HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	三浦, 英樹
Citation	低温科学, 76, 227-241
Issue Date	2018-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.76.227
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70337
Type	departmental bulletin paper
File Information	22_Lowtemsci76_P227-241.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

低温科学 76 （2018） 227-241
doi: 10.14943/lowtemsci. 76. 227

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

三浦　英樹[1)]

南極大陸とその周辺に存在する山地，海岸，海底の地形・地質には，過去の南極氷床の盛衰が様々な形で記録されている．これらの記録は，断片的ではあるが，過去の南極氷床の空間的な分布範囲や拡大・縮小過程，当時の氷床底環境などを復元するうえで，他の地球科学的手法では得ることができない独特のデータを提供する．本稿では，地形地質学的に復元された最終氷期最盛期以降の南極氷床融氷史に関する成果の概要と今後の課題を示す．

Geomorphological and geological reconstruction of Antarctic Ice Sheet deglaciation since the Last Glacial Maximum: the current situation and future challenges

Hideki Miura[1]

The Antarctic Ice Sheet history has been recorded on various sediments and rocks of the mountains, coasts and the ocean floor of Antarctica and its surroundings. Although these geomorphological and geological records are fragmentary, they provide unique data for reconstruction of the spatial expansion range, shrinking process and thermal subglacial environments of the past Antarctic Ice sheet. In this paper, we present the outline of the knowledge and understanding of the Antarctic Ice Sheets at the Last Glacial Maximum (LGM) and their subsequent changes throughout the Holocene.

キーワード：南極大陸，南極氷床，地形地質学，最終氷期最盛期，融氷史
Antarctica, Antarctic Ice Sheet, geomorphology and geology, Last Glacial Maximum, deglaciation

1．はじめに

南極氷床が，いつから形成され，その形や大きさ，氷床底面の性質をどのように変化させてきたのかを明らかにすることは，現在の地球の自然環境の成り立ちを探り，地球システムの中で南極氷床が過去・現在・近未来において，どのような役割や影響を持ってきたのか（または，持つのか）を考えるうえで重要な情報を提供する（図 1）．

連絡先
三浦　英樹
国立極地研究所　地圏研究グループ
〒190-8518　東京都立川市緑町 10-3
Tel. 042-512-0703
e-mail：miura@nipr.ac.jp
1）国立極地研究所　地圏研究グループ
Geoscience Group, National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan

このような地質学的な時間スケールでの氷河・氷床変遷史の研究には，主として次の 2 つの観点があり，それぞれに対応した研究方法が存在する．

① 地球上に存在する（した）氷河・氷床総量の変化史を明らかにする観点：
　（a） 深海底堆積物コアから得られる底生有孔虫殻を構成する炭酸塩の酸素同位体比変動を用いる方法（例えば，Zachos et al., 2001; Lisiecki and Raymo, 2005）
　（b） 氷床から離れた隆起速度が速い地点における旧汀線（過去の海岸線）高度を示す海岸地形や地質，化石などから復元された海面変化史を用いる方法（例えば，Lambeck and Chappell, 2001；図 2 右を参照）
② 地球上各地に存在する（した）具体的な氷河・氷床の地理的・空間的分布・性質とそれらの変動史を明らかにする観点：

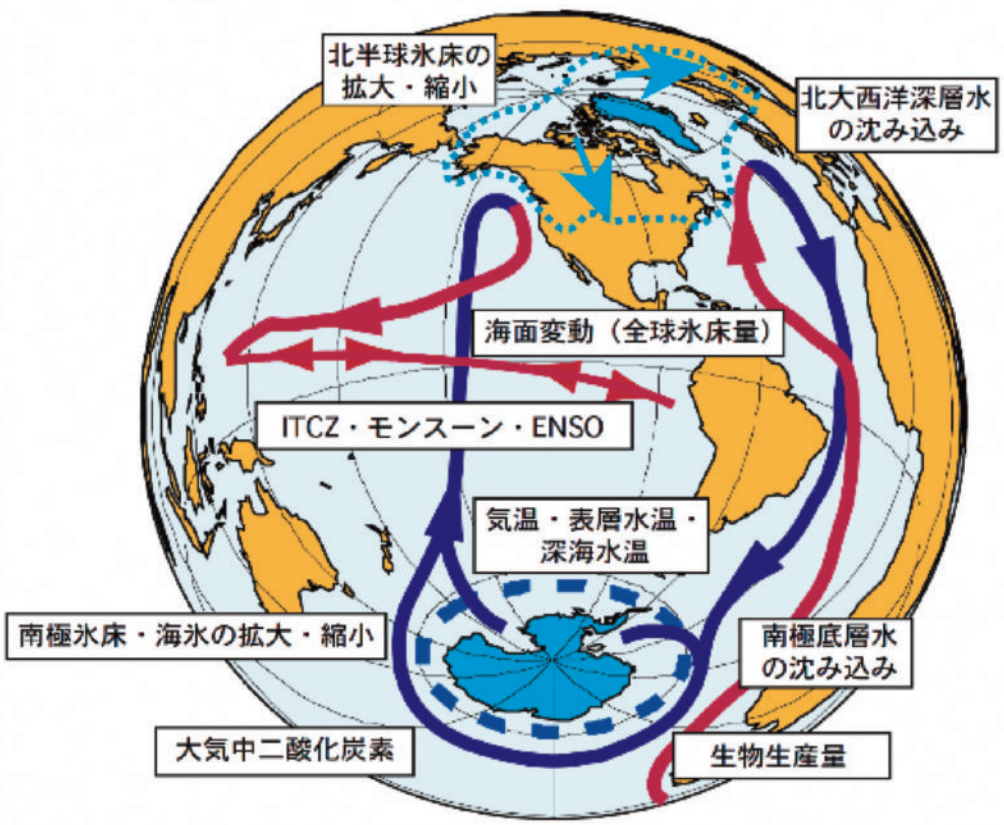

図 1：第四紀の氷期・間氷期サイクルにおける氷床変動を中心とした地球システムの模式図．氷床の変化は，他の要素と関連して地球システムの変動に大きな影響を与える．過去の氷床の存在と変動を明らかにすることは，地球システムを考える上で，基礎的で重要な課題である．水色に塗られた部分は現存する氷床（グリーンランド氷床と南極氷床）．北半球高緯度に描かれた水色の短い破線と矢印は，氷期に拡大した北半球氷床の範囲と拡大方向の概要．南極大陸の周囲に描かれた青色の破線は，氷期の南大洋の海氷拡大範囲の概要．紺色と赤色の線は，現在（間氷期）の深層と表層の海洋循環の概要をそれぞれ示す．三浦（2003）から引用．

(c)　氷河・氷床が存在した場所およびその周辺地域における氷河の侵食・運搬・堆積により形成された地形や地質の分布・層序・年代・特徴を用いる方法

(d)　氷河・氷床が存在した縁辺地域における旧汀線高度を示す海岸の地形地質，化石などから復元される海面変化史を用いて氷河性アイソスタシー調整（GIA: Glacial Isostatic Adjustment）を行う方法（本巻の奥野を参照）

上記の①の観点は，時間的に連続する変動記録を用いて，グローバルな意味での「氷期」（陸上の氷河・氷床が増加して海水量が減少した時期）と「間氷期」（陸上の氷河・氷床が減少して海水量が増加した時期）を相対的に定義することに適している．図 2 に示した海洋酸素同位体ステージ（Marine Isotope Stage: MIS）は，そのように定義された時代区分・編年であり，間氷期に奇数番号，氷期に偶数番号を与えたものである．

一方，上記の②の観点では，個々のローカルな氷河・氷床の大きさをフィールドワークによって直接的・間接的に明らかにする．ただし，個々の氷河・氷床の大きさ（面的範囲や厚さ）や形を規定する氷雪の涵養量と消耗量のバランスは，グローバルな気候条件だけでなく，地域的・局所的な気候条件にも依存しており，これらの気候条件に対して氷河・氷床の応答に様々な時間的差が生じる．そのため，個別の氷河・氷床の消長と気候変動（グローバルな意味での氷期や間氷期）を単純に結びつけるわけにはいかない．

本稿では，南極氷床も地球上のローカルな地理的空間を占めるひとつの氷床として捉え，特に，約 2 万年前の最終氷期最盛期（LGM: Last Glacial Maximum：図 2 の海洋酸素同位体ステージ 2）以降の時代に焦点を当てて，上記②（c）の観点と方法を用いて，現在知られている南極氷床変動史の概要および今後の課題について紹介する．

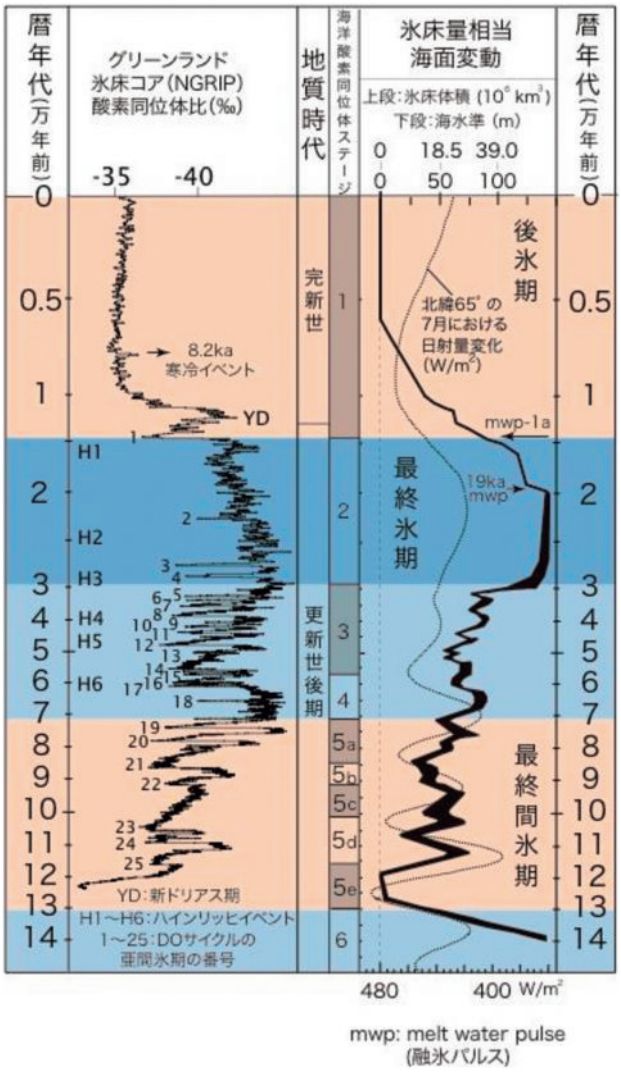

図 2：最終間氷期以降のグローバルな氷床量相当海面変動（右）とグリーンランド氷床コアの酸素同位体比（気温）の変動（左）．
右の氷床量相当海面変動は，大陸氷床から遠い地域の大陸棚や隆起珊瑚礁段丘の年代から得られた相対的海水準変動を地球の粘弾性構造を考慮し，アイソスタシーの効果を補正した値で，地球上全体の氷床の総量変化を示している．融氷パルス（mwp）は，地形地質学的に検出された急激な海面の上昇イベントを意味し，氷河・氷床の急激な融解が生じたことを示唆するが，このデータからはその融解の発生した氷河・氷床の場所はわからない．Bentley (1999) や Bentley (2010) では，南極の地形地質学的データから南極氷床の融解と mwp の関係について考察している．Lambeck and Chappell (2001) と North Greenland Ice Core Project members (2004) のデータを用いて三浦（2017a）が作成した編集図から引用．

2．第四紀の氷河・氷床変動の研究史とローカルな氷河・氷床変動史を編む意味

地形地質学的なフィールドワークによって，地球上のローカルな氷河・氷床変動史を復元する意義について改めて考えておきたい[1]．地球上の氷河・氷床の変遷史やそれに関連する古気候の研究は，1840 年にルイ・アガシーによって過去の「氷河時代」の存在が提唱されたことを契機に進展した．特に，スイスアルプス山麓では，氷河による侵食・運搬・堆積作用の痕跡の観察によって過去の氷河の存在や拡大範囲を直接推定できたため，氷河に関する地形地質学が過去の環境を復元する上で古生物や考古遺跡と合わせて中心的な研究手法となった．また，1841 年には，スコットランドのチャールズ・マクラーレンが，アガシーが提唱した大規模な氷河が陸上に形成されたならば，それに相当する海水が海洋から取り去られることにより海面が低下したであろうと予測した．その後，過去の氷河の広がりに関する古気候の研究は主に北半球中・高緯度地域で精力的に進められた．1960 年代後半頃までには，世界各地で得られた陸成層や海成層の研究成果と対比から，北アメリカやヨーロッパ北部の大陸の氷床が形成・拡大した時期（氷期）と縮小・消滅した時期（間氷期）が第四紀に幾度か繰り返され，それに伴って海水量が増減し，海面が上昇（間氷期）または下降（氷期）していたという古典的な氷河時代像が確立されてきた．特に陸上の氷河の消長と氷河堆積物の間に挟まる土壌・風化帯の時代ごとの分布に基づいて，アルプスでは古い方から，ギュンツ氷期，ミンデル氷期，リス氷期，ビュルム氷期，北アメリカでは古い方から，ネブラスカ氷期，カンザス氷期，イリノイ氷期，ウイスコンシン氷期というそれぞれ 4 回の古典的な氷期の時代区分が提唱された．

1970 年代になると，世界各地の海洋底から深海底堆積物コアが，グリーンランドと南極大陸から氷床コアが採取・解析されるようになり，陸上の地形地質データよりも高精度・高時間分解能を持つ連続した古気候（特に海水温・海水量・気温）の記録が得られるようになった（図 2 には気温と海水量を示している）．その結果，約 300 万年前以降，気候変動と氷床体積（海水量）の変動（氷期–間氷期サイクル）がグローバルにほぼ同期して約 50 回も生じていたこと（図 2 には，その最後の 2 サイクル分を示している）が明らかになった．さらに，その周期がセルビアの天文学者ミランコビッチが提唱した地球軌道の離心率・地軸の傾き・歳差運動の変動周期とよく一致することなど，氷期・間氷期サイクルをもたらす原因に

[1] 第四紀という地質時代は，地質現象がそのまま地形に表現されているという他の時代にはない特質がある（杉村，1973）．すなわち，地形を知らずに地質を語ることはできないし，地質を無視して地形だけを論ずることもできない（成瀬，1982）．本稿では，第四紀の最終氷期の地表現象を対象としているので，地形と地質を分けて考えるのではなく，両者を組み合わせて総合的に考えるという意味をこめて「地形地質学」という言葉を用いる．

ついても次第に明らかになり，陸上の氷河地形地質に基づいて設定されてきた古典的な氷河時代像は見直されることとなった．これらの研究史の詳細については，貝塚（1978），インブリー・インブリー（1982），小林・阪口（1982），成瀬（1982），大河内（2008）を参照されたい．その後も，海底堆積物コアや氷床コアの記録とモデル研究が連携して，氷床の開始時期や氷期・間氷期サイクルの実態や原因論に関する多くの研究が続けられている（例えば，Kawamura et al., 2007; Abe-Ouchi et al., 2013）．

このような高精度・高時間分解能を持つ深海底堆積物コアや氷床コアを使った古気候研究の進展に伴って，従来の断片的な陸上地形地質研究に基づいたローカルな氷河・氷床変動史の研究は，一見その役割を終えたように思われるかもしれない．しかし，以下の点において，それは依然重要な意義を持つと言える．

① 海底堆積物コア中の炭酸塩堆積物の酸素同位体比変動や隆起地域の海成段丘の旧汀線高度記録から得られる氷床量（海水量）の盛衰は，地球上に存在した氷河・氷床の総量を反映するが，ローカルな地形地質調査以外の方法では，地球上のどこにどれだけの量の氷河・氷床が存在していたのかを具体的に知ることはできない．

② ローカルな氷河・氷床の盛衰は，氷河・氷床量の変化や海水の再分配による荷重変化を通じて，氷床周辺の下部マントルの流動と地殻の上下運動をもたらす．その結果，海水量の総量変化と固体地球の変形が組み合わさって，各地域で異なる相対的な海水準変動が生じる．この世界各地の海水準変動の相違をもたらす原因を探るためには，ローカルな氷河・氷床の地理的分布と変動史を知る必要がある（本巻の奥野を参照）．

③ 衛星重力データを用いて，現在進行中の地球温暖化による氷河・氷床の質量変化を正確に評価する場合（本巻の福田を参照），氷床の質量変化だけでなく，氷床下のマントル流動（GIA：氷河性アイソスタシー調整）による質量変化も考慮する必要がある．そのためには，過去の氷河・氷床の拡大範囲とその縮小過程の歴史を対象となる場所で知ることが重要である．

④ ローカルな氷床の盛衰は，その周囲の大気・海洋循環や生物の挙動に影響を与えるだけでなく，その影響は氷床から離れた遠方まで伝搬していく．そのため，グローバルな環境変動の原因を考える上でも，ローカルな氷河・氷床変動の知見が必要不可欠である．

⑤ 地質学的に知られる過去の温暖期［例えば，最終間氷期の海洋酸素同位体ステージ（MIS）5 や超間氷期とも呼ばれる MIS 11（Loutre and Berger, 2003），MIS 31（Froelich et al., 1991）など］におけるローカルな氷河･氷床の分布や形態の復元は，地球温暖化時代の氷河・氷床の変化を予測する参照データとなる．

⑥ 古気候記録や氷河力学に基づいた計算によって復元された過去の氷河・氷床モデル（例えば，Pollard and DeConto, 2009; Pattyn et al., 2012）の妥当性を検証するためには，過去のローカルな氷河・氷床の分布や形態の復元結果との比較・参照が必要である．

⑦ 将来の気候変動を予測するためには，現在とは異なる過去の様々な環境下での古気候記録とあわせてローカルな氷河・氷床の分布状態のデータが必要である．これらを用いることで，気候モデルの精度向上や将来の気候変化予測に貢献できる［例えば，IPCC (2013) の Information from Paleoclimate Archives の章を参照］．

⑧ 地球表層を覆う大気，海洋，氷河などの様々な流体は，地形と重力の作用によって移動や分布を規定されている．また，地形は太陽エネルギーの地球表面への分配に直接的・間接的に影響を及ぼすため，様々な生物の分布にも大きな影響を与える．そのため，氷河・氷床が存在・発達した地域の自然環境を総合的・具体的かつ歴史的に理解する上で，氷河・氷床が関与した地形の発達史的理解が必要となる．

3．最終氷期最盛期以降の南極氷床変動史研究の概要

3.1　南極氷床変動史の研究

南極氷床も地球上のローカルな氷床のひとつであるが，その分布面積や体積は他の氷床と比べて圧倒的に大きい（三浦，2017b）．このような南極氷床の起源や変動史は，約 100 年前の“南極探検の英雄時代”の頃から注目されていた（例えば，Taylor, 1922; Wright and Priestley, 1922）．しかし，南極までのアプローチが厳しいこと，大陸のほとんどが氷床に覆われているため陸上に残されている記録が少ないこと，さらに海氷に覆われた海洋に囲まれていて海底の研究も困難であったことから，北半球氷床の研究に比べて実証的な調査が著しく遅れていた．したがって，南極氷床の変動史については現在もまだ多

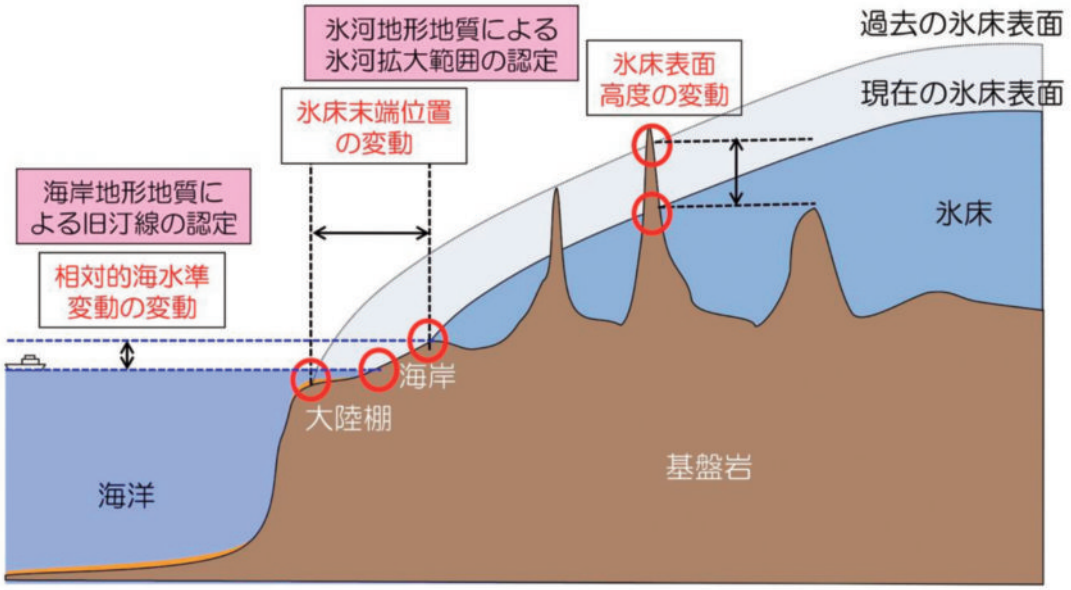

図 3：模式的な南極大陸の縦断面と氷床変動史を復元するための地形地質学的調査の着眼点．
現在よりも氷床が拡大した時代には，拡大した氷河が侵食・運搬・堆積した地形や堆積物の痕跡が大陸棚や沿岸露岩，山地に記録されて残る場合が多い．それらの形成時代を示す堆積物や岩石を採取して年代測定（主として放射性炭素年代，宇宙線による表面照射年代，光ルミネッセンス年代など）を行う．海底の大陸棚の地形は，観測船を用いた探査と掘削が必要になる（本巻の藤井・野木を参照）．海岸地形地質から得られる相対的な海水準の変動は，氷床の変動を直接示すものではないが，GIA と組み合わせることで，過去の氷床荷重の変化を通した氷床の変化を計算できる（本巻の奥野を参照）．

くの謎に包まれている．

特に，約 2 万年前の最終氷期最盛期（この時代は地球史における最新の氷期であり，記録が多く残されているため，その様々な古環境のデータセットは古い時代の氷期の地球環境を考える上で重要な情報を与える；Clark et al., 2009 を参照）以降に焦点を絞ると，1981 年の CLIMAP モデル（Climate/Long Range Investigation Mapping and Prediction）（Denton and Hughes, 1981）を端緒として，それ以降のデータの蓄積に伴い，過去の氷床復元データの編集が行われてきた（Denton et al., 1991; Anderson, 1999; Bentley, 1999; Anderson et al., 2002; Denton and Hughes, 2002; Wright et al., 2008; Livingstone et al., 2012）．さらに，これらの地形地質データと氷床モデルの比較研究も行われている（Golledge et al., 2012）．しかしながら，まだ広大な未調査地域が南極大陸には残されており，最終氷期最盛期のグローバルな海面低下への寄与量については，研究者によって見積もりが大きく異なっている（例えば，Ivins et al., 2013）．ここでは，国際的な共同研究で取りまとめられた地形地質学的方法（図 3）に基づく最終氷期最盛期の南極氷床の拡大位置と，それ以降の融氷史（主として接地線（grounding line）の位置の変化を意味する）に関して，昭和基地周辺地域の研究結果を含めた現在までの成果（The RAISED Consortium et al., 2014; Hillenbrand et al., 2014; Anderson et al., 2014; Larter et al., 2014; Ó Cofaigh et al., 2014; Mackintosh et al., 2014）を地域別に要約する（以下，図 4 と図 5 を参照）．なお，氷河地形地質学の基礎や詳細については専門の教科書や論文およびそれらの引用文献を参照していただきたい（例えば，藤井ほか，1997; Bennett and Glasser, 2009；岩田，2011; Ben and Evans, 2014; Batchelor and Dowdeswell, 2015）．

3.2　南極大陸の各地域の氷床変動史

ウェッデル海は，西南極氷床と東南極氷床の両方の氷床が流れ込む場所に位置し，現在，南極氷床の約 5 分の 1 が流入している海域である（Joughin et al., 2006）．また，この地域に発達する棚氷（現在の棚氷は，バークナー島を挟んだ西側をロンネ棚氷，東側をフィルヒナー棚氷と呼ぶ）は，南極底層水の形成（本巻の大島を参照）に重要な役割を果たしている．

3.2.1　ウェッデル海周辺地域

(a)　最終氷期最盛期（2 万年前）：

陸上の氷河地形地質データと表面照射年代［宇宙線と地殻表面の岩石が反応することにより生成される ^{10}Be や ^{26}Al などの原位置宇宙線生成核種を定量する年代測定法．地表面が宇宙線に曝されている間に地表面物質中に蓄積される宇宙線生成核種の量から，地表面が氷床か

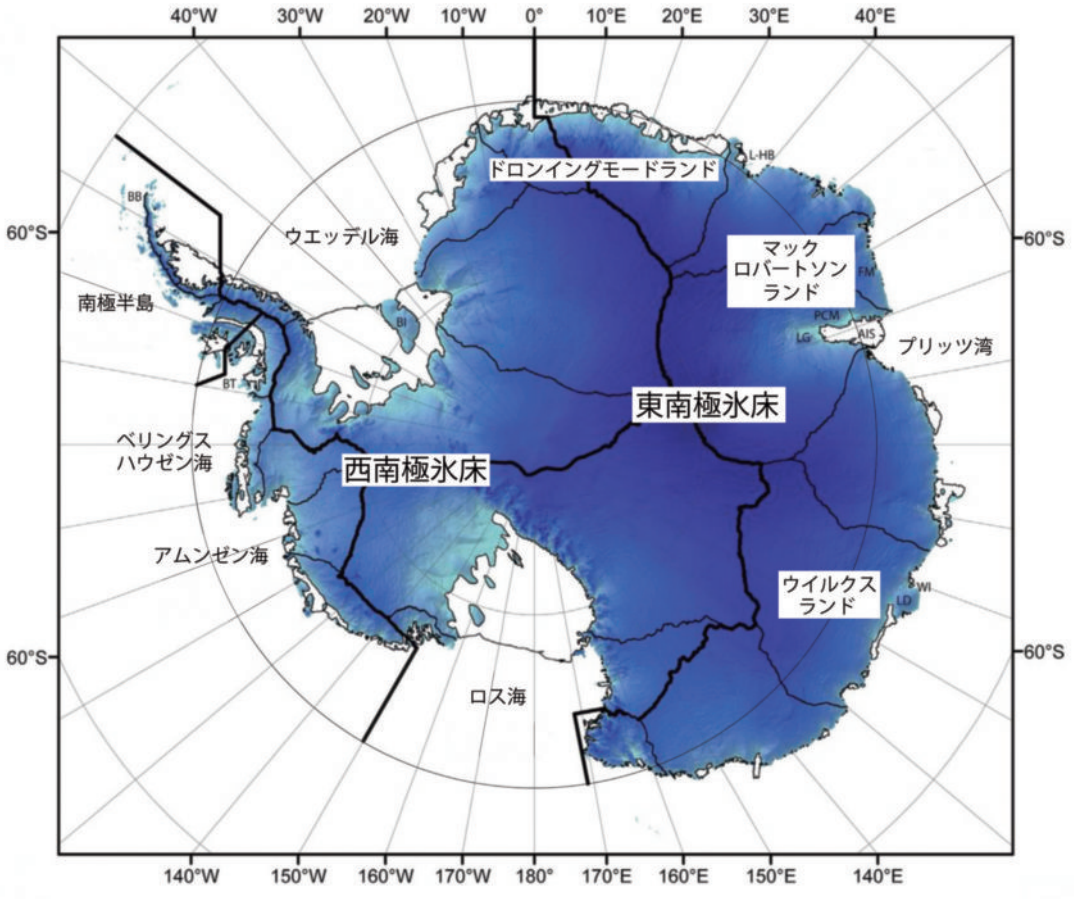

図 4：南極大陸の分氷界と地名索引図.
青い陰影は氷床高度，白色部分は棚氷を示す．L-HB：リュツォ・ホルム湾，FM：フラムネス山地，PCM：プリンスチャールズ山地，AIS：アメリー棚氷，WI：ウインドミル島，LD：ロウドーム，BT：ベルジカトラフ，BB：ブランスフィールド海盆，BI：ベルクナー島．The RAISED Consortium et al. (2014) の Fig. 1 を加筆修正．分氷界は，Zwally et al. (2012) に基づく．

ら解放されて露出していた時間を算出できる．横山ほか（2005）や若狭ほか（2008）を参照］から，最終氷期最盛期でも東南極氷床の氷厚は，エルスワース山脈における 230–480 m の上昇（図 5a に白丸で地点を示す）を除いて，ほとんど増加していなかったと考えられている（Fogwill et al., 2004; Bentley et al., 2010; Hein et al., 2011; Hodgson et al., 2012）．一方で，大陸棚の地形地質データからみると，概ね大陸棚外縁付近まで氷床が拡大していたと解釈されている（Hillenbrand et al., 2012, 2014; Stolldorf et al., 2012）．ただし，東南極氷床と西南極氷床が合流したことを示す海底の地形地質学的証拠は，まだ知られていない．

詳細に見ると，図 5a に示すように，最終氷期最盛期のウェッデル海周辺における氷床の空間的拡大範囲に関しては，データの解釈の違いによって，大陸棚末端付近まで拡大した「シナリオ A」（陸上の氷厚データと氷床モデルを組み合わせた解釈：Bentley et al., 2010; Le Brocq et al., 2011; Whitehouse et al., 2012）と，それより拡大範囲（大陸棚に着底した氷の面積）が小さかったとする「シナリオ B」（地形地質データに基づく解釈：Hillenbrand et al., 2012）という異なる 2 つの考え方が示されている．Hillenbrand et al. (2014) は，両者のシナリオと Hillenbrand et al. (2012) や Kristoffersen et al. (2000), Larter et al. (2012) の海底地形地質データを詳細に検討し，薄く勾配が緩やかで，わずかに海底に接地するような氷床が大陸棚外縁まで広がる状況を想定すれば，すべてのデータを矛盾なく説明できると提案している．

(b)　1.5 万年前：

図 5b に示すように，ウェッデル海の西部では，「シナリオ A」の見方では，大陸棚中央部まで後退したと考えるが，「シナリオ B」の見方では，氷床縁は大陸棚末端からわずかに南側に後退したと考えている（Hillenbrand et al., 2014）．

(c)　1 万年前：

図 5c に示すように，「シナリオ A」の見方では，ウェッデル海南西部のアイスライズ付近およびウェッデル海南

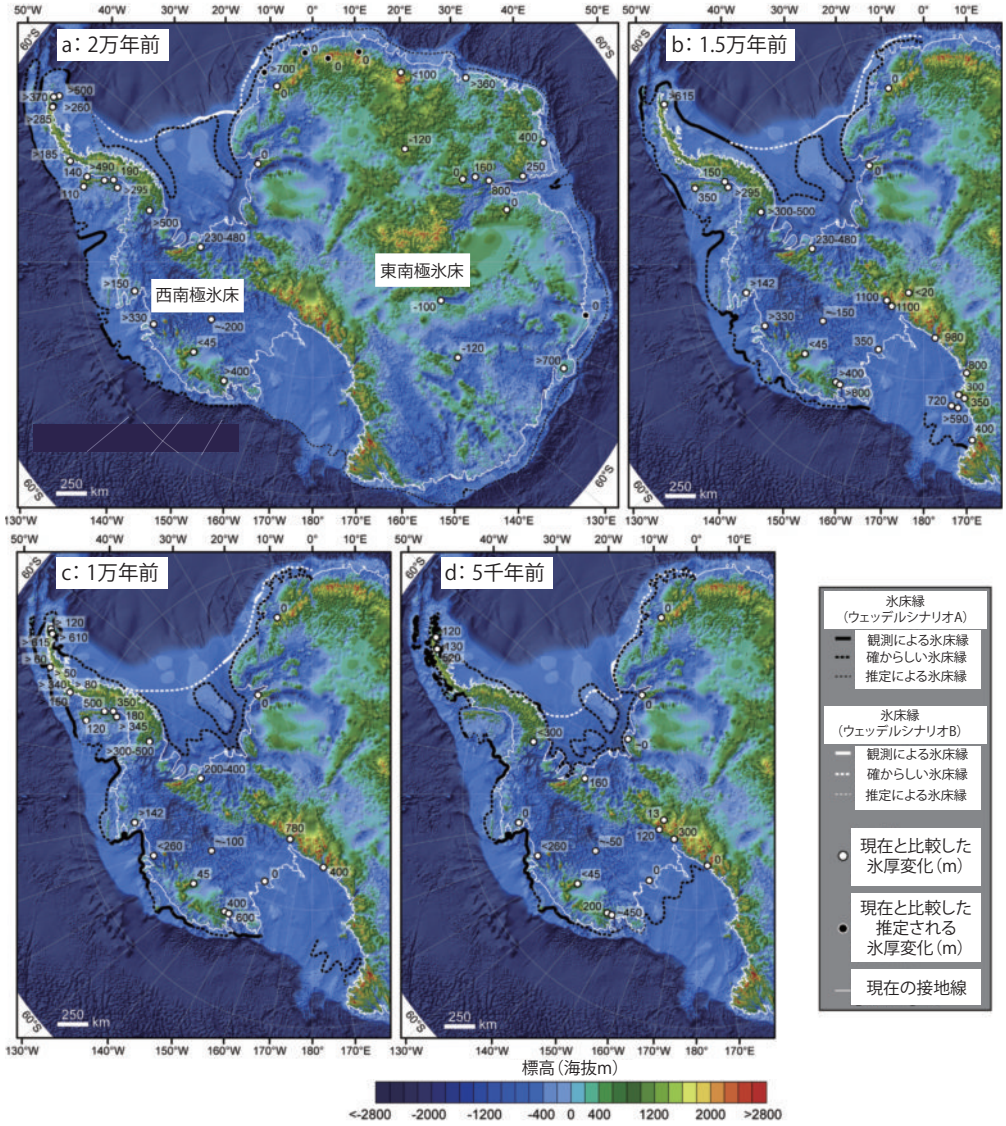

図 5：最終氷期最盛期以降の各時代（2 万年前，1.5 万年前，1 万年前，5 千年前）の南極氷床の復元図.
各図には，接地線の位置，現在の氷床高度と比較した氷厚変化（単位はメートル），復元される氷床高度（ロス海のみ）が示されており，接地線の位置の不確実さは線の種類で区分されている．基盤地形は，BEDMAP2 (Fretwell et al., 2013) を使用．The RAISED Consortium et al. (2014) の Fig. 2 を加筆修正.

東部の現在の氷床縁に近い位置まで後退，「シナリオ B」の見方では，バークナー島北端まで後退したと考えている（Hillenbrand et al., 2014）.

(d)　5 千年前：

図 5d に示すように，「シナリオ A」では，現在の氷床縁に近い位置まで後退したと考えるが，「シナリオ B」では，現在の氷床縁から，まだかなり離れた沖合に氷床縁が位置していたとしている（Hillenbrand et al., 2014）.

3.2.2　南極半島・ベリングスハウゼン・アムンゼン海周辺地域

これらの地域は西南極氷床の主要な流出地域となっており，近年，大規模な棚氷の流出が生じている（Rignot et al., 2013）.

(a)　最終氷期最盛期（2 万年前）：

南極半島周辺地域は陸上と海底の研究が最も進んでいる地域であり，多くの研究に基づいて，図 5a に示すように，氷床縁は大陸棚外縁まで達し，着底していたと復元されている（Ó Cofaigh et al., 2014）．また，海底下の氷河地形と堆積物の特徴から，大陸棚の内側から中央部を横切るような過去の氷床の流れが生じ，大陸棚が交差するように分断された海底地形が形成された（Ó Cofaigh et al., 2014）.

ベリングスハウゼン海のベルジカトラフでは，接地線

が大陸側に深く湾入しており，最終氷期最盛期には既に氷床が大陸棚外縁を離れていた（Larter et al., 2012）．

アムンゼン海の地形学的特徴や大陸棚から得られた放射性炭素年代のデータは，最終氷期最盛期の接地線が大陸棚外縁にかなり近い位置まで移動していたことを示しており，氷床が拡大していたことがわかる．しかし，その後の氷床の後退を示す接地線の移動に関するデータはほとんど得られていない．一方で，大陸棚外縁に近い場所から採取された海底堆積物コアからは，最終氷期最盛期の年代を示す有孔虫化石が見つかっている．この事実から，氷床の後退が2万年前より先に始まっていたか，あるいは，この時期に接地線の位置が大陸棚外側付近で変動していて，部分的に氷床から解放されていたことが示唆される（Larter et al., 2014）．

(b)　1.5万年前：

図5bに示すように，最終氷期最盛期以降の初期の氷床後退は，南極半島東部では1.8万年前，ブランスフィールド海盆では1.75万年前までに始まっていたようである．しかし，半島の西側に沿った南部付近では，大陸棚外縁部からの氷床縁の後退は他の場所よりもゆっくり進行していた（Ó Cofaigh et al., 2014）．

ベリングスハウゼン海のベルジカトラフでは，この時期も大陸側に湾入した形で氷床の後退が継続していた（Larter et al., 2012）．

アムンゼン海東部では，大陸棚の外側のトラフに接地線の湾入が進行した可能性があるが，アムンゼン海西部では，狭い大陸棚のほとんどの場所で1.5万年前までに後退していた（Larter et al., 2014）．

(c)　1万年前：

図5cに示すように，南極半島の西縁と東縁に沿って，1.5万年～1万年前の間に明らかな氷床の後退が生じ，完新世中期までには現在の氷床縁近くまで氷床が後退した．半島の東側では，1万年前までに，ほぼ現在と同じ位置まで氷床縁が後退した（Ó Cofaigh et al., 2014）．

アムンゼン海では，1.3万年前の後に急速な氷床の後退が生じた．そのため，それまでアムンゼン海まで張り出していた氷床縁は，1万年前までに現在の氷縁に近づいた（Larter et al., 2014）．

3.2.3　ロス海周辺地域

ロス海はウェッデル海と同様に，西南極氷床と東南極氷床の両方の氷床が流れ込む場所に位置する．現在の東南極氷床と西南極氷床の流域面積は，それぞれ約165万平方キロメートル，約75万平方キロメートルと見積もられ，全体の質量収支はプラスとなっている（Rignot et al., 2008）．この地域に発達する棚氷（現在はロス棚氷と呼ばれる）も，南極底層水の形成（本巻の大島を参照）に深く関係する．

(a)　最終氷期最盛期（2万年前）：

図5aに示すように，多くの海底地形地質のデータから，最終氷期最盛期のロス海は大陸棚の末端付近まで着底していた（Anderson et al., 2014）．ロス海の海底地形地質の特徴と海底の氷河堆積物を構成する砕屑物の岩質の解析から，最終氷期最盛期にロス海に着底した氷床の半分以上は東南極から流れてきたと考えられている（Licht et al., 2005）．Anderson et al. (2014) は，ロス海東部において，氷底下にできる特徴的な地形が大陸棚の末端付近まで広がることから，西南極氷床も，過去に大陸棚を広く覆う規模まで拡大していたと推定した．海底堆積物中の酸不溶性有機物の放射性炭素年代は，氷床が最終氷期より前に後退していたことを示している（Licht et al., 1996）．しかし，その拡大時期が最終氷期最盛期であるかどうかは，海底堆積物に古い炭素の影響があるため，まだ確定できていない．この氷床がロス海に拡大した時代を決定するために，古い炭素の影響を除いた特定有機化合物を用いた海底堆積物の放射性炭素年代の研究が進められている（例えば，Ohkouchi and Eglinton, 2008）．

陸上の地形地質および表面照射年代データからは，西南極流域の上流部のヌナタク（氷河地域に見られる地形の一種で，氷河・氷床上に突き出た岩峰や岩稜のこと）や東南極氷床流域の溢流氷河に沿った内陸部（最上流）の地域では，ほとんど氷厚は増加していなかった（Bockheim et al., 1989; Denton et al., 1989a, b; Ackert et al., 1999; Bromley et al., 2010, 2012; Todd et al., 2010）．一方，図5bに示すように，南極横断山脈の中央部や南部の溢流氷河の河口部では，最終氷期最盛期から1.5万年前までの氷厚は，東南極氷床が現在よりも1000 m程度厚く（Bromley et al, 2010, 2012; Todd et al., 2010），西南極氷床でもロス海東部の山地では，現在よりも800 m以上厚くなっていたことが知られている（Stone et al., 2003）．

(b)　1.5万年前：

図5bに示すように，最終氷期最盛期の氷床縁の位置に比べて，わずかに後退したと考えられる（Anderson et al., 2014）．

(c)　1万年前：

ロス海西部の沿岸においては，東南極氷床の主要な後退が1.3万年前より後に生じ，さらに完新世の間に急激に進行した（Cunningham et al., 1999; Anderson et al.,

2014）．ロス海東部沿岸でも 1 万年前に西南極氷床の後退が開始して完新世にかけて進行した（Stone et al., 2003）．陸上の氷床後退が東西でほぼ同時に生じたのに対して，大陸棚からの氷床の後退はこれより少し早かった（Conway et al., 1999; Anderson et al., 2014）．ただし，図 5c に示すように，大陸棚の東部については，氷床縁の位置ははっきりしていない．

（d） 5 千年前：

氷床の後退は進行したが，図 5d に示すように，氷床縁は現在の位置よりもまだかなり離れた海側に存在していた（Conway et al., 1999）．なお，Yokoyama et al. (2016) は，大気中で生成して海底に沈降した ^{10}Be が濃集した時代に基づいて，5 千年前にロス海の棚氷が崩壊していた位置（接地線ではない）を報告している．

3.2.4 東南極地域（ロス海とウエッデル海を除く）

東南極氷床は，地球上で最大の氷床であり，その氷厚は，ほとんどの地域で 2 km を越えており，中心部では最大 4.8 km 以上ある．氷床下の基盤地形の高度は，ウィルクスランドでは海面下であるが，その他の多くの地域は海面上に位置する（Fretwell et al., 2013）．

（a） 最終氷期最盛期（2 万年前）：

東南極では，最終氷期最盛期の氷床拡大に関する系統的な研究はまだ十分に行われておらず，直接 2 万年前の年代を示す証拠はほとんど得られていない．しかし，Mackintosh et al. (2011) は，図 5a に示すように，マックロバートソンランドの氷床が最終氷期最盛期には大陸棚の末端付近まで近づいていたことを海底堆積物の解析から示している．これとは対照的に，プリッツ湾では，ランバート氷河とそれに続くアメリー棚氷は，大陸棚の内側を越えて拡大することはなかった．陸上では，プリンスチャールズ山地とフラムネス山地のヌナタクで得られた表面照射年代のデータから，現在の海岸や接地線付近で氷床が数百メートルも厚くなっていたことが示されている（Mackintosh et al., 2007）．

ドロンイングモードランドのセール・ロンダーネ山地では，ヌナタクから表面照射年代が得られており，最終氷期最盛期には氷床の厚さはほとんど増加していなかったと考えられている（Moriwaki et al., 1992; Suganuma et al., 2014）．

リュツォ・ホルム湾やプリッツ湾周辺の沿岸の露岩には，最終氷期より前の MIS 3 やそれより古い時代の堆積物が保存されている．このことから，これら一部の地域は最終氷期最盛期にも氷床に覆われていなかったと解釈されている（図 6；Miura et al., 1998; Hodgson et al., 2009）．

（b） 1.5 万年前：

東南極で，1.5 万年前より前に氷床が大きく後退した明確な証拠がある場所は，プリンスチャールズ山地のローウェ山地北側の 1 箇所しか知られていない（White et al., 2010）．その他の場所では，大きな変動が認められる地域はなく，東南極氷床は大陸棚上に留まっていたと考えられている（Mackintosh et al., 2014）．しかし，陸上の表面照射年代から，マックロバートソンランドでは，現在の海岸線に沿って氷床が薄くなっていたことが示されており（Mackintosh et al., 2007），大陸棚縁辺部まで東南極氷床が広がっていたのかはわかっていない（Mackintosh et al., 2014）．

（c） 1 万年前：

海底堆積物や陸上の化石の放射性炭素年代や氷河地形の表面照射年代データから，ロウドーム近傍のウインドミル島，プリッツ湾，マックロバートソンランドの大陸棚やリュツォ・ホルム湾では，1 万年前までに氷床後退が始まったと考えられる（Domack et al., 1991, 1998; Goodwin, 1993, 1996; Miura et al., 1998）．東南極氷床の薄化や面的な後退は，その後も継続していたと考えられている（Mackintosh et al., 2014）．

（d） 5 千年前：

マックロバートソンランドのフラムネス山地やリュツォ・ホルム湾から見つかった迷子石（氷河・氷床によって運搬され，氷河が溶け去った後に取り残された礫のこと）の表面照射年代は，1 万年前から 5 千年前の間に氷床がかなり薄くなって，この時期に現在の氷床の形状に近づいたことを示している（図 6；Miura et al., 2002; Mackintosh et al., 2007; Yamane et al., 2011）．

4. まとめと今後の課題：特に野外地形地質調査と GIA による最終氷期最盛期の南極氷床モデルとの関係

4.1 最終氷期最盛期における氷床縁の位置について：海底の大陸棚地形・堆積物探査の必要性

最終氷期最盛期以降の時代に限っても，南極大陸や周辺の海底から得られた地形地質のデータはまだ極めて乏しい状態であり，特に，広大な面積を占めていながら観測基地が少ない東南極地域ではそれが顕著である．これまで最終氷期最盛期における南極氷床縁の大部分は大陸棚外縁付近に位置していたと推定されてきたが，そのほとんどが図 5a 中に破線で示されているように，まだ明確になっているとは言えない．現在進められている南極氷床の GIA モデルも，基本的に CLIMAP モデル

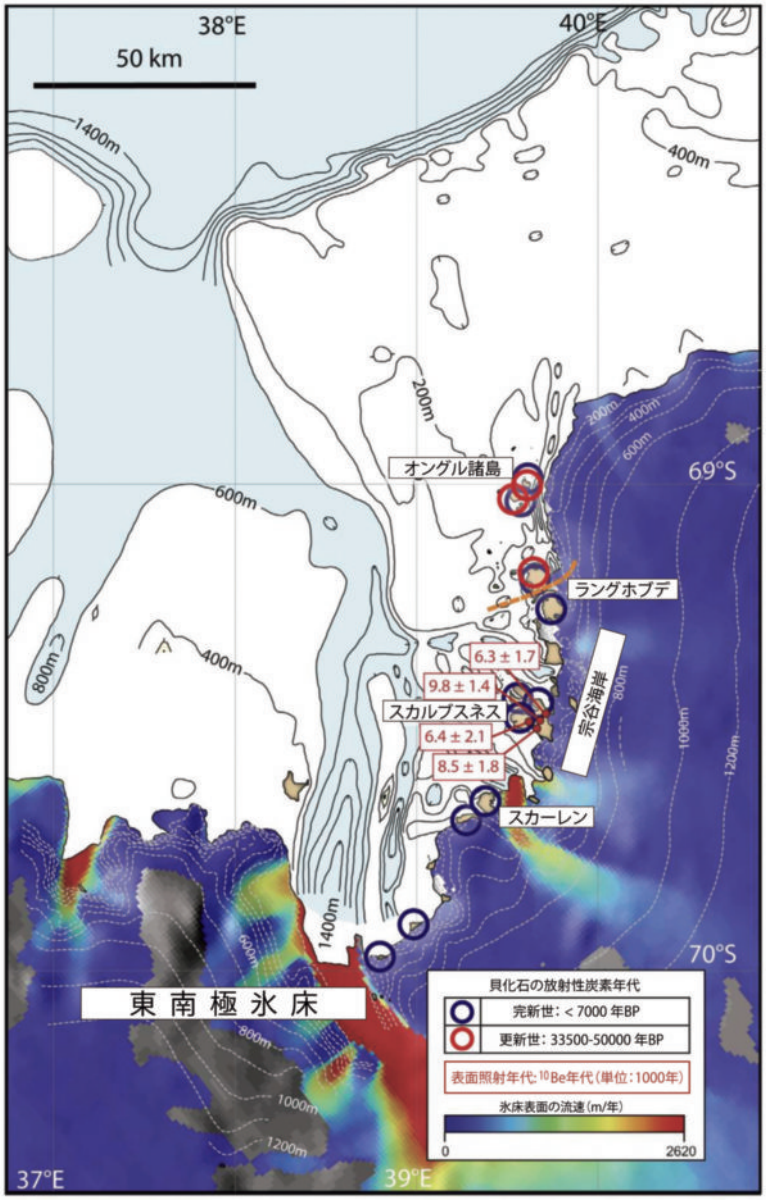

図 6：日本の主要な観測地域であるドロンイングモードランドのリュツォ・ホルム湾周辺の露岩の分布，氷床表面と海底の地形および氷床変動に関する年代の総括図．
宗谷海岸のラングホブデ北部とオングル諸島からは，最終氷期最盛期より古い時代を示す貝化石が発見されていることから，最終氷期最盛期には，大陸棚を含めてラングホブデ北部以北の地域（オレンジ色の破線より北）は氷床に覆われていなかったと考えられる．三浦原図の Mackintosh et al. (2014) の図を加筆修正．氷床表面の流速は Rignot et al. (2011) から引用．

（Denton and Hughes, 1981）が示した図と同様に，最終氷期最盛期の氷床縁辺部が大陸棚末端付近に位置していた（Anderson et al., 2002）と仮定して計算しなければならない状況である（例えば，Ivins et al., 2013; Okuno and Miura, 2013; Whitehouse et al., 2012；本巻の奥野を参照）．しかし，最終氷期最盛期の氷床分布範囲が異なっていた場合，GIA による氷床体積の計算結果も大きく違ったものになる．

最終氷期最盛期の南極氷床縁辺が大陸棚末端付近まで拡大していたとする推定は，Hollin (1962) によって示された考えである．彼は，ロス海に面したマクマード・ドライバレーにおける研究結果から，最終氷期の北半球氷床拡大に伴う海面低下の結果，南極大陸縁辺で陸化した場所が広がることで，南極氷床縁が大陸棚末端付近まで前進し，この氷床縁の前進に伴って内陸部の氷厚も増加したと考えた．CLIMAP モデル（Denton and Hughes, 1981）では，この Hollin (1962) の考えを採用して，最終氷期最盛期の南極氷床の末端位置が大陸棚外縁まで拡大

したと想定し，実証的なデータが存在しない東南極地域を含めた氷床分布図を作成した．しかし，南極大陸の大陸棚は他の大陸に比べて水深が深いため，100 m ほどの海面低下によって陸化する面積は他の大陸に比べて大きくない．

ウィルクスランドを除いたほとんどが海水準より高い位置に存在する東南極氷床は，海面変化の影響を強く受けて変動してきた西南極氷床とは異なり，独自（北半球氷床の変動とは異なる形）の変動をしていた可能性がある．南極大陸周辺の地域ごとに氷床縁の後退のタイミングやプロセスが違っていることや，東南極の沿岸露岩から最終氷期最盛期より古い時代の堆積物が報告されていること（Miura et al., 1998; Hodgson et al., 2009）は，その可能性を示唆するデータである．広大な東南極氷床の過去の挙動の解明は，地球システムのメカニズムを考える上でも極めて重要な課題である．このような点から，南極大陸周辺海底の大陸棚の地形探査と堆積物採取を進めることで，正確な最終氷期最盛期とそれ以降の南極氷床縁の位置決定が必要である．

4.2 内陸の氷床高度変化について：南極内陸山地の隆起史の解明

南極内陸山地の氷床高度変化は，図 3 に示したように，これまで単純に過去の地形と現在の氷床表面の高度差によって決定されてきたが，基盤となる山地の隆起については深く言及されてこなかった．しかし，非活動的な大陸縁辺に位置する南極大陸の山地であっても，まったく隆起していないわけではない．むしろ，山地の侵食や氷床荷重の変化によって，南極の山地も隆起していると考えるべきであり（例えば，Iwata, 1990; Fitzgerald and Stump, 1997），隆起史や隆起量を定量的に考慮しなければ，過去の氷床高度を過剰に見積もってしまう可能性がある．南極大陸内陸部の氷床高度をより正確に復元するためには，フィッショントラック年代を利用した山地の上昇量や大陸棚の海底堆積物の堆積速度（Jamieson et al., 2005; Emmel et al., 2008），氷河や風化による岩盤の侵食速度（Summerfield et al., 1999; Herman et al., 2015; Koppes et al., 2015），人工衛星の重力データ（Ivins and James, 2005）などを総合的に組み合わせて，定量的な南極の山地隆起史を明らかにする必要がある．

なお，氷河地形が示す高度は，あくまで過去の氷床底面の高度であって，氷床表面高度を示すものではないことに注意しなければならない．したがって，海水準変動を示す海岸の旧汀線地形とは異なり，氷河地形に基づく過去の氷床底面高度を用いて内陸山地に GIA を適用することには注意が必要であることを強調しておきたい．

4.3 最終氷期の陸上岩盤の侵食除去による GIA モデルへの影響：最終氷期以降の岩盤の侵食量の解明

現在の GIA による氷床モデルは，基本的に氷床荷重の変化を中心に計算しているが，この計算には，陸上の岩盤の侵食と砕屑物が海底へ運搬された結果生じる質量分配の変化については考慮されていない．しかし，昭和基地周辺の露岩を歩いてみると，現実に氷河の融解水によって形成された最終氷期以降の岩盤の侵食地形が広く認められる（例えば，Sawagaki and Hirakawa, 1997 など）．もし，最終氷期以降の沿岸部における氷床の侵食力が大きく，短時間で大量の岩盤が侵食を受けていた場合，沿岸部での荷重変化が生じることになり，GIA の計算にも影響を与える可能性がある（氷床変化量の過剰な見積もり）．陸上で観察される最終氷期の氷河地形と海底探査による海底堆積物の堆積量を詳細に調査し，最終氷期以降の氷床後退期に岩盤がどの程度侵食されたのかを定量的に見積もることで，GIA の氷床モデルへの影響も検討すべきである．

謝辞

北海道大学の大島慶一郎教授，京都大学の福田洋一教授には，本稿の執筆の機会を与えていただき，有益な御意見をいただいた．名古屋大学の須藤斎准教授には編集作業の労を執り，原稿改善への有益な御意見をいただいた．北海道大学低温科学研究所の北川暁子さんには編集作業で大変お世話になった．皆さまに深く感謝いたします．

参考文献

Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M. E. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi and H. Blatter (2013) Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume. *Nature*, **500**, 190–193.

Ackert, R. P., D. J. Barclay, H. W. Borns, P. E. Calkin, M. D. Kurz, J. L. Fastook and E. J. Steig (1999) Measurements of past ice sheet elevations in interior Weat Antarctica. *Science*, **286**, 276–280.

Anderson, J. B. (1999) *Antarctic Marine Geology*. Cambridge University Press, Cambridge.

Anderson, J. B., S. S. Shipp, A. L. Lowe, J. S. Wellner and A. B. Mosola (2002) The Antarctic Ice Sheet during the Last Glacial Maximum and its subsequent retreat history: a review. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 49–70.

Anderson, J. B., H. Conway, P. J. Bart, A. E. Witus, S. L. Greenwood, R. M. McKay, B. L. Hall, R. P. Ackert, K. Licht, M. Jakobsson and J. O. Stone (2014) Ross Sea paleo-ice sheet drainage and deglacial history during and since the LGM. *Quaternary Science Reviews*, **100**, 31–54.

Batchelor, C. L. and J. A. Dowdeswell (2015) Ice-sheet grounding-zone wedges (GZWs) on high-latitude continental margins. *Marine Geology*, **363**, 65–92.

Ben, D. and D. J. A. Evans (2014) *Glacier and Glaciation, 2nd edition*. Hodder Arnord Publication, London.

Bennett, M. M. and N. F. Glasser (2009) *Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms, 2nd edition*. Wiley, Chichester.

Bentley, M. J. (1999) Volume of Antarctic Ice at the Last Glacial Maximum and its impact on global sea level change. *Quaternary Science Reviews*, **18**, 1569–1595.

Bentley, M. J. (2010) The Antarctic palaeo record and its role in improving predictions of future Antarctic Ice Sheet change. *Journal of Quaternary Science*, **25**, 5–18.

Bentley, M. J., C. J. Fogwill, A. M. Le Brocq, A. L. Hubbard, D. E. Sugden, T. J. Dunai and S. P. H. T. Freeman (2010) Deglacial history of the West Antarctic Ice Sheet in the Weddell Sea embayment: constraints on past ice volume change. *Geology*, **38**, 411–414.

Bockheim, J. G., S. C. Wilson, G. H. Denton, B. Anderson and M. Stuiver (1989) Late Quaternary ice-surface fluctuations of Hatherton Glacier, Transantarctic Mountains. *Quaternary Research*, **31**, 229–254.

Bromley, G. R. M., B. L. Hall, J. O. Stone, H. Conway and C. E. Todd (2010) Late Cenozoic deposits at Reedy Glacier, Transantarctic Mountains: implications for former thickness of the West Antarctic Ice Sheet. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 384–398.

Bromley, G. R. M., B. L. Hall, J. O. Stone and H. Conway (2012) Late Pleistocene evolution of Scott Glacier, southern Transantarctic Mountains: implications for the Antarctic contribution to deglacial sea level. *Quaternary Science Reviews,* **50**, 1–13.

Clark, P. U., A. S. Dyke, J. D. Shakun, A. E. Carlson, J. Clark, B. Wohlfarth, J. X. Mitrovica, S. W. Hostetler and A. M. McCabe (2009) The Last Glacial Maximum. *Science*, **325**, 710–714.

Conway, H., B. L. Hall, G. H. Denton, A. M. Gades and E. D. Waddington (1999) Past and future grounding-line retreat of the West Antarctic ice sheet. *Science*, **286**, 280–283.

Cunningham, W. L., A. Leventer, J. T. Andrews, A. E. Jennings and K. J. Licht (1999) Late Pleistocene-Holocene marine conditions in the Ross Sea, Antarctica: evidence from the diatom record. *The Holocene*, **9**, 129–139.

Denton, G. H. and T. J. Hughes (1981) *The Last Great Ice Sheets*. Wiley-Interscience, New York.

Denton, G. H., J. G. Bockheim and S. C. Wilson (1989a) Late Wisconsin and Early Holocene glacial history, inner Ross Embayment, Antarctica. *Quaternary Research*, **31**, 151–182.

Denton, G. H., J. G. Bockheim, S. C. Wilson and J. E. Leide (1989b) Late Quaternary ice-surface fluctuations of Beardmore Glacier, Transantarctic Mountains. *Quaternary Research*, **31**, 183–209.

Denton, G. H., M. L. Prentice and L. H. Burckle (1991) Cainozoic history of the Antarctic ice sheet. In: Tingey, R. J. (ed.) *Geology of Antarctica*, 365–433. Oxford University Press, Oxford.

Denton, G. H. and T. J. Hughes (2002) Reconstructing the Antarctic Ice Sheet at the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 193–202.

Domack, E. W., A. J. T. Jull and S. Nakao (1991) Advance of East Antarctic outlet glaciers during the Hypsithermal: implications for the volume state of the Antarctic ice sheet under global warming. *Geology*, **19**, 1059–1062.

Domack, E., P. O'Brien, P. Harris, F. Taylor, P. G. Quilty, L. D. Santis and B. Raker (1998) Late Quaternary sediment facies in Prydz Bay, East Antarctica and their relationship to glacial advance onto the continental shelf. *Antarctic Science*, **10**, 236–246.

Emmel, B., J. Jacobs, P. Crowhurst, A. Austegard and U. Schwarz-Schampera (2008) Apatite single-grain (U-Th)/He data from Heimefrontfjella, East Antarctica: indications for differential exhumation related to glacial loading? *Tectonics*, **27**, doi:10.1029/2007TC002220.

Fitzgerald, P. and E. Stump (1997) Cretaceous and Cenozoic episodic denudation of the Transantarctic Mountains, Antarctica: new constraints from apatite fission track thermochronology in the Scott Glacier region. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 7747–7765.

Fogwill, C. J., M. J. Bentley, D. E. Sugden, A. R. Kerr and P. W. Kubik (2004) Cosmogenic nuclides ^{10}Be and ^{26}Al imply limited Antarctic Ice Sheet thickening and low erosion in the Shackleton Range for $>$ 1 m.y. *Geology*, **32**, 265–268.

Fretwell, P., H. D. et al. (2013) Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, **7**, 375–393.

Froelich, P. N. et al. (1991) Biogenic opal and carbonate accumulation rates in the subantarctic South Atlantic: the Late Neogene of Meteor Rise Site 704. In: Ciesielski, P. F. et al. (eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **114**, 515–550. Ocean Drilling Program, College Station, TX.

藤井理行，上田豊，成瀬廉二，小野有五，伏見碩二，白岩孝行（1997）基礎雪氷学講座 IV 氷河．古今書院，東京．

Golledge, N. R., C. J. Fogwill, A. N. Mackintosh and K. M. Buckley (2012) Dynamics of the last glacial maximum Antarctic ice-sheet and its response to ocean forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109**, 6052–6056.

Goodwin, I. D. (1993) Holocene deglaciation, sea-level change, and the emergence of the Windmill Islands, Budd Coast,

Antarctica. *Quaternary Research*, **40**, 70–80.
Goodwin, I. D. (1996) A mid to late Holocene readvance of the Law Dome ice margin, Budd Coast, East Antarctica. *Antarctic Science*, **8**, 395–406.
Hein, A. S., C. J. Fogwill, D. E. Sugden and S. Xu (2011) Glacial/interglacial ice-stream stability in the Weddell Sea embayment, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, **307**, 211–221.
Herman, F., O. Beyssac, M. Brughelli, S. N. Lane, S. Leprince, T. Adatte, J. Y. Y. Lin, J.-P. Avouac and S. C. Cox (2015) Erosion by an Alpine glacier. *Science*, **350**, 193–195.
Hillenbrand, C.-D., M. Melles, G. Kuhn and R. D. Larter (2012) Marine geological constraints for the grounding-line position of the Antarctic Ice Sheet on the southern Weddell Sea shelf at the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, **32**, 25–47.
Hillenbrand, C.-D. et al. (2014) Reconstruction of changes in the Weddell Sea sector of the Antarctic Ice Sheet since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, **100**, 111–136.
Hollin, J. T. (1962) On the glacial history of Antarctica. *Journal of Glaciology*, **4**, 173–195.
Hodgson, D. A., E. Verleyen, W. Vyverman, K. Sabbe, M. J. Leng, M. D. Pickering and B. J. Keely (2009) A geological constraint on relative sea level in Marine Isotope Stage 3 in the Larsemann Hills, Lambert Glacier region, East Antarctica (31 366–33 228 cal yr BP). *Quaternary Science Reviews*, **28**, 2689–2696.
Hodgson, D. A., M. J. Bentley, C. Schnabel, A. Cziferszky, P. Fretwell, P. Convey and S. Xu (2012) Glacial geomorphology and cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al exposure ages in the northern Dufek Massif, Weddell Sea embayment, Antarctica. *Antarctic Science*, **24**, 377–394.
インブリー，J., K. P. インブリー（1982）氷河時代の謎をとく（小泉格　訳）．岩波書店，東京．
IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
Ivins, E. R. and T. S. James (2005) Antarctic glacial isostatic adjustment: a new assessment. *Antarctic Science*, **17**, 541–553.
Ivins, E. R., T. S. James, J. Wahr, E. J. O. Schrama, F. W. Landerer and K. M. Simon (2013) Antarctic contribution to sea level rise observed by GRACE with improved GIA correction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, 3126–3141.
Iwata, S. (1990) Uplift of the Sør-Rondane Mountains, East Antarctica. *Proceedings NIPR Symposium Antarctic Geoscience*, **6**, 116–125.
岩田修二（2011）氷河地形学．東京大学出版会，東京．
Jamieson, S. S. R., N. R. J. Hulton, D. E. Sugden, A. J. Payne and J. Taylor (2005) Cenozoic landscape evolution of the Lambert basin, East Antarctica: the relative role of rivers and ice sheets. *Global and Planetary Change*, **4**, 35–49.
Joughin, I., J. L. Bamber, T. Scambos, S. Tulaczyk, M. Fahnestock and D. R. MacAyeal (2006) Integrating satellite observations with modelling: basal shear stress of the Filcher-Ronne ice streams, Antarctica. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (Series A)*, **364**, 1795–1814.
貝塚爽平（1978）変動する第四紀の地球表面．変動する地球――現在および第四紀――（笠原慶一，杉村新　編），183–242，岩波書店，東京．
Kawamura, K., F. Parrenin, L. Lisiecki, R. Uemura, F. Vimeux, J. P. Severinghaus, M. A. Hutterli, T. Nakazawa, S. Aoki, J. Jouzel, M. E. Raymo, K. Matsumoto, H. Nakata, H. Motoyama, S. Fujita, K. Goto-Azuma, Y. Fujii and O. Watanabe (2007) Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. *Nature*, **448**, 912–917.
小林国夫，阪口豊（1982）氷河時代．岩波書店，東京．
Koppes, M., B. Hallet, E. Rignot, J. Mouginot, J. S. Wellner and K. Boldt (2015) Observed latitudinal variations in erosion as a function of glacier dynamics. *Nature*, **526**, 100–103.
Kristoffersen, Y., B. Winterhalterb and A. Solheimc (2000) Shelf progradation on a glaciated continental margin, Queen Maud Land, Antarctica. *Marine Geology*, **165**, 109–122.
Lambeck, K. and J. Chappell (2001) Sea level change through the Last Glacial Cycle. *Science*, **292**, 679–686.
Larter, R. D., A. G. C. Graham, C.-D. Hillenbrand, J. A. Smith and J. A. Gales (2012) Late Quaternary grounded ice extent in the Filchner Trough, Weddell Sea, Antarctica: new marine geophysical evidence. *Quaternary Science Reviews*, **53**, 111–122.
Larter, R. D. et al. (2014) Reconstruction of changes in the Amundsen Sea and Bellingshausen Sea sector of the West Antarctic Ice Sheet since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, **100**, 55–86.
Le Brocq, A. M., M. J. Bentley, A. Hubbard, C. J. Fogwill, D. E. Sugden and P. L. Whitehouse (2011) Reconstructing the Last Glacial Maximum ice sheet in the Weddell Sea embayment, Antarctica, using numerical modelling constrained by field evidence. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 2422–2432.
Licht, K. J., A. E. Jennings, J. T. Andrews and K. M. Williams (1996) Chronology of late Wisconsin ice retreat from the western Ross Sea, Antarctica. *Geology*, **24**, 223–226.
Licht, K. J., J. R. Lederer and R. J. Swope (2005) Provenance of LGM glacial till (sand fraction) across the Ross embayment, Antarctica. *Quaternary Science Reviews*, **24**, 1499–1520.
Lisiecki, L. E. and M. E. Raymo (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ^{18}O records. *Paleoceanography*, **20**, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.

Livingstone, S. J., C. Ó Cofaigh, C. R. Stokes, C.-D. Hillenbrand, A. Vieli and S. S. R. Jamieson (2012) Antarctic palaeo-ice streams. *Earth-Science Reviews*, **111**, 90–128.

Loutre, M. F. and A. Berger (2003) Marine Isotope Stage 11 as an analogue for the present interglacial. *Global and Planetary Change*, **36**, 209–217.

Mackintosh, A. N., D. White, D. Fink, D. B. Gore, J. Pickard and P. C. Fanning (2007) Exposure ages from mountain dipsticks in Mac. Robertson Land, East Antarctica, indicate little change in ice-sheet thickness since the Last Glacial Maximum. *Geology*, **35**, 551–554.

Mackintosh, A. N., N. Golledge, E. Domack, R. Dunbar, A. Leventer, D. White, D. Pollard, R. DeConto, D. Fink, D. Zwartz, D. Gore and C. Lavoie (2011) Retreat of the East Antarctic ice sheet during the last glacial termination. *Nature Geoscience*, **4**, 195–202.

Mackintosh, A. N. et al. (2014) Retreat history of the East Antarctic Ice Sheet since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, **100**, 10–30.

三浦英樹（2003）地球システムに果たす南極の役割は何か？極地研ニュース，**168**，2–3.

三浦英樹（2017a）第四紀の氷床変動と将来の地球環境変動の予測．環境年表第 5 冊（平成 29・30 年度）（国立天文台編）：57–59，丸善，東京.

三浦英樹（2017b）グリーンランド氷床と南極氷床の最近の変化と海面水位への影響．環境年表第 5 冊（平成 29・30 年度）（国立天文台編）：55–56，丸善，東京.

Miura, H., H. Maemoku and K. Moriwaki (2002) Holocene raised beach stratigraphy and sea-level history at Kizahashi Beach, Skarvsnes, Lützow-Holm Bay, Antarctica. *Royal Society of New Zealand Bulletin*, **35**, 391–396.

Miura, H., H. Maemoku, A. Igarashi and K. Moriwaki (1998) Distribution of the raised beach deposits and marine fossils with radiocarbon dates around the Lützow-Holm Bay region, east Antarctica. *Special Map Series of National Institute of Polar Research*, **6** (with explanatory text, 46 p.), National Institute of Polar Research.

Moriwaki, K., K. Hirakawa, M. Hayashi and S. Iwata (1992) Late Cenozoic glacial history in the Sør-Rondane Mountains, East Antarctica. In: Yoshida, Y., K. Kaminuma and K. Shiraishi (eds.) *Recent Progress in Antarctic Earth Science*, 661–668. TERRAPUB, Tokyo.

成瀬洋（1982）第四紀．岩波書店，東京.

North Greenland Ice Core Project members (2004) High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, **431**, 147–151.

Ó Cofaigh, C. et al. (2014) Reconstruction of ice-sheet changes in the Antarctic Peninsula since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, **100**, 87–110.

大河内直彦（2008）チェンジング・ブルー　気候変動の謎に迫る．岩波書店，東京.

Ohkouchi, N. and T. I. Eglinton (2008) Compound-specific radiocarbon dating of Ross Sea sediments: a prospect for constructing chronologies in high-latitude oceanic sediments. *Quaternary Geochronology*, **3**, 235–243.

Okuno, J. and H. Miura (2013) Last deglacial relative sea level variations in Antarctica derived from glacial isostatic adjustment modelling. *Geoscience Frontiers*, **4**, 623–632.

Pattyn, F. et al. (2012) Results of the Marine Ice Sheet Model Intercomparison Project, MISMIP. *The Cryosphere*, **6**, 573–588.

Pollard, D. and R. M. DeConto (2009) Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. *Nature*, **458**, 329–32.

Rignot, E., J. L. Bamber, M. R. van den Broeke, C. Davis, Y. Li, W. J. van de Berg and E. van Meijgaard (2008) Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nature Geoscience*, **1**, 106–110.

Rignot, E., J. Mouginot and B. Scheuchl (2011) Ice flow of the Antarctic ice sheet. *Science*, **333**, 1427–1430.

Rignot, E., S. Jacobs, J. Mouginot and B. Scheuchl (2013) Ice-shelf melting around Antarctica. *Science*, **341**, 266–270.

Sawagaki, T. and K. Hirakawa (1997) Erosion of bedrock by subglacial meltwater, Soya Coast, east Antarctica. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, **79**, 223–238.

Stolldorf, T., H.-W. Schenke and J. B. Anderson (2012) LGM ice sheet extent in the Weddell Sea: evidence for diachronous behavior of Antarctic Ice Sheets. *Quaternary Science Reviews*, **48**, 20–31.

Stone, J. O., G. A. Balco, D. E. Sugden, M. W. Caffee, L. C. Sass, S. G. Cowdery, C. Siddoway (2003) Holocene deglaciation of Marie Byrd Land, West Antarctica. *Science*, **299**, 99–102.

Suganuma, Y., H. Miura, A. Zondervan and J. Okuno (2014) East Antarctic deglaciation and the link to global cooling during the Quaternary: evidence from glacial geomorphology and ^{10}Be surface exposure dating of the Sør Rondane Mountains, Dronning Maud Land. *Quaternary Science Reviews*, **97**, 102–120.

Summerfield, M. E., D. E. Sugden, G. H. Denton, D. R. Marchant, H. A. P. Cockburn and M. F. Stuart (1999) Cosmogenic isotope data support previous evidence of extremely low rates of denudation in the Dry Valleys region, southern Victoria Land, Antarctica. In: Smith, B. J., W. B. Whalley and P.A. Warke (eds.) *Uplift, Erosion and Stability: Perspectives on Long-term Landscape Evolution. Geological Society, London, Special Publication*, **162**, 255–267. Geological Society Publishing House, London.

杉村新（1978）大地の動きをさぐる．岩波書店，東京.

Taylor, G. (1922) *The Physiography of McMurdo Sound and Granite Harbour Region. British Antarctic (Terra Nova) Expedition, 1910–13*. Harrison and Sons, London.

The RAISED Consortium et al. (2014) A community-based geological reconstruction of Antarctic Ice Sheet deglaciation since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, **100**, 1–9.

Todd, C., J. Stone, H. Conway, B. Hall and G. Bromley (2010) Late Quaternary evolution of Reedy Glacier, Antarctica. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 1328–1341.

若狭幸，松崎浩之，松倉公憲（2008）原位置宇宙線生成核種測定法：侵食地形変化速度の解明への適用．地形，**25**，247–265.

White, D. A., D. Fink and D. B. Gore (2010) Cosmogenic nuclide evidence for enhanced sensitivity of an East Antarctic ice stream to change during the last deglaciation. *Geology*, **39**, 23–26.

Whitehouse, P. L., M. J. Bentley and A. M. Le Brocq (2012) A deglacial model for Antarctica: geological constraints and glaciological modelling as a basis for a new model of Antarctic glacial isostatic adjustment. *Quaternary Science Reviews*, **32**, 1–24.

Wright, A. P., D. A. White, D. B. Gore and M. J. Siegert (2008) Antarctica at the Last Glacial Maximum, deglaciation and the Holocene. In: Florindo, F. and M. J. Siegert (eds.) *Antarctic Climate Evolution. Elsevier Developments in Earth and Environmental Sciences*, **39**, 531–570. Elsevier, Amsterdam.

Wright, C. S. and R. E. Priestley (1922) *British (Terra Nova) Antarctic Expedition, Glaciology*. Harrison and Sons, London.

Yamane, M., Y. Yokoyama, H. Miura, H. Maemoku, S. Iwasaki and H. Matsuzaki (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., J. B. Anderson, M. Yamane, L. M. Simkins, Y. Miyairi, T. Yamazaki, M. Koizumi, H. Suga, K. Kusahara, L. Prothro, H. Hasumi, J. R. Southon and N. Ohkouchi (2016) Widespread collapse of the Ross Ice Shelf during the late Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113**, 2354–2359.

Zachos, J., M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas and K. Billups (2001) Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, **292**, 686–693.

Zwally, H. J., M. B. Giovinetto, M. A. Beckley and J. L. Saba (2012) Antarctic and Greenland Drainage Systems. GSFC Cryospheric Sciences Laboratory. http://icesat4.gsfc.nasa.gov/cryo_data/ant_grn_drainage_systems.php.