

第4回研究助成

## 気候変動の鍵を握る南極の海

プロジェクトリーダー

田村岳史 国立極地研究所

プロジェクトメンバー

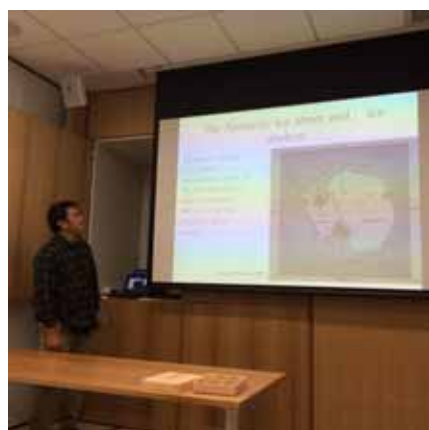
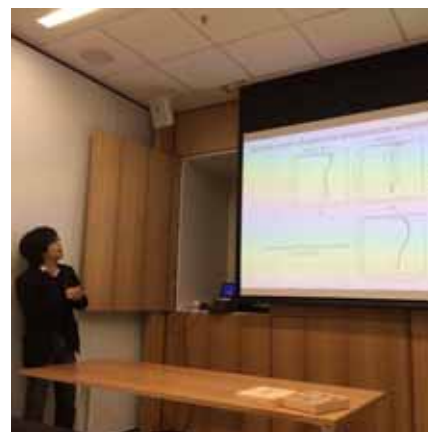
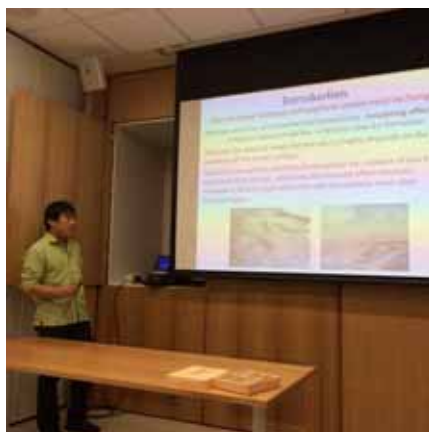
松村義正 東京大学 大気海洋研究所

嶋田啓資 東京海洋大学

Guy Williams ACE CRC, Univ. of Tasmania

Ben Galton-Fenzi ACE CRC, Univ. of Tasmania

草原和也 ACE CRC, Univ. of Tasmania



本課題主催の国際ワークショップでの発表の様子  
(左上：松村、右上：嶋田、左下：佐藤健【本課題のPD】、右下：田村)

## 1. 研究の背景と達成目標

海は熱・塩・酸素・CO<sub>2</sub>・栄養塩等を膨大に溜め込み、海洋大循環によってこれらを地球全体に輸送する。海水が存在する極域の海は“気候のカナリア”であり、温暖化等の気候変動に対して敏感に応答する。南極海で形成される南極底層水はこの二項目に対して主役を演じているが、その全体像を現場観測のみから捉えるのは今なお困難である。本プロジェクトは、衛星観測による海氷生産量のモニタリング、現場観測による水温塩分場の高精度マッピング、高解像度数値モデルによる数値実験という異なる三つの手法から多角的に取り組み、南極底層水の生成量・沈み込み過程・底層での拡がりを数値モデルから定量的に評価する。本プロジェクトは地球規模での気候システムの解明における最後にして最難関の空白域に対してチャレンジするものであり、気候変動予測に貢献をする。

## 2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

### ・海氷生産量データセットの作成

今まで不確かさ・誤差が大きかった海氷域での熱塩フラックス条件が、より確からしい形で気候モデルに対して提供される事になる。さらに、モデルによる気候変動の予測に対しても大きな貢献となる。さらに、長期間のデータセットを作成したことにより、海氷生産量の変動と気候変動との関連性を明らかにすることもできるようになった。

### ・海洋観測データセット高度化

南極底層水の流路等を含めた流出過程とその変動についての数値シミュレーションを行う際に必要な、比較・検証データを提供することとなった。

### ・現場観測データによる南極底層水の形成過程及び形成量の解明

海氷生産に伴って生じ、南極底層水の母水塊となる高密度陸棚水の形成と大陸棚上における移流過程が明らかになった。

### ・粒子追跡モデルの開発

両相の熱力学的な相互作用をモデル化し、力学的な相互作用も正確に扱えるようモデルを高度化したもので、これまでに発想すら難しかった数値シミュレーションを可能とした。この粒子追跡モデルにより、海洋堆積物の浮上や粒子状懸濁物質の輸送過程を陽に扱うシミュレーションも可能となった。

### ・棚氷-海氷-海洋結合モデルの開発

南極底層水の形成初期過程において、冷源および淡水供給源として無視できない働きをする棚氷の動向を結合モデルに組み込むことにより、南極底層水の形成・流出過程とその変動についての数値シミュレーションを行うことが初めて可能となった。また、南極沿岸域で大きな淡水供給を行っている棚氷水の動向についても明らかにすることが可能となった。

### ・南極底層水形成過程の解明

南極底層水の沈み込みは、数千年の時間をかけて全地球を巡る海洋深層大循環の駆動力となっており、膨大な熱・塩・物質輸送によって気候システムを支配している。また、その熱・塩・物質輸送の変動は全海洋に伝播し、それらが地球規模の気候変動に敏感に応答する。この南極底層水の生成量が近年の温暖化に伴い減少し、深層循環の駆動力が弱体化している事を示唆する報告は数多い。しかし、この南極底層水の形成・流出に関する基本的な物理過程については、局所的・定性的にしか明らかになっていなかった。本課題では、南極底層水の生成量・沈み込み過程・底層での拡がりの数値シミュレーションを可能とした。ここで得られた科学的知見は、将来の地球気候システムの変動予測に役立てられることとなる。

### ・氷床-海洋相互作用の研究に向けて

南極底層水の取り扱いに対する必須項目である棚氷結合モデリングを行うことにより、棚氷融解の扱いが当初の予想以上にインパクトがあることが明らかになり、今後、氷床-海洋相互作用を踏まえて、温暖化による海水準予測を行う際に、本プロジェクトの知見が必須となる。

### 3. 研究成果

#### ①衛星観測による海氷生産量データセットの作成

平成 24 年 9～10 月に行われた豪州主催の国際南極海氷観測に参加した際の得たデータを用いて解析を行った。この観測は、東経 120 度付近のドルトンポリニヤを含む海氷域で行われた集中観測で、得られた現場観測データによって海氷アルゴリズムの高精度化が期待される。この観測では日本から、人工衛星に積んであるマイクロ波センサーと全く同じセンサーを積んだ携帯型の放射計を持ち込み、これをヘリに搭載して観測を行って、現場検証を行った。海氷生産が集中し、南極底層水の形成域となっているポリニヤ域でのヘリ観測データの解析処理を行い、アルゴリズムの高精度化に貢献する知見を示した。

現場と衛星データの組み合わせにより高精度化された薄氷厚アルゴリズムを用いて、海氷生産量を定量的に見積もった。新たにゾウアザラシによるバイオリギングデータを導入して、この海氷生産量の検証も行った。まず東南極沿岸ポリニヤでの見積りを行い、この方法を南極海全体に適用し、半球規模での見積りを行った。その後の展開として、全南大洋の海氷生産量、熱塩フラックスデータセットとして整備して、数値モデル等に使用できるようにした。これによって南極底層水形成の出発点である海氷生産量について定量的なデータを提供することができ、これは南極底層水の数値シミュレーションを行う上で必須の主要基本データとなる。

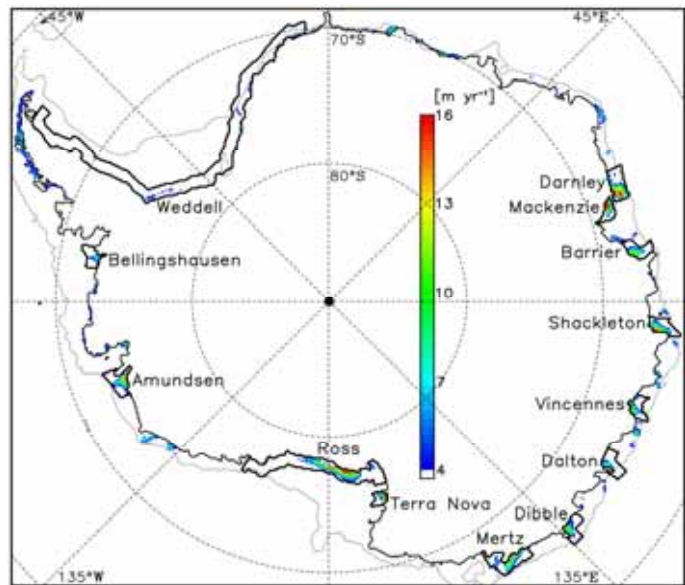


図 1：南大洋での海氷生産量マッピング

#### ②現場観測による海洋観測データセット高度化と南極底層水の形成過程の解明

深層大循環を定量的に理解する上で鍵となる、南大洋の格子化データにおける物理量の空間変動の再現性の向上を試みた。南大洋では、観測値の空間密度が低いことが空間変動の再現性を低下させる原因となっているが、物理的には鉛直密度成層が弱く、等深線に沿う流れが支配的となる、即ち海底地形の支配が強いという特徴がある。この特徴を内挿方法に導入することで、低い観測値の空間密度の低さを補って内挿誤差を低減させるべく、通常用いられる距離に加えて、水深の差を考慮する項を追加した重み付け関数を提案した。そして、World Ocean Database 2009 (1950-2010 年)を中心とする観測データを用いて、南大洋の物理量の空間変動を定量的に解析し、南大洋の海洋観測データセットを再構築して

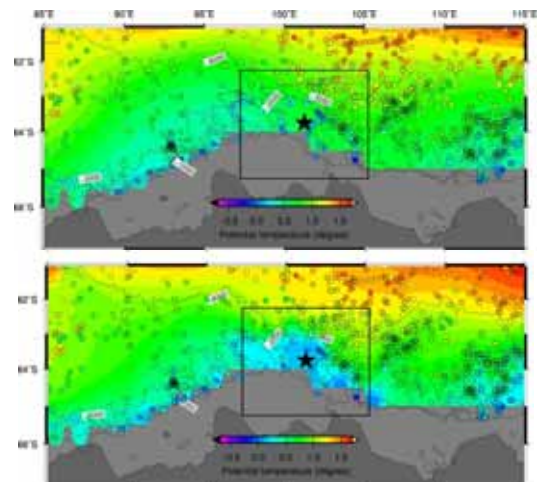


図 2：従来のデータセット（上）と高精度化した海洋観測データセット（下）

高精度化した。

さらに、東南極域に連続的に分布する海氷生産の高い沿岸ポリニヤの南極底層水形成への寄与を明らかにすることを目的とし、新たに南極底層水が形成されていることが明らかになったビンセンネス湾をパイロットケースとして、南極底層水の形成過程、形成量を明らかにすることを試みた。近年のゾウアザラシによるバイオリギングデータが利用可能になり、観測値の密度が大幅に増加したことを受け、確立した手法を用いて高精度なマッピングを行った。

### ③数値シミュレーションによる微小規模混合プロセスの解明

底層水の起源である高密度陸棚水は沿岸ポリニヤでの活発な海氷生成に伴う塩分排出によって生成される。海況が穏やかな場合には海面で氷板が成長するのに対し、海面が乱流状態の場合には海水中で微小な氷の結晶であるフラジルが析出し、それらが海面で集積してグリースアイスとなる。前者は大気海洋間の熱交換を妨げるが、後者であれば直接海水と冷たい大気が接するため高い熱損失が維持される。しかしこのような海氷形態の違いは既存の海氷モデルではほとんど考慮されていなかった。そこで粒子追跡法を開発して、海水中のフラジリアイスの力学的・熱力学的挙動を陽にシミュレートする数値モデルを構築し、それによりフラジルの振舞いが大気海洋間の熱交換に及ぼす影響を定量的に調べた。また数値実験結果の解析から、活発な海氷生成下で観測されるポテンシャル過冷却(海水の温位が表層での結氷点を下回る現象)が、表層で析出したフラジルが対流により下層に運ばれて融解することで生じる潜熱輸送によって実現されている可能性を指摘した。この一連のプロセス解明により、南極底層水形成過程の数値モデル化に資する知見を提供するに到った。

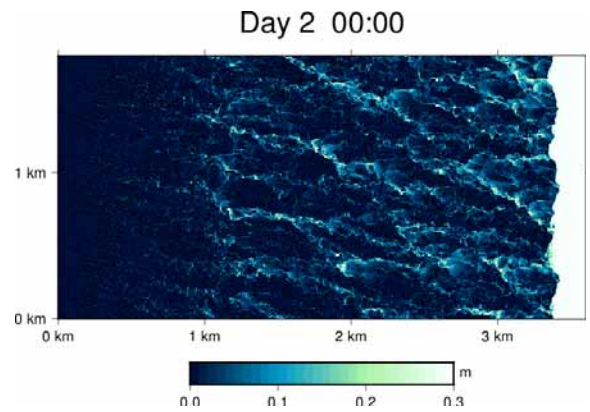


図3：フラジリアイスのシミュレーション

### ④数値モデルによる高密度水塊形成機構の解明

東京大学大気海洋研究所及び海洋開発機構によって共同開発/運用されている海氷-海洋モデルに棚氷コンポーネントを加えた棚氷-海氷-海洋結合モデルを開発して、南極棚氷融解水の流路及びその南大洋システムへの影響を調べた。モデルの領域はおおよそ南緯35°以南の南大洋全域である。南極沿岸域の水平解像度は10-20kmである。この棚氷-海氷-海洋結合モデルを用いて、南極棚氷の底面融解の特性を調べた。現在気候において、棚氷毎に流入する水塊が大きく異なること、温暖化時に棚氷下への水塊流入の変化(平均水温)によって、底面融解量の変化が説明できることが明らかになった。また、ウェッデル海及びアムンゼン-ベリングスハウゼン海の棚氷底面融解水はその大部分が表層/亜

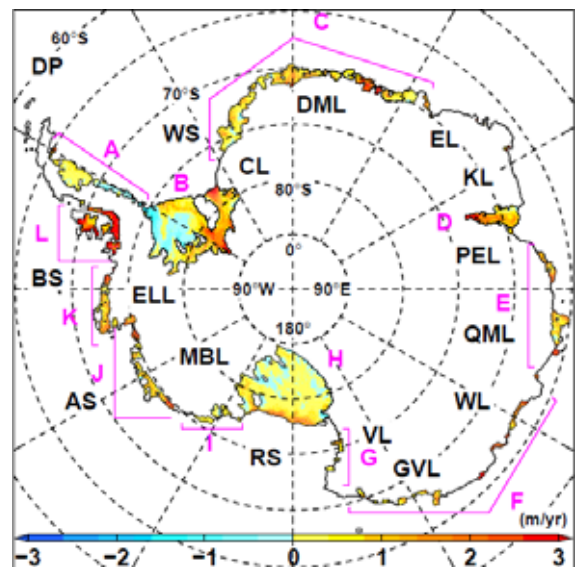


図4：棚氷結合モデルによる棚氷融解量分布

表層に存在し、南極周極流によって低緯度方向に効率的に運ばれていることがわかった。南極全体の棚氷底面融解水の鉛直分布をみると、おおよそ4分の3は表層/亜表層に存在し、のこりは南極沿岸域での高密度水の形成時に取り込まれ、南極底層水の一部として、底層に分配されることがわかった。

#### ⑤南極底層水形成過程の解明

衛星データ解析による海氷生産量モニタリング、現場観測に基づく海洋観測データセットの高度化、高解像度海洋モデルによる数値実験を組み合わせる事で、南極底層水分布の再現を行い、形成過程の解明に繋がる知見を明らかにした。この再現結果は数値モデルによってもたらされたものであり、さらなる現場観測データとの比較・検証によって、その信頼性が高まるものである。この数値モデルによる南極底層水分布の再現結果は、本課題終了後に始まった別の観測研究プロジェクトによって、さらなる検証が行われる計画となっている。

### 4. 今後の展開

本プロジェクトの研究結果により、南極底層水分布の再現が可能となり、今後、南極底層水の研究は飛躍的に前進する素地が完成した。今回の再現は数値シミュレーションによるものであるため、現場観測による検証がさらに必要ではあるものの、一方で今後の現場観測研究にとっても、安定的な比較・検証データを提供することにもなり、南極底層水のプロセス研究の大きな前進も期待される。また南極底層水は、全球海洋大循環の出発点であり駆動源でもあり、数値シミュレーションにより底層水の変動を明らかにすることができるため、海洋循環の変動予測研究にも繋がる。さらに、その役割の重要性が明らかになっていたものの、これまで全球気候モデルに組み込まれていなかった南極周りの海洋循環場を数値モデルに反映することが可能となり、気候変動予測モデルの明らかな精度向上に貢献するところとなる。

本プロジェクト遂行の過程において、いくつかの副産物的な成果が発生したが、その代表と言えるのが、氷床海洋相互作用の重要性の発見である。南極底層水の素過程をシミュレートする上で、南極沿岸域に存在する棚氷の役割の果たす役割が大きいと、この役割を数値モデルに組み込み、数値モデルでの再現を行った。この棚氷は、その融解による淡水供給により、地球の海水準上昇にも大きな役割を果たす。近年の温暖化による海水温上昇により、南極氷床が特にその末端部である棚氷域で融解量が上昇していると考えられている。棚氷域は南極氷床の中でも、その底面で海洋と直に接しており、ここでの氷床海洋相互作用が全球海水準上昇の主要部と目されている。本課題の結果を適用することにより、全球海水準上昇予測の研究も行うことが可能となり、上記とは別の形で気候変動予測研究に貢献することが可能となった。

### 5. 発表実績

#### 【査読付国際誌】

Shimada, K., S. Aoki, and Kay I., Ohshima (2017): Creation of a Gridded Dataset for the Southern Ocean with a Topographic Constraint Scheme, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0075.1>.

Kusahara, K, H. Hasumi, A. D. Fraser, S. Aoki, K. Shimada, G. D. Williams, R. A. Massom, and T. Tamura (2017): Modeling ocean-cryosphere interactions off Adelie and George V Land, East Antarctica. *Journal of*

Climate, 30, 163–188, doi:10.1175/JCLI-D-15-0808.1.

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): Suppression of Antarctic Bottom Water production by melting ice shelves in Prydz Bay, East Antarctica. *Nature Communications*, 7:12577, doi:10.1038/NCOMMS12577.

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.

Tamura, T., K. I. Ohshima, J. L. Lieser, T. Toyota, K. Tateyama, D. Nomura, K. Nakata, A. D. Fraser, P. W. Jansen, K. B. Newbery, R. A. Massom, and S. Ushio (2015): Helicopter-borne observations with portable microwave radiometer in the Southern Ocean and the Sea of Okhotsk. *Annals of Glaciology*, 56(69), 436–444, doi:10.3189/2015AoG69A621.

Matsumura, Y. and K. I. Ohshima (2015): Lagrangian modelling of frazil ice in the ocean, *Ann. Glaciol.*, 56(69), 373–382.

Kusahara, K., T. Sato, A. Oka, T. Obase, R. Greve, A. Abe-Ouchi, H. Hasumi (2015): Modelling the Antarctic marine cryosphere at the Last Glacial Maximum, *Annals of Glaciology* 56(69), doi:10.3189/2015AoG69A792.

Kusahara, K., and H. Hasumi (2014): Pathways of basal meltwater from Antarctic ice shelves: A model study, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 119, 5690–5704, doi:10.1002/2014JC00915.

Kusahara, K. and H. Hasumi (2013), Modeling Antarctic ice shelf responses to future climate changes and impacts on the ocean, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118, 2454–2475, doi:10.1002/jgrc.20166.

#### 【学会発表】

田村 岳史, 嶋田 啓資, 松村 義正, 草原 和弥, 佐藤 健, 野村 大樹, “気候変動の鍵を握る南極の海”, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜, 2014 年 4 月 28 日～5 月 2 日.