

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25241001

研究課題名(和文) 海氷生成とリンクする南極底層水・深層循環の再描像

研究課題名(英文) A new picture of Antarctic Bottom Water and deep water circulation, linked with 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,300,000円

研究成果の概要(和文)： 東南極を中心として、沿岸ポリニヤでの高海氷生成による底層水形成の詳細を明らかにした。南大洋第2の海氷生産域であるケープダンレーポリニヤでは、係留系観測等から、海中フラジルアイス生成による高海氷生産過程や、高密度水が混合・変質して底層水に至る過程を明らかにした。第3の海氷生産域であったメルツポリニヤでは、氷河舌の崩壊によって海氷生産量が半減し、底層水生成が大きく減少していることが示された。これら以外に、東南極ではブリッツ湾及びビンセネス湾でも小規模ではあるが高海氷生成による底層水形成が示され、ポリニヤ高海氷生産(正)と棚氷融解(負)の効果の兼ね合いで底層水形成が決まることも示唆された。

研究成果の概要(英文)： Formation of Antarctic Bottom Water (AABW) caused by high sea-ice production in coastal polynyas is detailed mainly for the East Antarctica. For the Cape Darnley polynya, the second highest ice production area in the Southern Ocean, the high ice production process through underwater frazil ice formation, and mixing/modification processes of dense water into AABW are clarified by mooring observations. For the Mertz polynya, which was the third ice production area, the ice production has decreased by as much as 50%, due to the glacier tongue calving, resulting in a significant decrease in AABW production. Formation of AABW is also suggested around the polynyas in Prydz Bay and Vincennes Bay in the East Antarctica. The balance between the polynya ice production (positive effect) and melting ice shelves (negative effect) is likely a key factor for the AABW formation.

研究分野：極域海洋学 海洋物理学

キーワード：海氷 気候変動 南極底層水 沿岸ポリニヤ フラジルアイス 定着氷 マイクロ波放射計 ケープダンレー底層水

### 1. 研究開始当初の背景

南極沿岸ポリニヤでは多量に海水が生産され、それによって重い水ができ南極底層水の起原水となる。南極底層水が沈み込むことで海洋子午面循環が駆動される。当研究グループは、南大洋の海水生産量マッピングを行い、ケープダンレーポリニヤが南大洋第2の海水生産海域であることを明らかにし、さらに直接観測から、ここが未知(第4)の底層水生成域であることを突き止めた。この発見を契機に、いくつかある東南極の高海水生産ポリニヤにおいて底層水形成の可能性が示唆された。一方、ケープダンレーポリニヤにおいても、高海水生産が生ずる過程、高密度陸棚水から底層水に至る一連の過程等の詳細はよくわかっていなかった。

### 2. 研究の目的

本課題では、未知の部分が多い東南極を中心として海水生成とそれに伴う底層水形成・深層循環を明らかにすることを目的とする。具体的には、ケープダンレーポリニヤ以外の高海水生産ポリニヤでも底層水の形成が生じるのか? 高海水生成から底層水形成へ至る一連の過程の詳細、海水生産と底層水の変動の関係、等の解明をめざす。

### 3. 研究の方法

(1) 東南極の高海水生産ポリニヤ域(図1の点線の丸囲い)の沖合をターゲットに船舶によるCTD(水温塩分プロファイラー)・係留系観測を行うとともに、バイオロギング(アザラシにCTDを付けて観測する手法)も組み合わせ、底層水の形成域や拡がりをつかむ。

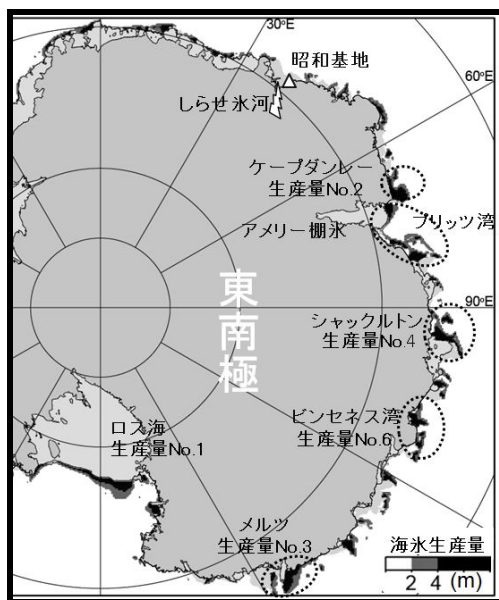


図1: 東南極の沿岸ポリニヤにおける年間海水生産量(海水厚に換算)。点線の丸で囲った海域はターゲットとする海域。薄い灰色は定着氷を示す。

Nihashi & Ohshima (2015)より加筆・修正。

(2) ケープダンレー沖をターゲットに、ポリニヤ内での ADCP (超音波流速計)・氷厚計・水温塩分計からなる係留系観測を行ない、同年の海水・海洋同時データを取得し、現場データからポリニヤ過程を詳細に解析する。

(3) 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の薄氷厚アルゴリズムを改良し、高精度の海水生産量データセットを作成する。

(4) 海洋非静水圧モデルを用いて、底層水の形成・変動シミュレーションを行い、そのメカニズムを探る。

### 4. 研究成果

(1) 東南極における高海水生産による南極底層水の形成

プリッツ湾における南極底層水の形成

アザラシ CTD 観測データから、ケープダンレーの上流(東側)のプリッツ湾(図1参照)においても、衛星から見積もられる海水生産量とよく対応する塩分・密度の増加があり、底層水、もしくはケープダンレー底層水の前駆水となるような高密度水が生成されていることが明らかになった(Williams et al. 2016)。ただし、プリッツ湾の背後にあるアメリカ棚氷の融解により、高密度水の生成が抑制され、そのためケープダンレー沖ほどには大量の底層水形成には至らないことも同時に示唆された。

ピンセネス湾における南極底層水の形成

東京海洋大学の海鷹丸による係留系・CTD 観測とアザラシ CTD 観測から、ピンセネス湾沖(図1参照)でも高密度水が潜り込んで上部(低密度)の南極底層水が形成されていることが示された(Kitade et al. 2014)。また、新規に構築した南大洋データセット(Shimada et al. 2017)からも、ここでの底層水形成は、東南極ではアデリーランド沖とケープダンレー沖に次ぐ寄与があることも示唆された。

ポリニヤ海水生産 vs. 棚氷融解

プリッツ湾海域は、三つのポリニヤによりケープダンレー沖に匹敵する海水生産があるにも関わらず、十分な底層水が形成されないのは、棚氷の融解水による低塩化によって底層水形成が抑制されるためと考えられる。海水生産量6位のピンセネスポリニヤでは低密度ながら底層水形成が示唆される一方で、生産量4位のシャクルトンポリニヤ(図1参照)では底層水のシグナルは見出せていない。ここは背後にシャクルトン棚氷を控えており、棚氷融解が大きい海域である。以上から、底層水形成が生じるかは、ポリニヤでの海水生産という正の効果と棚氷の融解という負の効果の兼ね合いで決まることが示唆された。

## (2) 沿岸ポリニヤでの高密度水形成過程

海中フラジルアイス生成による高海水生産過程

ケープダンレーポリニヤでの係留系による ADCP の散乱強度データから、ポリニヤ出現時には 80m 深以上まで及びポテンシャル過冷却と大量のフラジルアイス生成が生じていることが明らかになり(図 2) これが高海水生産システムを生む重要なメカニズムであることが示唆された。また、このデータも検証データにして、フラジルアイスを検知する衛星マイクロ波放射計アルゴリズムを開発し、南大洋全域の海水生産量マッピングに適用した。これにより、ポリニヤでの海水生産量の見積りの精度が一気に上がり、特にケープダンレーポリニヤでは、今までの見積もりよりも生産量が 1.5 倍ほど大きいことが示され、ここでの底層水形成との関係がより明瞭になった。

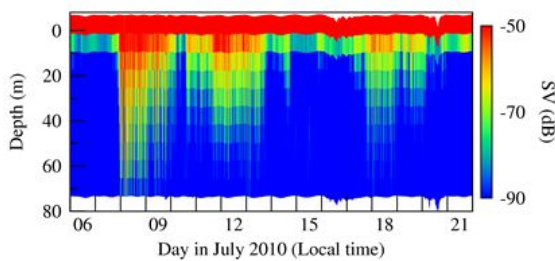


図 2: ケープダンレーポリニヤでの係留観測による、散乱強度のプロファイルの冬季半月の時系列。強い散乱強度はフラジルアイスのシグナルを示す。

## 高密度陸棚水の混合・変質過程

ケープダンレー沖で海鷹丸により取得された乱流計データ等から、海水生成で重くなった陸棚水が底層水へと変質する過程を詳細に解析した(Hirano et al. 2015)。高密度陸棚水は、海底斜面に捕捉され密度流的に地衡流バランスして西進するが、その際に上層の周極深層水との間に強い鉛直混合(渦動拡散係数で  $10^{-3} - 10^{-2} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$  程度)を生じ、かつ海底でのエクマン輸送によって斜面を下降しながら、底層水へと変質していく。

## 底層水の形成・変動シミュレーション

ケープダンレー沖における非静水圧モデルによる底層水形成実験からは、2つのキャニオンがケープダンレー底層水の形成・輸送域であること、観測されたキャニオンへの周期的な高密度水の流下は地形性ベータ効果によって制御された周期的な流出によって生じること、などが示唆された(Nakayama et al. 2014)。最新の衛星アルゴリズムから得られた海水生産量に対応する塩分フラックスを与えると、観測とよく対応する底層水形成が再現され、この海域から潜り込む底層水は全南極海の約 10%程度、というデータ解析

による結果と矛盾のない結果も得られた。

## (3) 海水生産量の変動とその底層水形成へのインパクト

衛星マイクロ波放射計のアルゴリズム開発により、南極海全域における沿岸ポリニヤと定着氷の同時マッピングを世界で初めて行った(Nishashi & Ohshima 2015)。海水生産量の大きいポリニヤは定着氷の西側に出現すること、その出現は風下域であること、他に西向き沿岸流の下流域であることにもよることが示された。第2の海水生産域であるケープダンレーポリニヤでは、海水生産量は気温や風ではなく、定着氷の形状によって決まる部分が多いことも示された。また、係留観測で示されたポリニヤでの塩分・密度上昇は、衛星からの海水生産量の変動と季節・年々変動ともよく対応しており、ポリニヤでの海水生産量が高密度陸棚水の変動を決めていることがデータからも示され、底層水の変動を決める重要ファクターであることが示唆された。

南極底層水形成域であるロス棚水ポリニヤ、メルツポリニヤ、ケープダンレーポリニヤに関しては、衛星マイクロ波放射計 SSM/I による薄氷厚データと熱収支計算により過去 22 年間の海水生産量の見積もりを行い(Tamura et al. 2016)、海水生産量が定着氷、氷河、棚水の変動と明確に関係していることが示された。

特にメルツポリニヤに関しては、3種類のマイクロ波放射計 SSM/I, AMSR-E, AMSR2 による結果を比較・補正することで、より長期でかつ高精度で海水生産量を見積もり(図 3)、第3の底層水であるアデリーランド底層水の変動との関係を調べた。その結果、2010年2月に起こったメルツ氷河舌の崩壊によって、海水生産量が半減したことが明確に示された。それと対応するように、海鷹丸の観測等からは 2010年以降アデリーランド底層水生成が大きく減少していることが示された(Aoki et al. 2014)。すなわち、底層水形成は海水生成の変動を介して氷河の変動と強くリンクしていることを示している。

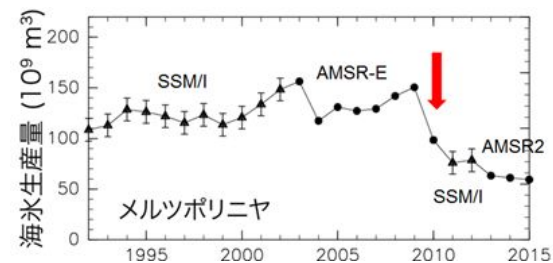


図 3: 3種類のマイクロ波放射計による、メルツポリニヤにおける年間海水生産量の時系列。赤矢印はメルツ氷河舌の崩壊を示す。

## 5 . 主な発表論文等

### [雑誌論文](計 21 件)

- Shimada, K., S. Aoki, K. I. Ohshima (2017): Creation of a gridded dataset for the Southern Ocean with a topographic constraint scheme. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34, 511-532, doi:10.1175/JTECH-D-16-0075.1. 査読有
- Williams, G. D., L. Herraiz-Borreguero, F. Roquet, T. Tamura, K. I. Ohshima, Y. Fukamachi, A. D. Fraser, L. Gao, H. Chen, C. R. McMahon, R. Harcourt and M. Hindell (2016): The suppression of Antarctic bottom water formation by melting ice shelves in Prydz Bay. *Nature Communications*, 7:12577, doi:10.1038/ncomms12577. 査読有
- Ohshima, K. I., S. Nihashi, K. Iwamoto (2016): Global view of sea-ice production in polynyas and its linkage to dense/bottom water formation. *Geoscience Letters*, 3:13, doi:10.1186/s40562-016-0045-4. 査読有
- Tamura, T., K. I. Ohshima, A. D. Fraser, and G. D. Williams (2016): Sea ice production variability in Antarctic coastal polynyas. *Journal of Geophysical Research*, 121(5), 2967-2979, doi:10.1002/2015JC011537. 査読有
- Nakata, K., K. I. Ohshima, S. Nihashi, N. Kimura, T. Tamura (2015): Variability and ice production budget in the Ross Ice Shelf Polynya based on a simplified polynya model and satellite observations. *Journal of Geophysical Research*, 120, 6234-6252, doi: 10.1002/2015JC010894. 査読有
- Nihashi, S. and K. I. Ohshima (2015): Circumpolar mapping of Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice: relationship and variability. *Journal of Climate*, 28, 3650-3670, doi:10.1175/JCLI-D-14-00369. 査読有
- Matsumura, Y., and K. I. Ohshima (2015): Lagrangian modelling of frazil ice in the ocean. *Annals of Glaciology*, 56(69), 373-382, doi:10.3189/2015AoG69A657. 査読有
- Hirano, D., Y. Kitade, K. I. Ohshima, and Y. Fukamachi (2015): The role of turbulent mixing in the modified Shelf Water overflows that produce Cape Darnley Bottom Water. *Journal of Geophysical Research*, 120, 910-922, doi:10.1002/2014JC010059. 査読有
- Nakayama, Y., K. I. Ohshima, Y. Matsumura, Y. Fukamachi, H. Hasumi (2014): A numerical investigation of formation and variability of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica. *Journal of Physical Oceanography*, 44, 2921-2937, doi: 10.1175/JPO-D-14-0069.1. 査読有
- Schmidko, S., K. J. Heywood, A. F. Thompson, and S. Aoki (2014): Multi-decadal warming of Antarctic waters. *Science*, 346 (6214), 1227-1231, doi:10.1126/science.1256117. 査読有
- Kitade, Y., K. Shimada, T. Tamura, G. D. Williams, S. Aoki, Y. Fukamachi, F. Roquet, M. Hindell, S. Ushio, and K. I. Ohshima (2014): Antarctic Bottom Water production from the Vincennes Bay Polynya, East Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 41(10), 3528-3534, doi:10.1002/2014GL059971. 査読有
- Aoki, S., Y. Kitade, K. Shimada, K. I. Ohshima, T. Tamura, C. C. Bajish, M. Moteki, and S. R. Rintoul (2013): Widespread freshening in the seasonal ice zone near 140 °E off the Adelie Land Coast, Antarctica, from 1994 to 2012. *Journal of Geophysical Research*, 118, 6046-6063, doi:10.1002/2013JC0090009. 査読有

### [学会発表](計 9 4 件)

- Ohshima, K. I.: Global View of Sea Ice Production in Polynyas and Its Linkage to Dense/Bottom Water Formation, Material Cycle and Biological Production. Gordon Research Conference on Polar Marine Sciences(招待講演)(国際学会), Ventura (USA), March 27, 2017.
- Kitade, Y., K. Shimada, Y. Ogata, S. Aoki, T. Kobayashi, T. Suga, K. I. Ohshima: Possibility of AABW source originating from middle size polynyas along the coast of Australian-Antarctic Basin. 2016 AGU Fall Meeting(国際学会), San Francisco (USA), December 14, 2016.
- Ohshima, K. I., Y. Nakayama, Y. Fukamachi, Y. Matsumura, S. Nihashi, T. Tamura, Y. Kitade, D. Hirano, D. Simizu, and S. Aoki: Formation and variability of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley: the fourth Antarctic Bottom Water. 2016 AGU

Ocean Sciences Meeting(国際学会),  
New Orleans (USA), February 25,  
2016.

Nihashi, S. and K. I. Ohshima:  
Coincident circumpolar mapping of  
Antarctic coastal polynyas and  
landfast sea ice; their relationship  
and linkage. 26th IUGG General  
Assembly 2015(国際学会), Praha  
(Czech Rep.), June 26, 2015.

Fraser, A. D., K. I. Ohshima, S. Nihashi,  
R. A. Massom, and T. Tamura: Landfast  
sea ice: the missing factor  
explaining Antarctic coastal  
polynya sea ice production. 26th  
IUGG General Assembly 2015(国際学  
会), Praha(Czech Rep.), June 26,  
2015.

中田 和輝, 松村 義正, 大島 慶一郎:  
フラジルアイス粒子追跡モデルのポリ  
ニヤモデルへの応用. 2015年度日本海  
洋学会春季大会, 東京海洋大学品川キ  
ャンパス(東京都港区), 2015年3月22  
日. (若手ベストポスター賞受賞)

大島 慶一郎: 海氷がつくる海洋大循環  
とその変動. 国立大学附置研究所・セ  
ンター長会議 第1部会シンポジウム  
「激変する地球環境の現状と未来像」  
(招待講演), 京王プラザホテル札幌  
(北海道札幌市), 2014年10月9日.

Ohshima, K. I.: Global view of sea ice  
production and its linkage with  
dense/deep water formation. 11th  
Annual Meeting AOGS 2014(招待講演),  
ロイトン札幌(北海道札幌市), 2014年  
8月1日.

#### [図書](計3件)

大島 慶一郎 他(2017): 「低温環境の科  
学事典」河村 公隆・大島 慶一郎他編  
第5章 海洋物理・海氷. 朝倉書店,  
411(131-161).

大島 慶一郎 (2016): パリティ「特集:  
物理科学, この1年」. Vol.31 No.1,  
丸善出版, 116 (66-67).

大島 慶一郎, 深町 康, 青木 茂, 松村  
義正 他 (2015): 北海道大学低温科学  
研究所編「低温科学便覧」, 第7章 南  
極海における海氷生成と深層水形成.  
丸善出版, 383 (133-158).

#### [その他]

研究成果データベース  
南大洋・北極海・オホーツク海の海氷生産  
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/](http://wwwod.lowtem.hokudai.ac.jp/polar-seaflux/)

受賞

・2015年度日本海洋学会賞受賞:

(大島 慶一郎: 海氷域の変動とその海洋  
循環に与える影響に関する研究, 2016年3  
月)

・平成28年度文部科学大臣表彰 科学技術  
賞(研究部門)受賞:

(大島 慶一郎: 海氷域における中深層水  
形成と海洋循環に関する研究, 2016年4月  
20日)

#### 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

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

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

松村 義正 (MATSUMURA YOSHIMASA)  
東京大学・大気海洋研究所・助教  
研究者番号: 70631399

北出 裕二郎 (KITADE YUJIRO)  
東京海洋大学・学術研究院・教授  
研究者番号: 50281001

二橋 創平 (NIHASHI SOHEY)  
苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・准教授  
研究者番号: 50396321  
(平成27年度のみ連携研究者)

##### (3) 連携研究者

牛尾 収輝 (USHIO SHUKI)  
国立極地研究所・研究教育系・准教授  
研究者番号: 50211769

田村 岳史 (TAMURA TAKESHI)  
国立極地研究所・研究教育系・准教授  
研究者番号: 40451413

高橋 晃周 (TAKAHASHI AKINORI)  
国立極地研究所・研究教育系・准教授  
研究者番号: 40413918

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

##### (4) 研究協力者

ルーザ - アレクサンダー (FRASER ALEXANDER)  
ウィリアムズ ガイ (WILLIAMS GUY)  
佐藤 建 (SATO TATSURU)