

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12811

研究課題名（和文）東南極沿岸域の氷床－海水－海洋相互作用における暖水流入の影響評価

研究課題名（英文）Impact of warm water inflow on ice sheet-sea ice-ocean interaction in East Antarctic coastal region

研究代表者

平野 大輔 (HIRANO, Daisuke)

北海道大学・低温科学研究所・助教

研究者番号：30790977

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：南極沿岸域における氷床・海水・海洋の相互作用は、全球規模の海洋深層循環や海水準の変動、ひいては気候変動に多大なる影響を与える。本研究課題では、観測的知見が乏しい東南極を対象に、南極沿岸システムの観測研究を実施し、（1）暖水流入に伴う白瀬氷河舌の底面融解プロセス、（2）トッテン棚氷の前面および近傍海域における暖水分布の特徴、（3）ケープダンレーポリニヤにおける高密度陸棚水および沖合起源暖水の水塊特性と空間分布の季節変動性、に関する知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

特に、「データ空白域である棚氷近傍での海洋観測と棚氷の氷厚変化の直接観測を同時に実施し、海洋学と測地・雪氷学双方のアプローチから東南極沿岸システムにおける暖水流入の実態とその影響」について、主に観測研究により明らかにした点に学術的意義がある。これら現場観測を軸とした研究成果は、東南極沿岸システムの変動が全球規模の海洋熱塩循環や海水準変動へ与える影響を精度良く評価する上での基礎的知見となる。さらに、将来予測に欠かせない数値モデルの検証およびその精度向上にも貢献し、ひいては気候モデルにおける海洋熱塩循環や海水準といった全球環境将来予測スキルの発展に資する。

研究成果の概要（英文）：The Antarctic coastal system with ice sheet, sea ice, and ocean components has a significant influence on global thermohaline circulation and sea-level changes, and thus climate change. This study is observational research on the East Antarctic coastal system, where the observational findings are quite sparse. The primary findings of this study are; (1) basal melt process beneath Shirase Glacier Tongue caused by warm water inflow, (2) characteristics of warm water distribution in front of Totten Ice Shelf and surrounding ocean, (3) seasonal variability in properties/distributions of dense Shelf Water and offshore-origin warm water over the Cape Darnley Polynya.

研究分野：海洋物理学・極域海洋学

キーワード：東南極 氷床・海水・海洋相互作用 白瀬氷河舌 トッテン棚氷 ケープダンレーポリニヤ 沖合起源暖水 棚氷/氷舌底面融解 南極底層水

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 1. 研究開始当初の背景

南極沿岸域における氷床・海水・海洋の相互作用は、全球規模の海洋熱塩循環・海水準の変動、ひいては気候変動に重要な役割を果たし、中でも海洋の役割は注目を集めている。氷床（氷河）と海洋の相互作用は、棚氷・氷舌（氷床が海洋に張り出して浮いている領域）の底面に暖水である周極深層水が流れ込んで生じる棚氷の底面融解プロセスが本質である。棚氷は氷河を堰き止める効果を有するため、底面融解により棚氷が薄くなる（不安定化する）と氷河流動の抑制効果が弱化し、その結果、海洋への南極氷床起源の陸氷（淡水）流出が増大する。これは、最終的に全球の海水準上昇に寄与するだけでなく、南極沿岸海洋の低塩分化をもたらす。また、海水と海洋の相互作用では、沿岸ポリニヤ（風や海流によって形成・維持される持続的な開水面・薄氷域）において活発な海水生産に伴い海洋中に塩分が付加される（ブライン排出）と、低温の高密度陸棚氷（南極底層水の母海水）が形成される。この水塊が周極深層水と混合しながら海洋の底層へと沈みこむことで南極底層水が形成され、底層水の沈み込みが全球を巡る海洋熱塩循環の重要な駆動源の1つとなる。さらに、南極沿岸海洋の低塩分化は、南極底層水の低塩分（低密度）化、ひいては熱塩循環の駆動力を弱体化させる。

以上のように、南極沿岸域は（1）暖水（周極深層水）の流入、（2）棚氷底面融解、（3）海水生産に伴う高密度陸棚氷（南極底層水）形成、の3つの主要なプロセスによって特徴付けられ、卓越するプロセスは海域間で異なるが、特に観測空白域が多い東南極沿岸域では、各素過程に関する基礎的な観測的知見さえ乏しい。このような背景に起因し、南極氷床の70%を占める東南極氷床の融解メカニズムは未解明の部分が残されており、将来予測における大きな不確実性の要因となっている。

## 2. 研究の目的

本課題では、同じ東南極内でも卓越する南極沿岸プロセスが異なると考えられる白瀬氷河域（リュツォ・ホルム湾）とケープダンレーポリニヤ域の2海域に着目し、東南極における氷床・海水・海洋相互作用の全容解明に向けた基礎的知見の獲得を目的とする。現場観測だけでカバー可能な時空間範囲には限りがあるため、観測手法を軸とした数値モデルとの融合研究を遂行し、この相互作用全体における暖水流入の影響評価を行う。

## 3. 研究の方法

(1) JARE58 次隊および JARE59 次隊（JARE: 日本南極地域観測隊）にて、砕氷船「しらせ」でリュツォ・ホルム湾の湾口から白瀬氷河舌の前面に至る広域海洋観測を実施し、良好な物理パラメータ（水温・塩分・溶存酸素）の鉛直プロファイルおよび海水サンプル（酸素同位体比、栄養塩などの分析用）を取得した。また、白瀬氷河舌上では長期間にわたるアイスレーダー（ApRES）観測を実施し（現在も継続中）、得られた氷厚の時系列データから白瀬氷河舌の底面融解強度を推定・評価した（研究協力者：英国南極観測局・Keith Nicholls 博士）。さらに、現場観測の結果から導かれた白瀬氷河域における氷床海洋相互作用に関する研究結果を、海洋・海水・棚氷結合モデルによる実験結果と比較・統合した（研究協力者：海洋研究開発機構・草原 和弥 博士）。

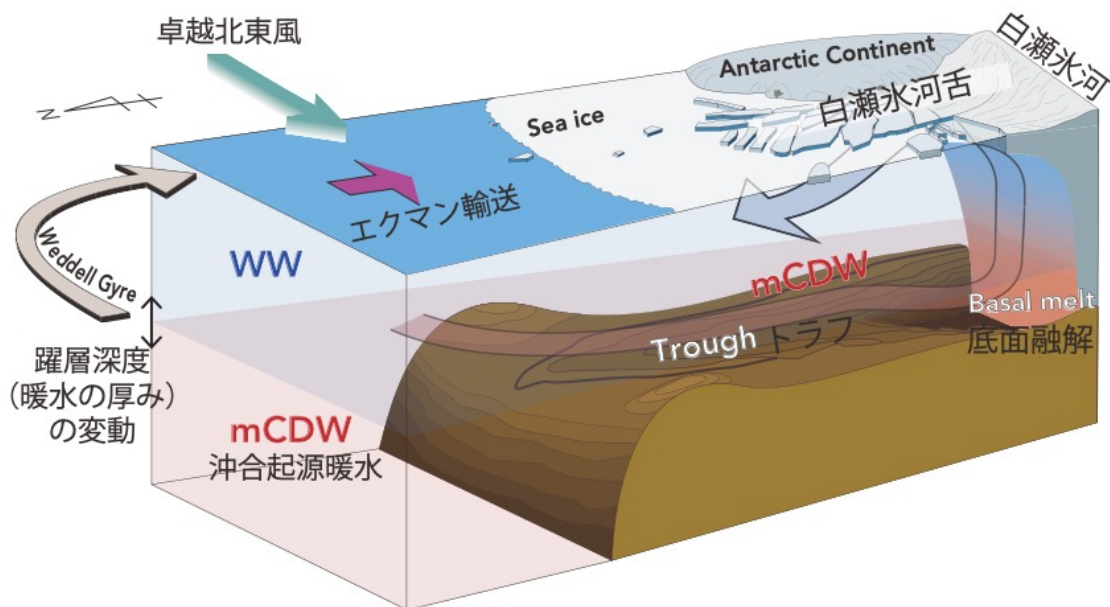
(2) 東南極で最も融解損失が加速しているトッテン棚氷の前面海洋（JARE59 次隊、砕氷船「しらせ」、2018年3月）および近傍沖合の大陸斜面域（水産庁「開洋丸」南極調査航海、2019年2月）の多地点にて空間的に詳細な海洋観測を実施し、物理パラメータのプロファイルと海水サ

サンプルを取得した。当初、トッテン海域を対象とした観測の実施および研究課題は計画していなかった。しかし、暖水流入によるトッテン棚氷の顕著な底面融解に関する学術論文が研究期間中に発表され (Rintoul et al., 2016), 当該海域における観測実施の重要性が益々高まったため、氷床融解に対する海洋の本質的役割の解明に一層の重点を置いた全体計画へと変更した。

(3) 東南極の主要な南極底層水形成域・ケープダンレーポリニヤにおける、既存の時系列係留観測データおよびバイオリギングデータを用いて、当該海域での活発な海水生産に伴い形成される低温・高密度陸棚水 (南極底層水の母海水) および沖合から流入する暖水の水塊特性と空間分布の季節変動を調べた。

#### 4. 研究成果

(1) リュツォ・ホルム湾の湾口から白瀬氷河舌の前面に至る、広域海洋観測データの解析結果を軸とし、数値モデルや測地・雪氷学分野 (アイスレーダー観測) との融合研究を行い、「白瀬氷河舌の下に 0 度を超える非常に温暖な沖合起源の暖水が流入することで顕著な底面融解が生じ、その融解強度は卓越北東風による暖水流入量の変動を介してコントロールされる」というメカニズムを提唱した (Fig.1)。この研究成果を国際学術誌 (*Nature Communications*) に投稿し、現在論文改訂中である。西南極地域と比べて圧倒的に知見が乏しい東南極の「暖水流入」に伴う底面融解プロセスの知見を得たと同時に、これは日本による初めての氷床海洋相互作用に関する観測研究成果である。



**Fig. 1:** 一連の海洋と白瀬氷河舌の相互作用 (底面融解プロセス) を示す模式図 (Hirano et al., *Nature Communications*, under minor review)。 (1) リュツォ・ホルム湾内への沖合起源暖水の輸送, (2) 深いトラフに沿った白瀬氷河舌下への暖水流入, (3) 暖水による白瀬氷河舌下の顕著な底面融解および、氷河融解水の流出。表層エクマン力学を介し、卓越北東風の季節変動が暖水の厚みひいては白瀬氷河舌の底面融解強度をコントロールする。

(2) JARE (砕氷船「しらせ」) や水産庁の南極調査航海 (「開洋丸」) に参加し、これまで海洋観測実績が極めて乏しいトッテン棚氷の周辺海域 (前面海洋および近傍大陸斜面域) における海洋観測データの取得に成功した。得られた広域かつ空間的に詳細な海洋観測データを解析し、トッテン棚氷の近傍には 0 度を超える非常に温暖な沖合起源水が分布していること、また過去の観測 (1 例のみ, *Rintoul et al.*, 2016) よりも高温の暖水が棚氷下へと流入している実態が観測から示された。さらに、主に「開洋丸」で取得した観測データの解析結果から、大陸斜面以北に定常的に複数存在する中規模渦が、沖合起源暖水の極向き (大陸方向) 輸送において重要な役割を果たしていることが示唆された。

(3) 東南極の主要な南極底層水形成域・ケープダンレーポリニヤにおける、既存の時系列係留観測データとバイオリングデータを用いて、当該海域における活発な海水生成に伴い形成される低温・高密度陸棚水 (南極底層水の母海水) および沖合から流入する暖水の水塊特性と空間分布の季節変動を調べた。高密度陸棚水の形成・季節発展は、海水生産の季節変動だけでなく、東方のアメーラ棚氷域 (沿岸流の視点では上流) からの水塊移流の影響を考慮することで、より良く説明可能であることが分かった。またポリニヤの中でも、特に大陸斜面近傍では沖合起源暖水の顕著な貫入が認められ、その下方を沈み込む高密度陸棚水と混合して底層水が形成されている状況が明らかになった。このように、陸棚上 (ポリニヤ域) から上部大陸斜面域における南極底層水の初期形成プロセスに関する基礎的知見が得られた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Makabe Ryosuke, Tanimura Atsushi, Tamura Takeshi, Hirano Daisuke, Shimada Keishi, Hashihama Fuminori, Fukuchi Mitsuo	4. 巻 12
2. 論文標題 Meso-zooplankton abundance and spatial distribution off Lutzow-Holm Bay during austral summer 2007-2008	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 25 ~ 33
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polar.2016.09.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Murase H. Abe K., Matsukura R., Sasaki H., Driscoll R., Driscoll S., Schaafsma F. L., Regteren M. van, Yang Q., Ohshima H., Ohshima K., Sugioka R., Tong J., Yamamoto N., Doiguchi H., Briggs E., Doi K., Hirano D., Katsumata K., (以下14名)	4. 巻 WG-EMM-2019/42
2. 論文標題 Cruise report of multidisciplinary ecosystem survey in the eastern Indian sector of the Antarctic (CCAMLR Division 58.4.1) with a focus on Antarctic krill during 2018/19 season by the Japanese survey vessel, Kaiyo-maru	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Report of the Working Group on Ecosystem Monitoring and Management, CCAMLR	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 菅沼 悠介, 石輪 健樹, 川又 基人, 奥野 淳一, 香月 興太, 板木 拓也, 関 宰, 金田 平太郎, 松井 浩紀, 羽田 裕貴, 藤井 昌和, 平野 大輔	4. 巻 掲載確定
2. 論文標題 東南極における海域-陸域シームレス堆積物掘削研究の展望	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Aoki, S., K. Ono, D. Hirano, and T. Tamura	4. 巻 掲載確定
2. 論文標題 Continuous winter oceanic profiling in the Cape Darnley Polynya, East Antarctica	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 Hirano D., Tamura T., Kusahara K., Ohshima K. I., Ushio S., Simizu D., Ono K., Aoki S.
2. 発表標題 Strong ice-ocean interaction at Shirase glacier tongue, East Antarctica
3. 学会等名 IUGG 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kusahara K., Hirano D., Fujii M., Fraser A., Tamura T.
2. 発表標題 Modeling strong basal melting at the Shirase Glacier Tongue, East Antarctica
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mizobata K., Tamura T., Hirano D., Makabe R.
2. 発表標題 The investigation into the Ice shelf-Ocean Interaction of East Antarctica with special focusing on the Ocean Circulation
3. 学会等名 第10回極域科学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirano D., Mizobata K., Tamura T., Ito M., Yamazaki K., Yoichiro K., Kiuchi M., Murase H., Sasaki H., Aoki S.
2. 発表標題 Offshore-origin warm water inflows toward Totten Ice Shelf, East Antarctica
3. 学会等名 第10回極域科学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤優人, 平野大輔, 真壁竜介, 高橋啓伍, 大島慶一郎, 田村岳史, 青木茂
2. 発表標題 南極ケーブダンレーポリニヤ域における植物プランクトンの秋季大増殖を伴う新成氷生成
3. 学会等名 2019年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野大輔, 田村岳史, 溝端浩平, 伊藤優人, 山崎開平, 國府陽一郎, 木内政彰, 村瀬弘人, 青木茂
2. 発表標題 トッテン棚氷近傍海域における暖水分布
3. 学会等名 2019年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 草原和弥, 平野大輔, 藤井昌和, Fraser Alexander, 田村岳史
2. 発表標題 南極リュツォ・ホルム湾における海洋-氷床相互作用に関する数値モデリング
3. 学会等名 2019年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅沼悠介, 石輪健樹, 川又基人, 奥野淳一, 香月興太, 板木拓也, 田邊優貴子, 関宰, 金田平太郎, 松井浩紀, 羽田裕貴, 須藤斎, 藤井昌和, 平野大輔
2. 発表標題 東南極における海域-陸域シームレス堆積物掘削研究の展望
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木茂, 小野数也, 平野大輔, 伊藤優人, 野口智英, 小澤知史
2. 発表標題 First continuous profiler observation of wintertime Antarctic coastal polynya
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Aoyama Y., Doi K., Hirano D., Tamura T., Aoki S., Shibuya K.
2. 発表標題 Vertical ice flow motions obtained from year-round GNSS observations on Shirase Glacier, Antarctica
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 勝又勝郎, 平野大輔, 野村大樹, 山崎開平, 國府陽一郎, 木内政彰, 青木茂, 村瀬弘人
2. 発表標題 2018/2019 夏季豪州南極海盆南部の海洋・物質循環 開洋丸 KY18-04 航海速報
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirano, D., T. Tamura, K. Kusahara, K. I. Ohshima, S. Ushio, D. Simizu, K. Ono, S. Aoki
2. 発表標題 Strong ice-ocean interaction at Shirase Glacier Tongue, East Antarctica
3. 学会等名 The 1st GRAntarctic-NIPR Joint International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年



1 . 発表者名 Kokubun, N., Y. Tanabe, T. Tamura, V. Mensah, D. Hirano, S. Aoki, A. Takahashi
2 . 発表標題 Wintering habitat of Weddell seals along the continental shelf off Enderby Land, East Antarctica
3 . 学会等名 The 1st GRAntarctic-NIPR Joint International Symposium ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kiuchi, M., D. Nomura, D. Hirano, T. Tamura, T. Noguchi, G. Hashida, S. Aoki
2 . 発表標題 The effect of basal melting of the Shirase Glacier on the CO2 system in Lutzow-Holm Bay, East Antarctica
3 . 学会等名 The 1st GRAntarctic-NIPR Joint International Symposium ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Yamane S., S. Sugiyama, M. Minowa, M. Ito, D. Hirano
2 . 発表標題 Subshelf environment of Langhovde Glacier, Antarctica
3 . 学会等名 The 1st GRAntarctic-NIPR Joint International Symposium ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Murakami, K., D. Nomura, G. Hashida, S. Nakaoka, Y. Kitade, D. Hirano, K. I. Ohshima
2 . 発表標題 Carbon transport by Dense Shelf Water formation in the Cape Darnley Polynya, East Antarctica
3 . 学会等名 The 1st GRAntarctic-NIPR Joint International Symposium ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirano, D., T. Tamura, S. Ushio, K. I. Ohshima, D. Simizu, K. Ono, T. Noguchi, S. Aoki
2. 発表標題 Observations of ice tongue-ocean interaction at Shirase Glacier
3. 学会等名 Polar2018 SCAR/IASC Open Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平野大輔, 田村岳史, 大島慶一郎, 牛尾収輝, 清水大輔, 小野数也, 青木茂
2. 発表標題 東南極・白瀬水河における氷舌 海洋相互作用
3. 学会等名 日本海洋学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木茂、田村岳史、平野大輔、伊藤優人、小野数也、柏瀬 陽彦
2. 発表標題 Under-ice application of Remotely-Operated Vehicle on the Antarctic continental shelf
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirano Daisuke, Tamura Takeshi, Ushio Shuki, Ohshima Kay I., Simizu Daisuke, Ono Kazuya, Noguchi Tomohide, Aoki Shigeru
2. 発表標題 Observations of ice tongue-ocean interaction at Shirase Glacier
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Sugiyama Shin, Fukamachi Yasushi, Ohshima Kay I., Aoki Shigeru, Aoki Teruo, Yamamoto-Kawai Michiyo, Kikuchi Takashi, Hirano Daisuke
2. 発表標題 Abrupt changes and interactions of polar oceans and ice sheets as a research subject in Master Plan 2020
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hirano Daisuke, Tamura Takeshi, Ushio Shuki, Ohshima Kay I., Simizu Daisuke, Ono Kazuya, Noguchi Tomohide, Aoki Shigeru
2. 発表標題 Observations of ice tongue-ocean interaction at Shirase Glacier
3. 学会等名 The 8th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	草原 和弥  (KUSAHARA Kazuya)		
研究協力者	ニコルズ キース  (NICHOLLS Keith)		