

# 黒潮大蛇行に対する爆弾低気圧の応答プロセス

平田英隆<sup>1</sup>, 川村隆一<sup>2</sup>, 野中正見<sup>3</sup>

(立正大学<sup>1</sup>, 九州大学大学院<sup>2</sup>, JAMSTEC<sup>3</sup>)

## 1. はじめに

日本南岸において黒潮の流路が大きく蛇行する状態が維持されることがあり、この現象は黒潮大蛇行と呼ばれる。近年、黒潮大蛇行に伴う海面水温 (SST) の変動が、大気現象へ影響することが報告されている (平田・西川 2022)。例えば、Nakamura et al. (2012) 及び Hayasaki et al. (2013) は、黒潮大蛇行が温帯低気圧へ影響を与えることを指摘した。彼らは、気候学的な観点から、黒潮が直進流路の場合と比較して大蛇行流路の場合、低気圧経路が南へシフトし、さらに低気圧発達を抑えられることを示した。Hayasaki et al. (2013) は、黒潮大蛇行に伴う SST 偏差が、海面熱フラックスや地表傾圧帯の位置を変えることによって、低気圧へ影響することを議論した。しかしながら、彼らは、主に冬季平均場の分析結果に基づいて議論を行っており、個々の低気圧が黒潮大蛇行に伴う SST 偏差に対してどのように応答するのかについては、十分に調査がなされていない。そこで、本研究では、領域雲解像モデルを用いて SST 感度実験の結果に基づいて、黒潮の流路変動に伴う SST 偏差に対する個々の低気圧の応答に関わるプロセスについて調査した。

## 2. 数値実験のデザイン

本研究では 2017 年 1 月と 2018 年 1 月に日本南岸を通過した 2 事例に注目した。便宜的に、2017 年の事例を case 1、2018 年の事例を case 2 と呼ぶ。これらの低気圧は急発達を伴い、爆弾低気圧の定義 (Sanders and Gyakum 1980) を満たす事例であった。数値実験には、領域雲解像モデル CReSS (Tsuboki and Sakakibara 2002) を使用した。実験領域は 128° E-148° E、24.5° N-45.3° N、水平解像度は 0.05° に設定した。初期値・境界値には気象庁メソ客観解析データ、SST には JCOPE2M (Miyazawa et al. 2017, 2019) を用いた。SST 偏差が低気圧の発達環境場へ与える影響を調べるために、初期時刻は低気圧発生時刻の 7 日前に設定し、8.5 日間の積分を実施した。実験領域の西端を低気圧発生域の東側にすることで、初期擾乱を境界条件として与える実験設定にした。

黒潮の流路変動に伴う SST 偏差に対する低気圧応答を調査するために、上述設定のもと、SST の分布のみを変えた 9 種類の実験を 2 事例に対してそれぞれ実施した。まず、黒潮大蛇行期と直進期の SST 偏差のコンポジット図を作成した (図 1)。日本南岸

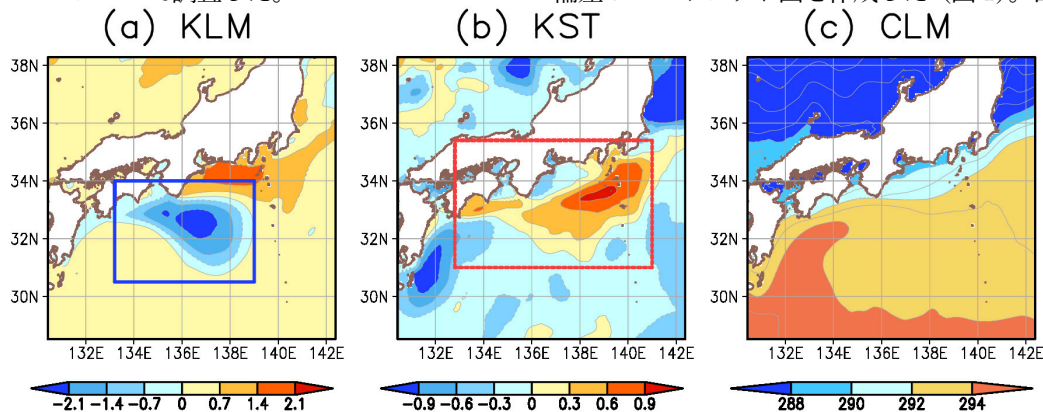


図 1. (a)黒潮大蛇行期と(b)黒潮直進期の冬季の SST 偏差のコンポジット。SST の 1 月の気候値の分布。

域の黒潮大蛇行に関連する負の SST 偏差 (図 1a の青枠内) を、1.0、1.5、2.0、2.5 倍し、気候値に加えることで、SST 分布を 4 パターン作成した。同様に、黒潮直進と関連する正の SST 偏差 (図 1b の赤枠内) に基づいて 4 パターンの SST 分布を作成した。これら 8 パターンと気候値 (図 1c) に基づく SST 分布を境界条件として与えた。大蛇行、直進に伴う SST 偏差を与えた実験をそれぞれ KLM、KST 実験、気候値を与えた実験を CLM 実験と呼ぶ。実験名の KLM と KST の後ろに示す数値は、SST パターンを作成する際に偏差にかけた数値に対応する。

### 3. 結果と考察

SST 偏差に対する低気圧中心気圧の応答を確認するために、図 2 に SST 感度実験と CLM 実験との間の低気圧中心気圧の差の時間変化を示す。case 1 と case2 の中心気圧の応答は似ており、KLM 実験では中心気圧の低下が抑制され、KST 実験では中心気圧の低下が促進される。SST 偏差が大きくなるにつれ

て、その応答は顕著になる傾向にある。この黒潮の流路変動に伴う SST 偏差に対する低気圧中心気圧の応答は、先行研究 (Nakamura et al. 2012, Hayasaki et al. 2013) の結果と整合的である。

SST 偏差に対する低気圧応答に関わるプロセスを理解するために、Fink et al. (2012) で提案された地表気圧の傾向方程式を利用した。この傾向方程式は、地表気圧の傾向に対する傾圧性と関わるプロセスと非断熱加熱と関わるプロセスの影響を分けて評価することができる。そのため、SST 偏差に対する低気圧応答プロセスを理解する上で、有用な手法である。

図 3 には、以下の①～③の手順で計算処理をした case1、2 に関する地表気圧の傾向方程式の非断熱過程と傾圧性過程に関わる項の値を示す。①各実験において低気圧中心近傍で地表気圧の傾向方程式の各項を領域平均する。②各時刻において、SST 感度実験と CLM 実験との間の①で算出した領域平均値の差を計算する。③②で計算した差を、SST 感度実験と CLM 実験との間の中心気圧差が拡大する期間で

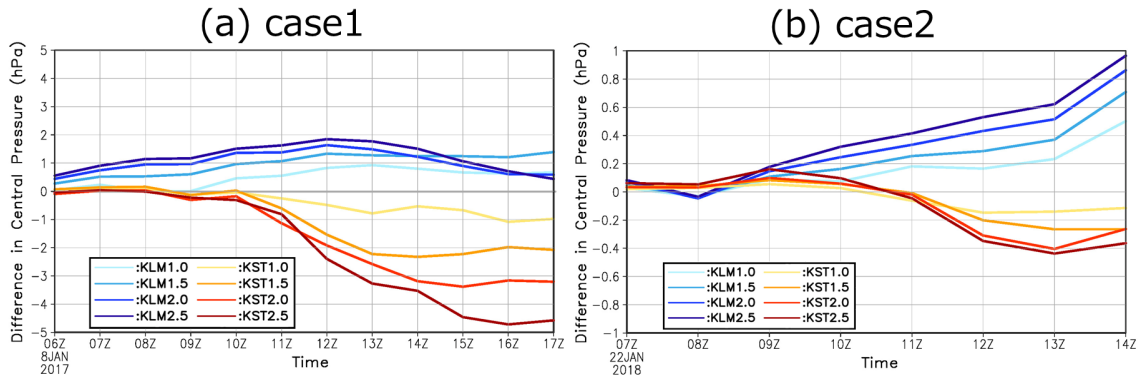


図 2. (a) case 1 に関する各 SST 感度実験と CLM 実験との間の低気圧中心気圧の差の時系列。(b) (a) と同様。ただし、case 2 に関する中心気圧差の時系列。

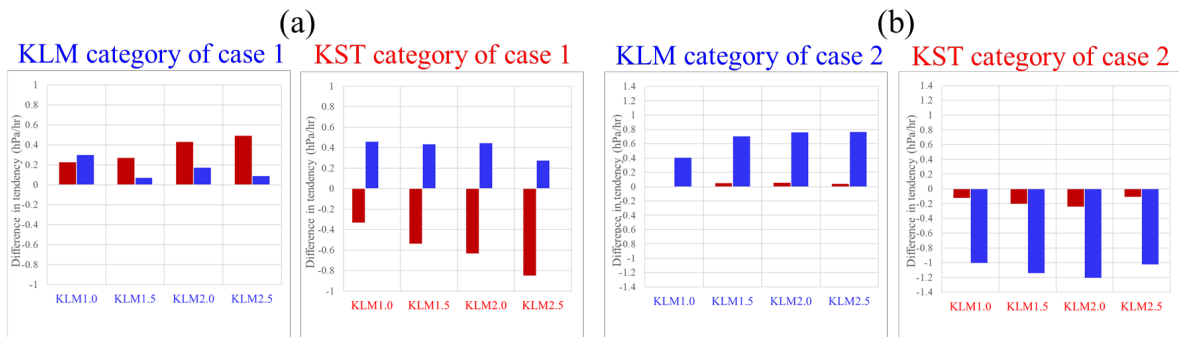


図 3. (a) case1 に関する Fink et al. (2012) の地表気圧の傾向方程式の非断熱加熱に関連する項 (赤色のバー) と傾圧性に関連する項 (青バー) の値。示している値の計算方法は本文の参照。(b) (a)図 3 と同様。ただし、case2 に関する値を示す。

平均を行う。この手順で計算された各項の値を比較することで、図2で確認した SST 偏差に対する中心気圧の応答に関わるプロセスについて調査する。

case 1 については、非断熱過程に関わる項（赤色のバー）が、KLM 実験のグループで比較的大きな正の値、KST 実験のグループでは負の値となっている。この結果は、KLM 実験の低気圧中心気圧の低下の抑制、KST 実験における低気圧中心気圧の低下の促進に、非断熱過程が主に寄与したことを示唆する（図3a）。一方で、case 2 については、傾圧性に関わるプロセス（青色のバー）が、KLM・KST 実験における SST 偏差に対する中心気圧の応答へ関与したことを示す（図3b）。これらの結果は、case1 と case2 では、SST 偏差に対する低気圧応答に関与する主要プロセスが異なることを意味する。

なぜ、case1 と case2 では、低気圧の応答に関わるプロセスが異なるのだろうか。ここでは、低気圧中心付近の降水（潜熱加熱）と海面熱フラックスの構造の違いに注目して、この問題を考える（図4、5）。

case 1 が黒潮大蛇行域を通過する際には、低気圧中心付近で強い降水が生じていた（図4の左図）。このとき、降水の形成に伴い、潜熱開放も活発に生じていた（図略）。また、同時刻には、低気圧の北象限で、暖流域から顕著な海面熱フラックスが生じていた（図4の右図）。このような海面熱フラックスのパターンは低気圧中心近傍の潜熱加熱の強化に適していることが報告されている（例えば、Hirata et al. 2018）。一方で、低気圧中心北側の熱フラックスは傾圧帯の寒気側の空気を加熱するので、傾圧性を弱める働きもあることには留意すべきである。Hirata et al. (2018) の結果を考慮すると、図4で示される case 1 の構造は、黒潮の流路変動に伴う SST 偏差が、海面熱フラックスの大きさを変動させることで、低気圧中心付近の潜熱加熱の強度へ影響を及ぼすことができる構造と見なすことができる。それ故に、case 1 においては、非断熱過程が SST 偏差に対する低気圧応答における主要プロセスとなったと考えられる。

case 2 に注目すると、日本南岸を通過する際には、

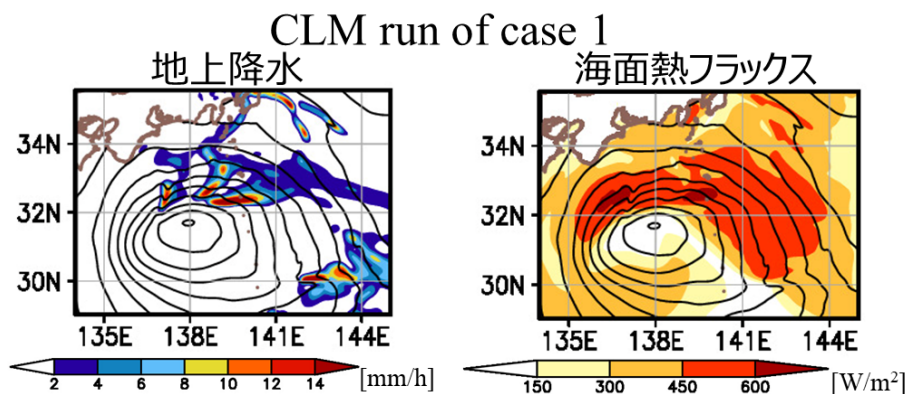


図4. case1 の CLM run において低気圧が黒潮大蛇行域を通過する際の地上降水（左図）と海面熱フラックス（右図）の水平分布図。

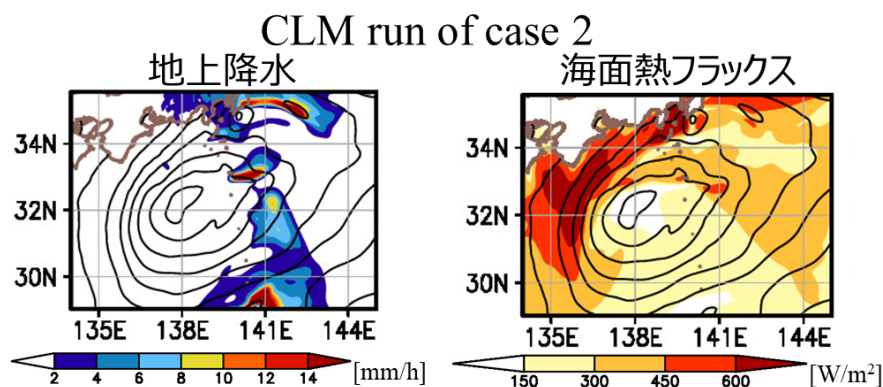


図5. 図4と同様。ただし、case2 に関する水平分布図。

低気圧中心付近では活発な降水域は見られず (図 5 左図)、低気圧中心北側の海面からの熱フラックスも case1 と比較して小さな値である (図 5 右図)。case 2 では、低気圧中心付近で降水形成に伴う潜熱加熱が弱かったため、低気圧応答における非断熱加熱の効果が不明瞭であったと考えられる。また、低気圧中心北側の海面熱フラックスが弱かったので、熱フラックスによる環境場の地表傾圧性の弱化も比較的抑えられたと考えられる。環境場の傾圧性として、低気圧発生前 5 日間で平均した 50 m 高度の温位の水平勾配の大きさを確認したところ、低気圧の経路沿いでは、SST 分布の違いを反映して、KLM 実験よりも KST 実験において傾圧性が大きかった (図略)。このようなことから、case 2 では SST 偏差が環境場の傾圧性へ与える影響を通じて、SST 偏差が低気圧に作用したと解釈できる。

#### 4. まとめ

黒潮大蛇行/直進流路に伴う海面水温偏差に対する爆弾低気圧の応答に関わるプロセスについて、日本南岸を通過した 2 事例に対して SST 感度実験を実施し、調査した。その結果は、黒潮大蛇行 (直進) に伴う冷水 (暖水) 偏差は、低気圧中心気圧の低下を抑制 (促進) することを示した。この低気圧応答に関わる主要プロセスは事例によって異なり、case1 については非断熱過程が、case2 については傾圧過程が支配的であった。そして、低気圧構造の比較から、事例間の低気圧応答に関わる主要プロセスの違いは、大蛇行域を通過する際の、低気圧中心付近の降水 (潜熱加熱) および海面熱フラックスの構造の違いに起因していることを指摘した。このような視点は、黒潮域に限らず中緯度海洋の SST 偏差に対する低気圧の応答を考える上で重要だろう。さらなる調査が望まれる。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H05170、JP19H05696、JP19H05701 の助成を受けた。

#### 参考文献

- Fink, A., S. Pohle, J. Pinto, and P. Knippertz, 2012: Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L07803.
- Hayasaki, M., R. Kawamura, M. Mori, and M. Watanabe, 2013: Response of extratropical cyclone activity to the Kuroshio large meander in northern winter. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2851-2855.
- 平田英隆, 西川はつみ, 2022: 総論: 異常海象「黒潮大蛇行」とその影響の研究動向. *月刊海洋*, 614, 3-9.
- Hirata, H., R. Kawamura, M. Kato, and T. Shinoda, 2018: A positive feedback process related to the rapid development of an extratropical cyclone over the Kuroshio/Kuroshio Extension. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 417-433.
- Miyazawa Y, Varlamov SM, Miyama T, Guo X, Hihara T, Kiyomatsu K, Kachi M, Kurihara Y, Murakami H (2017) Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three-dimensional variational scheme. *Ocean Dyn* 67:713-728.
- Miyazawa Y, Kuwano-Yoshida A, Doi T, Nishikawa H, Narazaki T, Fukuoka T, Sato K (2019) Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio confluence region. *Ocean Dyn* 69:267-282.
- Nakamura, H., A. Nishina, and S. Minobe, 2012: Response of storm tracks to bimodal Kuroshio path states south of Japan. *J. Climate*, 25, 7772-7779.
- Sanders, F., and J. Gyakum, 1980: Synoptic-dynamic climatology of the "bomb." *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1589-1606.
- Tsuboki, K., and A. Sakakibara, 2002: Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator. *High Performance Computing*. Zima, H. P., K. Joe, M. Sato, Y. Seo, and M. Shimasaki (eds.), Springer, 243-259.