

# 海洋の渦・前線とそれらが生み出す大気海洋現象の解明

課題責任者

野中 正見 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

著者

野中 正見 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

平田 英隆 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

佐々木 英治 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ

本課題では、黒潮等の西岸境界流に伴う海面水温前線や中規模渦などの海洋局所構造の変動が、大規模な海洋循環や大気循環の形成・変動に果たす役割、海洋生態系に及ぼす影響等を明らかにすることを目的に、高解像度大気海洋シミュレーション研究を推進している。ここでは平成 29 年度の成果から、1) 黒潮・黒潮統流が爆弾低気圧の発達に及ぼすメカニズム、2) 黒潮統流の経年変動における自励的な（風の変動に関係なく海洋内部で勝手に生じる）変動、3) 海洋の潮汐による鉛直混合が海洋循環に与える影響について紹介する。1) では、黒潮・黒潮統流からの水蒸気・顕熱供給が低気圧発達や対流圏下層の水蒸気量の増加を介して、大雪の発生などに寄与する可能性が示された。2) では、海洋渦を解像するアンサンブル海洋シミュレーション結果を比較することで、海洋の自励の変動が十年規模で変調することを示した。3) では、潮汐に伴う混合を海洋モデルで On/Off した実験から、潮汐混合が海洋大循環に重要なインドネシア通過流の流量を増加させることを示した。

キーワード：海洋渦, 海洋前線, 爆弾低気圧, 潮汐混合, 高解像度シミュレーション

## 1. 本課題の概要

本課題では、地球シミュレータを用いた高解像度大気海洋シミュレーション研究により、①黒潮等の西岸境界流に伴う海面水温前線や中規模渦などの海洋局所構造の変動が、大規模な大気循環の形成・変動に果たす役割、②より高解像度の海洋シミュレーションから、海洋の中規模渦よりも細かい数 km 程度の構造が、より大規模な海洋循環の形成や生態系の変動に与える影響、③高解像度領域モデルにより台風や爆弾低気圧と海洋との相互作用によって生じる影響、等々を明らかにすることを目的とする。これにより、従来の季節変動予測や地球温暖化予測ではほとんど考慮されてこなかった、海洋局所構造の変動とそれらが引き起こす大気海洋現象に対する知見を深め、地球気候の理解と予測技術の発展に貢献することを目指している。

平成 29 年度は、黒潮・黒潮統流と爆弾低気圧の関係に注目した実験・解析に加え、黒潮統流の変動メカニズムに注目した解析などを推進し、海洋前線と低気圧の相互作用を介した気候変動のメカニズムの理解を深化させた。以下にその成果の概要を報告する。

## 2. 平成 29 年度の成果

### 2.1 黒潮・黒潮統流が爆弾低気圧に及ぼす影響

北西太平洋域では、急発達する温帯低気圧（爆弾低気圧）が頻繁に発生することが良く知られており（例えば [4]）、日本においてもしばしば大きな気象災害をもたらす。その低気圧の急発達の一因として、黒潮・黒潮統流の影響が考えられる。黒潮・黒潮統流は、熱帯域で日射により暖められた海水を中緯度域に輸送する暖流であり、その

温かい海水とその北側の冷たい海水との間に強い水温の勾配を作り出す。これが地表付近の高い傾圧性（気温の南北勾配）を維持し、温帯低気圧の発達に好適な場を与える（例えば [3]）。また、低気圧が黒潮・黒潮統流域で急発達する際には、暖流域から大気へ多量の潜熱・顕熱供給が生じる。この潜熱・顕熱供給には、後屈前線上の潜熱加熱強化を通じて低気圧発達を促進する働きがあることが指摘されている [1, 2]。ただし、Hirata et al. [1, 2] は 2013 年 1 月上旬に発生した低気圧のケーススタディであり、他の事例についても更なる検証が必要である。そこで、本研究は、特に、2017 年 1 月上旬に三宅島で大雨をもたらした事例および 2017 年 3 月下旬の栃木県那須町の大雪と関連した事例に重点を置いて解析を進めた。

2017 年 1 月 8 日に日本列島南岸を爆弾低気圧が通過した際に、三宅島では日降水量の 1 月極値 (139.5 mm) を更新した。観測データ等の解析によって、温暖前線北側に形成された前線帯上で発達した対流性の降水域がこの大雨の発生に関与したことが明らかになった。そこで、雲解像度モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CRSS; [5]) を用いて、中緯度海洋がこの前線帯の形成や大雨発生に及ぼす影響について調べた。

まず、低気圧および大雨の再現実験 (CNTL 実験) を実施し、大雨の発生を良く再現することを確認した。次に、中緯度海洋が大雨発生へ及ぼす影響を評価するために、黒潮/黒潮統流域周辺からの潜熱・顕熱フラックスを除去する感度実験を行った。フラックス除去実験では、CNTL 実験と比べて、三宅島周辺の降水が顕著に弱化した。CNTL 実験とフラックス除去実験の比較は、暖流域からの潜熱・顕熱フラックスが降水域周辺の地表付近の静的安

定度の低下や水蒸気量の増加をもたらすことを明らかにした。このような暖流の効果が、大雨の発生を導いたと考えられる。

更に、大雨と関連した前線帯の初期形成過程に対する黒潮の役割について調べるために、前線帯形成前の時刻から、現実的な海面水温分布と黒潮周辺を平滑化した海面水温分布をそれぞれ与えた実験を実施した。前者を Real SST (RS) 実験、後者を Smoothed SST (SS) 実験と呼ぶ。RS 実験では、注目している前線帯の初期形成が再現された。一方で、SS 実験では、前線帯が現れなかった。海面からの顕熱フラックスの分布に注目すると、RS 実験では黒潮を挟む顕熱フラックスのコントラストが明瞭であったが、SS 実験ではそのような顕熱フラックスの分布は生じなかった。これらの結果は、黒潮に伴う海面水温分布とそれに伴って生じる顕熱フラックスの南北勾配が、三宅島で大雨をもたらした前線帯の形成へ大きく寄与したことを示唆している。

更なる事例として、2017年3月26日から27日にかけて、関東沖で発達した温帯低気圧に注目した。この低気圧に伴って、栃木県那須町では大雪となり、なだれ事故が発生した。この低気圧の発達や那須の大雪発生に対する中緯度海洋の効果を評価するために、CReSSを利用して3月26日の黒潮および黒潮続流周辺の海面水温偏差や暖流域からの潜熱・顕熱フラックスに対する感度実験を実施した。

海面水温感度実験の結果は、暖流域の海面水温偏差に対する低気圧応答は不明瞭であることを示した。一方で、フラックス感度実験の結果は、暖流域周辺からの潜熱・顕熱供給が低気圧発達へ大きく寄与したことを示した。更に、フラックスを除いた場合では、先行研究によって那須の大雪との関連が指摘されている、黒潮続流域から日本列島へ伸びる対流圏下層における西向きの水蒸

気フラックスの大きな領域がシミュレートされなかった(図1)。この水平水蒸気フラックスの弱化には、低気圧に伴う低気圧性循環の弱まりと対流圏下層の水蒸気量の減少が寄与していることが確認された。この結果は、暖流域からの潜熱・顕熱供給が低気圧発達や水蒸気量の増加を介して水平水蒸気フラックスの強化し、那須の大雪の発生へ影響したことを示唆している。

## 2.2 黒潮続流の経年変動における自励的な変動

2.1で示されたように、黒潮・黒潮続流といった強い暖流は、海面水温の分布を通じて温帯低気圧の発達にも強い影響を及ぼす。このため、これらの海流やそれに伴う海面水温の年々から更に長期の変動のメカニズムを理解することは、日本周辺の気候の変動を理解する上でも重要である。これらの経年変動には、北太平洋の大気場の変動が海洋 Rossby 波伝播を通じて強い影響を持つことが知られているが(例えば[6])、一方で、強い海流を伴うこれらの変動には非線形性が強く、大気場外力に経年変動が含まれていない場合にも、経年変動が生じる。このことは、理想化した海洋モデルでは古くから知られているが、現実即した渦解像海洋大循環モデルでも確認されている(例えば[7])。更に、Nonaka et al. [8]は、条件を僅かに変えた3メンバーアンサンブル実験から、経年変動する外力を与えた場合においても自励的な変動が生じることを示した。本研究では、この自励的に生じる変動を定量的に評価すると共に、その大きさの長期変動をも調査するため、海洋大循環モデル OFES2 (Ocean general circulation model for the Earth Simulator version 2) を、海洋渦を表現可能な水平0.1度の解像度で、同一の大気再解析データ[9]で駆動した50年間の積分を、僅かに初期値を変えた10メンバーアンサンブルで実施した。図2はこの積分で再現された黒潮続流上流域の流軸上の流速の経

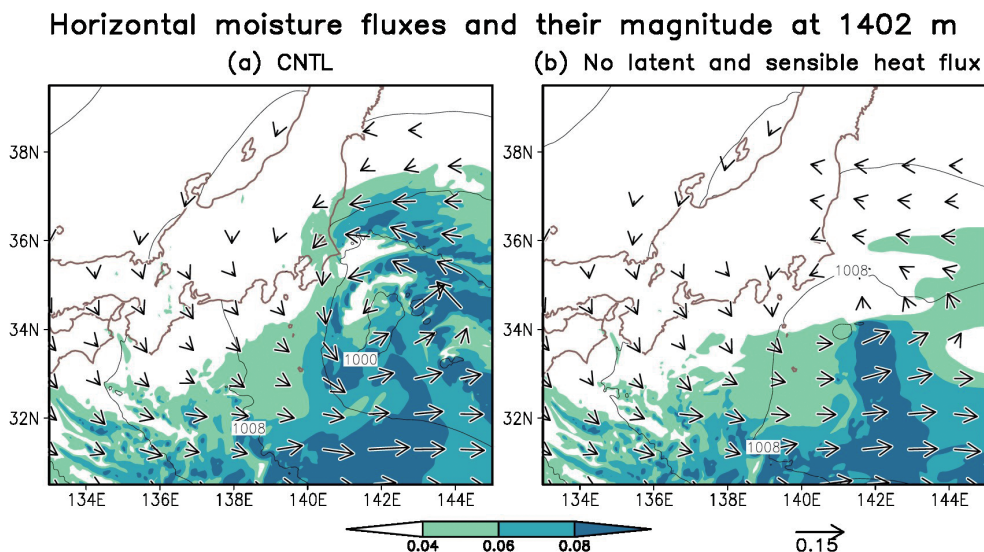


図1 (左図) CNTL 実験、(右図) 暖流域周辺の潜熱・顕熱フラックスを除いた実験の2017年3月26日22UTCにおけるシミュレーション結果。ベクトルは高度1402 mにおける水平水蒸気フラックス ( $\text{kg kg}^{-1} \text{m s}^{-1}$ )、陰影はその大きさ ( $\text{kg kg}^{-1} \text{m s}^{-1}$ )、等値線は地表気圧 (hPa) を示す。CNTL 実験で再現されている続流域から関東地方へ伸びる水蒸気フラックスの大きな帯状の領域が感度実験では現れない。



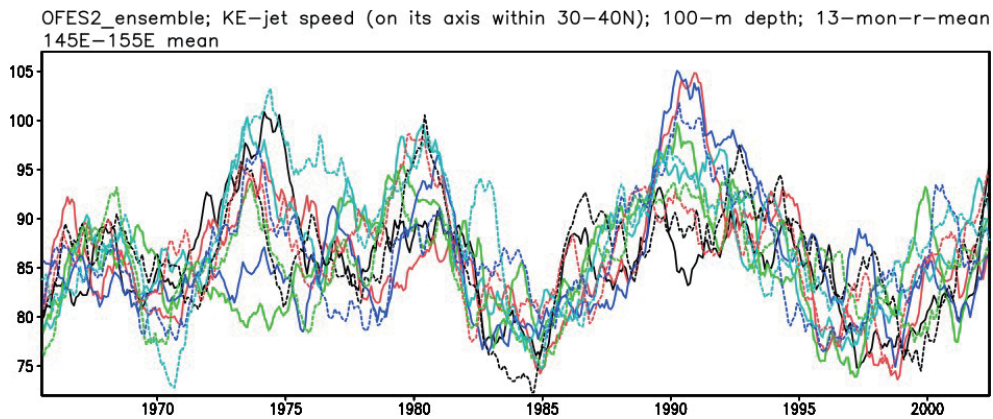


図2 渦解像海洋大循環モデル OFES2 の経年変動積分で再現された黒潮統流の流軸上の流速の経年変動（単位は  $\text{cm s}^{-1}$ ）。東経 145-155 度で東西に平均。経年変動に注目するために 13 ヶ月の移動平均を施している。それぞれの線が僅かに初期値を変えた各アンサンブルメンバーの変動を示す。

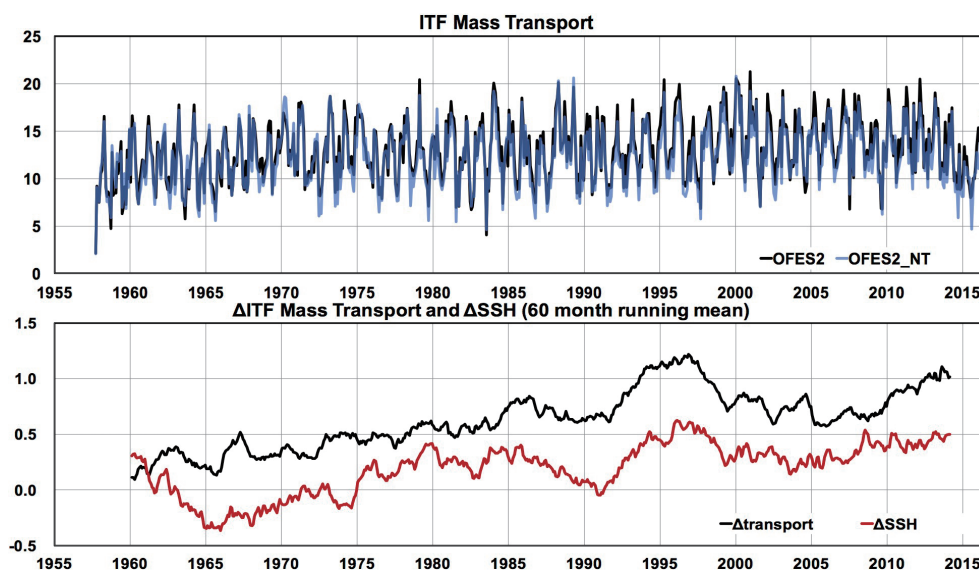


図3 (上図) 潮汐混合スキーム ON (黒線) と OFF (青) のインドネシア通過流の月平均流量 ( $\text{Sv}$ )。 (下図) 潮汐混合スキーム ON から OFF の場合を引いた流量差 ( $\text{Sv}$ , 黒線) と西太平洋とインド洋の海面高度差の差 ( $\text{cm}$ , 赤線)。

年変動である。海洋渦の影響を除き、経年変動に注目するために 13 ヶ月の移動平均を施している。全てのアンサンブルメンバーは同一の大気変動で駆動されているので、メンバー間の相違が海洋の自励的な変動を示す。黒潮統流では十年規模の変動が卓越しているが、メンバー間の相違も十年規模で大きく変動し、流速が小さい時期に自励的な変動が小さい傾向が見られる。このような自励変動の長期変動は初めて示されたものであり、メカニズム解明を今後進める予定である。

### 2.3 潮汐混合によるインドネシア通過流の流量増加

海洋では、潮汐による潮流が海底地形の起伏に衝突することで鉛直混合が大きくなり、全球の熱塩循環、深層の水塊分布などに多大な影響があることが知られている。さらに、クリル海峡やインドネシア多島海域でも、潮汐による鉛直混合で下流域の水質が大きく変質する。そこで、St. Laurent et al.[10] が開発した潮汐混合スキームを水平解像度 0.1 度の準全球海洋シミュレーションに導入し

て、潮汐混合による海洋循環場への影響を調べた。

先行研究と同様にインドネシア多島海域およびその下流域の水質は、潮汐混合の導入によって大幅に改善した。また、インドネシア多島海を通過し、温かい海水を太平洋からインド洋に輸送するインドネシア通過流の流量は、潮汐混合の導入で増加した。そのメカニズムは、熱帯太平洋の数多い諸島付近での強い潮汐混合による鉛直密度分布変化によって海面高度が上昇、インド洋との圧力差が大きくなることでインドネシア通過流の流量が増加する。本研究は、潮汐混合が表層海洋の大規模循環にも影響を及ぼしうることを示した。

### 謝辞

本研究課題の一部は、IPRC 及び IFREMER との国際共同研究として行っております。また、JSPS 科研費（基盤 A:16H01846、挑戦的萌芽:16K12591、基盤 C:15K05284、若手 B:26800249、特別研究員奨励費:17J04041）の助成を受けております。

文献

- [1] H. Hirata, R. Kawamura, M. Kato, and T. Shinoda, "Influential role of moisture supply from the Kuroshio/Kuroshio Extension in the rapid development of an extratropical cyclone," *Monthly Weather Review*, 143, 4126–4144, 2015.
- [2] H. Hirata, R. Kawamura, M. Kato, and T. Shinoda, "A positive feedback process related to the rapid development of an extratropical cyclone over the Kuroshio/Kuroshio Extension," *Monthly Weather Review*, 146, 417-433, 2018.
- [3] A. Kuwano-Yoshida, and S. Minobe, "Storm-Track Response to SST Fronts in the Northwestern Pacific Region in an AGCM," *Journal of Climate*, 30, 1081-1102, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0331.1, 2017.
- [4] F. Sanders, and J. R. Gyakum, "Synoptic-dynamic climatology of the "bomb"," *Monthly Weather Review*, 108, 1589–1606, 1980.
- [5] K. Tsuboki, "High-resolution simulations of high-impact weather systems using the cloud-resolving model on the Earth Simulator," *High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean*, K. Hamilton and W. Ohfuchi, Eds., Springer, 141–156, 2008.
- [6] B. Qiu, and S. Chen, "Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre and mesoscale eddies on decadal timescales," *Journal of Physical Oceanography*, 35, 2090–2103, 2005.
- [7] B. Taguchi, S.-P. Xie, N. Schneider, M. Nonaka, H. Sasaki, and Y. Sasai, "Decadal variability of the Kuroshio Extension: Observations and an eddy-resolving model hindcast," *Journal of Climate*, 20, 2357-2377, 2007.
- [8] M. Nonaka, Y. Sasai, H. Sasaki, B. Taguchi, and H. Nakamura, "How potentially predictable are midlatitude ocean currents?," *Scientific Reports*, 6, 20153. doi:10.1038/srep20153, 2016.
- [9] Tsujino et al., "JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do)," *Ocean Modelling*, in press, doi:10.1016/j.ocemod. 2018.07.002, 2018.
- [10] L. St. Laurent, and C. Garrett, "The role of internal tides in mixing the deep ocean," *Journal of Physical Oceanography*, 32, 2882-2899, 2002.

# Understanding Roles of Oceanic Fine Structures in Climate and Its Variability

Project Representative

Masami Nonaka Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Masami Nonaka Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Hidetaka Hirata Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Hideharu Sasaki Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In this project, we have conducted numerical investigations of impacts of oceanic fronts and eddies associated with strong western boundary currents on oceanic and/or atmospheric large-scale circulation and oceanic ecosystem. In this report, we briefly introduce 1) mechanisms of influence of the Kuroshio/Kuroshio Extension on the rapid development of an extratropical cyclone, 2) interannual intrinsic variability in the Kuroshio Extension jet, and 3) an increase of the Indonesian Throughflow by internal tidal mixing, from the results in FY2017.

**Keywords:** oceanic eddies, oceanic fronts, bomb cyclones, air-sea interactions, tidal mixing, high-resolution ocean and atmosphere simulations

## 1. Introduction

In this project, we investigate numerically impacts of oceanic fronts and eddies associated with strong western boundary currents on oceanic and/or atmospheric large-scale circulation and oceanic ecosystem. With the investigations, we will improve our understanding of roles of oceanic fine structures in climate and its variability and predictability. In this report, we briefly introduce several achievements from those in FY2017.

## 2. Results in FY2017

### 2.1. Impacts of the Kuroshio/Kuroshio Extension on rapidly developing extratropical cyclones

The objective of this study is to clarify influences of latent and sensible heat fluxes from the Kuroshio/Kuroshio Extension on the explosive intensification of extratropical cyclones and associated heavy rainfall/snowfall. Specifically, we studied an extratropical cyclone rapidly developing to the south of

the Pacific coast of Japan from 26th to 27th March 2017. This cyclone brought the heavy snowfall in Tochigi Prefecture, Japan. This study examined impacts of the midlatitude ocean on the cyclone growth and the attendant heavy snowfall using the Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS; [1]) with 2 km horizontal resolutions. To address these issues, in addition to a control (CNTL) run, we conducted sensitivity experiments with respect to SST anomalies around the Kuroshio/Kuroshio Extension on 26th March 2017 and also an experiment without the latent and sensible heat fluxes around the warm currents (no latent/sensible heat fluxes: NLSH run). Results derived from the SST sensitivity experiments showed that the response of the cyclone to SST anomalies around the Kuroshio/Kuroshio Extension is obscure. In contrast, results obtained from the NLSH run indicated that the latent and sensible heat release from the warm currents enhances the cyclone development (Fig. 1), consistent with the previous studies [2, 3]. Another

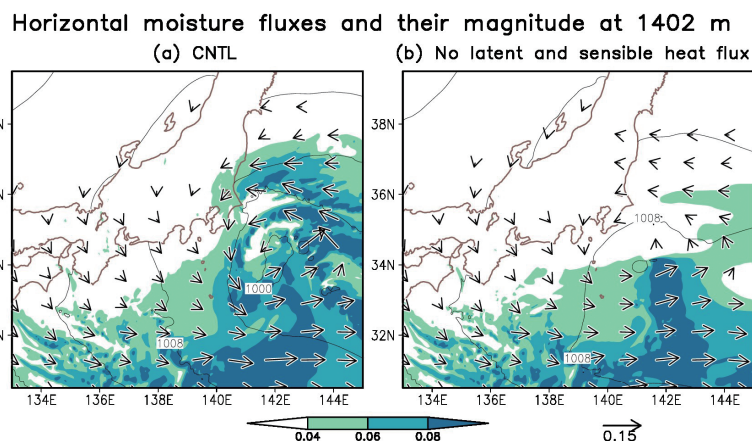


Fig. 1 Horizontal distributions of surface pressure (contours; hPa), horizontal moisture fluxes at a height of 1402 m (vectors;  $\text{kg kg}^{-1} \text{m s}^{-1}$ ), and their magnitude (shading;  $\text{kg kg}^{-1} \text{m s}^{-1}$ ) in (a) the CNTL run and (b) the NLSH run at 22:00 UTC 26 March 2017.

remarkable difference between the NLSH and CNTL runs is found in horizontal moisture fluxes extended from the Kuroshio Extension to mainland Japan in the lower troposphere, which is related to the occurrence of the heavy snowfall according to previous studies. As seen in Fig. 1, the westward moisture fluxes are very weak in the NLSH run, as compared with the CNTL run. The reduction in the moisture fluxes in the NLSH run results from the weakening of the cyclone's circulation and the decrease in the lower tropospheric water vapor content. These results imply that the latent and sensible heat supply from the warm currents affects the occurrence of the heavy snowfall via the enhancement of the horizontal moisture fluxes.

### 2.2 Interannual intrinsic variability in the Kuroshio Extension jet

Given the possible importance of variability in the western boundary currents and associated eddy activities on atmospheric cyclone development as discussed in section 2-1 as well as oceanic physical states and ecosystem, it is important to understand dynamics of interannual to decadal variability in the western boundary currents like the Kuroshio and Kuroshio Extension. In the western boundary regions, it has been known

that oceanic internal dynamics can induce interannual intrinsic variability under atmospheric forcing without interannual variability. In the present study, to investigate intrinsic interannual variability in the western boundary currents under realistic interannually varying forcing, we have conducted eddy-resolving quasi-global OGCM ensemble experiments for 50 years. Ten ensemble members with slightly different initial conditions show substantial spread in their interannual variability under the identical atmospheric reanalysis fields. Even on interannual time scale, intrinsic variability (and thus uncertainty) is similar to or larger than the wind-driven variability in the western boundary current regions. Also, it is found that in the Kuroshio Extension region, the amplitude of intrinsic variability modulates on decadal time scale (Fig. 2).

### 2.3 An increase of the Indonesian Throughflow by internal tidal mixing

Vertical mixing induced by internal tide is enhanced over rough bottom topographies. This tidal mixing plays a role in the global meridional overturning circulation and influences on deep water mass. Within the Indonesian Seas and around the Kuril Islands, the tidal mixing influences much on these vertical

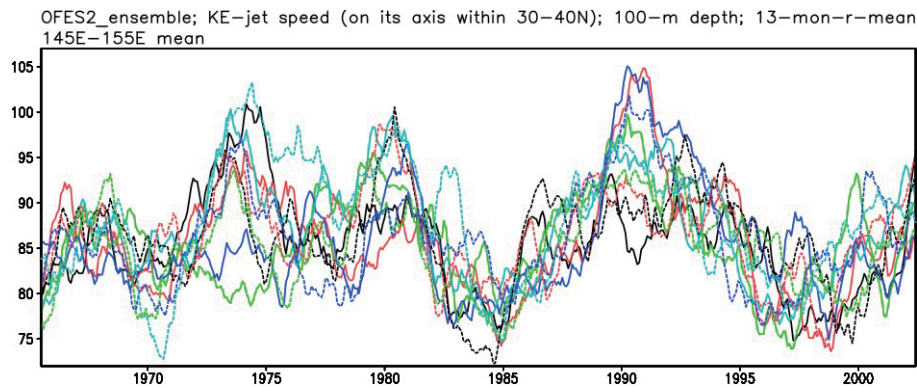


Fig. 2 Time series of modeled Kuroshio Extension jet strength ( $\text{cm s}^{-1}$ ) averaged in 145-155E. 13-month running mean is applied to focus on interannual variability.

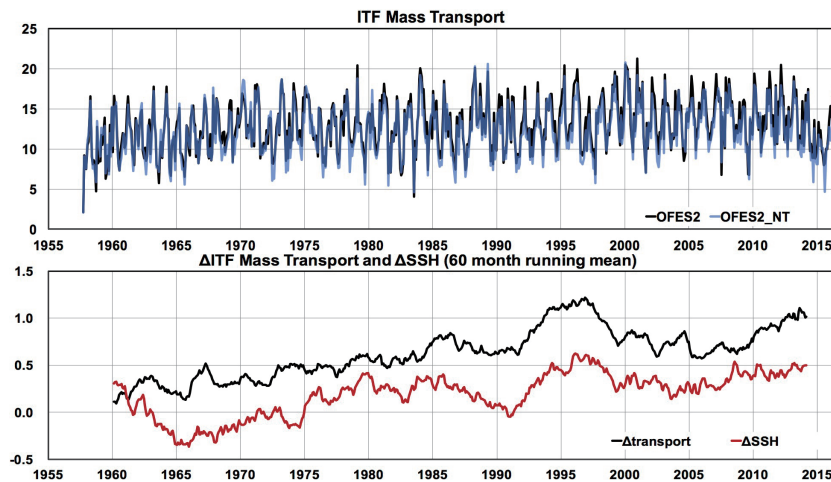


Fig. 3 (top) Monthly ITF transport ( $\text{Sv}$ ) in two simulations with (black curve) and without (blue curve) the tidal mixing scheme. (bottom) 5 year running mean differences of the ITF transport ( $\text{Sv}$ ) and sea surface height gap ( $\text{cm}$ ) between Pacific and Indian Oceans (OGCM with the tidal mixing scheme minuses OGCM without the tidal mixing scheme).

water masses. In order to improve the oceanic field simulated by our ocean general circulation model (OGCM) at a horizontal resolution of  $0.1^\circ$ , a tidal mixing scheme developed by St. Laurent et al. [4] is implemented into the OGCM.

An implementation of the tidal mixing scheme into our OGCM improves much the vertical water masses within the Indonesian Seas and along the Sumatra and Java islands (not shown) as well as previous studies. Additionally, we found that the transport of the Indonesian Through Flow (ITF) increases by the tidal mixing scheme. Many islands in the tropical Pacific are a region with enhanced vertical mixing, which changes vertical density profile and then the sea surface height raises due to a net increase of buoyancy in the water column. This impact spreads over the basin via Rossby and Kelvin waves. As the result, the pressure gap between the Pacific and Indian Oceans is enhanced and hence the ITF transport is strengthened. This result shows that the internal tidal mixing can influence on surface circulation.

### Acknowledgement

A part of this project is conducted as an international collaboration with IFREMER, and supported by JSPS KAKENHI Grant Number 16H01846, 16K12591, 15K05284, JP26800249, 17J04041.

### References

- [1] K. Tsuboki, “High-resolution simulations of high-impact weather systems using the cloud-resolving model on the Earth Simulator,” *High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean*, K. Hamilton and W. Ohfuchi, Eds., Springer, 141–156, 2008.
- [2] H. Hirata, R. Kawamura, M. Kato, and T. Shinoda, “Influential role of moisture supply from the Kuroshio/Kuroshio Extension in the rapid development of an extratropical cyclone,” *Monthly Weather Review*, 143, 4126–4144, 2015.
- [3] H. Hirata, R. Kawamura, M. Kato, and T. Shinoda, “A positive feedback process related to the rapid development of an extratropical cyclone over the Kuroshio/Kuroshio Extension,” *Monthly Weather Review*, 146, 417–433, 2018.
- [4] L. St. Laurent, and C. Garrett, “The role of internal tides in mixing the deep ocean,” *Journal of Physical Oceanography*, 32, 2882–2899, 2002.

