ダウンスケール実験で再現された低緯度におけるハリケーン強化過程の解析 *吉岡大秋(京都大学大学院理学研究科)・榎本剛(京都大学防災研究所)

1 はじめに

一般に低緯度で台風は発生しない(台風強度ま で発達しない)とされている(Anthes 1982; McBride 1995)が、台風の発生および強度発達に 重要とされる条件(Gray 1968)のうち、「惑星渦 度が大きい」という条件を満たしていなくても台 風が発生(台風強度まで発達)することがある。 本研究では、その頻度と分布について観測事実を 示した後、特定の事例についてシミュレーション を行い、その発達過程について調べる。

1.1 観測事実

図1にWMOのベストトラックデータ International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS; Knapp *et al.* 2010) -v03r09を用いて、1991年から2010年までの間 に西太平洋及び多島海域で発生した台風の位置 を示す。IBTrACSに記録されている当該期間、当 該海域では、9個(およそ2年に1個)が北緯5 度から南緯5度までの領域(赤道域)で発生した。



図 1, 1997 年から 2010 年の台風発生位置の分布 (IBTrACS-v03r09)。赤丸印で、南緯 5 度から北緯 5 度で 発生したものを示す。

これまで赤道域で発生した台風(赤道台風)に ついては、北緯 1.5 度で発生した、2001 年台風 26 号 VAMEI について、Boruneo 渦との関連から多 く研究されている(Liu *et al.* 2010; Chambers and Li 2007)。しかし、Chang *et al.* (2003) では、環境場(Cold surge)が大きく影響してい る特殊な状況のため、赤道台風一般の理解につい ては、他事例の解析の必要性を示唆している。

1.2 数値シミュレーション

非静力学モデルを用いたシミュレーション研 究に注目すると、National Centers for Environmental Prediction (NCEP) や他の機関の 現業予報で用いられている領域モデル WRF

(Skamarock *et al.* 2008) によって、これまで 様々な台風を対象とした研究が行われており、台

風発生の再現に多くの実績がある (Ge et al. 2013; Hogsett and Zhang 2010)。その中でもYi and Zhang (2010) は、1.1 で記した赤道台風 VAMEI の数値実験と感度実験を行い、その結果を示した。 また、Hamill and Galarneau (2013)では、2005 年ハリケーン RITA を対象にダウンスケール実験 (DS 実験)を行った。初期値、境界値には全球 アンサンブルデータ NOAA's 2nd-generation global ensemble reforecast dataset (GEFSR2; Hamill et al. 2015) を、領域モデルには WRF-ARW v3 を利用し、GEFSR2 で再現されている台風強度 よりも、WRF でダウンスケールした台風強度がべ ストトラックに近づく結果が示した。この手法で は、摂動を与えた複数の初期値・境界値による実 験を行うため、その実験結果の不確かさを解析出 来る利点がある。

1.3 ハリケーン PALI

2016年1月に中部太平洋で赤道台風、ハリケ ーン PALI が発生した。Joint Typhoon Warning Center (JTWC) によるハリケーン PALI のベスト トラックを図2に示す。PALI は、7日 12Z に熱帯 低気圧強度に、その6時間後の7日 18Z に北緯 4.4度で台風強度に発達した。その後北上しなが ら発達し、12日 18Z に中心気圧が 977hPa、最大 風速 43.7ms⁻¹の最盛期を迎えた。その後、強度 を弱めながら南下し、15日 12Z に消滅した。

本研究では、このハリケーンを対象にDS実験 を行い、その発達過程を調べる。



2 研究手法

2.1 アンサンブルダウンスケール実験

2.1.1 実験設定

本研究では、全球アンサンブルデータ GEFSR2 を用いて初期値を複数用意し、領域モデル WRF による DS 実験を行った。

GEFSR2 は、NCEP の現業モデルである Global Ensemble Forecast System (GEFS) を用いたデー タセットである。このデータセットについての情 報は表1に示す。土壌データ及び海面水温は、 NCEP Final Operational Global Analysis data の計算初期時刻にあたる時刻の値を、全てのメン バーに共通に与え、大気のみに摂動を持つDS 実 験を行った。

表1. 初期値・境界値について

大気データ	GEFSR2
土壌データ	NCEP FNL analysis
水平格子サイズ	1度×1度
鉛直層数	11 (下端 1000hPa 上端 10hPa)
メンバー数	11
データ同化手法	ETR (Wei <i>et al.</i> 2008)

本研究では、領域モデルとして WRF-ARW v.3.6.1を用いた。PALIのトラックを覆うような 計算領域を設定した(図2)。水平解像度は10km と、最新の研究と比較してやや大きめに設定し、 積雲対流パラメタリゼーション(Kain-Fritsch scheme, Kain 2004)を使用した。境界層スキー ムには、Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino(MYNN) Level 2.5(Nakanishi and Niino 2006)を用いた。 また、6時間毎に摂動を与えた境界値で強制して いる。主要なDS実験設定を、表2に示した。

表 2. DS 実験設定

モデル	WRF-ARW v3.6.1
水平格子サイズ	10 km $\times 10$ km
水平格子数	250 × 250
鉛直格子数	40 (下層を密に)
タイムステップ	30 秒
積雲対流	Kain-Fritch scheme
パリスタリピーション	
境界層スキーム	MYNN Level 2.5
計算初期時刻	2016年1月6日00Z
予報期間	8日間

2.2 トラッキング手法

本研究では、850hPa高度の1辺が500kmの正方 形領域の面平均相対渦度が最大になる点を、計算 初期時刻のハリケーンの位置とし、それ以降は前 の時刻から150km以内の地点で同様の点を検索 することで、DS 実験でのトラックを作成した。

3 結果

3.1 強度変化

図3に、ハリケーン強度(最大風速)の時間変 化を、また表3に、再発達期の予報誤差(ベスト トラックとの二乗平均平方根誤差, RMSE)を示し た。現実のハリケーン(赤線)は72時間と168 時間付近に2度の発達をしている。0~108時間 を発達期、108~168時間を再発達期と呼ぶ。現 業予報(点線)は、発達期のピークはよく表現さ れているが、再発達期は全く表現されていない。 DS実験(実線、灰)は、発達期の強度が過大に なっている一方、再発達期の強度は現業予報より 良く表現出来た。



図 3. ハリケーンの強度(最大風速)の時間変化。赤でベス トトラック、点線で現業予報のアンサンブル平均値、 実線で DS 実験のアンサンブル平均値、灰で DS 実験 のアンサンブルメンバーの最小値と最大値の幅、青で 再発達期誤差最小のメンバーを示す。

表 3. ハリケーン再発達期の強度予報誤差

種類	誤差(RMSE, m/s)
現業アンサンブル平均値	20. 54473
DS 実験アンサンブル平均値	10. 17813
DS 実験誤差最小メンバー	6. 251342

最大風速は台風強度の指標としてよく用いら れているが、ある高度で面的構造を持つ台風の渦 の全体像を捉えることは出来ない。そこで、図4 に、DS実験それぞれの相対渦度(1辺500kmの正 方形領域の850hPa高度面平均相対渦度)の時間 変化を示した。最大風速で見た場合と同様に、再 発達期誤差最小メンバーは予報初期を除いてア ンサンブル平均値よりも相対渦度の値が大きく なっている。このことから、水平面的にみても渦 の強度や構造が維持、発達していることが分かる。



図 4. ハリケーンの強度(相対渦度)の時間変化。実線でDS 実験のアンサンプル平均値、灰でDS実験のアンサンプ ルメンバーの幅、青で再発達期誤差最小のメンバー(図 3と同メンバー)を示す。

3.2 構造変化

図5に、誤差最小メンバーで再現されたハリケ ーンの方位角平均した鉛直構造のうち、発達期ピ ーク時(48予報時間)、再発達期開始時(108予 報時間)、再発達期ピーク時(144予報時間)の 様子を示す。この期間を通して接線風速の最大は、 半径50km、高度1km付近に位置しており、上昇 風が最大となる半径と一致している。発達期ピー ク時は、半径40~60km、高度7~14kmにメソγ スケールの流れがあり、高度が上がるに連れ、上 昇風の強い領域が中心から外向きに傾いている ことが分かる。一方で、再発達期開始時以降は、 上昇風が特に強い領域が直立しており、高度 14km付近に明瞭な発散場(アウトフロー)、及び 二次循環が確認出来た。



鉛直風(cm/s)と動径風(m/s)を示す。

図6に、DS実験誤差最小メンバーの発達期(0~48予報時間平均)及び、再発達期(96~144 予報時間平均)の方位角平均した鉛直構造(相対 渦度、温度偏差)を示す。最大接線風速半径はそ れぞれ半径50km、半径80km付近に位置してい る。これはおよそ4.0×10⁻⁴s⁻¹の相対渦度や、暖 気核(温度偏差が正)と一致している。このこと から、最大風速と最大風速はその程度のサイズの 渦によって定義されている可能性が示唆される。

発達期と再発達期を比べてみると、再発達期の 方が、最大接線風速半径で定義した場合のサイズ が大きく、暖気核が高高度に位置している様子が 見て取れる。一方、暖気核は発達期の方が強くな っている。DS実験では再発達期の渦の内部構造 (暖気核の発達)の再現が不十分であるために、 実際のハリケーンよりもハリケーン強度の発達 率及び最盛期のハリケーン強度が上手く再現出 来たなかったと推測される。



図 6. 発達期及び再発達期の DS 実験誤差最小メンバーのハ リケーンの方位角平均した鉛直構造の様子。左上・右上 ではシェードで相対渦度(104×s⁻¹)、左下・右下ではシェ ードで温度偏差(K,各高度の半径方向の平均値からの偏 差)を示す。また、いずれも緑コンターで接線風速(m/s)、 灰コンターで最大接線風速半径(km)。

4.まとめ

本研究では、全球アンサンブルデータ GEFSR2 を領域モデル WRF-ARW を用いてダウンスケール することで、2016年1月7日に発生し、2度発達 したハリケーン PALI の予報実験を行った。発生 時刻の約2日前の1月6日を計算初期時刻に設定 した8日間予報によって、PALI の初期擾乱が台 風強度まで発達する様子を再現することが出来 た。この結果から、ハリケーン PALI の最大接線 風速は、半径50km~80km 程度の渦によって定義 されていることが分かった。しかし、その内部構 造の再現が不十分であるため、再発達期の発達率 や最盛期の強度を十分に再現することができな かった。このことから、最大接線風速半径より内 側の領域を渦度収支解析などによって詳細に解 析することが今後の課題として残されている。

参考文献

Chambers, C. R. S., and Li, T. 2007: Simulation of formation of a near-equatorial typhoon Vamei (2001). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(1), 67-80.

Chang, C.-P., C.-H. Liu, and H.-C. Kuo. 2003: Typhoon Vamei: An equatorial tropical cyclone formation, Geophys. Res. Lett., 30, 1150, doi: 10.1029/2002GL016365.

Emanuel, K., and Nolan, D. S., 2004: Tropical cyclone activity and the global climate system. In 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 240-241.

Hamill, T., and T., Galarneau, 2013: GEFS reforecasts: a data set suitable for initializing retrospective WRF forecasts, NOAA ESRL, Physical Sciences Division.

Hamill, T., Bates, G., Whitaker, J., Murray, D., Fiorino, M., and Galarneau, T., 2015: Description of the 2nd-Generation NOAA Global Ensemble Reforecast Data Set, NOAA Earth System Research Lab, Physical Sciences Division Bouder, Colorado, USA.

Hogsett, W., and Zhang, D. L., 2010: Genesis of Typhoon Chanchu (2006) from a westerly wind burst associated with the MJO. Part I: Evolution of a vertically tilted precursor vortex. Journal of the Atmospheric Sciences, 67(12), 3774-3792.

Kain, J. S., 2004: The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. Journal of Applied Meteorology, 43(1), 170-181.

Liu, G. R., C. C. Liu, C. S. Huang, T. H. Lin, W. J. Chen, and C. C. Chao, 2010: Diagnosing the growth of equatorial Typhoon Vamei (2001) from an energy standpoint. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 21, 817-827, doi: 10.3319/TAO.2009.12.03.01(A)

Min, C., and Yongguang, Z., 2004: Vorticity budget investigation of a simulated long-lived mesoscale vortex in South China, Adv. Atmos. Sci., 21, 928, https://doi.org/10.1007/BF02915595

- Murakami, H., and Sugi, M., 2010: Effect of model resolution on tropical cyclone climate projections. Sola, 6, 73-76.
- Nakanishi, M., and H. Niino, 2006: An improved Mellor-Yamada level-3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. Bound.-Layer Meteor., 119, 397– 407.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Dudha, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, Y. (2008). A description of the advanced research WRF Ver. 30. NCAR Technical Note (p. 113). NCAR/TN-475.
- Yi, B., and Zhang, Q., 2010: Near-equatorial typhoon development: Climatology and numerical simulations, Adv. Atmos. Sci. 27: 1014., https://doi.org/10.1007/s00376-009-9033-3.