

WRF 物理アンサンブルを用いた寒冷渦と台風 Lionrock(1610)の  
距離による構造変化の違いについて

Differences in the structure change depending on the distance between typhoon Lionrock (1610) and  
upper-tropospheric cold low using WRF physics ensemble experiment

入江健太 (京大院理), 竹見哲也 (京大防災研)

Kenta IRIE, Tetsuya TAKEMI

Abstract

We investigated the difference in structure change of typhoon Lionrock (2016) depending on the distance from the upper-tropospheric cold low (UCL). 50 members were created using WRF physics ensemble simulation and classified 8 clusters by the dynamic time warping method. The cluster closest and farthest from the UCL were selected and analyzed. In the closest cluster, the structural change began earlier than in the farthest cluster, and a transition to the occluded structure resulted. On the other hand, in the farthest cluster, the tropical cyclone structure was maintained. This was related to that the closer the distance to the UCL, the more susceptible Lionrock is to the inflow of cold air from the UCL into the typhoon, the increase of vertical wind shear and the friction with landfall, and the effects of the circulation of the UCL.

1. はじめに

台風 Lionrock (1610) は 2016 年 8 月 17 日に発生し 30 日 15 時 UTC に日本海上で温帯低気圧化した台風であり, 統計開始以来, 初めて東北地方に上陸した台風である (Nayak and Takemi 2018, Wada and Oyama 2018)。Lionrock は日本海上の寒冷渦に取り込まれるような経路を取ったことも特徴として挙げられる。

寒冷渦を伴う台風の温帯低気圧化に関する過去の研究は, 対流圏上層擾乱との相互作用により温帯低気圧化後の低気圧の再発達・急発達を促す可能性があることを示している (Bosart and Lackmann 1995, Hanley et al. 2001)。一方で, 寒冷渦が台風を弱める可能性があることも示されている。Hanley et al. (2001) では, 不利な相互作用は, 強い PV やその水平分布が台風を上回り, 強いシ

アを引き起こすことに起因すると述べている。Muñoz et al. (2020) は東アジア域・北米・南半球における寒冷渦の発生分布や発生数の経年変化を調査した。日本域での発生数は年々増加傾向にあり, 台風と寒冷渦が会う確率が高くなることが予想される。近年の例を挙げると, Lionrock (2016) のほかにも, Jongdari (2018) などの台風も寒冷渦の影響を受けたことで経路が変わったことが知られている (例えば Yan et al. 2021)。また, 寒冷渦に接近したことで弱化したことがベストトラックから分かっており, 台風の構造変化が寒冷渦との距離に依存する可能性が考えられる。

本研究では, アンサンブル実験により異なる経路の台風を作成し, Lionrock と寒冷渦との距離が異なった場合の構造変化の違いを調査する。

## 2. モデル設定

使用したモデルはWRF-ARW Ver. 4.1.3 (Skamarock et al., 2019) である。図1に示す領域で計算を行った。解像度は親領域(D1)が15 km, 子領域(D2)が5 km, 鉛直層数は50層である。D2には渦追跡ネスティングを採用した。初期値・境界値にはNCEP FNLを用いた。積雲対流 (Kain-Fritsch, Tiedke; D1のみ), 雲微物理 (WSM6, Lin, Morrison, Thompson, WDM6), 惑星境界層 (YSU, MYJ, MYNN2, MYNN3, Shin-Hong) スキームを組み合わせる物理アンサンブルを行い, 50メンバーを作成した。計算は8月27日00時UTCから120時間行った。

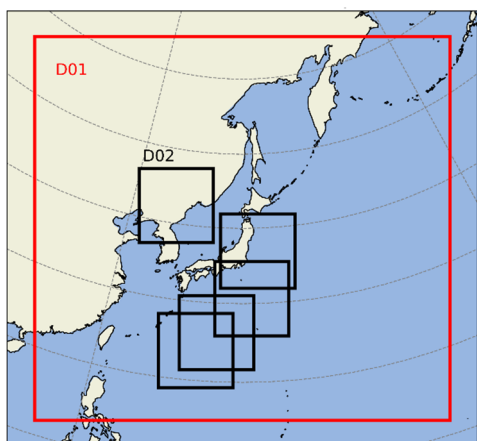


図1. モデルの計算領域。赤枠は親ドメイン(D1)を, 黒枠は子ドメイン(D2)を表す。D2では各時刻において計算領域が変化している。

経路全体で寒冷渦の循環に乗って移動している様子が再現されていた一方で中心気圧はベストトラックと比較して低かった。28日12時UTC付近でどのメンバーも最低気圧となっていたが, 最も気圧が低いメンバーと高いメンバーとの差は約35 hPaであった。組み合わせる物理スキームによって台風の強度に差が生じることは注意が必要であ

る。得られた50メンバーにおいて動的時間伸縮法 (Dynamic Time Warping; DTW) を用いたk-means法を経路に適用した。DTWは時間データ間の距離と類似度を計算することができる手法である。DTWによるクラスタリングの結果を図2に示した。シルエット法とエルボー法を参考に8つのクラスターに分類した。本研究では, 寒冷渦との距離に注目するため, 8つのクラスターのうち, 台風中心と寒冷渦中心との平均距離が最も小さいクラスター5 (Clu5) と大きいクラスター6 (Clu6) を選択した (図3)。Clu5はベストトラックよりも西を, Clu6は東を通ったクラスターである。

## 3. 距離による構造変化と環境場の違い

### 3.1. Cyclone Phase Space

低気圧の構造を客観的に診断する指標として Cyclone Phase Space (CPS; Hart 2003) を用いた。CPSは,

$$B = h[(Z_{600} - Z_{900})_R - (Z_{600} - Z_{900})_L]$$
$$-V_T^L = \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \Big|_{900}^{600} = \frac{(Z_{max} - Z_{min})_{600} - (Z_{max} - Z_{min})_{900}}{\ln P_{600} - \ln P_{900}}$$
$$-V_T^U = \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \Big|_{600}^{300} = \frac{(Z_{max} - Z_{min})_{300} - (Z_{max} - Z_{min})_{600}}{\ln P_{300} - \ln P_{600}}$$

という3つのCyclone Parameterを用いて表現される。Bは低気圧の進行方向に向かって右側半円と左側半円における600-900hPaの層厚の平均の差であり, 下層における熱的な対称性を表現している。hは北(南)半球で1(-1)である。完全な軸対称は $B = 0$ であり, 非対称構造が強まり, 層厚に差が生じると $B > 0$ となる。温低化開始の定義として $B > 10$ が用いられている。また,  $-V_T^L$ と $-V_T^U$ は低気圧の暖気核構造または寒気核構造を表現しており, 温度風の関係から導かれる。

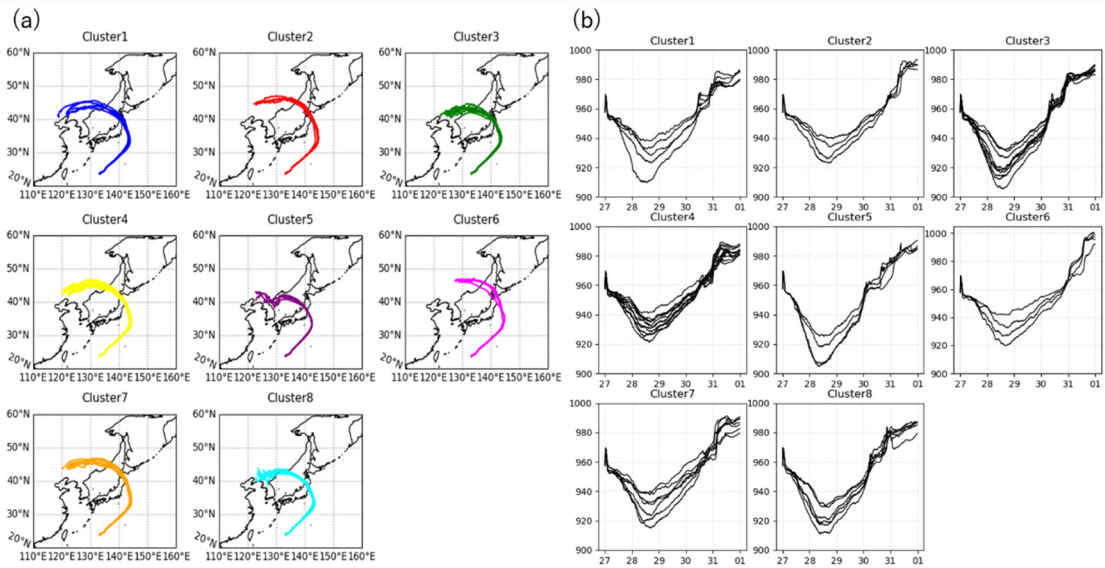


図 2. (a)DTW クラスタリングにより得られた全クラスターの経路。(b) 全クラスターごとの中心気圧。

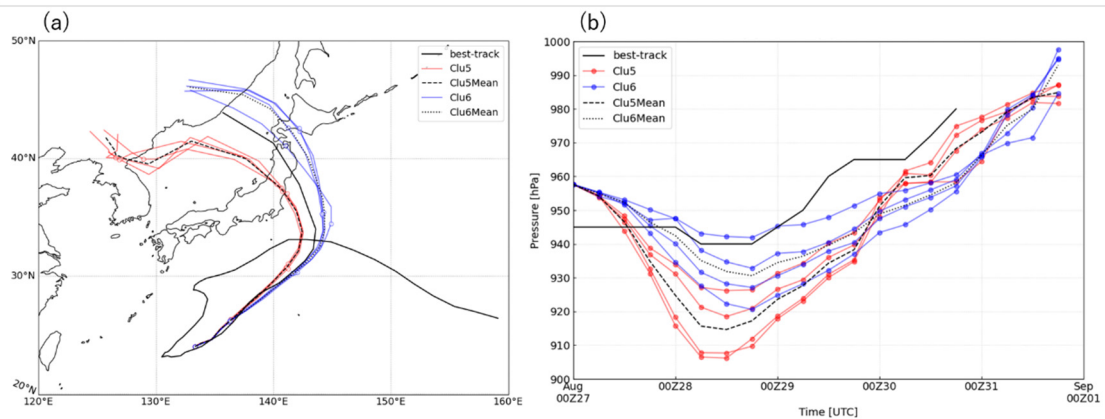


図 3. クラスタ 5 (赤) と クラスタ 6 (青) の経路。(a) は経路、(b) は中心気圧を示す。黒実線はベストトラック、赤 (青) 破線はクラスタ 5 (クラスタ 6) の平均を示している。

添え字  $L$  と  $U$  はそれぞれ下層 (600 – 900 hPa) と上層 (300 – 600 hPa) を表している。 $-V_T^L > 0$  のとき、低気圧は熱帯低気圧 (下層での層厚が大きい) ため地上付近で風速が最大) となり、 $-V_T^L < 0$  のとき温低化の完了と定義されている (Evans and Hart 2003)。

図 4 に Clu5 と Clu6 についての CPS を示している。Clu5 では、29 日付近から熱帯低気圧構造から対称性が崩れ始め、寒冷渦に最接近する 31 日以降には閉塞的な構造を

示した (図 4a)。寒冷渦の接近に伴い上空に寒気が入ることで上層の層厚が減少し寒気核構造が強まった (図 4c)。一方 Clu6 では、期間を通して熱帯低気圧構造を維持しており (図 4b)、Clu5 と比較すると寒冷渦との距離もあるため寒気の侵入が弱く、上層の寒気核構造も見られなかった (図 4d)。

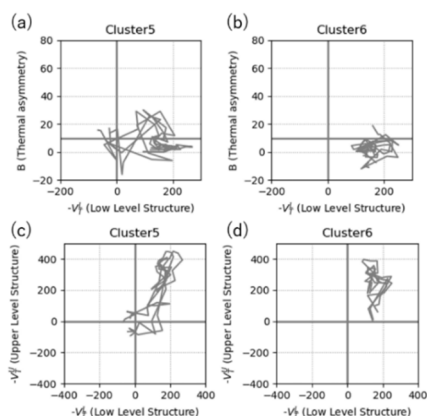


図4. クラスタごとの低気圧位相空間。(a)と(c)はクラスター5、(b)と(d)はクラスター6の低気圧位相空間を示す。(a)と(c)は下層の非対称性と構造を表し、(b)と(d)は下層と上層の構造を表す。

### 3.2. 環境場

図5には8月29日12時UTCから30日12時UTCまで12時間ごとの下層から上層までの温度場と高度場を示している。図に示す時刻は、Clu5の平均中心気圧が急速に減少していた時刻であり(図3b)、CPSの診断からもClu5で構造変化が見られた時刻である(図4b)。30日00時UTC以降に違いが顕著であり、Clu5では寒冷渦由来の寒気が流れ込み、台風構造が崩壊していることが温度・高度場から示唆されている。一方でClu6では寒冷渦からの影響は少なく、台風構造は維持されたままである。

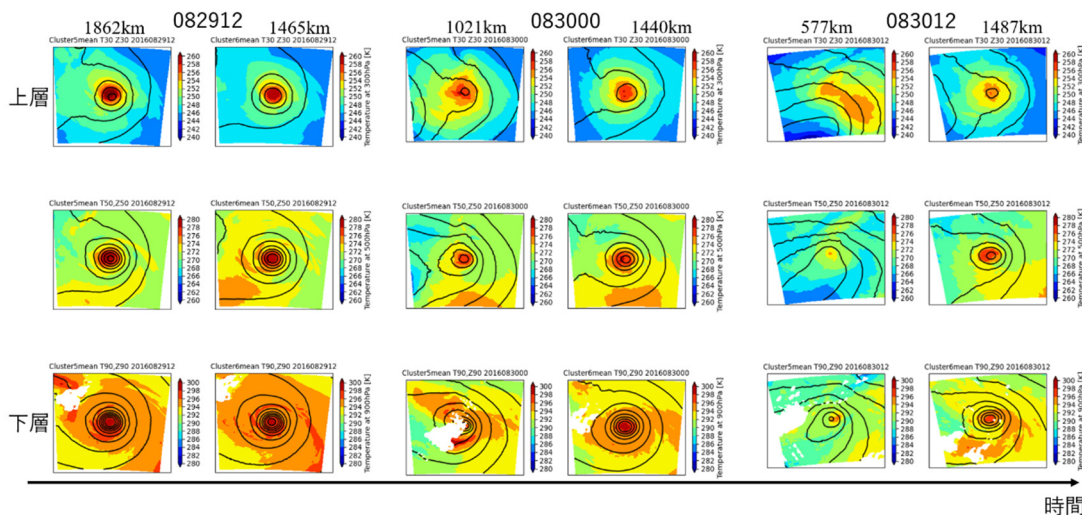


図5. 台風中心付近の環境場。(a), (c), (d)はクラスター5の気温 [K, 陰影]と高度 [m, 等値線], (b), (d), (f)はクラスター6の気温と高度を示す。

図6にはClu5とClu6のメンバー毎の水平風の鉛直シアとその平均を示した。鉛直シアは200hPaと850hPaの水平風のデータを用いた。図6a, bは台風中心から半径500km円内の平均を示し、図6c, d, e, fは二次元分布を示している。図6aでは30日00時UTCからシアが大きくなっているのに対し、bではその様子が見られなかった。ま

た、c, eとd, fを比較すると、台風中心付近に寒冷渦に伴う循環の貫入が見られた。寒冷渦との距離が近いClu5では鉛直シアが大きくなり台風構造の崩壊に寄与したと考えられる。

また、200hPa高度[m, 実線]と海面校正気圧(SLP)[hPa, 破線]から台風と寒冷渦の位置関係を図7に示した。図7aはClu5を、



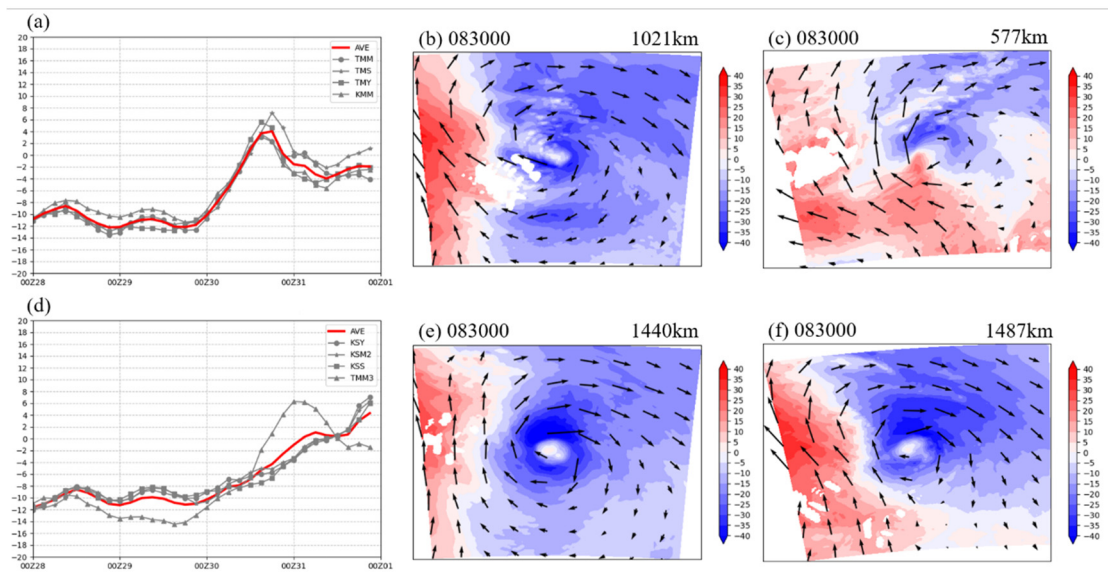


図 6. (a) クラスタ-5 の台風中心から半径 500 km 円で平均した鉛直シアの時間変化。(b) クラスタ-6 における時間変化。(c), (e) クラスタ-5 の鉛直シアの大きさ [m/s, 陰影] と向き (ベクトル)。(d), (f) クラスタ-6 の鉛直シアの大きさと向き。(c), (d), (e), (f) の左上に解析時刻, 右上に台風と寒冷渦との距離を示している。

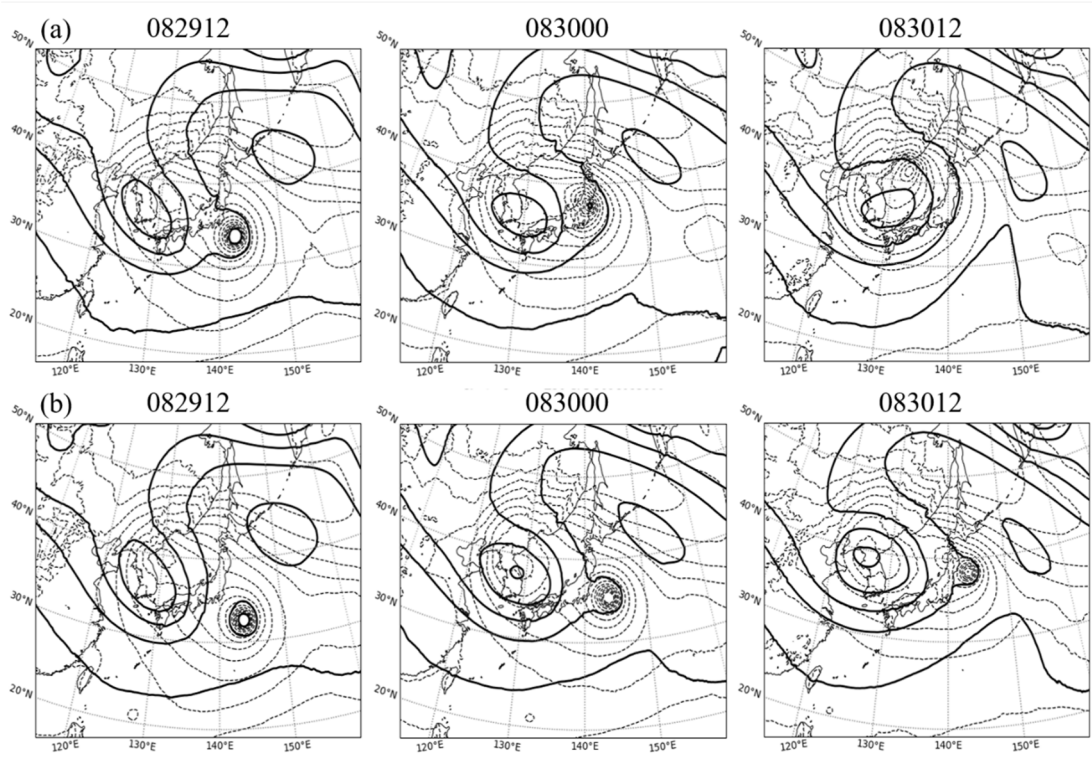


図 7. 台風と寒冷渦の位置関係。(a) はクラスタ-5 を, (b) はクラスタ-6 を示す。太実線は 200hPa 高度[m]等値線, 点線は SLP [hPa]等値線を示している。

図 7b は Clu6 を示している。図 7a において 日 00 時 UTC には上陸した。一方、図 7b では台風は寒冷渦の循環の影響を強く受け、30 は台風は寒冷渦の循環の影響を受けつつも

上陸には至っていない。また、高気圧の位置は大きな差がなかったが、寒冷渦の中心位置が Clu5 では Clu6 よりも南にあったことで台風との距離が小さくなり、台風をより早く影響下に引き込んだと考えられる。

#### まとめ

Lionrock の温帯低気圧化に伴う構造変化の距離による違いについて、WRF 物理アンサンブルを用いて調査した。得られたメンバーをクラスタリングして、寒冷渦との距離が最も近いクラスター (Clu5) と最も遠いクラスター (Clu6) を用いて解析を行った。Clu5 では Clu6 よりも構造変化開始が早く、閉塞構造への遷移が見られたが、Clu6 では熱帯低気圧構造を維持していた。寒冷渦からの寒気の流入は Clu5 で見られ、暖気核を弱めるように作用したが、Clu6 では、寒気の影響は小さく、暖気核が維持されていた。さらに、寒冷渦との距離が近い Clu5 では鉛直シアが大きくなり、Lionrock の弱体化に寄与した。このとき Clu5 の寒冷渦は Clu6 の寒冷渦よりも南に位置していたため、Clu5 に分類されたメンバーをより早く影響下に引き込んだと考えられる。本研究で Lionrock の温帯低気圧化に伴う構造変化に寒冷渦との距離の依存性が見られたが、他の事例にも共通するかどうかを今後、統計的に調査する必要がある。

#### 参 考 文 献

- Bosart, L. F., and G. M. Lackmann, 1995: Postlandfall tropical cyclone reintensification in a weakly baroclinic environment: A case study of hurricane David (September 1979). *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3268-3291.
- Evans, J. L., and R. E. Hart, 2003: Objective indicators of the life cycle evolution of extratropical transition for Atlantic tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 909-925.
- Hanley, D., J. Molinari, and D. Keyser, 2001: A composite study of the interactions between tropical cyclones and upper-tropospheric troughs. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2570-2584.
- Hart, R. E., 2003: A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 585-616.
- Muñoz, C., D. Schultz, and G. Vaughan, 2020: A midlatitude climatology and interannual variability of 200- and 500-hPa cut-off lows. *J. Climate*, **33**, 2201-2222.
- Nayak, S., and T. Takemi, 2018: Dynamical Downscaling of Typhoon Lionrock (2016) for Assessing the Resulting Hazards under Global Warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 69-88.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J. G. Powers, M. G. Duda, D. M. Baker, X.-Y. Huang, 2019: A description of the advanced research WRF model version 4. *NCAR/TN-556+STR*, 145 pp.
- Wada, A. and R. Oyama, 2018: Relation of convective bursts to changes in the intensity of typhoon Lionrock (2016) during the decay phase simulated by an atmosphere-wave-ocean model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 489-509.
- Yan, Z., X. Ge, Z. Wang, C.-C. Wu, and M. Peng, 2021: Understanding the impacts of upper-tropospheric cold low on typhoon Jongdari (2018) using piecewise potential vorticity inversion. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 1499-1515.