

— 2015年度日本海洋学会賞受賞記念論文 —

海水域の変動とその海洋循環に与える影響に関する研究*

大島 慶一郎†

要 旨

海洋の大規模な中深層循環・物質循環は、極域・海水域での海水生成による高密度水生成が起点になっている。全海洋の深層に広がる底層水が作られる南極海のような極海では、観測の困難さによって、海水生成及び中深層水の形成・循環は十分わかってはいなかった。衛星マイクロ波放射計データによる薄氷厚アルゴリズムが開発され、熱収支計算を組み合わせることで海水生産量を見積もる手法が考案された。南大洋の海水生産量マッピングからは、ロス海に次ぐ第2の海水生産量域が東南極のケープダンレー沖にあることが示され、ここが未知(第4)の南極底層水生成域であることが、直接観測から明らかになった。北半球最大の海水生産量域は、オホーツク海北西ポリニヤであることが示され、ここを起点として北太平洋の中層まで及ぶオーバーターンが形成されることに対応する。西岸境界流である東樺太海流はこのポリニヤで形成される高密度陸棚水を南方へ運ぶ役割を持つ。この50年のオホーツク海風上域での温暖化が、海水生産の減少とそれに伴う高密度水減少をもたらし、北太平洋のオーバーターンを弱体化させていることも示唆された。これらの研究により、海水生産量と中深層水の形成・変動に強い関係があることが定量性をもって明らかになってきた。

キーワード：熱塩循環、南極底層水、高密度陸棚水、沿岸ポリニヤ、海水生産量、衛星マイクロ波放射計、オホーツク海、東樺太海流

1. はじめに

世界の海洋の深層にまで及ぶ最も大きな循環は、重い水が沈み込み、それが徐々に湧き上がってくる、という

密度差による熱塩循環です。海水は冷たくなればなるほど密度が高く重くなるので、重い水の潜り込みは寒冷な海で起こります。世界中の海の深層水の元となる重い水は、北大西洋の北部と南極海で潜り込み、1500～2000年程度で世界の海洋を一巡りするゆっくりした循環、海洋深層大循環が作られます(角皆, 1981)。この循環は、極域の冷たい海水を低緯度へ、低緯度域の暖かい海水を極域に運ぶことで、両海域の温度差を和らげ、地球の気候をマイルドにしています。海は莫大な熱容量を持つため、重い水の沈み込む量や場所が変わると熱塩循環が変わり、その結果として地球気候が激変したことが、過去

* 2017年9月29日受理; 2017年12月18日受理
著作権: 日本海洋学会, 2018

† 北海道大学低温科学研究所
〒060-0819 札幌市北区北19条西8丁目
TEL: 011-706-5481 FAX: 011-706-7362
e-mail: ohshima@lowtem.hokudai.ac.jp

の地球の歴史から示唆されています (Broecker, 2010)。このような変動は、数 100 ~ 1000 年の時間スケールを持つと考えられていますが (Siedler *et al.*, 2013), かつてない速度で温暖化が進行している現在、もっと早い速度での変動も十分に考えられます。より冷たくて重い深層水である南極底層水は、全大洋の底層に拡がっており、全海水の 30 ~ 40% をも占めます (Johnson, 2008)。太平洋では 2000 m 以深の水は 2°C 以下となっていて、そのかなりの部分は南極底層水起源の水で占められています。

塩分の高い北大西洋では、冷やされるだけで重い水が深層まで沈み込み、北大西洋深層水が作られるのに対し、南極海では、海水生成を伴って重い水が沈み込み、南極底層水が作られます。海水が凍って海水となると、海水の塩分の 7 ~ 9 割は、はきだされ (Cox and Weeks, 1974), 濃縮された高塩分水 (ブライン) が作られ、底層水の起源水となります。北半球の海水域の南限であるオホーツク海でも、活発な海水生成に伴って、北太平洋表層では最も重い水が作られます。この水は深層までは及びませんが、北太平洋全体の中層 (200 ~ 1000 m) へと潜り込み (Talley, 1991), 北太平洋の中層 (鉛直) 循環を形成します。このような中深層水の元となる重い水 (起源水) は、沿岸ポリニヤ (風や海流によって生成された海水が次々と沖へ運ばれ、疎氷域・薄氷域が維持される場所) という、限られた海域での大量の海水生成により形成されると考えられています。

表層から 1000 m 程度までに卓越する風成循環に関しては、その実態や力学は定量性をもってある程度わかっているのに対し、熱塩 (中深層) 循環に関しては、その理解は定性的なものに留まっていて、その実態もよくわかっているとは言えません。湧き上がる方に関しては、それを担う鉛直拡散が、どこで、どのようなメカニズムで生じているかが、海洋物理の最重要テーマの一つとして認識され、それがほぼ潮流混合によることも含め、定量的な理解が現在進みつつあります (例えば、日比谷, 2009)。しかし、重い水が沈み込む方に関しては、観測の困難さから、沈み込みが起こる場所さえ、十分にわかっているとは言えない状況にありました。

海水域は重い水が沈み込む熱塩 (中深層) 循環の起点となっている海域です。私がこの 10 ~ 20 年行ってきた

研究、受賞課題となった研究は、どこで大量の海水が生産され重い水の生成が起こるのかを現場観測と衛星観測から明らかにし、それらが中深層循環及びその変動に与える影響を解明する、というものです。本稿では、受賞課題の研究内容の紹介とともに、私が海洋学の道に入ってからこれらの研究に行き着くまでのいきさつと、どのようなことを考えてきたか、も交えて述べます。なお、以下で言及する方々の所属・職は、断りが無い以外は、当時の所属・職を記しました。

2. 海水の気候への役割

1980 年初頭に北海道大学地球物理学科に海洋物理学研究室が新設されました。私は、その研究室の一期生として、学部 4 年の卒業研究を行うことを決めました。赴任されて間もない金成誠一教授の授業や話を聞き、流体力学が面白そうだったこと、これからの研究分野と直感したこと、あと単純に海が大好きだったこと、が海洋物理学研究室を選んだ理由だったと記憶しています。研究室に入ると、フロリダ州立大学に留学中だった竹内謙介講師、東北大学から小賀百樹助手が加わり、同期の篠田敏昭 (現テキサス A&M 大学 准教授) くんら学生も揃い、主体性第一の超自由な研究室がスタートしました。そのなかで私は、木村竜治さんの本、地球流体力学入門 (木村, 1983) に感銘を受け、竹内謙介さんから頂いたイルカブックス一式 (吉田耕造東大教授の遺作の啓蒙書) に心を動かされ、地球流体力学 (Geophysical Fluid Dynamics: GFD) に魅せられて、大学院修士・博士課程へと進学しました。そんなことで、大学院学生時代は、斜面上を流れる沿岸流の順圧不安定論とその宗谷暖流への応用 (Ohshima, 1987a; 1987b), という GFD 研究を進めました。自由放任な研究室の居心地は、自分には非常によかったのですが、日米での研究の差を感じてもおり、ハワイ大学の留学奨学金制度に応募・合格し、海外留学を予定していました。そんな状況のときに、北大低温科学研究所海洋学部門の助手就職への打診を受けました。条件としては、数年後に日本南極地域観測隊に越冬隊員として参加し、海洋観測に従事する、というものでした。未知の部分が大きい極域の海は魅力十分であり、何より日本で大学の研究職につけるとは思ってもみなかったの

で、僥倖と感じ、海外留学の気持ちを封印して、就職を選び、極域海洋学への道に進むことになったわけです。

海洋学部門研究室は、それまで海水の物性研究を中心課題としていて、海水の熱的性質 (Ono, 1967) や結晶構造 (Wakatsuchi and Kawamura, 1987) などに大きな成果をあげていました。しかし、私が職を得たタイミングは、研究室のテーマを、それまでの実験を主とする海水の物性研究から、海水の海洋大循環や気候への役割に関する研究へシフトさせようとしていた時期でした。全く海水に無知の私を採用した意図もそこにあったようです。

海水は、以下の3つの特性・役割により、気候 (変動) に対して大きなインパクトを持ちます (Fig. 1)。

- A) 熱と塩の再分配・輸送 (中深層水の形成)
- B) 高アルベド (日射に対する反射率が大きい)
- C) 大気-海洋間の断熱材

これらの特性により、海水域は温暖化等の気候変動に対して鋭敏に応答するとともに、海水域・極域が全球の気候変動を増幅 (polar amplification) し、決定しうることもなります。しかし、1990年代までは、これらの効果の重要性は、定性的にはわかっているにもかかわらず、定量的な議論はほとんどされていませんでした。ごく限られた地点での限られた現場観測からだけでは議論が困難だったことによります。

Aの熱の再分配・輸送に関して、部門の小野延雄教授

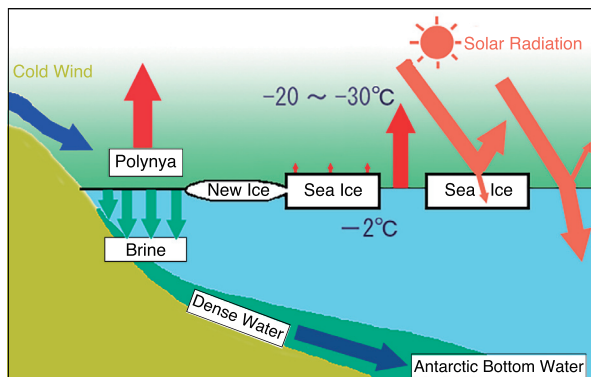


Fig. 1. Schematic of the role of sea ice in the climate system. (A) Redistribution of heat and salt/freshwater (deep/intermediate water formation). (B) High albedo. (C) Heat insulator between atmosphere and ocean. Drawn by Dr. Kazuya Ono.

は、自らの海水の熱的性質の研究から、結氷・融解に伴う潜熱 (海水温 75 °K の変化に相当) の重要性を説かれていました。海水が生成された後、輸送されて別の海域で融解すると、大きな (負の) 熱の輸送が生じることになります。一方、若土正暁助教授は、海水生成に伴うブライン排出による中深層水の形成に注目し、ブライン排出の室内実験 (Wakatsuchi and Ono, 1983) などを行っていました。しかし、これらの効果を直接的に現場観測から捉えるのは簡単ではありません。

そのような状況のときに、日本南極地域観測事業 (Japanese Antarctic Research Expedition: JARE) において、南極気候研究 (Antarctic Climate Research: ACR, 1986 ~ 1992年) という大きなプロジェクトが立ち上がりました。その中で海水・海洋研究は重要な位置づけでした。しかし、当時の国立極地研究所には海水・海洋の研究者がおらず、北大低温科学研究所がそれを担うことになりました。当時、日本主体で極域・海水域の観測研究を行うための唯一の機会が JARE での観測だったわけです。そのような中で、私は JARE に参加することになります。

3. 南極地域観測隊での観測

南極昭和基地周辺で本格的な通年での海洋観測を行ったのは、第 17 次隊 (1976 年) の若土さんが初めてであり (Wakatsuchi, 1982), それまでは南極観測船「そうや」と南極観測船「ふじ」によって海上保安庁が夏季に行った外洋域での観測に限られていました。昭和基地はリュツォホルム湾のオングル島にあり、周辺の海は冬季には定着氷に覆われます。観測は定着氷に穴を開けて、そこに積み込んだウィンチ・ワイヤーを用いて測器を降ろして観測することになります。若土さんの後は、第 23-25 次隊で福地光男さんら海洋生物グループが引き継いで海洋観測を行っていました。しかし、これらの観測は基地周辺に限られていました。

ACR 海洋・海水プロジェクトは、同じ研究室の瀧澤隆俊さんリーダーのもと、第 31 次隊では瀧澤さん・牛尾収輝さん、第 32 次隊 (1990. 11 ~ 1992. 3) では河村俊行さんと私が参加、2 年余りにわたる越冬観測として行われました。主には、リュツォホルム湾全域の定着氷上を、橇を曳いた雪上車で数週間旅行して、海洋観測を行いました。

た (Takizawa *et al.*, 1992; Ohshima *et al.*, 1996)。また、湾の沖にあるリード・ポリニヤ域では小型航空機による通年の AXBT 観測も行いました (Ushio *et al.*, 1999)。予算に限りもあり、東大海洋研からナンセン採水器のお古一式を頂いて採水観測を行いました (Plate 1 の (a))。観測するためには、まず採水器や CTD を海中へ入れるための穴を海水に開ける必要があります。しかし、定着水の厚さが 4~5 m と、予想を大きく上回っていたため、作業の 90% 以上は、 -30°C 以下にもなる野外での海水の穴あけ作業となりました (Plate 1 の (b))。越冬中の最大のテーマは、限られた機材でいかに効率的に海水に穴を開けるか、でした。昭和基地の作業棟で、鉄パイプ等の材料から自分で溶接なども行って、穴あけのための機器作りも行いました。このような経験を通じて、手弁当観測の原点を学ぶことになり、これはその後の砕氷巡視船「そうや」や北極海での観測に活かされることとなります。

このようにして 4 人で丸 2 年間、リュツォホルム湾内の海洋構造の時系列データを取得することに費やしたわけですが、研究成果としてはローカルな研究以上には発展はしませんでした。この 2 年間でわかったことは、この海域では、夏に海水が融解して低塩化した表層水が、秋に東風の強化によって、エクマン収束により沿岸域に厚く溜まり、底層水ができにくい状況を作っているとい

うものでした (Ohshima *et al.*, 1996)。南極沿岸域の重要性は、そこで重い水が沈みこみ、底層水が形成され、深層循環の起点になっていることです。他国が底層水生成域であるロス海やウェッデル海、さらには第 3 の底層水生成域であるアデリーランド沖で底層水研究に大きな成果をあげつつある中で、底層水形成に関わらないであろう昭和基地のある東南極を研究対象海域とする日本からインパクトのある南極観測研究を発信するのは難しいのかな、と思うに至りました。そういうこともあって、その後しばらくは、南極に関しては観測研究から離れることとなります。実は、昭和基地の東方 1200 km に未知の南極底層水の生成域があること、それをこの 20 年後に発見することになるとは、この時には夢にも思っていませんでした。

南極沿岸の海洋研究には、もう一点、重要な点があります。南極氷床は、大気からの降雪で涵養され海洋で融解されますが、今世紀になり、南極氷床の海洋による融解が加速してきていることが明らかになってきました (Paolo *et al.*, 2015)。南極氷床の 1 割が解けただけでも全世界の海水準が約 6 m も上昇します。昇温による海水膨張によって生じる海水準上昇はせいぜい 1 m 程度であることを考えると、今までほとんど観測研究がなされていなかった、氷床の海洋による融解プロセスに対する研究が急務であることがわかります。昭和基地のあるリュ

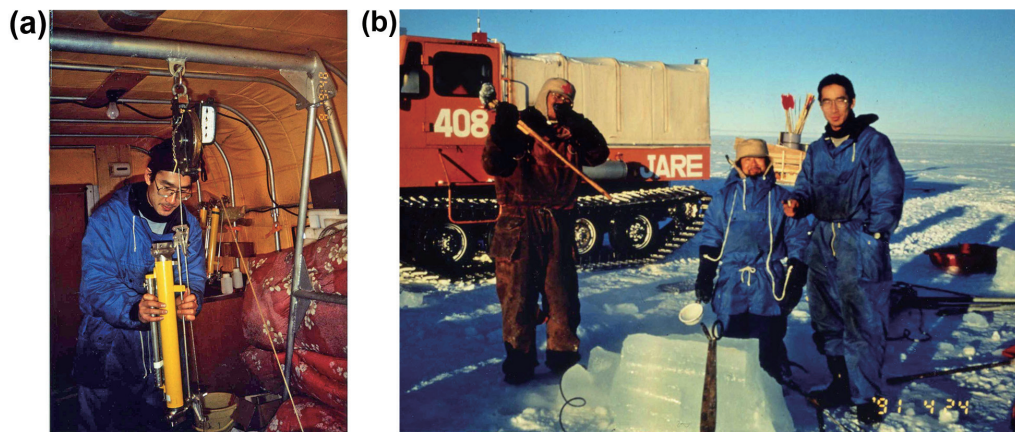


Plate 1. Photographs during wintering of the 32nd Japanese Antarctic Research Expedition (1990-1992). (a) Water sampling with Nansen Bottle in the caboose on the fast ice. (b) Drilling of sea ice cover to carry out the oceanographic observation.

ツォホルム湾の背後には、南極の中でも流動スピードが非常に速い「しらせ氷河」が存在します。JAREでも、氷河と海洋の相互作用をターゲットとする重点観測研究が2016年度から開始されました。ACRプロジェクトでは、「しらせ氷河」近傍でも海洋観測を行っており、実は、そのデータには、氷河が融解している情報がしっかり含まれていたのです。当時の我々は全くそれに気づいていませんでした。重点観測が計画されたのを機に、5インチフロッピーディスクに眠ったままになっていた25年前の海洋データを何とか読み出して、平野大輔さん(現北大低温研)が詳しく解析したところ、「しらせ氷河」が海洋によって融解されているシグナルが見事に捉えられたのです。

このように、このACRプロジェクトでは、我々の無知もあり、海洋に関しては南極底層水や氷床海洋相互作用に関わるようなインパクトのある研究を発信することはできずに終わってしまいました。一方で、夏の南極輸送船「しらせ」による海洋・海氷観測を契機に、当初は考えていなかった、前節Bの海氷のアルベド特性に関わる研究が大きく進展することになります。南極海のような季節海氷域では、表面融解が主である多年氷域とは違って、夏季にアルベドの低い開水面で日射が吸収され、その海に入った熱により海水が底面・側面から融解されること、を定量的に示しました(Ohshima *et al.*, 1998; Nihashi and Ohshima, 2001a)。さらに、海氷・海洋アルベドフィードバック(一旦、何らかの過程で海氷密接度が減少すると、開水面はアルベドが低いため、多量の日射を海が吸収、その海の熱により海氷融解が加速され、ますます開水面の面積と日射の吸収が増え、さらに海氷密接度が減少する、という効果)が海氷後退の年々変動を説明することも示しました(Nihashi and Ohshima, 2001b; Ohshima and Nihashi, 2005)。現在、南極の海氷面積の変動に顕著なトレンドはないのですが、北極海では2000年代に入り夏の海氷面積が1980年代に比べ半減、北極海は多年氷域から、夏に海氷のない季節海氷域へとシフトしつつあります。季節海水化の中で、我々が南極海で示した海氷・海洋アルベドフィードバック効果が、今の北極海の海氷激減のメカニズムの1つとして適用しうることを最近になって示すことができました(Kashiwase *et al.*, 2017)。

話を越冬観測に戻しますと、やはりこの経験は強烈なもので、観測に関しては、私は特に以下のことを学びました。

- (a) 段取りが重要
- (b) 先をイメージして仕事をする
- (c) 総花的な観測は避ける

(a)の段取りが重要であることは、すべての観測の基本中の基本ですが、観測隊参加当時の私はよくわかっていませんでした。特に、極域での観測は、時間・機会が限られている場合が多く、その中で最大のパフォーマンスをあげることを常に考える必要があり、予定されていたことができない場合の第2、第3のバックアップも考える必要があります。越冬経験後に私が最も変わったことは、(b)の、人がどう思うか感じるかも含めて、常に先をイメージして仕事に取り組むようになったことです。観測に限らず、共同で仕事をするときに最重要な進め方と感じています。(c)ですが、観測が総花的であると、中途半端なデータが多くなり、補足するのに観測後に多大な労力を費やすこととなります。そのうえ、多大な時間を使った割には決定力ある論文・研究にはなりません。ACRの観測は、越冬観測ありきで始まったプロジェクトということもあり、焦点が絞りきれず、総花観測パターンに陥ってしまった感は否めません。この時の経験から、観測を計画する時は、総花的ではなく一点集中で、という方針が基本になっています。おそらく、この経験はその後のオホーツク海や南極海、北極海での観測に活かされていると思います。ただし、総花観測もよい部分はあって、私自身に関して言えば、様々な観測を体験できたのは、その後の財産にはなりました。

4. オホーツク海での観測

ACR観測を終えて、南極海に対して日本主導で意義ある観測を行うのは簡単ではないと実感しました。そこで、我々は観測のターゲットをオホーツク海に移すことを考えました。それまで、オホーツク海はそのほとんどがロシア領海であり、冬季は海水で覆われるということもあり、観測データ(特に冬季)が極めて少なく、その位置づけは単に北太平洋の縁海の1つというものでしかありませんでした。しかし、1990年代に入り、Talley

(1991)ほかの研究を契機に、塩分極小を特徴とする北太平洋中層水を含めて、北太平洋の中層水の潜り込み (ventilation) の起源はオホーツク海にあるのでは、という議論がされ始めました (例えば, Yasuda, 1997)。このことは、気候値による等密度面マップからも示唆されます。Fig. 2 は $27.0\sigma_\theta$ 面 (深度にすると 300 ~ 500 m) における水温と溶存酸素の分布図ですが、低温で高酸素濃度の水がオホーツク海をソースに拡がっているような分布になっています。中層の水は等密度面に沿って流動します。それを踏まえると、Fig. 2 は、オホーツク海で、(高酸素であることから) 表層から、(低温であることから) 結氷に伴って、中層まで潜り込む密度の海水が生成され、北太平洋全域に広がっていることを示唆しています。現在では、須賀利雄さんらが作成したハイドロベース (Macdonald *et al.*, 2001) 等から、さらに詳しい拡がりの様子がわかります。

オホーツク海において、データの無い、重い水が生成される冬季に、なんとか観測ができないか、我々が住む北海道はオホーツク海に接しているのだから地の利があるはず、と考えました。当時 (現在も)、海上保安庁では毎年、砕氷巡視船「そうや」により冬季の海水期にオホーツク海でパトロールを兼ね観測を行っていました。そこで、1996年2月、海上保安庁の協力を得て同乗させて頂き、電動ウィンチを持ち込むなどして、初めて砕氷巡視船「そうや」での本格的な採水観測にチャレンジし、冬季の海水下のデータを取得しました (Ohshima *et al.*, 2001; Mizuta *et al.*, 2004)。しかし、4年間の「そうや」観測では中層水形成に関する決定的な観測はできず、やはりロシア領海内の本丸を観測しなければ、鍵となる海洋のデータを得るのは難しい、ことを思い知らされました。一方で、「そうや」は、海水の直接観測には極めて貴重なプラットフォームであることを実感もしました。そこで、5年目 (2000年) からは、観測も海洋中心から海水中心に移行させ、リーダーも私から海水専門の豊田威信さんに変更しました。「そうや」での海水観測は、豊田さんを中心に、その後20年以上継続して行われ、氷厚の発達過程など、多くの成果をあげています (例えば, Toyota *et al.*, 2004; Toyota *et al.*, 2007)。

砕氷巡視船「そうや」は観測船ではないので、ウィンチなどの設備はなく、その船上での観測は、大学院生と

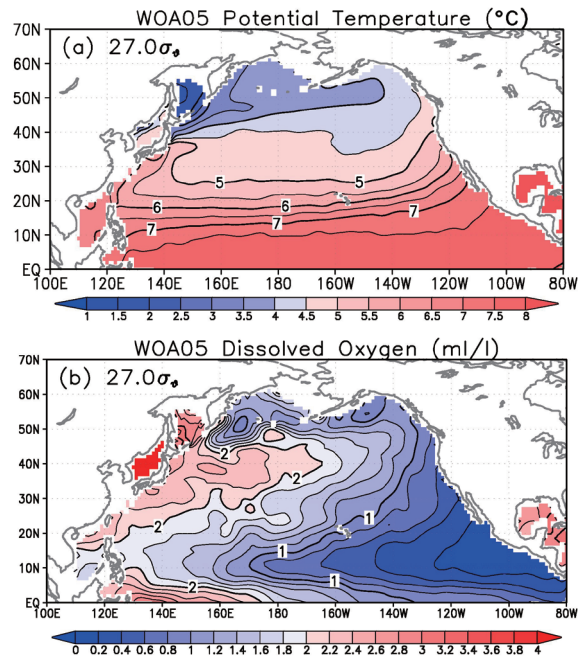


Fig. 2. Horizontal distribution of (a) potential temperature ($^{\circ}\text{C}$) and (b) dissolved oxygen content (mL L^{-1}) on the $27.0\sigma_\theta$ isopycnal surface in the North Pacific. These maps are drawn by Dr. Nakanowatari, based on World Ocean Database 2005 (Boyer *et al.*, 2006).

いっしょに自分達で工夫しての手弁当観測でした。JAREでの経験は活かされましたが、不器用で作業センスのない私よりずっとセンスのよい学生達に助けられて何とか観測できた、という感じでした。学生からみると、現場で生の海水が見られる上に、観測の原点的な手弁当観測を体験でき、先生よりできるという自信がつく、ことになります。今にして思えば、凶らずも効果的な教育効果を生んだのでは、と思っています。というのも、この観測体験を契機に極域海洋や海水研究に引き込まれた学生は少なくなかった (それが当人にとってよかったですかどうかはわかりませんが)。

30代後半までの自分自身を総括すると、得がたい体験は数多く積んだものの、形のある成果や論文は心許ない限り、というものです。極域海洋学の醍醐味である中深層水の研究、本丸であるその形成海域での観測には全く関わることもできず、当時は日本発信の中深層水研究は

やはり難しいのでは、と思っていました。我々には、それに必要な地の利もお金も技術もない、と実感せざるを得ませんでした。砕氷巡視船「そうや」の観測などでも、ナンセン採水器がニスキン採水器に変わったくらいで、我々は低予算、低技術の観測しか行っていませんでした。

そんな時に大きなチャンスが巡ってきました。当時の研究室の教授である若土さんを代表とする JST (Japan Science and Technology Agency) による CREST 研究「オホーツク海プロジェクト」が採択されたのです。5年間 (1997～2002年) にわたって強力なサポートを JST から頂きました。当時の若土さんからの「本丸の観測がないと、本質的なサイエンスの進展がない」という言葉は強く心に残っています。JST のサポートにより、資金難であったロシア極東海洋研究所 (FEHRI) の協力を得ることで、ロシア領海であるオホーツク海北西部の潜り込みが起こっている場所や、その水を運ぶ東樺太海流域、それが北太平洋へ流出するブッソル海峡、と本丸となる海域において直接観測ができる、つまり地の利を得たのです。このプロジェクトは米国とも共同しており、ワシントン大学の Riser 博士、スクリップス研究所の Tallay 博士、Rudnick 博士が参加し、アメリカからの最新の技術を取り入れることも可能となりました。つまり、地の利、資金、技術の3つを一挙に得たわけです。

当時、ロシア領海内の観測に関しては、日本海の研究 (CREAMS) において、九州大学 (リーダー: 竹松正樹教授) が FEHRI と共同観測することで成功を取っていました。北海道大学 (リーダー: 若土正暁教授、竹内謙介教授) もそれにならって FEHRI と共同観測することで、ほとんどがロシア領海であるオホーツク海の観測を行うことになりました。プロジェクトでは4回 (1998～2001年) の航海観測ともロシア船クロモフ号を使用しましたが、アーマードケーブルや CTD システムから用意しなければならぬ状況でした。しかし、FEHRI の乗組員や研究者の観測に対するスキルや情熱は非常に高く、日本ではありえないほどの密度の濃い効率的な観測を行うことができました。

この日露米共同プロジェクトでの1つの大きな成果は、北太平洋表層で最も重い水がオホーツク海の北西陸棚から潜り込んでいること及びそのプロセスを直接観測から明らかにしたことで、これはアメリカ側の成果として

発表されました (Shcherbina *et al.*, 2003)。日本側の大きな成果は、それまで曖昧にしかわかっていなかった東樺太海流の詳細を実測から明らかにしたことです。その流量は年平均で 7 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) 程度で対馬暖流の3倍にも及び、冬季に大きいという顕著な季節変動をすること (Mizuta *et al.*, 2003)、沿岸分枝と沖合分枝の2分枝構造を持っていること (Ohshima *et al.*, 2002) などを明らかにしました (Fig. 3)。

また、この海流は、上流で作られる低温の高密度陸棚水や海水を運ぶ海流であり (Fukamachi *et al.*, 2004; 2009)、熱塩循環や気候形成にも重要な役割を果たしています。冷たい東樺太海流水に加え、北で生成された大量の海水が南へ運ばれ融解することで、潜熱を介して負の熱を南方へ運び (熱の輸送としては北向き)、北海道東部の寒冷な気候を形成することになります (Ohshima *et al.*, 2003; Nihashi *et al.*, 2009)。小野延雄先生が指摘していた、熱を運ぶ海水の役割、をある程度定量性をもって示すことができたわけです。東樺太海流の解明は、サハリン油田からの油流出の漂流・拡散予測を可能とし、将来の災害の備えとしての流出油シミュレーション研究にも発展しました (Yamaguchi *et al.*, 2011; Ono *et al.*, 2013)。

CREST プロジェクトでは、ワシントン大学の Riser 博士と共同して、ARGO に先んじて、オホーツク海でのプロファイリングフロート観測を開始しました。その後も様々な研究資金をつないで、現在までに計30個のフロートを投下し、17年間継続して温度・塩分・溶存酸素のモニターを行っています (Ohshima *et al.*, 2005; 2010)。蓄積されたフロート観測データに過去及びロシア船クロモフ号での観測データを合わせて解析することで、この50年でオホーツク海の中層水は昇温化し、そのシグナルが北太平洋の中層に広がっていることが明らかになりました (Fig. 4; Nakanowatari *et al.*, 2007)。また、オホーツク海の上層は低塩化し高密度陸棚水の生成量が30%減少していることも示唆しました (Ohshima *et al.*, 2014)。この50年でオホーツク海の風上域での温暖化が地球平均の約3倍の速度で進行したため、それが海水生産の減少とそれに伴う高密度陸棚水減少をもたらし、結果的に、北太平洋の中層 (200～1000 m) まで及ぶオーバーターン (中層循環) を弱体化させた、というのが我々の結論です

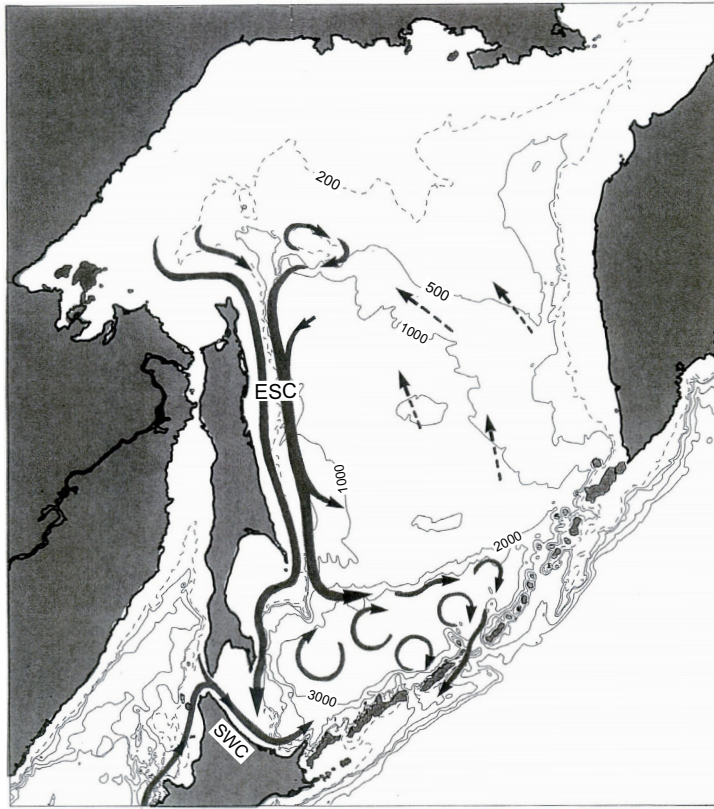


Fig. 3. Schematic of near-surface circulation for the Sea of Okhotsk as derived from satellite-tracked drifter data. Thicker arrows represent the stronger flow. The East Sakhalin Current (ESC) is composed of two (coastal and offshore) branches. SWC represents the Soya Warm Current. Modified from Ohshima *et al.* (2002).

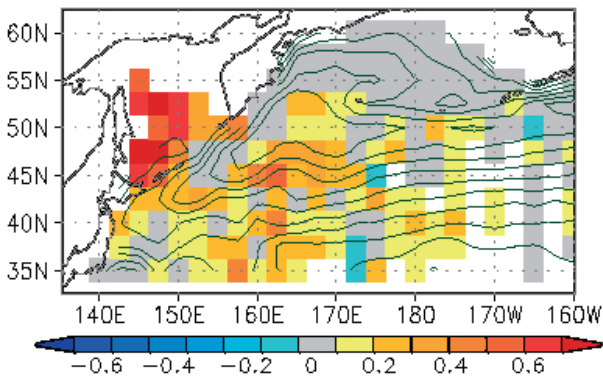


Fig. 4. Linear trends (colors in $^{\circ}\text{K } 50\text{-yr}^{-1}$) of potential temperature anomalies at density $27.0 \sigma_{\theta}$ (approx. 300–500 m deep) during 1955–2004 in the North Pacific. Green contours indicate acceleration potential at $27.0 \sigma_{\theta}$ relative to 2000 dbar. Modified from Nakanowatari *et al.* (2007).

(Nakanowatari *et al.*, 2007; Kashiwase *et al.*, 2014)。

CREST プロジェクトでは、高密度陸棚水に伴ってアムール川起源の鉄が中層に供給され (Nakatsuka *et al.*, 2002; Nishioka *et al.*, 2014), それ西部北太平洋の高生物生産をもたらす (Nishioka *et al.*, 2007) という、巨大魚附林説 (うおつきりん: 陸が海を涵養するという概念) を生み出し (白岩, 2011), 学際研究を創出することにもなりました。私が主席研究員を勤めた、プロジェクトの最後の航海観測では、高密度陸棚水や中層水が北太平洋へ流出すると考えられていたブッソル海峡での集中観測を行い、北太平洋との海水交換及び潮流混合による水塊形成に関して、初めて直接観測によって評価・研究することができました (Katsumata *et al.*, 2004; Ono *et al.*, 2007; 2013)。

以上のように、CREST プロジェクトは大きな成功を

取め、特に1998～2001年の計4回のロシア船航海がその中心的役割を果たし、多くの貴重なデータを取得することができました。私自身は、ただ1人、この4回の航海すべてに参加し、その準備・取りまとめに奔走しました。その一方で、この期間は自身の研究論文を出版する余裕は全くありませんでした。しかし、有り難いことに、プロジェクト終了後の2003～2004年の10ヶ月間、私はワシントン大学に在外研究員として滞在する機会を得ました。この10ヶ月間のサバティカル期間中は、論文執筆のみに集中5本の論文を書きあげることができ、自分の中でもプロジェクトを締めくることができました。雑用の多い日本の大学の研究者こそサバティカルが有効であることを、身を持って感じました。

5. 海水生産量のグローバルマッピング

オホーツク海プロジェクトでは、北太平洋では最も重い水がオホーツク海の北西陸棚域から潜り込んで北太平洋の中層(熱塩)循環の起点になっていることが、係留系観測(Shcherbina *et al.*, 2003)及び等密度面データセット解析(Itoh *et al.*, 2003)から明確になりました。ここで重い水が生成されるのは、ここが活発な沿岸ポリニヤ域であり、海水生産が大きいことによることは推定されませんが、どこでどの程度の海水生産があるのかは全くわかっていませんでした。当時、衛星マイクロ波放射計データから、どこに薄氷域(ポリニヤ)があるかを検知できることがわかってきました(Kimura and Wakatsuchi, 1999)。そこで、人工衛星リモートセンシングで得られる海水情報を用いて、熱収支計算から大気より奪われる熱量を計算し、海水生産量を推定する方法を考案し、オホーツク海北西部が非常に高い海水生産域であることを示しました(Ohshima *et al.*, 2003)。結局、このオホーツク海での研究が、その後大きく発展することになる海水生産量マッピングの世界初の研究になったわけです。

ちょうどその頃、学部1年時に私の授業「極域海洋学入門」の受講をきっかけとして、南極底層水の研究を何としてもやりたい、とする田村岳史くんが大学院学生として研究室に入ってきました。当時、南極底層水の生成域はウェッデル海とロス海とされ、それらの海域に全く関わりのない日本の研究者が底層水を研究対象とするこ

とは難しい状況でした。そこで、オホーツク海で行っていた、衛星リモートセンシングを利用した海水生産量のマッピングを南大洋でもやってみよう、ということになりました。海水生産と底層水形成は密接に関係しているはずですが、当時南大洋でも海水生産量を見積もるような研究は誰も行っていませんでした。

そこでまず、マイクロ波放射計から薄氷域(ポリニヤ)を検出し、その厚さを推定するアルゴリズムを南大洋で作成する、ことから始めようということになりました。アルゴリズムを作成するからには、汎用性があり、かつ全世界に認められるものでなければなりません。海水アルゴリズムはNASAのGoddard Space Flight Center(GSFC)のグループがリードしており、少なくとも彼らに認められるものでなければならぬと考えました。田村くん自身がそれを強く認識し、彼らとの共同研究を提案してきました。当時、タイミングよく、私の所で博士の学位を取得した二橋創平くんがGSFCのポスドク研究員として海水リモセングループに所属していました。そこで、二橋創平くんを介してGSFCのMarkus博士とCavalieri博士に共同研究の同意をとりつけて、薄氷厚アルゴリズムを完成させました(Tamura *et al.*, 2007)。この研究論文は、その後多くの研究に引用され、世界標準といつてよい薄氷厚アルゴリズムとなっています。

人工衛星データから薄氷厚がわかると、熱収支計算から大気より奪われる熱量が計算でき(氷が薄いほど多く熱を奪われる)、奪われた熱量から海水生産量が推定できます。そのようにして、田村くんが最初に計算した海水生産量のマップは、昭和基地の東に非常に大きなポリニヤ、高い海水生産海域が存在することを示していました。そんな強力なポリニヤがこの海域にあるという話は聞いたことがなく、はじめ、これは解析のミスによる間違いではないか?と疑っておりました。しかし、プログラムを精査しても間違いは見つからず、一方で過去論文を調べると、この海域の西には潜り込みを示唆する高酸素(Jacobs *et al.*, 1970)や高フロム(Meredith *et al.*, 2000)のシグナルが観測されていることがわかりました。このようにして、底層水形成との関係を強く意識しながら、南大洋では初の海水生産量マッピングを完成させました(Tamura *et al.*, 2008)。

Fig. 5には、最新のマッピングの結果を示しています。

このようなマッピングから、南大洋で最も海水生産量が高いポリニヤは、ロス棚氷ポリニヤであり、ここが底層水生成域であることに対応しています。マッピングによる最大の発見は、第2の海水生産域が昭和基地の東1200 kmにあるケープダンレーポリニヤであることを示したことです。海水生産量マッピングの図は、教科書 *Descriptive Physical Oceanography* (Talley, 2011) にも掲載されていますが、この教科書にもここが底層水生成域である可能性と、それを確かめるための観測の必要性が書かれています。その観測をその後、我々が行うことになるのですが、それについては次節で述べます。

マッピングからは、第3の海水生産域はメルツポリニヤとなり、この沖が第3の底層水生成域であることに対応します。ここはメルツ氷河が沖へ張り出しているため、その風下・下流に巨大ポリニヤが形成されるのですが、2010年にメルツ氷河の大崩壊が起きました。この前後の海水生産量を調べると、氷河崩壊後は生産量が激減したことが明らかになり (Tamura *et al.*, 2012; Nihashi

and Ohshima, 2015), その後の海洋観測で、ここでの底層水生成が大きく減じていることも明らかになりました (Aoki *et al.*, 2013)。このように、海水生産量を見積もる手法が開発されたことによって、後述する底層水生成域の発見に加え、底層水の変動まで予見できることが示されました。

海水生産量マッピング (Fig. 5) からは、東南極に生産量の高いポリニヤがいくつもあることがわかります。ケープダンレーの東のアメリー棚氷沖には3つのポリニヤが存在し、その3つを合わせると、ケープダンレーポリニヤに匹敵する海水生産量を持ちます。ここで、後述するケープダンレー沖のような顕著な底層水生成が生じないのは、アメリー棚氷の融解水による低塩化によることも示唆されました (Williams *et al.*, 2016)。これは、ポリニヤ海水生産による高塩化と棚氷融解による低塩化の兼ね合いが、底層水生成を決める重要なファクターであることを示唆しています。この10-20年、西南極で海洋による棚氷融解が加速していることが明らかになり (例

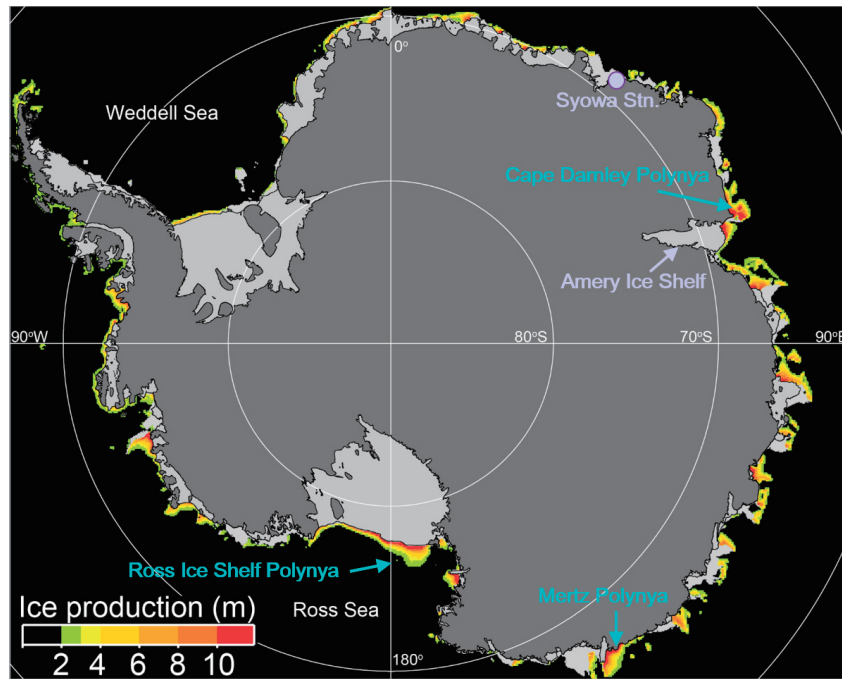


Fig. 5. Map of annual sea-ice production, represented by the ice thickness (cm), in the Southern Hemisphere, averaged over 2003-2010 (Modified from Ohshima *et al.*, 2016). Estimation is based on the AMSR-E thin-ice algorithm and heat budget calculation (Nihashi and Ohshima, 2015).

例えば, Paolo *et al.*, 2015), IPCC 第 5 次評価報告書 (Rhein *et al.*, 2013) でも大きく取り上げられています。一方で, 世界の深層水の変化 (高温低塩化) が南極底層水を起点として生じ始めており (Purkey and Johnson, 2012; Rhein *et al.*, 2013), 南極底層水の生成量は, この 40 年で半減したという研究 (van Wijk and Rintoul, 2014) さえあります。ポリニヤ海水生産と棚氷融解及びそれらの変動が, どう底層水・深層循環の変動を引き起こしているのか, 地球環境の未来を予測する上で非常に重要なテーマとなってきています。

我々のグループは海水生産量マッピングを全球で行っていて (例えば, Tamura and Ohshima, 2011), Fig. 6 に北半球のマッピングの最新版 (Ohshima *et al.*, 2016) を示します。南半球のマッピング (Fig. 5) と同じカラースケールで描いていますが, 全球で最も海水生産量が高いポリニヤは, 実は我々が最初にマッピングを行ったオホーツク海にある北西ポリニヤだったのです。マッピングからは, 北半球でこのポリニヤ次いで海水生産量が高いポリニヤは, ベーリング海のアナディールポリニヤであることも示唆されました。フロンの観測から, ベーリング海では深層水が一時的に生成されている可能性 (Warner and Roden, 1995) や, ベーリング海を含む北太平洋で過去 1.5 ~ 2 万年前に一時的に深層水が形成されていた可能性 (Okazaki *et al.*, 2010) も指摘されています。ベーリング海で深層水形成が起こっていたとすると, アナディールポリニヤがそれに強く関わっているはずで, ロシア領海ではありますが, ぜひ今後, 集中観測をしたい海域です。Fig. 6 には, 日本海でも北部のタートル海峡で比較的高い海水生産があることが示されますが, ここからの潜り込みで日本海の深層水 (の一部) が形成されるのでは, という仮説も我々は持っております (Nihashi *et al.*, 2017)。

Fig. 5 と Fig. 6 から, 両極海洋での海水生産を比較すると, 南極沿岸のポリニヤは北極海のポリニヤよりも格段に海水生産量が高いことがわかります。これは, 南極海は外洋に開かれた海なため, 海水が発散しやすく, ポリニヤができやすいのに対し, 北極海は同じ広大な海水域であっても周りを陸に囲まれ, 海水が発散しにくいと考えられます。従って, 北極海では底層に沈み込むような重い水ができません。なお, 海水生産量やそれを

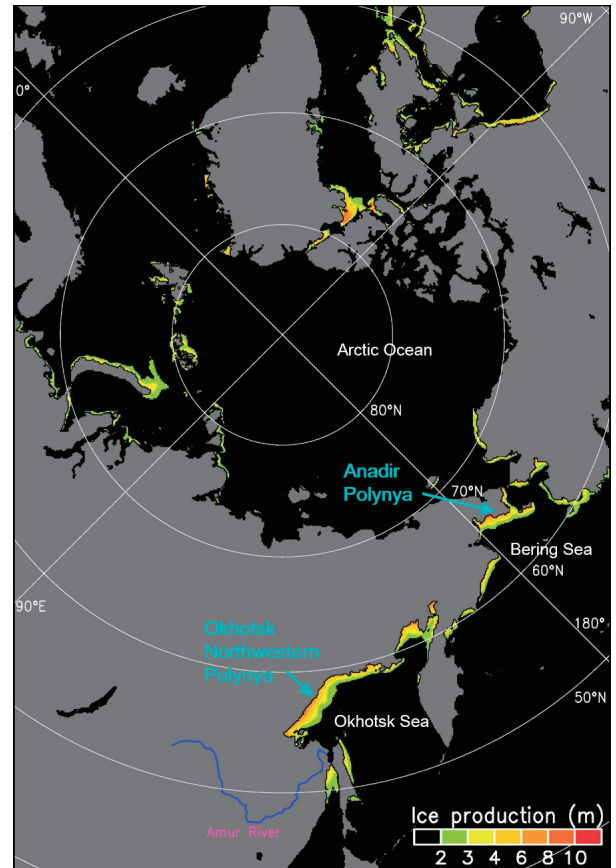


Fig. 6. Map of annual sea-ice production in the Northern Hemisphere, averaged over 2002/2003-2010/2011 (Modified from Ohshima *et al.*, 2016). Estimation is based on the AMSR-E thin-ice algorithm and heat budget calculation (Iwamoto *et al.*, 2014). The color scale is the same as that of Fig. 5 (Southern Hemisphere).

応用した熱塩フラックス (Tamura *et al.*, 2011; Nihashi *et al.*, 2012) のデータは, 以下のサイトで公開されており, 国外も含む多くの研究者に利用されています。
<http://wwwod.lowtem.hokudai.ac.jp/polar-seaflux/>

6. 南極底層水の観測

2000 年代までは, 南極底層水の生成海域は, ウェッデル海・ロス海・アデリーランド沖の 3 海域とされてきました (Orsi *et al.*, 1999)。それに対し, 我々は, 海水生産

量マッピングから示された第2の海氷生産量海域であるケープダンレー沖が、未知(第4)の南極底層水の生成海域であると予測し、その予測を確かめる観測を計画しました。学術研究船白鳳丸のKH07-4次研究航海(主席研究員は極地研の野木義史さん)によって、この海域で初めて、係留系設置が行われました。この陸棚海域は8割方の確率で夏には海氷がなくなる海域なのですが、たまたま行った年が海水の多い年にあたってしまい、陸棚上にあるポリニヤ出現域に入っていくことが困難な状況にありました。当初ポリニヤ内に3点の係留系を設置する計画だったのですが、日本から送ってもらっていたリアルタイムの海水分布を見て、投入予定日の5日前にポリニヤ内での係留系設置を諦め、係留系設置点を頭の中に入れていたバックアップの点ワイルド峡谷とその上流の2点に変更する、という決断をしました。急遽、同僚の深町康さんと、変更した係留点用に系をデザインし直す作業を船内で行い、ワイルド峡谷とその上流に係留系を設置しました。計画時、我々は、ポリニヤでできる重い水は地衡流的に西に移流し、ワイルド峡谷の西にあるダリー峡谷から潜り込むと推定しました。それを踏まえ、ポリニヤ内とダリー峡谷を中心とした係留系設置を予定にしており、ワイルド峡谷は補欠の位置づけでした。本命のポリニヤ内には係留できなかつたわけで、観測終了後に東京大学海洋研の川辺正樹さんに、予定通りの観測とはならなかつた話をすると、「大島くん、バックアップの点にこそ宝があることもある」とのコメント、まさに予言が的中することになります。つまり、ポリニヤで

きた重い水が潜り込むメインの峡谷はワイルド峡谷だったのです。Fig. 7がこの峡谷で得られた係留系データの時系列で、ポリニヤでの海水生成が盛んになって約2ヶ月後に、底層水の性質を持つ低温の重い水が到来し(赤矢印)、それと同期して、海底付近に強化された降下流が出現すること、を見事に捉えることができました(Ohshima *et al.*, 2013)。また、この底層水を伴う降下流は、非常にきれいな4~5日周期を持つという、GFD的にも興味深い結果が得られました。

Fig. 8の模式図に示すように、ケープダンレー沖では、南極大陸から張り出す冰山舌(冰山にアンカーされた定着水)の下流に、多量に海水が生産される海域(沿岸ポリニヤ)が作られます。この高海水生産によって重い水が作られ、その重い水が海の峡谷に沿って沈み込み、周りの水と混合しながら南極底層水となるわけです。このケープダンレー底層水(Cape Darnley Bottom Water: CDBW)は、全南極底層水の生成量の約10%程度を占めると推定され(Ohshima *et al.*, 2013)、西方へ移流してウェッデル深層水の一部になると考えられます。この研究論文のコンテンツはNature Geoscience誌の表紙にも採用されました(Plate 2)。表紙には、水温塩分計を頭上に取り付けたアザラシの写真が載っていますが、このバイオロギングという新手法によるデータをオーストラリアのWilliams博士らと共同して解析することで、陸棚上の底層水になりうる重い水を捉えることにも成功しました。

底層水の生成域としては、今まで3ヶ所が知られてい

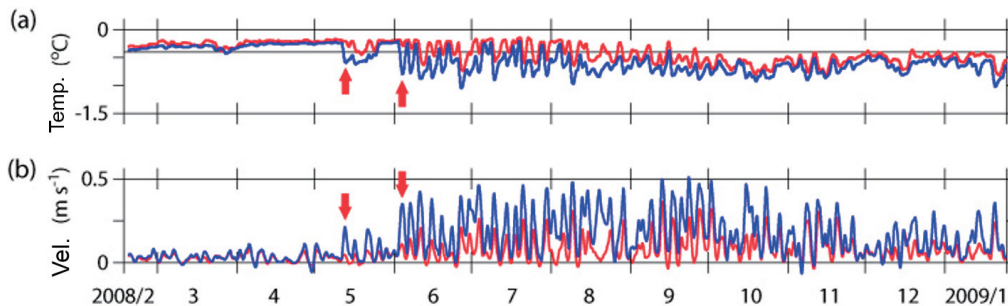


Fig. 7. Observations of new AABW production offshore from the Cape Darnley Polynya. Mooring time-series of (a) potential temperature (θ) at depths of 26 m (blue) and 224 m (red) from the bottom, and (b) the velocity component of the mean (dominant) flow direction at 20 m (blue) and 226 m (red) from the bottom. Modified from Ohshima *et al.* (2013).

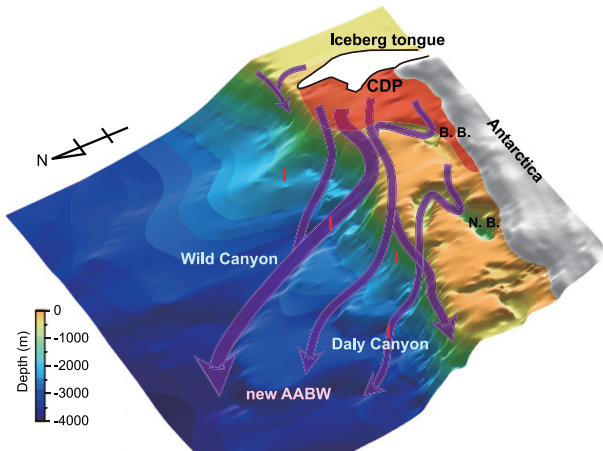


Fig. 8. Schematic of production of Cape Darnley Bottom Water (CDBW). Enhanced sea-ice production (red shading) in the Cape Darnley Polynya (CDP) formed leeside of the grounded iceberg tongue causes formation of Dense Shelf Water (DSW) through the high brine (salt) rejection. The downslope pathway from DSW to new AABW is represented by the purple arrows. The primary DSW descends down Wild Canyon. DSW, through mixing with overlying Circumpolar Deep Water, is gradually transformed into new AABW (CDBW). Red bars indicate locations of the moorings. Modified from Ohshima *et al.* (2013).

ましたが、この第4の底層水生成域の発見は、新しい教科書（例えば、Ocean Circulation and Climate: Siedler *et al.*, 2013）にも加えられるようになりました。この底層水生成域発見をサポートする研究も、その後、他の国からも次々と出版されています（Wong and Riser, 2013; Couldrey *et al.*, 2013; Jullion *et al.*, 2014）。また、我々のグループでも、数値モデルによるCDBWの形成と周期流出の再現（Nakayama *et al.*, 2014）、CDBW形成に至る混合過程（Hirano *et al.*, 2015）など、大きな研究の拡がりを見せています。また、この海域がJAREの南極輸送船「しらせ」の通り道であることから、CDBWの研究は2016年よりJAREの重点研究のテーマの一部にもなっており、ほぼ毎年この海域への調査が行われています。



Plate 2. Cover of *Nature Geoscience*, for which Ohshima *et al.* (2013) is adapted. (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd., *Nature Geoscience* Vol. 6, March 2013, copyright 2013).

7. 地球流体力学 (Geophysical Fluid Dynamics) の応用

元々、私はGFDへの興味から海洋学の道に入ったので、極域海洋の観測研究をしながらも、GFDを海氷域・極域海洋に応用することを頭のどこかに持っていました。実際、そういった研究をGFDにも興味を持つ学生（草原和弥くんや中山佳洋くん他）と一緒にやってきたので、最後にそれらの研究も紹介します。具体的には、海氷域・極域海洋を特徴づける次の4つの特性・設定に対して、GFDの研究を行ってきました。

- I. 海水を介しての風応力が伝わる（または伝わらない）
 - A: 流水（動く海水）と、B: 定着水（動かない海水）の2つの設定
- II. 周極的である（ただし、南極海に限って）
- III. 既存理論が未適用（観測稀少なため）
- IV. 海水が流れを可視化する

まず、I Aに関してですが、古く100年以上前のナンセンのフラム号漂流観測にも関わってくる問題でもあり

ます。通常、海水は風速の概ね2%程度の速度で漂流することがわかっていますが、詳しく見ると沿岸域ではその値が大きくなる傾向があることに気づきます(例えば、Kimura and Wakatsuchi, 2000)。そこには、海水の漂流を強化する何らかのメカニズムがあるはずで、そこで、(内部応力を無視して)自由漂流する海水を一面に置いたときの、振動風に対する沿岸陸棚海洋の応答解を導き、漂流が強化する機構を示しました(Nakayama *et al.*, 2012)。その機構とは、風応力によりまず海水の漂流が生じ、海水が流動することでその下の海洋へ応力が伝わり、次にその応力によって沿岸捕捉波が励起され、今度はその流れによって海水漂流が増幅される、というものです(Fig. 9 参照)。

一方、昭和基地のあるリュツォホルム湾の陸棚域などでは、冬季には海水が岸から固着して動かない定着氷が発達します。このような場合(I B)は、定着氷下に風応力が伝わらず、定着氷の縁に非常に大きな渦度の注入が生じます。このような設定において、定常風及び振動風に対する沿岸陸棚域の応答解を解いて(Ohshima, 2000)、実際にリュツォホルム湾で観測した流速変動をよく説明できることを示しました(Ohshima *et al.*, 2000)。

II に関しては、南極海は地球上で唯一、周極的な構造になっている海で、海底地形や大気からの外力も一定程度周極的な特徴を持っています。このような設定に対して、Aoki (2002) は、南極沿岸の潮位が周極的にコヒーレントな変動を示し、それが Southern Annular Mode によく対応していることを発見しました。設定も外力も周極的という、いわば理想的な条件の中での特徴的な変動なので、単純なメカニズムが働いているはずですが、すぐにはそのメカニズムはわかっていませんでした。Kusahara and Ohshima (2009) は、岸沿い方向に海底地形も風応力も一様、周極的という設定で、風応力で駆動される沿岸海洋の応答問題を解き、コヒーレントな潮位変動は、岸での風で駆動される波数0の地形性 β 渦度モードで説明できることを明らかにしました。Fig. 10 は、この理論解と現実的な地形と風による数値シミュレーション、観測結果を並べて示したのですが、他にあまりみることがないほどに、理論・観測・モデルが一致する研究となりました。

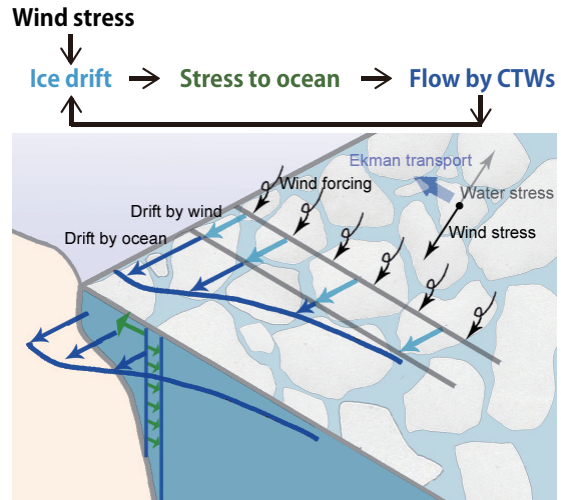


Fig. 9. A schematic diagram showing the enhancement mechanism of sea ice drift through the interaction between sea ice and a coastal ocean. Coastal Trapped Waves (CTWs) driven by the stress from the drifting ice floes enhances the ice drift in turn. Modified from Nakayama *et al.* (2012).

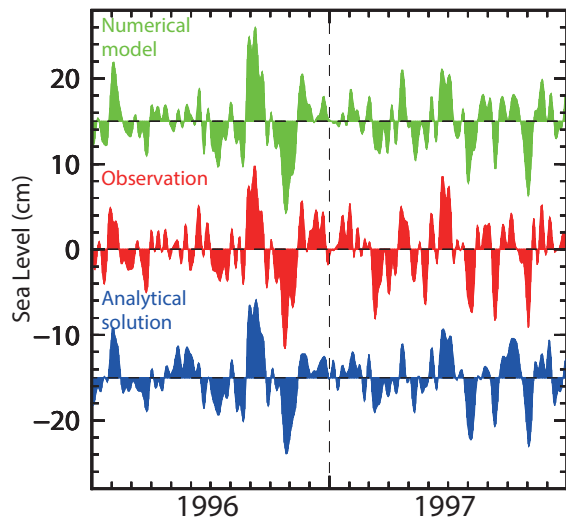


Fig. 10. Time series of sea level around Antarctica from the observation, model, and analytical solution for 1996–97. The leading modes of the observed and modeled (with an offset of 115 cm) sea levels are shown in red and green, respectively. The analytical solution is shown in blue with an offset of 215 cm. Modified from Kusahara and Ohshima (2009).

現実の海洋において、ケルビン波という場合は、99%以上が内部ケルビン波のことを指しています。外部ケルビン波は教科書での話であり、現実に外部ケルビン波の存在を観測から示唆したのは、Ponte and Hirose (2004) による南極海の海底圧力計の解析くらいでした。Kusahara and Ohshima (2014) では、南極沿岸の潮位データから、南極沿岸を境界として西向き伝播する外部ケルビン波を検出し、波数1だけではなく波数2や3のケルビン波が存在することも示しました。さらに全球モデルから、その生成機構を調べ、7割は南大洋、残り3割は北太平洋(赤道含む)の気圧変動で駆動されていることを明らかにしました。

IIIに関しては、特にオホーツク海においては、海水域であることに加え、領海の問題もあり、現場観測は難しく、海洋の流速場の実態はほとんどわかっていませんで

した。CRESTプロジェクトにより、東樺太海流の実態が明らかになり、この海流は沖合分枝と沿岸分枝の2分枝構造を持っているという、興味深い特徴が明らかになりました。それまでの定性的な循環像のもとでは、東樺太海流についての力学的な議論はほとんどされていませんでした。このような特徴的な現象は単純なメカニズムで説明できるはずで、以下がその解釈です。東樺太海流の沖合分枝は、オホーツク海内の正の風応力カールで駆動される反時計回り循環の西岸境界流と解釈され、オホーツク海内部では等密度面が西に行くほど上昇するというスペルドラップバランスの特徴を示しています(Ohshima *et al.*, 2004; Simizu and Ohshima, 2006)。一方、沿岸分枝はATW (Arrested Topographic Wave: Csanady, 1978) という言い方をされる、岸沿い方向の風応力で駆動される沿岸捕捉流、と解釈され (Fig. 11の(a)), 北西風が強化される冬季に強くなります (Simizu and Ohshima, 2006; Ohshima and Simizu, 2008)。これら2分枝構造のメカニズムの概略を示したのが Fig. 11の(b)です。

Fig. 12は沿岸分枝に関して、観測による流速、モデルシミュレーションによる流速、ATW輸送量(岸沿い方向に上流から積分した風応力によるエクマン輸送量: Fig. 11の(a)参照)の時系列を比較したものです。3者は非常によく合っており、これは樺太沖が岸沿い方向に一般的な構造であることと、高緯度のために順圧流が卓越して

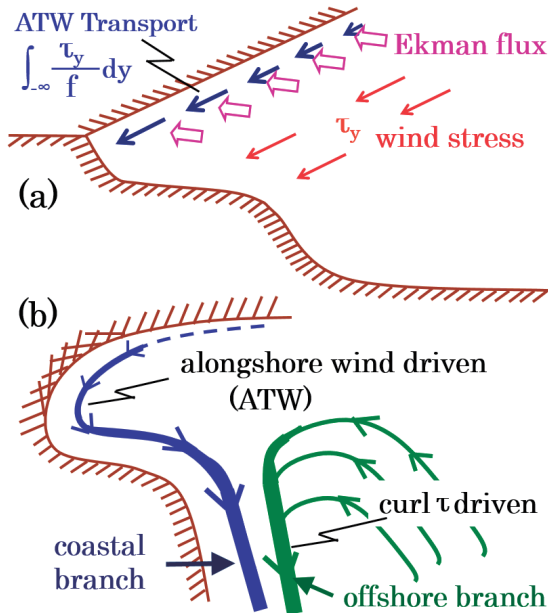


Fig. 11. (a) Schematic of the Arrested Topographic Wave (ATW) and its transport, generated by the alongshore wind stress. (b) Schematic of the two branch mechanism of the East Sakhalin Current. The coastal branch is interpreted as the ATW, driven by the alongshore wind stress. The offshore branch is interpreted as the western boundary current of the cyclonic gyre, driven by the positive wind stress curl.

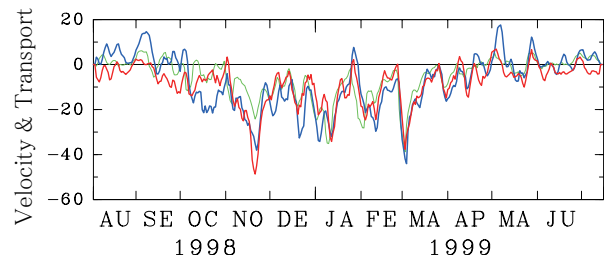


Fig. 12. (a) Time series of velocity (cm s^{-1}) at 50 m depth over the east Sakhalin shelf from August 1998 to July 1999, observed by the bottom-mounted ADCP (red), and simulated in the model experiment (blue). Volume transport (10^{-2} Sv) predicted by ATW theory is also superimposed as green line. Modified from Ohshima and Simizu (2008).

いることによるもので、沿岸の流速変動がこのようにきれいに再現できる例は他にはあまりないように思います。なお、最近の研究から、この ATW は水位にも特徴的な変動をもたらす、樺太及び北海道の沖で冬季に水位が高くなるのはこの ATW による、ことも明らかにしました (Nakanowatari and Ohshima, 2014)。この効果は日本海とオホーツク海の水位差を通じて、対馬暖流系 (日本海通過流) にも大きな影響を与え、冬季に両者の水位差を減少させ、宗谷暖流、さらには対馬暖流の流量を減じている可能性があります (Tsujino *et al.*, 2008; Kida *et al.*, 2016; Ohshima *et al.*, 2017)。

私が最初に GFD の研究に取り組んだのは、宗谷暖流の不安定の問題で、結局、私の博士論文にもなったものです (Ohshima and Wakatsuchi, 1990)。この研究で鍵となったのは、海流のフロント域に見られる流水渦列でした。航空機からは見事な流水渦列が撮影され (Plate 3 の (a))、当時設置されていた流水レーダーからは碎波パターンを示す流水渦列が観測されました (Plate 3 の (b))。博士論文では、宗谷暖流の順圧不安定波が可視化されたものと考え、流水渦列を数値モデルで再現しました (Plate 3 の (c))。このように、海水の存在は流れを見事に可視化するという側面も持っているのです。これらの研究は、教科書 (Regional Oceanography: Tomczak and Godfrey, 2003) にも取り上げられましたが、我々の中では遠い過去の仕事になっていました。ところが、この 20 年以上前の研究が突然「流水”大回転」というタイトルのもとで、NHK スペシャルで取り上げられることになりました。この番組では、航空機に乗って直接流水渦を映像に収める、というのがメインイベントなのですが、ディレクターから、「流水渦を室内水槽実験で再現してもらえないか」、というリクエストをもらいました。視聴者から見ると、数値シミュレーションは CG と同様な印象にしかならないので、とのことでした。水槽実験などは一度もやったことはなかったのですが、原理的に再現できるはず、というのがあったので、「やってみましょう、いけると思います」と即答してしまいました。番組制作期限まで 1 ヶ月あまりしかなかったのですが、北大環境科学院の久保川厚さんが演習で回転水槽実験を行っていたので、まずその回転水槽を使わせてもらうことをお願いし、宗谷暖流を再現する水槽とポンプシステ

ムを設計し、北大低温研技術部にその作成をお願いしました。そのようにして、大学院生の中田和輝くんといっしょに人生初の回転水槽実験に取り組みました。博士論

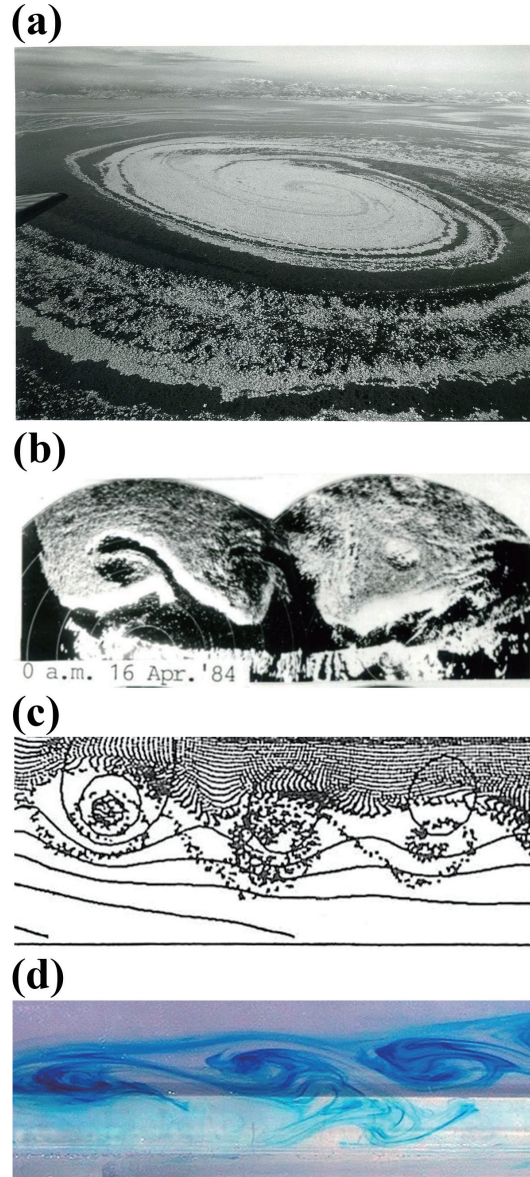


Plate 3. Ice-ocean eddy (street) observed by (a) aerial photograph and (b) images of sea ice radar (modified from Wakatsuchi and Ohshima, 1990). (c) Simulated ice floe distribution and sea level contours by the numerical experiment (modified from Ohshima and Wakatsuchi, 1990). (d) Eddy street reproduced by the rotating tank experiment.

文の際もお世話になった久保川さんには30年を経て、またアドバイスを頂いて、何とか渦列を再現することに成功し(Plate 3の(d)),番組でも無事使用されることになりました。

8. おわりに

本稿は受賞タイトルに沿って、その内容とともに、研究に至った経緯も含めて述べてきましたが、私自身が深いビジョンを常を持って困難を乗り越えて研究成果に至った、というものではありません。その時々で自分もしくは学生・同僚が、価値があると思ったことを、いっしょに面白がってやってきたにすぎません。そのようにやってきたことが、結果的に有機的につながりを持つようになったとは思いますが。“人間万事塞翁が馬”，私が最も好きな故事ですが、研究においても何が幸いするかわかりません。それは、私が研究生活の中で実感を持って感じていることで、本稿にもそれが反映されているかもしれせん。

私には、自分(我々)が研究しなくても他の人(グループ)が研究しそうなことは、研究する気にならないという志向が一貫してあるのですが、極域海洋は、未知のフロンティアの部分が多く、今も変わらぬ魅力的な研究対象です。最近では、自分の専門である海洋物理分野の方より他分野の方と議論したりプロジェクトを立ち上げたりすることがずっと多くなりました。これは予算を獲得しやすいから、というよりも、境界領域の研究には、まだ取り組まれていないことが多く面白そうだから、というのが一番の理由です。例えば、南極底層水の生成が大きく減じており、深層循環の弱化的可能性が指摘されていますが、これには南極氷床の融解加速による低塩化が関係しているのか？氷床の研究者との連携が必要になります。南極海からの沈み込みが弱化的・停止すると、地球の気候システムがどうなるのか？過去にはそういうことがあったのか？気候や古海洋・古気候の研究者との連携が必要になります。沿岸ポリニヤからの高密度陸棚水が中深層へ運ばれるときに鉄等の物質も輸送されます。それだけではなく、ポリニヤでは対流が海底まで及ぶので、海底の堆積物を巻き上げ、それが海水に取り込まれることが起こりえます(Ito *et al.*, 2017)。海水が融解すると

きに、その鉄を含む堆積物を放出し、それがブルーミングという最大規模の生物基礎生産をもたらしている可能性があります。これらの研究には、海洋生物・海洋化学だけではなく、地質学の研究者との連携が必要になります。これらは一例で、研究の興味は尽きませんが、リタイアまでの時間も見えてきたことも認識していますので、うまく次世代にバトンを渡せるように尽力したいと思います。また、このように海洋学(会)は他の分野と連携することで、さらに大きく発展する研究分野(学会)であると確信していますし、その連携に微力ながら貢献できればと考えております。

謝辞

栄誉ある日本海洋学会賞を頂き、身に余る光栄と深く感謝いたします。これまでの研究には多くの皆様のお世話になりました。特に、以下の皆様に深く感謝いたします。大学院では、金成誠一先生、竹内謙介先生等のもとで研究の楽しさを知ったことがその後の研究・教育活動のベースになっています。職を得た低温研では、小野延雄さん、若土正暁さんによって、極域海洋研究の価値と面白さを教えて頂きました。特に私及び現研究室は若土さんのレガシーを引き継いでおります。南極越冬観測では、インディージョーンズのような藤井理行隊長と、河村俊行さん他32次隊隊員、またプロジェクトリーダーの瀧澤隆俊さん他にお世話になり、観測のなんたるかを学びました。オホーツク国際プロジェクトでは、リーダーの若土さん、竹内さん、中塚武さんらと生産性抜群の観測ができたことが大きな共有財産であり、自信にもなりました。その他、砕氷巡視船「そうや」では海上保安庁の方々、東京海洋大学付属練習船「海鷹丸」では北出裕二郎さんら、観測では多くの方々のお世話になりました。特に、同僚の深町康さんの腕によって、ほとんどの係留系観測は成功することができました。共生プロジェクトでは、日比谷紀之学会長から、強力にサポート頂いたと同時に、世界を見据えた研究者の心構え等多くを学ばせて頂きました。CRESTモデリングプロジェクトでは羽角博康さんにサポート頂き、観測とモデルの融合研究をいっしょに推進できました。同僚の江淵直人さん、青木茂さん、豊田威信さん、西岡純さんとは、現在も充実し

た共同研究をさせて頂いております。プロジェクト等と一緒に研究させて頂いた、水田元太さん、勝又勝郎さん、中野渡拓也さん、岩本勉之さん、木村詞明さん、嶋田啓資さん、松村義正さん、平野大輔さん、一緒に研究をしてきた学生(当時)、伊東素代さん、清水大輔さん、二橋創平さん、田村岳史さん、草原和弥さん、小野純さん、小野数也さん、中山佳洋さん、柏瀬陽彦さん、中田和輝さん、伊藤優人さん(博士取得の方のみ記載)他には、大いに研究を楽しませて頂きました。これまでの研究は、アメリカ、ロシア、オーストラリアの研究者(機関)との国際共同研究によって成し得たものが多くあります。具体的な名前を挙げませんが、ここに感謝の意を表します。北川暁子さん他、秘書の皆様には大きなサポートを頂きました。最後に、推薦・選考して頂いた方々、および学会員の皆様に深く御礼申し上げます。

References

- Aoki, S. (2002): Coherent sea level response to the Antarctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1950, doi:10.1029/2002GL015733.
- 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 140E off the Adelie Land Coast, Antarctica, from 1994 to 2012. *J. Geophys. Res.*, **118**, 6046–6063, doi:10.1002/2013JC009009.
- Boyer, T.P., J.I. Antonov, H.E. Garcia, D.R. Johnson, R.A. Locarnini, A.V. Mishonov, M.T. Pitcher, O.K. Baranova, and I.V. Smolyar (2006): *World Ocean Database 2005*, edited by S. Levitus, NOAA Atlas NES-DS 60, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 190 pp., DVDs.
- Broecker, W. (2010): *The Great Ocean Conveyor: Discovering the Trigger for Abrupt Climate Change*. Princeton University Press, 154 pp.
- Couldrey, M. P., L. Jullion, A. C. Naveira Garabato, C. Rye, L. Herráiz-Borreguero, P. J. Brown, M. P. Meredith, and K. L. Speer (2013): Remotely induced warming of Antarctic Bottom Water in the eastern Weddell gyre. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2755–2760.
- Cox, G. F. N., and W. F. Weeks (1974): Salinity variations in sea ice. *J. Glaciology*, **13** (67), 109-120.
- Csanady, G. T. (1978): The arrested topographic wave. *J. Phys. Oceanogr.*, **8**, 47–62.
- Fukamachi, Y., G. Mizuta, K. I. Ohshima, L. D. Talley, S. C. Riser, and M. Wakatsuchi (2004): Transport and modification processes of dense shelf water revealed by long-term moorings off Sakhalin in the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **109**, C09S10, doi:10.1029/2003JC001906.
- 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. *Cont. Shelf Res.*, **29**, 1541–1548, doi:10.1016/j.csr.2009.04.005.
- 日比谷紀之 (2009): 2008 年度日本海洋学会賞受賞記念論文: 海洋の中・深層における鉛直拡散強度の全球分布に関する理論的・観測的研究. *海の研究*, **18**, 115–134.
- 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. *J. Geophys. Res.*, **120**, 910–922, doi:10.1002/2014JC010059.
- Ito, M., K. I. Ohshima, Y. Fukamachi, G. Mizuta, Y. Kusumoto, and J. Nishioka (2017): Observations of frazil ice formation and upward sediment transport in the Sea of Okhotsk: A possible mechanism of iron supply to sea ice. *J. Geophys. Res.*, **122**, 788–802, doi:10.1002/2016JC012198.
- Itoh, M., K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi (2003): Distribution and formation of Okhotsk Sea Intermediate Water: An analysis of isopycnal climatology data. *J. Geophys. Res.*, **108**, 3258, doi: 10.1029/2002JC001590.
- Iwamoto, K., K. I. Ohshima, and T. Tamura (2014): Improved mapping of sea ice production in the Arctic Ocean using AMSR-E thin ice thickness algorithm. *J. Geophys. Res.*, **119**, 3574–3594, doi:10.1002/2013JC009749.
- Jacobs, S. S., A. F. Amos, and P. M. Bruchhausen (1970): Ross Sea oceanography and Antarctic Bottom Water formation. *Deep Sea Res.*, **17**, 935–970.
- Johnson, G. C. (2008): Quantifying Antarctic Bottom Water and North Atlantic Deep Water volumes. *J. Geophys. Res.*, **113**, C05027, doi:10.1029/2007JC004477.
- Jullion L, A. C. Naveira Garabato, S. Bacon, M. P. Meredith, P. J. Brown, S. Torres-Valdes, K. G. Speer, P. R. Holland, J. Dong, D. Bakker, M. Hoppema, B. Loose, H. J. Venables, W. J. Jenkins, M-J. Messias, and E. Fahrbach (2014): The contribution of the Weddell Gyre to the lower limb of the Global Overturning Circulation. *J. Geophys. Res.*, **119**, 3357–3377.
- Kashiwase, H., K. I. Ohshima, and S. Nihashi (2014): Long-term variation in sea ice production and its relation to the intermediate water in the Sea of Okhotsk. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 21–32, doi:10.1016/j.pocean.2014.05.004.
- Kashiwase, H., K. I. Ohshima, S. Nihashi, and H. Eicken (2017): Evidence for ice-ocean albedo feedback in the Arctic Ocean shifting to a seasonal ice zone. *Scientific Reports*, **7**, 8170, doi:10.1038/s41598-017-08467-z.
- Katsumata, K., K. I. Ohshima, T. Kono, M. Itoh, I. Yasuda, Y. Volkov, and M. Wakatsuchi (2004): Water exchange and tidal currents through the Bussol Strait revealed by direct current measurements. *J. Geophys. Res.*, **109**, C09S06, doi:10.1029/2003JC001864.
- Kida, S., B. Qiu, J. Yang, and X. Lin (2016): The annual cycle of the Japan Sea Throughflow. *J. Phys. Oceanogr.*, **46**, 23–39, doi:10.1175/JPO-D-15-0075.1.
- Kimura N., and M. Wakatsuchi (1999): Processes controlling the advance and retreat of sea ice in the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **104**, 11137–11150.
- Kimura, N., and M. Wakatsuchi (2000): Relationship between sea-ice motion and geostrophic wind in the Northern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 3735–3738.
- 木村竜治 (1983): 地球流体力学入門—大気と海洋の流れのしくみ—, 東京堂出版, 247 pp.
- Kusahara, K., and K. I. Ohshima (2009): Dynamics of the wind-driven sea

- level variation around Antarctica. *J. Phys. Oceanogr.*, **39**, 658–674.
- Kusahara, K., and K. I. Ohshima (2014): Kelvin Waves around Antarctica. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 2909–2920, doi:10.1175/JPO-D-14-0051.1.
- Macdonald, A. M., T. Suga, and R. G. Curry (2001): An isopycnally averaged North Pacific climatology. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **18**, 394–420.
- Meredith, M. P., R. A. Locarnini, K. A. Van Scoy, A. J. Watson, K. J. Heywood, and B. A. King (2000): On the sources of Weddell Gyre Antarctic Bottom Water. *J. Geophys. Res.*, **105**, 1093–1104.
- Mizuta, G., Y. Fukamachi, K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi (2003): Structure and seasonal variability of the East Sakhalin Current. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 2430–2445.
- Mizuta, G., K. I. Ohshima, Y. Fukamachi, M. Itoh, and M. Wakatsuchi (2004): Winter mixed layer and its yearly variability under sea ice in the southwestern part of the Sea of Okhotsk. *Cont. Shelf Res.*, **24**, 643–657.
- Nakanowatari, T., and K. I. Ohshima (2014): Coherent sea level variation in and around the Sea of Okhotsk. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 58–70, doi:10.1016/j.pocean.2014.05.009.
- Nakanowatari, T., K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi (2007): Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04602, 1955–2004, doi:10.1029/2006GL028243.
- Nakatsuka, T., C. Yoshikawa, M. Toda, K. Kawamura, and M. Wakatsuchi (2002): An extremely turbid intermediate water in the Sea of Okhotsk: Implication for the transport of particulate organic matter in a seasonally ice-bound sea. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 4-1–4-4, doi:10.1029/2001GL014029.
- Nakayama, Y., K. I. Ohshima, and Y. Fukamachi (2012): Enhancement of sea-ice drift due to the dynamical interaction between sea ice and a coastal ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 179–192.
- Nakayama, Y., K. I. Ohshima, Y. Matsumura, Y. Fukamachi, and H. Hasumi (2014): A numerical investigation of formation and variability of Antarctic Bottom Water off Cape Darnley, East Antarctica. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 2921–2937, doi:10.1175/JPO-D-14-0069.1.
- Nihashi, S., and K. I. Ohshima (2001a): Relationship between ice decay and solar heating through open water in the Antarctic sea-ice zone. *J. Geophys. Res.*, **106**, 16767–16782.
- Nihashi, S., and K. I. Ohshima (2001b): Relationship between the sea ice cover in the retreat and advance seasons in the Antarctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3677–3680.
- Nihashi, S., and K. I. Ohshima (2015): Circumpolar mapping of Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice: relationship and variability. *J. Climate*, **28**, 3650–3670, doi:10.1175/JCLI-D-14-00369.
- 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. *J. Geophys. Res.*, **114**, C10025, doi:10.1029/2008JC005222.
- 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. *J. Climate*, **25**, 2261–2278, doi:10.1175/JCLI-D-11-00022.1.
- Nihashi, S., K. I. Ohshima, and S. Saitoh (2017): Sea-ice production in the northern Japan Sea. *Deep-Sea Res. I*, **127**, 65–76, doi:10.1016/j.dsr.2017.08.003.
- Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, T. Nakatsuka, S. Takeda, T. Yoshimura, K. Suzuki, K. Kuma, S. Nakabayashi, D. Tsumune, H. Mitsudera, W. K. Johnson, and A. Tsuda (2007): Iron supply to the western subarctic Pacific: Importance of iron export from the Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **112**, C10012, doi:10.1029/2006JC004055.
- Nishioka, J., T. Nakatsuka, K. Ono, Y. N. Volkov, A. Scherbinin, and T. Shiraiwa (2014): Quantitative evaluation of iron transport processes in the Sea of Okhotsk. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 180–193, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.011.
- Ohshima, K. I. (1987a): Stability of a barotropic jet on a sloping bottom. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **43**, 49–60.
- Ohshima, K. I. (1987b): On the stability of the Soya Warm Current. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **43**, 61–67.
- Ohshima, K. I. (2000): Effect of landfast sea ice on coastal currents driven by the wind. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17133–17141.
- Ohshima, K. I., and S. Nihashi (2005): A simplified ice-ocean coupled model for the Antarctic ice melt season. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 188–201.
- Ohshima, K. I., and D. Simizu (2008): Particle tracking experiments on a model of the Okhotsk Sea: toward oil spill simulation. *J. Oceanogr.*, **64**, 103–114.
- Ohshima, K. I., and M. Wakatsuchi (1990): A numerical study of barotropic instability associated with the Soya Warm Current in the Sea of Okhotsk. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**, 570–584.
- Ohshima, K. I., T. Takizawa, S. Ushio, and T. Kawamura (1996): Seasonal variations of the Antarctic coastal ocean in the vicinity of Lützw-Holm Bay. *J. Geophys. Res.*, **101**, 20617–20628.
- Ohshima, K. I., K. Yoshida, H. Shimoda, M. Wakatsuchi, T. Endoh, and M. Fukuchi (1998): Relationship between the upper ocean and sea ice during the Antarctic melting season. *J. Geophys. Res.*, **103**, 7601–7616.
- Ohshima, K. I., T. Kawamura, T. Takizawa, S. Ushio, and T. Miyakawa (2000): Current variability under landfast sea ice in Lützw-Holm Bay, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17121–17132.
- Ohshima, K. I., G. Mizuta, M. Itoh, Y. Fukamachi, T. Watanabe, Y. Nabae, K. Suehiro, and M. Wakatsuchi (2001): Winter oceanographic conditions in the southwestern part of the Okhotsk Sea and their relation to sea ice. *J. Oceanogr.*, **57**, 451–460.
- Ohshima, K. I., M. Wakatsuchi, Y. Fukamachi, and G. Mizuta (2002): Near-surface circulation and tidal currents of the Okhotsk Sea observed with satellite-tracked drifters. *J. Geophys. Res.*, **107**, 3195, doi:10.1029/2001JC001005.
- Ohshima, K. I., T. Watanabe, and S. Nihashi (2003): Surface heat budget of the Sea of Okhotsk during 1987–2001 and the role of sea ice on it. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 653–677.
- Ohshima, K. I., D. Simizu, M. Itoh, G. Mizuta, Y. Fukamachi, S. C. Riser, and M. Wakatsuchi (2004): Sverdrup balance and the cyclonic gyre in the Sea of Okhotsk. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 513–525.
- Ohshima, K. I., S. C. Riser, and M. Wakatsuchi (2005): Mixed layer evolution in the Sea of Okhotsk observed with profiling floats and its relation to sea ice formation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L06607, doi:10.1029/2004GL021823.
- Ohshima, K. I., T. Nakanowatari, S. Riser, and M. Wakatsuchi (2010): Seasonal variation in the in- and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific. *Deep-Sea Res. II*, **57**, doi:10.1016/j.dsr.2009.12.012, 1247–1256.
- Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nihashi, F. Roquet, Y. Ki-

- tade, 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 Geosci.*, **6**, 235–240, doi:10.1038/NCEO1738.
- Ohshima, K. I., T. Nakanowatari, S. Riser, Y. Volkov, and M. Wakatsuchi (2014): Freshening and dense shelf water reduction in the Okhotsk Sea linked with sea ice decline. *Prog. Oceanogr.*, **126**, 71–79, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.020.
- Ohshima, K. I., S. Nihashi, and 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.
- Ohshima, K. I., D. Simizu, N. Ebuchi, S. Morishima, and H. Kashiwase (2017): Volume, heat, and salt transports through the Soya Strait and their seasonal and interannual variations. *J. Phys. Oceanogr.*, **47**, 999–1019, doi:10.1175/JPO-D-16-0210.1.
- Okazaki, Y., A. Timmermann, L. Menviel, N. Harada, A. Abe-Ouchi, M. O. Chikamoto, M. A. Mouchet, and H. Asahi (2010): Deepwater formation in the North Pacific during the last glacial termination. *Science*, **329**, 200–204, doi:10.1126/science.1190612.
- Ono, J., K. I. Ohshima, K. Uchimoto, N. Ebuchi, H. Mitsudera, and H. Yamaguchi (2013): Particle-tracking simulation for the drift/diffusion of spilled oils in the Sea of Okhotsk with a three-dimensional, high-resolution model. *J. Oceanogr.*, **69**, 413–428, doi:10.1007/s10872-013-0182-8.
- Ono, K., K. I. Ohshima, T. Kono, M. Itoh, K. Katsumata, Y. N. Volkov, and M. Wakatsuchi (2007): Water mass exchange and diapycnal mixing at Bussol' Strait revealed by water mass properties. *J. Oceanogr.*, **63**, 281–291.
- Ono, K., K. I. Ohshima, T. Kono, K. Katsumata, I. Yasuda, and M. Wakatsuchi (2013): Distribution of vertical diffusivity in the Bussol' Strait: a mixing hot spot in the North Pacific. *Deep-Sea Res. I*, **79**, 62–73, doi:10.1016/j.dsr.2013.05.010.
- Ono, N. (1967): Specific heat and heat of fusion of sea ice, p. 599-610. In *Physics of Snow and Ice*, Vol. 1, edited by H. Oura, Inst. of Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., Sapporo, Japan.
- Orsi, A. H., G. C. Johnson, and J. L. Bullister (1999): Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water. *Prog. Oceanogr.*, **43**, 55–109.
- Paolo F. S., H. A. Fricker, and L. Padman (2015): Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, **348**, 327–331, doi:10.1126/science.aaa0940.
- Ponte, R. M., and N. Hirose (2004): Propagating bottom pressure signals around Antarctica at 1–2-day periods and implications for ocean modes. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 284–292.
- Purkey S. G., and G. C. Johnson (2012): Global contraction of Antarctic Bottom Water between the 1980s and 2000s. *J. Climate*, **25**, 5830–5844.
- Rhein, M., S.R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R. A. Feely, S. Gulev, G. C. Johnson, S. A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L. D. Talley and F. Wang (2013): Observations: Ocean. p. 255–316. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Shcherbina, A. Y., L. D. Talley, and D. L. Rudnick (2003): Direct observations of North Pacific ventilation: Brine rejection in the Okhotsk Sea. *Science*, **302**, 1952–1955.
- 白岩孝行 (2011): 魚附林の地球環境学 — 親潮・オホーツク海を育むアムール川 —, 昭和堂, 226 pp.
- Siedler G., S. Griffies, J. Gould, and J. Church (2013): *Ocean Circulation and Climate, Vol. 103, Second Edition: A 21st Century Perspective*. Academic Press, 904 pp.
- Simizu, D., and K. I. Ohshima (2006): A model simulation on the circulation in the Sea of Okhotsk and the East Sakhalin Current. *J. Geophys. Res.*, **111**, C05016, doi:10.1029/2005JC002980.
- Takizawa, T., S. Ushio, T. Kawamura, K. I. Ohshima, N. Ono, and S. Kawaguchi (1992): Preliminary results of hydrography under fast ice in Lützow-Holm Bay. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **6**, 106–125.
- Talley, L. D. (1991): An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific. *Deep-Sea Res. A*, **38**, Suppl. 1, S171–S190.
- Talley, L. D. (2011): *Descriptive Physical Oceanography, 6th Edition, An Introduction*. Academic Press, 560 pp.
- Tamura, T., and K. I. Ohshima (2011): Mapping of sea ice production in the Arctic coastal polynyas. *J. Geophys. Res.*, **116**, C07030, doi:10.1029/2010JC006586.
- Tamura, T., K. I. Ohshima, T. Markus, D. J. Cavalieri, S. Nihashi, and N. Hirasawa (2007): Estimation of thin ice thickness and detection of fast ice from SSM/I data in the Antarctic Ocean. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **24**, 1757–1772.
- Tamura, T., K. I. Ohshima, and S. Nihashi (2008): Mapping of sea ice production for Antarctic coastal polynyas. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L07606, doi:10.1029/2007GL032903.
- 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**, 17–20, doi:10.2151/sola.2011-005.
- 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 Commun.*, **3**, 826, doi:10.1038/ncomms1820.
- Tomczak, M., and J. S. Godfrey (2003): *Regional Oceanography: an Introduction, 2nd Edition*. Pergamon, 390 pp.
- Toyota, T., T. Kawamura, K. I. Ohshima, H. Shimoda, and M. Wakatsuchi (2004): Thickness distribution, texture and stratigraphy and a simple probabilistic model for dynamical thickening of sea ice in the southern Sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, **109**, C06001, doi:10.1029/2003JC002090.
- Toyota, T., S. Takatsuji, K. Tateyama, K. Naoki, and K. I. Ohshima (2007): Properties of sea ice and overlying snow in the southern Sea of Okhotsk. *J. Oceanogr.*, **63**, 393–411.
- Tsujino, H., H. Nakano, and T. Motoi (2008): Mechanism of currents through the straits of the Japan Sea: mean state and seasonal variation. *J. Oceanogr.*, **64**, 141–161.
- 角皆静男 (1981): 太平洋および大西洋深層水の年令決定法とその応用. *地球化学*, **15**, 70–76.
- Ushio, S., T. Takizawa, K. I. Ohshima, and T. Kawamura (1999): Ice production and deep-water entrainment in shelf break polynya off Enderby Land, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **104**, 29771–29780.

- van Wijk, E. M., and S. R. Rintoul (2014): Freshening drives contraction of Antarctic Bottom Water in the Australian Antarctic Basin. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1657–1664.
- Wakatsuchi, M. (1982): Seasonal variations in water structure under fast ice near Syowa Station, Antarctica, in 1976. *Antarct. Rec.*, **74**, 85–108.
- Wakatsuchi, M., and T. Kawamura (1987): Formation processes of brine drainage channels in sea ice. *J. Geophys. Res.*, **92**, 7195–7197.
- Wakatsuchi, M., and K. I. Ohshima (1990): Observations of ice-ocean eddy streets in the Sea of Okhotsk off the Hokkaido coast using radar images. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**, 585–594.
- Wakatsuchi, M., and N. Ono (1983): Measurements of salinity and volume of brine excluded from growing sea ice. *J. Geophys. Res.*, **88**, 2943–2951.
- Warner, M. J., and G. I. Roden (1995): Chlorofluorocarbons evidence for recent ventilation of the deep Bering Sea. *Nature*, **373**, 409–412.
- 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 Commun.*, **7**:12577, doi:10.1038/ncomms12577.
- Wong, A. P. S., and S. C. Riser (2013): Modified shelf water on the continental slope north of Mac Robertson Land, East Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 6186–6190.
- Yamaguchi, H., K. I. Ohshima, and N. Nakazawa (2011): Numerical prediction of spilled oil behavior in the Sea of Okhotsk under sea ice conditions. *Offshore Technology Conference*, OTC22123, doi:10.4043/22123-MS.
- Yasuda, I. (1997): The origin of the North Pacific Intermediate Water. *J. Geophys. Res.*, **102**, 893–909.

Studies on the variability of sea ice and its effects on ocean circulation

Kay I. Ohshima*

Abstract

Global thermohaline and material circulations originate from dense water formation through sea-ice production in the polar and ice-covered oceans. Due to difficulties associated with in situ observations, sea-ice production and deep/intermediate water formation were not well understood until recently. Methods for estimating sea-ice production on large scales have been developed using the thin-ice algorithm of satellite microwave radiometer data and heat flux calculation. Mapping of sea-ice production in the Southern Ocean has shown that the Cape Darnley polynya is the second highest ice production area after the Ross Ice Shelf polynya. Furthermore, direct observations have revealed that this polynya is the missing (fourth) source of Antarctic Bottom Water. The Okhotsk Northwestern polynya exhibits the highest ice production in the Northern Hemisphere, and the resultant dense water formation leads to overturning in the North Pacific, that extends to the intermediate layer. The dense water is transported southward by the East Sakhalin Current, which is the western boundary current of the Okhotsk Sea. The polynya ice production has shown a significant decrease over the past 30–50 years, likely causing the weakening of the North Pacific overturning. These studies demonstrate the strong linkage between variabilities of sea-ice production and bottom/intermediate water formation.

Key words : thermohaline circulation, Antarctic Bottom Water, dense shelf water, coastal polynya, sea-ice production, satellite microwave radiometer, Sea of Okhotsk, East Sakhalin Current

(Corresponding author's e-mail address : ohshima@lowtem.hokudai.ac.jp)

(Received 29 September 2017 ; accepted 18 December 2017)

(doi:10.5928/kaiyou.27.2_75)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2018)

* Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University,
Kita-19, Nishi-8, Kitaku, Sapporo 060-0819, Japan
TEL: +81117065481 FAX: +81117067362 or 7142
e-mail: ohshima@lowtem.hokudai.ac.jp