氷河地形調査と表面露出年代測定に基づく 東南極宗谷海岸南部 Skarvsnes における氷床後退過程の復元

川 又 基 人* 菅 沼 悠 介**, * 土 井 浩 一 郎**, *
澤 柿 教 伸*** 服 部 晃 久*

Reconstruction of Ice Sheet Retreat History at Skarvsnes, Southern Part of the Soya Coast, East Antarctica, Based on Glacial Landforms and Surface Exposure Ages

Moto KAWAMATA*, Yusuke SUGANUMA**, *, Koichiro DOI**, *,
Takanobu SAWAGAKI*** and Akihisa HATTORI*

[Received 29 March, 2019; Accepted 16 November, 2019]

Abstract

The purpose of geomorphological studies in East Antarctica is to understand past fluctuations of the Antarctic Ice Sheet, which is essential to constrain ice sheet models and predict future behavior of the East Antarctic Ice Sheet. Here we show a deglacial history of Skarvsnes, at the southern part of the Soya Coast, East Antarctica based on a geomorphological field survey and newly obtained surface exposure ages. Bedrock higher than *ca.* 250 m a.s.l. at the northwest part of Skarvsnes (Skjegget) is weathered extensively, whereas bedrock below *ca.* 250 m a.s.l. is relatively unweathered. The degree of weathering of bedrock above 250 m a.s.l. is similar to that at the northern part of the Soya Coast, which is thought to have been ice-free throughout the last glacial period. Therefore, a clear difference in the degree of weathering depending on altitude probably indicates the lower limit of the ice sheet elevation during the last glacial period at Skarvsnes. Judging from the multiple directions of glacial striae, the ice sheet covering the area retreated while changing flow direction under the influence of the bedrock topography after the last glacial period. Since *ca.* 9 ka, the ice sheet is thought to have thinned and eventually divided into two major ice streams (northward and southward) that were obstructed by a 362 m a.s.l. mountain (Shirasuso-Yama), at the southeastern part of Skarvsnes. However, the timing of the initiation of the ice sheet retreat and its duration remain unclear. Therefore, additional surface exposure ages from various areas and heights at Skarvsnes are required for a detailed reconstruction of the ice retreat history and to understand its mechanism.

Key words : East Antarctica, Soya Coast, glacial landforms, surface exposure ages, Last Glacial Maximum

キーワード : 東南極, 宗谷海岸, 氷河地形, 表面露出年代, 最終氷期最盛期

* 総合研究大学院大学極域科学専攻

** 国立極地研究所地圏研究グループ

*** 法政大学社会学部

* Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Tachikawa, 190-8518, Japan

** National Institute of Polar Research, Tachikawa, 190-8518, Japan

*** Faculty of Social Sciences, Hosei University, Machida, 194-0298, Japan

I. はじめに

1) 地形学的アプローチによる氷床変動復元の意義

南極氷床は、海水準変動や海洋循環を通して全球的な気候変動に密接に関連しており、その変動メカニズムを把握することは今後の気候変動予測にとって重要である。とくに南極氷床の末端、すなわち氷床の消耗域である沿岸地域において、過去の氷床拡大範囲とその後の氷床後退過程を正確に復元することは、氷床と海洋との相互作用の理解や氷河・氷床モデルの検証につながる（三浦, 2018）。

また近年では、衛星重力ミッション Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) データに基づいた氷床質量収支の精密な評価が行われている（福田, 2018）。GRACE で捉えられる変動は氷床質量変動だけでなく、氷河性地殻均衡 (Glacial Isostatic Adjustment: GIA) による地殻変動も含まれる。しかし、南極に関しては氷床後退過程に関する情報が不足しているため、GIA による南極の地殻変動を精度よく見積もることは難しい（奥野, 2018; Whitehouse *et al.*, 2019）。そのため、現在の氷床質量変動を評価するうえでも、地形地質学的データによって過去の氷床変動を精密に復元する必要がある。

一方、南極沿岸地域や内陸山地には、過去の氷床変動の痕跡が氷河地形として残されており、地形・地質調査に基づく氷河地形の区分・認定（面的情報・相対年代）と、その場の氷床後退を示す年代試料（絶対年代）により、詳細かつ面的な氷床変動の復元が可能となる。しかし、南極氷床、とくに東南極氷床に関しては、約 2 万年前の最終氷期最盛期 (Last Glacial Maximum: LGM) (Denton and Hughes, 1981) 以降、氷床高度が約 800 m 低下した地域からほとんど変化しなかった地域までその変動規模はさまざまであり (Mackintosh *et al.*, 2014)、それぞれの地域ごとに地形的な要素やそれに伴う海洋との相互作用に起因する独自の変動システムを有しているといえる。そのため、広大な東南極氷床のそれぞれの地

域において、氷床拡大範囲とその後の氷床後退過程といった過去の氷床変動を明らかにすることがきわめて重要な課題である。

2) 東南極宗谷海岸における先行研究と課題

東南極 Lützow-Holm 湾東岸に位置する宗谷海岸には南北 120 km にわたって露岩域が多数分布する（図 1）。これまで、日本の南極観測基地である昭和基地を拠点として、第四紀の南極氷床変動に着目した地形地質学的な調査・研究が行われてきた（例えば、吉川・戸谷, 1957; Omoto, 1977; Yoshida, 1983; Hayashi and Yoshida, 1994; Maemoku *et al.*, 1997; Sawagaki and Hirakawa, 1997, 2002b; Miura *et al.*, 1998a, b; 森脇ほか, 1998; Igarashi *et al.*, 2001; Takada *et al.*, 2003; 菅沼ほか, 2017）。そのなかで、宗谷海岸における氷床後退を示す指標として早くから着目されたのが、貝化石 (*Laternula elliptica*) を多く含む隆起海浜堆積物である。これは、氷床荷重の解放に伴う地殻の隆起によって相対的に海水準が低下する過程でステップ状の海浜地形として陸上に残された海成堆積物であり、宗谷海岸付近ではおよそ海拔 20 m 以下に広く分布している (Miura *et al.*, 1998a, c)。隆起海浜堆積物中の破碎されていない原地性貝化石は、離水直前まで貝が生息可能な環境であったことに加え、隆起海浜堆積物の堆積後にその場所を氷床が覆うことがなかった証拠とされている（三浦ほか, 2002a）。Miura *et al.* (1998a) は、隆起海浜堆積物のトレンチ調査（堆積構造の観察と水準測量）とそこから産出する原地性貝化石の年代測定を行い、宗谷海岸北部では完新世（約 5-4 ka）および 35 ka 以前の年代を示す貝化石が存在する一方で、南部においてはすべて完新世（約 7-3 ka）の年代を示すことを明らかにした。このことから、宗谷海岸の北部と南部では氷床から解放された年代に大きな差があり、北部では LGM においても氷床に覆われなかったとされた (Miura *et al.*, 1998a)。この氷床から解放された年代の差は宗谷海岸北部では基盤岩石が激しく風化している一方で、南部において氷河擦痕などの氷食微地形が明瞭に確認できるといふ地形的特徴とも整合的である (Miura *et al.*,

図 1 東南極宗谷海岸の衛星画像，および本研究調査地域である Skarvsnes の拡大図。黄色丸および黒矢印はそれぞれ日本の南極観測基地である昭和基地とおもな氷河の流動方向を示す。黄色の破線より北側は最終氷期最盛期において氷床に覆われなかったとされている (Miura *et al.*, 1998a)。

Fig. 1 Satellite image of the Soya Coast and close-up view of the study area of the Skarvsnes. Yellow circle and black arrows indicate the Syowa Station, which is the Japanese Antarctic Research Station and flow directions of major ice streams, respectively. Areas north of the yellow dashed line probably have remained exposed above the ice sheet during the Last Glacial Maximum (Miura *et al.*, 1998a).

1998b)。

また、宗谷海岸南部に位置し、宗谷海岸最大の露岩である Skarvsnes で得られている 4 試料の表面露出年代測定結果もすべて完新世の年代 (10–6 ka) を示した (Yamane *et al.*, 2011)。このことは貝化石の年代から示唆されるのと同様に、宗谷海岸南部が LGM に氷床で覆われていたことを支持する。しかし、Yamane *et al.* (2011) では年代が得られた地点周辺の広域的な地形・地質調査は行われていないことから、その年代に対する地形発達史的視点からの考察が十分とはいえない。すなわち、現段階で明らかになっているのは表面露出年代試料の採取位置と年代のみであり、LGM 以降の空間的広がりをもった氷床後退過程の議論はなされていない。そのため、東南極の宗

谷海岸周辺地域における LGM 以降の氷床融解量や氷床変動のメカニズムの議論のためにも、地形発達史的視点に基づいた地形調査と絶対/相対年代試料に基づいた精密な氷床後退過程の復元が必要とされている。

そこで本研究では、Skarvsnes において詳細な地形調査を実施するとともに、新たに得られた 3 試料の表面露出年代測定を行った。本論ではそれらの結果を報告し、Skarvsnes における LGM 以降の氷床後退過程を議論する。

II. 調査地域の概要

Skarvsnes は宗谷海岸最大の面積 (63 km²) をもつ露岩域である (Yoshida, 1983) (図 1)。露岩の地質は、おもに輝石片麻岩、ざくろ石黒雲

母片麻岩、および斑状変晶片麻岩といった変成岩類で構成されている (Ishikawa *et al.*, 1977)。Skarvsnes の最高点は Skjegget の標高 400 m 地点であり、ほとんどは標高 300 m 以下の丸みを帯びた丘陵状の凸地形、あるいは狭くて浅い直線的な谷や小さな盆地状の凹地などの地形からなり、尾根や谷などの地形配列はおもに NW-SE および NE-SW 方向に伸びる変成岩類の層状構造を反映する。また氷食による凹地には大小さまざまな湖沼が存在し、地表には迷子石やティルが不連続に分布する (Yoshida, 1983)。以上の地形的特徴は面的剝地形系 (岩田, 2011, p.176-181) と一致するため、Skarvsnes は過去の氷床拡大期に氷食による面的剝削を受けたのちに露出したと考えられる。

また、Skarvsnes に分布するロッシュムトネやドラムリンといった氷床底で形成される流線型地形に関しては、その地形形成と氷床底面環境について考察がなされている (Sawagaki and Hirakawa, 1997, 2002a; 岩崎ほか, 2005)。Sawagaki and Hirakawa (1997) は現地調査で、氷の動きだけでは形成しえない複雑な形状をした滑らかな溝状の基盤岩侵食痕 (sculpted form: s-form) を記載し、氷床底において急激な融解水流イベントが発生したことを指摘した。すなわち、彼らは氷床底における地形形成において、圧力融解・再凍結の作用で起こる研磨作用と引き剥がし作用 (アブレーションとブラッキング) による侵食プロセスに加え、氷床底での突発的な融解水イベント (氷底水流) が関与することを明らかにした。

一方、岩崎ほか (2005) は、宗谷海岸の露岩域に分布する未固結細粒堆積物に着目し、氷河底成岩屑 (氷河底面氷中の岩屑とロジメントティル) との粒度組成の違いを検討した。その結果、宗谷海岸露岩域に分布する未固結細粒堆積物の大部分は、その地域にかつて広く堆積していた氷河底ティル由来の堆積物が再移動した二次堆積物であることを明らかにした。これらの研究結果は、Skarvsnes において氷床底が融解状態 (warm-based) であったことを示しており、かつて Skarvsnes を覆っていた氷床は比較的容易に流

動できる状態であったことを意味する。

さらに過去の氷厚に関して、Sawagaki and Hirakawa (2002a) では氷底水流を示す地形を根拠に、Skarvsnes において水理学的な数値実験を行い、すりばち山付近において西方に傾く氷厚約 400 m の氷床を仮定した場合に、氷底水流の流れが流線型地形の配列と整合的になることを示した。また、Okuno and Miura (2013) は 2000 年代以降に提案された LGM 以降の南極氷床融解モデルと隆起海浜中の貝化石年代から示される海水準変動との比較を行った。その結果、宗谷海岸を含む東南極の沿岸において数百 m 程度の厚さの氷床の融解を仮定しなければ、産出する貝化石の放射性炭素年代とその産出高度から復元される海水準変動を説明できないとしている。

氷床後退の絶対年代に関しては、Yamane *et al.* (2011) によって、Skarvsnes の 4 試料から宇宙線生成核種を用いた表面露出年代が報告されており、Skarvsnes を覆っていた氷床は 10 ka から 6 ka にかけて表面高度を少なくとも 360 m 下げたとされている。また、Skarvsnes における隆起海浜堆積物トレンチ中の原地性貝化石のうち、最上部 (標高 14.9 m 地点) の 960116-1-I (7170 ± 60 yrBP) が、加速器質量分析 (Accelerator Mass Spectrometry: AMS) を用いて測定されたもっとも古い年代として報告されている (Miura *et al.*, 1998a, c) この年代よりも古い貝化石も過去に報告されているものの (Yoshida, 1983; 平川・澤柿, 1998)、採取された貝化石の生息姿勢などが考慮されていない可能性が高く、再堆積などの可能性は否定できない (三浦ほか, 2002a)。なお隆起海浜堆積物トレンチ中の原地性貝化石の年代は、貝の生存可能な環境であったことに加えその場の離氷年代を示すが、氷床後退のタイミングを直接示すとは限らない。また、Skarvsnes に存在する湖沼堆積物の最下部の放射性炭素年代は、すべて完新世の年代を示しており、Skarvsnes では、前期完新世以降に南極氷床から解放されたのちに湖沼が成立したと考えられている (Takano *et al.*, 2012; Verleyen *et al.*, 2017)。ただし、これらの湖沼堆積物に関する先行研究で用いられて

いる掘削機材は人力による押し込み式コアラー（瀬戸ほか，2002）である。この押し込み式コアラーは小型かつ軽量で、南極においても簡便に良質な柱状試料を採取できる利点があり、宗谷海岸における湖沼研究でよく用いられてきた。しかしその採取は人力のため、堆積物が十分柔らかい場合を除いて、湖沼の成立を知る上で不可欠となる基盤直上の堆積物の採取は困難であると指摘されている（菅沼ほか，2019）。先行研究における Skarvsnes で採取された湖沼堆積物の堆積相の記載（Takano *et al.*, 2012）を確認すると、最下部において氷河性堆積物と思われる明確な堆積相（シルト層や礫層）は報告されていない。すなわち、氷床後退年代（湖沼の成立年代）は先行研究における湖沼堆積物最下部の年代よりも前であると考えられるが、どの程度遡るかは不明である。

III. 手 法

1) 空中写真・数値地形モデルを用いた地形判読

地形判読は、国土地理院発行の空中写真ならびに、Skarvsnes 地域の数値地形モデルを用いて行い、地形学図を作成した（図 2）。数値地形モデルは、国土地理院および国立極地研究所が保有する南極域の地図データをデジタル収録した「南極 GIS ポータルサイト」（野木・北本，2010）よりダウンロードし、等高線図、標高段彩図、および陰影図を透過投影して表示した。数値地形モデルの解像度は 10 m であり、ALOS/PRISM 画像データ（撮影日 2009 年 1 月 18 日、作成年 2010 年）から、国土地理院による現地の基準点成果（国土地理院，2013）をもとに作成されている。地形判読基準は、宗谷海岸 Langhovde における先行研究を参考にした（Hirakawa *et al.*, 1984a; 平川ほか，1984b）。Hirakawa *et al.*（1984a）による地形学図では等高線、等深線、地形形態の要素・地形計測的要素、地形営力と現象、陸水、地形営力域、岩質、地質構造、傾斜という 7 つの異なる情報が記載されていた。本稿では論旨を超える煩雑化を避けるため地形形態・地形計測的要素の分類のみ参考とし、氷床後退過程の議論で重要な

地形の起伏・高度情報を数値地形モデルを用いることにより可視化した。また、隆起海浜堆積物と氷成堆積物の分布は先行研究に従った（Miura *et al.*, 1998c; 岩崎ほか，2005）。また、数値地形モデルを用いて傾斜 40° 以上の斜面を「急斜面」とした。

2) 現地調査に基づく地形記載

第 57 次南極地域観測隊（2015 年 12 月～2016 年 2 月）において川又および土井が現地調査を行い、第 59 次南極地域観測隊（2017 年 11 月～2018 年 2 月）では川又および菅沼が再調査を実施した。その際、岩石の風化の程度や氷河擦痕に注目した。岩石の風化の程度は氷河・周氷河地形または堆積物の形成・堆積年代を相対的に示す手法として用いられている（渡辺，1990; Moriwaki *et al.*, 1991, 1994; Suganuma *et al.*, 2014; Kanamaru *et al.*, 2018）。過去の氷床の流動方向を示す指標である氷河擦痕については、クリノコンパスで方位を読みとり、携帯型の Global Positioning System (GPS) (GPSMAP62S) によって位置情報を取得した（GPS での高さ表示は一般的に楕円体高であるが、GPSMAP62S の気圧補正機能により標高に近い値が得られるため、今回は GPSMAP62S で得られた高さ情報は標高として扱う）。また同地点で二方向の交叉する擦痕がみられた場合は可能な限りその前後関係を判定した。宗谷海岸での磁気偏角は西偏 50° のため、この磁気偏角を修正したうえで地形学図にプロットした（図 2）。

3) 宇宙線生成核種 (^{10}Be ・ ^{26}Al) を用いた表面露出年代

表面露出年代測定法は、地表面が宇宙線に曝されている間に形成される宇宙線生成核種 (^{10}Be ・ ^{26}Al など) の蓄積量から地表面が露出した時間を推定する手法である（Gosse and Phillips, 2001; 若狭ほか，2004; 横山ほか，2005）。植物遺骸のほとんど存在しない南極において、陸上の氷床変動を探るうえで非常に有効な手法であり、南極露岩地域では氷床の後退年代を探るためによく用いられている（例えば、Nishiizumi *et al.*, 1991; Yamane *et al.*, 2011; Suganuma *et al.*, 2014;

図 2 Skarvsnes の地形学図。赤色および白色記号（丸は迷子石、四角は基盤岩）はそれぞれ本研究および Yamane *et al.* (2011) で得られた表面露出年代 (^{10}Be) を示す。青丸は隆起海浜堆積物トレンチ中から産出した原地性貝化石のうち加速器質量分析を用いて測定された最も古い放射性炭素年代 (Miura *et al.*, 1998a)。Area 1, 2, および 3 の調査範囲を黄色の四角の範囲で示す。等高線の間隔は 10 m。A, B, C, および D の実線の断面は図 7 に示した。

Fig. 2 Geomorphological map of Skarvsnes. Red and white symbols (circles and square indicative of erratic and bed-rock, respectively) show surface exposure ages (^{10}Be) of this study and Yamane *et al.* (2011), respectively. Blue circle is radiocarbon age of the oldest fossil shell in the raised beach deposit measured with Accelerator Mass Spectrometry (Miura *et al.*, 1998a). Yellow boxes (Area 1, 2, and 3) indicate survey areas of this study. Contour interval is 10 m. Cross-sections along the solid lines A, B, C, and D are shown in Fig. 7.

White and Fink, 2014)。試料採取は氷食基盤岩および迷子石から行い、石英中の $^{10}\text{Be} \cdot ^{26}\text{Al}$ を測定した。この 2 つの核種は、石英の結晶中における核種生成率が一定の比 (6.7) をもつ一方で、半減期が約 2 倍異なる (^{10}Be : 1.387 Ma, Chmeleff *et al.*, 2010; Korschinek *et al.*, 2010;

^{26}Al : 0.705 Ma, Nishiizumi, 2004)。すなわち、 ^{26}Al は ^{10}Be よりも早く放射壊変するため、試料が侵食や埋没、何度かの露出と埋没過程などの影響を受けていた場合、試料中の $^{10}\text{Be} \cdot ^{26}\text{Al}$ の存在比が生成率の理論値とは異なった値になる。岩石からの核種の抽出が成功したとき、 $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$

図 3 表面露出年代試料と年代 (^{10}Be)。黄色の矢印は基盤岩で確認された氷河擦痕の方向を示す。(a) 16012401 は基盤岩試料。(b) 16012403 は迷子石試料。(c) 16012501 は迷子石試料。(d) 16012501 採取後の様子。年代試料は携帯型電動カッターとタガネを用いて岩石表面から一定の深さで採取した。

Fig. 3 Samples for surface exposure dating. Surface exposure ages (^{10}Be) are also shown. Yellow arrows show directions of striations (a) 16012401 in bedrock sample. (b) 16012403 is erratic sample. (c) 16012501 is erratic sample. (d) 16012501 pit after sampling. Samples were taken at a constant depth from the rock surface using a portable electric cutter and chisel.

比が核種生成率の比 (6.7) の上方にくることは基本的にはない。一方で下側になることは風化や埋没などで説明できる。すなわち同試料から $^{10}\text{Be} \cdot ^{26}\text{Al}$ の二核種を測定することにより、埋没や地表風化速度といった地球表層プロセスや AMS 測定のための前処理の操作の正確性などについて議論できる利点がある。

本研究では、第 57 次南極地域観測隊 (2015 年 12 月～2016 年 2 月) での調査において 3 試料から採取した岩石試料に対して表面露出年代を測定した結果を報告する。岩石試料は、現在の東南極氷床縁からの距離がそれぞれ異なる流線型地形の頂部に残された巨礫および基盤から採取し

た (図 2, 図 3a, b, c)。すなわち 16012403 および 16012501 を採取した巨礫は崖錐堆積物といった急崖の崩壊現象などに起因する可能性はなく、氷床によって運搬された迷子石である。基盤の岩石試料である 16012401 は、Yamane *et al.* (2011) の SV9-2 とほぼ同一地点から採取されているが、SV9-2 は迷子石から採取された。

岩石試料採取は、Suganuma *et al.* (2012) の手法を採用し、携帯型電動カッターとタガネを用いて、岩石表面の傾斜が均一で表面の物理的な風化による凹凸が確認できない部分を選択して行った (図 3d)。この手法の利点は、選定した岩石の表面から均一の深度で試料を採取できる点であ

表 1 表面露出年代試料の詳細.

Table 1 Details of sample for surface exposure dating.

Sample name	Latitude (°S) ^a	Longitude (°E) ^a	Altitude (m) ^a	Sample type	Boulder size (m)	Sample thickness (cm)	Shielding factor ^b
16012401	69°29'16.3"	39°39'03.3"	237	Bedrock	–	2.5	0.987
16012403	69°29'57.1"	39°41'01.0"	139	Erratic	1.7 × 1.1 × 1.0	2.3	1.000
16012501	69°30'30.7"	39°44'38.0"	233	Erratic	1.1 × 0.8 × 0.8	2.6	0.982

^a Latitudes, longitudes, and altitudes were recorded in the field with a Garmin GPSmap 62sc.

^b The shielding factor was calculated using the online Geometric Shielding Calculator version 1.1 (Balco *et al.*, 2008).

り、試料形状の不均質性に起因する年代誤差を小さくできる。また、宇宙線の減衰による核種生成速度の変化を避けるため、現状で堆積物の被覆等を受けていない基盤岩石・迷子石を対象とした。迷子石は退水後の転動の影響を避けるため、直径 1 m 程度以上で基盤に安定して定置しているものを選定した。試料採取時には試料採取深度、採取試料表面の傾き、および地上開度を記載した。この情報をもとに Topographic shielding calculator version.1.1 (Balco *et al.*, 2008) を用いて地表面の傾き、地上開度による地表面の核種生成率の影響を計算し、後の年代計算時の補正係数として使用した (表 1)。

もち帰った試料は、Kohl and Nishiizumi (1992) に準じて以下のとおりに処理を行った。はじめにサンプルを粉碎し、ふるいを用いて 250–500 μm の粒子を選別し、酸を用いたリーチングにより石英以外の鉱物を除去した。今回はそれぞれ約 40 g の石英を使用した。石英は酸溶解したのち、⁹Be キャリアーを添加した。この段階で試料溶液の一部を分取し、誘導結合プラズマ質量分析 (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry: ICP-MS) を用いて石英中の安定同位体である ²⁷Al の定量を行なった。溶解したサンプルは陰・陽イオン交換によって Be と Al に分離し、それぞれの酸化物とした。この酸化物の ¹⁰Be/⁹Be 比と ²⁶Al/²⁷Al 比を Purdue 大学の AMS を用いて測定した。標準試料は ICN (ICN Chemical and Radioisotope Division, Irvine, California, USA) の標準溶液を西泉らが新たに値づけした同位体比がそれぞれ ¹⁰Be/⁹Be = 2.851

× 10⁻¹² および ²⁶Al/²⁷Al = 1.818 × 10⁻¹² の KN standard (Be: 07KNSTD, Al: KNSTD) を用いた (Nishiizumi, 2004; Nishiizumi *et al.*, 2007)。また他試料と同時に、まったく同じ工程でケミカルブランクを作成し、同様に AMS を行い分析工程のバックグラウンドを評価した。各試料の最終的な核種量はケミカルブランクで検出された ¹⁰Be および ²⁶Al 量を各試料から差し引くことで求めた。なお核種量の誤差については、AMS による各試料とケミカルブランクの核種濃度の分析誤差を伝搬させ、²⁶Al に関しては ICP-MS による ²⁷Al 定量誤差 3% をさらに伝搬させた。岩石試料に関する情報や実験に用いた石英重量、その他ケミカルブランクを含めた AMS での測定結果を表 1 と表 2 に示す。表中の各濃度は、石英 1 g 中の濃度とした。

年代計算には CRONUS-Earth online calculators, V3 (Balco *et al.*, 2008) を用いた。表面露出年代の算出のためには試料採取地点の核種生成率を見積もる必要がある。核種生成率は宇宙線フラックスの減衰を決定づける緯度 (地磁気の水平成分強度) と標高 (大気の実質的厚み) に依存する (Dunai, 2010; 松四, 2017)。さらに近年ではより高精度な年代推定のため、地磁気と太陽強度の時間および空間的な変化をとり入れた時間変化型のスケーリング手法が考案されている (Lifton *et al.*, 2014)。スケーリングは生成率が地点、標高および時間によってどのように変化するかを決定するモデルであるため、核種生成率を求めるためには何らかの独立した手法により明らかとなった較正データが必要となる。今回は核種生成

表 2 表面露出年代の分析に関する結果と情報.

Table 2 Analytical results and information on surface exposure dating.

Sample name	Sample weight (g)	Be carrier weight (mg)	Al in quartz (ppm)	Additional Al carrier weight (mg)	$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratio ($\times 10^{-15}$) ^{a,b}	$^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ratio ($\times 10^{-15}$) ^{a,c}
16012401	39.60	0.4869	161.06	0	148.50 ± 4.91	399.97 ± 15.09
16012403	40.18	0.4875	69.69	0	100.64 ± 3.85	248.50 ± 10.39
16012501	39.51	0.4870	34.27	1.1019	109.55 ± 4.12	111.60 ± 6.10
Blank	–	0.4869	–	1.4744	30.49 ± 2.67	2.58 ± 1.87
Sample name	^{10}Be conc. ($\times 10^4$ atoms/g) ^d	^{26}Al conc. ($\times 10^4$ atoms/g) ^e	^{10}Be age (ka) ^{f,g,h}	^{26}Al age (ka) ^{f,g,h}	$^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ ratio	
16012401	9.68 ± 0.46	61.99 ± 2.35	14.36 ± 1.09	12.94 ± 1.22	6.40 ± 0.39	
16012403	5.68 ± 0.38	34.41 ± 1.45	9.10 ± 0.81	7.73 ± 0.74	6.06 ± 0.48	
16012501	6.51 ± 0.40	39.90 ± 2.20	9.69 ± 0.83	8.33 ± 0.86	6.13 ± 0.51	
Blank	–	–	–	–	–	

^aAll nuclide ratio measured by PRIME lab (Purdue Rare Isotope Measurement Laboratory).

^bMeasurements are normalized to 07KNSTD (Nishiizumi *et al.*, 2007) Be standard material with a nominal $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ of 2.851×10^{-12} .

^cMeasurements are normalized to KNSTD (Nishiizumi, 2004) Al standard material with a nominal $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ of 1.818×10^{-12} .

^dPropagated uncertainties of ^{10}Be include an error in the uncertainties on the AMS measurements of both the samples and the blank.

^ePropagated uncertainties of ^{26}Al include an error in the uncertainties on the AMS measurements of both the samples and the blank and 3% stable ^{27}Al measurement (ICP-MS) uncertainty.

^fAges were calculated with the LSDn scale CRONUS-Earth online calculators, V3 (Balco *et al.*, 2008)¹⁾.

^gErrors of exposure ages include concentration uncertainties based on lab/AMS measurements plus production rate uncertainties (external error).

^hA density of 2.7 g/cm^3 was used based on the gneiss rock of the surface samples and assuming zero erosion.

率の時間および空間変化を組み込んだ最新のスケーリング手法である LSDn スケール (Lifton *et al.*, 2014) を適用し、校正データに関しては CRONUS-Earth online calculators, V3 においてデフォルトで設定されている Borchers *et al.* (2016) の primary data set を用いた。また、標高を大気圧に変換する際の入力値として、南極での特殊な標高・気圧の関係を考慮した大気モデル (Stone, 2000) を用いた。表示する年代のエラーについては分析の際の核種の誤差に加え、生成率の誤差を含めた (External error)。なお表中および本文において CRONUS-Earth online calculators, V3 での計算に必要な情報はすべて明記した。本研究では、Yamane *et al.* (2011) で得られている表面露出年代に関しても上記の条件で再計算を行った。

IV. 結 果

1) 地形および氷食痕の記載

1-1) Area 1 : Skjegget

Skjegget は Skarvsnes 露岩域の北西に位置する標高 400 m のピークであり、南西側は急崖を呈する一方で北東斜面は比較的なだらかに傾斜し、非対称な横断形をなしている (図 1, 図 2)。Skjegget の大部分は輝石片麻岩からなり、地層の走向はおおむね NW-SE で北側に約 60° 傾斜する。すなわち、南西側の急崖は受け盤に相当し、氷食作用と岩石制約で生じた差別侵食地形であるといえる。この急崖は海面下になお 100 m あまり続いており (Omoto, 1976)、全体の比高は 500 m 以上にもなる。このような U 字谷をなさない片側だけの急な氷食崖は、上記の例ほど規模は大きくないが、宗谷海岸の各所の露岩の端に

図 4 (Fig. 4)

形成されている。

Skjegget では、標高の違いによる基盤岩風化状態の違いが明瞭に確認できた。山頂部の基盤岩は風化作用により岩盤表面に形成されるくぼみ（タフォニ・蜂の巣構造）が明瞭に確認できる（図 4a）。タフォニの長径は最大 30 cm 程度で数十 cm から数 cm のものが卓越する。この風化状態は、LGM より古い年代の貝化石が報告されている宗谷海岸北部と酷似している（Maemoku *et al.*, 1997）。一方、標高約 250–300 m 以下を境に数十 cm のタフォニはほとんど確認できなくなり、まれに直径数 cm 程度の微小な蜂の巣構造が確認できるのみである（図 4b）。Area 1 において標高による岩層の違いはないため、基盤岩風化状態の違いは氷床からの相対的な露出期間の違いを意味し、LGM には少なくとも標高約 250–300 m まで氷床で覆われていたことを示唆する。また標高約 250 m 以下では、さまざまな岩種の大礫から巨礫（直径 30 cm 程度）が山頂付近よりも多く確認されるようになる。Skarvsnes における隆起海浜堆積物が分布する上限高度が約 20 m であることを考えると、これらの礫は氷山によるドロップストーンではなく、氷床が融解することでその場に残される迷子石である。また、標高 60 m 付近には明瞭ではないものの氷河擦痕が確認できる一方で、モレーンといった堆積性の氷河地形は見受けられない。

1-2) Area 2 : 親子池付近

鳥の巣湾の奥には Osen 湾に向かって伸びる狭い U 字谷があり、その鞍部は海拔約 3 m にすぎない。海成堆積物は谷の縁辺部で標高 15 m 以上にまで存在していることから（Miura *et al.*, 1998c）、この谷はかつて鳥の巣湾と Osen 湾を結ぶ海峡となっていたことは間違いない。すなわち Skarvsnes 北西部は大陸から切り離されて島になっていた時期があり、この鞍部に位置する親子池は海跡湖である。親子池の西側ピークの標高 150 m 付近と東側ピークの標高 222 m には同方向（N60°W）の氷河擦痕が確認された（図 2）。一方で、親子池の東側ピークの中腹にある平坦面には二方向の氷河擦痕（N50°W・N110°W）が存在し、N110°W の擦痕が N50°W の擦痕を切っていた（図 4c）。このことから氷床の流動方向は N50°W から N110°W に変化したと考えられる。また、さらに標高を下げた親子池の近傍の基盤岩にも氷河擦痕が確認され、その方向は、鳥の巣湾と Osen 湾をつなぐ U 字谷に沿う方向である（図 4d, e）。

1-3) Area 3 : しらすそ山・すりばち山付近

しらすそ山（標高 362 m）は Skjegget に続き Skarvsnes で 2 番目に高いピークである。すべての Area に共通して基盤岩表面は、二次的に赤く着色しているが、しらすそ山の基盤岩では氷河擦痕が明瞭に確認でき岩石の変形を伴った風化は進行していない。この基盤岩風化状態の特徴は同

図 4 調査地域の氷河地形。調査位置は図 2 に示す。(a) Skjegget 山頂 (Area 1)。基盤岩はタフォニを伴い激しく風化している。(b) Skjegget 標高 250 m 地点 (Area 1) の基盤岩は比較的風化が進行しておらず表面は滑らかである。(c) Area 2 の標高 160 m 地点の擦痕。(d) Area 2 の標高 2 m 地点の擦痕。(e) Area 2 の鳥瞰図 (縦方向に 1.5 倍強調)。標高の違いにより擦痕方向が異なっている。(f) Area 3 の標高 344 m 地点の擦痕。(g) Area 3 の標高 62 m 地点の擦痕。(h) Area 3 の鳥瞰図 (縦方向に 1.5 倍強調)。流線型地形を分断するように浅い U 字谷が擦痕方向と同じ方向に伸びる。オレンジ色の丸はそれぞれ(c), (d), (f), および(g)の位置を示す。オレンジ色の破線は U 字谷を示す。黄色矢印は氷河擦痕の方向を示す。

Fig. 4 Glacial landforms in study area. Positions of localities are shown in Fig. 2. (a) Top of Skjegget (Area 1) bedrock is deeply weathered with tafone. (b) 250 m a.s.l. of Skjegget (Area 1) bedrock is relatively unweathered and smooth. (c) 160 m a.s.l. of Area 2. Directions of striations differ depending on altitude. (d) 2 m a.s.l. of Area 2. (e) Bird's eye view of Area 2, 1.5 times vertically exaggerated. (f) 344 m a.s.l. of Area 3. (g) 62 m a.s.l. of Area 3. (h) Bird's eye view of Area 3, 1.5 times vertically exaggerated. A shallow U-shaped valley extends in the same direction as striae dividing the streamlined bedforms. Orange circles show locations of (c), (d), (f), and (g). Orange dashed lines show U-shaped valley. Yellow arrows show directions of striations.

標高における Skjegget (Area 1) と大きく異なる (図 4f)。南極内陸山地における岩石の風化プロセスでは、機械的風化による割れ目の伸展と、それに伴う酸化によって形成される針鉄鉱により岩石の外縁部が着色するとともに物理的にもろくなる作用が卓越すると考えられている (Kanamaru *et al.*, 2018)。また、東南極沿岸に位置する Enderby Land の Mt. Riiser-Larsen 近傍では大谷石 (5 cm 角) を設置し、4 年後に観察を行う風化実験がなされており、大谷石の表面は赤褐色に著しく変色したと報告されている (三浦ほか, 2002b)。すなわち東南極沿岸の Skarvsnes 全域で酸化に伴う基盤岩の着色は進行しているものの、氷床縁に比較的近い Area 3 ではタフォニなどの岩石の変形を伴う風化過程には至っていないことが示唆される。また、すりばち山山頂から斜面付近には大礫から巨礫 (直径 50 cm 程度) が多数みられ、それらは蜂の巣構造が確認されるものが多く見られた。一方で、より氷床縁に近づく氷河擦痕方向が E-W 方向の地域に関しては、蜂の巣構造や二次的な着色を伴う迷子石は少なくなる傾向にある。以上の地形的特徴は、標高の違いのみでなく氷床縁からの距離の違いによっても、岩石の風化状態に差があることを示している。

氷河擦痕に関しては、おもに NW-SE (N50-60°W) と E-W (N90-100°W) 方向の二成分が確認された。ただし、しらすそ山ピーク付近では N75°W 方向の擦痕も確認された (図 4f)。すりばち山ピーク付近では N60°W 方向の擦痕 (図 3a) しか確認できなかったがそれより南東側 (氷床側) に高度を減じた地点では明瞭に二方向の擦痕が確認された (図 4g)。ここでは、N100°W 方向の擦痕が N50°W を切っている様子が確認でき、流動方向が N50°W から N100°W 方向に変化したと示唆される。また、しらすそ山より南側では、NW-SE 方向に伸びる流線型地形が確認できる。これは走向 NW-SE で南側に約 60° 傾斜する片麻岩の層状構造に氷床底での侵食が加わって形成された差別侵食地形であり、この流線型地形を分断するように浅く底の広い U 字谷が続いている (図 4h)。この付近一帯の擦痕方向は

N100°W が卓越し、U 字谷の伸張方向と一致する。

2) 表面露出年代

今回、Area 3 の 3 試料から表面露出年代を得ることに成功した (図 2, 表 1, 表 2)。さらに、Yamane *et al.* (2011) で報告されている年代を再計算し、今回の測定結果とあわせて地形学図上に示す (図 2)。また、図 5 に年代試料の $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 比を示す。今回得られた核種量から考えられる年代はそれぞれの核種の崩壊が無視できるほど若く、 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 濃度比は $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 生成速度比と同等であるといえる。

すりばち山山頂付近の基盤岩の試料 (16012401) は 14.36 ± 1.09 ka と Yamane *et al.* (2011) で報告されている SV9-2 の表面露出年代よりも約 7 kyr 古い年代を示した。より南東側で迷子石から得られた 16012403 および 16012501 の年代は、それぞれ 9.10 ± 0.81 ka と 9.69 ± 0.83 ka であり、比較的近い年代を示した (図 2)。本研究で得られた 3 試料には核種生成速度比に対し、 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 比が大幅に高い、または低い試料はなく、少なくとも AMS の前処理や現地での試料の選定・採取の問題はないと考えられる (図 5)。

V. 考 察

1) Skarvsnes における氷床後退過程

今回の地形調査の結果、氷床高度による風化の違い (Area 1) と、現在の氷床縁からの距離による風化の違い (Area 1 と Area 3 の比較)、および氷床流動方向の変化 (Area 2, Area 3) が明らかとなった。すなわち、かつて Skarvsnes を覆っていた氷床は、現在の氷床縁から遠く北西の沖合まで進出しており、それが後退するに従って標高の高い露岩域から露出していった。その後、氷床高度の低下に伴い、基盤地形の影響を受け、氷床の流動方向を変化させていったと考えられる。また、現在の露岩域には氷床縁を除いて、過去の氷床末端を示すような明瞭な末端モレーンなどの地形は確認できない。すなわち、少なくとも LGM 以降に現在の露岩域を再び覆うような、めだった

図 5 本研究と Yamane *et al.* (2011) の ^{10}Be 核種量と $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 比。試料に風化埋没の影響がなく、また実験の操作上の問題がないとき、 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 比は黒い実線 (6.7) 上にプロットされる。本研究で得られた試料 (赤) のエラーバーは加速器質量分析による各試料とケミカルブランクの分析誤差を伝搬させた不確かさ (表 2)。Yamane *et al.* (2011) の試料 (白) のエラーバーは論文に記載されていた Systematic uncertainties ($\pm 1\sigma$) とした。

Fig. 5 Plots of $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ ratio against ^{10}Be concentrations from this study and Yamane *et al.* (2011). $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ ratios lie along the thick black path (6.7) if the samples have not been affected by weathering or/and burial and experiment could be performed without analytical problems. Error bars of these study samples (red symbols) reflect uncertainties propagated in Accelerator Mass Spectrometry measurements of both samples and blank (Table 2). Error bars of Yamane *et al.* (2011) samples (white symbols) are systematic uncertainties ($\pm 1\sigma$) described in the paper.

氷床の再拡大はなかったと考えてよいだろう。

この考えに基づき、二次元的な氷床形状を復元する単純な関係式 (Nye, 1952) を用いて、氷床分布を三次元的に復元した。復元した氷床形状を地形図に重ね、今回の調査結果および年代測定結果との比較を行った (図 6, 図 7)。

基盤形状を考慮せず、氷を完全塑性体とみなしたとき、力学的に平衡状態 (降伏応力 τ_o が氷床底面の摩擦力和釣り合う) にある二次元氷床形状は、厚さ H と半幅 L の関係で以下の式で表され

る。

$$1/2\rho gH^2 = \tau_o L \quad (1)$$

岩盤の上を流れる氷河の底部でのせん断応力は基本的に約 50–100 kPa の間で変化し (Bennett, 2003), 氷を完全塑性体とみなしたときの降伏応力に関しては一般的に $\tau_o = 100$ kPa が用いられる (Cuffey and Paterson, 2010)。いま $\tau_o = 100$ kPa とすると、 $\tau_o/\rho g = 11$ m となる ($\rho = 0.9$ g/cm³: 氷の密度, $g = 9.8$ m/s²: 重力加速度)。

以下, Skarvsnes における地形調査結果と今回得られた表面露出年代測定結果に基づき, LGM 以降の氷床後退を議論する (図 6a, b, c)。図 7 には図 2 で示した直線 A, B, C, D の断面図および、それぞれの年代における氷床断面を示す。

1-1) LGM

少なくとも LGM には Skarvsnes を含む宗谷海岸南部においては、その大部分が氷床に覆われていたと考えられるものの (Miura *et al.*, 1998a), これまで過去の氷床高度とその後の後退過程を示す地形地質学的な証拠は確認されていなかった。一方で、今回確認された Skjegget の標高約 250 m 以上の基盤岩に確認されたタフォニを伴う激しい風化の特徴が, LGM にすでに露出していたと考えられる宗谷海岸北部と類似することは, LGM においても Skjegget 山頂部が氷床に覆われずに露出していたことを示唆する。このような基盤岩の風化状態の違いは、宗谷海岸と同じく東南極に位置する Enderby Land でも報告されており、標高 560 m ピークの標高 300–450 m 付近に風化状態の大きく異なるトリムラインが存在していると指摘されている (White and Fink, 2014)。ただし、この頂部で採取された基盤岩の年代は約 100 ka を示すものの、迷子石の年代は約 9 ka と大きく異なり、LGM には山頂まで cold-based の氷床に覆われていたと結論づけられている。このように基盤岩の激しい風化状態は必ずしも LGM での露出を決定づけるものではないが、宗谷海岸の Area 1 においては LGM に少なくとも標高 250–300 m までの氷床が存在していたと考えられる。このとき、すりばち山

図 6 氷床形状の単純な関係式 (Nye, 1952) に基づく Skarvsnes における氷床後退過程。青矢印はそれぞれの時代ごとに想定される当時の氷床流動方向。現地で確認された氷河擦痕方向に基づき、最終氷期最盛期 (Last Glacial Maximum: LGM) は N50°W、9 ka は N90°W に傾く氷床形状を仮定した。ただし、この氷床形状は基盤地形を考慮していないため、氷床末端位置や氷床分布には不確実性がある。(a) LGM. (b) 約 9 ka. (c) 現在。

Fig. 6 Ice sheet retreat processes at Skarvsnes based on a simple equation of ice sheet profile (Nye, 1952). Blue arrows are directions of reconstructed ice sheet flow for each age. On the basis of observed glacial striations, the Last Glacial Maximum (LGM) and ca. 9 ka ice sheet are assumed to have extended toward N50°W and N90°W. However, ice sheet terminus and distribution are uncertain because the ice sheet profile is not taken into account in bedrock topography. (a) LGM. (b) ca. 9 ka. (c) Present.

図7 図2の実線A, B, C, およびDの断面図上に描いた最終氷期最盛期, および9 kaにおける単純な関係式に基づく氷床表面形状。本研究とYamane *et al.* (2011)の試料採取位置と年代も示す。

Fig. 7 Ice sheet profiles at Last Glacial Maximum and ca. 9 ka, drawn on cross-sections of solid lines A, B, C, and D of Fig. 2. Sampling locations of this study and Yamane *et al.* (2011) are also shown.

山頂(図3a)やArea 2の標高の高い地点(図4e)の氷河擦痕がNW-SE (N50-60°W)方向を示すことから、氷床高度が高かったLGMにおける南極氷床は、おおむね南東から北西方向に流動していたと考えられる。この調査結果をもとに、N50°Wに傾いた氷床形状(Nye, 1952)をSkjeggetの標高250 mで露出するように重ねると、氷床近傍のしらす山(標高362 m)を含めたSkarvsnesの全域が氷床で覆われることになる(図6a, 図7)。これは、Skjeggetとしらす山がともに標高300 mを超えるピークでありながらも、その基盤岩風化状態に違いがあるという現地調査結果と整合的である。

先行研究では、宗谷海岸露岩南部の露岩(Skarvsnes・Skallen)でLGMに厚さ400 m程度の氷床が存在したと考えられている(Sawagaki and Hirakawa, 2002a; Okuno and Miura, 2013)。すなわち、Area 1(図6a)といった、現在の氷床縁から比較的離れ、かつ標高が高い地点においては、LGMでの氷床からの露出も想定され、今回の地形調査結果は既存研究の成果とも矛盾しない。

1-2) およそ9 ka

LGMにSkarvsnesを覆っていた氷床は高度低下と後退により、基盤地形の影響を受けて溢流水河化し、複雑に流動方向が変化した。その影響でArea 2やArea 3では二方向の氷河擦痕が残されたと考えられる(図4c, g)。さらに後退が進むと、しらす山が障壁となることで溢流水河の流路は大きく南北に二分し海に向かって流下した(図6b)。Area 3で確認された氷河擦痕の方向のN90°Wに傾く氷床を後退させていくと、16012403および16012501の試料採取地点はほぼ同時に露出する(図7)。この2試料はどちらもほぼ9 kaに近い年代を示している。とくにしらす山南東には、氷河擦痕方向に伸びる浅いU字谷(図4h)が確認され、そのU字谷にそって氷床が流下していた。その後現在の氷床縁まで後退したと考えられる(図6c)。

以上のように今回の新たに得られた表面露出年代測定結果は地形調査に基づき考察した氷床後退過程と整合的である。ただし、今回三次元的に復元した氷床分布は基盤形状を考慮していないため、とくに氷床高度が低下した際の氷床分布は不

確実性が高いと考えられる。また、海域に流入した氷床は海洋との相互作用による氷床底面融解の影響を受けるため、氷床末端位置に関しても正確には推定できていないだろう（図 6a, b）。以上の考慮すべき問題はあつたものの、Skarvsnes における LGM 以降の氷床後退過程については、氷床高度の低下と後退という比較的シンプルな条件に基づきおおむね説明できると考えられる。

2) 先行研究で報告されている年代と今回得られた年代の比較・検討

本研究で得られた基盤岩から採取された試料（16012401）の表面露出年代は約 14 ka であり、ほぼ同地点の迷子石から採取された年代（SV9-2）（Yamane *et al.*, 2011）と比べて 7 kyr もの差が認められる。この原因としてあげられるのは、(1) 基盤岩から採取された試料が過去の照射履歴を残しており、露出年代を古く見積もっている。(2) 迷子石から採取された試料の年代を若く見積もっている、のどちらかであると考えられる。

(1) について、16012401 の年代は、地形調査に基づいて三次元的に復元した氷床後退過程と整合的である（図 6, 図 7）。しかし、基盤岩の古い年代の要因としては、過去の露出の履歴による年代の過大な推定も考えられ、最後の氷床後退の年代を正しく示していない可能性がある。16012401 の $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 比（図 5）からは試料の埋没、風化の影響は確認できないが、今回の露出年代は核種半減期に対して非常に若いため、最後の露出を反映しているとは断定できない。すなわち基盤の年代が最後の氷床後退の年代を示しているかどうかは慎重に議論するべきである。

一方(2)について、Yamane *et al.* (2011) で報告された SV9-2 の年代を若く見積もっている原因として想定されるのは、年代測定した迷子石の選定と岩石の採取方法による影響である。16012401 は氷河擦痕が残る基盤岩から携帯型電動カッターを使用して採取しており、試料表面が風化によって失われているといった試料選定および採取方法に関する問題はない。一方、もし SV9-2 の試料採取の際に、核種量の一番多い岩石表層の一部が失われたとすれば若干の年代の若返

りが起きる可能性があるが、この影響が 7 kyr もの年代の違いになるかは疑問が残る。

16012401 の年代である 14.36 ± 1.09 ka は全球的な海水準の急激な上昇イベントである Meltwater pulse-1A (Lambeck *et al.*, 2014) に対応する（図 8）。一方で、迷子石から得られている年代は 10–6 ka の間にはほぼ収束している（図 8）。相対的な気温の指標とされる南極氷床コアの酸素同位体比は、完新世以降はほぼ一定の値で安定しているものの（図 8）、南極横断山脈をはじめとした南極の多数の露岩域では前期完新世における急激な氷床高度の低下が報告されている（例えば、Small *et al.*, 2019）。また、東南極氷床の融解は Meltwater pulse-1A よりもむしろ完新世以降に観測される数 m 程度の海水準上昇に関与した可能性が指摘されており、全球的な海水準上昇イベントと東南極氷床の融解は同期しているとは限らない（Mackintosh *et al.*, 2011; 奥野, 2018）。すなわち、宗谷海岸において迷子石から得られている年代である 10–6 ka に急激な後退を示すとしても、他の南極露岩域と比較して矛盾はない。

今回の Skarvsnes における現地調査の結果、LGM には Area 1 において少なくとも標高 250 m まで氷床が存在し、その後氷床高度が減じるに従って氷床流動方向が複雑に変化したことが明らかになった。一方で後退の開始年代と期間については、基盤岩試料（16012410）から得られた Melt water pulse-1A に対応する 14.36 ± 1.09 ka が正確に最後の氷床後退年代を示しているのか、迷子石試料の年代の収束する年代（10–6 ka）に急激に後退したのか現時点で結論することは難しい。

今後、Area 1 といった氷床高度変動の復元に適した地域で迷子石および基盤岩から系統的な年代試料の採取を行うことにより、LGM の氷床高度、後退開始年代および氷床底面状態の推定が可能となるだろう。また、年代の報告の際には試料の選定、採取法の明記や周辺の地形情報の記載が必要とされる。

さらに、地形調査に基づいて三次元的に復元した氷床分布から考えられる親子池の氷床からの解

放年代と、これまでに報告されている親子池の堆積物最下部の年代 (Takano *et al.*, 2012) との間には大きな差がある。親子池では湖成から海成に遷移する全長 153 cm の柱状堆積物が得られており、その最下部の放射性炭素年代は 3050 ± 40 yrBP (1σ) である (Takano *et al.*, 2012)。一方で、親子池は氷床縁から約 7 km 離れた地点に位置しており (図 1, 図 7)、氷床形状の不確実性はあるものの 9 ka にはすでに氷床から解放されている (図 6b)。菅沼ほか (2018) は、湖面凍結期間中に新たな掘削機材 (可搬型パーカッションピストンコアラ) (菅沼ほか, 2019) を用いることにより、親子池において先行研究を大幅に上回る全長 487 cm の長さの柱状堆積物を取得した。この堆積物からは、薄い湖成層の下位に 3 m を超える砂質シルト層および砂層が確認された (菅沼ほか, 2018)。以上のことから、少なくとも親子池においては、これまで湖沼の成立を示す基盤に達するまでの堆積物が採取できていなかった可能性が高い。今後、湖沼堆積物の年代から氷床後退年代 (湖沼の成立年代) を議論する際には、採取された堆積物の堆積相や得られた年代、陸上での氷床後退の指標となる年代測定結果 (隆起海浜中の貝化石、表面露出年代) を比較して吟味することが重要であろう。

VI. まとめと今後の課題

東南極宗谷海岸最大の露岩域である Skarvsnes において、現地調査結果と新たに得られた表面露出年代に基づき、氷床後退過程を考察した。現地調査の結果、LGM には Skarvsnes の一部が露出していた可能性を示す地形的特徴が確認された。LGM 後、Skarvsnes の大部分を覆っていた氷床は、氷床高度が減じるに従い基盤地形の起伏の影響を受け、氷床流動方向を複雑に変化させていった。その後 9 ka ごろにはしらすそ山が障壁となり、氷床は大きく二分されながら後退し続けたと考えられる。今後の課題として重要な点は大きく以下の 2 点である。

図 8 本研究と Yamane *et al.* (2011) の表面露出年代試料の標高と年代 (^{10}Be) および 21 ka 以降の氷床量相当海水準変動曲線 (Lambeck *et al.*, 2014) とドームふじアイスコアデータから得られた酸素同位体比曲線 (Dome Fuji Ice Core Project Members, 2017)。ドームふじ基地は昭和基地から約 1000 km 内陸に位置しており、ドームふじアイスコアデータから得られた酸素同位体比は周辺地域一帯を代表する相対的な温度指標となる。迷子石試料の年代はおよそ 10–6 ka (灰色) 付近に収まる。一方、基盤岩試料の年代 (16012401) は Meltwater pulse-1A (黄色) の年代と一致する。今後、氷床後退の開始時期やその継続期間を知るためにも、Skarvsnes において、さまざまな地点と標高での表面露出年代が必要とされる。

Fig. 8 Plots of altitude against exposure ages for samples of this study and Yamane *et al.* (2011). Ice-volume equivalent sea-level curve (Lambeck *et al.*, 2014) and $\delta^{18}\text{O}$ record from Dome Fuji ice core (Dome Fuji Ice Core Project Members, 2017) since 21 ka are also shown. Dome Fuji Station is located about 1000 km inland from Syowa Station. Oxygen isotope ratio obtained from Dome Fuji is a relative temperature index, which represents surrounding areas in Antarctica. Ages of erratics are about 10–6 ka (gray shade). On the other hand, the age of bedrock (16012401) coincides with Meltwater pulse-1A (yellow shade). To know the timing of the initiation of ice sheet retreat and its duration, it is necessary to obtain additional surface exposure ages from various areas and heights at Skarvsnes.

1) Skjeggset の標高 250 m 以上の地点は LGM において露出していたのか

Area 1 山頂付近における基盤岩風化状態は、LGM の氷床高度を規定する地形学的証拠となるかもしれない。今後、標高 250 m 以上が LGM に露出していたのか、それとも侵食性のない cold-based の氷床に覆われていたのかを特定するためにも、とくに Area 1 において迷子石および基盤岩試料の標高ごとの表面露出年代を得ることが重要である。いずれにしても今回得られた地形学的知見は、宗谷海岸における LGM の氷床厚が数百 m 程度以上であったことを支持する。

2) 氷床後退開始の年代と継続期間について

今回すりばち山山頂付近の基盤岩試料 (16012401) で約 14 ka の年代が得られ、先行研究で報告されていた迷子石試料 (SV9-2) の露出年代と 7 kyr もの差が出た。16012401 の年代は地形調査結果をもとに復元した氷床後退過程と整合的だが、過去の露出の履歴のために年代が古く推定されている可能性もあり、本研究では氷床後退年代について最終的な結論を導くことが難しい。本研究と Yamane *et al.* (2011) の表面露出年代は、現在の氷床縁から比較的近い地点 (約 5 km 以内) から得られたものであり (図 2, 図 7), 氷床後退開始の年代とその継続期間を特定するためにも新たな表面露出年代が求められる。

Skarvsnes においては、高精度の海水準変動データが報告されており (Miura *et al.*, 1998a), 今回の地形調査で明らかになった氷床後退過程に関する知見に加え、今後信頼性の高い表面露出年代がさらに加わることにより、GIA モデルや氷河・氷床モデルの検証に貢献できる高精度の氷床後退過程の復元が可能となる。これにより、Meltwater pulse-1A といった海水準上昇イベントと東南極氷床融解の関連性や、南極沿岸域の融解のトリガーとして注目されている温暖水塊の周極深層水 (Circumpolar Deep Water: CDW) との氷床末端における海洋・氷床相互作用の議論にもつながる。そのためにも、今後陸上の年代測定結果に加え、三浦 (2018) が提唱するように Lützow-Holm 湾における海底地形調査や海底堆

積物の採取なども重要になるだろう。

謝 辞

現地調査や物資輸送に関して、第 57・59 次南極地域観測隊ならびにしらせ乗組員の方々に多大なご協力をいただいた。とくに第 57 次越冬隊の野外観測支援担当の水谷剛生隊員、第 57 次隊同行者の柴田和宏氏、渡辺浩志氏、塩原 真氏、および白水 薫氏には表面露出年代試料の採取と調査物資の運搬に関して大変お世話になった。第 56 次南極観測隊三浦英樹越冬隊長には南極調査に関する貴重なアドバイスをいただいた。西泉邦彦博士および国立極地研究所の三澤啓司博士には表面露出年代の分析に関し直接ご指導いただいた。ICP-MS 測定は国立極地研究所の平林幹啓博士に行っていた。また、2 名の匿名査読者の建設的なコメントにより本稿は大幅に改善された。以上の方々に深く御礼申し上げます。本研究は、東レ科学技術研究助成、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) 課題番号 16H05739 (代表者菅沼悠介)、新学術領域研究 17H06321 (代表者福田洋一) および研究プロジェクト KP306 (代表者野木義史) の一部を使用した。

注

- 1) CRONUS-Earth online calculators: <http://hess.ess.washington.edu> [Cited 2019/3/29].

文 献

- Balco, G., Stone, J.O., Lifton, N. and Dunai, T.J. (2008): A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from ^{10}Be and ^{26}Al measurements. *Quaternary Geochronology*, **3**, 174–195.
- Bennett, M.R. (2003): Ice streams as the arteries of an ice sheet: Their mechanics, stability and significance. *Earth-Science Reviews*, **61**, 309–339.
- Borchers, B., Marrero, S., Balco, G., Caffee, M., Goehring, B., Lifton, N., Nishiizumi, K., Phillips, F., Schaefer, J. and Stone, J. (2016): Geological calibration of spallation production rates in the CRONUS-Earth project. *Quaternary Geochronology*, **31**, 188–198.
- Chmeleff, J., Blanckenburg, F., Kossert, K. and Jakob, D. (2010): Determination of the ^{10}Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **268**, 192–199.
- Cuffey, K.M. and Paterson, W.S.B. (2010): *The Physics of Glaciers, Fourth Edition*. Academic Press.
- Denton, G.H. and Hughes, T.J. (1981): *The Last Great Ice Sheets*. Wiley, New York.

- Dome Fuji Ice Core Project Members: Kawamura, K., Abe-Ouchi, A., Motoyama, H., Ageta, Y., Aoki, S., Azuma, N., Fujii, Y., Fujita, K., Fujita, S., Fukui, K., Furukawa, T., Furusaki, A., Goto-Azuma, K., Greve, R., Hirabayashi, M., Hondoh, T., Hori, A., Horikawa, S., Horiuchi, K., Igarashi, M., Iizuka, Y., Kameda, T., Kanda, H., Kohno, M., Kuramoto, T., Matsushi, Y., Miyahara, M., Miyake, T., Miyamoto, A., Nagashima, Y., Nakayama, Y., Nakazawa, T., Nakazawa, F., Nishio, F., Obinata, I., Ohgaito, R., Oka, A., Okuno, J., Okuyama, J., Oyabu, I., Parrenin, F., Pattyn, F., Saito, F., Saito, T., Saito, T., Sakurai, T., Sasa, K., Seddik, H., Shibata, Y., Shinbori, K., Suzuki, K., Suzuki, T., Takahashi, A., Takahashi, K., Takahashi, S., Takata, M., Tanaka, M., Uemura, R., Watanabe, G., Watanabe, O., Yamasaki, T., Yokoyama, K., Yoshimori, M. and Yoshimoto, T. (2017): State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling. *Science Advances*, **3**, 2, e1600446.
- Dunai, T.J. (2010): *Cosmogenic Nuclides: Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences*. Cambridge University Press.
- 福田洋一 (2018): 衛星観測による南極氷床質量収支. 低温科学, **76**, 187-204. [Fukuda, Y. (2018): Satellite observations of the Antarctic ice-sheet mass balance. *Low Temperature Science (Teion Kagaku)*, **76**, 187-204. (in Japanese with English abstract)]
- Gosse, J.C. and Phillips, F.M. (2001): Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Reviews*, **20**, 1475-1560.
- Hayashi, M. and Yoshida, Y. (1994): Holocene raised beaches in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica. *Memoir National Institute of Polar Research (Special Issue)*, **50**, 49-84.
- 平川一臣・澤柿教伸 (1998): 宗谷海岸の隆起海成堆積物から得られた貝化石の ^{14}C 年代 -JARE35 (1993-94) の資料. 南極資料, **42**, 151-167. [Hirakawa, K. and Sawagaki, T. (1998): Radiocarbon dates of fossil shells from raised beach sediments along the Soya Coast, East Antarctica—A report on a geomorphological survey during JARE-34 (1993-94)—. *Antarctic Record (Nankyoku Shiryo)*, **42**, 151-167. (in Japanese with English abstract)]
- Hirakawa, K., Ono, Y., Hayashi, M., Aniya, M., Iwata, S., Fujiwara, K., Moriwaki, K. and Yoshida, Y. (1984a): *Geomorphological map of Langhovde (1:25,000)*. *Special Map Series of National Institute of Polar Research 1*. National Institute of Polar Research, Tokyo.
- 平川一臣・小野有五・森脇喜一 (1984b): 南極地形学図・ラングホブデ (1:25,000) の基本的な考え方. 地図, **22**, 6-10. [Hirakawa, K., Ono, Y. and Moriwaki, K. (1984b): Basic concepts of geomorphological map of Langhovde (1:25,000). *Map (Chizu)*, **22**, 6-10. (in Japanese)*]
- Igarashi, A., Numanami, H., Tsuchiya, Y. and Fukuchi, M. (2001): Bathymetric distribution of fossil foraminifera within marine sediment cores from the eastern part of Lützow-Holm Bay, East Antarctica, and its paleoceanographic implications. *Marine Micropaleontology*, **42**, 125-162.
- Ishikawa, T., Yanai, K., Matumoto, Y., Kizaki, K., Kojima, S., Tatumi, T., Kikuchi, T. and Yoshida, M. (1977): *Explanatory Text of Geological Map of Skarvsnes, Antarctica. Antarctic Geological Map Series Sheet 6 and 7 Skarvsnes*. National Institute of Polar Research, Tokyo.
- 岩崎正吾・三浦英樹・前李英明 (2005): 東南極・宗谷海岸の陸上沿岸露岩域に点在する未固結細粒堆積物の粒度組成の特徴と成因. 南極資料, **49**, 258-291. [Iwasaki, S., Miura, H. and Maemoku, H. (2005): Grain-size distribution and origins of unconsolidated fine sediments in ice-free areas, Soya Coast, East Dronning Maud Land, East Antarctica. *Antarctic Record (Nankyoku Shiryo)*, **49**, 258-291. (in Japanese with English abstract)]
- 岩田修二 (2011): 氷河地形学. 東京大学出版会. [Iwata, S. (2011): *Glacial Geomorphology*. University of Tokyo Press. (in Japanese)]
- Kanamaru, T., Suganuma, Y., Oiwan, H., Miura, H., Miura, M., Okuno, J. and Hayakawa, H. (2018): The weathering of granitic rocks in a hyper-arid and hypothermal environment: A case study from the Sør-Rondane Mountains, East Antarctica. *Geomorphology*, **317**, 62-74.
- Kohl, C.P. and Nishiizumi, K. (1992): Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ-produced cosmogenic nuclides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **56**, 3583-3587.
- 国土地理院 (2013): 南極地域基準点測量・重力測量・水準測量・地磁気測量・露岩変動測量成果. 技術資料. B1-No.62. [Geographical Survey Institute (2013): *Control Point Survey, Leveling, Gravity Survey, Magnetic Survey, Fluctuation Survey of Exposed Rock and Ice Sheet in Antarctica. Technical Report of the Geospatial Information Authority of Japan*, B1-No.62.] <https://antarctic.gsi.go.jp/index-e.html> [Cited 2019/3/29].
- Korschinek, G., Bergmaier, A., Faestermann, T., Gerstmann, U.C., Knie, K., Rugel, G., Wallner, A., Dillmann, I., Dollinger, G., Lierse von Gostomski, Ch., Kossert, K., Maiti, M., Poutivtsev, M. and Remmert, A. (2010): A new value for the half-life of ^{10}Be by Heavy-Ion Elastic Recoil Detection and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **268**, 187-191.
- Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y. and Sambridge, M. (2014): Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111**, 15296-

- 15303.
- Lightfoot, N., Sato, T. and Dunai, T.J. (2014): Scaling in situ cosmogenic nuclide production rates using analytical approximations to atmospheric cosmic-ray fluxes. *Earth and Planetary Science Letters*, **386**, 149–160.
- Mackintosh, A., Golledge, N., Domack, E., Dunbar, R., Leventer, A., White, D., Pollard, D., DeConto, R., Fink, D., Zwartz, D., Gore, D. and Lavoie, C. (2011): Retreat of the East Antarctic ice sheet during the last glacial termination. *Nature Geoscience*, **4**, 195–202.
- Mackintosh, A., Verleyen, E., O'Brien, P.E., White, D.A., Jones, R.S., McKay, R., Dunbar, R., Gore, D.B., Fink, D., Post, A.L., Miura, H., Leventer, A., Goodwin, I., Hodgson, D.A., Lilly, K., Crosta, X., Golledge, N.R., Wagner, B., Berg, S., van Ommen, T., Zwartz, D., Roberts, S.J., Vyverman, W. and Masse, G. (2014): Retreat history of the east Antarctic ice sheet since the last glacial maximum. *Quaternary Science Reviews*, **100**, 10–30.
- Maemoku, H., Miura, H., Saigusa, S. and Moriwaki, K. (1997): Stratigraphy of the Late Quaternary raised beach deposits in the northern part of Langhovde, Lützow-Holm bay, East Antarctica. *Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctic Geosciences*, **10**, 178–186.
- 松四雄騎 (2017): 宇宙線生成核種を用いた岩盤の風化と土層の生成に関する速度論—手法の原理, 適用法, 研究の現状と課題—. 地学雑誌, **126**, 487–511. [Matushi, Y. (2017): Quantification of long-term rates of bedrock weathering and soil production using terrestrial cosmogenic nuclides: Principles, methodology, current research status, and perspectives. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **126**, 487–511. (in Japanese with English abstract)]
- 三浦英樹 (2018): 最終氷期最盛期以降の南極氷床融氷史: 地形地質学から見た現状と課題. 低温科学, **76**, 227–241. [Miura, H. (2018): Geomorphological and geological reconstruction of Antarctic Ice Sheet deglaciation since the Last Glacial Maximum: the current situation and future challenges. *Low Temperature Science (Teion Kagaku)*, **76**, 227–241. (in Japanese with English abstract)]
- Miura, H., Maemoku, H., Seto, K. and Moriwaki, K. (1998a): Late Quaternary East Antarctic melting event in the Soya Coast region based on stratigraphy and oxygen isotopic ratio of fossil molluscs. *Polar Geoscience*, **11**, 260–274.
- Miura, H., Moriwaki, K., Maemoku, H. and Hirakawa, K. (1998b): Fluctuations of the East Antarctic ice-sheet margin since the last glaciation from the stratigraphy of raised beach deposits along the Soya Coast. *Annals of Glaciology*, **27**, 297–301.
- Miura, H., Maemoku, H., Igarashi, A. and Moriwaki, K. (1998c): Late Quaternary Raised Beach Deposits and Radiocarbon Dates of Marine Fossils around Lützow-Holm Bay. *Special Map Series of National Institute of Polar Research* 6. National Institute of Polar Research, Tokyo.
- 三浦英樹・前杢英明・瀬戸浩二・五十嵐厚夫 (2002a): リュツォ・ホルム湾周辺の隆起海浜堆積物から見た第四紀後期の南極氷床変動と古環境. 月間地球, **24**, 37–43. [Miura, H., Maemoku, H., Seto, K. and Igarashi, A. (2002a): The late Quaternary fluctuation of Antarctic ice sheet and paleoenvironment see from raised beach sediment around the Lützow-Holm Bay. *Chikyu Monthly (Gekkan Chikyu)*, **24**, 37–43. (in Japanese)*]
- 三浦英樹・高田将志・Daniel Zwartz (2002b): 東南極, エンダビーランド, リーセル山周辺の第四紀氷床変動の証拠と古環境. 月間地球, **24**, 51–57. [Miura, H., Masashi, T. and Zwartz, D. (2002b): Evidence for quaternary ice sheet fluctuation and paleoenvironment around the Mt. Riiser-Larsen, Enderby Land, East Antarctica. *Chikyu Monthly (Gekkan Chikyu)*, **24**, 51–57. (in Japanese)*]
- Moriwaki, K., Iwata, S., Matsuoka, N., Hasegawa, H. and Hirakawa, K. (1991): Weathering stage of till and glacial history of the central Sør-Rondane Mountains. *Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctic Geosciences*, **5**, 99–111.
- Moriwaki, K., Iwata, S., Matsuoka, N., Hasegawa, H. and Hirakawa, K. (1994): Weathering stage as a relative age of till in the central Sør-Rondane. *Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctic Geosciences*, **7**, 156–161.
- 森脇喜一・平川一臣・中田正夫 (1998): 第四紀後期における東南極氷床の変動と海水準変動. 第四紀研究, **37**, 165–175. [Moriwaki, K., Hirakawa, K. and Nakada, M. (1998): Behavior of the East Antarctic ice sheet and sea level change during the Late Quaternary. *Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **37**, 165–175. (in Japanese with English abstract)]
- Nishiizumi, K. (2004): Preparation of ^{26}Al AMS standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B Beam Interactions with Materials and Atoms*, **223**, 388–392.
- Nishiizumi, K., Kohl, C.P., Arnold, J.R., Klein, J., Fink, D. and Middleton, R. (1991): Cosmic ray produced ^{10}Be and ^{26}Al in Antarctic rocks: Exposure and erosion history. *Earth Planetary Science Letters*, **104**, 440–454.
- Nishiizumi, K., Imamura, M., Caffee, M.W., Southon, J.R., Finkel, R.C. and McAninch, J. (2007): Absolute calibration of ^{10}Be AMS standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **258**, 403–413.
- 野木義史・北本朝展 (2010): 日本の南極観測活動における地理情報システム (GIS) ポータルサイト. 南極資料, **54**, 203–215. [Nogi, Y. and Kitamoto, A. (2010): GIS portal site of Japanese Antarctica Research. *Antarctic Record (Nankyoku Shiryo)*, **54**,

- 203-215. (in Japanese with English abstract)]
- Nye, J.F. (1952): A method of calculating the thickness of the ice-sheets. *Nature*, **169**, 529-530.
- 奥野淳一 (2018): 南極氷床変動と氷河性地殻均衡. 低温科学, **76**, 205-225. [Okuno, J. (2018): Antarctic ice sheet variation and glacial isostatic adjustment. *Low Temperature Science (Teion Kagaku)*, **76**, 205-225. (in Japanese with English abstract)]
- Okuno, J. and Miura, H. (2013): Last deglacial relative sea level variations in Antarctica derived from glacial isostatic adjustment modeling. *Geoscience Frontiers*, **4**, 623-632.
- Omoto, K. (1976): Glacio-geomorphic study on submarine morphology east of Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Science Reports of the Tohoku University. 7th Series, Geography*, **26**, 247-297.
- Omoto, K. (1977): Geomorphic development of the Soya Coast, East Antarctica—Chronological interpretation of raised beaches based on levellings and radiocarbon datings—. *Science Reports of the Tohoku University. 7th Series, Geography*, **27**, 95-148.
- Sawagaki, T. and Hirakawa, K. (1997): Erosion of bedrock by subglacial meltwater, Soya Coast, East Antarctica. *Geografiska Annaler: Series A*, **79**, 223-238.
- Sawagaki, T. and Hirakawa, K. (2002a): Hydrostatic investigations on subglacial meltwater: Implications for the formation of streamlined bedforms and subglacial lakes, East Antarctica. *Polar Geoscience*, **15**, 123-147.
- Sawagaki, T. and Hirakawa, K. (2002b): Terrestrial evidence of melting of the Antarctic ice sheet during the last glacial period. *Antarctica at the Close of a Millennium; Proceedings of the 8th International Symposium on Antarctic Earth Sciences (Gamble, John A., editor; et al.), Bulletin-Royal Society of New Zealand*, **35**, 404-414.
- 瀬戸浩二・伊村 智・坂東忠司・神田啓史 (2002): 南極湖沼に記録された完新世の古環境. 月刊地球, **24**, 31-36. [Seto, K., Imura, S., Bandou, T. and Kanda, H. (2002): The Holocene paleoenvironmental record in Antarctic Lake. *Chikyu Monthly (Gekkan Chikyu)*, **24**, 31-36. (in Japanese)*]
- Small, D., Bentley, M.J., Jones, R.S., Pittard, M.L. and Whitehouse, P.L. (2019): Antarctic ice sheet palaeo-thinning rates from vertical transects of cosmogenic exposure ages. *Quaternary Science Reviews*, **206**, 65-80.
- Stone, J.O. (2000): Air pressure and cosmogenic isotope production. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 753-759.
- Suganuma, Y., Miura, H. and Okuno, J. (2012): A new sampling technique for surface exposure dating using a portable electric rock cutter. *Antarctic Record (Nankyoku Shiryo)*, **2**, 85-90.
- Suganuma, Y., Miura, H., Zondervan, A. and Okuno, J. (2014): East Antarctic deglaciation and the link to global cooling during the Quaternary: Evidence from glacial geomorphology and Be-10 surface exposure dating of the Sør Rondane Mountains, Dronning Maud Land. *Quaternary Science Reviews*, **97**, 102-120.
- 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 (2017): 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. 地学雑誌, **126**, 1-24. [Suganuma, Y., Kawamata, M., Shiramizu, K., Koyama, T., Doi, K., Kaneda, H., Aoyama, Y., Hayakawa, H. and Obanawa, H. (2017): Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based survey in Antarctica for high-definition topographic measurements. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **126**, 1-24. (in Japanese with English abstract)]
- 菅沼悠介・田邊優貴子・香月興太・柴田大輔・川又基人 (2018): 氷上からの湖底・海底堆積物掘削プロジェクトの報告 (JARE-58/59). 南極資料, **62**, 15-42. [Suganuma, Y., Tanabe, Y., Katuki, K., Shibata, D. and Kawamata, M. (2018): Report on lake/marine sediment coring from ice surface (JARE-58/59). *Antarctic Record (Nankyoku Shiryo)*, **62**, 15-42. (in Japanese with English abstract)]
- 菅沼悠介・香月興太・金田平太郎・川又基人・田邊優貴子・柴田大輔 (2019): 可搬型パーカッションピストンコアラーの開発. 地質学雑誌, **125**, 323-326. [Suganuma, Y., Katsuki, K., Kaneda, H., Kawamata, M., Tanabe, Y. and Shibata, D. (2018): Development of a portable percussion piston corer. *Journal of the Geological Society Japan*, **125**, 323-326. (in Japanese with English abstract)]
- Takada, M., Tani, A., Miura, H., Moriwaki, K. and Nagatomo, T. (2003): ESR dating of fossil shells in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 1323-1328.
- Takano, Y., Tyler, J.J., Kojima, H., Yokoyama, Y., Tanabe, Y., Sato, T., Ogawa, N.O., Ohkouchi, N. and Fukui, M. (2012): Holocene lake development and glacial-isostatic uplift at Lake Skallen and Lake Oyako, Lützow Holm Bay, East Antarctica, based on biogeochemical facies and molecular signatures. *Applied Geochemistry*, **27**, 2546-2559.
- Verleyen, E., Tavernier, I., Hodgson, D.A., Whitehouse, P.L., Kudoh, S., Imura, S., Heirman, K., Bentley, M.J., Roberts, S.J., Batist, M.D., Sabbe, K. and Vyverman, W. (2017): Ice sheet retreat and glacio-isostatic adjustment in Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Quaternary Science Reviews*, **169**, 85-98.
- 若狭 幸・松崎浩之・松倉公憲 (2004): 原位置宇宙線生成核種年代測定法: 侵食地形変化速度の解明への適用. 地形, **25**, 247-265. [Wakasa, S., Matsuzaki, H. and Matsukura, Y. (2004): Application of the method of terrestrial in situ cosmogenic radionuclides dating to geomorphology. *Transactions, Japanese Geomorphological Union (Chikei)*, **25**, 247-265. (in Japanese with English abstract)]

- 渡辺悌二 (1990): 氷河・周氷河堆積物を主対象とした相対年代法. 第四紀研究, **29**, 49-77. [Watanabe, T. (1990): Relative dating methods mainly applied to glacial and periglacial deposits. *Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **29**, 49-77. (in Japanese)]
- White, D.A. and Fink, D. (2014): Late Quaternary glacial history constrains glacio-isostatic rebound in Enderby Land, East Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **119**, 401-413.
- Whitehouse, P.L., Gomez, N., King, A.M. and Wiens, A.D. (2019): Solid Earth change and the evolution of the Antarctic Ice Sheet. *Nature Communication*, **503**, 1-14.
- Yamane, M., Yokoyama, Y., Miura, H., Maemoku, H., Iwasaki, S. and Matsuzaki, H. (2011): The last deglacial history of Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Journal of Quaternary Science*, **26**, 3-6.
- 横山祐典・阿瀬貴博・村澤 晃・松崎浩之 (2005): 宇宙線照射生成核種を用いた地球表層プロセスの研究. 地質学雑誌, **111**, 693-700. [Yokoyama, Y., Aze, H., Murasawa, A. and Matuzaki, H. (2005): Terrestrial cosmogenic nuclides as a tool for studying earth science processes. *Journal of the Geological Society Japan*, **111**, 693-700. (in Japanese with English abstract)]
- Yoshida, Y. (1983): Physiography of the Prince Olav and the Prince Harald Coasts, East Antarctica. *Memoirs of National Institute of Polar Research. Series C, Earth Sciences*, **13**, 1-83.
- 吉川虎雄・戸谷 洋 (1957): 第1次南極観測隊地理部門報告. 南極資料, **1**, 1-13. [Yoshikawa, T. and Toya, H. (1957): Report on geomorphological results of the Japanese Antarctic Research Expedition, 1956-57. *Antarctic Record (Nankyoku Shiryo)*, **1**, 1-13. (in Japanese with English abstract)]
- * Title etc. translated by M.K.