

— 総 説 —

全球規模の海洋環境再現の精緻化と鉛直混合に関する研究 —鉛直混合観測データの統合にむけて—*

増田 周平[†]

要 旨

海洋の鉛直混合が子午面循環をはじめとする海洋循環の動態に本質的な役割を担っていることが知られている。全球的な鉛直混合の観測の拡充に伴い、鉛直混合観測データを用いた海洋環境再現に向けての新たな挑戦がはじめられている。本論文では、その礎となる海洋学における数値モデルを利用したデータ統合研究の進展に触れながら、鉛直混合観測データを用いた海盆スケールの海洋環境再現の現状と将来的な鉛直混合観測の統合について議論する。

キーワード：海洋循環，データ同化，鉛直混合

1. はじめに

1870年代にチャレンジャー号による近代的な海洋観測が始まって以来、これまでに様々な物理量、生物化学変量の観測がなされてきた。船舶による採水から始まり、CTD, XBTなどの観測機器の開発・発展に伴い、多種多様な海洋観測データが蓄積されてきた。1990年代に入ってから、世界海洋循環実験計画(WOCE)をはじめとする国際連携、同じく1990年代の人工衛星による全球観測の発展、2000年代の国際アルゴ計画(例えば、Argo Science Team, 2001)の始動などにより、観測データは

量的に飛躍的な増加をみせており、その時空間的な間隙は着実に減少している。とはいえ、特に亜表層の海洋観測に関しては、時間空間分解能の問題が常に付きまとう。冬季に海況が厳しくなる海域や、一般航路および陸上から離れた海域などでは、とくに高精度観測の回数は少なく、海洋環境及びその変動の全体像把握を阻んでいる面がある。

観測データの品質については、センサー精度の向上や観測プラットフォームの発展により、高精度データの取得が可能になってきた。一方で、最高精度の船舶観測データから、開発途上段階のセンサーやオートマチック観測機器による比較的精度を犠牲にしたものまで、千差万別である。

海盆スケールでの海洋環境の動態を正確に捉えるためには、絶え間ない海洋観測に加え、様々なアプローチでの研究開発が必要である。上述のような海洋観測の時空間的なまばらさや、各観測の品質のばらつきをカバーするための一つの手段として、「データの統合」があげられる。

* 2016年8月3日受領;2016年12月26日受理
著作権：日本海洋学会, 2017

[†] 国立研究開発法人海洋研究開発機構
地球環境観測研究開発センター
〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15
TEL: 046-867-9258 FAX: 046-867-9835
e-mail: smasuda@jamstec.go.jp

海洋観測データの統合はさまざまな方法で試みられている。例えば、World Ocean Atlas (例えば、Monterey and Levitus, 1997) では、観測データのみを用いて、統計学的な仮定の下で内挿を施し、時間空間的に連続なマップデータを作成している。これらは、ほとんどの場合、純粋に観測データに準拠しており、比較的観測密度が高い海域・期間においては有効な手法である。このため、最近では、アルゴフロートのデータを用いて、月ごとに編集された水温、塩分場の統合データセットなども公開されている (例えば、Hosoda *et al.*, 2008)。

1990年代後半になり、計算機の能力が日進月歩で向上し続けるに従い、数値モデルを用いた全球規模での観測データの統合も盛んになってきた (例えば、Shiller *et al.*, 2013)。これらの研究開発には統計数学や制御工学の知見をベースとして、気象学の分野では一足先に天気予報などに活用されていた、“データ同化”技術が応用されている。

海洋分野での数値モデルを用いたデータ統合は、逐次的に観測データを同化し、主に、比較的短期 (数日から数か月程度) の予測実験の初期値を作ることを目的とする場合と、滑らかに時間発展する場として、観測データに近い3次元分布の時間発展を探索し、短期から中・長期 (季節から数十年) の予測、力学解析や、熱・物質輸送の時間変化の見積もりなどを目的とする場合の2つに大きく分けられる (例えば、Shiller *et al.*, 2013)。ここでは後者を海洋環境再現 (ocean state estimation) と呼ぶことにする (例えば、Wunsch and Heinbach, 2013)。海洋環境再現では、その目的から、力学的な整合性を重視する手法が望まれ、その場合には観測データの力学的内挿の側面を持つ (例えば、Stammer *et al.*, 2002a)。

1995年から開始されたCLIVAR (Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change) に続き、1997年からGODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment) が始動し、このような海洋観測データの統合研究が国際的にも活性化していくこととなる。このムーブメントは現在もCLIVAR GSOP (Global Synthesis and Observations Panel) や、GODAE OceanViewを通じて健在である。

近年、数値モデルの予報変数に含まれない観測変量を利活用する全球規模でのデータ統合研究も進められてき

た。とりわけ子午面循環をはじめとする海洋循環の動態に本質的な役割を担っていることが知られている海洋鉛直混合の観測情報 (例えば、田中, 2017) を用いて、鉛直混合のマッピング (例えば、丹羽, 2017) をいかに精緻化するかなどが議論されている。

本総説では、全球規模の海洋環境再現の精緻化に関する鉛直混合観測データの利用の現状について最近の研究を俯瞰しながら紹介する。また、海洋環境再現システムを利用した鉛直混合観測データ統合の将来的なアプローチについて議論する。以下、第2章では海洋環境再現の現状を紹介し、第3章では水温、塩分データを用いた鉛直拡散係数の最適化に関する研究を取り上げる。第4章で鉛直混合観測のデータ統合の方向性について述べ、第5章で今後の課題などをまとめる。

2. 海洋環境再現の現状

2000年代に入り、いくつかの研究グループが海洋環境再現を実施している。それらでは、スムーザーと呼ばれる四次元変分法アジョイント手法 (例えば、Sasaki, 1970) やカルマンスムーザー (例えば、Evensen and van Leeuwen, 2000)、あるいは、それらと類似する手法を応用する機会が多い (例えば、Fukumori, 2002; Awaji *et al.*, 2003; Wunsch and Heinbach, 2007)。これらの運用には一般的には大型の計算機が必要であり、その複雑なコーディングスキームと相まって、データ統合研究を実施している機関は限られている。本論文に深くかわる全球規模で長期の海洋環境再現の代表例を以下に挙げる。アメリカのMITおよびJPLを中心とした、ECCOコンソーシアムは、初めて本格的な全球的な長期の海洋環境再現を成功させた例であり、Stammer *et al.* (2002b)、Wunsch and Heinbach (2013) などは、現在に至るまで、良質な海洋環境再現データセットを提供している。また、その技術は、ドイツのハンブルグ大でも発展し、German ECCO (G-ECCO) として、やはり全球の海洋環境再現に大きな貢献をしている (例えば、Köhl *et al.*, 2012)。

日本では、JAMSTEC 一京都大学で形成されたK7コンソーシアムが、2000年代初めから、長期の全球海洋データ統合研究を進め (Awaji *et al.*, 2003; Masuda *et*

al., 2003), 2010年代半ばには, 全層・全球を対象とした海洋環境再現データセット (ESTOC; 例えば, Osafune *et al.*, 2015) を完成させている。このデータセットの特徴は, 数少ない中・深層の観測データを最大限活用することで, そこでの中・長期変化の再現性を向上させていることである。このシステムを用いた深層昇温 (例えば, Fukasawa *et al.*, 2004) をターゲットとした気候変動研究は, 深層の海洋環境再現の有用性を示すユニークな成果である (Masuda *et al.*, 2010)。また, ESTOC は, 全球海洋深層での貯熱量増加の推定の信頼性評価にも活用され, 海洋深層での貯熱量増加量が海洋表層の 8-20% に当たったことを示した研究にも必要不可欠な貢献をしている (例えば, Kouketsu *et al.*, 2011)。このように, 深層まで含んだ貯熱量変化や深層での循環変動の研究などで貴重な成果をあげている (例えば, Katsumata *et al.*, 2013)。

全球・全層での長期海洋環境再現が可能となってきたことで, 海洋環境変動と気候変動現象のリンクなどに関する海洋亜表層変動の包括的な理解の進展が期待される。しかしながら高品質の海洋環境再現には, 大陸間縦横断観測 (リポートハイドログラフィー) の充実や自動昇降型漂流ブイ (アルゴフロート) の拡充, その深海への拡張 (例えば, 小林・雨池, 2015) など, 亜表層の観測データの拡充とともに, 数値モデルの高性能化などが必要とされ, また, これまで直接的なデータ統合が難しかった予報変数以外の観測情報の利活用も重要な要素として認識されている。

3. 鉛直混合の制御による海洋環境再現の精緻化

海洋の鉛直混合は子午面循環をはじめとする海洋循環の動態に本質的な役割を担っていることが知られている (例えば, 井上, 2017; 瀧瀬, 2017; 田中, 2017)。鉛直混合は海洋環境再現を精緻化するための重要な要素である。数値モデルでは, 拡散係数は予報変数ではなく外部変数として扱われている場合が一般的である (羽角, 2017)。

モデルの拡散係数の変化 (制御) が結果をどれほど変えるか, すなわち, 制御変数として, 拡散係数は適切なものかという問題は重要である。拡散係数の大きさによる計算結果の依存性については, 海洋循環モデル開発の

黎明期から, 現在に至るまで研究が続いている (例えば, Bryan, 1987; Cummins *et al.*, 1990; Sasaki *et al.*, 2012; Richards *et al.*, 2012; Melet *et al.*, 2013; Oka and Niwa, 2013)。近年, Furue *et al.* (2015), Jia *et al.* (2015) らは海域ごとに異なる鉛直拡散係数を与えることが, モデルの再現性にどのような影響を与えるかについて, 詳細に検証している。その結果, 時空間的に分布を持つ鉛直拡散係数の適用が, 表現誤差の低減という意味において, 現実的な海洋循環場の再現に効果的であることを示している。これらの研究成果は, 潮汐モデルを用いて潮汐混合の 3次元分布を評価した Niwa and Hibiya (2004) の結果などとともに, 鉛直混合の分布と海洋循環場の動態を把握する上で重要な示唆を与えている。

このような背景で, 実際に既存の海洋観測データ (水温, 塩分など鉛直混合観測データ以外のデータ) を用いて海盆スケールでの拡散係数の最適化が試みられるようになった。Liu *et al.* (2012) は G-ECCO のシステムを基盤とし, 四次元変分法アジョイント法を応用して水温, 塩分, 海面高度データなどを用い, 全球的な鉛直・水平拡散係数を制御変数として, それらの最適化に取り組んでいる。その結果, 水温, 塩分, 海面高度偏差などに関しては 10-20% 程度の, 平均海面高度に関してはおよそ 45% の再現性の向上 (コストの軽減) を確認している。Liu *et al.* (2014) はこれらの結果から得られた, 拡散に関するあるモデルパラメータの地理的分布 (Fig. 1) を解析し, 海底地形との関係に着目することで, あらたなパラメタリゼーションを提案している。これらは, どのようなモデルにも共通して適応できることを念頭に置いた実用的な研究例であると同時に, 拡散に関する力学現象の解明にヒントを与える成果である。

海洋大循環モデルにおける鉛直混合パラメタリゼーションや外部変数の精緻化に関しては近年, さらにさまざまな研究がなされており, 詳細は本特集号の総説 (羽角, 2017) などを参照されたい。

Toyoda *et al.* (2016) は, 水温, 塩分データなどを用い, グリーン関数法 (例えば, Menemenlis *et al.*, 2013) を応用し, 複数の既存の鉛直拡散スキームを最適な割合でブレンドすることを試みた。彼らは, 単純な線形結合を仮定し, 鉛直拡散係数の最適な混合比率を求めている。その結果, 主に深層における水温分布, 循環場の再

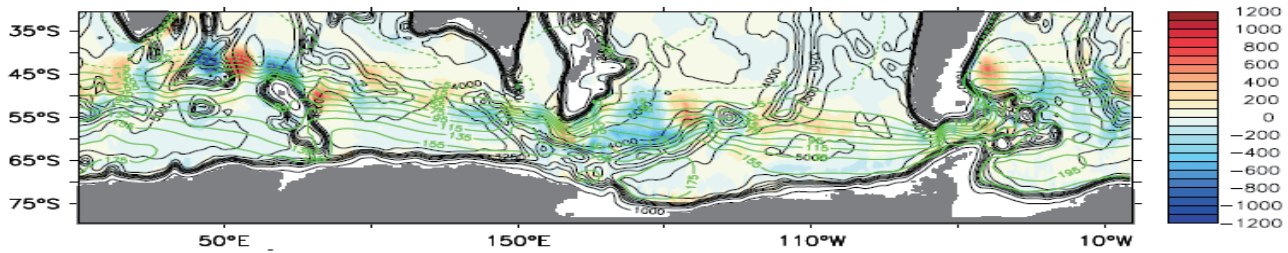


Fig. 1. Distribution of estimated k_{gmskew} , the eddy-induced thickness advection parameter, at 1160 m as applied by Liu *et al.* (2014). Bottom depth H (m) is represented by black contours and barotropic streamfunction (Sv , $1 Sv = 10^6 m^3 s^{-1}$) by green contours. Reprinted from Liu *et al.* (2014) with permission from Elsevier.

現性を向上させることに成功した。彼らの手法は、自由度を大幅に落とし、モンテカルロ法的な戦略をとることで、比較的軽微な計算機資源量で効率よく最適化を成し遂げている点で注目値に値する。ただし、モデル解像度などによって拡散係数が表現している力学が異なることもなどあり、これらの結果は大きなモデル依存性を持つ可能性がある。直接的な鉛直混合観測や既存の水温・塩分観測データから評価された鉛直混合に関する現場情報（例えば、Whalen *et al.* 2012）などと慎重に比較・検証することが不可欠であろう。

4. 鉛直混合観測のデータ統合

これまでの研究では、全球規模で拡散係数を精緻化する際に、海洋鉛直混合観測データを統合した例はまだない（前節のモデルパラメータ（鉛直拡散係数）の最適化は鉛直混合の観測データを用いていないため、統合とは呼べない）。観測データの存在する範囲が限られている現状において、数値モデルを用いた鉛直混合観測のデータ統合を考える場合に、どのようなアプローチが可能であろうか？ 水温や塩分など、数値モデルの予報変数と同じ物理量に関しては、データ統合は比較的イメージしやすい。例えば、観測によって取得された離散的で比較的観測データの密度が高い水温データを数値計算中に時定数を決めてナッジングし、観測値に近い分布の連続データセットを作成するというデータ統合の例などが挙げられる（例えば、淡路ら, 2009）。同様に、鉛直混合のマップを作成することも考えられる。しかし、多くの場合、鉛

直混合は単純な予報変数で表されることはなく、また、観測密度も現在のところ密とは言えない。このため、ナッジングのような手法は取りにくい。

前述のようなモデルパラメータ（鉛直拡散係数）の最適化は、モデルの高精度化という側面が強い。しかし、観測情報（例えば水温、塩分、海面高度の観測値）を取り込み、現実に近い海洋環境場（最適なパラメータを適用した力学的に整合した計算結果）を得るというプロセスは、力学的内挿による観測データの統合の一形態とみることもできる。海洋循環や気候変動現象への鉛直拡散係数の影響の詳細を紐解くために、鉛直拡散係数の最適化を通じた海洋環境再現データセットの高精度化を目標とするのは、一つの有効なアプローチである。

このアナロジーとして、鉛直混合の観測データの活用を考えると、鉛直混合観測の結果を用いて、鉛直拡散係数をはじめとするパラメータ群や、水温・塩分場、循環場（の初期値）を制御変数として最適化するというアプローチが浮かび上がる。この文脈では、数値モデルの時間発展を鉛直混合観測から得られる情報によって制御することで得られる鉛直拡散係数の分布および再現された海洋環境そのものが「観測を統合したデータセット」ということになる。ここで重要なのは、モデルの表現誤差の多くを鉛直拡散係数の修正で賄うようなデータ統合システムを使用したのでは、海洋環境再現結果はともかく、拡散係数の値自体の信頼性が大きく損なわれてしまう可能性があり、最適化された鉛直混合マップが統合された観測データセットとして意味をなさない危険性があることである。モデルの表現誤差を軽減しておくべく、可能

な限り力学に根ざした鉛直混合パラメタリゼーションを採用すること(例えば, St. Laurent *et al.*, 2002), 慎重な最適化結果の検証が肝要である。

5. 討論

文部科学省科学研究費補助金新学術研究領域「海洋混合学」(研究代表者: 安田一郎 東京大学教授)は, 鉛直混合の観測の拡充に伴い, 鉛直混合観測の直接的なデータ統合について2015年から新たな挑戦をはじめた(原田・西岡, 2015)。鉛直混合観測を活用し, 中深層の海洋環境再現を精緻化しようという試みである。4次元変分法を用いて鉛直混合観測データまで直接的に活用し, 鉛直拡散係数のアジョイント感度を手掛かりに海洋環境の再現と鉛直拡散係数の空間3次元分布の最適値推定をしようとしている。ここでの感度とは, 観測データと数値モデル結果の差に対して, 鉛直拡散係数をどのように変化させればその差が解消されるかを統計的に評価した変数である。

最適化の結果として得られた海洋環境再現データセットは, 深層循環・子午面循環メカニズムの解明, 気候変動現象と海洋亜表層循環の力学的リンクの探索, 深層昇温をはじめとする海洋の中長期変動のプロセス研究など, 近年注目されている海洋内部の様々な科学的問題に, これまでとは異なる視点から新たな知見を提供することができるであろう。また, 最適化された鉛直混合の分布はモデルの表現誤差を含むものの, 観測を統合した一つのマッピング結果として検証されるべきものになる。このような海洋環境再現システムを利用したアプローチと, 観測データや理論研究(丹羽, 2017; 井上, 2017a, b; 吉川・遠藤, 2017)を基に新たなパラメタリゼーション(例えば, Liu *et al.*, 2014)の構築をめざすアプローチ(羽角, 2017)など, 多角的に研究を推進することが, 海洋循環, 海洋環境変動における鉛直混合の役割を詳らかにするためのブレークスルーにつながるであろう。

また, 乱流に関する変数を予報変数とする新たな数値モデルフレームワークを構築することも, 計算機科学の発展に伴い近い将来可能となってくるかもしれない。現在, 実用段階に入りつつある, アルゴフロートや水中グライダーなどのプラットフォームを活用した乱流観測を

通して, 広範な直接観測データが密に取得されていくことが期待される中, 鉛直混合観測データをデータ統合の直接的な対象とする研究は, ますますその重要性を増すと考えられる。

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/JP15H05819**の支援を受けて行われました。

References

- Argo Science Team (2001): Argo: The global array of profiling floats, p. 248–258. In *Observing the Oceans in the 21st Century*, edited by C. J. Kobalinsky and N. R. Smith. GODAE Project Office, Bureau of Meteorology, Melbourne.
- 淡路敏之・蒲地政文・池田元美・石川洋一 (2009): データ同化—観測・実験とモデルを融合するイノベーション—. 京都大学学術出版会, 京都, 285pp.
- Awaji, T., S. Masuda, Y. Ishikawa, N. Sugiura, T. Toyoda, and T. Nakamura (2003): State estimation of the North Pacific Ocean by a four-dimensional variational data assimilation experiment. *J. Oceanogr.*, **59**, 931–943.
- Bryan, F. (1987): Parameter sensitivity of primitive equation ocean general circulation models. *J. Phys. Oceanogr.*, **17**, 970–985.
- Cummins, P. F., G. Holloway, and A. E. Gargett (1990): Sensitivity of the GFDL ocean general circulation model to a parameterization of vertical diffusion. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**, 817–830.
- Evensen, G. and P. J. van Leeuwen (2000): An Ensemble Kalman Smoother for Nonlinear Dynamics. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1852–1867.
- Fukasawa, M., H. Freeland, R. Perkin, T. Watanabe, H. Uchida, and A. Nishina (2004): Bottom water warming in the North Pacific ocean. *Nature*, **427**, 825–827. doi:10.1038/nature02337.
- Fukumori, I. (2002): A Partitioned Kalman Filter and Smoother. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1370–1383. doi: 10.1175/1520-0493.
- Furue, R., Y. Jia, J. P. McCreary, N. Schneider, K. J. Richards, P. Müller, B. D. Corneille, N. Martínez Avellaneda, D. Stammer, C. Liu, and A. Köhl. (2015): Impacts of regional mixing on the temperature structure in the equatorial Pacific Ocean. Part I: Vertically uniform vertical diffusion. *Ocean Modell.*, **91**, 91–111.
- 羽角博康 (2017): 海洋大循環モデルにおける鉛直混合パラメタリゼーションと太平洋深層循環に関する研究. *海の研究*, **26**, 203–208.
- 原田尚美・西岡純 (2015): 海洋混合学の創設, 物質循環・気候・生態系の維持と長周期変動の解明. *OMIX News Letter*, **1**, 1–4.
- Hosoda, S., T. Ohira, and T. Nakamura (2008): A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations. *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, **8**, 47–59.

- Jia, Y., R. Furue, and J. P. McCreary (2015): Impacts of regional mixing on the temperature structure of the equatorial Pacific Ocean. Part2: Depth-dependent vertical diffusion. *Ocean Modell.*, **91**, 112–127.
- 井上龍一郎 (2017a): 海上風による慣性振動の励起と近慣性内部重力波の海洋中への伝播に関する理論研究. *海の研究*, **26**, 217–225.
- 井上龍一郎 (2017b): 海上風により励起された近慣性内部重力波の背景流が存在する海洋中への伝播に関する理論研究. *海の研究*, **26**, 227–237.
- Katsumata, K. and S. Masuda (2013): Variability in Southern Hemisphere Ocean Circulation from the 1980s to the 2000s. *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 9, 1981–2007, doi:10.1175/JPO-D-12-0209.1.
- 小林大洋・雨池健一 (2015): 深海用プロファイリングフロート「Deep NINJA」の実用化. *水路*, **174**, 56–58.
- 額綱慎也 (2017): 北太平洋の中層と深層循環とその変化・変動の観測的研究. *海の研究*, **26**, xxx–xxx.
- Kouketsu, S., T. Doi, T. Kawano, S. Masuda, N. Sugiura, T. Toyoda, H. Igarashi, Y. Kawai, K. Katsumata, H. Uchida, M. Fukasawa, and T. Awaji (2011): Deep ocean heat content changes estimated from observation and reanalysis product and their influence on sea level change. *J. Geophys. Res.*, **116**, C03012. doi:10.1029/2010JC006464.
- Köhl A., F. Siegmund, and D. Stammer (2012): Impact of Assimilating Bottom Pressure Anomalies from GRACE on Ocean Circulation Estimates. *J. Geophys. Res.*, **117** (C4), 1–18. doi: 10.1029/2011JC007623.
- Liu, C. A. Köhl, and D. Stammer (2014): Interpreting layer thickness advection in terms of eddy-topography interaction. *Ocean Modell.*, **81**, 65–77.
- Liu, C., A. Köhl, and D. Stammer (2012): Adjoint-based estimation of eddy-induced tracer mixing parameters in the global ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **42**, 1186–1206.
- Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, Y. Ishikawa, K. Baba, K. Horiuchi, and N. Komori (2003): Improved estimates of the dynamical state of the North Pacific Ocean from a 4 dimensional variational data assimilation. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 16, 1868. doi:10.1029/2003GL017604.
- Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, J. P. Matthews, T. Toyoda, Y. Kawai, T. Doi, S. Kouketsu, H. Igarashi, K. Katsumata, H. Uchida, T. Kawano, and M. Fukasawa (2010): Simulated Rapid Warming of Abyssal North Pacific Waters. *Science*, **329**, 319–322, DOI, 10.1126/science.1188703.
- Melet, A., R. W. Hallberg, S. Legg, and K. Polzin (2013): Sensitivity of the Ocean State to the Vertical Distribution of Internal-Tide Driven Mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, **43**, 602–615. doi:10.1175/JPO-D-12-055.1.
- Menemenlis, D., I. Fukumori, and T. Lee (2005): Using Green's functions to calibrate an ocean general circulation model. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1224–1240.
- Monterey, G. I. and S. Levitus (1997): Climatological cycle of mixed layer depth in the world ocean. U.S. Gov. Printing Office, NOAA NES-DIS, 5pp.
- 丹羽淑博 (2017): 海洋深層の乱流混合過程に供給される内部波エネルギーのグローバル分布に関する研究の進展と課題. *海の研究*, **26**, 175–188.
- Niwa Y. and T. Hibiya (2004): Three-dimensional numerical simulation of M2 internal tides in the East China Sea. *J. Geophys. Res.*, **109** (C4), 1–14. doi:10.1029/2003JC001923.
- Oka, A. and Y. Niwa (2013): Pacific deep circulation and ventilation controlled by tidal mixing away from the sea bottom. *Nat. Commun.*, **4**, 1–8.
- Osafune, S., S. Masuda, N. Sugiura, and T. Doi (2015): Evaluation of the applicability of the Estimated Ocean State for Climate Research (ES-TOC) dataset. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 12, 4903–4911.
- Richards, K. J., Y. Kashino, A. Natarov, and E. Firing (2012): Mixing in the western equatorial Pacific and its modulation by ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L02604. http://dx.doi.org/10.1029/2011GL050439.
- Sasaki, W., K. J. Richards, and J.-J. Luo (2012): Role of vertical mixing originating from small vertical scale structures above and within the equatorial thermocline in an OGCM. *Ocean Modell.*, **57–58**, 29–42.
- Sasaki, Y. (1970): Some basic formalisms in numerical variational analysis. *Mon. Weather Rev.*, **98**, 875–883.
- Sciller, A., L. Tong, and S. Masuda (2013): Chapter 22, Methods and Applications of Ocean Synthesis in Climate Research, p. 581–601. In *Ocean Circulation & Climate -A 21st century perspective, International Geophysics 103*, edited by G. Siedler, S. M. Griffies, J. Gould, and J. A. Church, Academic Press, Oxford, UK. doi:10.1016/B978-0-12-391851-2.00022-2.
- Stammer, D., C. Wunsch, I. Fukumori, and J. Marshall (2002a). State Estimation in Modern Oceanographic Research. *EOS*, **83**, 27, 289, 294–295.
- Stammer, D., C. Wunsch, R. Giering, C. Eckert, P. Heimbach, J. Marotzke, A. Adcroft, C. N. Hill, and J. Marshall (2002b): Global ocean circulation during 1992–1997, estimated from ocean observations and a general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **107**, C9, 3118, 1–27.
- St. Laurent, L. C., H. L. Simmons, and S. R. Jayne. (2002): Estimating tidally driven mixing in the deep ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2106, 1–4. doi:10.1029/2002GL015633.
- 田中雄大 (2017): 北太平洋乱流ホットスポットでの鉛直混合強度の観測的知見. *海の研究*, **26**, 151–174.
- Toyoda, T., N. Sugiura, S. Masuda, Y. Sasaki, H. Igarashi, Y. Ishikawa, T. Hatayama, T. Kawano, Y. Kawai, S. Kouketsu, K. Katsumata, H. Uchida, T. Doi, M. Fukasawa, and T. Awaji (2015): An improved simulation of the deep Pacific Ocean using optimally-estimated vertical diffusivity based on the Green's function method. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 9916–9924, DOI: 10.1002/2015GL065940.
- Whalen, C. B., L. D. Talley, and J. A. MacKinnon (2012): Spatial and temporal variability of global ocean mixing inferred from Argo profiles. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L18612, doi:10.1029/2012GL053196.
- Wunsch, C. and P. Heimbach (2013): Chapter 21, Dynamically and kinematically consistent global ocean circulation and ice state estimates, p. 553–579. In *Ocean Circulation and Climate -A 21st Century Perspective, International Geophysics 103*, edited by G. Siedler, J. Church, J. Gould, and S. Griffies, Academic Press, Oxford, UK. doi:10.1016/B978-0-12-391851-2.00021-0.
- Wunsch, C. and P. Heimbach (2007): Practical global oceanic state estimation. *Physica D-Nonlinear Phenomena*, **20**, 197–208, DOI: 10.1016/j.physd.2006.09.040.
- 吉川裕・遠藤貴洋 (2017): 海洋表層混合層における乱流混合に関する研究. *海の研究*, **26**, 239–250.

Improved ocean state estimation by controlling ocean-mixing: toward synthesis of ocean-mixing observations

Shuhei Masuda*

Abstract

Ocean-mixing plays an essential role in ocean currents, particularly meridional overturning. In conjunction with increased observations, there has been a focus on synthesis of ocean-mixing data. This paper discusses current ocean state estimation and possible synthesis of ocean-mixing observations.

Key words : ocean circulation, data assimilation, vertical mixing

(Corresponding author's e-mail address : smasuda@jamstec.go.jp)

(Received 3 August 2016 ; accepted 26 December 2016)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2017)

* Research and Development Center for Global Change,
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC),
2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan
TEL: +81468679258 FAX: +81468679835
e-mail: smasuda@jamstec.go.jp

