HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	最終氷期以降の南極・グリーンランドの氷床変動とグローバルな海面変化
Author(s)	三浦, 英樹
Description	平成25年度北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会『氷河変動の地域性に関する地理的検討』. 2013年6月17日-18日. 北海道大学低温科学研究所, 札幌市.
Relation	朝日克彦編, 平成25年度北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会『氷河変動の地域性に関する地理的検討』報告書. 北海道大学低温科学研究所, 2014, iii, 46p.
Citation	平成25年度北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会『氷河変動の地域性に関する地理的検討』報告書, 38-44
Issue Date	2014-05
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56261
Type	conference paper
File Information	38.miura.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

最終氷期以降の南極・グリーンランドの氷床変動とグローバルな海面変化

Antarctic and Greenland ice-sheet histories and global sea-level changes since the Last Glacial Maximum

三浦英樹（国立極地研究所）

Hideki MIURA (National Institute of Polar Research)

キーワード：最終氷期、南極氷床、グリーンランド氷床、相対的海水準変動、グレシオハイドロアイソスタシー、GIA モデル

Keywords: Last Glaciation, Antarctic Ice Sheet, Greenland Ice Sheet, Relative sea-level variations, Glacial-hydro isostasy, Glacial isostatic adjustment model

1. はじめに

現存する氷床である南極氷床とグリーンランド氷床が変動した場合、海面変化や海洋熱塩循環など地球環境に重大な影響を与えることが予想される。将来の南極氷床とグリーンランド氷床が、どのような条件でどのように融解し、それが地球環境や人類社会にどのような影響を与えるのかを検討するうえで、過去の2つの時代の氷床状態の復元は重要な基礎的情報を与える。ひとつは温暖化時代のアナロジーとなる「最終間氷期」、もうひとつが「最終氷期最盛期以降」である。

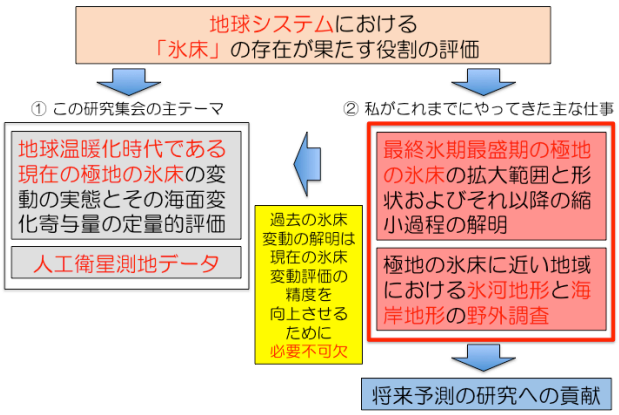

図 1　全体の枠組みと目指していること

本報告では、まず、現在の南極氷床とグリーンランド氷床が形成される気候条件と氷床の概況を示した上で、(1) 人工衛星測地データに基づく、地球温暖化時代である現在の極地の氷床変動の実態とその海面変化寄与量の定量的評価に関する最近の研究成果と問題点の紹介、(2) 野外地形地質調査に基づく、最終氷期最盛期の極地の氷床の拡大範囲と形状およびそれ以降の縮小過程の研究の概要と問題点の紹介、を行う。そのうえで、過去の氷床変動の研究が、どのように現在の氷床変動評価や将来の氷床変動と海面変化の予測に貢献するのかについて、その概略を説明する（図 1）。

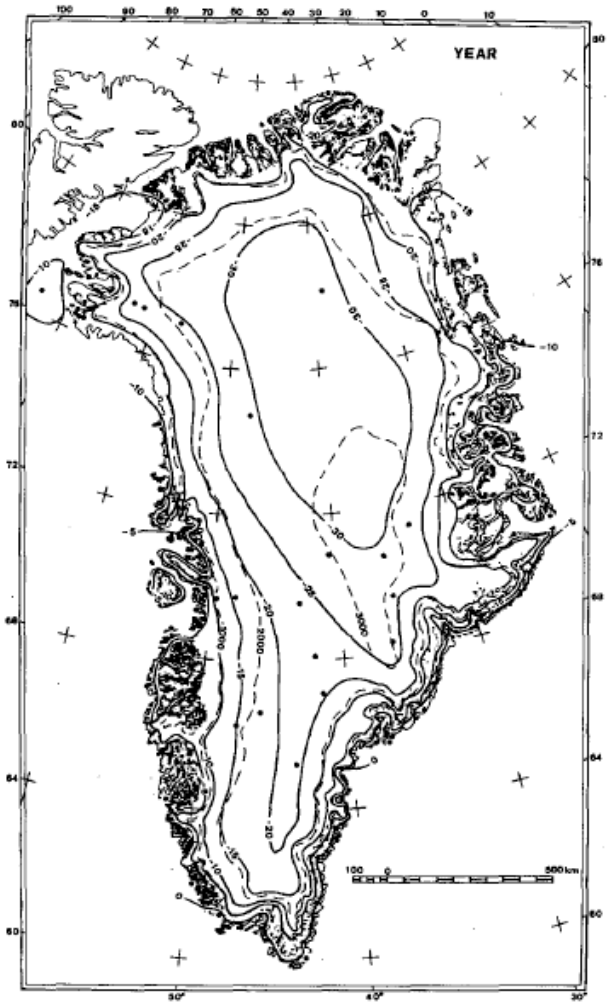

図 2　現在のグリーンランド氷床の表面年平均気温（℃）の観測値の等値線の分布図（Ohmura, 1987）

2. 現在の極地氷床の概要とその形成環境

(1) グリーンランド氷床

グリーンランド氷床は、北半球最大の氷床であり、その面積は1,710,000㎢、推定体積は295,000㎥、平均氷床層厚は2,135m、氷床最大層厚は3000mを超えると推定されている（Thomas et al., 2001; Bamber et al., 2001）。氷期から引き続き、現在もこの地域に氷床が存在する主要な理由は、北大西洋を北東方向に横断する風系や南岸を南西方向に流れる海流が大量の水分をグリーンランドに供給することができるためである。

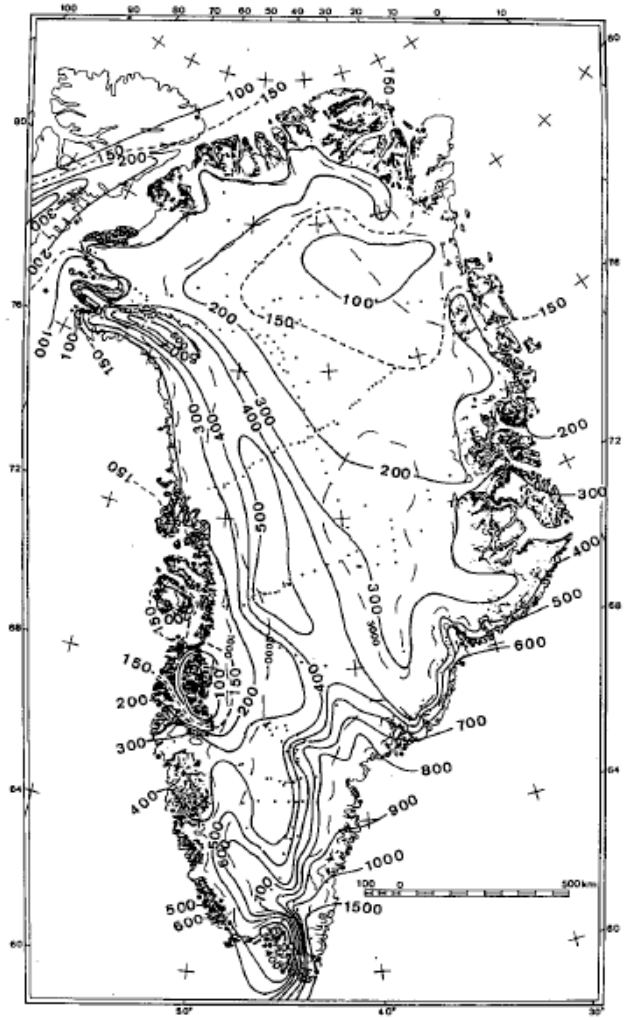

図 3　現在のグリーンランド氷床の年間平均涵養量（mm/年）の観測値の等値線の分布図（Ohmura and Reeh, 1991）

グリーンランド氷床の表面年平均気温の観測地は、−10〜−30℃であり、氷床内陸部の標高の高い地域で最も低温で、海岸に向かって標高が低くなるにつれて気温も上昇する（図 2）。年間平均涵養量は、緯度が高くなるにつれて減少し、南東部に最大値が存在し、そこから Melville Bay 方向の西部海岸方向に沿って涵養量の大きい帯状の部分が伸び、北東グリーンランド地域に最小値が存在する（図 3）。

グリーンランド氷床は、2つの分離したドーム状の高まりから構成されており（図 4）、全氷床量の15%を占める南部のドームは、標高500mの基盤岩上に存在するため気候的に非常に敏感に応答する。一方、北部のドームのほとんどは、現在の海水準以下の高度で着底しており、気候的にも比較的安定している。グリーンランドの氷床変動は、気候変化だけでなく、氷流としての氷床の主要な排出部となるフィヨルドや大陸棚上の海底谷の規模などの地形的要因にも支配される（例えば、北西部の Melville Bugt (Bay) の沿岸部から続く深く幅広い海底谷や、北東部の浅く複雑な大陸棚の地形など）。

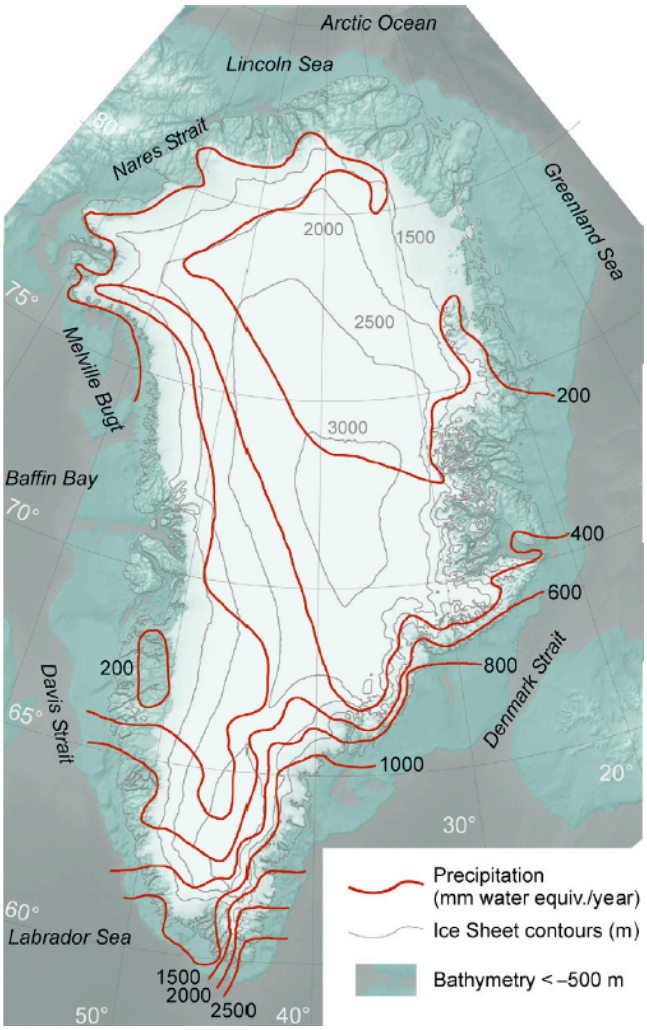

図 4　現在のグリーンランド氷床の標高と大陸棚の海底地形（Funder et al., 2011）

(2) 南極氷床

南極氷床は、地球上最大の氷床であり、大陸としては世界で最も高い平均表面高度を持つ。最近公表された基盤地形データに基づいた南極氷床に関する諸データを表 1に示す。

表 1 2つの氷床基盤地形データ（Bedmap1 と Bedmap2）に基づく南極氷床の面積、体積、平均氷床層厚等の諸データ（Fretwell et al., 2013）、Bedmap2が最新のデータである

	Bedmap1	Bedmap2
Area including ice shelves (10^6 km^2)	13.987	13.924
Area excluding ice shelves (10^6 km^2)	12.351	12.295
Volume including ice shelves (10^6 km^3)	26.07	26.92
Volume excluding ice shelves (10^6 km^3)	25.34	26.54
Mean thickness including ice shelves (m)	1859	1937
Mean thickness excluding ice shelves (m)	2034	2126
Thickest ice Astrolabe Subglacial Basin (m)	4897	4897
Mean bed depth (m)	155.2	82.8
Deepest bed point was Bentley Subglacial Trough (m), now Byrd Glacier	−2496	−2870
Area below sea level (10^6 km^2)	5.01	5.50
% of total grounded area	40.6	44.7
Potential sea-level equivalent	57 m	58 m

南極氷床の表面年平均気温の観測地は、−10～−60℃であり、氷床内陸部の標高の高い地域で最も低温で、海岸に向かって標高が低くなるにつれて気温も上昇する。最低気温は極点よりもやや東南極側に存在する（図 5）。年間平均涵養量の最大値は、東南極の中央部に低い領域が広がり、南極半島上で高い領域が存在する（図 6）。

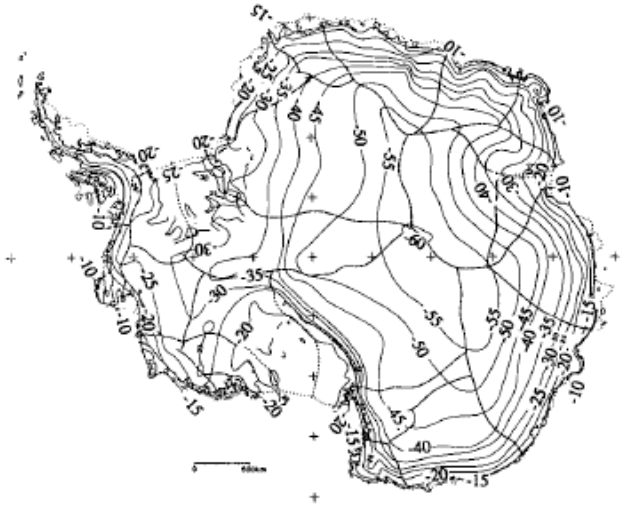

図 5 現在の南極氷床の表面年平均気温（℃）の観測値の等値線の分布図（Giovinetto et al., 1990）

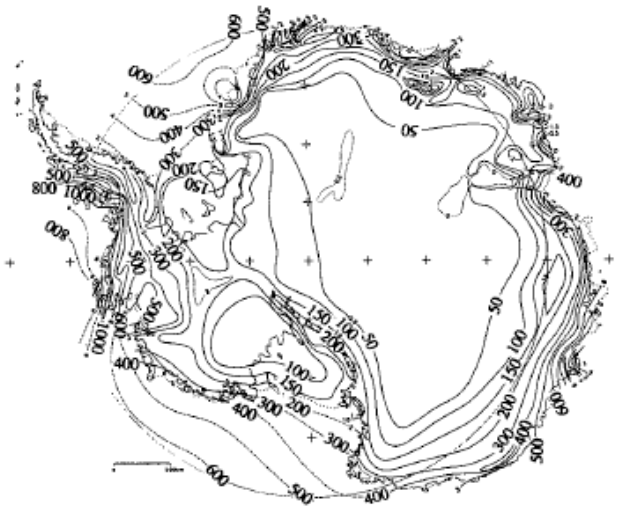

図 6 現在の南極氷床の年間平均涵養量（mm/年）の観測値の等値線の分布図（Giovinetto et al., 1990）

南極氷床は、南極横断山脈を境に、東部（およそ西経30°から東経165°の間の東側の範囲）の東南極氷床と西部（同、西側の範囲）の西南極氷床に区分され、それぞれ独立した挙動を示す（図 7）。ただし、南極半島部は、通常、西南極氷床には含めない（Bindschadler, 2007）。

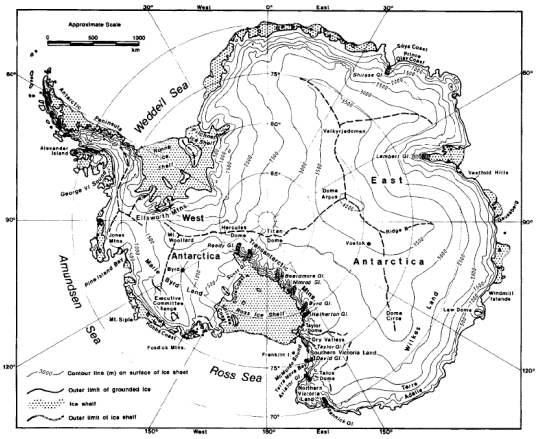

図 7 現在の南極氷床の標高と氷床の区分（Denton et al., 1991）

東南極氷床は、Wilekes Land 付近のような巨大な氷底下の盆地を除けば、ほとんどの地域がガンブルツェフ山脈などのような山地を含む大陸地殻の上に存在している。氷床の最高点は、東南極の中央部に近いドームA（Dome Argus）付近で、標高4000mを超えている。

西南極氷床は世界で最大の２つの棚氷である、ロス棚氷とロンネ棚氷を含んでおり、ほとんどが現在の海水準下で着底している「海洋氷床」である。この氷床は、南極横断山地と沿岸山地の間の平均数km以上の深度の深い盆地を埋めている。薄い海洋地殻は、大きな地殻熱流量を氷床底にもたらすため、氷床底は多くの地域で融点に近い状態になっているため、氷床は柔らかく容易に変形しやすくなっている。

(3) グリーンランド氷床と南極氷床の質量収支

一般に質量収支は標高が高くなるとともに増大するが、一方で低温の大気中の水分含量の低下によって増大の程度は小さくなる（図 8）。気候が温暖化すると、質量収支の場が全体に上方にシフトするので、グリーンランド氷床では全体の質量収支は減少し、（東）南極氷床では、増大する。

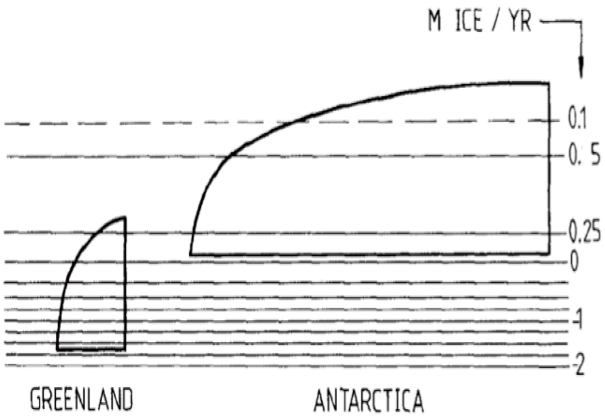

図 8　グリーンランド氷床と南極氷床の質量収支の状態を標高に投影した概念図（Oerleman and van der Veen, 1989）

なお、現在のグリーンランドの平衡線は、海面より高い高度（約1,400～1,600m）に位置する（Tedesco et al., 2013）が、南極氷床の平衡線は海面高度に存在する。そのため、現在の南極氷床の場合は主要な消耗のプロセスはカービングによる氷山の流出が中心になる（Sugden and John, 1976）。

3. 最近の氷床変動：人工衛星測地データの成果と問題点

氷床は、広大な面積と複雑な消耗プロセスをもつため、限られた地域の現地観測だけでは、全体の質量収支を把握することは難しかった。この問題点を解決するために、1990年代以降、人工衛星測地データによるグリーンランド氷床と南極氷床の質量収支観測が行われてきた。人工衛星測地データによる氷床質量収支の観測方法には主として次の3つの方法がある（三浦、2011）。

（1）質量収支法：衛星からのマイクロ波計測を用いて、氷床コアに認められる年層を複数の地点で対比することで涵養量を推定し、一方、地震探査やアイスレーダーで知られる氷厚と衛星からのInSAR（Interferometric Synthetic Aperture Rader）とGPSのデータから得られる氷の流速を用いて消耗量を推定することで、両者の差から質量収支を計算する方法

（2）氷床表面高度の繰り返し測定法：基盤高度と雪氷の深さ方向の密度分布がわかれば、表面高度の時間変化は質量収支を示すため、航空機や衛星に搭載した高度計（SRALT : Satellite radar altimetry）のデータを用いて、繰り返し、氷床表面高度を計測することで質量収支を計算する方法

（3）重力変化にもとづく直接質量変化測定法 : 2002 年に打ち上げられたGRACE（Gravity Recovery and Climate Experiment）の衛星重力データを用いることで、氷床全体の質量の変動を直接明らかにする方法

しかし、得られた結果には、観測データや解析ごとに大きな相違が存在していた（Lemke et al., 2007）。その原因としては、例えば、InSARとGPSを用いた質量収支法による解析では、氷の表面の流動速度と深部での流動速度が必ずしも一致しないため、一般に表面の流速で見積もった消耗量の値は過剰評価になっている可能性がある。また、衛星搭載高度計（SRALT）を用いた氷床表面高度の繰り返し測定法による解析では、氷の質量を見積もるための、深度方向のフィルンの密度の正確な見積もりの困難さが、正確な涵養量と消耗量の算出の障害となっている。GRACEのデータに関しては、最終氷期最盛期に拡大した氷床の縮小によって生じるポストグレーシャルリバウンドのために、表面質量の変動と地球内部の質量の変動を分離できないことが問題になる。

Shepherd et al.（2012）は、これらの問題を解決するために、3種の人工衛星測地データによる質量収支の結果について、共通の時間と空間と補正法法を用いて比較することで再評価を行った。その結果、1992～2011年の期間の質量収支は、グリーンランド氷床が−142±49 Gt/年、東南極氷床が＋14±43 Gt/年、西南極氷床が−65±26 Gt/年、南極半島が−20±14 Gt/年となり、極地氷床全体としてのグローバルな海面上昇率は、0.59±0.20 mm/年の値が得られた。

しかし、GPSを用いた氷床表面高度の測定と衛星重力による直接質量変化の測定は、最終氷期最盛期とそれ以降の氷床の分布範囲とその形状・体積（質量）が正確に復元されない限り、氷床

そのものの変化と地殻変動の分離を行えないないため、人工衛星測地データの正確な評価はできない。

4. 最終氷期最盛期以降の氷床変動史の復元と問題点

最終氷期最盛期とそれ以降の氷床変動史の復元手法には大きく分けて2つの方法がある。ひとつは、① 氷河学的方法であり、もうひとつは、② GIA（Glacial Isostatic Adjustment）による方法である。

いずれの場合も、まず、最終氷期最盛期以降の氷床縁位置の分布と変化の復元図が必要になる。グリーンランド氷床も南極氷床も、最終氷期最盛期には氷床縁の末端位置は、大陸棚上に存在した。そのため、海洋観測船（砕氷船ないし耐氷船）による海底地形地質調査（氷河地形の認定）と海底堆積物コアの採取（堆積物の年代測定による氷床の拡大縮小に時間軸を入れる）が必要になる。最終氷期最盛期以降のグリーンランドの氷床縁の位置については、南部は陸上と海底の大陸棚上の地形地質調査によってほぼ明らかにされているが、北部については大陸棚地形から推定されているのみでまだ十分に明らかにされていない（例えば、Funder et al., 2011）。南極氷床の場合は、ロス海や一部の地域を除き、まだ多くの地域で、大陸棚上の氷河地形地質と年代測定は進んでいない。

次に、最終氷期最盛期の氷床高度の分布とその変化の復元図を作成する必要がある。① 氷河学的方法では、氷床縁の位置を確定した上で、当時の気候状態から推定される涵養量、消耗量、氷床流動速度などを与えて計算によって、定常状態になった状態の氷床を復元する。この方法による最も代表的な氷床復元の例は、CLIMAPモデル（Denton and Hughes, 1981）である。この方法によって得られた、最終氷期最盛期のグリーンランド氷床の復元図には、大陸棚末端まで拡大した最大モデルと、末端まで拡大していなかった最小モデルがある。CLIMAPによる、最終氷期最盛期の南極氷床モデルは、ひとつしかなく、最終氷期最盛期には大陸棚末端まで拡大したことが前提になっている。一方、② GIA（Glacial Isostatic Adjustment）による方法では、完新世の最高位旧汀線高度・海面変化曲線と地球（マントル）の粘弾性モデルを用いて、過去に地殻の上に載っていた氷床の質量変化（体積）を推定する方法である（図9：三浦、2012）。グリーンランド氷床のGIA法による最終氷期最盛期の氷床復元には、Tushingham and Peltier (1991) のICE-3Gモデル、Okuno and Nakada (1999) のARC4モデル、Fleming and Lambeck（2004）のモデルなどがある。しかし、これらの復元図では、いずれも東部と西部と北部の3地域に特異的に融解量の大きな地域が存在している。このような特異な融解量の原因は、1970年代以降に蓄積された完新世旧汀線高度を示すデータ（例えば、Henriksen, 2008）に基づいている。しかし、これらのデータの中には、貝化石の採取高度と年代値だけが示されているものが含まれており、離水地形、地層、化石の産状などの再検討が必要な研究も多い。これらのデータの精査によっては、最終氷期最盛期のグリーンランド氷床の復元図は大きく変更が迫られる可能性がある。南極氷床のGIA法による最終氷期最盛期の氷床復元には、Nakada et al. (2000) のANT5、ANT6、Ivins and James（2005）のIJ05モデルなどがある（Okuno and Miura, 2012）。これらのモデルは、いずれも最終氷期最盛期には南極氷床は大陸棚末端まで拡大していたとするCLIMAPモデルの考えを継承しているが、東南極の一部では、これとは異なる地形地質学的証拠も得られている（例えば、Miura et al., 1998; Mackintosh et al., 2013）。また、南極大陸の海岸では信頼度の高い完新世最高位旧汀線高度と完新世海面変化曲線のデータは、著しく限られている。今後の南極大陸棚の氷河地形地質とその編年、隆起海浜地形地質の広域の精査に基づく完新世海面変化データの増加によっては、最終氷期最盛期の南極氷床の復元も大きく異なったものになる可能性が残されている。

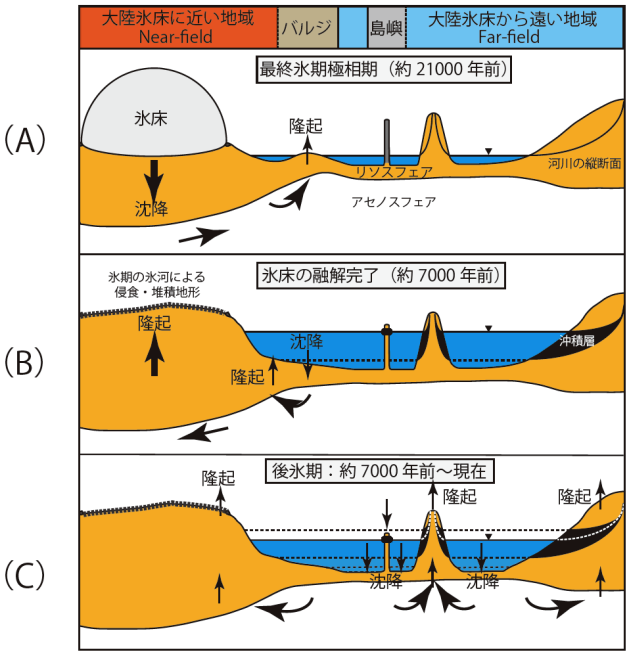

図9　氷床変動にともなうグレイシオハイドロアイソスタシーと地形変化の模式図（三浦、2012）：(A) 最終氷期極相期には, 大陸氷床に近い地域（Near-field）では氷床によって侵食・堆積作用が生じるとともに, 氷床

荷重によるアセノスフェアの移動が生じ, 大陸氷床中央部では沈降, その周辺部ではバルジが生じる。(B) 北半球氷床がほぼ融解した後, 大陸氷床に近い地域 (Near-field) では, アセノスフェアの再移動が生じて, 氷床域での隆起, 周辺部での沈降が生じる。(C) その後, 増加した海水の荷重で大洋底下のアセノスフェアが移動して, 大洋底が沈降する. 流動したアセノスフェアは, 大陸の縁辺の下に移動してそれらを隆起させる。これらの効果のため、氷床の存在した地域では完新世の高海面とそのごの相対的海面低下が生じる。相対的海面変化と氷床下のアセノスフェアの粘弾性モデルを組み合わせることで、最終氷期最盛期とそれ以降の氷床荷重変化の歴史を復元することができる。

上記の、① 氷河学的方法でも、② GIAによる方法のいずれの場合も、地形学的な方法でしか得られないデータが多い。それらをまとめると以下の3つにまとめられる。

① 地域ごとに個々の氷床の存在範囲と縮小過程の推定（陸上および海底の氷河地形地質調査）

② 地域ごとに個々の氷床の層厚変化の推定（海岸地形地質に基づく完新世海面変化曲線とGIAモデル）

③ 地域ごとに個々の氷床底環境の状態（融解していたか凍結していたか）の変化の推定（氷河地形地質）

5. まとめ

まとめとして、図 1で示した内容を、以下に示す。

(1) 人工衛星測地データを正しく評価し、現在のグリーンランド氷床と南極氷床の正確な質量収支と海面変化への寄与量を明らかにするためには、最終氷期最盛期とそれ以降の極地氷床の変動史の復元が必要である。

(2) 将来のグリーンランド氷床と南極氷床の融解の過程を推定するためには、大気海洋大循環モデル（AOGCM）の精度を向上させる必要がある。このためには、現在とは異なる環境状態（例えば、最終氷期最盛期）における気温や大気組成、氷床の拡大規模・体積、海面高度などのデータセットをモデルに組み込んでゆく必要がある。過去の気温や大気組成は氷床コアのデータから得られるが、氷床の拡大規模・体積や海面高度はローカルな地形学的な方法でしか得ることができないデータであることを強調したい。

引用文献

Bamber J. L., Layberry, R.L., Gogineni, S.P. 2001. A new ice thickness and bed data set for the Greenland ice sheet: 1. Measurement, data reduction, and errors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 33773-33780.

Bindschadler, R. 2007. Dynamics of the West Antarctic Ice Sheet. In "*Encyclopedia of Quaternary Science*" ed. Elias, S.A., 1296-1305., Elsevier, Amsterdam, The Netherand.

Denton, G.H. and Hughes, T.J. eds. 1981. "*The Last Great Ice Sheets*." John Wiley & Sons, New York, USA.

Denton, G.H. Denton, G.H., Prentice, M.L., Burckle, L.H., 1991. Cainozoic history of the Antarctic ice sheet. In "Geology of Antarctica" ed. Tingey, R.J., 364-433., Oxford University Press, New York.

Fleming, K. and Lambeck, K. 2004. Constraints on the Greenland Ice Sheet since the Last Glacial Maximum from sea-level observations and glacial-rebound models. *Quaternary Science Reviews*, 23, 1053–1077.

Fretwell, P., Pritchard, H. D., Vaughan, D. G., Bamber, J. L., Barrand, N. E., Bell, R., Bianchi, C., Bingham, R. G., Blankenship, D.D., Casassa, G., Catania, G., Callens, D., Conway, H., Cook, A. J., Corr, H. F. J., Damaske, D., Damm, V., Ferraccioli, F., Forsberg, R., Fujita, S., Gim, Y., Gogineni, P., Griggs, J. A., Hindmarsh, R.C.A., Holmlund, P., Holt, J.W., Jacobel, R. W., Jenkins, A., Jokat, W., Jordan, T., King, E.C., Kohler, J., Krabill, W., Riger-Kusk, M., Langley, K.A., Leitchenkov, G., Leuschen, C., Luyendyk, B. P., Matsuoka, K., Mouginot, J., Nitsche, F.O., Nogi, Y., Nost, O.A., Popov, S.V., Rignot, E. , Rippin, D.M., Rivera, A., Roberts, J., Ross, N., Siegert, M.J., Smith, A.M., Steinhage, D., Studinger, M., Sun, B., Tinto, B.K., Welch, B. C., Wilson, D., Young, D.A. , Xiangbin, C. Zirizzotti, A. 2013. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, 7, 375–393.

Funder, S., Kjeldsen, K.K., Kjaer, K. H. and Cofaigh, C, O. 2011. The Greenland Ice Sheet during the past 300,000 years: A review. In "*Quaternary Glaciations-extent and chronology A Closer Look*" eds. Ehlers, J., Gibbard, P.L., Hughes, P.D., 699-713. Elsevier.

Giovinetto M., Waters, N.M. Bentley, C.R. 1990. Dependence of Antarctic surface mass balance on temperature, elevation and distance to open ocean. *Journal of Geophysical Research*. 95, 3517–3531.

Lemke, P., Ren, J. , Alley, R. B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H., Zhang, T. 2007. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In "*Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*" eds. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L., 337-383, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

Mackintosh, A,M., 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., Masse, G. 2013. Retreat history of the East Antarctic Ice Sheet since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, in press.

Miura, H., Maemoku, H., Igarashi, A., Moriwaki, K. 1998. Late Quaternary raised beach deposits and radiocarbon dates of marine fossils around Lutzow-Holm Bay, *National Institute of Polar Research Special Map Series*, No 6,, Tokyo (with explanatory text p. 46).

三浦英樹 2011. 氷床質量収支に関する研究の現状と課題−衛星データによるグリーンランド氷床と南極氷床の最近の変動−. 環境技術、40, 27-33.

三浦英樹 2012. 人類が経験した地球環境：文明成立の背景と人類の未来. 地理科学, 67、97-108.

Nakada, M., Kimura, R., Okuno, J., Moriwaki, K., Miura, H., Maemoku, H., 2000. Late Pleistocene and Holocene melting history of the Antarctic ice sheet derived from sea-level variations. *Marine Geology,* 167, 85-103.

Oerleman, J. and van der Veen, C.J. 1984. "*Ice Sheets and Climate*" D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.

Ohmura, A. 1987. New temperature distribution maps for Greenland. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*. 23,1-45.

Ohmura, A. and Reeh, N. 1991. New precipitation and accumulation maps for Greenland. *Journal of Glaciology*, 37, 140-148.

Okuno, J. and Nakada, M. 1999. Total volume and temporal variation of meltwater from last glacial maximum inferred from sea-level observations at Barbados and Tahiti. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 146, 283-293.

Okuno, J. and Miura, H. 2012. Last deglacial relative sea level variations in Antarctica derived from glacial isostatic adjustment modeling. *Geoscience Frontiers*. Geoscience Frontiers, in press.

Shepherd, A., Ivins, E.R., Geruo, A., Barletta, V.R., Bentley, M.J., Bettadpur, S., Briggs, K.H., Bromwich, D.H.,Forsberg, R., Galin, N., Horwath, M., Jacobs, S., Joughin, I., King, M.A., Lenaerts, J.T.M., Li, J., Ligtenberg, S.R.M., Luckman, A., Luthcke, S.B., McMillan, M. Meister, R., Milne, G., Mouginot, J., Muir, A., Nicolas, J.P., Paden, J., Payne, A.J., Pritchard, H., Rignot, E., Rott, H., Sorensen, L.S., Scambos, T.A., Scheuchl, B., Schrama, E.J.O., Smith, B., Sundal, A.V.,Van Angelen, J.H., Van De Berg, W.J., Van Den Broeke, M.R., Vaughan, D.G., Velicogna, I., Wahr, J., Whitehouse, P.L., Wingham, D.J., Yi, D., Young, D., Zwally, H.J. 2012. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance, *Science*, 338, 1183-1189.

Sugden, D.E. and John, B.S. 1976. "*Glaciers and Landscape*" Edward Arnold, London, Great Britain.

Thomas, R., Csatho, B., Davis, C., Kim, C., Krabill, W., Manizade, S., McConnell, J., Sonntag, J. 2001. Mass balance of higher-elevation parts of the Greenland ice sheet. J*ournal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 33707-33716.

Tushingham, A.M. and Peltier, W.R. 1991. ICE-3G: a new global model of late Pleistocene deglaciation based upon geophysical predictions of post-glacial relative sea level change. J*ournal of Geophysical Research.*, 96, 4497-4523.