

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号： 10101

研究種目： 基盤研究 (S)

研究期間： 2008 ~ 2012

課題番号： 20221001

研究課題名 (和文) 海氷生産量のグローバルマッピングとモニタリング構築

研究課題名 (英文) Global mapping and monitoring of sea ice production

研究代表者

大島 慶一郎 (OHSHIMA KEIICHIRO)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号： 30185251

研究成果の概要 (和文)： 海洋中深層循環及びその変動を決めうる海氷生産量を、衛星データ等から見積もるアルゴリズムを開発し、そのグローバルマッピングを初めて行った。沿岸ポリニヤでの高海氷生産過程を長期係留観測から明らかにし、アルゴリズムの検証も行った。南極第2の高海氷生産域であることが示されたケープダムレー沖が未知の南極底層水生成域であることもつきとめた。南極海とオホーツク海では、海氷生産量の変動が底層水や中層水の変質とリンクしていることを明らかにし、中深層循環弱化的可能性を指摘した。

研究成果の概要 (英文)： Saline water rejected during sea ice formation drive the global overturning circulation. We have developed an algorithm to estimate and provide global mapping of sea ice production from satellite data for the first time. High ice production process in coastal polynyas has been clarified by mooring observations with validation of the algorithm. We have revealed that the region off Cape Darnley is the missing formation area of Antarctic Bottom Water with the second highest ice production in the Antarctica. We have also clarified the strong linkage between variabilities of sea ice production and bottom/intermediate water in the Antarctic Ocean and Okhotsk Sea and suggested weakening of the overturning in these oceans.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	57,900,000	17,370,000	75,270,000
2009年度	34,200,000	10,260,000	44,460,000
2010年度	37,500,000	11,250,000	48,750,000
2011年度	21,100,000	6,330,000	27,430,000
2012年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
総計	162,400,000	48,720,000	211,120,000

研究分野： 極域海洋学

科研費の分科・細目： 環境学・環境動態解析

キーワード： 海氷生産・中深層循環・沿岸ポリニヤ・南極底層水・マイクロ波放射計

1. 研究開始当初の背景

海洋の大規模な中深層循環は極域・海水域から重い水が沈み込み、それが徐々に湧き上がってくるといふ密度(熱塩)循環である。海氷生成の際にはき出される高塩分水が重い水の生成源になっている。最近、南極底層水や北太平洋の中層水の変質が観測され、中

深層循環が弱化的している可能性も指摘されている。海氷生産量の変動がこれらに関わっている可能性があるが、海氷生産量を捉える現場観測が極めて困難であることから、その変動はもとより平均的な量・分布さえも今までよくわかっていなかった。

2. 研究の目的

海洋中深層循環及びその変動を決めうる重要な因子である海水生産量を、現場観測に基づいて衛星データ等から見積もるアルゴリズムを開発し、そのグローバルマッピングを行うことを目的とする。さらに海水生産量と中深層水形成の関係をその変動を含めて理解することもめざす。

3. 研究の方法

- (1) 高海氷生産域である沿岸ポリニヤにおいて、氷厚計等による係留系観測を行ない、過去には得ることがなかった高精度の海水・海洋データを取得する
- (2) 上記のデータも比較検証データに用いて、衛星マイクロ波放射計データによる薄氷厚及び海水生産量アルゴリズムを開発し、海水生産量・海水域熱塩フラックスの全球データセットを作成する。
- (3) 係留アレ観測も含めた海洋観測から、高密度水・南極底層水の形成過程及び海水生産との関係を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 海水生産量のグローバルマッピング

衛星マイクロ波放射計データと熱収支計算等から、南極海、北極海、オホーツク海において薄氷厚アルゴリズムを開発し、海水生産量の見積もりを初めて全球で行った。衛星マイクロ波放射計 SSM/I と AMSR-E により、長期間(20年間)と高分解能(6km)の2種類の全球の海水生産量マッピングを完成させた。さらに、今までよくわかっていなかった、海水域での熱塩フラックスの見積もりを行い、データセット化した。これらはオンラインデータベース化して公表され、国外も含む多くの研究者によって、モデルの比較・検証データなどとしてすでに利用され、このデータセットを用いた論文も数編出版されている。

南極海と北極海では、薄氷域と誤評価される定着氷を高精度で検知するアルゴリズムも開発した。南極海では、このアルゴリズムを用いて、定着氷と海水生産量を合わせたマッピングを行い(図1)、海水生産が大きい沿岸ポリニヤは、定着氷の風下または下流域に作られ、変動も含めて両者は強くリンクしていることを明らかにした。

(2) 沿岸ポリニヤでの高精度海水・海洋観測

第51-54次日本南極地域観測隊(2009-2013年)に延べ7名が参加して、高海氷生産の沿岸ポリニヤであるケープダンレーポリニヤ(図1のCDP)において、長期係留観測を行なった。2009-2012年、アラスカ大学との共同観測により、北極海での高海氷生産域であるチャクチ海沿岸ポリニヤにおいても長期係

留観測を行なった。これらの観測により、沿岸ポリニヤでは今まで得ることがなかった高精度の海水厚データと海水・海洋同時データの取得に成功した。これらのデータは、沿岸ポリニヤでの高海氷生産や高密度水生成の検証データとして使用された。また、これらの観測によって、強いポリニヤイベントがあると、40-50m深まで及ぶ過冷却と海洋中でのフラジルアイス生成が生ずることが明らかになった。沿岸ポリニヤで非常に効率的に海水が生産される新たな機構を提示する観測結果である。

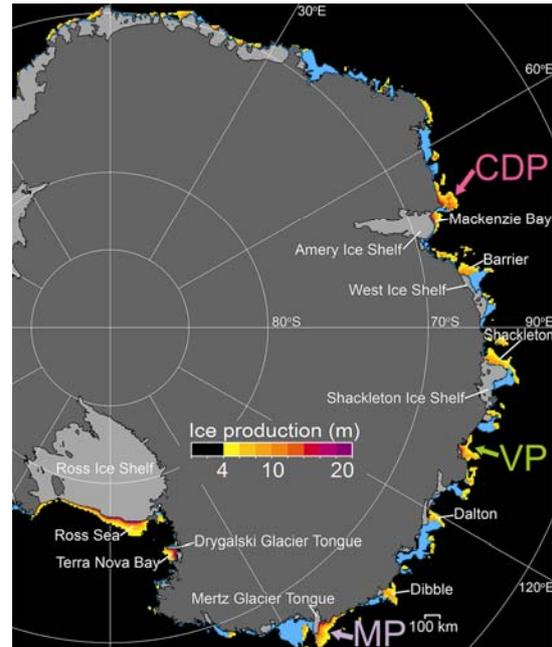


図1: 南極海における年間海水生産量(暖色系)と定着氷(青色)を合わせたマッピング。CDP; ケープダンレーポリニヤ, VP; ビンセネス湾ポリニヤ, MP; メルツポリニヤ

(3) 未知の南極底層水生成域の発見

海水生産量マッピング(図1)から、南極ではロス海ポリニヤに次ぐ第2の高海氷生産域であることが示されたケープダンレー沖において、係留系観測及び海洋観測を行い、この海域が未知(第4)の南極底層水生成域であることをつきとめた(図2, 図3)。ここから潜り込む高密度水を起源とする底層水は全底層水のうちの6-13%程度を占めることも示唆した。係留観測からは底層水が周期的に流出する過程を捉えることにも成功した(図2)。また、南極底層水生成を最新の非静水圧海洋モデルにより再現し、底層水の流動経路・流量を推定し、底層水の周期的流出のメカニズムを明らかにした。さらに、ここでの高海氷生産は東(上流)に形成される座礁氷山舌によることも明らかにした(図3)。

南極底層水は、ロス海・ウェッデル海・アデリーランド沖の3海域が主な生成域とされ、

広い陸棚・窪地と棚氷が不可欠とされてきた。ケープダンレー沖での発見は、それらの条件がなくても、海氷生産が非常に強力であれば底層水は作られることを意味する。東南極では、ケープダンレー沖以外にも氷河・氷舌の西側（沿岸流の下流域）に海氷生産量が大きい海域が複数あり（図 1）、これらの海域でも底層水ができていく可能性がある。2011/12 年、東京海洋大学の海鷹丸による係留観測から、海氷生産第 6 位のビンセンス湾沖（図 1 の VP）でも少量ではあるが底層水が生成されていることを示唆した。なお、ケープダンレー沖での南極底層水形成過程の研究は、日本南極地域観測の重要な一般研究観測と位置づけられ、今後も観測が継続して行なわれる予定である。

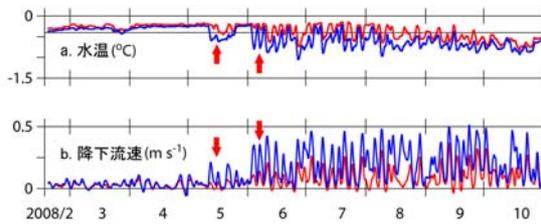


図 2：ケープダンレー沖での係留系による水温 (a) と降下方向の流速 (b)。青、赤が海底より 20m, 225m 地点でのデータで、海底付近ほど底層水の性質が強い降下流となる。

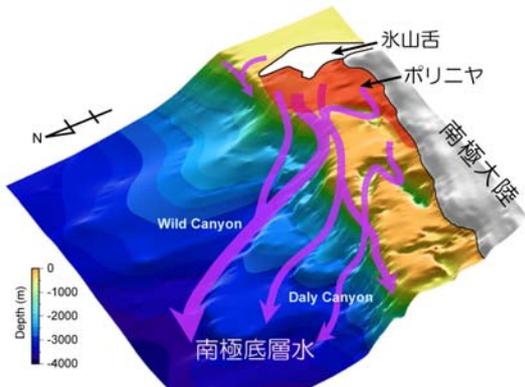


図 3：ケープダンレー沖における南極底層水形成の模式図。氷山舌下流に作られる沿岸ポリニヤでの高海氷生産によって重い水が作られ、それが峡谷に沿って沈み込み、南極底層水となって、南極海さらには全世界の海洋深層に広がっていく。

(4) 南極氷河の崩壊による海氷生産の激減

海氷生産量マッピングからは、第 3 の底層水生成域であるアデリーランド沖はメルツ氷河の下流にできるメルツポリニヤ（図 1 の MP）での高海氷生産（第 3 位）が主因であることがわかる。2010 年 2 月にメルツ氷河の大崩壊が起こったが、この大崩壊によって、メルツポリニヤでの海氷生産量が約 40% 減少したことを当研究グループのアルゴリズムか

ら明らかにした（図 4）。さらにそれがここで形成される南極底層水の低塩化・低密度化をもたらしていることを 2011/12 年の海鷹丸による現場観測から明らかにした。氷河が元のように張り出すまでの数十年にわたって、ここでの底層水生成が大きく減少する可能性を指摘するとともに、氷床海洋相互作用が深層循環を変動させうる、という新たなテーマを提示することとなった。

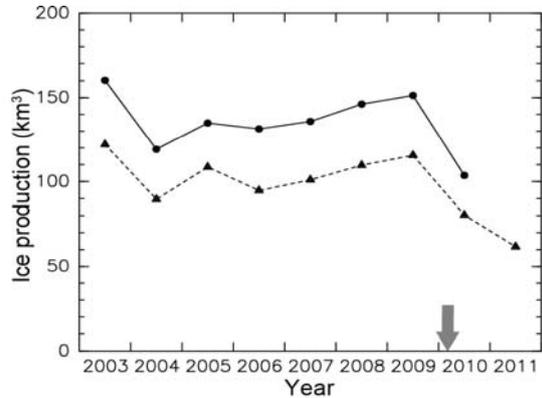


図 4：メルツポリニヤでの海氷生産量の経年変動。矢印がメルツ氷河崩壊を示す。実線は 3-10 月までの積算、点線は 3-8 月までの積算。

(5) 南極底層水の北上経路と流量の解明

南極底層水の潜り込みと北上は、北大西洋深層水とともに、海洋子午面循環を駆動している。2 年間にわたる係留系アレ観測の解析から、ケルゲレン海台東斜面がその主要な北上経路であり、北大西洋深層水の南下流量に匹敵する流量（約 12Sv）を持つことを明らかにした。海洋子午面循環の中で最もわかっていなかったピースを埋めた解析結果といえる。

(6) オホーツク海の手氷生産量の変動とそのインパクト

オホーツク海の北西陸棚ポリニヤは、北半球で最大の海氷生産域であり、北太平洋で最も重い水を作ること、北太平洋規模の鉛直（中層）循環を駆動している。オホーツク海での高精度の海氷生産量マッピングを行う（図 5）とともに、過去 30-50 年にわたる海氷生産量と中層水及びそれらの関係を明らかにした。衛星と大気データの解析からは沿岸ポリニヤでの海氷生産量が過去 35 年で 10-15% 減少していることを、過去に蓄積された海洋上層塩分プロファイルからは海氷量が過去 40 年で 25-40% 減少していることを、明らかにした。一方、オホーツク海上層 500m では、この 40 年で平均約 0.05psu という大きな低塩化が生じていることが示された。この低塩化は海氷生産の減少に伴う海水の持つ塩分の再配分効果の弱化によることを提案した。海氷生産量の減少が、オホーツク海の低塩化

と高密度水の減少を生み、北太平洋まで及ぶ中層循環を弱化させることを提示するとともに、鉄分を含む物質循環を弱化させ、生態系にまで影響を及ぼす可能性を指摘した。

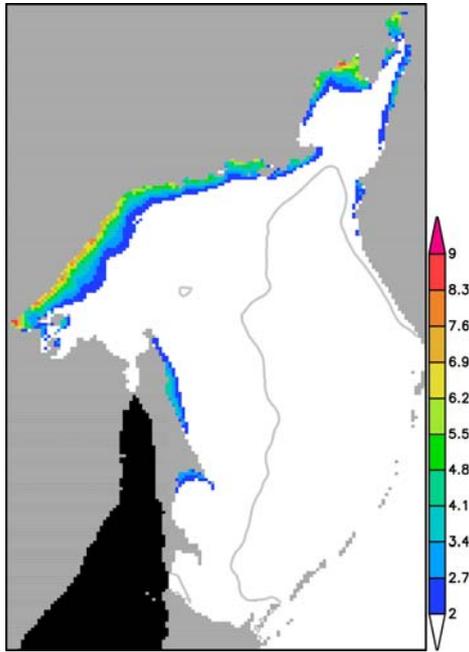


図 5：オホーツク海における年間海氷生産量マッピング。

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 48 件)

- ① Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nihashi, F. Roquet, Y. Kitade, T. Tamura, D. Hirano, L. Herraiz-Borreguero, I. Field, M. Hindell, S. Aoki and M. Wakatsuchi (2013): Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley Polynya, *Nature Geoscience*, 6, 235-240, doi:10.1038/NGeo1738. 査読有.
(Highlight article in March issue)
- ② Iwamoto, K., K. I. Ohshima, T. Tamura, and S. Nihashi (2013): Estimation of thin ice thickness from AMSR-E data in the Chukchi Sea, *International Journal of Remote Sensing*, 34, 468-489, doi:10.1080/01431161.2012.712229. 査読有
- ③ Tamura, T., G. D. Williams, A. D. Fraser and K. I. Ohshima (2012): Potential regime shift in decreased sea ice production after the Mertz Glacier calving, *Nature Communications*, 3:826, doi:10.1038/ncomms1820. 査読有
- ④ Shimada, K., S. Aoki, K. I. Ohshima, S. R. Rintoul (2012): Influence of Ross Sea Bottom Water changes on the warming and freshening of the Antarctic Bottom Water in the Australian-Antarctic Basin, *Ocean Science Discussion*, 8, 419-432, doi:10.5194/os-8-419-2012. 査読有
- ⑤ Nihashi, S., K. I. Ohshima, and N. Kimura (2012): Creation of a heat and salt flux dataset associated with sea ice production and melting in the Sea of Okhotsk, *Journal of Climate*, 25, 2261-2278, doi:10.1175/JCLI-D-11-00022.1. 査読有
- ⑥ Tamura, T. and K. I. Ohshima (2011): Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas, *Journal of Geophysical Research*, 116, C07030, doi:10.1029/2010JC006586. 査読有
(Research Spotlight: Highlighting: exciting new research from AGU journals)
- ⑦ Tamura, T., K. I. Ohshima, S. Nihashi, and H. Hasumi (2011): Estimation of surface heat/salt fluxes associated with sea ice growth/melt in the Southern Ocean, *SOLA*, 7, 7-20, doi:10.2151/sola.2011-005. 査読有
- ⑧ Nakanowatari, T., K. I. Ohshima, and S. Nagai (2010): What determines the maximum sea ice extent in the Sea of Okhotsk?: Importance of ocean thermal condition from the Pacific, *Journal of Geophysical Research*, 115, C12031, doi:10.1029/2009JC006070. 査読有
- ⑨ Fukamachi, Y., S. R. Rintoul, J. A. Church, S. Aoki, S. Sokolov, M. A. Rosenberg, and M. Wakatsuchi (2010): Strong export of Antarctic Bottom Water east of the Kerguelen plateau, *Nature Geoscience*, 3, 327-331, doi:10.1038/ngeo842. 査読有.
(Highlight letter in May issue)
- ⑩ Nihashi, S., K. I. Ohshima, T. Tamura, Y. Fukamachi, and S. Saitoh (2009): Thickness and production of sea ice in the Okhotsk Sea coastal polynyas from AMSR-E, *Journal of Geophysical Research*, 114, C10025, doi:10.1029/2008JC005222. 査読有
- ⑪ Fukamachi, Y., K. Shirasawa, A. M. Polomoshnov, K. I. Ohshima, E. Kalinin, S. Nihashi, H. Melling, G. Mizuta, and M. Wakatsuchi (2009): Direct observations of sea-ice thickness and brine rejection off Sakhalin in the Sea of Okhotsk, *Continental Shelf Research*, 30(12), 3171-3189, doi: 10.1016/j.csr.2009.04.005. 査読有
- ⑫ Tamura, T., K. I. Ohshima, and S. Nihashi (2008): Mapping of sea ice production for Antarctic coastal polynyas, *Geophysical*

[学会発表] (計 123 件)

- ① Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, S. Aoki, T. Tamura, and G. D. Williams: New findings of Antarctic Bottom Water: Ongoing warming/freshening and a discovered AABW source, The Third Symposium on Polar Science, Multidisciplinary session "Late Cenozoic Environmental Changes in Antarctic Cryosphere: Perspectives from Sea, Land, and Ice Sheets", National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan, November 27, 2012.
- ② Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, Y. Nakayama, T. Tamura, S. Nihashi, Y. Kitade, Y. Matsumura, H. Hasumi, S. Aoki, and M. Wakatsuchi: Formation of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley with huge sea ice production, IUGG 2011, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia, July 2, 2011.
- ③ Tamura, T., and K. I. Ohshima: Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas, IUGG 2011, Melbourne Convention and Exhibition Centre, Melbourne, Australia, July 1, 2011.
- ④ Fukamachi, Y., K. I. Ohshima, S. Aoki, Y. Kitade, T. Tamura, and M. Wakatsuchi: Antarctic Bottom Water revealed by mooring measurements off Cape Darnley, Antarctica, International Polar Year Oslo Science Conference, Norway Convention & Exhibition Center, Oslo, Norway, June 9, 2010.
- ⑤ Tamura, T., K. I. Ohshima, and S. Nihashi: Global mapping of sea ice production and surface heat/salt-flux in the sea ice region, IGS International Symposium on Sea Ice in the Physical and Biogeochemical System, University of Tromso, Tromso, Norway, June 2, 2010.
- ⑥ Ohshima, K. I., and S. C. Riser: Mapping and interannual variations of sea-ice thickness in the Okhotsk Sea inferred from ocean salinity profile in spring, IGS International Symposium on Sea Ice in the Physical and Biogeochemical System, University of Tromso, Tromso, Norway, June 1, 2010.
- ⑦ 大島慶一郎: 両極域における海洋-海水変動と温暖化, 国際極年 2007-2008 シンポジウム- 地球規模の変動現象と極域の役割-, 日本学術会議, 国立極地研究所, 立川, 2010年3月1日.

[図書] (計 11 件)

- ① 大泰司紀之, 桜井泰憲, 大島慶一郎 編集: オホーツクの生態系とその保全, 北海道大学出版会, 総ページ 484p, 2013年3月13日.
- ② 大島慶一郎: 第1章 オホーツク海の海洋循環・海水生成と温暖化の影響. 「環オホーツク海地域の環境と経済」田畑伸一郎・江淵直人編, 北海道大学出版会, pp13-37. 総ページ 280p, 2012年3月13日.
- ③ 大島慶一郎・羽角博康 編集: 月刊海洋「南大洋の深層水形成と海水過程」, 海洋出版, 号外 54, 総ページ 150p, 2010年6月.
- ④ 大島慶一郎: 1.2. オホーツク海と海水-その特殊性と重要性-「朝倉世界地理講座-大地と人間の物語-2巻: 東北アジア」, 朝倉書店, pp10-19, 総ページ 389p, 2009年11月.

[その他]

- ① 本科学研究費のホームページ
<http://wwwod.lowtem.hokudai.ac.jp/~ohshima/kaken.html>
 - ② 研究成果データベース
南大洋・北極海・オホーツク海の海水生産量と熱塩フラックスのグリッドデータセットを以下のサイトで公表
<http://wwwod.lowtem.hokudai.ac.jp/polar-seaflux/>
 - ③ 受賞
日本気象学会 2008 年度堀内賞受賞
(大島慶一郎: 海水の気候システムに果たす役割に関する研究)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
大島 慶一郎 (OHSHIMA KEIICHIRO)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 30185251
 - (2) 研究分担者
江淵 直人 (EBUCHI NAOTO)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 10203655

青木 茂 (AOKI SHIGERU)
北海道大学・低温科学研究所・准教授
研究者番号: 80281583

深町 康 (FUKAMACHI YASUSHI)
北海道大学・低温科学研究所・准教授
研究者番号: 20250508

豊田 威信 (TOYOTA TAKENOBU)
北海道大学・低温科学研究所・助教
研究者番号：80312411

松村 義正 (MATSUMURA YOSHIMASA)
北海道大学・低温科学研究所・助教
研究者番号：70631399

北出 裕二郎 (KITADE YUJIRO)
東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授
研究者番号：10203655

舘山 一孝 (TATEYAMA KAZUTAKA)
北見工業大学・工学部・助教
研究者番号：30374789

二橋 創平 (NIHASHI SOHEY)
苫小牧工業高等専門学校・機械工学科・准教授
研究者番号：50396321

小野 数也 (ONO KAZUYA)
北海道大学・低温科学研究所・技術専門職員
研究者番号：40396320

榎本 浩之 (ENOMOTO HIROYUKI)
情報・システム研究機構・国立極地研究所・教授
研究者番号：00213562
(H23：連携研究者)

木村 詞明 (KIMURA NORIAKI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
研究者番号：20374647
(H23→H24：連携研究者)

(3)連携研究者

田村 岳史 (TAMURA TAKESHI)
情報・システム研究機構・国立極地研究所・助教
研究者番号：40451413