

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 14 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2013～2015

課題番号：25257206

研究課題名(和文)オホーツク海太平洋交換流・混合と太平洋深層構造観測研究

研究課題名(英文)Studies on mixing and exchange between the Okhotsk Sea and the Pacific and impact on deep structure

研究代表者

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(研究期間全体)：(直接経費) 37,000,000円

研究成果の概要(和文)：ロシア海洋調査船によるロシア海域の観測航海を2014年夏季に行い、ブッソル海峡およびウルップ海峡での多層流速計係留観測や乱流計搭載水中グライダー観測など約3週間の連続観測や千島南方太平洋海域の統合的観測を成功させた。ブッソル海峡での大きな鉛直混合が、海峡を流出するオホーツク海水の層厚・鉄分布等を変化させ、太平洋の水塊構造や生物生産に大きな影響を与えることを明らかにした。この海峡部での強乱流の発生原因が、1)比較的深度のブッソル海峡で、内部潮汐流・倍調流と平均流が重なる流速シア強化、2)浅いウルップ海峡では、地形性捕捉波動に伴う斜面を駆け下りる流速強化、であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：By performing the Russian vessel Multanovsky Expedition in the Russian economic zone in June 2014, we succeeded in time-series observations of long-range current moorings and a glider with a turbulence profiler in and around the Kuril Straits and physical-chemical integrated observations on the Pacific side. Observed enhanced turbulence in the Bussol' Strait leads to the discovery that thickness and iron/nutrient changes of outflowing Okhotsk Sea water through the strait to influence largely on the water-mass structures and ecosystem in the North Pacific. The enhanced turbulence is found to be generated by 1) the superposition of tidal and mean currents in the deep Bussol' Strait and by 2) the enhanced down-slope currents accompanied by topographically-trapped waves in the shallow Urup Strait.

研究分野：海洋物理学

キーワード：日露共同観測 ブッソル海峡 オホーツク海 乱流 鉛直混合 千島海峡部 ロシア海域 深層循環

1. 研究開始当初の背景

北太平洋では深層水の形成は無く、南太平洋を通じて流入する北大西洋や南極起源の深層水が乱流鉛直混合によって密度の小さい海水と混合することによって浮力を得て湧昇し、表中層を南に戻る、ベルトコンベアと呼ばれる熱塩循環によって海洋構造が維持されている。また、月軌道の18.6年周期変動に対応して日周潮汐力の振幅が約20%程度変動することに伴い、潮汐に起因する鉛直混合が約2割変動し、水塊や栄養塩等分布を通じて海洋生態系、さらには気候の長周期変動にまで影響する可能性が研究代表者らによって指摘されてきた (Yasuda et al. 2006; Osafune and Yasuda 2006; Hasumi, et al. 2008; Yasuda, 2009; Tanaka et al., 2012)。特に、強い潮汐鉛直混合が存在する可能性が推測されていた千島・アリューシャン列島周辺海域において、鉛直混合とその変動の時空間分布を明らかにすることが、気候・海洋・生態系の維持と変動を理解する上で喫緊の課題となっている。一方、千島海峡はロシア経済水域を含むため、鉛直混合のみならず様々な観測が困難であるため、観測データが乏しく、鉛直混合の実態やそのメカニズム、物質分布の実態は未だ十分には明らかにされていない。

2. 研究の目的

オホーツク海と太平洋の海水が交換し強い鉛直混合によって水塊変質が生じる千島列島海峡域の流速変動と混合は、北太平洋の海洋循環・物質循環さらには気候の長周期変動の鍵となっている。しかし、ロシア領海を含む経済水域にあるため、観測が著しく制限され研究課題が山積している。本計画では、ロシアと共同で千島列島周辺海域における係留系流速観測および乱流観測を展開し、1) 千島交換流とその上流・下流部での海流変動の実態と連関を明らかにし、2) 流速鉛直構造・変動と乱流鉛直混合の関係を基に、鉛直混合に伴う鉛直循環を推定する手法を開発し、3) 既存の広域高精度密度観測データに適用することにより、北太平洋中深層循環に千島・オホーツク海周辺の強い鉛直混合が果たす役割を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

千島列島海峡などにおいて、ロシア極東水文気象研究所 (FEHRI) と共同で、係留系を設置し共同でデータを解析すること、および、千島列島海域でのロシア観測船による乱流計搭載水中グライダー観測・ケーブル付き乱流計観測により、1) 平均流と日周潮汐流の鉛直勾配 (鉛直シア) が強化されることによる強乱流発生仮説を検証し、2) 千島海峡での流速変動の実態と上流・下流部での流速変動の関連を明らかにする。日本近海での詳細観測と併せて、3) 鉛直混合に伴う鉛直循環を求める手法、鉛直混合推定手法を開発・改良することにより、4) 千島列島周辺海域及び北太平洋中深層での乱流鉛直混合および混

合に伴う鉛直循環を推定し、千島周辺海域での強い混合が北太平洋循環に果たす役割を明らかにする。

4. 研究成果

4.1) ロシア太平洋側観測

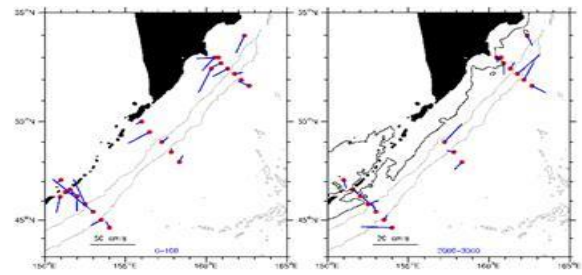


図1: 千島南太平洋側での (左) 0-100m 平均流速、(右) 2000-3000m 平均流速、灰色: 6000m 等深線、右図黒線: 2000m 等深線

2014年6月2日から7月8日にロシア・極東水文気象研究所 (FERHRI) 所属調査船マルタノフスキーを用いたロシア排他的経済水域・領海の日露共同観測を実施した。当初予定のロシア領海からは若干ずらすことにはなったが、千島ウルップ海峡での係留式多層流速計観測、ブッソル海峡での係留式多層流速計観測および多層流速計・乱流計搭載グライダー観測、太平洋側における深層に至る物理・化学統合的観測を実施した (図1)。この観測から千島・カムチャッカ海溝最深部に沿って北東に流れる深層流の存在が明らかとなった (図1右 2000-3000m 深層流分布)。

4.2) 千島海峡部での係留・乱流観測

ウルップ島とシムシル島の間のブッソル海峡 (水深 925m) およびウルップ海峡 (水深 785m) にそれぞれ1系ずつ 75kHz ADCP 係留系を設置し、前者では2週間、後者では20日間の流速鉛直プロファイルの時系列を得た。また、各海峡で乱流計を用いた1日繰り返し乱流観測を行った。

ブッソル海峡とウルップ海峡とでは鉛直構造が異なっており、平均流速、変動成分ともにブッソル海峡では下層ほど強く、ウルップ海峡では上層ほど強い傾向があった (図2)。

ブッソル海峡の800m深の流速のパワースペクトルには、日周潮と半日周潮が卓越するほか、3倍潮・4倍潮、さらに5倍潮までピークが見られた。流速変動は日周潮 (K1 と O1) と半日周潮 (S2 と M2) でほぼ再現できるものの、より高周波数の変動も無視できなかった。

繰り返しの乱流観測で得られた乱流エネルギー拡散率は、ブッソル海峡では半日の間に水深400mから800mに高い値が移動する様子が見られる (図3a)。係留系によって得られた流速鉛直シアの分布にも同様の様子が見られ (図3b)、調和解析の結果により主要4分潮とトレンドで概ね説明できる (図3c)。

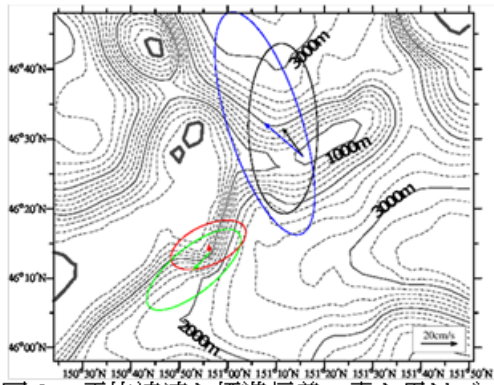


図 2. 平均流速と標準偏差。青と黒はブッソル海峡の水深 800m と 700m、赤と緑はウリップ海峡の 600m と 500m での値を示す。海底地形は ETOPO2 による。

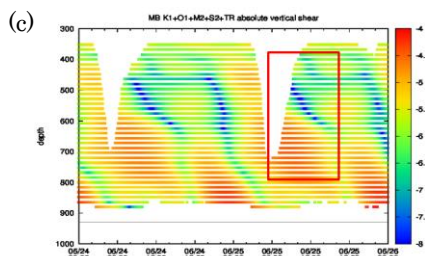
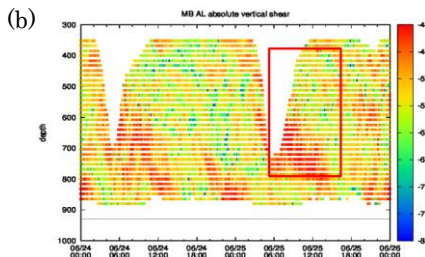
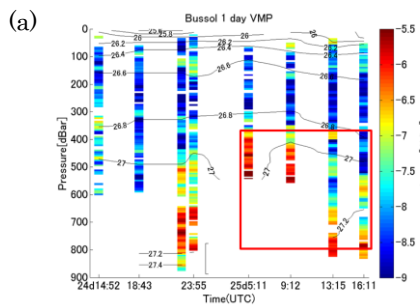


図 3. ブッソル海峡における乱流エネルギー散逸率 (a) と、同時期の流速鉛直シア s^2 (b) および流速の 4 分潮とトレンド成分による鉛直シア(c) の時系列。赤で囲った部分は同一の時間、同一の深さを示す。

4. 3) 乱流計搭載水中グライダー観測

2014年6月に千島列島ブッソル海峡周辺にて、約2週間にわたるグライダー観測を行った。グライダーには、CTD、溶存酸素計のほか、乱流計 Micro-Rider1000 が搭載されている。本海域では、日周期はコリオリ周期よりも長く、半日周期はコリオリ周期よりも短い

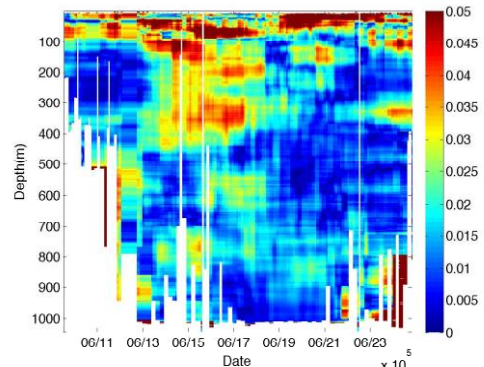
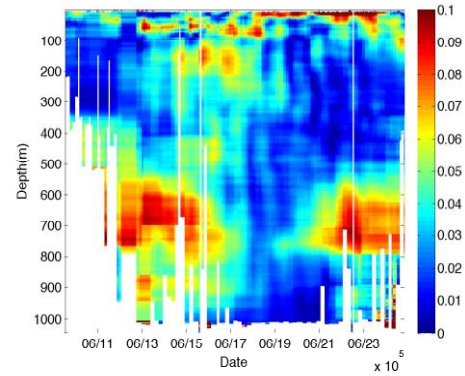


図 4: 密度アノマリの(a)日周期成分と(b)半日周期成分の振幅の時系列鉛直分布

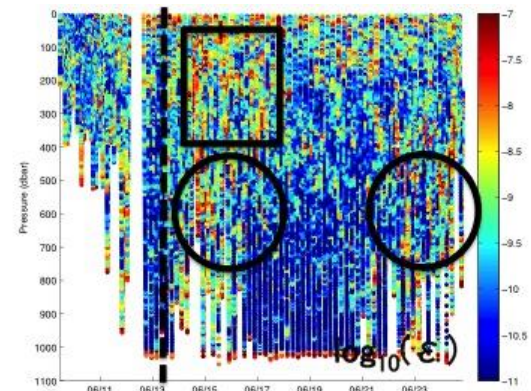


図 5 エネルギー散逸率の時系列鉛直分布 (W/kg)

事から、日周期の内部潮汐波動は海底地形に捕捉された地形性捕捉波、半日周期の内部潮汐波動は海洋内部を自由に伝播できる波動として各々存在できる。そこで、得られたポテンシャル密度の時系列に対して、2 日間のウインドウ内での平均密度を差し引いた密度アノマリの時系列を作成し、調和解析から日周期と半日周期成分の変動を取り出した。図 4a, b は、各々日周期、半日周期成分の密度アノマリ振幅である。日周期成分は、深い深度 (600-800 深) で大きな振幅を持つのに対し、半日周期成分は、比較的浅い深度 (100-400m 深) で大きな振幅が見られた。これは、上記の各内部潮汐波の性質を反映していると考えられ、日周期成分は、より海底地形

に近い層で大きな振幅を持っていると考えられた。また、同時観測した乱流計のデータからは、大きなエネルギー散逸率が、密度アノマリの振幅が大きな深度・時間帯に対応して発生している事が捉えられた(図5)。これらの事は、グライダー観測が、内部波動に伴う鉛直混合強化過程を捉えていることを示している。

4.4. 鉛直混合および鉛直循環評価手法の開発と千島海峡部・北太平洋中深層データへの適用

千島列島海峡部での乱流計観測との比較によって開発した、密度逆転を用いた間接的鉛直混合強度の見積もり手法(Yagi and Yasuda, 2013)を確立するとともに、ブッソル海峡を横切るCTD繰り返し観測に適用し海峡を横切る乱流鉛直混合係数の平均分布を明らかにした(図6、Yagi et al., 2014)。分厚い層厚を持っていたオホーツク水の厚さが、ブッソル海峡を横切る際に、薄くなる(図7)ことについて、図6でエネルギー散逸率が極小値をとるポテンシャル密度 26.7 から極大に向かう 26.85 の鉛直混合の鉛直分布によって説明できることを示した。

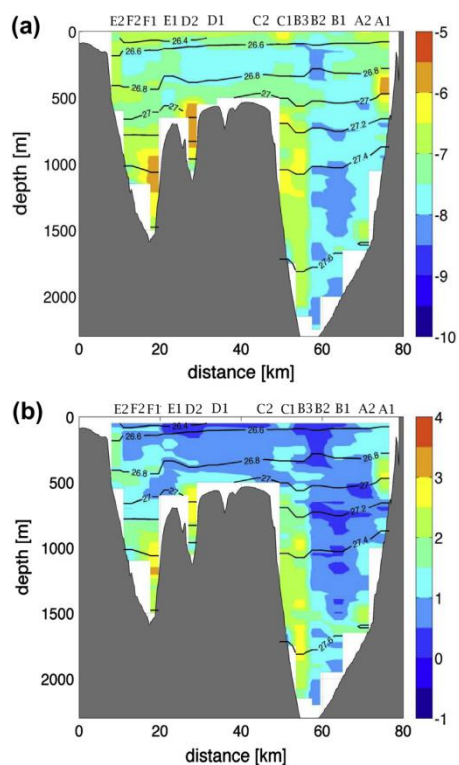


図6: ブッソル海峡を横切る1日平均

(a)エネルギー散逸率対数分布断面図(W/kg), (b)鉛直拡散係数断面図(cm²/s)

また、オホーツク海中層を南下する高濃度の溶存鉄を含むオホーツク海中層水が千島海峡部での大きな潮汐による鉛直混合によって太平洋へ流出する際に上下に混合し、西部

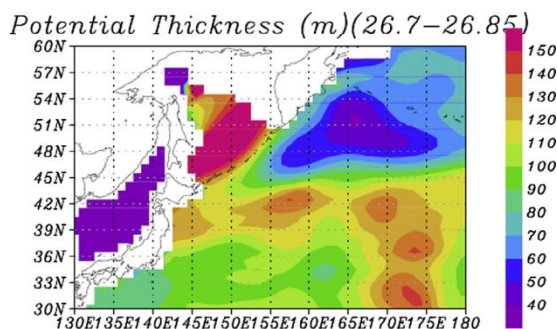


図7: 千島海峡部での鉛直混合の鉛直方向の変化によってオホーツク海の厚い水塊が薄くなって太平洋へ流出していることを示す 26.7-26.85 ポテンシャル密度層潜在層厚分布図。

北太平洋の生物生産を活発化しているとともに、低クロフィル高栄養塩の状態を制御する大きな要因となっていることを示した(図8、Nishioka et al., 2013)

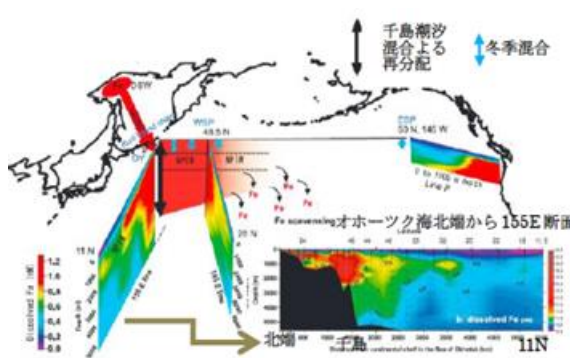


図8: 千島海峡部での強い鉛直混合によって表層から深層に再配分された溶存鉄分布。海峡部での鉄の供給が亜寒帯海域の生物生産構造に大きく影響する。

引用文献

I. Yasuda, S. Osafune and H. Tatebe, 2006: Possible explanation linking 18.6-year period nodal tidal cycle with bi-decadal variations of ocean and climate in the North Pacific. *Geophys. Res. Letters*, 33, L08606, doi:10.1029/2005GL025237.

S. Osafune, and I. Yasuda, 2006: Bidecadal variability in the intermediate waters of the northwestern subarctic Pacific and the Okhotsk Sea in relation to 18.6-year period nodal tidal cycle. *J. Geophys. Res.*, 111, C05007, doi:10.1029/2005JC003277.

H. Hasumi, I. Yasuda and H. Tatebe, M. Kimoto 2008: Pacific bidecadal variability regulated by tidal mixing around the Kuril Islands. *Geophysical*

Research Letters, 35,
L14601, doi:10.1029/2008GL034406, 2008

Yasuda, I. (2009), The 18.6-year period moon-tidal cycle in Pacific Decadal Oscillation reconstructed from tree-rings in western North America, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L05605, doi:10.1029/2008GL036880.

Y. Tanaka, I. Yasuda, H. Hasumi, H. Tatebe, S. Osafune (2012) Effects of 18.6-year modulation of tidal mixing on bidecadal climate variability in the North Pacific. *J. Climate*, 25(21), 7625-7642.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 35 件)

M. Yagi and I. Yasuda (2013) A method for estimating vertical profiles of turbulent dissipation rate using density inversions in the Kuril Straits. *J. Oceanogr.*, 69:203-214, DOI 10.1007/s10872-012-0165-1

Ando K., Kawabe M., Yanagimoto D., and Fujio S. (2013) Pathway and variability of deep circulation around 40° N in the northwest Pacific Ocean. *J. Oceanography*, 69, 159-174.

J. Nishioka, T. Nakatsuka, Y.W. Watanabe, I. Yasuda, K. Kuma, H. Ogawa, N. Ebuchi, A. Scherbinin, Yu. N. Volkov, T. Shiraiwa, M. Wakatsuchi (2014) Intensive mixing along an Island chain controls oceanic biogeochemical cycles. *Global Biogeochem. Cycles*, 27, doi:10.1002/gbc.20088. ○

S. Itoh, Y. Tanaka, S. Osafune, I. Yasuda, M. Yagi, H. Kaneko, S. Konda, J. Nishioka and Y.N. Volkov (2014) Direct breaking of large-amplitude internal waves in the Urup Strait. *Progress in Oceanography*, 126, 109-120.

M. Yagi, I. Yasuda, T. Tanaka, Y. Tanaka, K. Ono, K.I. Ohshima, K. Katsumata (2014) Re-evaluation of vertical structure of turbulent mixing in the Bussol' Strait and its impact on water-masses in the Okhotsk Sea and the North Pacific. *Progress in Oceanography*, 126, 121-134.

T. Tanaka, I. Yasuda, H. Onishi, H. Ueno, and M. Masujima (2015) Observations of current and mixing around the shelf break

in Pribilof Canyon in the Bering Sea, *Journal of Oceanography*, DOI 10.1007/s10872-014-0256-2

Turnewitsch, R., Falahat S., Stehlikova, J., Oguri K., Glud, R. N., Middelboe, M., Kitazato H., Wenzhofer F., Ando K., Fujio S., and Yanagimoto D. (2014)? Recent sediment dynamics in hadal trenches: Evidence for the influence of higher-frequency (tidal, near-inertial) fluid dynamics. *Deep-Sea Research I*, 90, 125-138, 2014.

Nishioka, J., I. Yasuda, H. Liu, T. Nakatsuka, Y.N. Volkov, Biogeochemical and physical processes in the Sea of Okhotsk and the linkage to the Pacific Ocean; Preface, *Progress in Oceanography*, 126, 1-7, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.027 (2014).

Nishioka, J., T. Nakatsuka, K. Ono, Y.N. Volkov, A. Scherbinin, T. Shiraiwa, Quantitative evaluation of iron transport processes in the Sea of Okhotsk, *Progress in Oceanography*, 126, 180-193, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.011 (2014).

Tanaka, T., I. Yasuda, H. Onishi, H. Ueno, and M. Masujima (2015) Observations of current and mixing around the shelf break in Pribilof Canyon in the Bering Sea, *Journal of Oceanography*, 71, 1-17, DOI 10.1007/s10872-014-0256-2

Saito, R., I. Yasuda, K. Komatstu, H. Ishiyama, H. Ueno, H. Onishi, T. Setou and M. Shimizu (2016): Subsurface hydrographic structures and the temporal variations of Aleutian eddies, *Ocean Dynamics*, DOI 10.1007/s10236-016-0936-0

伊藤進一, 有馬正和, 市川雅明, 青木茂, 奥西武, 笥茂穂, 長谷川大介, 和川拓, 安田一郎, 田中雄大, 黒田寛, 清水勇吾 (2016) 水中グライダーによる沿岸海洋観測の可能性, *沿岸海洋研究*, 53(2), 125-133.

[学会発表] (計 56 件)

Yasuda, I., Variability and mixing in the Kuroshio and impact on ecosystem and climate, Keynote presentation in CLIVAR/JAMSTEC Kuroshio International Symposium, Jan12, 2016, JAMSTEC-Yokohama, Japan. 招待講演

[図書] (計 7 件)

西岡純、他 (共同執筆)、丸善出版、低温科学便覧、環オホーツク地域における大陸と海

洋をつなぐ物質循環システム、383p
(167-171)

安田一郎, 月が海や気候に与える影響, 現代化学, 36-37, 2015.

藤尾伸三・柳本大吾・安藤広二郎 (2014)? 深層循環 ―アルゴの下を測る―. 月刊海洋, 45, 50-56.

西岡純, 三寺史夫, 白岩孝行, 関幸, 中村知裕, 的場澄人, 江淵直人, 日本周辺に存在する「陸海結合システム」の理解に向けて, 低温科学 74, 査読無し, 2016, 175-180, doi: 10.14943/lowtemsci.74.175.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://lmr.aori.u-tokyo.ac.jp/feog/yasuda/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

西岡 純 (Nishioka Jun)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号: 90371533

(3) 研究分担者

藤尾伸三 (Fujio Shinzo)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号: 00242173

(4) 研究分担者

柳本大吾 (Yanagimoto Daigo)

東京大学・大気海洋研究所・助教

研究者番号: 40260517

(5) 研究分担者

長澤真樹 (Nagasawa Maki)

東京大学・大気海洋研究所・技術専門員

研究者番号: 60447448