

機関番号：12601

領域設定期間：2015～2019年度

領域番号：4702

研究領域名（和文）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

研究領域名（英文）Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem

領域代表者

安田 一郎 (YASUDA ichiro)

東京大学・大気海洋研究所・教授

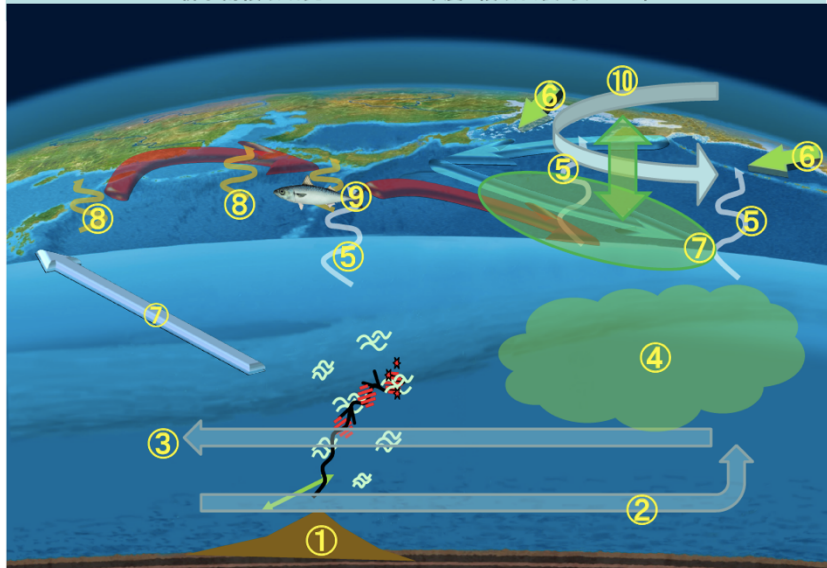
研究者番号：80270792

交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,175,900,000円

研究成果の概要

これまで実態がわからなかった海洋の鉛直混合と物質輸送について、深層まで容易に実測できる新しい観測手法やデータ統合システムが開発され、従来に比べて圧倒的に多数の、隣国海域を含む現場観測が行われた。現場観測に基づく分布・輸送から、潮汐によって躍層や複雑な海底地形上で強化される混合①分布を組み込んだシミュレーションモデルが開発され、鉛直混合が海洋循環・気候・生態系に与える役割が評価された。北太平洋で従来想定されていたよりも弱い混合に伴う深層循環②によって高い密度を維持した水塊が南極周辺で湧昇し海水分布を変えることで、気候・温暖化速度に影響する③とともに、北太平洋中深層に栄養塩が蓄積④される。この栄養塩はアリューシャン・千島・伊豆海嶺等で強化された潮汐混合⑤によって中表層に湧昇し、縁辺海に供給される陸起源の鉄⑥とともに、親潮で輸送される⑦ことで、北西太平洋での高い生物生産（海の恵み）を維持する役割を持つ。この水塊⑦は北太平洋の中層循環で亜熱帯・黒潮海域に輸送され、黒潮が海峡部の浅瀬を横切る際に発生する強烈な鉛直混合によって硝酸塩が表層へ輸送⑧され、生物生産を活性化させる等、黒潮は従来考えられていた貧栄養海域とは異なっていることが明らかとなった。強い混合が存在する伊豆諸島海域の低温環境で産卵し、高温の黒潮で輸送される成長の良いマサバ仔魚は、餌の豊富な低温の親潮へ回遊し、さらに成長が促進される⑨。これら伊豆海嶺付近をはじめとする北太平洋規模の水温や水産資源の長期変動の主要な要因である太平洋10年規模振動PDOに、潮汐の18.6年振動の影響が東北沖の海面水温とアリューシャン低気圧の相互作用を通じて増幅し現れる⑩ことが、混合変動を組み込んだ新しい気候モデルで再現された。本領域で得られた、観測・モデリング手法、データ・理論や研究連携・国際拠点は、新たな課題とともに、新しい研究領域「海洋混合学」として、地球規模の環境変動研究に挑む次世代の研究者に引き継がれる。

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
Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate & Ecosystem
新学術領域研究2015-2019年度 領域代表：安田一郎



これら伊豆海嶺付近をはじめとする北太平洋規模の水温や水産資源の長期変動の主要な要因である太平洋10年規模振動PDOに、潮汐の18.6年振動の影響が東北沖の海面水温とアリューシャン低気圧の相互作用を通じて増幅し現れる⑩ことが、混合変動を組み込んだ新しい気候モデルで再現された。本領域で得られた、観測・モデリング手法、データ・理論や研究連携・国際拠点は、新たな課題とともに、新しい研究領域「海洋混合学」として、地球規模の環境変動研究に挑む次世代の研究者に引き継がれる。

研究分野：海洋混合学

キーワード：乱流、鉛直混合、海洋循環、海洋物質循環、海洋物理学、生物地球化学、気候力学、海洋生態学、水産海洋学

1. 研究開始当初の背景

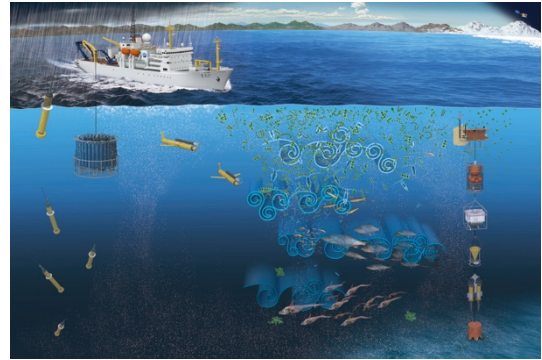
海洋の鉛直混合は、熱を鉛直方向に輸送し、海面での熱交換を通じて気候に影響する。また、海面付近で枯渇し、中深層に蓄積されている栄養物質を有光層に輸送することで、海洋の生物生産を維持する。さらに、鉛直混合により海水密度が変化することで、深層水をゆっくりと湧昇させて、海洋循環を制御する。北太平洋の深層循環や気候に、鉛直混合がどのように関わっているのか。深層循環の終端に位置する北太平洋で、中深層に蓄積された栄養物質が鉛直混合を通じてどのように表層へ回帰し、日本周辺海域での豊かな生物生産を支えているのか。海洋の鉛直混合の重要性は古くから認識され、多くの研究がなされてきたが、鉛直混合の実測が困難で、観測が十分に行われておらず、実態が不明瞭であった。このため、海洋のシミュレーションモデルで鉛直混合はブラックボックスとして扱われており、鉛直混合が海洋循環・栄養物質循環・生態系・気候に及ぼす影響の理解は進んでいなかった。さらに、月軌道の18.6年周期変動に伴う潮汐の変動に対応した、長周期変動が日本周辺海域の水塊や気候について報告されたことから、潮汐混合やその変動を組み込んだ次世代のモデルの開発が望まれていた。

2. 研究の目的

鉛直混合を実測することで北西太平洋での鉛直混合の実態を明らかにし、太平洋の中深層循環や気候に対する鉛直混合の役割を明らかにする。また、栄養塩等物質輸送への影響を通じた、日本周辺海域での高い生物生産（海の恵み）を維持する仕組みを解明する。18.6年周期で変動する潮汐に伴う鉛直混合の変動が、気候・海洋・海洋生態系・水産資源の長期変動に与える影響を評価して、変動予測につなげる。これらを総合して新しい研究領域「海洋混合学」を創り、次世代の研究の礎とする。

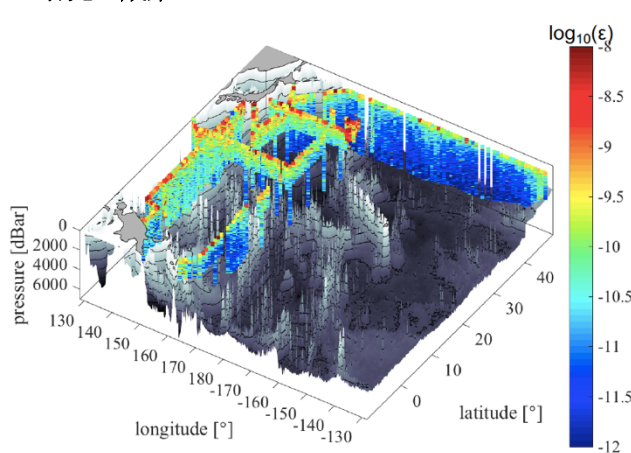
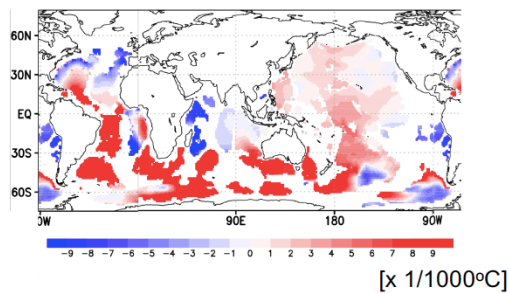
3. 研究の方法

高速水温計を用いて簡便・効率的に深海での弱い鉛直混合をも実測できる日本独自の観測手法を開発し¹⁾、日本が誇る気象庁・海洋研究開発機構・水産庁等の海洋観測ネットワークを活用するとともに、ロシア・インドネシア・台湾・中国・米国など、隣国との国際共同研究航海や昇降式係留生態系長期時系列観測(右図)を通じて、北西太平洋と縁辺海で広域あるいは集中的な物理・化学・生物を統合した、100を超える観測航海を実施し、2000キャストを超える現場観測データを取得した。鉛直混合の観測データを直接モデルに統合するデータ同化システム²⁾を世界に先駆けて開発し、観測と力学に統合的な統合データセットを作成し、温暖化に伴う深層昇温の詳細分布の再現(下図)に成功した。

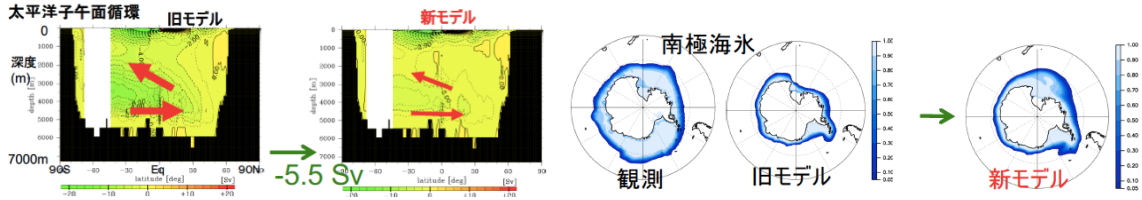


鉛直混合を引き起こす主要な機構である乱流、特に深海で重要である潮汐起源の乱流鉛直混合の素過程を定式化し³⁾、鉛直混合分布を組み込み、太平洋の深層循環を再現できる、全球モデルを開発する⁴⁾とともに、潮汐18.6年周期振動に伴う鉛直混合変動を組み込んだモデルを開発し⁵⁾、物質輸送・生態系・気候の維持と長周期変動に与える影響を評価した。魚類耳石の酸素同位体微量分析を用いた個体毎の経験水温・成長履歴を復元する技術を開発し⁶⁾、マサバの成長に好適な条件を明らかにして、水産資源の変動機構の理解と予測に貢献した。

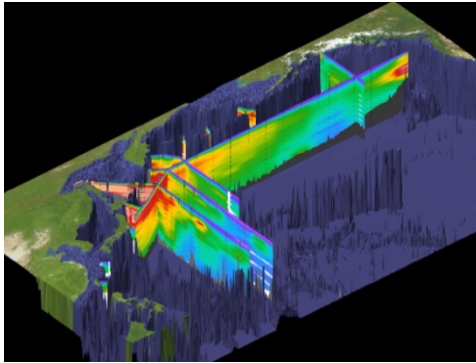
4. 研究の成果



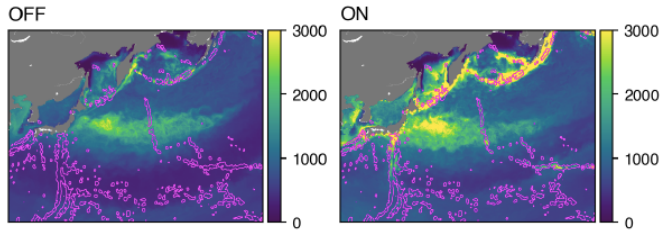
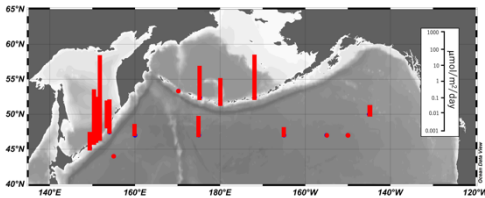
高速水温計を用いて観測された深海に至る鉛直混合強度を表す乱流エネルギー散逸率 ϵ (左図:単位 W/kg)は、海山や海嶺等複雑な海底地形上と密度躍層で大きい等、理論と統合的な分布を示した⁷⁾。一方、太平洋の深層循環を再現するモデルで用いられていた強度よりも小さいことが判明した⁷⁾。観測結果を反映させた海洋循環モデルから、深層で従来想定されたよりも弱い乱流エネルギー散逸率に対応する弱い深層循環であっても、放射性炭素同位体分布等水塊分布と整合的であり⁸⁾、この太



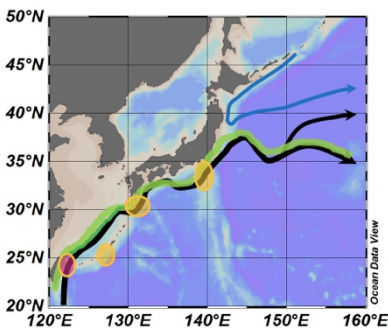
太平洋深層水が高密度を保って南下し（上左図新モデル）、南極周辺で湧昇することで成層が強化され、海氷面積が拡大すること（上図：右新モデル）等を通じて、全球気候⁹⁾、地球温暖化速度¹⁰⁾に影響する等、気候が太平洋深層の鉛直混合に敏感に応答することが明らかにされた。



これら北太平洋での従来想定されていたよりも弱い乱流混合や、ロシアとの共同観測等で明らかとなった、ベーリング海深層の閉鎖性¹¹⁾によって深層に蓄積された栄養塩、及び、オホーツク海・ベーリング海にもたらされる陸起源の鉄（左図：北西太平洋での溶存鉄の3次元分布）が、海峡・海嶺など局所的に強化された潮汐起源の鉛直混合によって中表層にもたらされる¹²⁾こと（左下図：実測された溶存鉄と鉛直混合による溶存鉄鉛直輸送速度：対数表示、単位 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ）が、北西太平洋に独特で豊かな海洋生態系を維持する



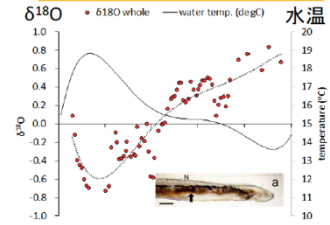
役割を果たしていることが明らかとなった（右上図：鉄を含む生態系シミュレーションによる潮汐混合が無い場合（左）と有る場合（右）の4月基礎生産速度 $(\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1})$ 、紫は内部潮汐エネルギー変換が 0.01Wm^{-2} を超える強潮汐混合海域）。



乱流硝酸塩フラックス $(\text{mmol/m}^2/\text{d})$
 亜熱帯海域 $O(10^{-2})$
 黒潮前線域 $O(10^{-1})$
 東シナ海陸棚縁辺 $O(10^{-1})$
 海峡・海嶺部 $O(10^{-1}-10^1)$

これら栄養物質は、北太平洋中層水循環を通じて亜熱帯海域・黒潮域に運ばれ¹³⁾、黒潮が通過する海峡・海嶺部で発生する強烈な鉛直混合¹⁴⁻¹⁹⁾により上方へ輸送され、黒潮が育む生態系を活性化する²⁰⁾。植物プランクトンが少ないために、これまで貧栄養海域と判定されてきた黒潮は、実は鉛直混合によって栄養塩が供給され生産される植物プランクトンが動物プランクトンに速やかに捕食されており、稚仔魚を育む餌の豊富な海域であることが明らかにされた²⁰⁾。

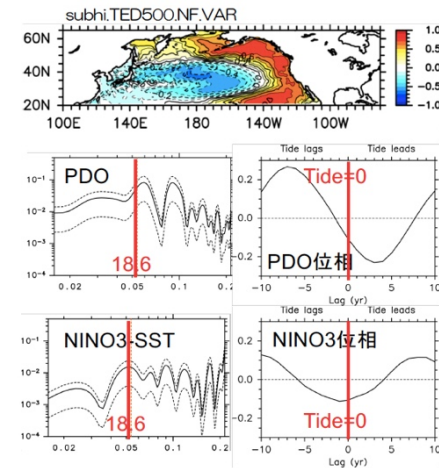
伊豆海嶺域で発生する強乱流による低温高餌料環境²¹⁾下で産卵し²²⁾、温暖な黒潮に輸送²³⁾される成長の良いマサバ仔魚²⁴⁾が、稚魚期に低温高餌料の親潮海域に回遊して²⁵⁾成長が促進され、水産資源変動に寄与することが、耳石微量元素同位体分析手法の開発によって明らかにされた（右図：下：マサバ耳石微量元素同位体分析から得



耳石半径 (μm)

られた耳石半径に対する酸素同位体（左）と水温（右）、稚魚期に低水温環境に回遊することを示す。上：伊豆諸島産卵場から黒潮に輸送され、さらに低温高餌料親潮海域で成長することを示唆する回遊模式図）。

さらに、観測される18.6年周期変動²⁶⁾と整合的な太平洋10年規模振動PDOを再現する、潮汐18.6年周期混合変動を取り入れた最新の気候モデルの開発に成功した²⁷⁾。混合分布・モデル特性に敏感に依存するため、今後さらに検討が必要だが、PDOは気候の長期変動を通じて海洋生態系・水産資源と関係することから、今後大きな発展が期待できる。



生態系・水産資源と関係することから、今後大きな発展が期待できる。

これら、海洋の鉛直混合が海洋循環・物質循環・生態系・気候と長周期変動に重要な影響を与えることが明らかとなった。加えて、乱流²⁸⁻²⁹⁾・化学³⁰⁾の素過程が明らかにされる等、本領域で開発された観測手法・データ・モデルを活用・改良して、多くの課題の解決に次世代の若手研究者が取り組める学術的基盤を作ることができた。混合分布の平均・変動・メカニズムとその影響の解明には、観測データおよび研究の蓄積が必要である。今後全球・深層に至る生態系を含む観測システム³¹⁾の整備と統合的研究が望まれる。

5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

- 1) Goto Y., I. Yasuda and M. Nagasawa (2018) Comparison of turbulence intensity from CTD-attached and free-fall microstructure profilers. *Journal of Atmosphere and Ocean Technology*, 35, 147-162, DOI: 10.1175/JTECH-D-17-0069.1
- 2) Masuda, S. (2020) Current Status and Perspective for Synthesis of Ocean-Mixing Observations, submitted to *J. Oceanogr.*
- 3) Hibiya, T., T. Ijichi, and R. Robertson (2017) The impacts of ocean bottom roughness and tidal flow amplitude on abyssal mixing, *J. Geophys. Res.*, 122, 5645-5651, doi:10.1002/2016JC012564.
- 4) Kawasaki, T., and H. Hasumi, Effect of tide-induced mixing on shallow Pacific Ocean circulation, IAPSO-IAMAS-IGA Joint Assembly, Cape Town (South Africa), August 31, 2017.
- 5) Tatebe, H., T. Ogura, T. Nitta, Y. Komuro, K. Ogochi, T. Takemura, K. Sudo, M. Sekiguchi, M. Abe, F. Saito, M. Chikira, S. Watanabe, M. Mori, N. Hirota, Y. Kawatani, T. Mochizuki, K. Yoshimura, K. Takata, R. O'ishi, D. Yamazaki, T. Suzuki, M. Kurogi, T. Kataoka, M. Watanabe and M. Kumoto, (2019) Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 12, 2727-2765.
- 6) Sakamoto, T., Komatsu, K., Yoneda, M., Ishimura, T., Higuchi, T., Shirai, K., Kamimura, Y., Watanabe, C., Kawabata, A. (2017) Temperature dependence of $\delta^{18}O$ in otolith of juvenile Japanese sardine: Laboratory rearing experiment with micro-scale analysis. *Fisheries Research*, 194, 55–59. doi: 10.1016/j.fishres.2017.05.004
- 7) Goto Y., I. Yasuda, M. Nagasawa, S. Kouketsu, Toshiya Nakano (2020) Toward global ocean turbulence observation: thermal microstructure measurements in the North Pacific. Submitted to *Scientific Reports*, June 7, 2020
- 8) Kawasaki, T., The deep Pacific meridional overturning circulation simulated by a low-resolution ocean model, JpGU, Chiba (Japan), May 29, 2019. (Invited Presentation)
- 9) Tatebe, H., Y. Tanaka, Y. Komuro and H. Hasumi (2018) Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean. *Scientific Reports*, 8, 14479.
- 10) Watanabe M., H. Tatebe, T. Suzuki, and K. Tachiiri (2020) Control of transient climate response and associated sea level rise by deep-ocean mixing, *Environmental Research Letters*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8ca7>
- 11) 藤尾伸三・柳本大吾他(2019)カムチャッカ海峡周辺での深層流観測.ロシア船航海報告会議,2019/10/17 北大低温科学研究所
- 12) Nishioka J., H. Obata, H. Ozawa, K. Ono, Y. Yamashita, K-J. Lee, S. Takeda and I. Yasuda (2020) Sub-polar marginal seas fuel the North Pacific through the intermediate water at the termination of the global ocean circulation. *Proceedings of National Academy of Science*, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2000658117
- 13) Yasuda I. (1997) The origin of the North Pacific Intermediate Water, *J. Geophys. Res.*, 102(C1), 893-909
- 14) Tsutsumi, E., T. Matsuno, R.-C. Lien, H. Nakamura, T. Senjyu, X. Guo (2017) Turbulent mixing within the Kuroshio in the Tokara Strait, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 7082-7094.
- 15) Nagai, T., D. Hasegawa, T. Tanaka, H. Nakamura, E. Tsutsumi, R. Inoue, T. Yamashiro (2017) First Evidence of Coherent Bands of Strong Turbulent Layers Associated with High-Wavenumber Internal-Wave Shear in the Upstream Kuroshio, *Scientific reports*, 7, 14555.
- 16) Tanaka T., D. Hasegawa, I. Yasuda, H. Tsuji, S. Fujio, Y. Goto, and J. Nishioka (2019) Enhanced vertical turbulent nitrate flux in the Kuroshio across the Izu Ridge. *J. Oceanogr.*, 75, 195-203, <https://doi.org/10.1007/s10872-018-0500-2>.
- 17) Inoue, R., T. Tanaka, H. Nakamura, D. Yanagimoto, S. Fujio, and I. Yasuda (2020) Microstructure and Mooring Observations of Enhanced Mixing in the Kerama Gap, *J. Geophys. Res. Oceans*
- 18) Nagai, T., G. S. Durán, D. A. Otero, Y. Mori, N. Yoshie, K. Ohgi, D. Hasegawa, A. Nishina, T. Kobari (2019) How the Kuroshio Current delivers nutrients to sunlit layers on the continental shelves with aid of near-inertial waves and turbulence, *Geophysical Research Letters*, 46 (12), 6726–6735. <https://doi.org/10.1029/2019GL082680>
- 19) Tsutsumi1 E., T. Matsuno2, S. Itoh, J. Zhang, T. Senjyu, A. Sakai, K.J. Lee, D. Yanagimoto, I. Yasuda, C. Villanoy (2020) Vertical fluxes of nutrients enhanced by strong turbulence and phytoplankton bloom around the ocean ridge in the Luzon Strait *Scientific Reports* submitted
- 20) Kobari, T., T. Honma, D. Hasegawa, N. Yoshie, E. Tsutsumi, T. Matsuno, T. Nagai, T. Kanayama, F. Karu, K. Suzuki, T. Tanaka, X. Guo, G. Kume, A. Nishina, and H. Nakamura (2020) Phytoplankton

growth and consumption by microzooplankton stimulated by turbulent nitrate flux suggest rapid trophic transfer in the oligotrophic Kuroshio, *Biogeosciences*, 17, 2441–2452, doi:10.5194/bg-2019-377.

21) 長船哲史・安田一郎 (2014) 潮汐 18.6 年周期変動・黒潮流路変動と関連する日本南岸域の栄養塩変動 沿岸海洋研究, 52, 67–73

22) Yoneda M. (2017) Keys to fluctuating the stock biomass of chub mackerel *Scomber japonicus*: temperature and maternal effects on early life history traits. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 83, 837, DOI:10.2331/suisan.WA2447-3

23) 小松幸生(2017) マサバ卵分布と加入量との関係、OMIX-A03-6 班会議報告

24) Kamimura, Y., M. Takahashi, N. Yamashita, C. Watanabe and A. Kawabata (2015) Larval and juvenile growth of chub mackerel *Scomber japonicus*: in relation to recruitment in the western North Pacific. *Fish. Sci.*, 81, 505-513

25) Higuchi T., S. Ito, T. Ishimura, Y. Kamimura, K. Shirai, H. Shindo, K. Nishida, K. Komatsu (2019) Otolith oxygen isotope analysis and temperature history in early life stages of the chub mackerel *Scomber japonicus* in the Kuroshio–Oyashio transition region. *Deep Sea Research II*, 169–170.

26) Yasuda, I. (2018) Impact of the astronomical lunar 18.6-yr tidal cycle on El-Niño and Southern Oscillation. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/s41598-018-33526-4

27) 建部洋晶(2020) OMIX 作業部会 3 報告、OMIX 全体会議 2020/5/30

28) Onuki Y. (2020) Quasi-local method of wave decomposition in a slowly varying medium, *Journal of Fluid Mechanics*, 883, A56.

29) Fujiwara, Y., Y. Yoshikawa, and Y. Matsumura (2018) A wave resolving simulation of Langmuir circulations with a nonhydrostatic free-surface model: Comparison with Craik-Leibovich theory and an alternative Eulerian view of the driving mechanism, *J. Phys. Oceanogr.*, 48, 1691-1708, doi: 10.1175/JPO-D-17-0199.1

30) Yamashita, Y., J. Nishioka, H. Obata, and H. Ogawa (2020) Shelf humic substances as carriers for basin-scale iron transport in the North Pacific. *Scientific Reports*, 10, 4505.

31) Roemmich, D., et al T. Hibiya, T. Nagai, I. Yasuda (2019) On the future of Argo: A global, full-depth, multi-disciplinary array, *Front. Mar. Sci.*, 6, doi:10.3389/fmars. 2019.00439.

ホームページ等

<http://omix.aori.u-tokyo.ac.jp>