

秋台風の発達期における黒潮の遠隔影響

藤原圭太・川村隆一・川野哲也(九大院・理)

1. はじめに

数値モデルの精緻化により、雲の形成や消滅を直接解像しながら、熱帯低気圧（以下、台風と表記）の発達プロセスを議論することが可能となった。しかしながら、台風強度予測に有意な改善は見られず、従来の発達理論の新たなブレイクスルーを迫られている。内部コアの力学に着目した研究が多い中、台風と大規模循環場との相互作用が台風の発達に与える影響も同様に解明すべき課題である。夏季の台風に注目した研究では、台風の積雲加熱により励起される赤道波が夏季アジアモンスーンの下層西風を強化し、水蒸気コンベアベルト（インド洋から台風に延びる水蒸気フラックスの顕著な領域）を形成することで、遠隔海域の水蒸気を効率よく集積し、その結果台風が発達または中緯度傾圧帯に接近時も勢力を維持できることが指摘されている（Kudo et al. 2014; Hegde et al. 2016; Takakura et al. 2017; Fujiwara et al. 2017）。しかし、東アジア域では季節進行に伴ってモンスーン循環が大きく変化するため、上述のプロセスは常に効率的に働くとは限らない。

本研究では、先行研究では言及されていない秋台風の巨視的描像からみた発達メカニズムに焦点を当てる。秋季には大陸の地表面冷却に伴う高気圧の形成により、黒潮及び東シナ海では北東風が卓越することが気候学的に知られている。寒冷かつ乾燥した北東気流は黒潮及び東シナ海の海面蒸発を活発化させる（図略）。その結果、北上する台風の進行方向から多量の水蒸気が輸送されてくるため、台風が暖流域の水蒸気を獲得するのに好適な環境場（e.g., Mararieva et al. 2017）が、秋季に形成されることが示唆される。

そこで本研究では、黒潮から遠く離れた海域に位置する台風の発達に対して、黒潮の影響が実際に見出されるのかどうかを明らかにし、その影響の定量的評価ならびに力学プロセスの解明を主な目的とする。本要旨では事例解析として、2004年10月に発生した台風23号（Tokage）の解析結果を報告する。

2. 実験設定及び再現性の検証

台風の数値計算には、領域雲解像モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CReSS)を使用した。計算領域は 95°E - 170°E , 5°S - 45°N とし、水平解像度は緯度 $0.05^{\circ} \times$ 経度 0.05° である。計算初期時刻は2004年10月14日0000 UTCとし、6日間積分を行った。大気の初期値・境界値には NCEP 提供の Climate

Forecast System Reanalysis version 1 (CFSR), SST には NOAA 提供の Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST)を与えた。

CReSS で再現された台風は、RSMC best track data と較べると、やや東寄りの経路をとる。しかし最大強度に関しては、best track data が 940 hPa に対して、シミュレーションでは 937 hPa と観測と同程度に再現されている（図略）。また、モデルにおける黒潮での海面蒸発の総量は、衛星観測に基づく全球海面フラックスデータセット Japanese Ocean Flux Data Sets with Use of Remote Sensing Observations ver3 (J-OFURO3)とおおよそ一致している（図1）。そこで、このシミュレーション結果を Control run（以下、CNTLと表記）として解析を行う。

先述のモデル設定のもとで黒潮の遠隔影響をより明確にするために、黒潮域の海面潜熱フラックスを除去（0に設定）する感度実験も併せて実施した。除去領域は、黒潮域の日平均海面潜熱フラックスの6日間積算値が $1,500 \text{ W m}^{-2}$ を超える領域を囲むように設定した（図1bの緑の枠内）。この潜熱フラックス除去実験を便宜上、No Latent Heat flux run（以下、NLHと表記）と定義する。

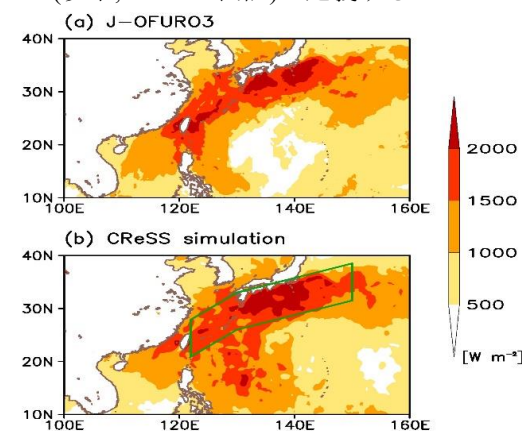


図1. (a) J-OFURO3 から計算した日平均海面潜熱フラックスの6日間積算値。陰影は海面潜熱フラックス $[\text{W m}^{-2}]$ を表し、黒潮域で高い値を示している。(b) (a)と同様であるが、CReSSのシミュレーション結果。NLHでは緑の枠で囲まれた領域の潜熱フラックスを除去した。

3. 台風と移動性高気圧の複合による水蒸気流入の強化 (CNTLの結果)

本事例では、台風が西日本へ接近する際に、日本付近を移動性高気圧が東進していた。台風と高気圧の間で気圧傾度が強まることに伴って、黒潮上で東寄りの下層風が形成・強化される（図2a, b, c）。下層風は寒冷かつ乾燥しているため、黒潮域の海面蒸発を活発化させる。また、鉛直積算水蒸気フ

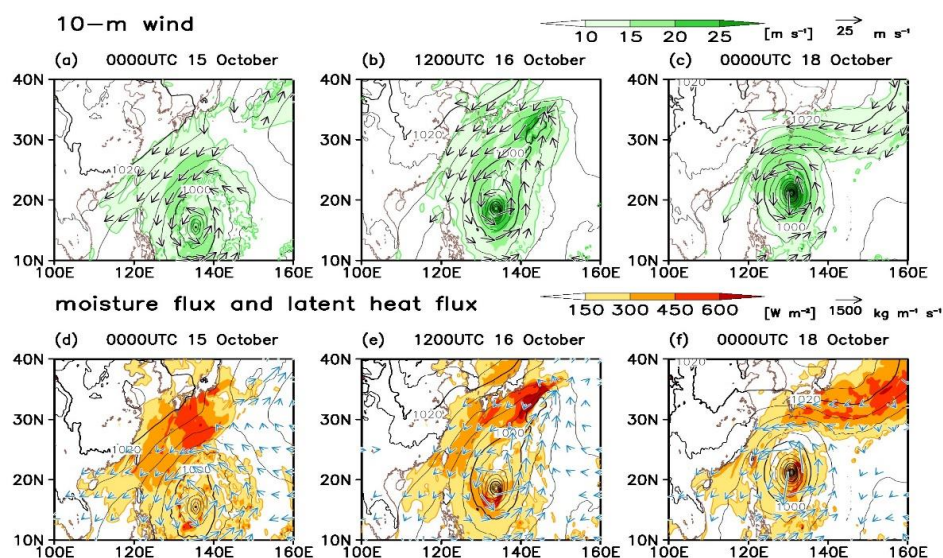


図2. (a)-(c) CReSS で再現された海上風 (ベクトル)及び海上風速 (陰影), SLP (等値線). 風速 10 m s^{-1} 未満は描いていない. (d)-(f) CReSS における鉛直積算水蒸気フラックス (ベクトル)及び海面潜熱フラックス (陰影), SLP (等値線). 水蒸気フラックスが $200 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 未満は描いていない.

ラックスに注目すると, ちょうど黒潮域から台風へ向かう流れが形成されていることが確認できる (図2 d, e, f). 上述の状況から, 黒潮域で蒸発した水蒸気が移動性高気圧にアシストされる形で 日本南海上の台風システム内へ流入している可能性がある.

そこで, 黒潮域から壁雲やレインバンドに供給される水蒸気の輸送過程を調査するために, 後方流跡線解析を実施した. 流跡線解析の初期時刻は 12 時間あたりの台風中心気圧の降下率が最大となる時刻 (17 日 1500 UTC)とする. このときアウターレインバンドは半径 700 km 付近にまで分布していたため, 空気塊は台風中心から 700 km 以内において潜熱加熱率が 5 K h^{-1} を超える領域に配置した. 初期高度は方位角平均した潜熱加熱率が最大となる高度 6 km とし, 2 日間 (15 日 1500 UTC まで)遡って計算した.

図3 a は全空気塊と典型的な空気塊の後方

流跡線を, 図3 b では典型空気塊の変質過程を調べるために関連する物理量 (高度, 潜熱フラックス, 水蒸気混合比, 温位)を示す. 遠方に位置する台風へ向って, 黒潮域から多くの空気塊が前述の下層風に沿って流入している. 図3 b では, ちょうど黒潮直上を吹送する際に黒潮からの水蒸気供給を受けることで, 混合比が約 12 g kg^{-1} 増加し, 湿潤化している様子が確認できる (地点 ③ - ⑤). その後, 湿潤となった空気塊は台風システム内へ取り込まれ, 凝結に伴い水蒸気を脱落させると同時に, 多量の潜熱を放出することで温位を急激に上昇させている (地点 ①). これらの結果から, 秋台風の発達に対して黒潮の遠隔影響が存在することが示唆される. このような遠隔影響の定量的評価ならびに詳細な力学プロセスの解明を行うために, CNTL と NLH における台風の発達過程を次節で比較する.

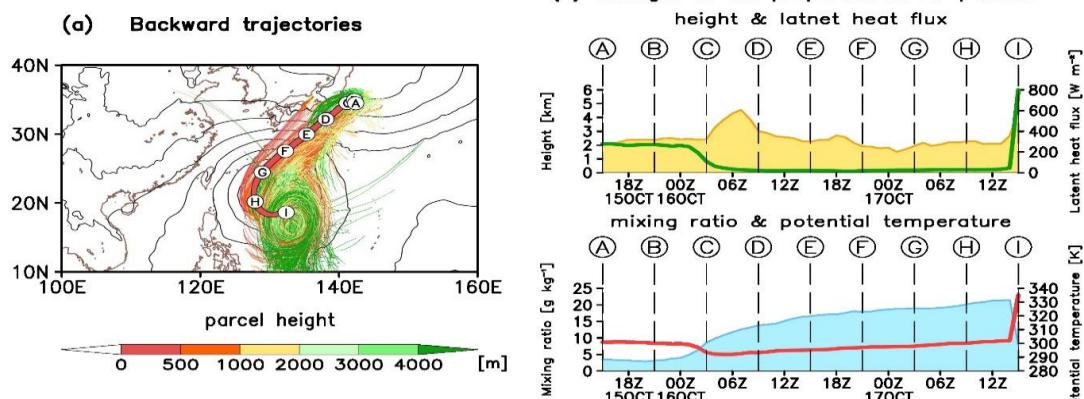


図3. (a) 全空気塊の後方流跡線 (細線)および典型空気塊の後方流跡線 (太線), 17 日 1500UTC における SLP 分布 (等値線). 流跡線の色は各空気塊の高度 [m]を示す. (b) 典型空気塊の特性の時間変化. 上図は緑線が高度 [km], 陰影が潜熱フラックス $[\text{W m}^{-2}]$, 下図は赤線が温位 [K], 陰影が水蒸気混合比 $[\text{g kg}^{-1}]$ を表す. 図3a に記されている記号① - ⑩は, 図3b の時刻と対応している.

4. 台風の発達期における黒潮の遠隔影響 (CNTLとNLHの比較)

4-1. 水蒸気流入の変動と台風発達の変動

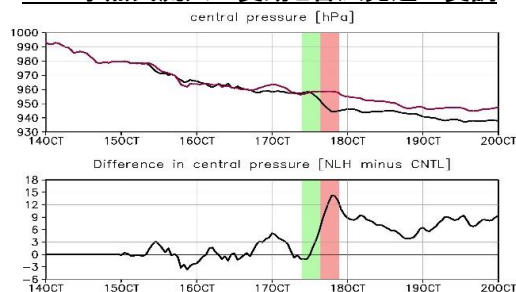


図 4. CNTL および NLH における台風中心気圧の時系列図。黒線は CNTL、紫線は NLH を示す。緑色の期間は発達期前半、赤色の期間は発達期後半を表す。下図は、両者の中心気圧差 (NLH - CNTL) の時間変化を表している。

図 4 は CNTL と NLH における台風中心気圧の時系列を表す。NLH では台風強度が相対的に弱い傾向を示した。特に 17 日 0900 UTC から 2100 UTC に注目すると、発達期の仕方に大きな差が現れている。CNTL の台風は中心気圧が急激に低下している一方で、NLH の中心気圧はほぼ横ばいになっている。また発達期を前半 (17 日 0900 UTC から 1500 UTC) と後半 (17 日 1500 UTC から 2100 UTC) に分け、台風の構造変化に着目すると、CNTL では最大風速半径の縮小、最大風速の増加、動径風速の強化など発達期に特有の特徴が見られた (図 5 a, b)。加えて、急激な強度・構造変化に対応して内部コアの CAPE が急速に消費されていた (図 5 c)。一方で、NLH では台風の内部構造に大きな変化はなく、CAPE も消費されていない (図 5 d, e, f)。更に、発達期における内部コアの潜熱加熱の総量にも CAPE 等の差と整合的な違いが確認できた (図略)。NLH では、黒潮域の海面蒸発のみを考慮していないので、黒潮からの水蒸気

流入量の減少が凝結量の減少を介して台風の発達抑制を引き起こした可能性がある。

しかしながら、水蒸気流入量の減少と凝結量の減少が 1 対 1 に対応するとは限らない。両者の関係性に関して、内部コア (半径 350 km 以内) における水蒸気フラックス収束と潜熱加熱率の時系列図を用いて検証する。図 6 によると水蒸気フラックス収束と潜熱加熱率の変動傾向は CNTL, NLH とともに概ね一致しており、相関係数は CNTL では 0.80, NLH では 0.77 となっている。つまり、内部コアにおける凝結量の変動が水蒸気フラックス収束に大きく左右されていると解釈できる。発達期においては、CNTL の台風中心気圧が低下する直前に、水蒸気フラックス収束及び潜熱加熱率が急激に増加しており、NLH ではその特徴がみられない。つまり、水蒸気流入量の減少が潜熱加熱の抑制を介して、台風の発達抑制をもたらす要因の一つとなったと考えられる。上述のオイラー的解析手法から得られた結果と同様な結果がラグランジュ的診断手法である前方流跡線解析からも確認されている (詳細は省略)。

4-2. 乾燥空気の流入と台風内部環境の変化

図 7 は発達期のちょうど中間の時刻 (17 日 1500 UTC) において方位角平均した相当温位、潜熱加熱率、鉛直安定度を表している。CNTL と比較して NLH では、水蒸気流入量の減少に対応して、低相当温位領域の侵入が CNTL よりも顕著であり、潜熱解放も抑制されている (図 7 a, b)。また、内部コアの相当温位勾配からも NLH の対流不安定は相対的に弱い (図 7 c, d)。以上の結果から NLH においては、低相当温位の空気塊が台風内部に流入したことで、台風システム内の鉛直安定度が増加し、壁雲等における対流を抑制させることで、台風が相対的に弱化したと考えられる。

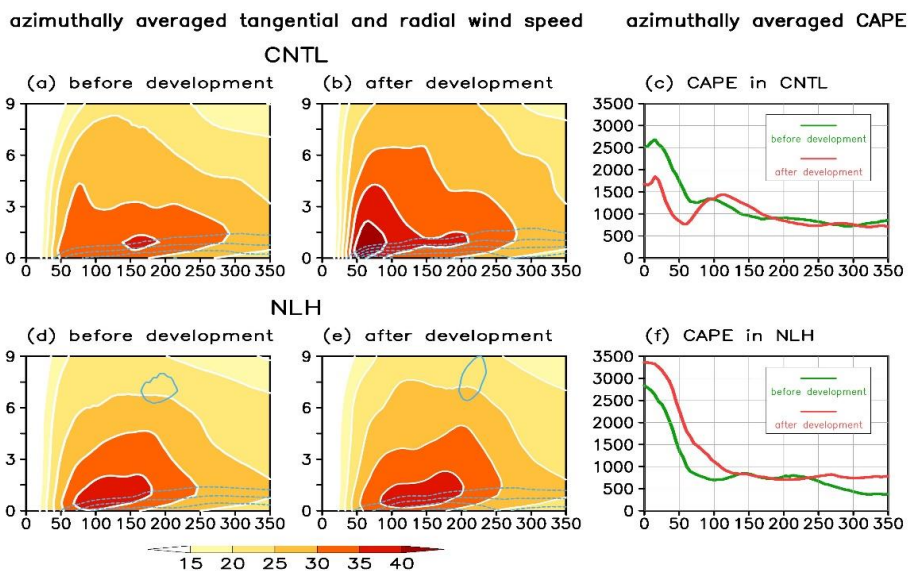


図 5. (a) CNTL の台風発達期前半における方位角平均した接線風速 (陰影) と動径風速 (コンター)。ただし 6 時間平均値。コンターは 2 m s^{-1} 間隔で描いており、 0 m s^{-1} は表記していない。縦軸は高度 [km]、横軸は台風中心からの距離 [km] を表す。(b) (a) と同様であるが、発達期後半のもの。(c) CNTL の方位角平均した対流有効位置エネルギー (CAPE)。緑線は発達期前半、赤線は発達期後半の 6 時間平均値を表す。縦軸は CAPE [J kg^{-1}]、横軸は台風中心からの距離 [km] を表す。(d) - (f) (a) - (c) と同様であるが、NLH の結果。

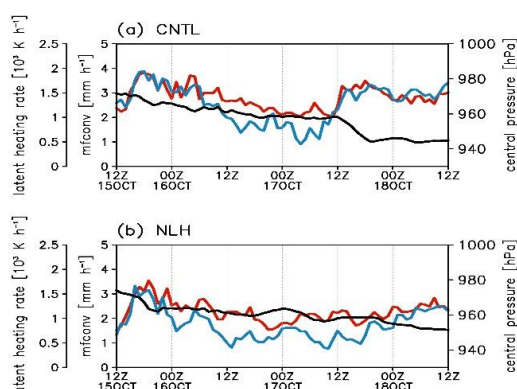


図 6. (a) CNTL の内部コアで領域平均した水蒸気フラックス収束 (青線)、潜熱加熱率 (赤線)ならびに中心気圧 (黒線)の時系列図。水蒸気フラックスと潜熱加熱率はモデル下端から上端まで鉛直積分している。(b) (a)と同様であるが、NLH の結果。

5. まとめ

本研究では、非静力学領域雲解像モデル (CReSS) を用いて台風の発達期における黒潮の遠隔影響を調査した。事例解析として、2004 年 10 月に発生した台風 23 号 (Tokage) に注目した。台風と移動性高気圧による気圧傾度の強化により、黒潮域で東寄りの下層風が形成・強化されていた。後方流跡線解析によると台風の壁雲やレインバンドに供給される水蒸気の一部は、黒潮域で水蒸気供給を受けた湿潤空気塊によってもたらさ

れている。また、その湿潤な空気塊は、台風内部で上昇流に捕獲されることで、凝結に伴う潜熱解放により台風の発達に寄与している可能性があること示唆された。

そこで、黒潮域の潜熱フラックスを除去する感度実験 (NLH) を実施したところ、台風が相対的に弱化する傾向を示し、特にその差は発達期に顕著に現れていた。NLH では、黒潮域からの水蒸気流入量の減少に伴って、低相当温位の空気が台風内部に侵入することで、内部コアの鉛直安定度を増加させていた。その結果、壁雲での対流活動が抑制され、急速な発達が妨げられたと考えられる。上述の結果は、オイラー的またはラグランジュ的解析の双方によって確認されている。

本研究の一連の結果は、移動性高気圧をはじめとする中緯度総観規模システムの振る舞いが、黒潮での水蒸気供給を介して、台風の発達や構造変化に影響を与えていることを強く示唆するものである。このような背景場の季節変化に規定される遠隔海域からの水蒸気輸送プロセスと台風強度の関係性の解明が、台風強度の予測可能性の限界について重要な知見を与えるかもしれない。上述の仮説を検証するために、今後は他事例での数値実験 (2017 年台風 18 号や同年台風 21 号) ならびに潜熱フラックスの除去割合を変化させた感度実験を実施する予定である。

azimuthally averaged equivalent potential temperature and latent heating rate

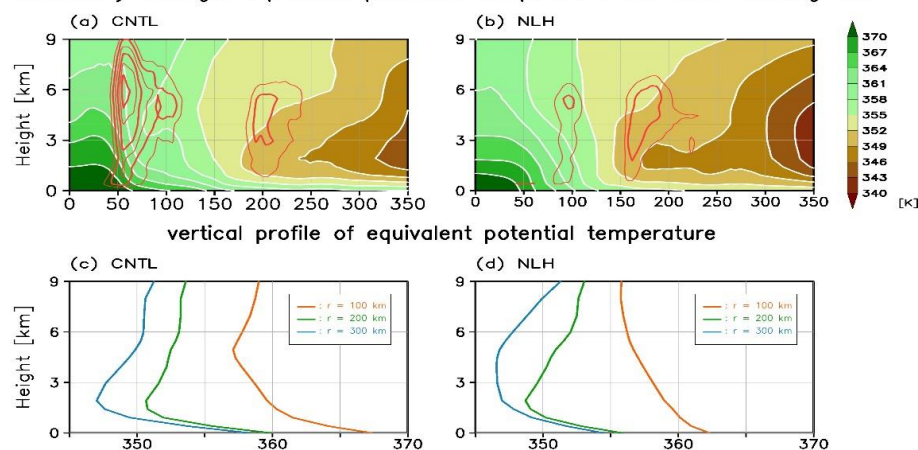


図 7. (a) 17 日 1500 UTC における CNTL の方位角平均した相当温位 (陰影) および潜熱加熱率 (コンター)。コンターの間隔は 5 K h^{-1} であり、 5 K h^{-1} 未満は描いていない。縦軸は高度 [km]、横軸は台風中心からの距離 [km] である。(b) (a)と同様であるが、NLH の結果。(c) 台風中心から 100 km (橙線)、200 km (緑線)、300 km (青線) における方位角平均した相当温位の鉛直プロファイル。縦軸は高度 [km]、横軸は相当温位 [K] を表す。(d) CNTL と同様であるが、NLH の結果。

参考文献

- Fujiwara, K., Kawamura, R., Hirata, H., Kawano, T., Kato, M., Shinoda, T. (2017), *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, doi:10.1002/2017JD027557
- Hedge, A. K., Kawamura, R., Kawano, T. (2015), *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-015-2859-8.
- Kudo, T., Kawamura, R., Hirata, H., Ichiyangi, K., Tanoue, M., Yoshimura, K. (2014), *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 8825-8838.
- Makarueva, A. M., Gorshkov, V. G., Nefiodov, A. M., Chikunov, A. V., Sheil, A., Nobre, A. D., Li, B. L. (2017), *Atmos. Res.*, **193**, 216-230.

- Takakura, T., Kawamura, R., Kawano, T., Ichiyangi, K., Tanoue, M., Yoshimura, K. (2017), *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-017-3626-9.

謝辞

今回の京都大学防災研究所一般研究集会 (29K-06) への参加にあたり、京都大学防災研究所より旅費の補助を受けました。この場を借りて、お礼申し上げます。シミュレーション結果の再現性の検証の際に、J-OFURO3 を利用させていただきました。データの提供に感謝致します。また、本研究集会において貴重な質問ならびにコメントを下された皆様へ感謝致します。