

海洋内部の鉛直拡散分布による海洋循環への影響

課題責任者

長船 哲史 海洋研究開発機構 地球環境部門 海洋観測研究センター

著者

長船 哲史*, 土居 知将*, 瀨瀬 慎也*

*海洋研究開発機構 地球環境部門 海洋観測研究センター

海洋循環の全層的再現性の向上を目的として、海洋内部の鉛直拡散の分布が海洋循環に与える影響について実験を行った。本実験は、幾つか具体的なパラメタリゼーションを試したことを除けば、過去に行われてきた実験の再実験にあたるが、線形最適化手法を駆使することでこれがどの程度制御されるかを試行したものである。この実験により、観測の水温・塩分の分布を再現するにあたって海底地形から離れた場所の拡散をどう表現するかが比較的大きな影響を持つことが分かった。ここで実験した拡散の3次元分布が海洋循環に与える影響と海洋表層における人為起源の影響の深層への影響を調べるために大気中 CFC の増加に従った海洋内部 CFC 濃度の増加実験を行える環境を開発した。CFC 濃度の再現性をより効率的に制御するため CFC の海洋表層での吸収速度を線形最適化により制御することで海洋モデル内部のパラメタによる物理循環の変化に即し最適な分布を導き、比較をすることが可能となり、海洋の拡散分布の影響を効率的に把握できる可能性を示した。

キーワード：海洋，データ同化，鉛直拡散，CFC

1. はじめに

海洋研究開発機構地球環境部門海洋観測研究センターでは、主に大規模な海洋循環と変動を対象とした海洋観測について、データに内在する情報を海洋科学的解釈につなげることで、仮に大規模循環を対象とした場合には海洋観測のあるべき姿につなげることを目的として、主に4次元データ同化モデルの開発、データセットの作成、様々な手法の検討を行っている。観測プロジェクトにある課題のうちの一つとして、特に深層循環の再現性に留意した海洋の全層的な循環の長期変動性の把握とその影響評価、全層的な物質循環の再現実験がある。過去の観測による知見や数値モデルによる感度実験に基づき、深層循環を含む海洋子午面循環の再現性に強く影響をされると考えられている要素については調べられ、知られているところであるが、それらの要素を統合し、4次元データ同化に組み込み、実際の観測変動をより精緻に再現すること自体はまだ開発が必要な状況である。また、深層の滞留時間の長い循環で形作られる物質分布自体の再現も十分になされていない状況である。

このため、今年度は、物理的には、深層循環に影響する拡散のパラメタリゼーション（3次元分布の与え方）による循環再現性の違いの比較と人為起源物質としてよく知られている CFC の浸透実験を行い、ベースモデルの海洋循環の再現性に対する影響を調べるとともに、データ同化システムによる海洋循環の再現性統合解析とその成果であるプロダクトの評価に役立つ道具立てを行うことを目的に開発・実験を行った。

2. 線形最適化手法

本研究では、グリーン関数法(Menemenlis et al. 2005)を用いて、最適なモデルパラメタの組み合わせを推定した。この手法は、初期推定パラメタを用いた標準実験に加え、制御変数に設定したパラメタを変更した擾乱実験をパラメタ毎に実施し、それらと標準実験との差の情報を元に、設定された評価関数が最小となる最適パラメタを統計的に推定する。

3. 潮汐由来 Far-Field-Mixing の鉛直構造を考慮した OGCM の線形最適化

本研究では、当グループで開発・運用している長期海洋環境再現システムのベースとして用いられている海洋大循環モデル（以下 OGCM）を用いる。

このモデルでは、内部領域における鉛直拡散を三つの半経験的な鉛直拡散スキームの足し合わせで表していた。Toyoda et al. (2015)は、これらのスキームの重みづけ係数を含む複数のモデルパラメタを制御変数とし、線形最適化を行った。最適化の結果からは、急峻な地形の近傍における強い拡散と、背景鉛直拡散の重要性が示唆された。この最適化された OGCM を用いた長期海洋再現実験では、様々な時空間スケールの変動がよく再現されており、深層昇温についても比較的良好に再現されていた(Osafune et al., 2015)。しかしながら、用いられた鉛直拡散スキームが、必ずしも鉛直拡散に関わる最近の知見と整合的ではないなどの問題があった。

Osafune et al. (2021)は、この OGCM で再現される力学の信頼性を向上すべく、地熱フラックスを導入するとともに、内部領域における鉛直拡散を潮汐由来の鉛直混合スキームに置き換え、線形最適化実験を行っ

た。ここで導入した潮汐混合スキームは、外部潮汐が地形にぶつかる際に発生する際に生じる内部潮汐波が地形の近傍で砕波することで引き起こされる Near Field Mixing (以下、NFM) および、発生した内部潮汐波が遠方に伝播したのちに背景の内部波と相互作用することで砕波して引き起こされる Far Field Mixing (以下、FFM) である。前者については St. Laurent et al. (2001) のスキームを用いた。また、後者については、Hibiya et al. (2006) が観測に基づいて提案した水平分布を参考に、波動間相互作用を仮定し、鉛直一様な分布を与えた。この最適化されたモデルパラメタを用いて行った海洋環境再現実験では、深層における水温上昇の再現性が、以前のモデルと比べて改善していた。しかしながら、表中層では再現性が低下していた。

二つのモデルの大きな違いの一つとして、地形近傍以外の海域における鉛直拡散の鉛直構造が挙げられる。以前のモデルでは、Tsuji no et al. (2000) を採用しており、背景の鉛直拡散として、海底から表層に向けて減衰する鉛直構造を与えていた。一方で、潮汐鉛直拡散スキームを実装したモデルでは、FFM として鉛直一様な構造を与えていた。これは、FFM を表現するうえで、主要なメカニズムである波動間相互作用のみを考慮した為であるが、実際には他のメカニズムによる寄与も存在し、メカニズムにより異なる鉛直構造を持つと考えられている。そこで、FFM に対して、仮想的に Tsujino 型の鉛直構造を与えた線形最適化実験を行うことで、FFM に鉛直構造を与えることの効果を検討した。

ベースとして用いた FFM の拡散係数 κ_{FAR} は、以下のよう表される。

$$\begin{aligned} \kappa_{FAR} &= (F_{FAR}(\theta, \phi) + b_{FAR}) * \frac{\phi}{20} & \text{for } 0 \leq |\phi| < 20 \\ \kappa_{FAR} &= F_{FAR}(\theta, \phi) + b_{FAR} & \text{for } 20 \leq |\phi| < 30 \\ \kappa_{FAR} &= F_{FAR}(\theta, \phi) * \frac{35-\phi}{5} + b_{FAR} & \text{for } 30 \leq |\phi| < 35 \\ \kappa_{FAR} &= b_{FAR} & \text{for } 35 \leq |\phi| \end{aligned}$$

with

$$F_{FAR}(\theta, \phi) = r_{FAR} * \log_{10}(E_{internal}(\theta, \phi)/0.1) \quad \text{for } E_{internal}(\theta, \phi) \geq 0.1 J m^{-3}$$

$$F_{FAR}(\theta, \phi) = 0 \quad \text{for } E_{internal}(\theta, \phi) < 0.1 J m^{-3}$$

ここで、 θ, ϕ は経度、緯度、 $E_{internal}$ は、潮汐モデルによって得られた内部潮汐エネルギー密度を表す。これは、4 つの変数の関数として $\kappa_{FAR}(\theta, \phi, b_{FAR}, r_{FAR})$ と表記することが出来る。本研究では、新たに鉛直構造を持つ FFM の拡散係数として、

$$\begin{aligned} \kappa_{FAR}^{3D}(\theta, \phi, z) &= \kappa_{FAR}(\theta, \phi, b_{FAR} \\ &\quad + b_{FAR}^0 \times f_{FAR}^b \times G(z), r_{FAR} \\ &\quad + r_{FAR}^0 \times f_{FAR}^r \times G(z)) \end{aligned}$$

を定義した。ここで、 b_{FAR}^0 および r_{FAR}^0 は初期推定値、 $G(z)$ は鉛直構造関数

$$G(z) = \begin{cases} -0.9 + 0.9 \times \left(1 - \tanh \frac{z - 1500}{750}\right) & \text{for } z \leq 1500 \\ -2 + 2 \times \left(1 - \tanh \frac{z - 1500}{2000}\right) & \text{for } z > 1500 \end{cases}$$

である。新たに導入した f_{FAR}^b および f_{FAR}^r の初期推定値は 0 とした。

NFM の拡散係数 κ_{NEAR} は以下である。

$$\begin{aligned} \kappa_{NEAR} &= \frac{\Gamma \varepsilon_{NEAR}}{N^2} \\ \varepsilon_{NEAR} &= \frac{q}{\rho} E_g(x, y) F(z) \\ F(z) &= \frac{\exp\left(-\frac{H+z}{\zeta}\right)}{\zeta \left(1 - \exp\left(-\frac{H}{\zeta}\right)\right)} \end{aligned}$$

ここで、 $\Gamma = 0.2$ は混合効率、 N^2 は浮力振動数、 E_g は潮汐モデルによって見積もられた順圧潮汐から内部潮汐へのエネルギー変換率、 ζ は鉛直減衰係数である。 q は局所エネルギー散逸率で、潮汐周期が慣性周期を超える (sub-inertial) 海域ではほぼ 1、慣性周期を下回る (super-inertial) 海域では 0.3 程度とされている。それぞれを、 q_{sub} 、 q_{sup} と表記する。

本研究では、Osafune et al. (2021) と同様の設定でグリーン関数法を行った。但し、新しく FFM のスキームを加えた f_{FAR}^b および f_{FAR}^r を新たに制御変数に加えた。コスト関数としては、NCEP の気候値でスピニングアップしたモデル気候値と WOA の気候値の差が小さいという条件を課した。

表 1 に制御変数のうち、潮汐鉛直混合スキームに関するパラメタについての結果を示す。FFM を鉛直一様とした FFM1D では、NFM に関わる全てのパラメタが初期推定値より大きくなっており、NFM によって表層の混合を強化するように修正されていた。一方で、FFM に鉛直構造を与えた FFM3D では、NFM に関わるパラメタの修正が FFM2D と比べて大幅に減少していた。

(表 1) グリーン関数法の結果

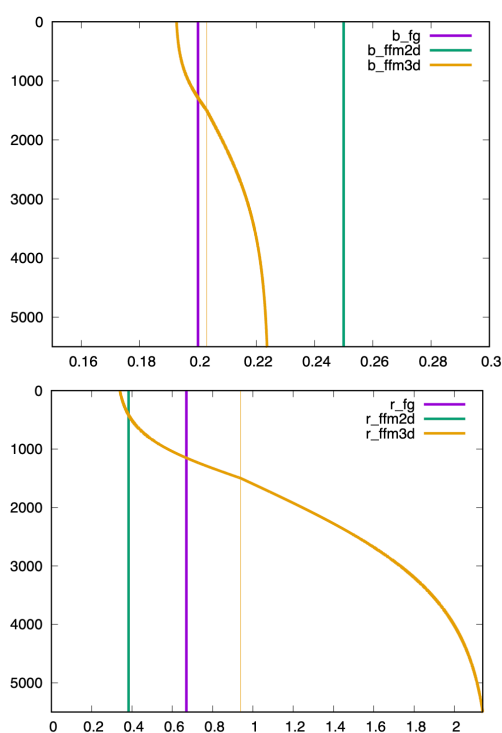
FG は初期推定値、FFM2D は FFM を鉛直一様とした Osafune et al. (2021) の結果、FFM3D は今回の結果

| | Parameter | FG | FFM2D | FFM3D |
|-----|-------------|-------|-------|--------|
| NFM | ζ | 500 | 987 | 593 |
| | q_{sub} | 1.00 | 1.05 | 0.966 |
| | q_{sup} | 0.300 | 0.452 | 0.336 |
| FFM | b_{FAR} | 0.200 | 0.250 | 0.203 |
| | r_{FAR} | 0.670 | 0.383 | 0.940 |
| | f_{FAR}^b | 0 | NA | 0.0537 |
| | f_{FAR}^r | 0 | NA | 0.929 |

FFM の鉛直構造を図 1 に示す。 b_{FAR} は、FFM2D では全

体的に FG より大きな値になっていたが、FFM3D では鉛直コントラストはかなり小さく、全体的に FG に非常に近い値になっていた。 r_{FAR} は、FFM2D では FG より大幅に小さかった。一方で、FFM3D では、鉛直コントラストが非常に大きく、深層では FG の 3 倍以上と大きな値を取るが、1200m 付近では FG と一致し、表層では、FFM2D と同程度の値となった。

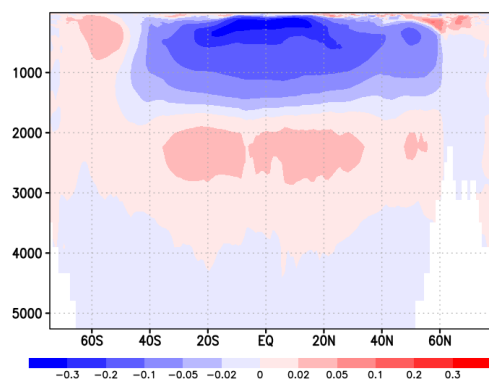
Hibiya et al. (2006) では、950-1450m における値を推定しており、この深度帯で、FFM3D の b_{FAR} 、 r_{FAR} とともに FG に近かったことは大変興味深い結果である。また、FFM3D の b_{FAR} の鉛直コントラストが小さいことは、高緯度における FFM の主要な要因が波動相互作用であることを示唆している可能性がある。



(図1) FFM の鉛直構造。上図は b_{FAR} 、下図は r_{FAR} を表し、紫、緑、橙は、それぞれ初期推定値、FFM2D、FFM3D の結果を示す。

次に、推定された海洋構造への影響について示す(図2)。経度平均した水温構造は、FFM の鉛直構造を考慮することで、赤道付近の表層が低温化、その下が高温化していた。これは、主水温躍層が弱化したことを意味しており、FFM2D に見られたモデルバイアスを低減していた。その他、亜表層の塩分構造や、海面水温・塩分などにもモデルバイアスが低減していた(非図示)。但し、修正の幅は十分ではなかった。

以上の結果から、FFM の鉛直構造を考慮することの重要性が示唆されたが、その表現についてはさらなる改良の必要性があると考えられる。今後は、FFM の再現性がより高いスキームの組み込みを検討する。



(図2) 推定された水温の経度平均の FFM2D から FFM3D への差。

4. 大気中 CFC の歴史的変遷を模した実験による海洋循環再現性比較の検討

前節のように海洋における乱流混合の実態把握、理論的研究の成果の進展・認知と共に、海洋循環モデルにおける鉛直拡散により精緻な 3 次元分布を持たせるような表現(パラメタリゼーション)の研究が進んできている。鉛直拡散の役割は、海洋の物理的大規模循環を決定づけるだけでなく、海洋内部の物質分布に強く影響する。特に、観測研究では、循環そのものを再現できないことから、ある種の物質分布を観測することで循環の推定を行ってきた。その中でも 20 世紀半ばより放出量が増えた人為起源物質である CFC (図3) は化学的に安定であることから海洋中の流れを表すものとして注目されてきた。本研究では、前節の鉛直拡散による海洋循環の再現性の違いを検討するツールとして海洋中 CFC 分布のデータ同化再現実験を進めた(JpGU 発表)。

実験設定としては、まず、4 次元同化システムで再現された海洋循環に大気観測でモニタリングされている大気中 CFC 濃度を境界条件として与えることから始める。CFC の海洋内部での分布再現にとって未確定な要素となる海洋表層での CFC の溶け込む速度をデータ同化の制御パラメータとし、GO-SHIP 観測で得られた海洋内部の CFC 分布を再現するように線型最適化を行う。特に北太平洋において、この方法のみでの再現性が十分でなかったことから、本システムで十分には再現できないと考えられる縁辺海での水塊形成を模して、オホーツク海における CFC 分布を緩和する方法を導入し、その CFC の海盆スケールの再現性を上げる工夫をした。前節の開発と並行で進めるため、今年は今節と実験条件のすり合わせを行わず、公開済みの 2 種のデータセット (Ver. 3: Toyoda et al. 2015 に基づく拡散, Ver4: Osafune et al. 2021 に記述のある拡散) に基づく循環場で各々線型最適化まで行い、結果の場の比較検討を行った。

システムでは、モード水、中層水における CFC 濃度を過小評価する傾向にあり、CFC の海洋深層への浸透が十分ではなかった。その傾向は、表層の吸収に係る係数の最適化だけでは改善されなかったが、Ver3 と Ver4 の比較では、ほぼすべての観測ラインでモード水、中層水における CFC 濃度の観測の再現性が上がっ

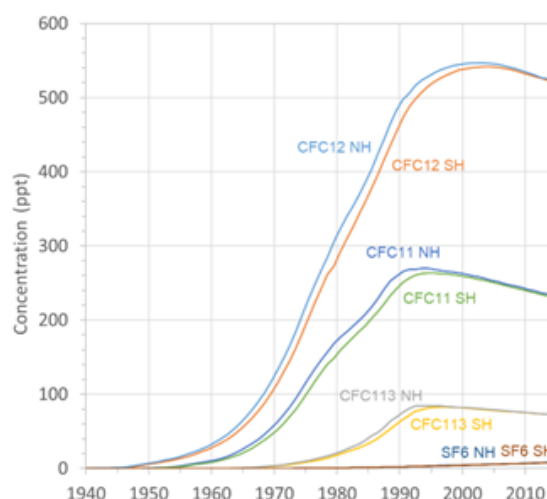
ていた（例：図4）。一方で、Ver4においては、より深層で過大評価になる傾向があった。モード水、中層水におけるCFC濃度の再現性には、鉛直拡散だけでなく、モード水、中層水の形成量の再現性が関係している。この形成量そのものが鉛直拡散による違いであるかどうかは、現段階では調べることが出来ておらず、解析が必要である。一方で、モード水・中層水の層において観測に近い（高い）濃度を再現したVer4において、その下層が過大評価となってしまうことは、この層が（モデル内でも）直接的に海面に露出していないことを考え併せれば、Ver4の鉛直拡散が過大評価であったことが推測される。さらに、モード水・中層水上部の深さでの鉛直拡散はVer4がVer3よりも大きいことを考え併せれば、少なくとも本システムのような条件（解像度）のモデルにおいて適切な拡散の鉛直変化は相当大きなものである可能性を示唆していた。以上のようにCFCを導入してモデル鉛直拡散の物質循環への影響をより定量的に比較する枠組みを開発した。表層の吸収に係る係数をデータ同化する本システムと前節の実験を組み合わせ、内部の拡散係数による違いとの切り分け、本システムで評価される全球的な物質輸送の描像への拡散の定量的役割の評価を今後進める予定である。

謝辞

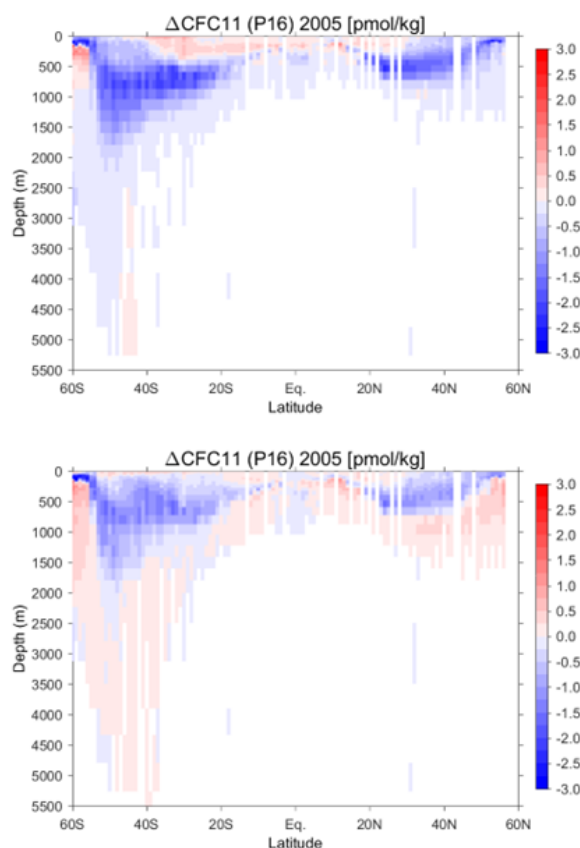
本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究（研究領域提案型）」領域番号4702、KAKENHI JP15H05817/H05819の支援を受けて行われました。CFC観測の利用に当たっては、佐々木建一さんよりアドバイスをいただきました。

文献

- [1] Menemenlis et al., Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model, *Mon. Weather Rev.*, 2005
- [2] Toyoda et al., An improved simulation of the deep Pacific Ocean using optimally estimated vertical diffusivity based on the Green's function method, *Geophys. Res. Lett.*, 2015
- [3] Osafune et al., Evaluation of the applicability of the Estimated State of the Global Ocean for Climate Research (ESTOC) data set, *Geophys. Res. Lett.*, 2015
- [4] Osafune et al., The use of tidally induced vertical-mixing schemes in simulating the Pacific deep-ocean state, *J. Oceanogr.*, (2021)
- [5] St. Laurent et al., Estimating tidally driven mixing in the deep ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 2001
- [6] Hibiya et al., Global mapping of diapycnal diffusivity in the deep ocean based on the results of expendable current profiler (XCP), *Geophys. Res. Lett.*, 2006
- [7] Tsujino et al., Deep Pacific circulation controlled by vertical diffusivity at the lower thermocline depth, *J. Phys. Oceanogr.*, 2000
- [8] Bullister, Atmospheric Histories (1765-2015) for CFC-11, CFC-12, CFC-113, CCl₄, SF₆ and N₂O (NCEI Accession 0164584). NOAA National Centers for Environmental Information., 2017



(図3) 大気中CFC濃度の変遷(Bullister, 2017)



(図4) 太平洋165°EラインにおけるモデルCFCと観測の差（上Ver3；下Ver4）

Effect of Spatial Distribution of Vertical Diffusivity on Ocean Circulation

Project Representative

Satoshi Osafune

Global Ocean Observation Research Center,
Research Institute for Global Change,
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Satoshi Osafune*, Toshimasa Doi*, Shinya Kouketsu*

* Global Ocean Observation Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

We conducted optimization experiments with Green's function methods to investigate the influences of 3-dimensional distributions of vertical diffusivity on the ocean circulation in our system to improve the full-depth ocean circulation assimilation system. Based on the preliminary results, to reproduce the observational temperature and salinity fields, the strength of far field mixing around the subsurface, as well as deeper layers, was important. At the same time, we have been developing a circulation model of CFC to assess the effects of changes in the diffusivity parameters. Based on the preliminary results of comparison between previous products, CFC experiments seemed to be useful for the assessment of the diffusivity sensitivities.

Keywords : Ocean, Data Assimilation, Vertical Mixing, CFC

1. Introduction

GOORC in JAMSTEC has been conducting observations to investigate large-scale ocean circulations and the relationships between the environment of the earth and has been developing a data assimilation system to serve as a good suggestion for the observational activities as well as to interpret and assess various phenomena revealed by observations.

Assessment of variability of the ocean circulation from the surface to the bottom considering the meridional overturning circulation is one of our targets of the assimilation system. It has been well-known that the meridional overturning circulation in the ocean is strongly influenced by the strength and distributions of vertical diffusivity associated with micro-scale turbulence. However, incorporating such knowledge based on observational and numerical model studies to reanalysis products has been in progress, to improve the productivity of budgets in biogeochemical materials as well as the overturning circulation itself. As one of such activities, we conduct examinations to assess the sensitivity of circulations to vertical diffusivity distributions in our system and develop a method to show the results in the assessment clearly.

2. Linear optimization of an OGCM considering vertical structure of tidally induced Far-Field-Mixing

Using the ocean general circulation model (OGCM) in our data-synthesis system, we conducted a linear optimization experiment based on the Green's function method (Menemenlis et al., 2005).

This model uses a linear combination of three semi-empirical mixing schemes for interior vertical mixing below the surface mixed layer. Toyoda et al. (2015) conducted a linear optimization experiment to determine the weighting

factor for each schemes along with other physical parameters. Recently, to improve the reliability of the dynamics reproduced in our model, Osafune et al. (2021) implemented geothermal heat flux and two tidally induced vertical mixing schemes, a near-field mixing scheme of St. Laurent (2001) and vertically constant far-field mixing scheme based on Hibiya et al. (2006), and optimized the model parameters including those in the mixing schemes. This optimized model reproduces the abyssal ocean state very well, but there was room for improvement in the reproducibility of the upper layer.

In this study, we focus on the vertical structure of FFM. Osafune et al. (2021) used the vertically constant profile for FFM, assuming the wave-wave interaction as for the mechanism causing FFM. However, there are other mechanisms causing FFM, and the vertical structure depends on the mechanism. We used a vertical structure of Tsujino et al. (2000) used in our previous model. The FFM scheme includes two unknown parameters related to the background mixing (b_{FAR}) and the mixing related to internal tide energy (r_{FAR}). We replace these parameters to $b_{FAR} + b_{FAR}^0 \times f_{FAR}^b \times G(z)$, $r_{FAR} + r_{FAR}^0 \times f_{FAR}^r \times G(z)$, where b_{FAR}^0 and r_{FAR}^0 are the first-guess (FG) values, $G(z)$ is a vertical distribution function as,

$$G(z) = \begin{cases} -0.9 + 0.9 \times \left(1 - \tanh \frac{z - 1500}{750}\right) & \text{for } z \leq 1500 \\ -2 + 2 \times \left(1 - \tanh \frac{z - 1500}{2000}\right) & \text{for } z > 1500 \end{cases}$$

We used f_{FAR}^b and f_{FAR}^r to control variables in addition to those used in Osafune et al. (2021).

We show the vertical structure of FFM in Fig. 1. b_{FAR} in this study is closer to FG than that in Osafune et al. (2021),

and its vertical contrast is small. r_{FAR} in this study has a large vertical contrast, has a similar value to r_{FAR} in Osafune et al. (2021) near the surface, and to r_{FAR} in FG at about 1200 m.

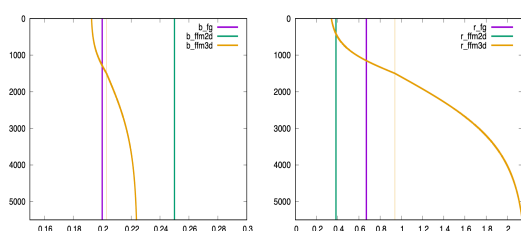


Figure 1. Vertical structure of FFM in first-guess (fg), Osafune et al. (2021) (FFM2D), and this study (FFM3D)

We compared the temperature and salinity structure estimated in this study and Osafune et al. (2021). It is shown that various model biases including strong main thermocline are improved in the estimation in this study (not shown), although the modifications are not enough to be realistic.

These results suggest that the importance of considering the vertical structure of FFM, but the representation of this structure needs further refinement. We will consider incorporating a scheme with better reproducibility of FFM.

3. Comparison of reproducibility of ocean circulation by experiments forced by historical atmospheric CFC

As shown in the previous section, an examination and revisit investigation of the relationships between large-scale ocean circulation and 3-dimensional distribution of vertical diffusivity has been conducted by researchers who are developing ocean modeling. The distribution of the vertical diffusivity is considered to be important to determine the distributions of chemical tracers as well as the meridional overturn circulation. In this study, we conduct numerical model examinations reproducing CFC distributions, based on Green's function method, to develop the methods for evaluation of dependencies of vertical diffusivity parameterization on the reproducibility of ocean circulation in our assimilation system.

We incorporate absorption of CFC at sea surface and circulation based on the advection and diffusion in ESTOC 4DVAR assimilation system. The boundary conditions of CFC concentrations in the atmosphere at the sea surface are given from observations. Then we develop a system to infer the coefficients of absorption speed at the sea surface (global constant) to reproduce the observation of CFC in the ocean, which have been provided (for example) by GO-SHIP observations. At this time, we focused on the development of an essential method to evaluate circulations reproduced in our 4DVAR assimilation system, and attempt to examine CFC circulation reproduction to ESTOC Ver. 3 (vertical diffusivity is set based on Toyoda et al., 2015) and Ver. 4 (vertical diffusivity based on Osafune et al., 2021), and compare the results to investigate the advantage of the incorporated method.

Our system tends to underestimate the concentration of CFC in the mode water and intermediate layers, which have not been improved through the optimization of Green's function method. The concentration in the intermediate

layers based on Ver. 4 was larger than that in Ver. 3, reproducibility in Ver. 4 seemed to be improved. Causes of the difference have not been well investigated yet, but might be related to changes in reproductivity of mode water formation and transports dependent on vertical diffusivity. In addition, the concentration below the intermediate layers was overestimated in Ver. 4.

At this time, we incorporated a method to evaluate the effects of changes in vertical diffusivity. Next, we try to conduct an actual evaluation of our system quantitatively.

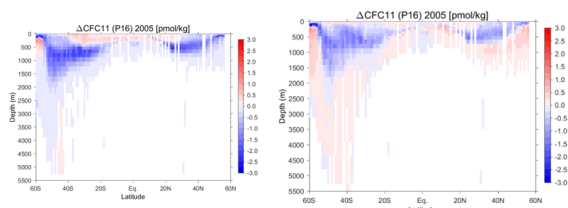


Figure 5. Difference of modeled CFCs (left: Ver. 3 and right: Ver. 4) from the observation along 65°E.

Acknowledgement

This work was partly supported by Grants-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas (Japan Society for the Promotion of Science) (MEXT KAKENHI-JP15H05817/JP15H05819). We thank K. Sasaki for helpful advice on the use of CFC observation.

References

- [1] Menemenlis et al., Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model, *Mon. Weather Rev.*, 2005
- [2] Toyoda et al., An improved simulation of the deep Pacific Ocean using optimally estimated vertical diffusivity based on the Green's function method, *Geophys. Res. Lett.*, 2015
- [3] Osafune et al., Evaluation of the applicability of the Estimated State of the Global Ocean for Climate Research (ESTOC) data set, *Geophys. Res. Lett.*, 2015
- [4] Osafune et al., The use of tidally induced vertical-mixing schemes in simulating the Pacific deep-ocean state, *J. Oceanogr.*, (2021)
- [5] St. Laurent et al., Estimating tidally driven mixing in the deep ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 2001
- [6] Hibiya et al., Global mapping of diapycnal diffusivity in the deep ocean based on the results of expendable current profiler (XCP), *Geophys. Res. Lett.*, 2006
- [7] Tsujino et al., Deep Pacific circulation controlled by vertical diffusivity at the lower thermocline depth, *J. Phys. Oceanogr.*, 2000