

— 2020年度日本海洋学会岡田賞受賞記念論文 —

## 南極域における観測データの再現性の高い 数値モデルの開発と海洋棚氷相互作用の研究\*

中山 佳洋<sup>†</sup>

### 要 旨

従来、南極氷床は安定で質量は大きく変動しないと考えられていた。しかし、過去 20 年程度の各国の研究によって、南極大陸の氷の損失が年間約 0.3 mm 程度の海面上昇に寄与していることが明らかになってきた。南極沿岸域の大陸棚上へ流入する高温の水塊が、棚氷を融解 / 薄化させ、南極大陸から海への氷の流出を加速させているためである。特に、南極の氷損失の 70% 以上がアムンゼン海東部で起きているとされ、国際的な協力によって、この海域の氷床 / 海洋観測が重点的に行われてきた。こういった背景のもと、南極域の海洋モデル開発において、「限られた観測データを利用する」という従来の方式だけでなく、「観測データと数値モデルを統合的に利用し、過去の観測をできるだけ再現できる数値モデルを開発する」という流れが生まれつつある。本稿では、海洋と棚氷について考える上で重要な、(1) 高温の水塊の陸棚上への流入、(2) 棚氷の融解、(3) 棚氷融解水の流出について、著者の研究を含めて紹介する。さらに、観測データと数値モデルを統合的に利用した研究という観点から、今後の方向性について議論する。

キーワード：南極，南大洋，棚氷，周極深層水

### 1. はじめに

南極大陸には、地球上の氷の約 90% が存在し、その氷が全て融解すると海水準は約 60 メートル上がるとされている (e.g. Fretwell *et al.*, 2013)。この南極大陸上にある

氷の総量は、降雪 (供給) と、沿岸部から海への氷の流出 (損失) によってコントロールされる (Fig. 1)。この中で、棚氷 (氷が海へと押し出され、陸上から連結して洋上にある氷、湾内など囲まれた領域に形成されることが多い) は、氷河の流れを塞ぎとめ、南極からの氷の流出を抑制する効果があり (e.g. Fürst *et al.*, 2016)、栓の働きをすることでワインの“コルク”に例えられることがあるなど、重要である。例えば、ある氷河の棚氷が高温の海水流入によって融解し薄くなる (Fig. 1)、または極端な例で言えば、棚氷が急速に失われてしまえば、氷河の流動を塞ぎとめる効果が失われてしまうので、上流部の氷河の流れは急激に加速して、大量の氷が南極大陸上

\* 2020 年 9 月 16 日受領 2020 年 10 月 19 日受理

著作権：日本海洋学会，2020 年

<sup>†</sup> 北海道大学低温科学研究所

〒060-0819 北海道札幌市北区北 19 条西 8 丁目

Tel: 011-706-5480

e-mail: Yoshihiro.Nakayama@lowtem.hokudai.ac.jp

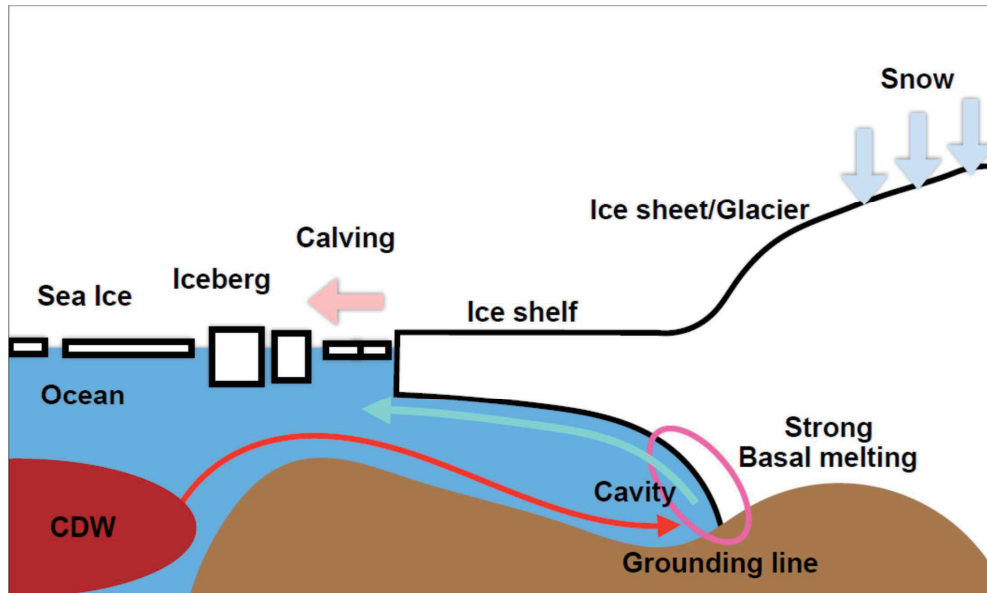


Fig. 1. Schematic of ocean circulation over the Antarctic continental shelf and in the ice shelf cavity indicating the on-shelf intrusion of mCDW (red arrow), strong basal melting near the grounding line (pink circle), and outflow of the mCDW and glacial meltwater (cyan arrow) mixture.

から海へと流れ出してしまうこととなるのである (e.g. DeConto *et al.*, 2016)。これまでの研究から、棚氷融解/薄化の主な原因は大陸棚上へ流入してくる暖かい海水にあることがわかり、南極氷床の損失による海面上昇の原因を探るために、海洋による棚氷融解のメカニズムの理解が重要な課題となっている (e.g. Jacobs *et al.*, 1996, Prichard *et al.*, 2012, Paolo *et al.*, 2015)。

2000年以降、棚氷と海洋の相互作用の研究は急速に発展した。その一つのきっかけとなったのは、1994年に初めて実施されたアムンゼン海における海洋観測である。西経100°-140°に位置するアムンゼン海東部 (Fig. 2) では、暖かい海水 (1-2°C) が棚氷下部へと流入し、棚氷を融解していることが発見された (Jacobs *et al.*, 1996)。また、2000年以降レーザー・レーダー高度計を搭載した IceSAT, CryoSAT, 全球の重力分布を測定することのできる GRACE などによる人工衛星観測によって、南極の質量損失が推定できるようになった (e.g. Velicogna and Wahr 2006, Rignot *et al.*, 2008, Pritchard *et al.*, 2009, Rignot *et al.*, 2011, King *et al.*, 2012, McMillan *et al.*, 2014)。現在では、南極氷床の損失による海面上昇への

寄与 (約 0.3 mm/year の海面上昇に相当) の約 70-80% がアムンゼン海東部によるものとされている (Rignot *et al.*, 2019)。このような背景のもと、2007年以降、アメリカ、イギリス、ドイツ、スウェーデン、韓国などの国際的な協力で、少なくとも2年に一度の頻度で、アムンゼン海での海洋観測が実施されている (e.g. Jenkins *et al.*, 2010, Jacobs *et al.*, 2011, Arneborg *et al.*, 2012, Nakayama *et al.*, 2013, Kim *et al.*, 2017)。しかし、海洋による暖かい海水の陸棚上、棚氷下部への流入プロセスは、いくつかの説があるものの (e.g. Dutrieux *et al.*, 2014, Kimura *et al.*, 2017, Nakayama *et al.*, 2018, Webber *et al.*, 2019, Dotto *et al.*, 2019)、未だ解明には至っていない。

著者がアムンゼン海の研究を始めた2011年には、アムンゼン海域、特に Pine Island 棚氷付近の海洋観測は、1994年 (Jacobs *et al.*, 1996)、2009年 (Jacobs *et al.*, 2011)、2010年 (Nakayama *et al.*, 2013) 以外には存在しなかった。その後、海洋観測が継続的に実施され、パイオロギング、自立型無人潜水機、係留計などの技術的発展も伴い、現在では、南極沿岸域ではこれまでにないほどに空間的、時間的に、詳細な海洋観測データが蓄積さ

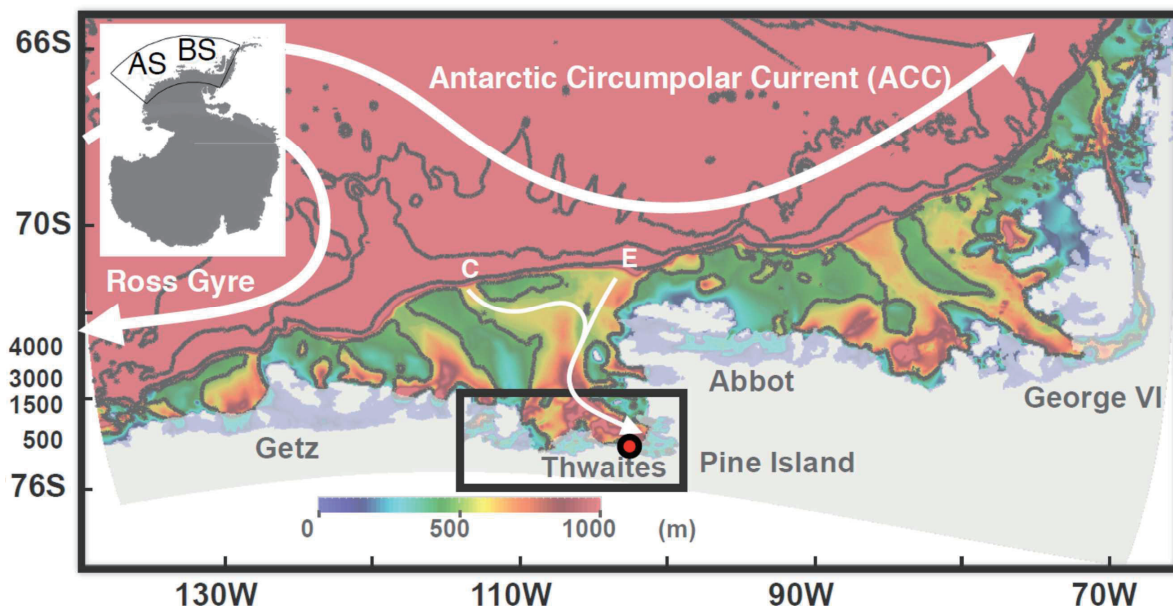


Fig. 2. (a) Model bathymetry (color) of Nakayama *et al.*, 2018 with white arrows indicating the Ross Gyre, southern extent of the Antarctic Circumpolar Current (ACC), and on-shelf intrusions of the mCDW toward the Pine Island Ice Shelf (PIIS) and Thwaites Ice Shelf (TIS). Black contours indicate the bathymetric contours at 500, 1500, 3000, and 4000 m. The inset (left top) shows Antarctica with the black line indicating the study area region. The Amundsen Sea (AS) and Bellingshausen Sea (BS) are also indicated. The submarine glacial troughs located on the eastern (E) and central (C) AS continental shelf are also indicated. The black box indicates the Nakayama *et al.* 2019 study area. The red dot indicates the location of the PIIS front mooring.

れている (e.g. Jenkins *et al.*, 2010, Dutrieux *et al.*, 2014, Webber *et al.*, 2017, Mallett *et al.*, 2018)。その結果、「限られた観測データを利用した海洋モデル研究」ではなく、「経年変動を捉えることのできる程度に十分に存在する観測データと数値モデルを統合的に利用する海洋モデル開発」を行うことが可能となってきた。中緯度域に着目した研究で実施されてきているデータ同化技術 (e.g. Zhang *et al.*, 2018) を南大洋に適用することも可能となりつつあるが、いまだに限られた観測データ、棚氷/海水と海洋の相互作用など、極域特有のプロセスが南極沿岸域のデータ同化プロダクトの開発を難しいものとしている。

本稿では、海洋棚氷相互作用を理解する上で重要な、(1) 高温の水塊の陸棚上への流入、(2) 棚氷の融解、(3) 棚氷融解水の流出などの海洋プロセスについて、著者の研究を含めて紹介する。さらに、南極沿岸域に着目した観測データと数値モデルを統合的に利用した研究、著者が中心的に進めている南極沿岸域に特化したデータ同化

モデルの開発について紹介し、今後の展開について議論する。

## 2. 海洋と棚氷の相互作用

### 2.1. 周極深層水の陸棚上への流入

一般的に、周極深層水 (Circumpolar Deep Water (CDW)) は南極周極流 (ACC) やロスジャイア (RG) に沿って、南極の周りを流れている (Fig. 2; Orsi *et al.*, 1995, Nakayama *et al.*, 2017)。この CDW の一部は、100°W, 110°W に位置するトラフからアムンゼン海の大陸棚上へと流入し、過去の氷河流動によって削られ形成された陸棚上を南北に横切る深い谷に沿って南へと流れる (Fig. 2; Jacobs *et al.*, 1996, Nakayama *et al.* 2013)。この陸棚上に流入した CDW は、水温約 1-1.5°C で、modified CDW (mCDW) と呼ばれる。例えば、大陸棚斜面

から、Pine Island 棚氷までの断面図を示すと、水深 0-400 m 付近に Winter Water (WW) と呼ばれる冬季の海氷生産によって形成される低温の水塊が存在し、水深約 400 m 以深には、水温 1-1.5°C の mCDW が存在しており、沖合から連続的に暖かい水塊が Pine Island 棚氷下部へと流入していることが確認できる (Fig. 3)。東アムンゼン海の局所的な領域について実施された数値計算の  $27.75\sigma_\theta$  等密度面上の水温を見ると (Nakayama *et al.*, 2019), 谷に沿って、水温約 1.3°C の水塊が Pine Island, Thwaites 棚氷下部へと流入している。モデルの流速場を用いて、 $27.75\sigma_\theta$  等密度面上の 74.24° S から粒子を流す

解析を行うと、高温の水塊はこの谷に沿った幅約 20-30 km の強い流れによって、接地線付近 (red, green, and blue boxed in Fig. 4b) まで運ばれていることがわかる。

## 2.2. 棚氷の融解

氷の結氷点は約  $-2^\circ\text{C}$ 、棚氷下部へ流入する水塊は約  $1^\circ\text{C}$  と温度差が大きいため、接地線付近で氷と接触した海水は、急速に棚氷を融解する (Fig. 1; Robin 1979, Hellmer and Olbers 1989, Jenkins 1991)。融解に伴って、mCDW に棚氷融解水が混合し、この混合水は (棚氷

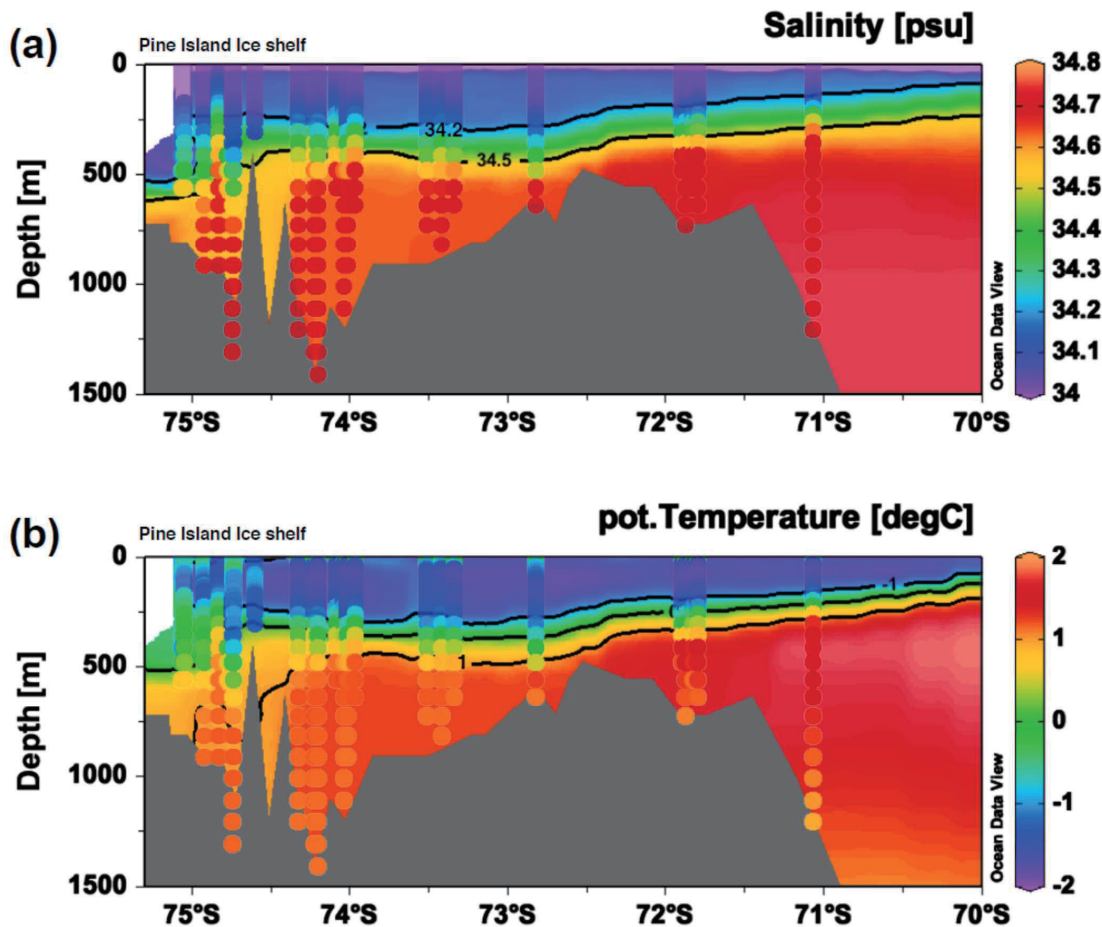


Fig. 3. Simulated vertical sections of the monthly mean in January 2010 for both (a) salinity and (b) potential temperature of the optimized simulation from the eastern trough to the PIIS. All the CTD profiles in 2010 within 50 km from the vertical section are plotted as circles with the color indicating (a) salinity (contours of 34.2 and 34.5 are indicated with black lines) and (b) potential temperature of CTD observations. For potential temperature, contours of  $-1^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ , and  $1^\circ\text{C}$  are indicated using black lines (Nakayama *et al.*, 2017).

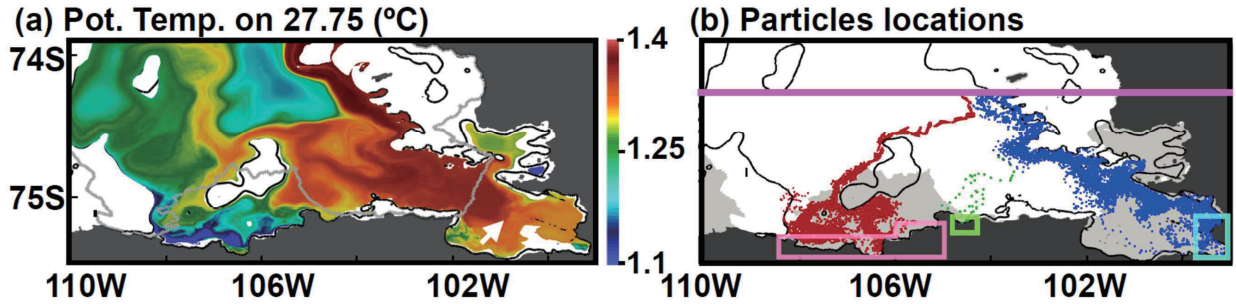


Fig. 4 (a) Horizontal distribution of the 60-d mean potential temperature along  $27.75 \text{ kg m}^{-3}$ . (b) Daily locations of all particles (initially released along  $74.24^\circ \text{ S}$  (pink line)) before reaching the volumes in the vicinity of the PI-IS (pink highlight), the eastern TIS (light green highlight), and western TIS (cyan highlight) grounding lines indicated by red, green, and blue points, respectively. The locations of the ice shelf fronts are shown using gray contours for Fig. 4 (a) and the location of the ice shelf is shown using gray patches in Fig. 4 (b) (Nakayama *et al.*, 2019).

融解水には塩分が含まれないことから) 周りの水塊と比べて低密度で、棚氷下部を沿って浅い深度へと湧昇する (e.g. Jacobs *et al.*, 1996; Nakayama *et al.*, 2013)。このように、接地線付近で海洋による棚氷融解が卓越することによって、棚氷厚は急速に薄くなり、Fig. 1 のような棚氷の形状が形成される (Figs. 1, 5)。Pine Island 棚氷における人工衛星を用いて推定した接地線近くの棚氷融解量の観測値は、約  $200 \text{ m yr}^{-1}$  であり (Shean *et al.*, 2019)、数値シミュレーションでは過小評価されているものの  $100 \text{ m/year}$  程度の棚氷底面融解が再現されている (Fig. 5; Nakayama *et al.*, 2019)。

### 2.3. 氷河融解水の流出

このようにして、形成された棚氷融解水と mCDW の混合水は、湧昇する際にコリオリ力の影響を受けて流れの向きを変え、西方へと進む沿岸流を形成する (Nakayama *et al.*, 2013, Nakayama *et al.*, 2014, Nakayama *et al.*, 2017, Biddle *et al.*, 2019)。例えば、アムンゼン海、ベリングスハウゼン海に存在する全ての棚氷下部から、棚氷融解量に相当する量のトレーサーを 10 年間、流出させる実験を行うと、流出した棚氷融解水を表すトレーサーの、80%以上が大陸棚上を西方へと移流し、20%程度は ACC によって大陸棚斜面に沿って東方へと移流する (Fig. 6)。

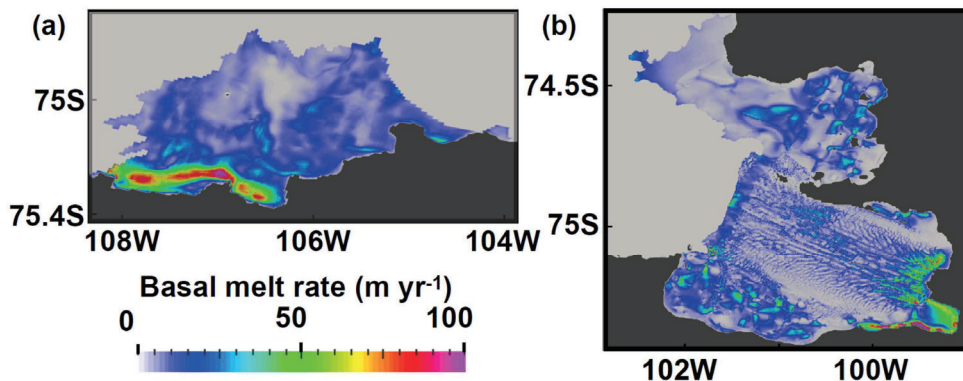
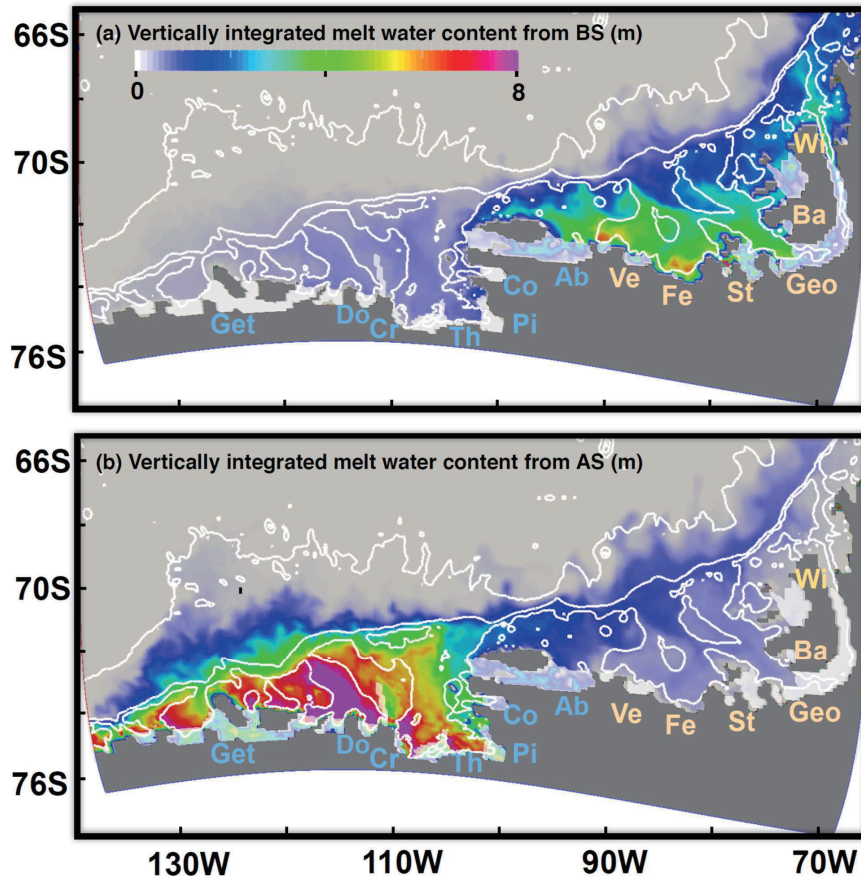


Fig. 5. 60-day mean simulated basal melt rates for the (a) TIS and (b) PIIS (Nakayama *et al.*, 2019).



**Fig. 6.** Spatial distributions of vertically integrated meltwater content after 10 years of optimized simulation showing the basal meltwater from (a) ice shelves in the BS (names in light yellow) and (b) ice shelves in the AS (names in light blue). The bathymetry contours of 500, 2000, and 4000 m are shown in white. The locations of the ice shelves are shown using white patches (Nakayama *et al.*, 2017).

ペリングスハウゼン海 (100–60°W) に存在する棚氷から流出する棚氷融解水も 70%以上が大陸棚上を西方へと移流する (Fig. 6)。ロス海では 1950 年以降観測されている長期的な低塩化が観測されており、これらの数値モデルの結果 (Nakayama *et al.*, 2014, Kusahara *et al.*, 2014) から、西南極の棚氷融解がロス海をはじめとする南極沿岸域、さらには、南極沿岸域で形成される南極底層水の低塩化に繋がっていることが示唆されている (Jacobs *et al.*, 2002, Nakayama *et al.*, 2014, Nakayama *et al.*, 2020)。このように、棚氷融解は、南極沿岸域の水塊特性の変質や、南極底層水の性質、さらには全球規模の海洋循環に影響を与える可能性もある (Purkey and John-

son 2013, Kusahara *et al.*, 2014)。

### 3. 過去の観測データの再現性の高いモデルの開発

2007 年以降、東アムンゼン海域においては、10 シーズン以上の海洋観測が実施されている。また、係留系、フロート、AUV、バイオリギングなどの技術を用いて、広域、かつ、時間変動を捉えることのできる観測も実施されてきた (e.g. Jenkins *et al.*, 2010, Webber *et al.*, 2017, Mallet *et al.*, 2018)。しかし、海水、棚氷、氷河などの人工衛星データや、船舶などによる海洋観測データは、観

測されているパラメータ、場所、時刻などがばらばらで、現実の南極の海で何が起きているかを理解することは容易ではない。また、海洋モデルとの相互比較も難しく、現状の数値モデル研究では、観測データと海洋モデルの比較は、最低限しか実施されていない場合も多い。この場合、(1) 海洋モデルを利用して、得られるモデル結果が現実の海況を再現できているとは限らない、(2) 観測データだけではメカニズムの理解もできず、それが将来的にどう応答するかもわからず、将来予測の高い不確実性の原因となっている (Schlegel *et al.*, 2018), といった問題がある。

こういった背景のもと、著者は、(1) 利用可能な観測データと数値モデルの比較、(2) グリーン関数法、アジョイント法などといったデータ同化技術を用いた数値モデルの最適化を実施してきた (Nakayama *et al.*, 2017)。具体的にデータ同化とは、総合評価値をモデルと観測値の差の重み付け二乗和として定義して、この総合評価値が最小となるように、モデルパラメータ、モデルの外力となる大気の再解析データ、モデル初期値などの最適化を行うことである。このようにして開発されるデータ同化プロダクトを用いて、過去の観測データを数値モデルで再現し、その因果関係を探ることができる (Forget *et al.*, 2015, Zhang *et al.*, 2018)。また、数値モデルを利用することで、観測点だけの情報だけでなく、計算領域の全ての変数が時間的に変化する様子が記述することができ、観測データが増加しつつあるとはいえ限られる極域海洋の研究には有用な手法である (Mazloff *et al.*, 2010, Heimbach, and Wunsch, 2010)。

### 3.1. グリーン関数法を用いたデータ同化

グリーン関数法という、複数 (通常 10 程度) のモデルパラメータを最適化する手法を用いて、2009, 2010 年のアムンゼン海の海況の再現を試みた例 (Nakayama *et al.*, 2017) を紹介する。東アムンゼン海で行われた海洋観測の結果から、2009, 2010 年の夏季の海況は類似していた。この期間は、WW の層厚が、200-300 m と比較的薄く (Fig. 3), Pine Island 棚氷への高温の水塊の流入が卓越し、融解量が約  $100 \text{ Gt yr}^{-1}$  と大きい値となっていた (Dutrieux *et al.*, 2014)。しかし、既存の数値モデルには、WW の性質 (特に塩分) やその層厚を再現すること

に難があり、経年変動をうまく再現できない理由の一つと考えられていた。そこで、著者らは、グリーン関数法を用いて、モデルパラメータを最適化し、2010 年について、WW, mCDW の層厚、性質をよく再現できる数値モデルを開発した (Fig. 3)。

このようにして、最適化されたパラメータをもとに、開発された高解像度数値シミュレーションを用いて、CDW のアムンゼン海、ベイリングスハウゼン海への流入経路を調べる数値モデル実験を行なった (Nakayama *et al.*, 2018)。継続的に観測されている南大洋の  $67^{\circ}\text{S}$  に位置する東西断面 (S04P) からのアムンゼン海、ベイリングスハウゼン海の大陸棚上への CDW の経路に注目して解析を行うと、大陸棚上へ流入する mCDW の性質が、ロスジャイアなどの外洋の大規模な海洋循環によって、2001-2015 年の期間に最大  $0.3^{\circ}\text{C}$  程度変化したことが示唆された (Fig. 7) この研究では、観測、数値モデルの両者において、外洋、大陸棚上で類似した水温変動が見られことが、大規模な海洋循環が沿岸の海洋に影響を与えている可能性があるという発見につながり、観測データの再現性の高いモデルの開発の重要性を示している。

### 3.2. アジョイント法を用いたデータ同化

グリーン関数法を用いた Nakayama *et al.* (2017) では、時間変動を伴わない場合について、数値モデルの再現性を向上させることができた。しかし、Pine Island ice shelf の棚氷融解量は、2012 年には 2009-2010 年と比べて約 50% にまで減少し、その後増加傾向を示しており、その変動を駆動した海洋の経年変動のメカニズムの理解が直近の課題となっている。このような、時間変動を伴ったデータ同化は、全球モデルで実施されているものの (Forget *et al.*, 2015, Zhang *et al.*, 2018), これらの同化プロダクトは、南極沿岸域の水塊の性質やその時間的変動をうまく再現することができていない。観測データの不足や、棚氷、海氷など極域に特有なプロセスが原因と考えられている。しかし、棚氷融解のメカニズムを理解するためには、南極沿岸域の観測データの再現性の向上が不可欠で、著者は西南極域に特化したデータ同化プロダクトを開発している。

アジョイント法と呼ばれるデータ同化の手法では、時間変動する海洋観測データと数値モデルの差の重み付け

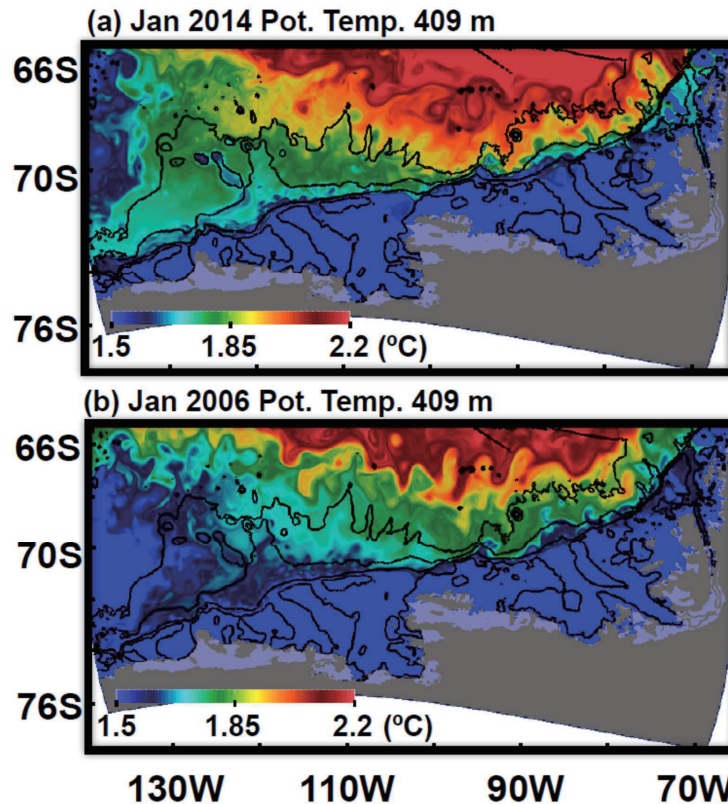


Fig. 7. Yearly mean 409-m potential temperature for (a) 2006 and (b) 2014—bathymetric contours of 500, 1500, 3000, and 4000 m are indicated in black (Nakayama *et al.*, 2018).

二乗和 (総合評価値) を最小とするように、モデルを繰り返し駆動し、モデルの初期値、大気外力などを、評価関数を最小とするように繰り返し修正する。既存の手法に (Forget *et al.*, 2015, Zhang *et al.*, 2018), いくつかの修正を加えることで、アムンゼン海、ベリングスハウゼン海のデータ同化プロダクトを開発中である。例えば、アムンゼン海の Pine Island 棚氷沖の係留点での時系列は (Webber *et al.*, 2017), 最適化を行う前には、2010 年から 2014 年にかけて低温化、低塩化し、観測データと全く異なる状態となっていたものの、25 回の繰り返し計算を実施することで、現実に近い状態が再現されるようになることが確認された (Fig. 8)。しかし、観測データ (Webber *et al.*, 2017) と比較すると、観測データでは、2010-2013 年にかけて mCDW の水温が約 0.3°C 程度低温化し、その後、昇温している変化が見られるが、このような時間変動を再現することはできておらず、さらなる

改善を行なっている。

#### 4. 今後の展開

国内外の研究者の努力や、観測技術の発展によって、南極沿岸域の海洋観測データが蓄積されてきた。例えば、棚氷融解量の大きさから各国が継続的に海洋観測を実施してきたアムンゼン海、基地や船舶の航行経路に隣接しており長期的な観測を実施しやすいウエッデル海、ロス海などでは、既に、経年変動を捉えることのできる観測データが取得されている (e.g. Jacobs *et al.*, 2012, Darelus *et al.*, 2016)。近年では、東南極域でも棚氷融解が加速する可能性が指摘され、トッテン氷河 / 棚氷域では、アメリカ、オーストラリア、日本によって 2015 年以降、複数回の海洋観測が実施されてきた (e.g. Rintoul *et al.*, 2016, Nitsche *et al.*, 2017, Girton *et al.*, 2019)。バ



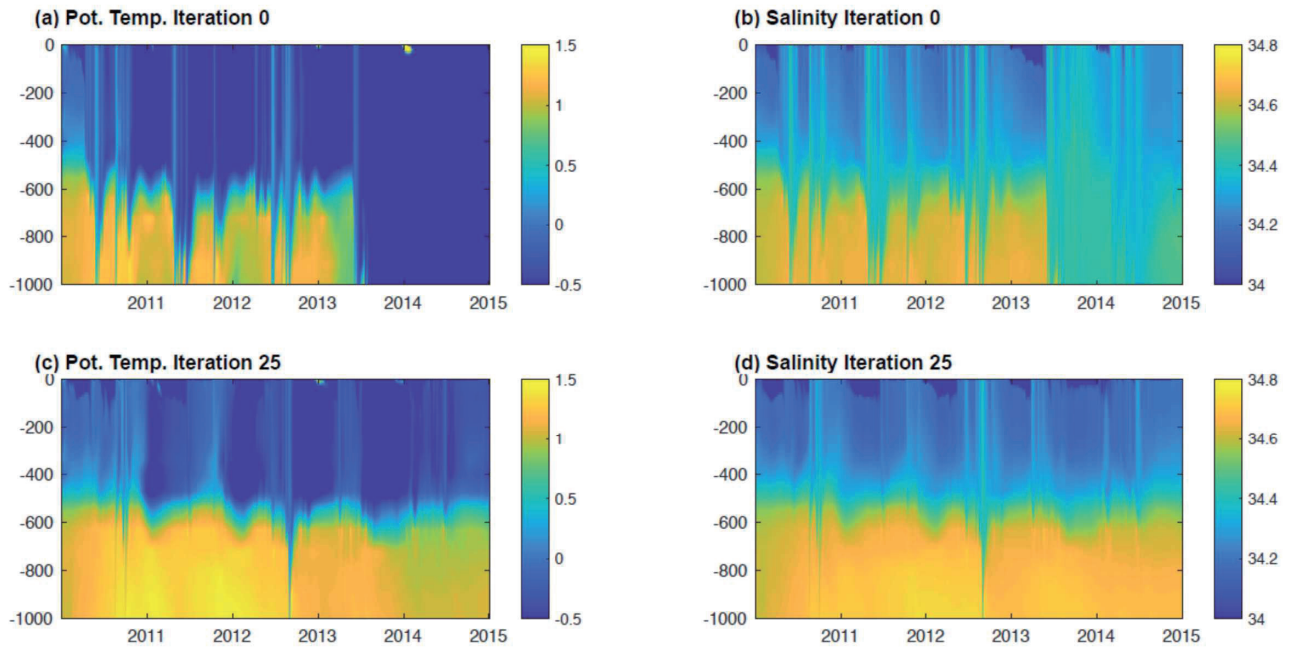


Fig. 8. Simulated time series of (a & c) potential temperature and (b & d) salinity at the PIIS front mooring (red dot in Fig. 1) for iterations 0 and 25, respectively.

イオロギングや自動観測技術の発展に伴って、データの蓄積は今後も加速することが考えられ、今後の数値モデル研究では、南極沿岸域全域で、過去の観測データを再現することのできる海洋モデルの開発が重要なテーマとなるであろう。

現在、著者は共同研究者らと、アムンゼン海だけでなく、ペリングスハウゼン海、東南極沿岸域 (90-150°E)、ケープダンレー沖 (60-70°E)、ロス海 (150°E-140°W) などの複数の領域の海洋モデル開発を実施している。これらのすべての領域について、詳細な観測データとの比較、グリーン関数法などを用いたデータ同化を実施することを計画している。過去の観測データをよりよく再現することのできる数値モデルを開発し、それぞれの領域に特化して開発することで、棚氷融解を駆動する海洋のプロセスの理解を進めていくことを目指している。

現在では、NASA ジェット推進研究所 / University of California Irvine との共同研究で、海洋生態系モデル、氷河、棚氷モデルとの結合も実施している。南極氷床の損失による海面上昇の将来予測や、南大洋による二酸化炭素の取り込みについては、理解が求められているもの

の、海洋モデルの南極沿岸域における再現性の評価の不足や、またその再現性がよくないことが課題となっている。南極による海面上昇への寄与、南大洋による二酸化炭素の取り込み、炭素循環などの課題について、観測データの再現性の高い数値モデルを開発することで、現状理解、より確からしい将来予測を実現することが求められていると考えている。

## 謝辞

このたび名誉ある日本海洋学会岡田賞を頂いたことは身に余る光栄であり、選考・承認をしていただいた賞選考委員会および学会員の皆様に厚くお礼申し上げます。「棚氷」と「南大洋」の研究を始めた Alfred Wegener Institute での博士課程では Dr. Hartmut Hellmer, Dr. Ralph Timmermann, Dr. Michael Schröder に、ご指導をいただきました。私にとって、「極域海洋」の研究を始めるきっかけとなった、北海道大学環境科学院での修士課程では、大島慶一郎教授に、海洋物理、論文の書き方など、研究を始めるにあたって必要なことを丁寧に指導

していただきました。また、私がこれまで所属した NA-SA Jet Propulsion Laboratory, University of California Irvine, 北海道大学低温科学研究所, 国立極地研究所の Dr. Dimitris Menemenlis, Prof. Eric Rignot, Dr. Ian Fenty, 青木茂准教授, 田村岳史准教授から頂いた数多くのご助言, ご協力により, 本成果を得ることが出来ました。私が利用/開発に関わってきた海洋モデルは, 非常に多くの研究者が携わってきたもので, その関係者の皆様には感謝いたします。また, 参加させていただいたプロジェクトや観測航海に関わられた全ての研究者, 技術補佐員, 乗組員の皆様には多大なご助力を頂き, 大変お世話になりました。この紙面をお借りして, 全ての皆様に心から感謝の意を表します。

## References

- Arneborg, L., A. K. Wählin, G. Björk, B. Liljebladh, and A. H. Orsi (2012): Persistent inflow of warm water onto the central Amundsen shelf. *Nat. Geosci.*, **5**, 876-880.
- Biddle, L. C., B. Loose, and K. J. Heywood (2019): Upper ocean distribution of glacial meltwater in the Amundsen Sea, Antarctica. *J. Geophys. Res. Oce.*, **124**, 6854-6870.
- Darelius, E., I. Fer, and K. W. Nicholls, (2016): Observed vulnerability of Filchner-Ronne Ice Shelf to wind-driven inflow of warm deep water. *Nat. Commun.*, **7**, 1-7.
- DeConto, R. M., and D. Pollard (2016): Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, **531**, 591-597.
- Dotto, T. S., A. C. Naveira Garabato, S. Bacon, P. R. Holland, S. Kimura, Y. L. Firing, M. Tsamados, A. K. Wählin, and A. Jenkins (2019): Wind-driven processes controlling oceanic heat delivery to the Amundsen Sea, Antarctica. *J. Phys. Oceanogr.*, **49**, 2829-2849.
- Dutrieux, P., J. De Rydt, A. Jenkins, P. R. Holland, H. K. Ha, S. H. Lee, and M. Schröder, (2014): Strong sensitivity of Pine Island ice-shelf melting to climatic variability. *Science*, **343**, 174-178.
- Fretwell, P., H. D. Pritchard, D. G. Vaughan, J. L. Bamber, N. E. Barrand, R. Bell, C. Bianchi, R. G. Bingham, D. D. Blankenship, G. Casassa, G. Catania, and others 24 co-authors (2013): Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, **7**, 375-393.
- Forget, G., J. M. Campin, P. Heimbach, C. N. Hill, R. M. Ponte, and C. Wunsch (2015): ECCO version 4: an integrated framework for non-linear inverse modeling and global ocean state estimation. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 3071-3104.
- Fürst, J. J., G. Durand, F. Gillet-Chaulet, L. Tavard, M. Rankl, M. Braun, and O. Gagliardini (2016): The safety band of Antarctic ice shelves. *Nature Clim. Change*, **6**, 479-482.
- Girton, J. B., K. Christianson, J. Dunlap, P. Dutrieux, J., Gobat, C. Lee, and L. Rainville, (2019): Buoyancy-adjusting Profiling floats for exploration of heat transport, melt rates, and mixing in the ocean cavities under floating ice shelves. P. 1-6, In *OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE*, IEEE, WA, USA.
- Hellmer, H. H., and D. J. Olbers, (1989): A two-dimensional model for the thermohaline circulation under an ice shelf. *Antarct. Sci.*, **1**, 325-336.
- Jacobs, S. S., H. H. Hellmer, and A. Jenkins, (1996): Antarctic ice sheet melting in the Southeast Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 957-960.
- Jacobs, S. S., C. F. Giulivi, and P. A. Mele, (2002): Freshening of the Ross Sea during the late 20th century. *Science*, **297**, 386-389.
- Jacobs, S. S., A. Jenkins, C. F. Giulivi, and P. Dutrieux (2011): Stronger ocean circulation and increased melting under Pine Island Glacier ice shelf. *Nat. Geosci.*, **4**, 519-523.
- Jenkins, A. (1991): A one-dimensional model of ice shelf-ocean interaction. *J. Geophys. Res. Oce.*, **96**, 20671-20677.
- Jenkins, A., P. Dutrieux, S. S. Jacobs, S. D. McPhail, J. R. Perrett, A. T. Webb, and D. White (2010): Observations beneath Pine Island Glacier in West Antarctica and implications for its retreat. *Nat. Geosci.*, **3**, 468-472.
- Kim, T. W., H. K. Ha, A. K. Wählin, S. Lee, C. S. Kim, J. H. Lee, and Y. K. Cho (2017): Is Ekman pumping responsible for the seasonal variation of warm circumpolar deep water in the Amundsen Sea? *Cont. Shelf Res.*, **132**, 38-48.
- Kimura, S., A. Jenkins, H. Regan, P. R. Holland, K. M. Assmann, D. B. Whitt, Van M. Wessem, W. Jan van de Berg, C. H. Reijmer, and P. Dutrieux, (2017): Oceanographic controls on the variability of ice-shelf basal melting and circulation of glacial meltwater in the Amundsen Sea Embayment, Antarctica. *J. Geophys. Res. Oce.*, **122**, 10131-10155.
- Kusahara, K., and H. Hasumi, (2014): Pathways of basal meltwater from Antarctic ice shelves: A model study. *J. Geophys. Res. Oce.*, **119**, 5690-5704.
- King, M. A., R. J. Bingham, P. Moore, P. L. Whitehouse, M. J. Bentley, and G. A. Milne, (2012): Lower satellite gravimetry estimates of Antarctic sea-level contribution. *Nature*, **491**, 586-589.
- Mallett, H. K., L. Boehme, M. Fedak, K. J. Heywood, D. P. Stevens, and F. Roquet, (2018): Variation in the distribution and properties of Circumpolar Deep Water in the eastern Amundsen Sea, on seasonal timescales, using seal-borne tags. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 4982-4990.
- Mazloff, M. R., P. Heimbach, and C. Wunsch (2010): An eddy-permitting Southern Ocean state estimate. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 880-899.
- McMillan, M., A. Shepherd, A. Sundal, K. Briggs, A. Muir, A. Ridout, A. Hogg, and D. Wingham, (2014): Increased ice losses from Antarctica detected by CryoSat-2. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 3899-3905.
- Nakayama, Y., M. Schröder, and H. H. Hellmer, (2013): From circumpolar deep water to the glacial meltwater plume on the eastern Amundsen Shelf. *Deep Sea Res. Part 1, Oceanographic Research Papers*, **77**, 50-62.
- Nakayama, Y., R. Timmermann, C. B. Rodehacke, M. Schröder, and H. H. Hellmer (2014): Modeling the spreading of glacial meltwater from the Amundsen and Bellingshausen Seas. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 7942-7949.
- Nakayama, Y., D. Menemenlis, M. Schodlok, and E. Rignot (2017): Amundsen and Bellingshausen Seas simulation with optimized ocean, sea ice, and thermodynamic ice shelf model parameters. *J. Geophys. Res. Oce.*, **122**, 6180-6195.
- Nakayama, Y., D. Menemenlis, H. Zhang, M. Schodlok, and E. Rignot (2018): Origin of Circumpolar Deep Water intruding onto the Amundsen and Bellingshausen Sea continental shelves. *Nat. Commun.*, **9**, 1-9.

- Nakayama, Y., G. Manucharyan, H. Zhang, P. Dutrieux, H. S. Torres, P. Klein, H. Seroussi, M. Schodlok, E. Rignot, and D. Menemenlis, (2019): Pathways of ocean heat towards Pine Island and Thwaites grounding lines. *Sci. Rep.*, **9**, 1-9.
- Nakayama, Y., R. Timmermann, and H. H. Hellmer, (2020): Impact of West Antarctic ice shelf melting on Southern Ocean hydrography. *The Cryosphere*, **14**, 2205-2216.
- Nitsche, F. O., D. Porter, G. Williams, E. A. Cugnon, A. D. Fraser, R. Correia, and R. Guerrero (2017): Bathymetric control of warm ocean water access along the East Antarctic Margin. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 8936-8944.
- Orsi, A. H., T. Whitworth III, and W. D. Nowlin Jr, (1995): On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep Sea Res. Part I: Oceanographic Research Papers*, **42**, 641-673.
- Paolo, F. S., H. A. Fricker, and L. Padman (2015): Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science* **348**, 327-331.
- Pritchard, H. D., R. J. Arthern, D. G. Vaughan, and L. A. Edwards (2009): Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature*, **461**, 971-975.
- Pritchard, H., S. R. Ligtenberg, H. A. Fricker, D. G. Vaughan, M. R. van den Broeke, and L. Padman (2012): Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, **484**, 502-505.
- Purkey, S. G., and G. C. Johnson (2013): Antarctic Bottom Water warming and freshening: Contributions to sea level rise, ocean freshwater budgets, and global heat gain. *J. Climate*, **26**, 6105-6122.
- Rignot, E., J. L. Bamber, M. R. van den Broeke, C. Davis, Y. Li, W. J. Van De Berg, and E. Van Meijgaard (2008): Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nat. Geosci.*, **1**, 106-110.
- Robin, G. D. Q. (1979): Formation, flow, and disintegration of ice shelves. *J. Glaciology*, **24**, 259-271.
- Rignot, E., J. Mouginot, and B. Scheuchl, (2011): Ice flow of the Antarctic ice sheet. *Science*, **333**, 1427-1430.
- Rignot, E., J. Mouginot, B. Scheuchl, M. van den Broeke, M. J. van Wessem, and Morlighem, M. (2019): Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979-2017. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **116**, 1095-1103.
- Rintoul, S. R., A. Silvano, B. Pena-Molino, E. van Wijk, M. Rosenberg, J. S. Greenbaum, and D. D. Blankenship (2016): Ocean heat drives rapid basal melt of the Totten Ice Shelf. *Sci. Advances*, **2**, e160610.
- Schlegel, N. J., H. Seroussi, M. P. Schodlok, E. Y. Larour, C. Boening, D. Limonadi, M. M. Watkins, M. Morlighem, , and M. R. van den Broeke (2018): Exploration of Antarctic Ice Sheet 100-year contribution to sea level rise and associated model uncertainties using the ISSM framework. *The Cryosphere*, **12**, 3511-3534.
- Shean, D. E., I. R. Joughin, P. Dutrieux, B. E. Smith, and E. Berthier (2019): Ice shelf basal melt rates from a high-resolution digital elevation model (DEM) record for Pine Island Glacier, Antarctica. *The Cryosphere*, **13**, 2633-2656.
- Velicogna, I., and J. Wahr (2006): Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica. *Science*, **311**, 1754-1756.
- Webber, B. G., K. J. Heywood, D. P. Stevens, P. Dutrieux, E. P. Abrahamson, A. Jenkins, S. S. Jacobs, H. K. Ha, S. H. Lee, and T. W. Kim (2017): Mechanisms driving variability in the ocean forcing of Pine Island Glacier. *Nat. Commun.*, **8**, 1-8.
- Webber, B. G., K. J. Heywood, D. P. Stevens, and K. M. Assmann (2019): The impact of overturning and horizontal circulation in Pine Island Trough on ice shelf melt in the eastern Amundsen Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **49**, 63-83.
- Zhang H., D. Menemenlis, and I. Fenty (2018): ECCO LLC270 Ocean-Ice State Estimate. *ECCO Consortium*, 1-7.

# Investigation of ice shelf ocean interaction in the Amundsen Sea using numerical modeling and ocean state estimates

Yoshihiro Nakayama<sup>†</sup>

## Abstract

Recent studies show that Antarctica is losing ice, which is contributing to global sea level rise at a rate of approximately  $0.3 \text{ mm yr}^{-1}$ . The main cause of this ice loss is on-shelf intrusions of warm ocean water. This water flows into ice shelf cavities and causes melting, which thins the ice shelves. This leads to decreased buttressing, acceleration of ice flow, and grounded ice loss. The ice loss occurs unevenly around Antarctic with over 70% of the grounded ice loss occurring in the eastern Amundsen Sea sector. As such, oceanographic observations were frequently conducted in this sector over the past decade. These observations have provided a sufficient amount of data to help develop a reliable ocean simulation that is able to simulate the current hydrographic conditions and past observations. This research focuses on the development of a reliable ocean model, as only by using reliable model outputs we are able to investigate the causes of the observed changes and sensitivity to climate variations. In this study, important physical processes governing ice shelf ocean interaction are explained including (1) the on-shelf intrusion of modified Circumpolar Deep Water, (2) oceanographic processes at an ice shelf interface, and (3) spreading and outflow of glacial meltwater. Additionally, we will present our model development, including model-data evaluation and development of ocean state estimates.

**Key words:** Antarctica, Southern Ocean, Ice shelf, and Circumpolar Deep Water

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

(Received 16 September 2020; accepted 19 October 2020)

(doi: 10.5928/kaiyou.29.6\_233)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2020)

---

<sup>†</sup> Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan.  
Tel: +81117067432  
e-mail: Yoshihiro.Nakayama@lowtem.hokudai.ac.jp