

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

馬場 雄也*1, 平田 英隆*2, 古恵 亮*1

*1 海洋研究開発機構 アプリケーションラボ, *2 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

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 30 年度の成果から、1) メキシコ湾流が爆弾低気圧の発達に影響を及ぼす機構、2) 新しく開発された積雲対流スキームと浅い対流クロージャの有効性、3) 海洋の中深層に現れる東西流（帯状流）の性質が決定論的であるか、について紹介する。1) では、メキシコ湾流からの水蒸気・顕熱供給が爆弾低気圧の発生に寄与する可能性が示された。2) では、雲解像モデルに基づき構築された新積雲対流スキームに浅い対流スキームを適用することで気候場・経年変動、さらには季節内振動をより改善することが示された。3) 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、個々の帯状流の位置が外力や系によって決まる緯度帯と、それが確率的にしか決まらない緯度帯があることを示した。

キーワード：海洋渦、海洋帯状流、爆弾低気圧、積雲対流スキーム、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している。

2. 平成 30 年度の成果

2-1. メキシコ湾流がスーパー爆弾低気圧の発達に与える影響

2018 年 1 月 4 日にメキシコ湾流上で、非常に急激な発達を伴った温帯低気圧（便宜的に、スーパー爆弾低気圧と呼ぶ）が発生した。この低気圧によって引き起こされた暴風雪が原因となって、アメリカやカナダでは甚大な被害が生じた。この爆弾低気圧の急激な発達の要因について水平解像度約 2 km の雲解像モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS; [1]) を用いて調査した。本研究では、特に低気圧の急発達におけるメキシコ湾流からの水蒸気や熱供給の役割に焦点を当てた。

CReSS による再現実験では、観測された低気圧の急発達や低気圧に伴う雲・降水構造を良く再現した（図 1）。また、再現実験では、低気圧が急発達する際に、低気圧に伴う cold conveyor belt (CCB) 付近で、メキシコ湾流からの潜熱・顕熱フラックスが活発化した。この、メキシコ湾流域からの水蒸気や顕熱供給が低気圧へ与える影響を評価するために、暖流付近からの熱フラックスを除いた数値実験を実施した。感度実験では、低気圧の

急発達が著しく抑制された。二つの実験の中心気圧の差は、25 hPa に達した。これらの結果は、メキシコ湾流からの水蒸気や熱供給がスーパー爆弾低気圧の発達要因の一つであることを示している。

実験結果を解析し、どのように暖流からの水蒸気や熱供給が低気圧の発達に影響をしたか調査した。乾燥かつ寒冷な強風を伴う CCB が、暖流からの水蒸気や熱供給の活発化を促進していた。そして、この水蒸気や熱供給によって地表付近に対流不安定な層が形成される。この対流不安定化した気層は、低気圧中心の北西に形成されるメソ前線帯で持ち上げられる。その結果、不安定の解消が生じ、膨大な潜熱が解放される。この潜熱加熱はさらなる低気圧や CCB の強化を導く。このような一連のプロセスは、Hirata et al. [2] が黒潮域の爆弾低気圧の発達プロセスとして提案した CCB と潜熱加熱との間の正のフィードバック過程と整合的である。ゆえに、暖流からの水蒸気や顕熱供給が CCB と潜熱加熱との間の正のフィードバック過程を通じてスーパー爆弾低気圧の発生を引き起こしたと考えられる。

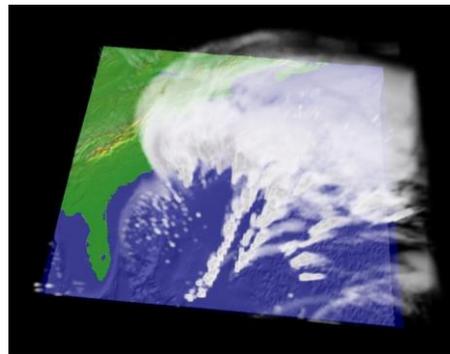


図 1. 再現実験がシミュレートしたスーパー爆弾低気圧に伴う雲の 3 次元構造。

2-2. 新積雲対流スキームの AFES への実装

2-2-1. はじめに

積雲対流スキームは気候モデルの心臓部とも見なされる重要なパラメタリゼーションであるが、そのモデル化は従来のスキームでは経験的に行われてきた。Baba (2019) は経験的なモデリングによる不確実性を排除し、より精密に雲の挙動を再現するため、雲解像モデルを用いて積雲対流スキームを再構築した(以下、新スキーム) [3]。この研究では雲解像モデルで得られた長期的な雲の挙動を統計的に解析することで、物理的な背景に基づくパラメータを使用し、より普遍的な雲のモデリングに成功しており、積雲対流スキームのよく知られた二重熱帯収束帯 (double intertropical convergence zone, ITCZ) バイアスや、再現が難しいとされてきたマッデン・ジュリアン振動 (Madden-Julian oscillation, MJO) の再現に成功している。開発時にはこのような改善点が見られたが、新スキームが他の気候モデルにおいても有効であるかは不明のままであった。そこで本年度はこのスキームを AFES に実装し、その有効性を確認することを目的として研究を行った。加えて Baba (2019) で課題として残っていた、積雲対流スキーム内部のサブパラメタリゼーションである、対流クロージャの改良についても検討を行った。

2-2-2. 浅い対流クロージャ

積雲対流スキームは通常、長期積分を行うために計算格子が粗くした気候モデルで用いられるため、個々の雲を解像しないことを前提としている。そのため、雲の形成に伴う水・熱・運動量の輸送過程についても積雲対流スキーム内部で計算する必要があり、これは収支方程式に基づいて計算される。収支方程式は閉じていない方程式であり、方程式を閉じるためのなんらかのクロージャが必要となる。積雲対流スキームで用いられるクロージャは対流クロージャと呼ばれ、これまでにいくつかの対流クロージャが提案されている。対流の深さに依らず適用できる対流クロージャに予報型クロージャがあるが、パラメータ依存性が強く、対流の深さに偏りが生まれる問題がある。本研究ではパラメータの依存性が弱い、診断型の浅い対流クロージャ [4] に着目し、これを新スキームに適用して有効性を検証することとした。なお、新スキームでは元々深い対流クロージャのみが適用されており、浅い対流クロージャを適用することで、浅い対流の挙動が改善することが期待される。

2-2-3. 実験設定

気候モデルには CFES の大気モデルパートである AFES を用いた。解像度は T42、鉛直解像度は 48 層である。海面水温 (sea surface temperature, SST)・海水データには HadISST、大気初期値・オゾンデータは ERA-interim を用いた。これらの実験設定は AMIP 実験に基づく。積分期間は 1979 年から 10 年間とした。モデルの標準性能を解析するため、AFES の標準積雲対流スキーム (エマニエルスキーム) を用いた基準実験

(RUN-CNTL) を行い、新スキーム及びこのスキームに加えて浅い対流クロージャを適用した実験 (RUN-SC, RUN-SS) を実施して、計算結果を解析した。

2-2-4. 結果

2-2-4-1. 気候場への影響

積雲対流スキームの変更は気候モデルの基本性能に大きな影響を及ぼすため、まず気候場の検証を行った。図 2 に基準実験及び観測データから得られた、気候場の相対誤差を示す。高緯度側では改善傾向が見られるものの、新スキームを適用しただけでは気候場の誤差は改善しない。しかし、浅い対流クロージャを適用した場合には全ての緯度域で誤差が改善する結果となった。年平均の降水分布の比較では RUN-CNTL では熱帯収束帯が重複する double ITCZ の傾向が見られたが、新スキームを適用することでこの傾向は大きく改善した。この他、年平均・経度平均値などを解析した結果、新スキームを適用した場合、低温バイアス、乾燥バイアスなどが高緯度から熱帯にかけて改善していることが分かった。気候場を変化させた原因を調べた結果、浅い対流クロージャを適用すると、熱帯での浅い対流の活動が促進され、それに伴い浅い対流上部の深い対流の傾向も改善していることが確認された。

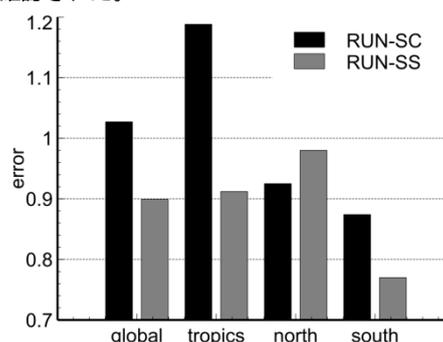


図 2: 各緯度域における基準実験に対する相対誤差

2-2-4-2. 変動場への影響

全球大気の変動は熱帯における経年変動と季節内変動に大きな影響を受ける。積雲対流スキームは熱帯における対流活動の再現性を大きく左右することから、熱帯における経年変動・季節内変動のスキームによる変化を検証した。経年変動はエルニーニョ・ラニーニャ (El Nino Southern Oscillation, ENSO) によって支配されており、大気は ENSO に伴う SST の変動で降水分布を変化させる。ENSO の指数である Nino3.4 について月平均降水量のアノマリー応答を調べたところ、RUN-SC 及び RUN-SS では降水の応答が改善していることが分かった。季節内変動は MJO により支配されており、MJO を解析することで、傾向が改善しているか検証することができる。US CLIVAR MJO 診断ツールを適用し、MJO に関してラグ相関を計算した結果を図 3 に示す。RUN-CNTL は MJO を再現できないが、新スキームでは MJO の再現性が向上している。中でも RUN-SS では東進構造は明確になり、MJO の再現性は大きく向上している。MJO の傾向を改善した原因について湿度アノマリーの傾向を調べたところ、浅

い対流クロージャを適用した場合 (RUN-SS)、再解析データに近い湿度アンマリーが再現されていた。さらに湿度アンマリーに及ぼす各物理過程の影響を調べた結果、RUN-SC と RUN-SS では浅い対流から中層へ供給される湿度に大きな違いがあり、浅い対流クロージャを適用することで中層への湿度供給傾向が改善され、MJ0 の発達を改善する働きをすることがわかった。

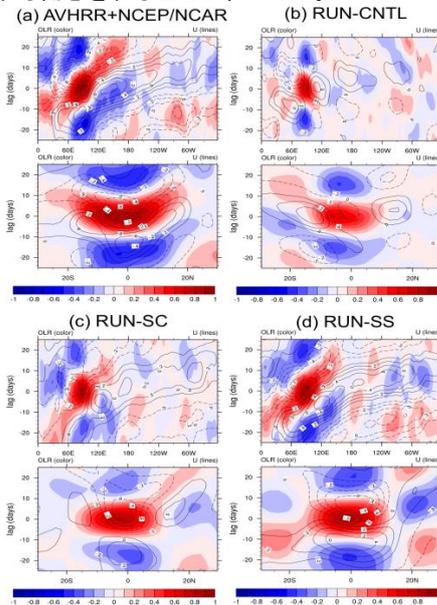


図3: 長波放射 (outgoing longwave radiation, OLR) 及び 850hPa 面における経度方向風速アンマリーのラグ相関図の比較

2-2-5. まとめ

雲解像モデルに基づき構築された新積雲対流スキームを AFES に実装し、スキームと浅い対流クロージャの有効性を検証した。AFES においても新積雲対流スキームは有効であり、浅い対流スキームを適用することで気候場・経年変動の傾向は改善し、さらに季節内振動の傾向をより改善することが可能であることがわかった[5]。

2-3. 中規模帯状流は決定論的か?

赤道域では、従来から、赤道潜流を初めとする強い帯状流が知られており、赤道特有の力学で説明されている。ところが、近年、赤道域の外でも世界中の海の至るところに南北幅おおよそ 100 km 程度、東西数千 km に亘る帯状流が存在することが分かってきた。東向きと西向きの流れが交互に現れ縞を成し、鉛直方向には 1000-2000 m 深に達する深い構造を持っている。最初は、衛星海面高度から計算した海面地衡流と高解像度数値モデルで発見され[6, 7]、最近になって、Argo による地衡流計算や ADCP による直接観測でも存在が確認されるようになってきた[8]。

ただ、海洋循環はカオス系なので[9]、帯状流の位置が決定論的に決まっているかどうかは分からない。幾つか提唱されている帯状流の機構のうち、個々の帯状流の

位置が外力や系の状態によって決まる機構と、位置が確率的にしか決まらないものがある。本研究では、帯状流の位置が決定論的に決まっているのかどうか調べるために、準全球渦解像海洋大循環モデル OFES2 [10] を使う。OFES2 は、1958 年から 2018 年まで、大気再解析データに基づく外力 (JRA55-do [11]) によって駆動されている。初期値をごく僅かに変え 10 回同じ積分を繰り返し統計集団を得る。

月平均の流速場では中規模渦の振幅が大きいため、以下では、周期 2 年で振幅が 1/2 となるローパスフィルターを掛けた流速場 u を使う。(以下では、 u の時間変動を、簡便に「経年変動」と呼ぶ。)過去の研究で示されたように[9]、初期値の僅かの違いは急速に成長し、5 年~10 年のうちに、500 m 深で流速にしておおよそ 5 cm/s 程度の「統計集団偏差」を持つようになる。その偏差場を見ると、赤道域を除けば、大きさも分布も u の経年変動に似ている。この分布は、定性的には中規模渦に伴う速度変動の分布にも似ている。渦と平均流の相互作用で帯状流が出来ているとすると、帯状流自体の時間変動やばらつきが渦の強さと関係していても不思議ではない。

帯状流の鉛直分布や水平分布を詳しく調べると、一口に「帯状流」と言っているものにも、様々なものがありそうである。時間変動の大きいものやより定常的なもの、統計集団偏差が大きいものや小さいもの、海底に捕捉されているもの、海面から海底まで延びているもの、などである(図 4 上)。経年変動をみると、緯度帯による傾向の違いが顕著である(図 4 下)。赤道域のすぐ外側では、帯状流はゆっくりと極向きに移動する。移動するときも標本間のばらつきはそれほど大きくない。亜熱帯循環域になると、過去の研究で指摘されたように赤道向きに移動するが、流軸の位置が標本間で一致する度合いは低い。亜寒帯での帯状流の動きはゆっくりで系統的でもなく標本間の一致も見られない。

以上の帯状流と違い、海面から海底に達する準順圧的な帯状流が、32°N と 40°N にある(図 4 上)。それぞれ、崖のような海底斜面に固定されているようであり、時間変動も少なく標本間での一致がほぼ完全である(図 4 下)。この順圧帯状流ほど安定はしていないがその南北に反流があり、これは、他の帯状流と同様に 1500 m 深程度までには及んでいない。つまり、海底に固定された帯状流が、隣接する帯状流を固定する働きをしているようである。この現象がどの程度普遍的なのかは分からない。40°N の崖はほぼ真っすぐ東西に延びているにも関わらず、帯状流の東西延伸は小さく、32°N の崖は北東-南西方向に少し傾いて延びているが、帯状流は概ねそれに沿い伸びている。南東太平洋には、東西に伸びた崖や谷が数多く、大西洋中央海嶺には、さらに多い。そのような領域を調べると面白いだろう。

以上の結果は論文[12]にまとめ、投稿する予定である。

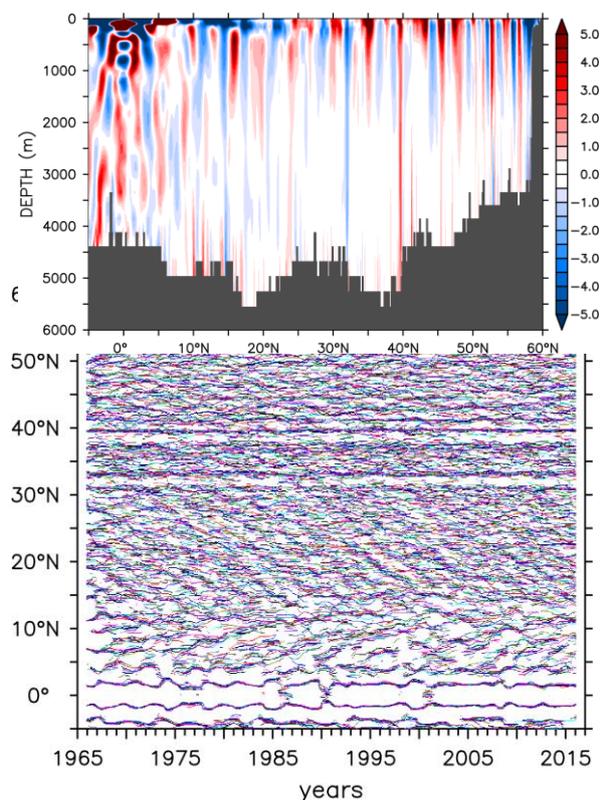


図4: (上) 140°Wに沿った南北断面。ローパスした東西流速。2010年1月を例として。(下) 140°W、500 m 深の東向きの帯状流の流軸位置に、標本ごとに色を変えて点を打った。

参考文献

- [1] K. Tsuboki, and A. Sakakibara, "Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator", *High Performance Computing*, edited by H. P. Zima, K. Joe, M. Sato, Y. Seo, and M. Shimasaki, Springer, 243-259, 2002.
- [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*, vol.146, no.2, pp. 417-433, 2018.
- [3] Baba, Y., "Spectral cumulus parameterization based on cloud-resolving model", *Clim. Dyn.*, vol.52, pp.309-334, 2019.
- [4] Bechtold, P. et al., "Representing equilibrium and nonequilibrium convection in large-scale models", *J. Atmos. Sci.*, vol.71, pp.734-753, 2014.
- [5] Baba, Y., "Shallow convective closure in a spectral cumulus parameterization", *Atmos. Res.*, vol.233, 104707, 2020.
- [6] H. Nakano and H. Hasumi, "A series of zonal jets embedded in the broad zonal flows in the Pacific obtained in eddy-permitting ocean general circulation models," *J. Phys. Oceanogr.*, vol.35, pp.474-488, 2005.
- [7] N. A. Maximenko, B. Bang, and H. Sasaki, "Observational evidence of alternating zonal jets

in the world ocean," *Geophys. Res. Lett.*, vol.32, p.L12607, 2005.

[8] S. Cravatte, E. Kestenare, F. Marin, P. Dutriex, and E. Firing, "Subthermocline and intermediate zonal currents in the tropical Pacific Ocean: Paths and vertical structure," *J. Phys. Oceanogr.*, vol.47, no.9, pp.2305-2324, 2017.

[9] M. Nonaka, Y. Sasai, H. Sasaki, and B. Taguchi, "How potentially predictable are midlatitude ocean currents?" *Scientific Reports*, vol.6, p.20153, 2016.

[10] H. Sasaki, S. Kida, R. Furue, H. Aiki, N. Komori, Y. Masumoto, T. Miyama, M. Nonaka, Y. Sasai, and B. Taguchi, "A global eddying hindcast ocean simulation with OFES2," 2020, submitted.

[11] H. Tsujino, S. Urakawa, H. Nakano, R. J. Small, W. M. Kim, S. G. Yeager, G. Danabasoglu, T. Suzuki, J. L. Bamber, M. Bentsen, C. W. Böning, A. Bozec, E. P. Chassignet, E. Curchitser, F. B. Dias, P. J. Durack, S. M. Griffies, Y. Harada, M. Ilicak, S. A. Josey, C. Kobayashi, S. Kobayashi, Y. Komuro, W. G. Large, J. L. Sommer, S. J. Marsland, S. Masina, M. Scheinert, H. Tomita, M. Valdivieso, and D. Yamazaki, "JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do)," *Ocean Modelling*, vol.130, pp.79-139, 2018.

[12] R. Furue, M. Nonaka, and H. Sasaki, "On the statistics of deep zonal jets in the eastern North Pacific in an ensemble of runs with an eddy-resolving ocean general circulation model," 2020, to be submitted.

Understanding Roles of Oceanic Fine Structures in Climate and Its Variability

Project Representative

Masami Nonaka

Science and Technology

Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth

Authors

Yuya Baba ^{*1}, Hidetaka Hirata ^{*2}, Ryo Furue ^{*1}

^{*1}Application Laboratory, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, , ^{*2}Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

Abstract

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 Gulf Stream on the rapid development of an extratropical cyclone, 2) a new convection scheme implemented in an atmospheric model and application of shallow convective closure in the scheme, and 3) how oceanic deep zonal jets are deterministic or stochastic, from the results in FY2018.

Keywords : oceanic eddies, bomb cyclones, oceanic zonal jets, atmospheric convection scheme, high-resolution ocean and atmosphere simulations

1. Introduction

In this project, we numerically investigate 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 FY2018.

2. Results in FY2018

2-1. Impact of the Gulf Stream on the development of a “superbomb” cyclone

On 4 January 2018, an extremely rapidly developing extratropical cyclone, which is referred to as “super bomb” cyclone in this report, appeared over the Gulf Stream. This cyclone brought a strong blizzard on the United States and Canada, causing severe weather disasters. This study examined the cause of the extremely rapid development of the cyclone using the Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS) with a 0.02°-horizontal resolution. We specifically focused on the role of the moisture and heat supply from the Gulf Stream in the rapid development process.

The control experiment successfully simulated the extremely rapid development of the cyclone and its associated cloud and precipitation. Moreover, latent and sensible heat fluxes from the Gulf Stream became evident around the cold conveyor belt (CCB) of the cyclone in the control experiment during the rapid development phase. To evaluate the influence of the latent and sensible heat fluxes on the cyclone

development, we conducted a numerical experiment without those heat fluxes. In the sensitivity experiment, the cyclone’s intensification was significantly suppressed. The difference in the cyclone central pressure between the two experiments reached about 25 hPa. These results indicated that the moisture and heat supply from the warm current is a key factor leading to the rapid development of the “superbomb” cyclone.

We investigated how the heat fluxes from the Gulf Stream affected the rapid development of the cyclone by analyzing the experimental results. The CCB, which is characterized by strong, dry, and cold wind, played an important role in promoting the heat fluxes from the Gulf Stream. The heat fluxes from the ocean created the convectively unstable layer near the surface. When this unstable layer was lifted along the meso-scale frontal zone to the northwest of the cyclone center, the instability was released and the resultant latent heating (LH) occurred. The LH further intensified the cyclone and the associated CCB. This successive process is consistent with the CCB-LH feedback process, which was proposed as a process of the rapid development of extratropical cyclones over the Kuroshio/Kuroshio Extension ([1]). Thus, we concluded that the moisture and heat supply from the Gulf Stream led to the rapid development of the “superbomb” cyclone via that feedback process.

2-2. Implementation of a new convection scheme in AFES

A new convection scheme was developed based on cloud-resolving simulation in our past study [2]. This scheme improved known convection scheme’s biases such as double

intertropical convergence zone (ITCZ) and poor representation of Madden-Julian oscillation (MJO). However, its validity in other climate models and validity of the convective closure of the scheme remained uncertain. Based on these backgrounds, the scheme was implemented in AFES (atmospheric general circulation model for the Earth Simulator) to evaluate its validity in other climate model and to examine validity of shallow convective closure in the scheme. For the shallow convective closure, to avoid dependence on the model parameter, a diagnostic closure was implemented with modifying the formulation of the convection scheme.

Three AMIP-type experiments were conducted using AFES i.e., control experiment (RUN-CNTL), experiment using new scheme (RUN-SC), and experiment using new scheme and shallow convective closure (RUN-SS). Regarding the climatology and mean states, the results indicated that RUN-SC and RUN-SS improved climatological errors compared to RUN-CNTL, and RUN-SS further improved the climatological error. For the atmospheric variability, RUN-SC and RUN-SS improved atmospheric interannual variability associated with El Niño Southern oscillation (ENSO), and RUN-SS further improved intraseasonal variability especially MJO compared to RUN-SC. Analyzing the impacts of convection scheme and the convective closure on the simulated atmospheric circulation, it was found that the employment of the shallow convective closure improved features of shallow convection simulated by the new scheme, and it contributed for improving both climatology and variabilities.

A new convection scheme was implemented in AFES to evaluate its validity in the model and examine application of shallow convective closure in the scheme. New scheme with the convective closure was found to improve both climatology and variability, and the scheme greatly improved intraseasonal variability relating to MJO [3].

2-3. How deterministic are the deep zonal jets?

It has been known for some time that the ocean basins are populated by “deep zonal jets” or “striations”. Below the main pycnocline, zonal velocity averaged over one year or more tends to show narrow (~100 km) alternating flows extending zonally many thousands of kilometers. There are a number of theories to explain them. Some of them predict jets at fixed latitudes and others imply that the positions of the jets are random. To what extent are they random?

To answer this question, we examined a set of long-term integrations of our semi-global, eddy-resolving ocean general circulation model, OFES2, which is a second version of OFES (ocean general circulation model for the Earth Simulator). It is driven by surface fluxes derived from an atmospheric re-analysis; started from 1958, it has been

integrated up to the end of 2018 so far. Beside this standard run, we have ten more runs started with slightly different initial conditions at the beginning of 1965. In the present study we use this 10-member ensemble.

We extract zonal jets by applying a low-pass filter to the monthly-mean zonal velocity field with a spectral band width of 1 cycle/(2 years). In this study, we focused on the eastern North Pacific.

Zonal jets exhibit various behaviors and have various properties. The equatorial jets, even their variability, seem to obey deterministic dynamics and some of the tropical jets slowly migrate poleward coherently (ensemble members acting similarly), whereas jets further poleward are more or less stochastic. The subtropical jets migrate equatorward and their positions are not very coherent; the subpolar jets are random and without systematic migration. Jets near the coast of North and South America tend to have shorter meridional wavelengths than interior ones. It is not clear how the deep jets interact (or not) with bottom trapped jets; in several cases, however, steep bottom topography anchors deep jets, forming quasi-barotropic jets. These jets in turn anchor shallower counter-flowing jets on their northern and southern flanks.

These results are summarized in a manuscript to be submitted [4].

References

- [1] 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*, vol. 146, no. 2, pp. 417-433, 2018.
- [2] Y. Baba, “Spectral cumulus parameterization based on cloud-resolving model”, *Clim. Dyn.*, Vol.52, pp.309-334, 2019.
- [3] Y. Baba, “Shallow convective closure in a spectral cumulus parameterization”, *Atmos. Res.*, Vol.233, 104707, 2020.
- [4] R. Furue., M. Nonaka, and H. Sasaki, “On the statistics of deep zonal jets in the eastern North Pacific in an ensemble of runs with an eddy-resolving ocean general circulation model,” 2020, to be submitted.