精度 5cm 以下の地形モデル作成を実現できる可能性が極めて高い。
- (3) (2) で作成した地形モデルを使い、地形量の一つである尾根谷度 (Chiba et al. 2008: 尾根 (凸部) と谷 (凹部) を等価に数値化できるようにしたもの) を活用して、ポリゴンの形態・規模の把握を試みる。ポリゴンはその形態から、凸部 (上面のマウンド) と凹部 (トラフ) の組み合わせとも言えるため、尾根谷度を活用した解析ができる可能性が極めて高い。

本研究は、地球と火星に共通して分布するポリゴンの生成を解明し、その成果を活用して火星の地表環境を解明する。既に南極における現地調査によって、ポリゴンの小型 UAV-SfM 測量やトレンチ掘削、地中レーダーが終了しているため、解析が進めばポリゴンの生成に関する新たな知見が得られる可能性が非常に高い。

3. 研究の方法

(1) ポリゴンの形態・規模の解析

28年度に南極において、ポリゴン分布図の作成およびポリゴンの正確な形態・規模の把握（精密測量）を目的として、小型 UAV（小型無人航空機）による空撮を実施した。これにより、高度 100m から約 1 万枚の画像を撮影することに成功している。また、地形モデルの作成に必要な地上基準点も、空撮を行った約 3.5km²内に 38 地点設置し現地にて測量を実施した。

南極で空撮した画像を、SfM を使ってポイントクラウドの生成、三次元モデルの構築を行い、高精度の地形モデル、標高データを用いて歪みをなくした画像（オルソフォト）を作成する（解析用高性能パソコン：平成 29 年度設備備品費で計上）。地形モデルは GeoTiff などのメッシュデータなどでファイル出力し、地理情報システム（GIS）によってポリゴンの形態・規模を解析する。また、ポリゴンの形態・規模を、地形量の一つである尾根谷度を使って解析する。尾根谷度の解析は、千葉大学の金田平太郎氏（研究協力者）と共に行う。南極にて現地踏査を行えなかった地点のポリゴンについては、衛星画像解析によってその形態・規模を抽出する。

(2) 火星地表環境・地下構造の解明（再検討）

火星の衛星画像をリモートセンシングソフトウェアで解析することによって、火星のポリゴンの密度、形態、規模を広域的に把握する。その際、小さいポリゴン（直径 1m 程度）も抽出できるように、オブジェクト分類手法を用いてポリゴンの形態を分類基準として抽出する。次に、SfM で作成した南極のポリゴンのオルソ画像についても、ENVI や GIS で解析し、火星と南極のポリゴンの形態・規模を比較する。そして、南極におけるポリゴンの形態・規模と地下構造の解析結果を当てはめることで、火星のポリゴンの種類、形成過程、ひいては地表環境・地下構造までを論じる。

4. 研究成果

研究成果の一部は現在学術雑誌に投稿中であるため、ここでは南極のポリゴンの規模・形態に関する成果について報告する。

(1) 調査地域概要と野外調査の方法

中央ドロンイングモードランドは、東南極の内陸部（西経約 170 度から東経約 20 度、南緯 70 度から南緯 75 度）に位置し、東西約 800km、南北約 500km の露岩域である。この地域には、標高約 1000m から 3000m ほどのヌナタクが、東西方向に連なっている。

中央ドロンイングモードランドの中西部、東経約 2 度 27 分から東経約 2 度 57 分、南緯約 71 度 58 分から南緯約 72 度 4 分の東西約 16km、南北約 10km の地域は Jutulsessen と呼ばれ、周囲が氷河に囲まれている。この地域の基盤岩は東南極クラトンに属しており、変成の進んだ変成岩で構成されたグラニュライトの陸塊の 1 つとなっている。当地域においては、地質調査に重点が置かれており、地形学的もしくは第四紀地質学的調査はほとんど行われていない。本研究地である Vassdalen は Jutulsessen 中西部に位置しており、南北約 3km、東西約 1.4km ほどの範囲にモレーンやポリゴンが広範に分布する。

現地調査では、まず計 38 カ所に GCP（Ground Control Point）を設置し、トータルステーション（SOKKIA SET4）を使用して各 GCP の位置に対して相対測量を行った。その後、ハンディ GPS により得られた、各 GCP における絶対座標値からの残差が最小となるように測定座標系全体を平行移動・回転させ、座標系 WGS1984 に準拠するように座標値を求めた。空中写真撮影は、GCP を含む南北約 3km、東西約 1.4km、面積約 3.2 km²の範囲において地表から高度約 100m の高さから行い、60 回のフライトで計 8899 枚の写真を撮影した。

(2) SfM 解析

8899 枚の空中写真を SfM 解析することで、研究地域の高解像度の数値標高モデル（Digital Elevation Model, DEM）とオルソ画像を作成した。

まず、すべての空中写真を目視で確認し、白飛びした写真や写真内のコントラストが大きい写真を取り除いた。その後、SfM 解析のフローチャートと各処理段階での設定に従い、次の順序で処理を進めた。

SfM 解析により作成された DEM の解像度は約 12.2cm、オルソ画像の解像度は約 3.0cm であった（図

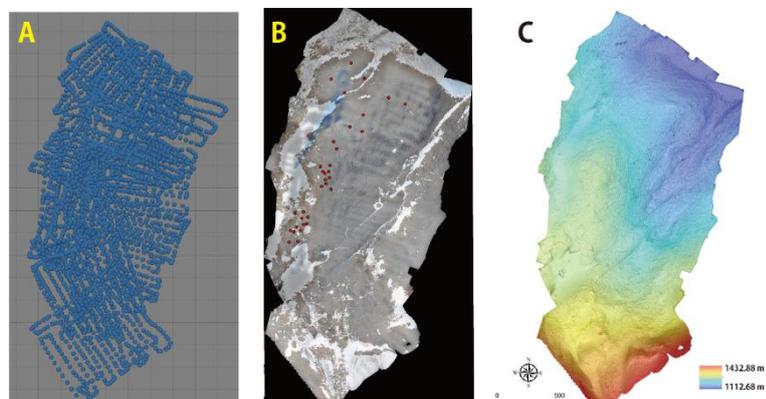


図 1 UAV-SfM 測量によって作成したオルソ画像(B)と標高段彩図(斜度図：C)

A は写真撮影位置をポイントで示したもの。オルソ画像の解像度は約 3.0cm である。

1)。

(3) 地形判読と区分

研究地域である Vassdalen を含む Jutulsessen 全体の周氷河地形の把握を目的として、衛星画像を用いた地形判読を行った。衛星画像については、陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) の光学センサー PRISM によって直下視および後方視撮影された衛星画像を使用し実体視地形判読を行った。

研究地域である Vassdalen については、SfM 解析から得られた DEM を使いステレオペアを作成し、詳細な実体視地形判読を行った。ALOS 衛星画像の実体視判読の結果、Jutulsessen では地形面が氷河から解放された時期の古いものから、大きく J (Jutulsessen の略) 1 から J4 の 4 面に地形面が区分された。それぞれの概要を以下に示す。

南部の標高約 1800m から 2000m の平坦な基盤侵食面や、東部の急崖の東側の比較的平坦な基盤侵食面を J1 面とした。この地形面は、かつて Jutulsessen のほぼ全域を覆っていた氷床が縮小することにより氷床から解放されて形成されたと推定される。J1 面よりやや低い標高約 1600m から 1700m の高さに残る平坦な基盤侵食面を J2 面とした。北東部の U 字谷やモレーンなどの標高約 1400m から 1500m 程度の面積の広い地形面を J3 面とした。標高約 1400m から 1600m と最も標高が低く、最も現成の氷河に近い基盤侵食面を J4 面とした。北西部や北東部、南部の J4 面は、J3 面を形成した氷河が縮小する際にローカル氷河として氷河から独立してそのまま留まり、その後その氷河が縮小・消失した際に形成されたと考えられる。また、南部に存在するローカル氷河に近接する J4 面は、より南部にある氷河が後退した際に取り残されたローカル氷河が縮小・後退した際に形成されたと考えられる。

0.12mDEM から作成した赤色立体地図ステレオペアの実体視判読の結果、Vassdalen では、地形面が氷床・氷河から解放された時期の古いものから、V1 から V5 面の 5 面に地形面を区分した(図 2)。なお、Vassdalen において区分した V1~V5 面は、Jutulsessen における J3 面にあたり、一部は J4 面に対応する。

Vassdalen 中央部の周囲に比べ標高が高く、丘状の地形面を V1 面とした。V1 面に比べると標高は低いものの、Vassdalen 中央部から北部にかけて広範囲にわたり広がる地形面を V2 面とした。V2 面北端のモレーンリッジのさらに北部の地形面を V3N 面、Vassdalen 中央部に北東から南西方向に延びる谷に沿った西側の小規模の地形面を V3S 面、さらに南部の谷と同方向に細長く延びる地形面を V4 面と判読した。この中央部の谷は氷河の浸食により形成されたと考えられる。

また、南部に存在する小規模の地形面群は、氷河が縮小した際にできた地形面として V5 面と包括的に分類した。

(4) ポリゴンの規模・形態・分布に関する解析結果

赤色立体地図ステレオペアを用いた Vassdalen の地形判読と、DEM によるポリゴンの断面図から、Vassdalen に分布する全てのポリゴンが、周囲を溝に囲まれ中央が盛り上がり丘状となっている中央上昇型のポリゴンであるとみなされた。また、ポリゴンのおおよその大きさが、直径 7~9m 程度のものと、直径十数 m 程度の 2 種類分布していることが、定性的な地形判読により判明した。そこで、Vassdalen に分布するポリゴンの形状を利用し、地形量の一つである尾根谷度 (Chiba et al., 2008) を用いれば、地形面上のポリゴンを尾根として表現できるのではないかと考えた。

まず、地形の不規則さを滑らかにするために 12cm DEM の 8×8 セル内の最高点を取り上げることで接峰面を作成し、96cmDEM の尾根谷度図を作成した。そして、作成した尾根谷度図を 2 値化(多角形土の上面を尾根、トラフを谷)し、尾根部を多角形土とみなした。また、平均化を行う際に、尾根と谷を視覚的に分かりやすくするため、尾根谷度を二値化(尾根を白、谷を黒)した(図 3)。

次に、抽出した凸地形には、ポリゴンだけでなく、迷子石やリッジ状の地形、ポリゴン以外のわずかな凸地形も含まれているため、尾根谷度により抽出した凸地形の中から、規模と形状(形態)によってポリゴン以外の凸地形の除外を試みた。ポリゴンは円形に近い形状のため、凸地形の形を真円であると仮定した場合の円の換算直径(diameter)を求めた。そして、その値を基に、尾根谷度によって抽出した凸地形の中から、ポリゴンではないとみなされるものを除外した。次に、Vassdalen におけるポリゴンのサイズは直径 7~9m 程度、もしくは十数 m 程度であるため、4m 以下あるいは 40m 以上の換算直径を持つ凸地形を除外した。

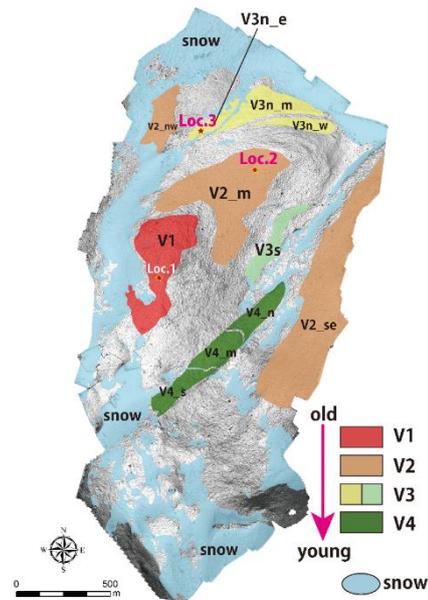


図 2 Vassdalen における地形区分

以上の解析によりポリゴンを抽出し、二値化した尾根部の重心を多角形土の位置とすることで、詳細な分布図の作成に成功した。

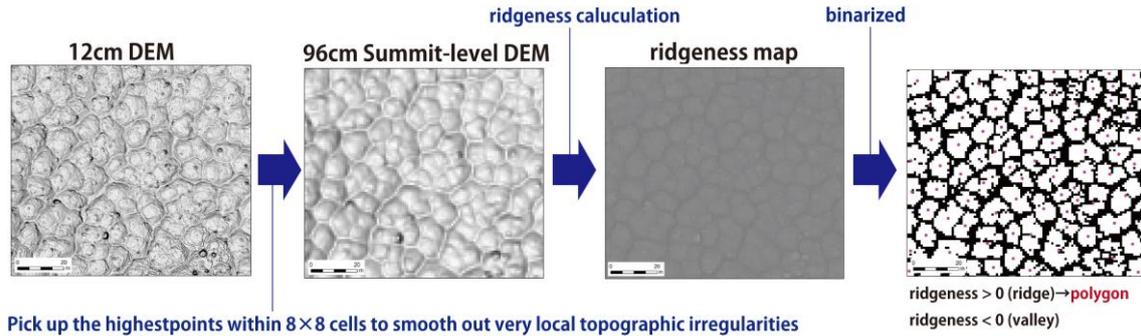


図3 尾根谷度による二値化（凸部を白，凹部を白）

(5) 各地形面におけるポリゴンの規模と内部構造

地形面の相対年代とポリゴンの規模の関係を明らかにするため、地形判読で分類した各地形面（V1～V4面）上のポリゴンの規模分布を求めた。

地形面の中で規模の大きなポリゴンが分布していたのは、V1面やV2_m面で、分類した地形面の中では相対的に古い地形面であった。その換算直径はV1面で7～9m、V2_m面では6～9mであった。次いで、V3n_w面（換算直径約5～7m）、V4_m面（換算直径約5～6m）と地形面が新しくなるにつれ、ポリゴンの規模は小さくなる傾向があった（図4）。

次に各地形面におけるポリゴンの詳細な3次元モデルと内部構造を比較した。その結果、比較的新しい地形面のポリゴンは、その規模が小さいことに加え、浅いトラフ（溝）が形成されており、アイスウェッジが小さいことも明らかとなった。このことから、Vassdalenにおけるポリゴンは、大規模なものが細分化され、小規模になっていく可能性が指摘できる。なお、この詳細と火星のポリゴンについては、学術論文に投稿中である。

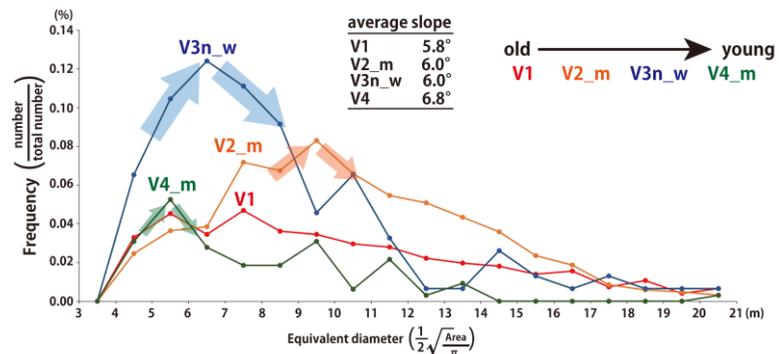


図4 地形区分とポリゴンの規模の関係

引用文献

- 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 (1), 63-90.
- 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.
- Chiba, T., Kaneda, S., Suzuki, Y. (2008) : Red relief image map: new visualization method for three dimensional data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37, B2, 1071-1076.
- 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.
- 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.
- Matsuoka, N. and Hirakawa, K. (1993) : Critical polygon size for ice-wedge formation in Svalbard and Antarctica. Proc. 6th Intl. Conf. Permafrost, 1. Wushan, South China University of Technology Press, 449-454.
- Matsuoka, N. and Hirakawa, K. (2006) : High-centered polygons in the Sor Rondane Mountains, East Antarctica: Possible effect of ice wedge sublimation. Polar Geosci., 19 189-201.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 小山拓志	4. 巻 168
2. 論文標題 南極を教材化する - ICTを活用した新たな試みとその効果 -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 駿台史学	6. 最初と最後の頁 71-97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 菅沼 悠介, 川又 基人, 白水 薫, 小山 拓志, 土井 浩一郎, 金田 平太郎, 青山 雄一, 早河 秀章, 小花 和 宏之	4. 巻 126
2. 論文標題 南極における無人航空機 (UAV) を用いた高解像度地形情報取得の試み	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.126.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 小山拓志
2. 発表標題 UAV-SfM測量と地中レーダーを活用した東南極内陸部における多角形土の三次元形態の把握 : 火星地表環境解明への展開
3. 学会等名 2019年日本地理学会春季学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takushi Koyama, Heitaro Kaneda, Yusuke Suganuma, and Yoshiomi Ishikawa
2. 発表標題 THREE-DIMENSIONAL FORM AND WEDGE STRUCTURES OF POLYGONS AROUND VASSDALEN, CENTRAL DRONNING MAUD LAND, EAST ANTARCTICA
3. 学会等名 The 2nd Asian Conference on Permafrost (ACOP2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小山拓志・金田平太郎・菅沼悠介・石川慶臣
2. 発表標題 UAV-SfM測量および尾根谷度を活用した多角形土の新たな解析手法の構築：東南極，中央ドロンイングモードランドにおける試み
3. 学会等名 第18回 茨城地理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takushi Koyama, Heitaro Kaneda, and Yusuke Suganuma
2. 発表標題 Estimation of Martian subsurface environments based on three-dimensional forms and sizes of polygons distributed in central Droning Maud Land, East Antarctica
3. 学会等名 34th INTERNATIONAL GEOGRAPHICAL CONGRESS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Suganuma, Jun'ichi Okuno, Tatsuo Kanamaru, Heitaro Kaneda, Takushi Koyama
2. 発表標題 Reconstruction of the East Antarctic ice sheet variability during the last 3 Ma in the central & eastern Droning Maud Land, East Antarctica
3. 学会等名 Past Antarctic Ice Sheet Dynamics (PAIS) Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

- ・「極地の魅力と極地観測から学ぶ地球のふしぎ」行橋市教育委員会 行橋市小学校教育研修会総合発表会 特別講演（2019年）
- ・「極地から学ぶ地球のふしぎ」行橋市立菟島小学校 行橋市立菟島小学校講演会（2017年）

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	金田 平太郎 (Kaneda Heitaro) (30415658)	中央大学・理工学部・教授 (32641)	
研究協力者	菅沼 悠介 (Suganuma Yuusuke) (70431898)	国立極地研究所・研究教育系・准教授 (62611)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関