

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23501255

研究課題名(和文)南極大陸周縁域の大陸棚はなぜ深いのか？

研究課題名(英文)Why the continental margin around the Antarctica is deeper than other continental shelves？

研究代表者

奥野 淳一 (Okuno, Jun'ichi)

国立極地研究所・北極観測センター・特任研究員

研究者番号：00376542

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：南極周縁域の大陸棚の深度は、一般的な大陸棚の深度より著しく深いことが知られている。この原因は、南極氷床が地球表層における荷重として作用することで、その縁辺域を沈降させているという仮説がある。本研究では、地球の粘弾性的変形を考慮したグレイシャルアイソスタシーのモデルを用いて、南極氷床荷重を変動が大陸棚深度に与える影響を調査した。数値シミュレーションの結果、現在の氷床分布を表面荷重と仮定すると、南極縁辺域の大陸棚深度の異常を説明することができないことが判明した。しかし、過去に現在の氷床分布より拡大した時期があると仮定した場合、南極縁辺域の大陸棚深度異常を説明できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The growth and decay history of Antarctic ice sheet affected geographic formation of the Antarctica including its margin through the Cenozoic era. The depth of the continental shelf around the Antarctica is very deep in comparison with that of the other sea areas in the world. The reason why continental shelf of Antarctica is very deep is that the Antarctic ice sheet would depress the continent including the continental shelf. Based on the glacial isostatic adjustment (GIA) modelling, we estimate the effect of the Antarctic ice load on the depth of the continental shelf around the Antarctica. GIA modelling results show that deformation due to the present ice distribution cannot satisfy the anomaly of the continental shelf depths in this region. However, the results based on the ice load model including the last glacial cycle explain the depth around the Antarctica, and imply that the Antarctic ice sheet extent to continental shelf at the Last Glacial Maximum.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：地理学，地理学

キーワード：南極氷床 地形 第四紀 氷床変動 地殻変動

## 1. 研究開始当初の背景

南極大陸内陸部およびその周縁地域の地形には、南極氷床盛衰の影響が色濃く残っている。特に、南極大陸の周縁域の地形的な特徴として、世界的に見ても広い大陸棚が連なっていることが挙げられる。その幅は地域的に大きく異なるが、西南極大陸沿岸では、200 km を越えるところが多く存在するのに対し、東南極大陸においては大陸棚の幅は狭いが、平均すると、60°E より東では約 100 km、西では約 60 km 程度である(吉川, 1997)。さらに注目すべきところは、その外縁の深さで、世界の他の海域の大陸棚にくらべて異常に深く、表面の地形が起伏に富み、その沿岸部の海面が棚氷に覆われていることは、南極大陸周縁の大陸棚に見られる顕著な特徴である(吉川, 1997)。このような南極大陸の周縁に広がる大陸棚の外縁の深さは、一般には 500-900 m であり、ところによっては 1000 m にも達するところがある。これは、中・低緯度地帯に広がる大陸棚はもとより、外縁の深さがおおむね 400-500 m である北極海、およびその周縁海域に広がる大陸棚とくらべても、はるかに深い。一方で、地球物理学的には、現在の南極大陸の大波長の地形については、アイソスタティックにはおおむね平衡状態にあるとされている(松本, 1986)。このことから、世界の他の海域の大陸棚にくらべて南極大陸周縁の大陸棚が異常に深いのは、巨大な氷床の荷重によって、大陸棚を含む南極大陸全体がアイソスタティックに沈降しているからであろうという考えが、早くから存在した(Stagg, 1985)。しかし、それらの詳細な因果関係についての定量的な評価は、いまだ不足しているのが現状であった。一方、南極氷床の盛衰に関しては、1981年にアメリカでまとめられた約2万年前の世界各地における最終氷期最盛期(Last Glacial Maximum: LGM)の氷床分布図が示された「世界の第四紀古気候に関する研究計画(CLIMAP)」(CLIMAP members, 1981)が挙げられる。しかし、この当時の南極氷床変動に関する地形地質学的観測値は、西南極のロス海周辺のわずかなものに限られており、南極氷床は、北半球氷床の発達に伴う海水準の低下によって、受動的に大陸棚の末端まで拡大したと考えられた。この考え方により、南極におけるLGMの氷床拡大範囲は、南極大陸縁辺部の大陸棚末端の位置をつなぐ線によって復元されている(例えば、Anderson et al., 2002)。しかし、前述したように、南極大陸外縁部の大陸棚末端の深度は 500-900 m と深く、氷期において大きく見積もっても 150m 程度の海水準低下では、氷床は大陸棚末端まで着底することはできないという問題点が存在する。このように、第四紀およびそれ以前の南極氷床盛衰の歴史と、周縁大陸棚の地形発達には密接な関係があると考えられる。さらに南極大陸周縁の地形は、南大洋の海洋循環にも影響をおよぼし、グローバル

な気候変動と密接に関係すると予想され、第四紀の気候変動を考察する上でも重要な要素であると考えられる。南大洋の変動史と海底地形発達史およびテクトニクスに関する研究(Hayes, et al., 2009)も古気候の復元という観点から進められているが、本研究では、グレイシャルアイソスタシー(Glacial Isostatic Adjustment: GIA)モデルを用い、地球表面における荷重としての南極氷床と南極大陸周縁の地形との関係について、粘弾性地球の変形という観点から定量的に評価し、南極周縁の大陸棚深度、南極氷床の盛衰および地球内部粘性構造について考察した。

## 2. 研究の目的

南極大陸には現在でも氷厚 2000 m 以上の氷床が存在しており、その氷床の存在が、南極大陸内部の地形のみならず、縁辺部の大陸棚地形にも大きな影響を与えていることは想像に難くない。特に、南極大陸周縁の大陸棚の深度(500-900m)は、地球全体における平均的な大陸棚深度(約 200m)より著しく深いことが知られている(たとえば、吉川 1997)。しかしながら、大陸棚深度と氷床の存在との因果関係についての知見は、未だ不十分な状況である。本研究では、南極周縁域の地形および地球物理学データの解析と、新生代の氷床変動史を考慮した粘弾性地球変形シミュレーションより、南極大陸周縁の大陸棚が深くなる原因と過去から現在までの南極氷床との関わりを探る。

## 3. 研究の方法

本研究課題は、地形・地球物理学的データの解析、表面荷重による粘弾性地球変形シミュレーションコードの開発、シミュレーションモデル結果とデータ解析との比較および地球内部物性、氷床の時空間分布のパラメータ決定、大陸棚深度と氷床の関係についての総合的検討といった4段階で研究を進めた。対象とする地域は、南極大陸縁辺部に加えて、アフリカ、インド、南アメリカ、オーストラリア各大陸の大陸棚についても比較検討した。これらの段階を経て、地球表面における荷重としての南極氷床と南極大陸周縁の地形との関係について、粘弾性地球の変形という観点から定量的に評価し、大陸棚深度の決定要因としての巨大氷床の役割を考察した。

## 4. 研究成果

まず、表面荷重にともなう地球の粘弾性的性質を考慮した地殻変動(GIA)を再現する数値シミュレーションコードの開発を行った。本コードは、Milne and Mitrovica (1998)による定式化に基づいて開発した。この定式化は、最終氷期以降の海水準変動を詳細に再現することも可能であるため、これまで提案された南極氷床融解史(例えば、Ivins and James, 2005)による海水準変動を、本研究

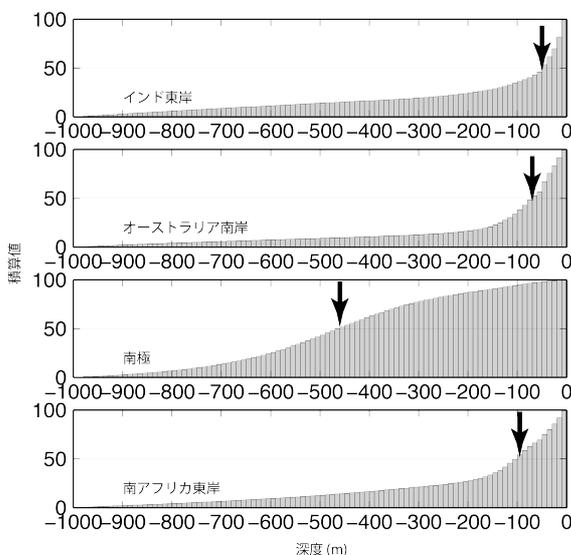


図1 大陸毎の沿岸海底地形の頻度分布

課題で開発した数値シミュレーションコードを用いて再現し、その時空間的特徴、および地球内部粘性構造依存性についてまとめた (Okuno and Miura, 2013)。

次に、各大陸沿岸域の海底地形の解析を行った。南極大陸は約2億年前には、その周りを現在のアフリカ大陸、インド、南アフリカ大陸、オーストラリア大陸と結合して、ゴンドワナ大陸の一部をなしていた。その後、約1億6000万年前よりアフリカ大陸、インド、さらに約1億年前にオーストラリア大陸が順次分裂して、現在のような大陸分布になったと考えられている (たとえば、Storey, 1995)。一般的に、大陸分裂前の接合部であったそれぞれの地域の大陸棚深度は、同じようなテクトニックな作用を経験したと考えられることから、その深度についても同程度になると考えられる。しかし、南極大陸は、ゴンドワナ大陸分裂から約6000万年後の3400万年前に起こった寒冷化により巨大な氷床に覆れ、それ以来氷の大陸となった (Zachos et al., 2001)。この南極大陸を覆った氷床が、地球に対する荷重として働き、縁辺部をアイスタティックに沈降させ、南極大陸周縁の大陸棚のみ異常に深い深度を示しているのではないかと予想される。この仮説を証明するため、かつてゴンドワナ大陸を構成した大陸間での大陸棚地形を詳細に解析した。ゴンドワナ大陸のなかで、一般的な大陸分裂を経験したと考えられる大陸のペアは、南アメリカとアフリカと考えられ、一方で、大陸分裂後の氷床発達の影響が現れる大陸のペアとして、南極大陸とアフリカ、インド、オーストラリアが考えられる。まず、これらの地域の地形データの解析と比較を行った。図1に各地域の海底地形の頻度分布を深さ毎に示す。-1000m以浅の海底地形に着目し、それぞれの大陸棚に分けて集計した。図1が示すように、積算値が50を超える地点の深度(図中の矢印が示す点)が、南極とそれ以外では、

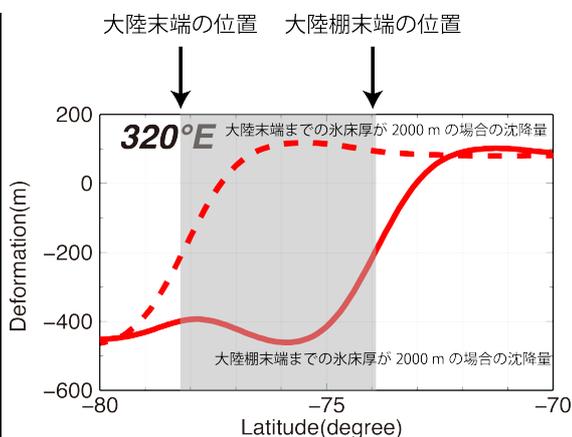


図2 グレイシャルアイソスタシーのモデルによる南極沿岸部の沈降量。東経320度の断面での数値計算結果を示す。大陸棚末端まで2000mの氷床厚を仮定した場合(実線)と大陸末端(現在の海岸線)まで2000mの氷床厚を仮定した場合(点線)の沈降量プロファイルを示す。地球内部粘性構造は、弾性層の厚さ50km、上部マントルの粘性率  $5 \times 10^{20}$  Pa s、下部マントルの粘性率  $10^{22}$  Pa sを採用した。

明らかに異なり、南極沿岸域の積算値が深度-450m程度、その他の大陸沿岸部が深度-100m前後になることが分かった。

この深度の差(約350m)がどのような氷床荷重を仮定すると実現できるかを本研究課題で開発したGIAモデルを用いて数値実験を行った。図2にモデル結果の一部を示す。大陸棚末端まで約2000mの氷床が存在したと仮定すると、大陸棚深度の異常は、十分説明することは可能であるが、現在の氷床分布のみでは、大陸棚深度の異常を説明することはできないことが判明した。さらにこの結果は、最終氷期の最盛期に大陸棚まで氷床が拡大した可能性を示唆する。本研究課題では、表面荷重として南極氷床の影響のみについて、GIAモデルを用いて定量的に評価したが、今後の課題として、南極沿岸部の堆積物の荷重効果や、大陸分裂に伴うリソスフェアの薄化による沈降などの効果も精度良く見積もることも必要であると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計23件)

J. Okuno, M. Nakada, M. Ishii, H. Miura, Vertical tectonic crustal movements along the Japanese coastlines inferred from late Quaternary and recent relative sea-level changes, Quaternary Science Reviews, 査読あり, 91, 2014, 42-61.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.03.010>

Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M.E. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi, H. Blatter, Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, *Nature*, 査読あり, 500, 2013, 190-194. doi:10.1038/nature12374

B. Song, Z. Li, Y. Saito, J. Okuno, Z. Li, A. Lu, D. Hua, J. Li, Y. Li, R. Nakashima, Initiation of the Changjiang (Yangtze) delta and its response to the mid-Holocene sea level change, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 査読あり, 388, 2013, 81-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.07.026>

M. Nakada, J. Okuno, GIA-related rotational variations for the Earth with low viscosity D layer, *Geophysical Journal International*, 査読あり, 195, 2013, 725-739. doi: 10.1093/gji/ggt290

M. Nakada, J. Okuno, M. Ishii, Twentieth century sea-level rise inferred from tide gauge, geologically derived and thermosteric sea-level changes, *Quaternary Science Reviews*, 査読あり, 75, 2013, 114-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.06.010>

J. Okuno, H. Miura, Last deglacial relative sea level variations in Antarctica derived from glacial isostatic adjustment modelling, *Geoscience Frontiers*, 査読あり, 4, 2013, 623-632. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2012.11.004>

Y. Suganuma, H. Miura, H. J. Okuno, A new sampling technique for surface exposure dating using a portable electric rock cutter, *Antarctic Record*, 査読あり, 56-2, 2012, 85-90. <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009493891>

Y. Yokoyama, J. Okuno, Y. Miyairi, S. Obrochta, N. Demboya, Y. Makino, H. Kawahata, Holocene sea-level change and Antarctic melting history derived from geological observations and geophysical modeling along the Shimokita Peninsula, northern Japan, *Geophysical Research Letters*, 査読あり, 39, 2012, L13502, doi: 10.1029/2012GL051983 .

P. Deschamps, N. Durand, E. Bard, B. Hamelin, G. Camoin, A. L. Thomas, C. M. Henderson, J. Okuno, Y. Yokoyama, Ice-sheet collapse and sea-level rise

at the Bølling warming 14,600 years ago, *Nature*, 査読あり, 483, 2012, 559-564. doi:10.1038/nature10902

Y. Suganuma, J. Okuno, D. Heslop, A. P. Roberts, T. Yamazaki, Y. Yokoyama, Post-depositional remnant magnetization lock-in for marine sediments deduced from <sup>10</sup>Be and paleomagnetic records through the Matsuyama-Brunhes boundary, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読あり, 311, 2011, 39-52. doi:10.1016/j.epsl.2011.08.038

T. J. J. Hanebuth, H. K. Voris, Y. Yokoyama, Y. Saito, J. Okuno, Formation and fate of sedimentary depocentres on Southeast Asia's Sunda Shelf over the past sea-level cycle and biogeographic implications. *Earth-Science Reviews*, 査読あり, 104, 2011, 92-110. doi:10.1016/j.earscirev.2010.09.006

中田正夫, 奥野淳一, グラシオ・ハイドロアイソスタシー, 地形, 査読なし, 32-3, 2011, 327-331 . <http://ci.nii.ac.jp/naid/110008733495>

[学会発表](計 20 件)

J. Okuno, F. Saito, A. Abe-Ouchi, K. Takahashi, Glacial isostatic adjustment simulations based on the ice sheet histories derived from 3D thermo-mechanical ice sheet model IcIES. 第4回極域科学シンポジウム, 2013年11月13日, 東京 .

J. Okuno, F. Saito, A. Abe-Ouchi, K. Takahashi, Effect of the glacial rebound on elevation changes deduced from the ice core records in Greenland ice sheet. 第4回極域科学シンポジウム, 2013年11月12日, 東京 .

奥野淳一, 齋藤冬樹, 阿部彩子, 高橋邦生, 3次元氷床モデルより求められた氷床融解史によるグリーンランドの地殻変動. 日本地球惑星科学連合 2013年大会, 2013年5月21日, 千葉 .

J. Okuno, H. Miura, Marine Isotope Stage 3 and Holocene relative sea level variations in East Antarctica derived from glacial isostatic adjustment modelling, 第32回極域地学シンポジウム, 2012年11月26日, 東京 .

J. Okuno, H. Miura, Y. Nogi, Effect of glacial isostasy on the depth of Antarctic continental margin, EGU General Assembly 2012, 2012年4月24日, Austria.

奥野淳一, 三浦英樹, 最終氷期最盛期における南極氷床拡大範囲と氷床量. 第2

回極域科学シンポジウム，2011年11月15日，東京。

奥野淳一，三浦英樹，酸素同位体ステージ3以降の東南極氷床変動に関する考察。日本第四紀学会2011年大会，2011年8月26日，徳島。

J. Okuno，H. Miura，H. Maemoku，Mid-Holocene collapse of the East Antarctic Ice Sheet derived from near-field sea-level changes，XVIII International Union for Quaternary Research - Congress，2011年7月26日，Switzerland。

J. Okuno，H. Miura，H. Maemoku，East Antarctic Ice Sheet fluctuations in mid-Holocene derive from near-field sea levels。11th International Symposium on Antarctic Earth Sciences，2011年7月14日，United Kingdom。

H. Miura，J. Okuno，H. Maemoku，Marginal history of East Antarctic ice sheet derived from glacial-marine geological stratigraphy and sea-level variations before LGM。11th International Symposium on Antarctic Earth Sciences，2011年7月14日，United Kingdom。

三浦英樹，太田晴美，泉紀明，菅沼悠介，奥野淳一，野木義史，東南極の大陸棚上に認められる氷河地形の特徴と第四紀の陸上氷床変動史との関連性。日本地球惑星科学連合2011年大会，2011年5月26日，千葉。

奥野淳一，三浦英樹，野木義史，南極大陸縁辺部における大陸棚深度に対する氷床変動の影響。日本地球惑星科学連合2011年大会，2011年5月25日，千葉。

〔図書〕(計 1 件)

宮内崇裕，奥野淳一，京都大学学術出版会，インダス期海湾都市の盛衰に影響した海岸線環境の変化とハイドロアイソスタシー。『インダス 南アジア基層世界を探る (長田俊樹編)』，2013，67-99。

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥野 淳一 (OKUNO, Jun'ichi)

国立極地研究所・北極観測センター・特任研究員

研究者番号：00376542

(2) 研究分担者

三浦 英樹 (MIURA, Hideki)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号：10271496