

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：12601  
 研究種目：基盤研究（S）  
 研究期間：2008～2012年度  
 課題番号：20221002  
 研究課題名（和文）潮汐混合の直接観測と潮汐18.6年振動に関わる海洋・気候変動の解明

研究課題名（英文）Direct observations of tidal mixing and studies on ocean/climate variability synchronized with 18.6-year period nodal tidal cycle

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

研究成果の概要（和文）：千島列島やアリューシャン列島海峡域において、中深層に及ぶ通常の数千倍の乱流鉛直混合の存在を、観測によって実証した。この大きな潮汐鉛直混合は、鉄や栄養塩等の物質循環を通じて、親潮など北太平洋亜寒帯海域の海洋生態系に大きな影響を与える。さらにその潮汐混合が18.6年周期で変動することによって生じる海洋変動が、日本東方海面水温とアリューシャン低気圧等の大気海洋相互作用を通じて増幅し、太平洋規模の気候・海洋の約20年変動に影響することが、観測・モデルの両面から明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Intense tide-induced turbulent mixing that reached deep ocean around the Kuril or Aleutian Straits was observationally evidenced. This strong vertical mixing affects marine ecosystem in the subarctic North Pacific through circulations of nutrients such as iron. Furthermore, observations and climate model experiments revealed that oceanic variations originated from the 18.6-year period modulation of the tidal mixing in those regions are amplified by air-sea interactions such as SST east of Japan and the Aleutian Low Pressure system and regulate bi-decadal climate and ocean variations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	36,200,000	10,860,000	47,060,000
2009年度	36,400,000	10,920,000	47,320,000
2010年度	46,400,000	13,920,000	60,320,000
2011年度	27,100,000	8,130,000	35,230,000
2012年度	17,600,000	5,280,000	22,880,000
総計	163,700,000	49,110,000	212,810,000

研究分野：複合新領域

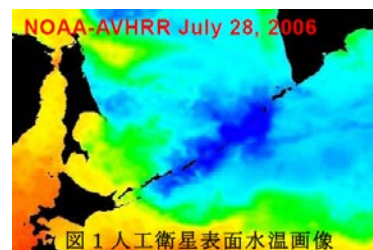
科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析・環境変動

キーワード：潮汐鉛直混合、長期大気海洋変動、海洋物質循環、海洋生態系

### 1. 研究開始当初の背景

海洋中の鉛直混合は熱や物質の鉛直拡散を通じて海洋循環・物質循環・生態系に大きな影響を与える可能性がある。しかし、鉛直混合は、観測の困難さから、殆ど実測されてこなかった。このため、混合強度の分布や変動の実態は明らかではなく、気候・海洋のモデルにも組み込まれていない。一方、北太平洋亜寒帯海域の千島列島・アリューシャン列

島海域では、強い1日周期潮汐流により大きな鉛直混合が発生していることが水塊解析などから予想され（図1）、その下流の親潮水が約



な鉛直混合が発生していることが水塊解析などから予想され（図1）、その下流の親潮水が約

20年周期で変化していることが示された。また日本の気候に大きな影響を与えるアリューシャン低気圧にも約20年周期の変動が存在する。月の公転軌道は18.6年周期で変動し、1日周期潮汐力の振幅は最大20%変動する(図2)。千島列島等での大きな潮汐混合が実証され、その混合が2割変化すれば、水塊や気候の約20年周期変動が説明できる可能性がある。

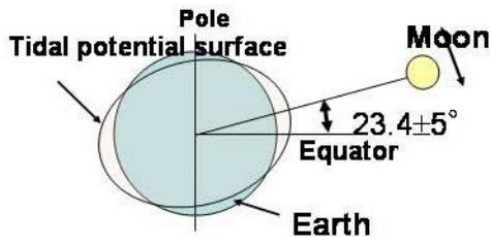


図2 月公転軌道の18.6年周期振動。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、1) これまでほとんど直接観測が行われておらずモデルにも組み込まれていない北太平洋亜寒帯海域千島列島・オホーツク海、アリューシャン・ベーリング海域、及び黒潮域における海洋鉛直混合を直接観測し、大きな潮汐混合を実証し、2) 大きな混合が生じるメカニズムを明らかにし、3) 混合過程が水塊形成・変質・海流・物質循環・生態系に及ぼす影響を評価すること、及び、4) 大きな鉛直混合が潮汐の18.6年振動に連動して変動することに起因する海洋・気候長周期変動について観測データやモデルを用いてその存在と変動過程を明らかにすること、を目的とした。

## 3. 研究の方法

強い潮流下でも潮汐鉛直混合を直接観測できる乱流観測システムを構築する。強い1日周期潮汐混合が予想されている海域を中心に、ロシア船や学術研究船白鳳丸・淡青丸を用いた航海を行い、乱流鉛直混合を観測し、理論やモデルと比較することで乱流発生過程を定式化する。海流・物質・生物観測と併せて、物質循環・生態系への影響を評価する。過去の観測データを解析し、潮汐18.6年振動の海洋・気候における存在を実証するとともに、潮汐混合とその変動を与えた海洋循環・大気海洋結合気候モデルを開発し、気候・海洋に対する潮汐振動の影響を評価する。

## 4. 研究成果

16航海、延340日400キャスト以上に及ぶ乱流計直接観測を北太平洋亜寒帯海域及び黒潮域を中心に展開し(図3)、千島列島・アリューシャン列島海域で通常の10-1000倍(図3カラーバーの黄色から赤)の強い鉛直

混合が実際に生じていることを実証した。

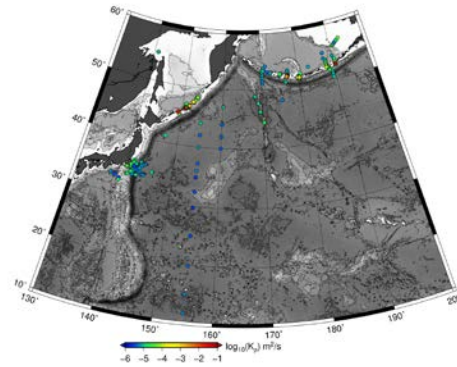


図3 乱流観測点図。色で鉛直平均鉛直拡散係数を表す

千島列島やアリューシャン列島周辺では、1日周期潮汐が地形に捕捉された波動として共鳴・強化され、鉛直方向に流速が変化する構造を持つ内部潮汐流として、水深1000m以上の深層でも強い潮流が発生する(千島ブツル海峡では1m/s以上)。この強い潮流流と平均流や複雑な海底地形との相互作用によって、強い乱流が発生していた。乱流直接観測データを用いて改良された、密度逆転を用いて乱流強度を推定する手法を用いて、ブツル海峡中央部の海山周辺中深層での大きな鉛直混合分布が明らかにされた(図4)。

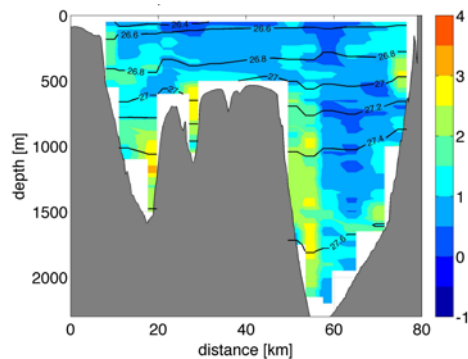


図4 ブツル海峡での1日平均鉛直拡散係数分布(常用対数表示、単位  $\text{cm}^2/\text{s}$ )

この中深層での大きな鉛直混合は、オホーツク中層水が太平洋に流出する際に層厚を薄くする作用を通じて、北太平洋中層水に影響を与えていることが明らかになった。一方、ウルフ海峡など比較的浅い海峡では、潮流が海峡斜面を駆け下る際に発生する大振幅波動の碎破に伴って表面から水深数100mを一樣にするほどの強い乱流が発生していた。

観測から得られた海底から数100m上方に及ぶ乱流混合の鉛直構造と順圧潮汐エネルギー収束量から、乱流強度の3次元構造をモデル化し、その18.6年周期変動を与えて駆動した大気海洋結合気候モデルを開発した。このモデルによって、観測と整合的な海洋・

気候の約 20 年周期変動が得られた (図 5)。

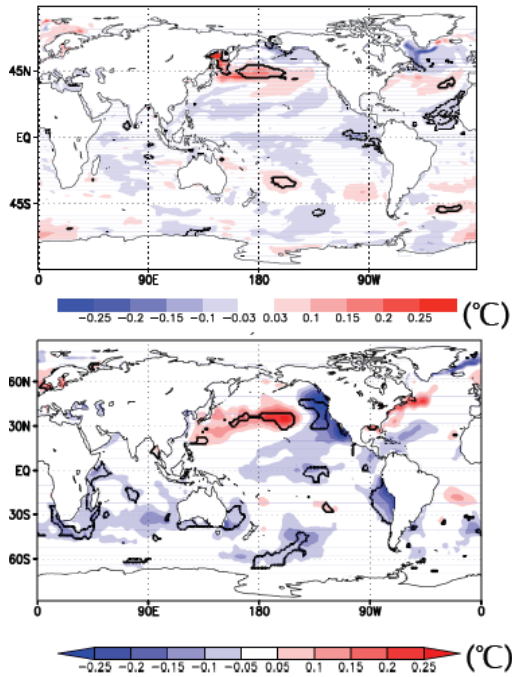


図 5 日周潮汐最大年での冬季海面水温偏差。上：モデル、下：観測。10-30 年周期帯

北太平洋亜寒帯海域では、亜表層に水温極大が存在するため、18.6 年周期で変動する鉛直混合によって、千島列島周辺海域に水温偏差 (潮汐混合が強い期間に高温偏差) が生じ、日本東方水温が変動 (水温上昇)、さらにアリューシャン低気圧を変動させ (弱体化)、その影響が本州東方の海面水温偏差を強調し、18.6 年周期変動を強化する。オホーツク海周辺海域のみで潮汐混合の 18.6 年周期変動を与えた実験でも、全球で混合変動を与えた場合と類似の結果が得られた。

また、木の年輪から再構成された太平洋気候変動指標 (PDO) に、統計的に有意な 18.6 年振動が検出され、モデルと観測で整合的な結果 (日周潮汐極大期に日本東方水温高く、アリューシャン低気圧弱) が得られた (図 6)。

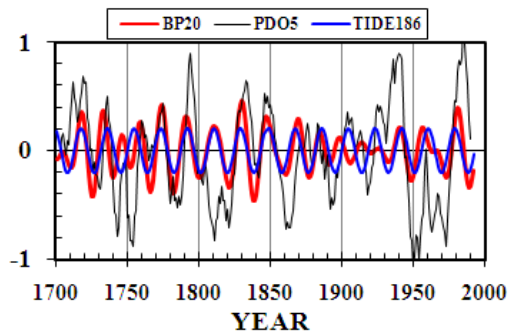


図 6 太平洋 10 年振動 PDO 指数 (黒線) とその 15.5-23.9 年周期帯 (赤)、18.6 年潮汐 (青、正負逆、潮汐が強い期間負)。

これらのことから、千島列島周辺での潮汐

混合が北太平洋での気候・海洋の約 20 年周期変動に影響していることが証明され、予測への道が開かれた。

千島列島周辺での鉛直混合の影響は、鉄循環を通じて海洋生態系にも大きな影響を与える。アムール川から供給された鉄はオホーツク海中層水を通じて、千島列島付近に達するが、そこでの強い潮汐混合によって上下に拡散し、表面から数 1000m の深層にもたらされ、それが太平洋へ流出し、太平洋規模の物質循環に大きな影響を与える (図 7)。混合を受ける前の鉄および栄養塩の鉛直構造によって、表層へもたらされる鉄と栄養塩の比率が決まり、鉄が枯渇するまで生物生産が持続し、枯渇すると他の栄養塩が余る。

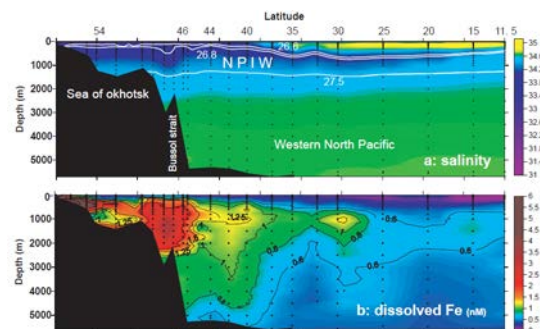


図 7 オホーツク海から東経 155 度経線にそった (上) 塩分・(下) 溶存鉄分布。

ベーリング海東部陸棚縁辺に沿って夏季でも高い生物生産が持続するグリーンベルトの維持に、潮汐による鉛直混合による鉄・栄養塩鉛直輸送が関与していることが明らかとなった。陸棚縁辺から外部陸棚域底層では、励起される 1 日周期地形性捕捉内部潮汐波動に伴う流速シアによって強い乱流が発生し、陸棚底層から鉄が巻き上げられる。等密度面に沿って亜表層に達した鉄を高濃度で含む水塊は、日周期地形性波動の倍振動数内部波動や陸棚縁辺で発生した半日周期内部潮汐波動の伝播経路上で発生する乱流によって、表層生産層に供給され、生物生産を維持する (図 8)。

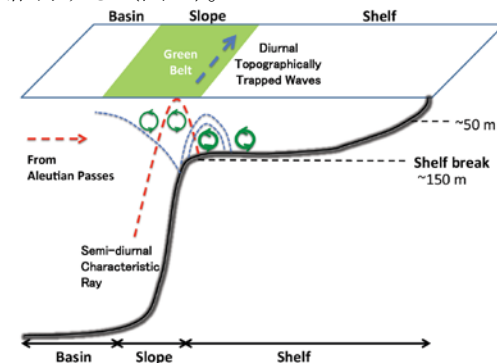


図 8 ベーリング海東部陸棚縁辺の持続的生物生産を維持する潮汐混合過程模式図。



黒潮流軸とその周辺海域表層から亜表層で強い乱流が平均的に存在することが明らかとなった。特に流軸から北側黒潮前線域の0-300m深において強化された鉛直混合は、硝酸塩を中層から表層へ持続的に輸送することに寄与しており、表層への硝酸塩輸送は、これまで報告された新生産速度と同程度であった(図9)。

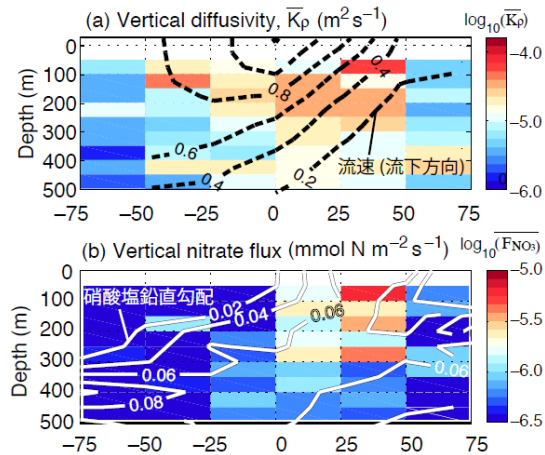


図9 海面流速最大位置を基準にして黒潮を横断する方向に区切って平均した(上)鉛直拡散係数、(下)鉛直拡散による硝酸鉛直フラックス分布。横軸単位 km、0が流軸、正が北。

黒潮流軸から北側前線域は、食糧供給を左右するマイワシ資源変動に関わる海域であり、太平洋規模の風系変動や冬季の冷却変動が関与して生じる冬季混合層深度や水温がマイワシ資源変動を引き起こすことが明らかにされている。本研究から、冬季に気候変動によって作られた変動が、強い鉛直混合による硝酸塩鉛直輸送を通じて、春季でも持続して表層へ影響を与え続けることが、マイワシの大きな変動を引き起こすことにつながっていることが示唆された。

乱流計測手法として、直接観測結果との比較によって密度逆転を用いた定量化手法を改良した他、乱流計を搭載したグライダーの導入、CTDに取り付けた乱流計による観測手法開発に取り組んだ。乱流計グライダーは現在欠点を改良中、CTDに取り付けた乱流計観測は、高速水温計による乱流強度推定の実用化を目指してさらに検討を進めている。

以上のように、計画していた以上に大きな成果が得られたが、今後明らかにすべき課題も明らかになってきた。混合観測としては、数値モデル研究と観測をより密接に関連させ、強い混合発生過程を明らかにしてモデルに組み込むプロセス観測が必要である。微小スケールの乱流を再現できる数値計算は現在でも難しいため、拠り所となる観測データをより広範囲、高密度で取得できる観測機

器・手法の開発が望まれる。海底付近の乱流計測や等密度面を横切る輸送の見積もり手法を開発し、海峡域での潮汐混合の中深層循環への影響を見積もることも重要である。大気海洋結合18.6年周期気候モデル実験では、第ゼロ近似として観測と整合的な結果が得られたが、熱帯・赤道域の変動が観測と異なっているなど、違いもある。今後、太平洋亜熱帯海域、東シナ海、伊豆諸島海域、南シナ海、インドネシア多島海、オーストラリア北部海域、南極周辺海域などの縁辺海を含む混合とその変動を明らかにする必要がある。これらの海域はいずれも海岸・海底地形が複雑で強い海流・潮流が存在する海域であり、それらを局所的に分解できる大気海洋結合モデルが今後必要である。

### 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123件)

- 1) S. Osafune and I. Yasuda (2013) Remote impacts of the 18.6-year period modulation of localized tidal mixing in the North Pacific. *J. Geophys. Res.* In press
- 2) J. Nishioka, T. Nakatsuka, Y.W. Watanabe, I. Yasuda, K. Kuma, H. Ogawa, N. Ebuchi, A. Scherbinin, Yu. N. Volkov, T. Shiraiwa, M. Wakatsuchi (2013) Intensive mixing along an Island chain controls oceanic biogeochemical cycles. *Global Biogeochemical Cycle*, in press
- 3) H. Nishikawa, I. Yasuda, K. Komatsu, H. Sasaki, Y. Sasai, T. Setou and M. Shimizu (2013) Winter mixed layer depth and spring bloom along the Kuroshio front: implications for feeding environment and recruitment of Japanese sardine, *Marine Ecology Progress Series*, in press
- 4) Watanabe Y. W., J. Nishioka and T. Nakatsuka (2013): Decadal time evolution of ocean uptake of anthropogenic carbon in the Okhotsk Sea. *Geophysical Research Letter*, 40, 1-5, doi:10.1002/grl.50113
- 5) 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
- 6) Tanaka, Y., I. Yasuda, H. Hasumi, H. Tatebe, and S. Osafune, 2012: Effects of the 18.6-year modulation of tidal mixing on the North Pacific bidecadal climate variability in a coupled climate model, *Journal of Climate*, 25, 7625-7642. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00051.1
- 7) Kaneko, H., I. Yasuda, K. Komatsu, and S. Itoh (2012) Observations of the structure of turbulent mixing across the Kuroshio, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL.

- 39, L15602, doi:10.1029/2012GL052419, 2012
- 8) M. Yagi and I. Yasuda, (2012) Deep intense vertical mixing in the Bussol' Strait. *Geophys. Res. Letters*, 39, L01602, doi:10.1029/2011GL050349, 2012
- 9) Yasuda, I. (2012) Studies on the formation, transport and modification of North Pacific Intermediate Water. *Oceanography in Japan*, 21(2), 83–99, 2012.
- 10) S. Osafune and I. Yasuda (2012) Numerical study on the impact of the 18.6-year period nodal tidal cycle on water-masses in the subarctic North Pacific. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-OCEANS*, 117, C05009 DOI: 10.1029/2011JC007734
- 11) T. Tanaka, I. Yasuda, K. Kuma and J. Nishioka (2012): Turbulent iron flux sustains Green Belt along the shelf break in the southeastern Bering Sea. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 39, L08603 DOI: 10.1029/2012GL051164
- 12) H. Nishikawa and I. Yasuda (2011) Long-term variability of winter mixed layer depth and temperature along the Kuroshio jet in a high-resolution ocean general circulation model. *J. Oceanogr.* 67(4), 503-518. DOI: 10.1007/s10872-011-0053-0
- 13) S. Itoh, I. Yasuda, M. Yagi, H. Kaneko, S. Osafune, T. Nakatsuka, J. Nishioka, and Y. N. Volkov (2011): Strong vertical mixing in the Urup Strait, *Geophys. Res. Letters*, VOL. 38, L16607, doi:10.1029/2011GL048507, 2011
- 14) H. NISHIKAWA, I. YASUDA, and S. ITOH (2011) Impact of winter-to-spring environmental variability along the Kuroshio jet on the recruitment of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*). *Fish. Oceanogr.*, 20(6), 570-582. DOI: 10.1111/j.1365-2419.2011.00603.x
- 15) J. Nishioka, T. Ono, H. Saito, K. Sakaoka, and T. Yoshimura, Oceanic iron supply mechanisms which support the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic Pacific, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 116, C02021, doi:10.1029/2010JC006321, 2011
- 16) Watanabe, Y. W., Chiba, T, Tanaka, T. (2011): Recent change in the oceanic uptake rate of anthropogenic carbon in the North Pacific subpolar region determined by using a <sup>13</sup>C time series. *Accepted in Journal of Geophysical Research*, 116, C02006, doi:10.1029/2010JC006199.
- 17) H. Tatebe, I. Yasuda, H. Saito and Y. Shimizu, 2010: Horizontal transport of the calanoid copepod *Neocalanus* in the North Pacific: The influences of the current system and the life history. *Deep-Sea Res. I*, 57, 409-419. DOI: 10.1016/j.dsr.2009.11.009
- 18) K. Katsumata and I. Yasuda, 2010, Estimate of non-tidal exchange transport between the Sea of Okhotsk and the North Pacific. *J. Oceanogr.*, 66, 489-504.
- 19) S. Itoh, I. Yasuda, T. Nakatsuka, J. Nishioka, and Y. N. Volkov 2010 : Fine- and microstructure observations in the Urup Strait, Kuril Islands, during August of 2006. *J. Geophys. Res. Oceans*, 115, C08004, doi:10.1029/2009JC005629
- 20) S. Osafune, and I. Yasuda, 2010: Bidecadal variability in the Bering Sea and the relation with 18.6-year period nodal tidal cycle. *J. Geophys. Res.*, 115, DOI: 10.1029/2008JC005110.
- 21) Nakamura T., Y. Isoda, H. Mitsudera, S. Takagi, M. Nagasawa. Breaking of unsteady lee waves generated by diurnal tides. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L04602, doi:10.1029/2009GL041456, 2010.
- 22) Tanaka, Y., T. Hibiya, Y. Niwa, and N. Iwamae (2010), Numerical study of K<sub>1</sub> internal tides in the Kuril straits, *J. Geophys. Res.*, 115, C09016, doi:10.1029/2009JC005903.
- 23) Tanaka, Y., T. Hibiya, and Y. Niwa (2010), Assessment of the Effects of Tidal Mixing in the Kuril Straits on the Formation of the North Pacific Intermediate Water, *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 2569-2574. 巻: 40 号: 12 ページ: 2569-2574 DOI: 10.1175/2010JPO4506.1
- 24) K. Tadokoro, T. Ono, I. Yasuda, S. Osafune, A. Shiimoto and H. Sugisaki, 2009: Possible mechanisms of decadal scale variations in PO4 concentration in the Oyashio and Kuroshio-Oyashio Transition waters, western North Pacific. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* Volume: 36 DOI: 10.1029/2009GL037327
- 25) 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.
- 26) Watanabe, Y. W., Nishioka, J., Shigemitsu, M., Mimura, A. and Nakatsuka, T. "Influence of riverine alkalinity on carbon species in the Okhotsk Sea" *Geophys. Res. Lett.* 36(15), L15604, doi:10.1029/2009GL038672
- 27) Watanabe, Y. W., J. Nishioka, M. Shigemitsu, A. Mimura and T. Nakatsuka (2009): Increases of alkalinity and pH in the Okhotsk Sea during the 1990s and 2000s, *Geophysical Research Letter*, 36, 15, doi:10.1029/2009GL038520.
- 28) 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

[学会発表] (計 302 件)

1) Yasuda, I. (2012) Interactions between fisheries production, planktonic ecosystems, physical oceanographic processes and climate change. Plenary Talk at Second International Symposium on "Effects of climate change on the world's oceans" in Yeosu Korea. May 18, 2012. (国際学会招待講演)

2) Takeshi NAKATSUKA, Masaki SANO, Qiang LI, Chenxi XU, Kota TAKANO, Kimitaka KAWAMURA, Akira KAGAWA, Koh YASUE and Takumi MITSUTANI, "Development of tree-ring cellulose oxygen isotope chronologies in Asia and Japan : theoretical and technical backgrounds and their applications", 2nd Conference of Asian Dendrochronological Association, Xi'an, China, 20 Aug., 2011. (国際学会招待講演)

3) Jun Nishioka, NIOZ colocium Nov. 18, 2011, The annual cycle of surface iron and the source or iron supporting the spring diatom bloom in the Oyashio region, Western subarctic Pacific (国際学会招待講演)

4) Yasuda, I. (2009) 18.6-year period moon-tidal cycle and North Pacific ocean-climate variability. J09-IAPSO/IAMAS MOCA09 2009/7/22 Montreal (国際学会招待講演)

[図書] (計 60 件)

1) 西岡 純 (2012) 生物地球化学過程に果たす環オホーツク圏の海洋循環・物質循環の役割—総説—, 月刊海洋, 504, 44, 10, 552-560. 合本特集号

2) 安田一郎 (2011) 総論: 潮汐混合とオホーツク海・ベーリング海の物理・化学・生物過程, 月刊海洋, 43(11), 629-640. 合本特集号

3) 安田一郎 (2008) 総論: 潮汐混合とオホーツク海・ベーリング海の物理・化学・生物過程. 月刊海洋号外 50, 5-15. 合本特集号

[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/186.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

羽角 博康 (HASUMI HIROYASU)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号: 40311641

小松 幸生 (KOMATSU KOSEI)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号: 30371834

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: 90371637

渡辺 豊 (WATANABE YUTAKA)

北海道大学・地球環境科学院・准教授

研究者番号: 90333640

中塚 武 (TAKESHI NAKATSUKA)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号: 60242880

(H20 連携研究者、H21-24 研究分担者)

### (3) 連携研究者

伊藤 幸彦 (ITO SACHIHIKO)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号: 80345058

建部 洋晶 (TATEBE HIROAKI)

海洋研究開発機構・地球環境変動領域・研究員

研究者番号: 40466876

勝又 勝郎 (KATSUMATA KATSUROU)

海洋研究開発機構・地球環境観測センター・主任研究員

研究者番号: 80450774

中村 知裕 (NAKAMURA TOMOHIRO)

北海道大学・低温科学研究所・講師

研究者番号: 60400008

広江 豊 (HIROE YUTAKA)

水産総合研究センター・中央水産研究所・主任研究員

研究者番号: 20371833

長船 哲史 (OSAFUNE SATOSHI)

東京大学・大気海洋研究所・機関研究員

研究者番号: 50638723

(H20-23)

田中 祐希 (TANAKA YUKI)

東京大学・大気海洋研究所・特任研究員

研究者番号: 80632380

(H22-23)

池谷 透 (IKEYA TOHRU)

東京大学・大気海洋研究所・特任研究員

研究者番号: 70361590

西川 悠 (NISHIKAWA HARUKA)

東京大学・大気海洋研究所・特任研究員

研究者番号: 10625396

(H22-23)

友定 彰 (TOMOSADA AKIRA)

東京大学・大気海洋研究所・特任研究員

研究者番号: 18382093

(H24)