

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

吉田 聡 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ
平田 英隆 九州大学 大学院理学府

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28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影響、2) 黒潮・黒潮統流が爆弾低気圧の分布と大規模な大気循環に及ぼす影響、3) 爆弾低気圧が海洋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・顕熱供給が低気圧を発達させ、局地的な降水や強風の発生に寄与する可能性が示された。2) では、黒潮や黒潮統流が爆弾低気圧を日本付近に集中させ、その結果、北東太平洋のジェット気流が北に蛇行し、北米西岸やハワイ付近の降水量を変動させることを示した。3) においては、爆弾低気圧が海洋に2000m深にまで達する上昇流を発生させることを解明した。

キーワード：海洋渦, 海洋前線, 大気海洋相互作用, 高解像度シミュレーション, 爆弾低気圧

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28年度は、特に黒潮・黒潮統流と爆弾低気圧の関係に注目した実験・解析を推進し、海洋前線と爆弾低気圧を介した大気海洋相互作用が明確に示された。以下にその成果の概要を報告する。

2. 平成28年度の成果

2.1 黒潮・黒潮統流が爆弾低気圧の発達に及ぼす影響

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いる(例えば[8])。その一因として、黒潮・黒潮統流の存在が影響していると考えられる。黒潮・黒潮統流は、地表付近の高い傾圧性を維持し、温帯低気圧の発達に好適な場を与える(例えば[3])。また、低気圧が暖流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るので、他の事例についても同様な暖流の効果が生じるのか更なる検証が必要である。そこで、本研究は、2017年1月8日に日本南岸で急発達した温帯低気圧に対する黒潮・黒潮統流域からの潜熱および顕熱供給の影響について、雲解像度モデルCloud Resolving Storm Simulator (CReSS; [9])を用いて調査した。焦点を当てる低気圧は、伊豆諸島に暴風雨をもたらした事例である。

CReSSの計算領域は115°E-170°E、18°N-52°Nである。水平解像度は0.02°、鉛直層数は57層、モデルトップは22800mに設定した。大気の初期値・境界値には気象庁Global Spectral Modelデータ([4])、海面水温データには海洋研究開発機構提供のJapan Coastal Ocean Predictability Experiment 2 ([7])を使用した。計算初期時刻は2017年1月7日1200UTC、計算期間は2.5日間とした。暖流からの潜熱・顕熱供給が低気圧強化へ及ぼす影響を評価するために、コントロール実験(control: CNTLラン)と暖流域からの潜熱・顕熱供給を除く実験(no sensible/latent heat fluxes: NSLHラン)を実施した。

図1a, bは低気圧発達期(2017年1月8日17UTC)におけるCNTLランとNSLHランの海面更正気圧および地表から100hPaまで鉛直積算した凝結に起因する潜熱加熱率を示している。CNTLランでは、低気圧中心北側の後屈前線付近において潜熱解放が活発に生じている様子が見てとれる。一方、NSLHランでは後屈前線付近の潜熱加熱の生成が著しく抑制されている。また、低気圧中心気圧に注目すると、CNTLランと比較してNSLHランでは約24hPa高くなっている。これらの二つの数値実験の比較から、暖流域からの水蒸気・顕熱供給が後屈前線付近の潜熱加熱強化を通じて、本低気圧の中心気圧低下へ寄与し

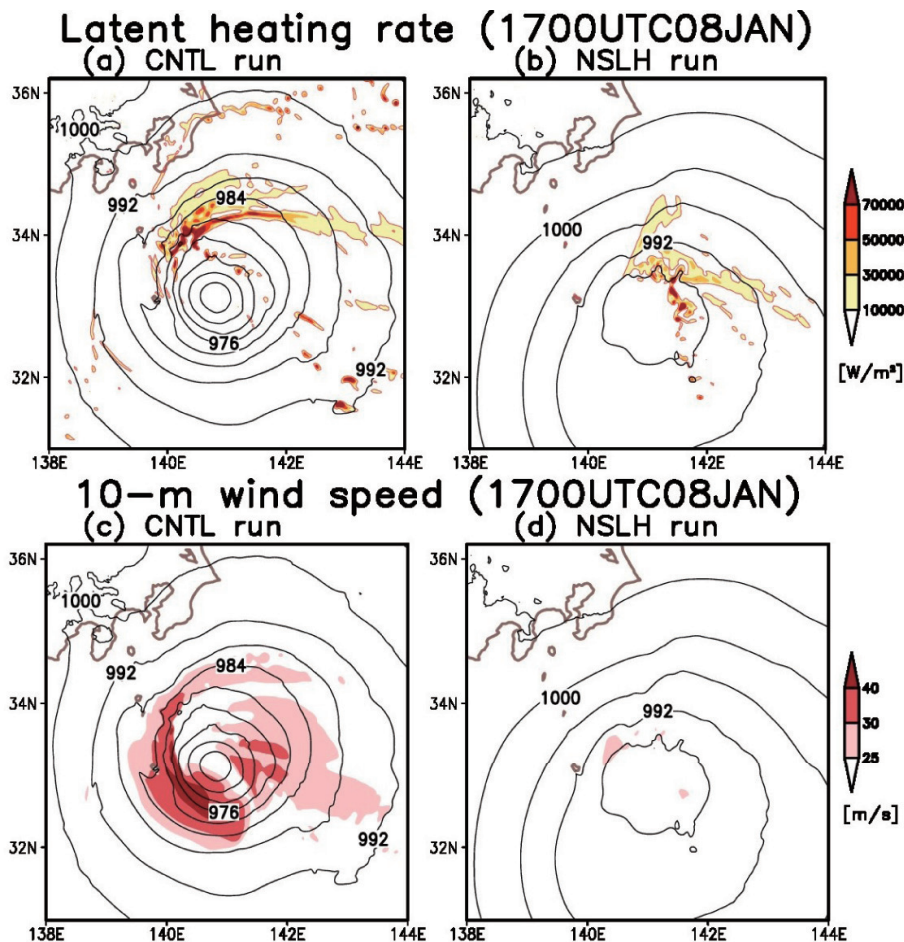


図1 (a) CNTL ラン、(b) NSLH ランでシミュレートされた2017年1月8日1700UTCにおける地表から100hPaまで鉛直積算した水蒸気の凝結に起因する潜熱加熱率(陰影: $W m^{-2}$)を示す。等値線は海面更正気圧(hPa)を示す。(c)、(d)は(a)と(b)と同様。ただし、陰影は10m高度の水平風の大きさ($m s^{-1}$)を示す。

たと考えられる。これらの結果は、Hirata et al. ([1], [2])の成果と整合的である。

10m高度における水平風の大きさを見ると(図1c、d)、CNTLランでは低気圧中心周辺において $25m s^{-1}$ を超える強風域が存在しており、特に低気圧中心の南西方向で風速が強まっている。一方、NSLHランでは、CNTLランにおいて見られる強風域がほとんど現れない。これらの結果は、黒潮・黒潮続流域からの潜熱・顕熱供給が急発達する温帯低気圧の中心付近の強風分布を変化させることで、周辺地域の強風イベントの発生へ関与していることを示唆している。

本研究は、2017年1月上旬の温帯低気圧の発達に対して、暖流域から供給される水蒸気・顕熱が積極的に関与したことをCReSSによる数値実験を用いて検証した。今後は、高解像度数値シミュレーションの結果を基に、低気圧中心近傍の微細構造の形成要因、その構造に伴って生じる潜熱加熱の低気圧発達における働き、低気圧に伴うシビアストーム等の発生過程についてさらなる調査を進めていく予定である。

2.2 黒潮・黒潮続流が爆弾低気圧の分布と大規模な大気循環に及ぼす影響

黒潮は熱帯で温められた海水を中緯度に運ぶことで地

球の熱循環の一端を担っている。一方、黒潮と黒潮続流が流れる北西太平洋域は爆弾低気圧が集中して発達する領域である。黒潮と爆弾低気圧の関係を明らかにするため、水平解像度50kmの地球シミュレータ用大気大循環モデルAFESの境界条件として、人工衛星観測にもとづいた高解像度の海面水温を与えた実験(CNTL)と、黒潮に伴う海面水温勾配を平滑化した海面水温を与えた実験(SMTH)をそれぞれ1981年9月から2001年8月までの20年間実施した([5])。CNTL実験では、SMTH実験に比べて1月の北西太平洋上の爆弾低気圧活動が活発、北東太平洋上で不活発になっていた。また、北東太平洋上では高気圧偏差が現れ、上空のジェット気流南北蛇行が活発になっていた。爆弾低気圧の発達過程の詳細な解析から、黒潮から供給される水蒸気が凝結し潜熱加熱を発生することで爆弾低気圧の急発達を促していることが明らかとなった。さらに、爆弾低気圧が北西太平洋で頻繁に発達することが、下流の高気圧偏差の形成とジェット気流の南北蛇行を引き起こす要因となっていた。この結果、CNTL実験では北アメリカ北西沿岸の降水量が減少し、ハワイ付近の降水が増加していた。以上のように、地球シミュレータを用いた高解像度長期大気シミュレーションによって、黒潮を通じて中緯度に輸送された熱帯起源の熱エネルギーが水蒸気として黒潮から局所的に大気に

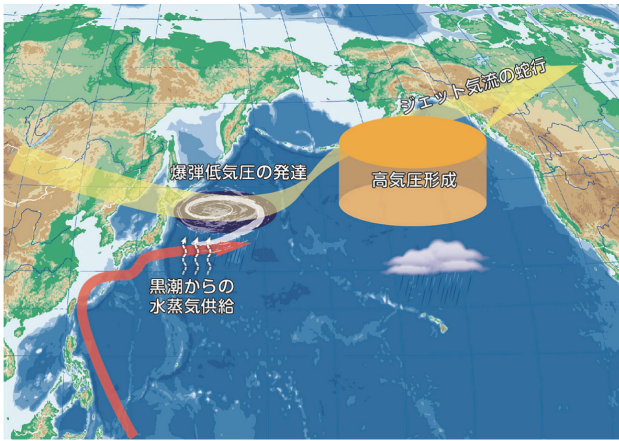


図2 黒潮が爆弾低気圧と大気循環に及ぼす影響の概念図。

放出され、爆弾低気圧はそれをエネルギー源として急発達し、下流の大気循環や降水分布を変調するという一連の気候形成メカニズムの存在を明らかにした(図2)。

2.3 爆弾低気圧が海洋に与える影響

海洋表層の循環は風成循環と呼ばれ、表面を吹く風によって駆動されている。また、台風が強風によって直下の海洋をかき混ぜることで海面水温が低下することが衛星観測で捉えられている。冬の台風とも呼ばれる爆弾低気圧も強風を伴うが、冬季の厚い海洋混合層のため、海面水温からは海洋への影響を捉えることができない。一方、北西太平洋域は爆弾低気圧が頻繁に発達する地域で最も水深が深い領域であり、海洋深層までの影響を調査できる。本研究では地球シミュレータ用海洋大循環モデル OFES の 10km 解像度準全球海洋長期過去再現実験を用いて、北西太平洋域で発達する爆弾低気圧が海洋に与える影響を調べた [6]。

図3は、2000年3月21日の爆弾低気圧下での海洋変動である。低気圧に伴う正の風応力カールの下に海洋の渦に伴う収束発散とは異なる広い順圧発散域が形成されており、この発散域の下では、海底付近からの強い湧昇流が励起されている。1時間毎出力の解析から、励起された鉛直流は慣性振動として、1週間程度持続し、海水温が全層に渡って低下しており、爆弾低気圧が海洋深層まで影響しうることを明らかにした。

爆弾低気圧が海洋に与える影響の平均的な描像を明らかにするため、1980年から2013年の12月から3月までの冬期間について、3日毎の瞬間値出力を元に爆弾低気圧が発達したときの海洋の変化を解析した。爆弾低気圧頻度が最も多かった地点で発達した爆弾低気圧76事例のコンジット解析を行ったところ、表層から水深60mまでの海洋混合層で水平発散が励起され、その下2000m付近までにかけて低気圧スケールの湧昇流が形成されていた。それより深い層では海山列などの海底地形に沿った湧昇流となっていた。一方、水平流は1500m深から海底まで低気圧性回転の循環が起っていた。

さらに1月の爆弾低気圧活動の年々変動との関係を調べ、爆弾低気圧が活発な年は海洋深層の日スケールの鉛

直流振幅と水温変動標準偏差が大きくなることが示され、爆弾低気圧の年々変動が海洋深層にも影響を及ぼすことが明らかになった。

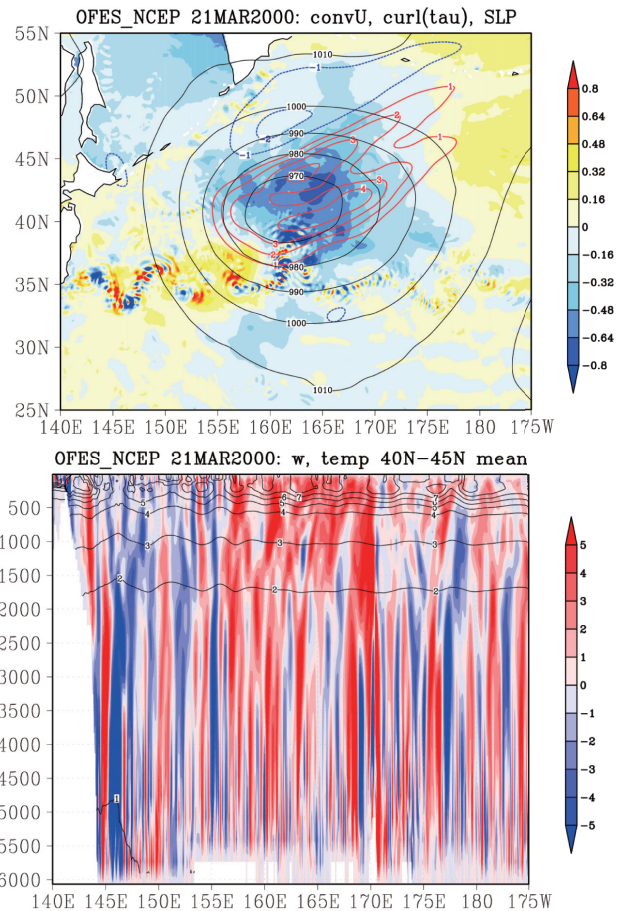


図3 2000年3月21日に発達した爆弾低気圧の事例。(上) 順圧収束(色)、風応力カール(赤線)、海面気圧(黒実線)と(下)北緯40度~45度で平均した鉛直流(色)、水温(黒実線)の東西鉛直断面。

謝辞

本研究課題の一部は、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(25400473, 26707025, 26800249, 16K12591, 16H01846, 14J04241)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 warm currents," *Monthly Weather Review*, under revision, 2017.
- [3] D. Hotta, and H. Nakamura, "On the significance of sensible heat supply from the ocean in the maintenance of mean baroclinicity along storm tracks," *Journal of Climate*,

- 24, 3377–3401, 2011.
- [4] Japan Meteorological Agency, “Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency,” [Available online at <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2013-nwp/index.htm>], 2013.
- [5] 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.
- [6] A. Kuwano-Yoshida, H. Sasaki, and Y. Sasai, “Impact of explosive cyclones on the deep ocean in the North Pacific using an eddy - resolving ocean general circulation model”, *Geophysical Research Letters*, 44, 320-329, doi: 10.1002/2016GL071367, 2017.
- [7] Y. Miyazawa, and Coauthors, “Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis,” *Journal of Oceanography*, 65, 737–756, 2009.
- [8] F. Sanders, and J. R. Gyakum, “Synoptic-dynamic climatology of the “bomb”,” *Monthly Weather Review*, 108, 1589–1606, 1980.
- [9] 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.

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

Akira Kuwano-Yoshida

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

Hidetaka Hirata

Graduate School of Science, Kyushu University

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) impacts of the Kuroshio/Kuroshio Extension on the rapid development of an extratropical cyclone, 2) impacts of the Kuroshio and Kuroshio Extension on distributions of bomb cyclones and large-scale atmospheric circulation, and 3) impacts of explosive cyclone on the deep ocean, from the results in FY2016.

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

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 FY2016.

2. Results in FY2016

2.1 Impacts of the Kuroshio/Kuroshio Extension on the rapid development of an extratropical cyclone

This study examined influences of latent and sensible heat fluxes from the Kuroshio/Kuroshio Extension on the explosive intensification of an extratropical cyclone, which appeared in the early January 2017, using the Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS; [5]). In order to quantitatively assess the impacts of the latent and sensible heat supply from the Kuroshio/Kuroshio Extension on the cyclone, we conducted a control experiment (CNTL run) and an experiment without the sensible and latent heat fluxes around the warm currents (no sensible/latent heat fluxes: NSLH run).

Figures 1a and 1b show the spatial pattern of sea level pressure and the latent heating rate due to condensation integrated from the surface to 100 hPa in the CNTL run and the NSLH run at 1700 UTC 8 January, when the cyclone developed. In the CNTL run, latent heat release actively occurs around the bent-back front north of the cyclone's center. On the other hand, the latent heating over the bent-back front is suppressed in the NSLH run. Additionally, the cyclone's central pressure in the NSLH run is higher than that in the CNTL run by about 24 hPa.

These comparisons between the two runs strongly suggest that the moisture and heat supplies from the Kuroshio/Kuroshio Extension affect the central pressure deepening of the cyclone via the intensification of the latent heating over the bent-back front, which is consistent with the results of Hirata et al. ([1], [2]).

Figures 1c and 1d illustrate the horizontal distributions of 10-m horizontal wind speed. The strong wind region exceeding 25 m s^{-1} appears in the vicinity of the cyclone's center in the CNTL run. Especially, the wind is very strong to the southwest of the cyclone's center. In contrast, such strong wind areas are hardly found in the NSLH run. These results imply that the latent and sensible heat fluxes from the warm currents influence strong wind events over the northwestern Pacific Ocean by changing the strong wind distribution near the cyclone's center.

2.2 The Kuroshio enhances bomb cyclones

The Kuroshio transports warm water from the tropics and releases huge amount of heat to the atmosphere at midlatitudes. To investigate impacts of the heat release, we have conducted two experiments; one uses satellite observing high-resolution sea-surface temperature, another uses smoothed sea-surface temperature in which the Kuroshio is removed, for boundary conditions of atmospheric general circulation model for the Earth Simulator (AFES) with 50-km horizontal resolutions [3]. The results suggest that the moisture flux from the Kuroshio enhances explosive cyclone activity over the northwestern Pacific Ocean through precipitation enhancement within explosive cyclones. The enhanced explosive cyclones make northward meandering jet stream over the northeastern Pacific Ocean and decrease precipitation along west coast of North America and increase it around Hawaiian Islands.

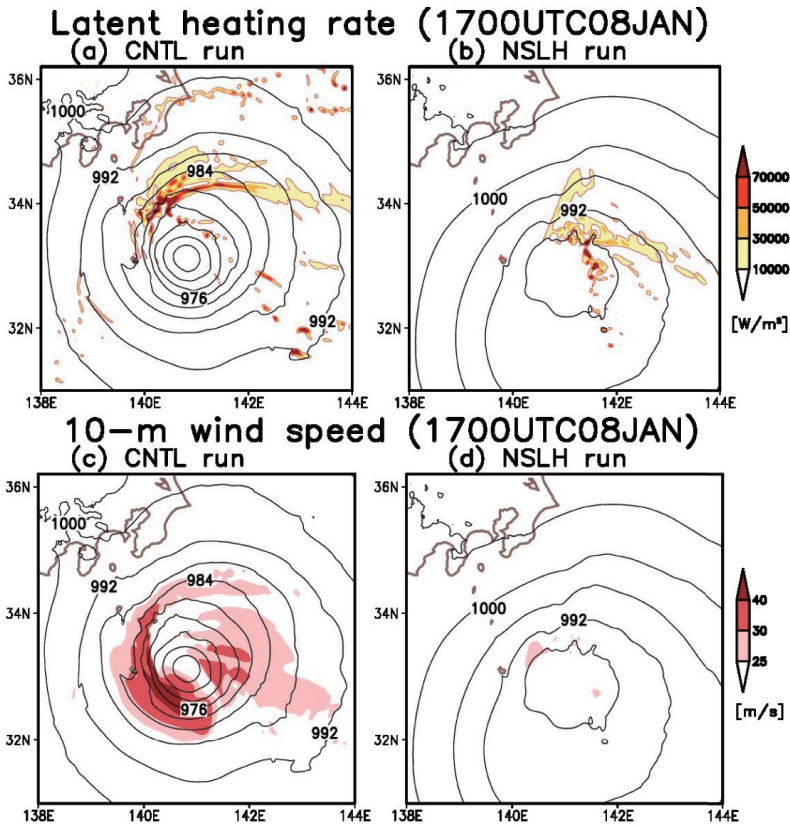


Fig. 1 (a), (b) Maps of latent heating rate due to condensation integrated from the surface to 100 hPa (shading: $W m^{-2}$) and sea level pressure (contours: hPa) at 1700 UTC 08 January 2017 in the CNTL run and the NSLH run. (c), (d) Same as (a) and (b) but for the magnitude of 10-m horizontal wind (shading: $m s^{-1}$).

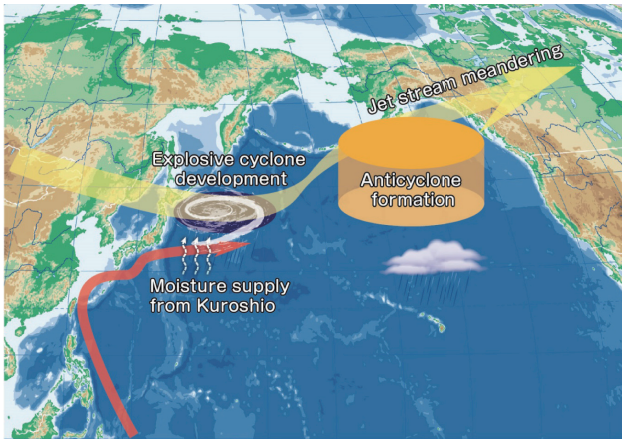


Fig. 2 Schematic diagram showing how the Kuroshio gives impact on bomb cyclones and atmospheric general circulation.

2.3 Impacts of explosive cyclone on the deep ocean

Explosive cyclones have strong winds as well as typhoons, which can modify ocean. However, sea-surface temperature observed from satellite cannot capture the oceanic response to explosive cyclones because of deep ocean mixed layer in winter. Long-term eddy-resolving ocean hindcast simulation using ocean general circulation model for the Earth Simulator (OFES) suggests that the strong winds make large horizontal divergence in ocean mixed layer and upwelling from the deep ocean under 2000 m (Fig. 3) [4]. The upwelling cools down the deep ocean. In addition, interannual variation of explosive cyclone activity in January varies amplitudes of vertical motion and daily-scale temperature variability in the deep ocean. These results suggest that explosive cyclones can modify deep ocean circulation and mixing.

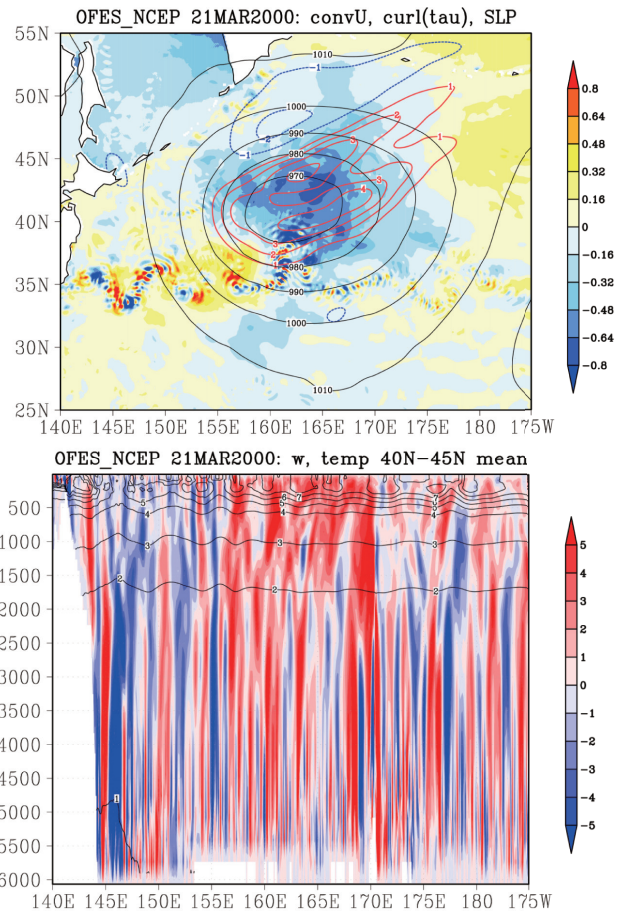


Fig. 3 Ocean response to an explosive cyclone developing at 21st March 2000. (Upper) Barotropic convergence (color) and wind stress curl (red line). (Lower) Vertical-zonal cross section of vertical motion (color) and water temperature (black line) averaged between 40N and 45N.

Acknowledgement

A part of this project is conducted as an international collaboration with IFREMER, and supported by JSPS KAKENHI Grant Numbers JP25400473, JP26707025, JP26800249, 16K12591, 16H01846, 14J04241.

References

- [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 warm currents,” *Monthly Weather Review*, under revision, 2017.
- [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] A. Kuwano-Yoshida, H. Sasaki, and Y. Sasai, “Impact of explosive cyclones on the deep ocean in the North Pacific using an eddy-resolving ocean general circulation model”, *Geophysical Research Letters*, 44, 320-329, doi: 10.1002/2016GL071367, 2017.
- [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.

