

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(B)（海外学術調査）

研究期間：2016～2020

課題番号：16H05739

研究課題名（和文）過去300万年間における東南極氷床高度の定量的復元とその変動メカニズムの解明

研究課題名（英文）Reconstruction of the East Antarctic Ice Sheet thickness for the last 3 million years and mechanisms of their changes

研究代表者

菅沼 悠介（Suganuma, Yusuke）

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：70431898

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,030,000円

研究成果の概要（和文）：近未来の南極氷床融解とこれに伴う海水準上昇は人類的懸念である。しかし、南極氷床変動、とくに大規模融解のメカニズムには未解明の部分が多く、将来予測の課題であった。そこで本研究は、東南極の各地域での現地調査、試料分析、および固体地球シミュレーションに基づき、長期的な東南極氷床変動を詳細に復元した。そして、この結果から、過去の大規模氷床融解において温暖な深層水の流入がトリガーとなった可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在観測されている南極氷床の融解傾向が、長期的に継続、もしくは加速し、大規模な氷床融解へと繋がるかについては、不明な点も残されており、現状の海水準上昇の将来予測には不確実性が大きい。本研究では、地形・地質記録から過去の長期的南極氷床の変動の復元に成功し、氷床融解メカニズムの一部を明らかにした。この成果は、将来予測モデルの再現性確認や改良を通して、海水準上昇を含む将来予測の高精度化に資するものとなる。

研究成果の概要（英文）：The recent observations of the Antarctic ice sheet melt and its contribution to the sea-level rise are of great importance to human society. However, the mechanism of the Antarctic ice sheet melting is still largely unknown, which hampers future projections with higher precision. Here, we reconstruct long-term changes in the East Antarctic ice sheet based on field surveys and sample analysis aided by the Solid Earth model simulations, which allow a quantitative estimate of the ice sheet changes. Based on these analyses, the intensified warm current incision is thought to be a trigger of the significant Antarctic ice sheet melt in the past.

研究分野：地質学

キーワード：東南極氷床 表面露出年代測定 GIA 周極深層水 海水準

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 東南極氷床は、基底の大部分が海面上にあるため海洋の影響を直接受けないことや、通年で気温が氷点下であることから、現在進行中の地球温暖化に対して比較的安定であるとされてきた。しかし、近年の調査によって、過去の温暖な時代には南極氷床が顕著に縮小したイベントが存在したことが明らかになってきた。とくに、大気 CO<sub>2</sub> 濃度が現在の値に近く、全球平均気温も現在より約 3°C も高かった約 300 万年前(鮮新世温暖期)には、グリーンランド氷床と西南極氷床のみならず、東南極氷床も顕著に融解した可能性が高い。このことは、地球温暖化が進行した近未来においては、東南極氷床も大きく融解する可能性を示している。しかし、東南極氷床が融解を始める閾値(ティッピング・ポイント)や、そのメカニズムについては不明な点が多く、社会的にも大きな懸念となっていた。

### 2. 研究の目的

(1) 東南極内陸山地に分布する氷河地形や堆積物、およびそれらの風化状況をこれまでより精度良く広範囲でマッピングするとともに、基盤岩や迷子石試料の露出年代を精密測定することで、約 300 万年間以降の東南極氷床の高度や形状、体積の変動を定量的に復元し、とくに氷床融解メカニズムを明らかにする。この結果を基に、気候変動に対する東南極氷床の応答様式を解明するとともに、氷床・気候モデルの評価や較正を通じて氷床融解・海水準上昇の将来予測の高精度化に資する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 現地調査

東南極内陸の中央ドロンニングモードランド、シューマツハオアシス、および宗谷海岸地域において、現地調査を実施する。とくに従来の地形・地質踏査だけでなく、UAV(無人ヘリ)フライト調査による高解像度地形情報を取得することで、これまでより高精度かつ広範囲での氷河地形・堆積物の記載・マッピングや氷河堆積物の風化度評価を実施する。この結果に基づき、氷床変動復元に適した岩石試料を採取する。

#### (2) データ解析・試料分析

UAV で取得した地形計測結果と、衛星・空中写真解析を組み合わせることで、詳細な地形解析を行う。また、基盤岩や迷子石から採取した岩石試料の表面露出年代測定や、岩石学的分析に基づき氷成堆積物の風化度を評価することで、過去の氷床変動を精密に復元する。

#### (3) 氷床変動の復元

(2) で得られた過去の氷床変動データについて、アイソスタシーによる隆起効果や氷床流動を考慮することで、東南極の各所における約 300 万年以降の東南極氷床変動を定量的に復元する。そして、これらの結果を基に、とくに急激な氷床融解メカニズムや、温暖な環境下における全球的な気候変動に対する東南極氷床の応答メカニズムの解明に取り組む。

### 4. 研究成果

#### (1) 無人ヘリおよび航空写真を用いた地形計測

中央ドロンニングモードランドと宗谷海岸地域において UAV フライト調査を実施し、詳細な氷河地形計測を試みた。これは近年注目されている Structure from Motion 多視点ステレオ写真測量 (SfM-MVS) を用いた高解像度地形情報の取得に基づくものである。本研究では、とくに GNSS 衛星特性の解析 UAV の GNSS モジュールの改良による位置制御問題の解決、および低温・強風対策などによって、日本の調査隊として初めて南極における UAV フライト調査による高解像度地形情報の取得に成功した。その結果、中央ドロンニング・モードランドでは、詳細なポリゴン地形解析を可能とする三次元地形モデルが得られた(図 1a-c)。また、宗谷海岸では、三次元地形モデルから、氷床変動の影響を受けて形成された氷河地形と、極域での長期の風化による特徴的な侵食地形を明瞭に区分することができた。これらの結果から、UAV フライト調査は、

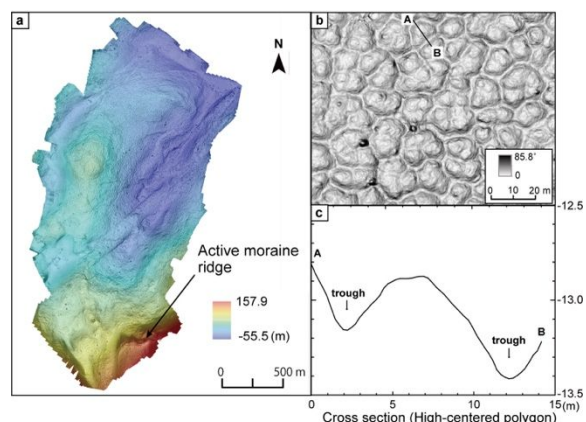


図1 UAV フライト調査と SfM-MVS 解析によって取得された三次元地形モデル。(a) 調査域全域の地形モデル。(b, c) ポリゴンの地形とその断面(菅沼ほか, 2017 より)

調査期間が限られる南極調査において、効率よく広範囲の調査を可能とし、従来の現地調査の限界を克服する手法として大いに期待できることが明らかになった（菅沼ほか，2017；2018）。

また、過去に国土地理院によって南極宗谷海岸域で撮影された空中写真アーカイブについても、SfM-MVS 解析を用いることで、オルソモザイク画像および地形の再現性の高い数値表層モデル（DSM）を作成することにも成功した。この結果、既存の DSM では判読できなかった解像度（数 10 m スケール）の氷河地形および岩盤の微起伏を読み取ることが可能となった（川又ほか，2021）。

### (2) 南極内陸基盤岩の風化度評価と風化メカニズムの研究

南極露岩域は、極低温・乾燥条件下での岩石の風化メカニズムを知る上で稀有な環境を提供する。そこで本研究は、東南極のセール・ロンダーネ山地において、極低温・乾燥地域における花崗岩の風化様式およびメカニズムを検討した。その結果、一般に岩石の化学風化の指標とされる強熱減量（Loss On Ignition: LOI）および全岩主要元素組成については、風化した岩石表面と比較的新鮮な岩石中心の間に大きな違いが認められなかった。このことは、含水粘土鉱物の生産のような化学風化プロセスがほとんど起きていないことを示している。一方、岩石中の Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>比と、Color Strength Index (CSI) については、岩石表面と中心部に大きな違いがあった。顕微鏡観察および顕微レーザーラマン分光分析の結果、この違いは鉱物粒間に形成された針鉄鉱に起因すること、また硬さ試験機（エコーチップ）測定の結果から、外殻がより脆弱であることが示された。つまり、花崗岩試料は主に物理風化によってひび割れを起こし、そこに脈状の針鉄鉱の形成されたことが示唆される（図 2）。さらに、電子プローブマイクロアナライザー（EPMA）分析の結果から、風化した岩石では、元来岩石中に存在した Fe-Ti 酸化物粒子が変質し、その程度が大きい場合は、磁鉄鉱は赤鉄鉱へ、イルメナイトは分解されて形状・組成ともに元来の性質を示さない物質へと変化することが明らかになった。以上のことは、極低温・乾燥環境下における花崗岩の風化は、環境（雪または蒸気）からの液体の水の供給がないため、主に酸化によって進むプロセスであること、そしてそのプロセスには極めて長い時間を要することが示唆された。また、岩石表面の色は主に岩石表面の水酸化鉄量を表すことから、南極内陸部における岩石の風化度評価方法として、現地調査もしくは衛星観測による岩石表面の色調データの解析が有効であることが明らかになった（Kanamaru et al., 2018）。

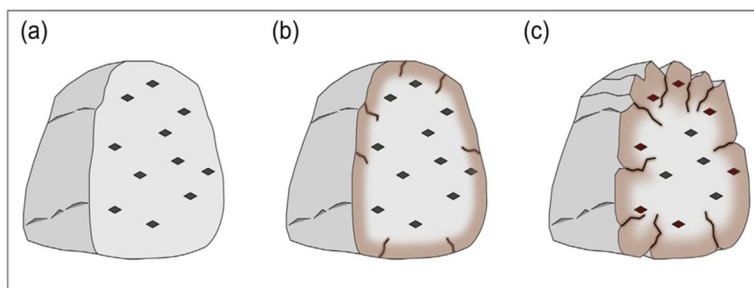


図 2 極低温・乾燥環境下における岩石風化プロセスの模式図（Kanamaru et al., 2018）

### (3) 急激な氷床融解メカニズム

東南極、宗谷海岸南部の露岩域（スカルプスネス、スカレン、テーレン）において、氷河地形調査と採取した岩石試料の表面露出年代測定を実施した。そして、この結果に基づき、最終氷期以降の南極氷床の融解過程を復元した。その結果、標高 50 m から 400 m（最高地点）まで連続的に採取した試料の表面露出年代が 9-5 千年前に収束することが分かった（図 3）。この結果は、最終氷期において東南極氷床はこの地域の最高地点まですべて覆っていたこと、その後 9-5 千年前にかけて急激に融解したことを示す。この急激な氷床融解のタイミングは、最終氷期以降におきた全球的な氷床融解のタイミングに比べて有意に遅く、周辺海域における海水温のピークや、南極氷床コアに記録される気温上昇のタイミングと比較しても有意に遅れる。このことは、宗谷海岸域における東南極氷床の急激な融解は、比較的温暖な周極深層水（Circumpolar deep water: CDW）の流入を示唆することが分かった（Kawamata et al., 2020）。

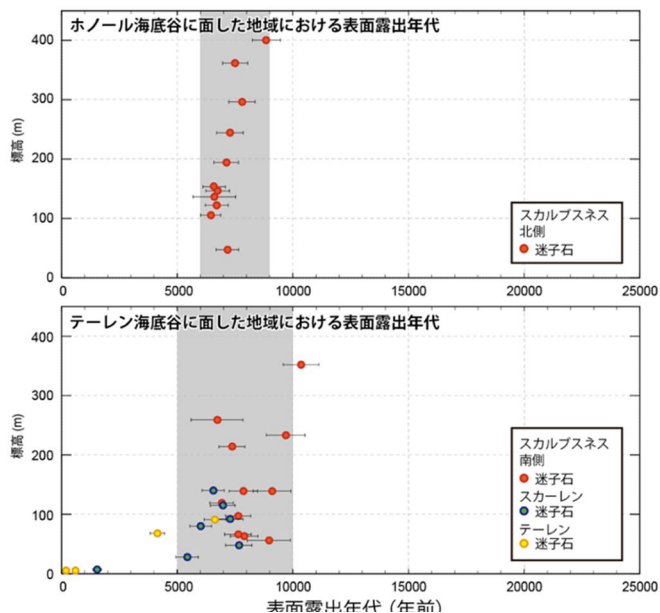


図 3 東南極、宗谷海岸南部で復元された氷床高度低下イベント。急激な氷床融解は温暖な周極深層水の流入が原因であったと考えられる（Kawamata et al., 2020）。

また、同様の調査を中央ドロンニングモードランドでも実施した。そして、中央ドロンニングモ

ードランドと宗谷海岸で得られた氷床高度の低下に対して，新たに固体地球の粘弾性変形(GIA)モデルシミュレーションを実施した結果，このエリアにおける海水準のピークと急激な氷床融解のタイミングが一致することを見出した.この結果は，現在論文として投稿中である．

#### (4) 長期的な氷床変動

ノルウェー，スウェーデン，デンマーク，およびアメリカのチームとの国際共同研究によって東南極，西部ドロンニングモードランドにおける氷河地形のマッピング(Newall et al., 2020)と，採取岩石試料の表面露出年代測定に基づく過去300万年間の氷床高度変動の研究を進めた.この結果，最終氷期におけるこの地域における氷床高度や，全期間を通じた氷床高度の上限などが明らかになった(Anderson et al., 2020). 今後は，氷床流動モデルや気候モデルと組み合わせることで，この地域における全球気候変動に対する東南極氷床の応答様式が明らかになると考えている．

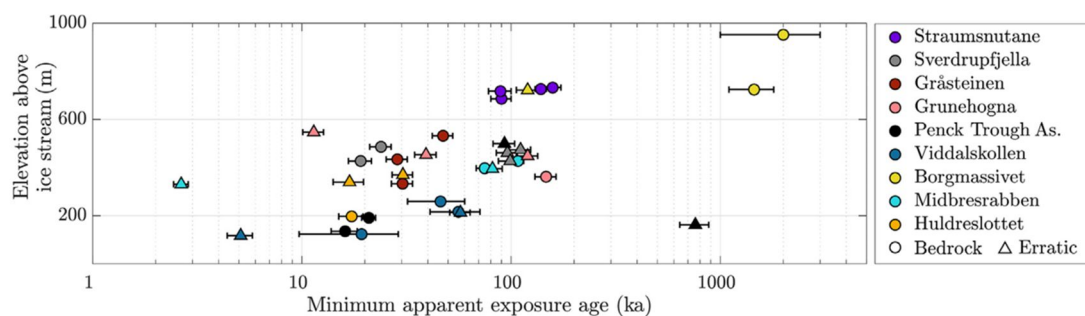


図4 西部ドロンニングモードランドで復元された過去300万年間の氷床高度変動(Anderson et al., 2020).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Newall, J.C.H., Dymova, T., Serra, E., Biomdin, R., Fredin, O., Glasser, N.F., Lundberg, C., Sukanuma, Y., Harbor, J.M., Stroeven, A.P.	4. 巻 -
2. 論文標題 The glacial geomorphology of western Dronning Maud Land, Antarctica	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Maps	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/17445647.2020.1761464	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 川又基人, 菅沼悠介, 土井浩一郎, 澤柿教伸, 服部晃久,	4. 巻 -
2. 論文標題 年代測定に基づく東南極宗谷海岸南部 Skarvsnes における氷床後退過程の復元	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 -
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, 石輪健樹, 川又基人, 奥野淳一, 香月興太, 板木拓也, 関宰, 金田平太郎, 松井浩紀, 羽田裕貴, 藤井昌和, 平野大輔	4. 巻 -
2. 論文標題 東南極における海域-陸域シームレス堆積物掘削研究の展望	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 -
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 Kanamaru Tatsuo, Sukanuma Yusuke, Oiwane Hisashi, Miura Hideki, Miura Makoto, Okuno Jun'ichi, Hayakawa Hideaki	4. 巻 317
2. 論文標題 The weathering of granitic rocks in a hyper-arid and hypothermal environment: A case study from the Sor-Rondane Mountains, East Antarctica	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geomorphology	6. 最初と最後の頁 62 ~ 74
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.geomorph.2018.05.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 菅沼悠介, 田邊優貴子, 香月興太, 柴田大輔, 川又基人	4. 巻 62
2. 論文標題 水上からの湖底・海底堆積物掘削プロジェクトの報告 (JARE-58/59)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 南極資料	6. 最初と最後の頁 15-42
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 -

1. 著者名 Andersen J.L., Newall J.C., Blomdin R., Sams S.E., Fabel D., Koester A.J., Lifton N.A., Fredin O., Caffee M.W., Glasser Neil F., Rogozhina I., Suganuma Y., Harbor J.M., Stroeven A.P.	4. 巻 249
2. 論文標題 Ice surface changes during recent glacial cycles along the Jutulstraumen and Penck Trough ice streams in western Dronning Maud Land, East Antarctica	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quaternary Science Reviews	6. 最初と最後の頁 106636 ~ 106636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.quascirev.2020.106636	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 川又基人, 土井浩一郎, 澤柿教伸, 菅沼悠介	4. 巻 94
2. 論文標題 日本南極地域観測隊アーカイブ空中写真を用いた数値表層モデル作成とその有用性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地理学評論,	6. 最初と最後の頁 1-16
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishiwa Takeshige, Okuno Jun'ichi, Suganuma Yusuke	4. 巻 49
2. 論文標題 Excess ice loads in the Indian Ocean sector of East Antarctica during the last glacial period	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geology	6. 最初と最後の頁 1182 ~ 1186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1130/G48830.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishiwa Takeshige, Tokuda Yuki, Itaki Takuya, Sasaki Satoshi, Suganuma Yusuke, Yamasaki Shintaro	4. 巻 28
2. 論文標題 Bathymetry data and water column profiles in the shallow waters of Langhovde in L?tzow-Holm Bay, East Antarctica	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 100650 ~ 100650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2021.100650	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KATSUKI Kota, SETO Koji, SUGANUMA Yusuke, YANG Dong Yoon	4. 巻 128
2. 論文標題 Characteristics of Portable Core Samplers for Lake Deposit Investigations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 359 ~ 376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.128.359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suganuma Yusuke, Katsuki Kota, Kaneda Heitaro, Kawamata Moto, Tanabe Yukiko, Shibata Daisuke	4. 巻 125
2. 論文標題 Development of a portable percussion piston corer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of the Geological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 323 ~ 326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2018.0065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawamata Moto, Suganuma Yusuke, Doi Koichiro, Misawa Keiji, Hirabayashi Motohiro, Hattori Akihisa, Sawagaki Takanobu	4. 巻 247
2. 論文標題 Abrupt Holocene ice-sheet thinning along the southern Soya Coast, L?tzow-Holm Bay, East Antarctica, revealed by glacial geomorphology and surface exposure dating	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quaternary Science Reviews	6. 最初と最後の頁 106540 ~ 106540
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.quascirev.2020.106540	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Suganuma, Y., Kuhn, G., Hillenbrand, CD., Zondervan
2. 発表標題 Ice retreat history in Pine Island Bay, revealed by sedimentary Be-10 records
3. 学会等名 SCAR (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suganuma, Y., Kuhn, G., Hillenbrand, CD., Zondervan
2. 発表標題 Reconstruction of ice retreat history in Pine Island Bay, West Antarctica, based on sedimentary Be-10 records
3. 学会等名 JpGU
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suganuma, Y. and Okuno, J.
2. 発表標題 East Antarctic ice sheet variability during the last 3 Ma in the central & eastern Droning Maud Land
3. 学会等名 PMIP2017 (Keynote Lecture) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Suganuma, Y., Okuno, J., Kanamaru, T., Kaneda, H., Koyama, T.,
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 PAIS2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Suganuma, Y., Kuhn, G., Hillenbrand, C-D., Zondervan
2. 発表標題 e-10 evidence for a paleo-subglacial lake and subsequent deglaciation processes in Pine Island Bay, West Antarctica
3. 学会等名 PAIS2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Reconstruction of the East Antarctic ice sheet variability during the last 3 Ma in the central & eastern Droning Maud Land, East Antarctica
2. 発表標題 Yusuke Suganuma, Heitaro Kaneda, Tasuo Kanamaru, Takushi Koyama, Jun'ichi Okuno
3. 学会等名 The Seventh Symposium on Polar Science will be held at the National Institute of Polar Research (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 土砂採取装置	発明者 菅沼悠介, 香月興太, 田邊優貴子	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-240581	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

## 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
研究分担者	奥野 淳一  (Okuno Jun'ichi)  (00376542)	国立極地研究所・研究教育系・助教    (62611)	

	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	金丸 龍夫  (Kanamaru Tatsuo)		
研究協力者	川又 基人  (Kawamata Moto)		
研究協力者	金田 平太郎  (Kaneda Heitaro)		

## 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			
				他3機関
スウェーデン	Geomorphology & Glaciology	Department of Physical Geography	Stockholm University	
ドイツ	Alfred Wegener Institute			
英国	British Antarctic Survey			
ニュージーランド	GNS Science, National Isotope Centre			
米国	Purdue University			