

低緯度におけるハリケーン強化過程のダウンスケール実験

Downscale Experiments of the Hurricane Intensification at Low Latitudes

吉岡大秋⁽¹⁾・榎本剛

Hiroaki YOSHIOKA⁽¹⁾ and Takeshi ENOMOTO

(1) 京都大学大学院理学研究科

(1) Graduate School of Science, Kyoto University, Japan

Synopsis

The influence of the Coriolis force influence on the intensity of Hurricane PALI that was generated at 4.4°N on 18Z 7 January 2016 was examined. Ensemble downscale experiments were conducted using the nonhydrostatic meso-scale numerical model, the Weather Research and Forecasting Model (WRF), with horizontal resolution of 10 km from the initial states derived from 11 ensemble members of NOAA's 2nd-generation global ensemble reforecast dataset. Sensitivity to the intensity is identified by initial time from 00Z 1 January to 00Z 10 every 24 hours. All disturbances with different develop to the intensity of Tropical cyclone (17.0 ms^{-1}). By changing initial time, the score of root mean square error of maximum wind speed has changed and 00Z 3 (about 5days before PALI genesis) is including the best score member. In the best member experiment, an analysis was carried out by selecting the stagnation period and the development period. Super-gradient wind, which means that tangential wind speed is larger than gradient wind speed, during the development period is larger than during the stagnation period.

キーワード: 熱帯低気圧, ハリケーン, 強度, 傾度風平衡

Keywords: Tropical Cyclone, Hurricane, Intensity, Gradient Wind Balance

1. はじめに

台風は、総観スケールからメソ対流スケールまで様々な空間スケールの現象が関連しあって発生する。Gray (1968) では、台風が発生する環境場の条件を下記の 6 つに分けて提案している。

- 条件1. 海面水温が 26℃から 27℃以上
- 条件2. 下層が条件付き不安定
- 条件3. 下層に低気圧性循環が存在する
- 条件4. 風の鉛直シアが弱い
- 条件5. 中, 下層が高湿度, 上昇流域
- 条件6. 惑星渦度が大きい

また、台風強度の発達についての理論も複数提唱されている。例えば、Ooyama (1964, 1969) では、下記の条件が提案されている。

- 条件7. 壁雲付近の対流有効位置エネルギー (Convective Available Potential Energy, CAPE) が大きい

これらの台風の発生および強度発達に重要とされる 7 条件のうち、本研究では条件 6 「惑星渦度が大きい」に着目した。Anthes (1982), McBride (1995) でも、「低緯度で台風は発生しない (台風強度まで発達しない)」と述べられている。

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、1981 年から 2015 年までの全海域の台風発生 (TCG; Tropical Cyclone Genesis) 位置を確認した。その一部を Fig. 1 に示した。当該期間には、2004 個の TCG が記録されており、その位置のほとんどは北緯 5 度以北及び、南緯 5 度以南であった。また、Fig. 2 に、コリオリパラメータが等間隔となるような緯度帯を定め、それぞれに該当する TCG を、北半球についてカウントした結果を示した。北半球では当該期間に 2004 個 TCG が記録されているが、確かに中緯度 (北緯 10 度-北緯 12 度 348 個, 北緯 12 度-北緯 14 度 403 個) で TCG が多い一方、低緯度 (赤道-北緯 2 度 2 個, 北緯 2 度-北緯 4 度 11 個) では圧倒的に発生数が少なかった。言い換えると、稀であるが、惑星渦度が小さい領域でも、台風が発生する可能性があることが分かった。

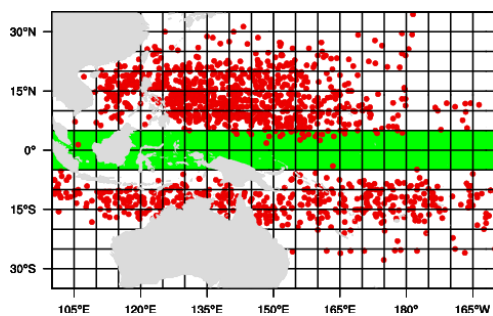


Fig. 1 Locations of Tropical Cyclone Genesis (TCG) during 1981 and 2015 in IBTrACS-v03r09.

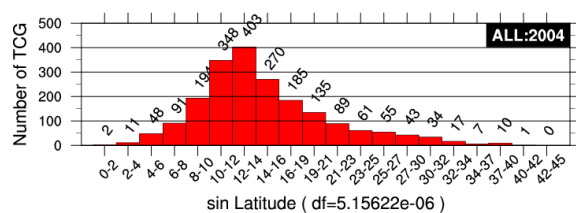


Fig. 2 TCG numbers during 1981 and 2015 in the Northern Hemisphere by IBTrACS-v03r09. Sin latitude rounded off to the nearest whole number in Y-axis.

これまで、実際に低緯度で発生した台風では、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. 2009; 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、赤道域で発生する台風については他の事例の解析も必要性を示唆している。

また惑星渦度と台風については、DeMaria and

Pickle (1988) で、水平解像度 25km 鉛直 3 層の静力学モデルを用いた理想実験で、f 面を仮定して北緯 10 度、20 度、30 度、40 度と変化させた場合の実験を行い、低緯度の方がより急速に発達し、サイズが小さい台風になることが示されている。しかし、最先端の研究と比較すると、水平解像度が荒く、鉛直層数が少ないという問題点もある。

そこで、非静力学モデルを用いた研究に注目すると、これまで様々な台風を対象とした研究が行われてきた。Hamill and Galarneau (2013) では、全球アンサンブルデータ NOAA's 2nd-generation global ensemble reforecast dataset (GEFSR2; Hamill et al. 2013) を、領域モデル WRF-ARW v3 (Skamarock et al., 2008) を用いて、台風のトラックを研究対象としたアンサンブルダウンスケール実験を行った。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。また、WRF は、NCEP や他の機関の現業予報で用いられている領域モデルで、台風発生の再現を試みた研究にも、多くの実績がある (Ge et al. 2013; Hogsett and Zhang, 2010)。

そこで本研究では、現実には赤道域で発生したハリケーン (台風と同じ熱帯低気圧) を対象に、領域モデル WRF による全球アンサンブルデータ GEFSR2 のダウンスケール実験を行い、その強度メカニズムを解析することを目指した。

2. 研究事例

本研究では、2016 年 1 月に発生したハリケーン PALI を事例に解析を行った。Joint Typhoon Warning Center (JTWC) による、ハリケーン PALI のトラックを Fig. 3 に、強度の時間変化を Fig. 4 に示した。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弱体化及び再発達し、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 (カテゴリー 2)。その後、強度を弱めながら南下し、15 日 12Z に消滅した。

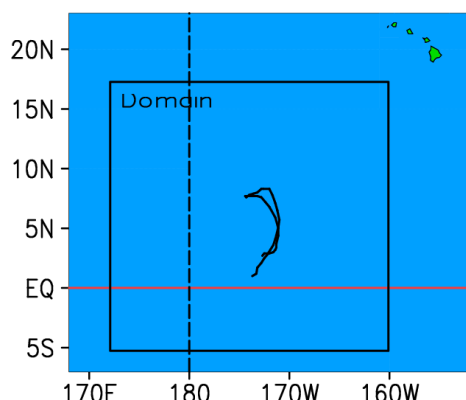


Fig. 3 Track of PALI by JTWC. A black rectangle indicates the experimental domain.

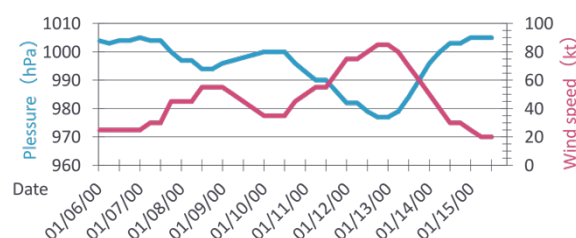


Fig. 4 Time series of hurricane intensity by JTWC. Blue line is central sea level pressure(hPa) and red line is maximum wind speed(kt)

3. 研究手法

3.1 ダウンスケール実験

3.1.1 実験設定

本研究では、全球アンサンブルデータ GEFSR2 を用いて複数の初期値を用意し、領域モデル WRF によるダウンスケール実験を行った。

GEFSR2 は、National Centers for Environmental Prediction (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。GEFSR2 に含まれていない、土壌データ及び海面水温は、NCEP Final Operational Global Analysis data の値を、全てのメンバーに共通の値として与え、大気のみ摂動を持つダウンスケール実験を行った。これらの初期値・境界値についての情報は、Table1 に示した。

Table 1 Initial data and boundary data for experiments.

Atmospheric Data	GEFSR2
Ensemble Member	11
Data Assimilation	ETR (Wei et al. 2008)
Soil and SST data	NCEP FNL analysis
Horizontal resolution	$1^{\circ} \times 1^{\circ}$
Vertical resolution	11 (From 1000hPa to 10hPa)
SST fixed at the initial time.	
Boundary data perturbed 6 hourly.	

本研究では、PALI のトラックを覆うような計算領域を設定した。ダウンスケールの計算領域を Fig. 3 に示した。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。この解像度では、全ての対流を陽に解像することは出来ないが、本研究の目的である台風発生までの擾乱の発達是十分解像され则认为られる (Murakami and Sugi, 2010)。また、6 時間毎に摂動を与えた境界値で強制している。その他の設定も含め、主要なダウンスケール実験設定について、Table2 に示した。

Table 2 Model configuration.

Model	WRF-ARW v3.6.1
Horizontal resolution	10km×10km
Number of grids	250×250×40
Time step	30 seconds
Initial time	00Z 06 January 2016 to 00Z 10 every 6 hour
Forecast time	8 days
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch scheme

3.2 トラッキング手法

本研究では、850hPa 高度の 1 辺が 200km の正方形領域の面平均の正の相対渦度が最大になる点を、計算初期時刻の台風の位置とした。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し、ダウンスケール実験におけるハリケーンのトラックを作成した。

3.3 傾度風平衡

ハリケーンの場合、風は比較的曲率半径の小さいカーブを描くように吹くため、円運動と近似した (1) 式で示される傾度風平衡が成り立つと考えられる。

$$\frac{Du}{Dt} - \frac{v^2}{r} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + F_r \dots (1)$$

u : 動径風 t : 時間 v : 接線風速 (傾度風)

f : コリオリパラメータ ρ : 密度 r : 半径 p : 気圧

F_r : 摩擦力項

摩擦のない自由大気では左辺第二項, 第三項, 右辺第一項近似的に成り立つため, その場合の傾度風を (2) 式で求めることができる.

$$v = -\frac{fr}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}} \dots (2)$$

ここで低気圧性循環の場合, 右辺第二項は北半球では正, 南半球では負を選択する. 現実のハリケーン (台風) では, 傾度風平衡を仮定した場合の傾度風よりも大きな接線風速 (超傾度風) となることがある. これは, 1 で記した条件 7 によってハリケーンの中心 (壁雲) 付近で対流が活発となり, 中心方向の動径風が無視できない値 ((1) 式左辺第一項) にな

る場合に超傾度風になると考えられ, ハリケーンの発達を考慮する際に重要であるとされる.

4. 結果

4.1 再解析データ解析結果

初めに, 再解析データ ERA-interim を用いて, ハリケーン PALI がどのような環境場にあったかを解析した. 鉛直シア (1.1, 条件 4), 海面水温 (1.1, 条件 1) および CAPE (1.1, 条件 7) の, 2016 年 1 月 3 日及び季節 (DJF) 平均と, その差の分布を Fig. 4 に示した. ハリケーン PALI の付近は, 海面水温が高く, CAPE の値が大きい領域にあたるのが分かる. Gray (1968) で提案されているその他の条件もおおよそ満たされており, ハリケーンの発達に好都合な環境場であったが, 負の条件とされている鉛直シアが大きい領域であることが確認された.

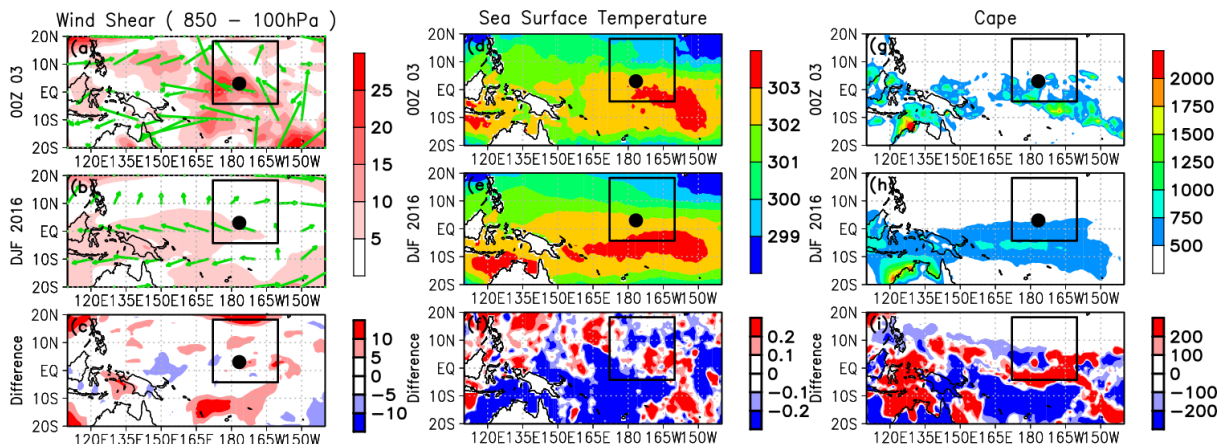


Fig. 5 Environmental condition around PALI by ERA-interim. (a), (b) and (c) show vertical wind shear (ms^{-1}), (d), (e) and (f) show sea surface temperature (K), (g), (h) and (i) show CAPE (Jkg^{-1}). (a), (d) and (g) are 00Z 03 2016, (b), (e) and (h) are DJF mean, (c), (f) and (i) are the difference between 00Z 03 and DJF. Black rectangles indicate the model domain and black points show the initial disturbance of PALI in 00Z 03.

4.2 ダウンスケール実験解析結果

4.2.1 強度変化

計算初期時刻毎の 11 メンバー及びアンサンブル平均とベストトラックの強度を比較し, 二乗平均誤差 (RMSE) を算出した. ここでは, ダウンスケール実験でのハリケーン強度 (地上 10m 風速の瞬間値) に, WMO のガイドライン (GUIDELINES FOR CONVERTING BETWEEN VARIOUS WIND AVERAGING PERIODS IN TROPICAL CYCLONE CONDITIONS) に示されているガストファクターを用いて 10 分間平均風速換算した値

をハリケーン強度とする. その結果のうち, 計算式時刻毎に RMSE が最も小さかったメンバー (Best member) とアンサンブル平均の RMSE を Table3 に示した. 計算初期時刻によって実験の成績に違いがあり, 03 日 00Z を計算初期時刻とした際, 最も成績の良いメンバーが含まれていた. 平均値ではより良い成績の計算初期時刻 (01 日 00Z) があったが, 個々のメンバーを解析することを主に行ったため, これ以降 03 日 00Z を計算初期時刻とした実験の解析結果を示す. また, 計算初期時刻を 10 日 00Z に近づけると, ハリケーンの再発達が予報時間に含まれるよう

になり、それを上手く再現することが出来ずに成績が悪くなったと考えられる。

Fig. 5 に、03 日 00Z を計算初期時刻としたダウンスケール実験での強度変化を示した。部分的に過大に発達している時間もあるが、予報時間 108 時間以降の発達期について、Best member はよく再現できていることが分かる。

Table 3. Experimental score (ms^{-1} , Root Mean Square Error) every initial time.

Initial time	Best member	Mean
00Z, 01	3.02	4.1
00Z, 02	3.06	4.44
00Z, 03	2.99	4.33
00Z, 04	6.4	6.97
00Z, 05	7.56	13.2
00Z, 06	8.15	10.25
00Z, 07	7.27	11.47
00Z, 08	9.52	13.05
00Z, 09	8.18	13.62
00Z, 10	14.15	16.22

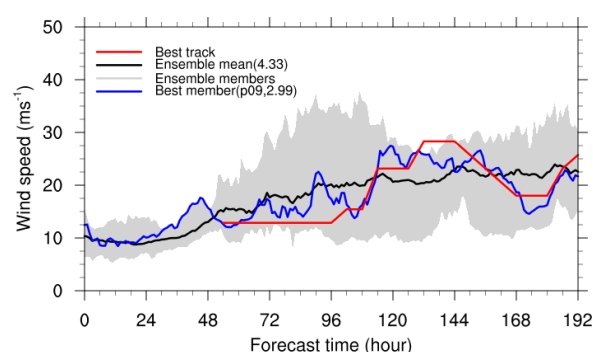


Fig. 6 Time series of hurricane intensity, wind speed(ms^{-1}). Red line is best track, black line is ensemble mean, blue line is best score member and gray shaded means maximum and minimum member.

4.2.2 トラック

Fig. 6 に、03 日 00Z を計算初期時刻にした場合のダウンスケール実験におけるハリケーントラックを示した。ベストトラック (Fig. 3) と同様に、赤道から北緯 5° 付近まで北上し、南下し始めるまでの様子が分かる。3.2 で記したように、北半球における低気圧性循環（正の相対渦度の極大値）を検索する手法を用いて追跡することが出来ているため、一部の時間で赤道以南の南半球領域に到達していることについて今回は考慮しない。

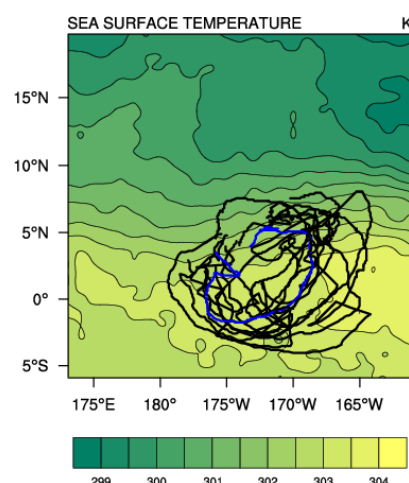


Fig. 7 Blue line is best score member, black lines are the other members. Sea surface temperature is indicated by shade.

4.2.3 ハリケーンの鉛直構造と傾度風平衡とのずれ

Fig. 8 に、Best member における停滞期（予報時間 48–96 時間）と発達期（予報時間 96–144 時間）の、時間平均したハリケーンの方角角平均鉛直断面図を示した。停滞期で高度 2km 付近に位置する温度偏差 1K 以上暖気核は、発達期では高度 2–6km 付近まで発達している。また、 $3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ の相対渦度で示される渦管も、発達期には鉛直方向に高度 8km 付近まで発達しており、風速で示される強度と構造が対応していることが分かる。また発達期では、下層（0–5km）の最大接戦風速半径が停滞期よりも内側に位置しており、渦が締ってきていることが推測できる。

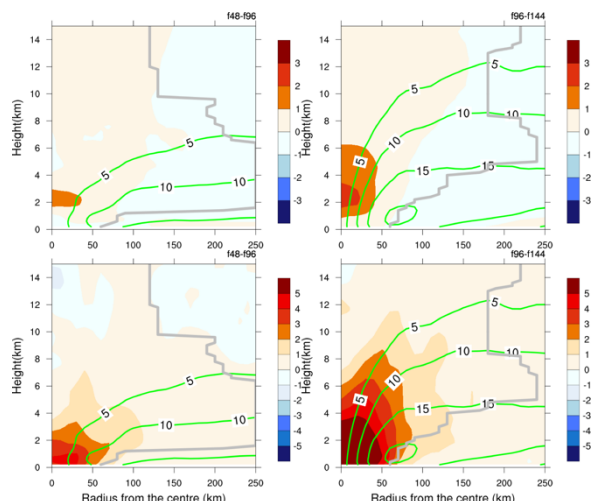


Fig. 8 Azimuth mean vertical structure by best member in downscale experiments. (a) and (b) show temperature deviation (K), (c) and (d) show relative vorticity ($\times 10^{-4} \text{s}^{-1}$). Green contour shows tangential wind speed (ms^{-1}) and gray contour shows radius of maximum wind speed. (a) and (c) show time average from FT48 to FT96, (b) and (d) show from FT96 to FT144.

Fig. 9 に、(2)式より算出された傾度風と接線風速と傾度風の差を、停滞期と発達期のそれぞれについて時間平均し、ハリケーンの方位角平均鉛直断面図で示した。暖気核や渦管（いずれも Fig. 8）同様、停滞期よりも発達期の方が、気圧傾度が大きくなるために傾度風が大きくなっていることが分かる。また、接線風速と傾度風との差は、いずれも半径 50–100km より外側、高度 4–5km まで正（超傾度風）となっている。しかし、そのずれの割合（超傾度風率）は、停滞期で最大約 13%、発達期で最大約 26% となっており、ハリケーン PALI のライフサイクルによって超傾度風率に違いがあることが分かった。

仮に傾度風平衡が完全に成り立っている場合、遠心力、コリオリ力、気圧傾度力が釣り合った定常状態を意味するので、ハリケーンは発達しない。しかし、今回のように現実のハリケーン（台風）では、何らかの理由で傾度風よりも大きい接線風速を取ることがある。これにはいくつかの理由が考えられ、一つには動径風の動径方向微分項（(1)式左辺第一項）が無視できず、傾度風平衡が適用できないということである。つまり、大気下層の強いインフローによって傾度風平衡の平衡点よりも内側に入り込んでくる流体粒子が出てくる。そのため、角運動量保存則から考えて、実際の接線風速が傾度風平衡から予想される風速よりも実際の接線風速が大きくなる。これは、Montgomery et al. (2006)の航空機による

観測結果でも得られている。今回のハリケーン PALI の事例では、強いインフローがどのように起こったのかを明らかにすることが、今後の課題となっている。

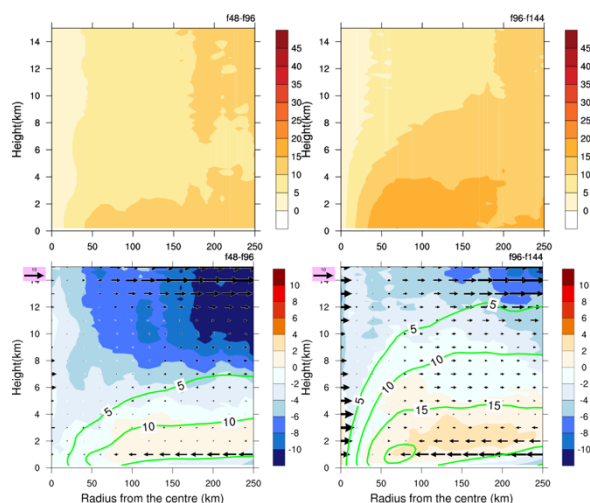


Fig. 9 Azimuth mean vertical structure by best member in downscale experiments. (a) and (b) show gradient wind (ms^{-1}), (c) and (d) show deviation between gradient wind and tangential wind speed (ms^{-1}). Green contour shows tangential wind speed (ms^{-1}). Vector shows radial wind speed (ms^{-1}). (a) and (c) show time average from FT48 to FT96, (b) and (d) show from FT96 to FT144.

5. 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 18Z に発生したハリケーン PALI の予報実験を行った。発生時刻の約 7 日前の 1 月 1 日 00Z から約 2 日後の 1 月 10 日 00Z まで 24 時間おきに計算初期時刻を設定してダウンスケール実験を行い、PALI の初期渦が台風強度まで発達する様子を再現することができ、計算初期時刻によってその成績に差があることが分かった。今回は、最も成績の良かった計算初期時刻（3 日 00Z）のあるメンバーを解析した結果を示した。ハリケーン PALI の初期の停滞期（予報時間 48–96 時間）と発達期（予報時間 96–144 時間）を比較すると、鉛直構造においても発達していることが分かり、傾度風平衡で仮定される風速よりも強い接線風速（超傾度風）の割合が大きくなっていることが分かった。

今後は、同実験内でのアンサンブルメンバーの詳細な比較、解析を行い、低緯度のハリケーン強度発達過程における、超傾度風の要因の解明及び強度予

報のバラつきへの影響を定量的に示すことを目指す。

謝 辞

本研究で行ったダウンスケール実験において、京都大学学術情報メディアセンターの大型計算機を使用しました。本研究はJSPS科研費JP26282111の助成を受けたものです。

参考文献

- Anthes, R., (1982): Tropical cyclones: their evolution, structure and effects. Vol. 19. Springer.
- Chambers, C. & Li, T., (2007): Simulation of formation of a near-equatorial typhoon Vamei (2001), *Meteorol. Atmos. Phys.*, 98: pp67. doi:10.1007/s00703-006-0229-0
- 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.
- Ge, X., T. Li, and M. Peng, (2013): Tropical cyclone genesis efficiency: Mid-level versus bottom vortex. *J. Tropical Meteorology*, 19 (3), pp197-213. IPRC-897.
- Gray, W. M., (1968): Global view of origin of tropical disturbance and storms. *Mon. Wea. Rev.*, 96. pp669-700.
- Hamill, T., and T., Galarneau, (2013): GEFS reforecasts: a data set suitable for initializing retrospective WRF forecasts Tom Hamill 1 and Tom Galarneau 2 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 Boulder, 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), pp3774-3792.
- Kain, J. S., (2004): The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), pp170-181.
- Knapp, K.R., M.C. Kruk, D.H. Levinson, H.J. Diamond, and C.J. Neumann, (2010): The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, pp363–376, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>
- 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, pp817-827, doi: 10.3319/TAO.2009.12.03.01(A)
- McBride, J. L., (1995): Tropical cyclone formation. *Global Perspective on Tropical Cyclones*, WMO Tech Doc. 693, World Meteorological Organization, pp63–105.
- Montgomery, M., M. Bell, S. Aberson, and M. Black, 2006: Hurricane Isabel (2003): New insights into the physics of intense storms. Part I: Mean vortex structure and maximum intensity estimates. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87 (10), 1335–1347.
- Ooyama, K., (1969): Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(1), pp3-40.
- 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.
- Wei, M., Toth, Z., Wobus, R. and Zhu, Y., (2008): Initial perturbations based on the ensemble transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system. *Tellus A*, 60: pp62-79. doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00273.x

(論文受理日 : 2018年6月13日)