



多重階層結合系における対流圏大気現象の過去・現在・未来/
日本周辺の海流の力学過程およびその影響の理解

気象研海洋モデルにおける 海氷熱力学過程の 改良について

豊田隆寛¹⁾ 坂本 圭¹⁾
豊田威信²⁾ 辻野博之¹⁾
浦川昇吾¹⁾ 川上雄真¹⁾
山上晃央^{1,3)} 小松謙介^{1,4)}
山中吾郎¹⁾ 谷川朋範¹⁾
中野英之¹⁾

Improvements of sea ice thermodynamics and
salt content parameterizations in an OGCM

Takahiro Toyoda, Kei Sakamoto, Takenobu
Toyota, Hiroyuki Tsujino, L. Shogo Urakawa,
Yuma Kawakami, Akio Yamagami, Kensuke
K. Komatsu, Goro Yamanaka, Tomonori
Tanikawa, Hideyuki Nakano

- 1) 気象庁 気象研究所
2) 北海道大学 低温科学研究所
3) 日本学術振興会
4) 東京大学 大気海洋研究所

気象研究所の海洋大循環モデルに、海氷の熱力学に影響する海氷塩分の変化とメルトポンド過程の導入を行った。海氷の塩分収支に関係するプロセスについて可能な限り観測ベースの定式化を利用し、メルトポンドについてはアルベドへの影響だけでなくポンド水の熱収支を評価する系を構築した。感度実験を行い、その影響を評価した。

1. はじめに

海氷は、気候システムの重要な要素であり、大気・海洋間の熱・淡水・運動量の交換に影響を与える。海氷変動は様々なフィードバックプロセスが働き、北極海の高氷の急激な減少トレンドや温暖化の増幅に寄与していると考えられている。そのため、海氷プロセスを理解し、予測モデルに反映させることは、気候研究の重要な課題である。

気象研究所では、現業予測の向上のために海洋大循環モデルの開発を継続的に行ってきた（例えば、Tsujino *et al.*, 2011; Sakamoto *et al.*, 2019）。これを用いた海洋単体、及び、大気海洋結合シミュレーションは国際的な相互比較研究に参加・貢献し（例えば、Tsujino *et al.*, 2020; Keen *et al.*, 2021）、また、そこで得られた知見を新しい開発に活かしてきた。

本研究では、気象研究所の海洋大循環モデルに含まれる海氷モデルの熱力学の改良として、海氷塩分の変化とメルトポンド過程の導入（後述）を行う。過去の観測・モデリング研究をもとにした定式化とそれを用いたシミュレーション結果の評価を行う。

2. モデル

2.1. 既存の海洋大循環モデル

気象研究所コミュニティ海洋モデル（MRI.COM）version 5（Sakamoto *et al.*, 2023）を使用する。これに含まれる海氷モデルについて簡単に記述する。熱容量のある1層の海水を仮定して熱収支を計算する（Mellor and Kantha, 1989）。これ以外（アルベドやリッジングなど）の定式化についてはロスアラモス研究所のCICEモデル（Hunke

and Lipscomb, 2010) に倣っている。現状のモデルでは、海水塩分を定数 (4 psu) とし、また、メルトポンドの効果を陽に表現していない。

2.2. 海水塩分の可変性

海水塩分の可変性を行う。これは海水の熱力学や海水域での塩の収支に影響する。

海水形成時に (高塩分な) 海洋表層水が海水に取り込まれるが、この取り込み率が室内実験をもとに海水の成長速度の関数として表現されている (Cox and Weeks, 1975; 1988)。また最近、この関数がより広範囲の成長速度に有効であることが示されている (Toyota *et al.*, 2013)。本研究でもこの定式化を使用する。また、積雪の重みで海水上面が喫水する (負のフリーボード) 時に出来る海水を含む雪の層 (スラッシュ) は結氷して雪氷となるが、この過程でも塩が取り込まれる。本研究ではスラッシュに含まれる海水の割合をオホーツク海における雪氷の現場観測 (Toyota *et al.*, 2007) をもとに設定する。脱塩プロセスは、brine expulsion と gravity drainage についての定式化 (Cox and Weeks, 1986; 1988) を導入する。海水が融解する際、または、輸送される際には、海水体積に比例した塩が輸送されるとする。海水塩分の変動を表現することで、海水の熱伝導係数の温度・塩分依存性 (Pringle *et al.*, 2007) を導入する。

2.3. メルトポンド過程の導入

メルトポンドは海水上に融解水がたまっただけで、積雪や乾いた海水と比べて日射を良く吸収するため、更に融解を促進する。本研究では、メルトポンド水の体積を予報変数とする定式化を行う (図 1)。海水と積雪の融解水の一部がメルトポンドに使用される (Ebert and Curry, 1993)。ポンド水は海水のブラインチャンネル (海水中の液相の連なった通り道) を通じて排出される (Golden *et al.*, 2007)。また、ポンド水の質量を合わせた浮力バランスから負のフリーボード状態となる際には、ポンド水を海洋に流出させ、この状態を解消する。更に、ポンド水は一部積雪の中に浸透する (Hunke *et al.*, 2013)。これらからポンド体積収支を計算する。

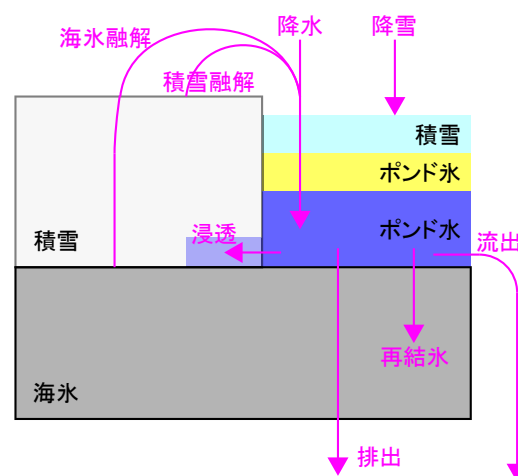


図1 メルトポンドの体積収支の概念図。

上記で求めたポンド水の体積を用いて、熱力学過程に必要なポンド面積・深さは、ポンドのアスペクト比から診断する。過去の研究 (Perovich *et al.*, 2003) で観測されたアスペクト比 $\delta = h/a = 0.8$ [m] (h は深さ [m], a はポンドの密接度) をベースにして、今回は個々のポンドではなくグリッドスケールのポンドを代表する値として経験的定数 f_{shape} を用いて $\delta = 0.8 \cdot f_{shape}$ とする予備実験 ($f_{shape} = 1/4, 1/3, 1/2, 1$) をもとに、北極海全体でのポンド面積がおおよそ観測と合うように $f_{shape} = 1/3$ とする。

メルトポンドの存在により海水上の表面アルベドが低下する。加えて、本研究ではメルトポンドの熱力学を考慮する。即ち、短波放射のポンド水内部での吸収・ポンド底面での反射、表面からの長波放射、顕熱・潜熱の放出、ポンド底面から海水への熱伝導から、ポンド水温を予報する熱収支が計算される (図 2a)。ポンド水温が結氷点よりも下がれば、表面で結氷する。このポンド氷の上に降雪があれば積雪し、積雪がある場合は短波の浸透を考えず、下層での熱交換は熱伝導のみとなる (図 2b)。上記結氷点はポンド水の塩分に依存する。ポンドの温度が十分に低下して海水として定義される閾値になると、海水に変化して下層の海水に取り込まれ、メルトポンドは消滅する。

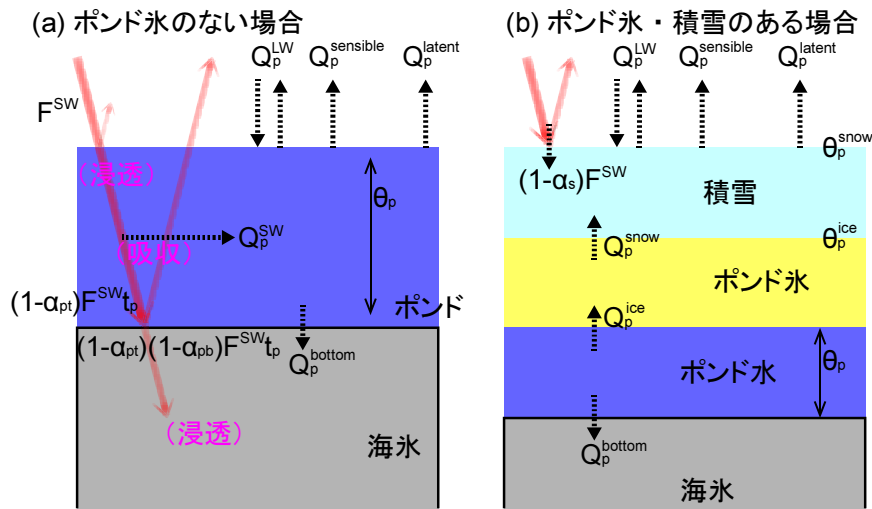


図2 メルトポンドの熱収支の概念図. (a) メルトポンドの上面に氷のない場合. (b) ポンド氷が張り、その上に積雪がある場合.

2.4. 実験

GONDOLA_100 の設定 (Urakawa *et al.*, 2020) での感度実験を行う. トライポラー座標系で, 水平分解能は北極海でおよそ 30–50 km である. 鉛直方向には 60 層の海洋グリッドを定義し, 8 つの海水厚カテゴリーを定義する. 海面強制は JRA55-do (T sujino *et al.*, 2018) から与える. 同じ初期値から従来のモデルと新しいパラメタリゼーションを加えたモデルを用いて 1982–2019 年の実験を行い (CTL と NEW とする), 主に 2000 年以降の違いを調べる.

メルトポンド過程の導入により, 夏季の海水融解の促進が想定される. 新しいスキームのインパクトの評価を行う上で, 現状のモデルの再現性を踏まえて海水が融け過ぎるバイアスを持つ実験とならないように, 比較的厚い海水を表現するような海水圧力パラメータの設定 ($P^* = 1.0 \times 10^{-4} \text{ N m}^{-2}$) で実験を行う. この値は相互比較研究 (例えば, Chevallier *et al.*, 2017) で用いられている範囲内である. このような基準実験の選択の下で感度実験を行うので, 海水厚や体積については現実と比較した再現性というより 2 実験間の差についての議論が可能である.

3. 結果

海水塩分可変化を行った NEW 実験では, 両半球の夏季・冬季の海水塩分について過去のモデリング研究 (Vancoppenolle *et al.*, 2009; Turner *et al.*, 2015) とおよそ整合する分布が得られた (図略). また, 過去の観測的研究 (例えば, Kovacs, 1996) では, 海水厚と海水塩分との関係が評価されており, NEW 実験の結果からもこれらの関係式に近い関係性が得られた. これらの結果から, 新しいスキームにより海水塩分分布の季節変動がおよそ再現されていることが示唆される. 特に, 本研究では海水塩分の緩和項を用いない予報計算により, これらの再現結果を得た.

図3では, 北極海のメルトポンド面積について, 実験結果と衛星観測ベースの推定値を比較している. NEW 実験では 7 月に面積最大となっており, 観測と整合的である. 年最大値も観測に近い $1.5\text{--}1.8 \times 10^{-4} \text{ km}^2$ 程度であり, これは予備実験をもとにした経験的定数 f^{shape} の選択によって達成されているが, 年々変動の傾向もおおよそ再現しており, モデルの現実的な表現のポテンシャルを示唆している.

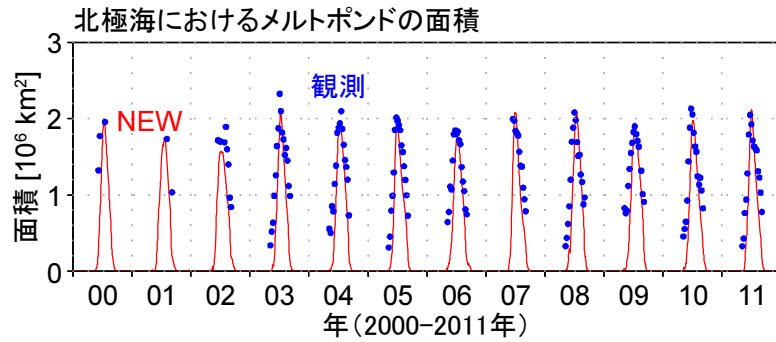


図3 北極海 (65° – 88° N) におけるメルトポンド面積の時系列. 赤線がNEW実験の結果. 青点は衛星観測 (MODIS) ベースの8日毎の推定値 (Rösel *et al.*, 2012).

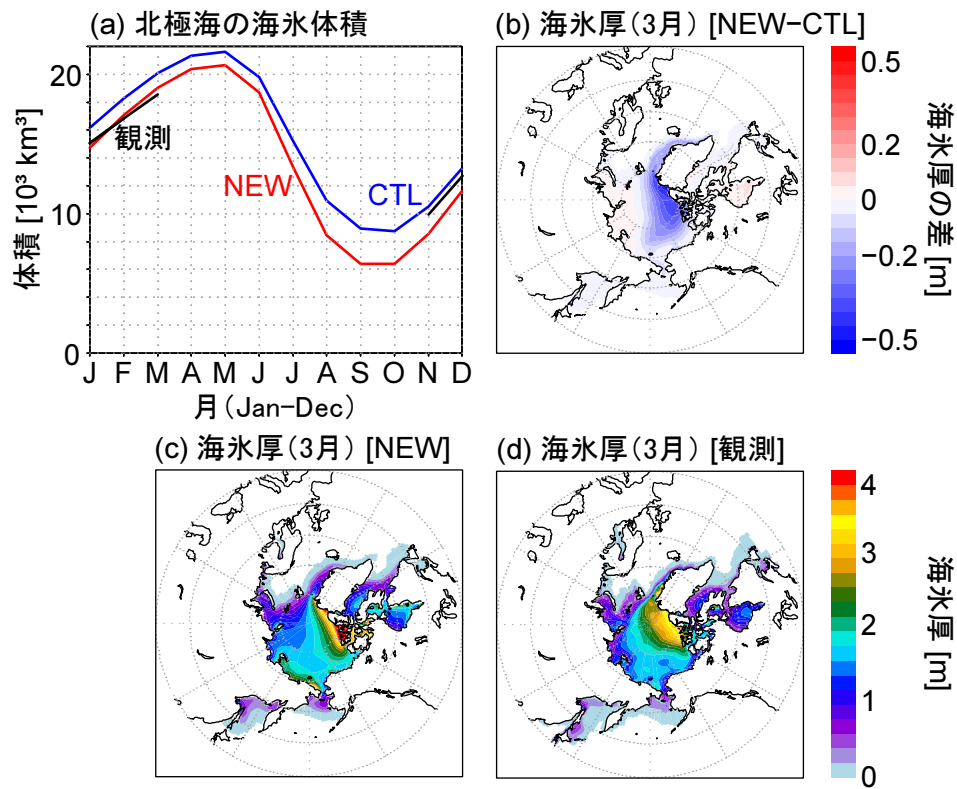


図4 (a) 北極海 ($> 65^{\circ}$ N) における海水氷体積の時系列. 青・赤線がCTL・NEW実験. 黒線がCryosat-2 とSMOS衛星観測を組み合わせた推定値 (CS2SMOS; Ricker *et al.*, 2017). (b–d) 3月の海水氷厚 (密接度を掛けた値) の分布. (b) CTLとNEW実験の差. (c) NEW実験. (d) CS2SMOSデータ. これらは2011–2019年の平均値を比較している.

新しいパラメタリゼーションは海水体積・厚さの表現に影響する。図4aに示されるように、北極海の海水体積は2011–2019年平均で夏季に $2 \times 10^3 \text{ km}^3$ 以上減少し、冬季にも半分程度の影響が残る。3月の海水厚を比較すると、カナダ多島海・グリーンランド北側の厚水域を中心に約50 cm薄くなるインパクトが見られ、太平洋セクターやグリーンランドの東側でも数十 cm 薄くなっている(図4b)。メルトポンドは夏季に主に平坦氷の上に選択的に形成されるが、力学的作用した変形氷から成る厚水域で大きなインパクトが見られることから、力学作用前の海水厚が厚水域の海水厚にも影響していることが示唆される。結果として、基準実験の選択(2.4節)と合わせて、厚水域での厚い海水(例えば、4 m以上のもの)と太平洋側でのやや薄い一年氷(例えば、2 m以下)が両立して表現されており(図4c, d)、新しいパラメタリゼーションによる改善のポテンシャルが示された。本研究のものに加えて海水モデルに含まれる複数の経験的パラメータの調整(例えば、Toyoda *et al.* (2021)の最適化アプローチ)による総合的な海水場の改善を今後の研究で行う必要がある。

4. おわりに

本研究では、既存の海洋大循環モデルに海水塩分とメルトポンドについての新しいパラメタリゼーションを導入した。海水塩分やメルトポンド変数を変動させるプロセスとして、過去の研究で提案されている観測と物理ベースの定式化を可能な限り使用した。ただし、最終的にグリッドスケールの(バルクでの)メルトポンドの表現に関係して、いくつかの経験的パラメータが残り、これらはメルトポンド面積の観測に合うように調整した。将来的に海水モデルの他の経験的定数と合わせて総合的な調整が求められる。

新しく導入された塩分の取り込みと脱塩プロセスにより、海水塩分分布の季節変動が両半球で過去の研究と整合的に再現された。また、現実的な範囲のパラメータ設定で、観測的な見積もりと整合するメルトポンドの面積の季節・経年変動が表

現された。メルトポンドの影響により、北極海での夏季の海水体積が約 $2 \times 10^3 \text{ km}^3$ 減少し、冬季にも半分程度のインパクトが残った。メルトポンドが主に形成される平坦氷に加えて、力学作用を受けた後の変形氷にも影響が見られた。これらから、課題となっている海水厚分布の再現を向上する可能性が示唆された。

謝辞：本研究は、日本学術振興財団の科学研究費助成事業(20H01968, 20K12142, 22J01703)、及び、文部科学省の北極域研究加速プロジェクト(ArCS II; MXD1420318865)の助成を受けました。また、2022年の大槌シンポジウム開催に尽力してくださった西川はつみ氏、山崎哲氏、田中潔氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] Chevallier, M., Smith, G.C., Dupont, F., Lemieux, J.F., Forget, G., Fuiii, Y., Hernandez, F., Msadek, R., Peterson, K.A., Storto, A., Toyoda, T., Valdivieso, M., Vernieres, G., Zuo, H., Balmaseda, M., Chang, Y.-S., Ferry, N., Garric, G., Haines, K., Keeley, S., Kovach, R.M., Kuragano, T., Masina, S., Tang, Y., Tsujino, H., Wang, X., 2017. Intercomparison of the Arctic sea ice cover in global ocean sea ice reanalyses from the ORA-IP project. *Clim. Dyn.* 49, 1107–1136.
- [2] Cox, G.F.N., Weeks, W.F., 1975. Brine drainage and initial salt entrapment in sodium chloride ice. *CRREL Res. Rep.* 345, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, US.
- [3] Cox, G.F.N., Weeks, W.F., 1986. Changes in salinity and porosity of sea ice samples during sampling and storage. *J. Glaciol.* 32, 371–375.
- [4] Cox, G.F.N., Weeks, W.F., 1988. Numerical simulations of the profile properties of undeformed first-year sea ice during the growth season. *J. Geophys. Res.* 93, 12449–12460.
- [5] Ebert, E.E., Curry, J.A., 1993. An intermediate one-dimensional thermodynamic sea ice model for investigating ice-atmosphere interactions. *J. Geophys. Res. Oceans* 98, 10085–10109.
- [6] Golden, K.M., Eicken, H., Heaton, A.L., Miner, J., Pringle, D.J., Zhu, J., 2007. Thin and thinner: Sea ice mass balance measurements during SHEBA. *Geophys. Res. Lett.* 34, L16501.
- [7] Hunke, E.C., Lipscomb, W.H., 2010. CICE: the Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 4.1. Tech. Rep. LA-CC-06-012, Los

- Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, US.
- [8] Hunke, E.C., Hebert, D.A., Lecomte, O., 2013. Level-ice melt ponds in the Los Alamos sea ice model, CICE. *Ocean Model.* 71, 26-42.
- [9] Keen, A., Blockley, E., Bailey, D., Boldingh Debernard, J., Bushuk, M., Delhay, S., Docquier, D., Feltham, D., Massonnet, F., O' Farrell, S., Ponsoni, L., Rodriguez, J.M., Schroeder, D., Swart, N., Toyoda, T., Tsujino, H., Vancoppenolle, M., Wyser, K., 2021. An inter-comparison of the mass budget of the Arctic sea ice in CMIP6 models. *The Cryosphere* 15, 951-982.
- [10] Kovacs, A., 1996. Sea ice. Part 1. Bulk salinity versus ice floe thickness. CRREL Rep. 96-7, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, US.
- [11] Mellor, L.G., Kantha, L., 1989. An ice-ocean coupled model. *J. Geophys. Res. Oceans* 94, 10937-10954.
- [12] Perovich, D.K., Grenfell, T.C., Richter-Menge, J.A., Light, B., Tucker III, W.B., Eicken, H., 2003. Thin and thinner: Sea ice mass balance measurements during SHEBA. *J. Geophys. Res.* 108, 8050.
- [13] Pringle, D.J., Eicken, H., Trodahl, H.J., Backstrom, G.E., 2007. Thermal conductivity of landfast Antarctic and Arctic sea ice. *J. Geophys. Res.* 112, C04017.
- [14] Ricker, R., Hendricks, S., Kaleschke, L., Tian-Kunze, X., King, J., Haas, C., 2017. A weekly Arctic sea-ice thickness data record from merged CryoSat-2 and SMOS satellite data. *The Cryosphere* 11, 1607-1623.
- [15] Rösel, A., Kaleschke, L., Birnbaum, G., 2012. Melt ponds on Arctic sea ice determined from MODIS satellite data using an artificial neural network. *The Cryosphere* 6, 431-446.
- [16] Sakamoto, K., Tsujino, H., Nakano, H., Urakawa, L.S., Toyoda, T., Hirose, N., Usui, N., Yamanaka, G., 2019. Development of a 2-km resolution ocean model covering the coastal seas around Japan for operational application. *Ocean Dyn.* 69, 1181-1202.
- [17] Sakamoto, H., Nakano, H., Urakawa, L.S., Toyoda, T., Kawakami, Y., Tsujino, H., Yamanaka, G., 2023. Reference Manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 5 (MRI.COM5). Tech. Rep. (in press), Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan.
- [18] Toyoda, T., Kimura, N., Urakawa, L.S., Tsujino, H., Nakano, H., Sakamoto, K., Yamanaka, G., Komatsu, K.K., Matsumura, Y., Kawaguchi, Y., 2021. Improved representation of Arctic sea ice velocity field in ocean-sea ice models based on satellite observations. *Clim. Dyn.* 57, 2863-2887.
- [19] Toyota, T., Takatsuji, S., Tateyama, K., Naoki, K., Ohshima, K.I., 2007. Properties of Sea Ice and Overlying Snow in the Southern Sea of Okhotsk. *J. Oceanogr.* 63, 393-411.
- [20] Toyota, T., Smith, I., Gough, A., Langhorne, P., Leonard, G., Van Hale, R., Mahoney, A.R., Haskell, T.G., 2013. Oxygen isotope fractionation during the freezing of sea water. *J. Glaciol.* 59, 697-710.
- [21] Tsujino, H., Hirabara, M., Nakano, H., Yasuda, T., Motoi, T., Yamanaka, G., 2011. Simulating present climate of the global ocean-ice system using the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM): simulation characteristics and variability in the Pacific sector. *J. Oceanogr.* 67, 449-479.
- [22] Tsujino, H., Nakano, H., Sakamoto, K., Urakawa, L.S., Hirabara, M., Ishizaki, H., Yamanaka, G., 2017. Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) version 4. Tech. Rep. 80, Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan.
- [23] Tsujino, H., Urakawa, S., Nakano, H., Small, R.J., Kim, W.M., Yeager, S.G., Danabasoglu, G., Suzuki, T., Bamber J.L., Bentsen, M., Böning, C.W., Bozec, A., Chassignet, E.P., Curchitser, E., Boeira Dias, F., Durack, P.J., Griffies, S.M., Harada, Y., Ilicak, M., Josey, S.A., Kobayashi, C., Kobayashi, S., Komuro, Y., Large, W.G., Le Sommer, J., Marsland, S.J., Masina, S., Scheinert, M., Tomita, H., Valdivieso, M., Yamazaki, D., 2018. JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Model.* 130, 79-139.
- [24] Tsujino, H., Urakawa, L.S., Griffies, S.M., Danabasoglu, G., Adcroft, A.J., Amaral, A.E., Arsouze, T., Bentsen, M., Bernardello, R., Böning, C.W., Bozec, A., Chassignet, E.P., Danilov, S., Dussin, R., Exarchou, E., Fogli, P.G., Fox-Kemper, B., Guo, C., Ilicak, M., Iovino, D., Kim, W.M., Koldunov, N., Lapin, V., Li, Y., Lin, P., Lindsay, K., Liu, H., Long, M.C., Komuro, Y., Marsland, S.J., Masina, S., Nummelin, A., Rieck, J.K., Ruprich-Robert, Y., Scheinert, M., Sicardi, V., Sidorenko, D., Suzuki, T., Tatebe, H., Wang, Q., Yeager, S.G., Yu, Z., 2020. Evaluation of global ocean-sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2). *Geosci. Model Dev.* 13, 3643-3708.
- [25] Turner, A.K., Hunke, E.C., 2015. Impacts of a mushy-layer thermodynamic approach in global sea-ice simulations using the CICE sea-ice model. *J. Geophys. Res. Oceans* 120, 1253-1275.
- [26] Urakawa, L.S., Tsujino, H., Nakano, H., Sakamoto, K., Yamanaka, G., Toyoda, T., 2020. Effects of diapycnal mixing induced by practical implementations of the isopycnal tracer diffusion scheme in a depth coordinate model on the bottom cell of meridional overturning circulation. *Ocean Model.* 154, 101693.
- [27] Vancoppenolle, M., Fichefet, T., Goosse, H., 2009. Simulating the mass balance and salinity of Arctic and Antarctic sea ice. 2. Importance of salinity variations. *Ocean Model.* 27, 54-69.

