

弱コリオリ力におけるハリケーン強度のアンサンブル予報実験

Ensemble Experiments of the Hurricane Intensity under Weak Coriolis Force

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 7 January 2016 was examined. Ensemble downscale experiments were conducted using the nonhydrostatic meso-scale numerical 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 augmenting the Coriolis parameter. All disturbances with different values of the Coriolis parameter develop to the intensity of Tropical cyclone (TC, 17 ms^{-1}). By changing Coriolis force, the intensity and size of hurricane changed especially at the mature stage, but the tracks were almost the same during forecast time. Our sensitivity experiments suggest that TCs with larger Coriolis force increased in size, but it does not necessarily make TCs stronger. Moreover, it is found that the spread of TC intensity varies with the Coriolis force.

キーワード: 熱帯低気圧, ハリケーン, 強度, アンサンブルスプレッド, コリオリパラメータ

Keywords: Tropical Cyclone, Hurricane, Intensity, Ensemble spread, Coriolis parameter

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°C から 27°C 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。

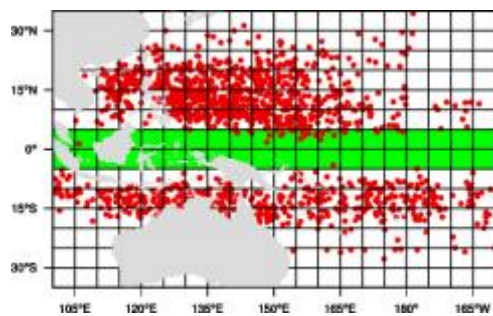


Fig. 1 Locations of Tropical Cyclone Genesis (TCG) during 1981 and 2015 in IBTrACS-v03r09.

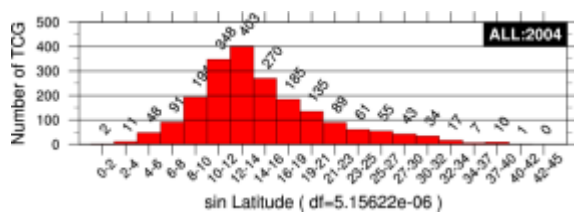


Fig. 2 TCG numbers during 1981 and 2015 in the Northern Hemisphere by IBTrACS-v03r09. Sin latitude rounded off to the nearest whole number in Y-axis.

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、コリオリ力 (惑星渦度) がハリケーンの強度にどのように影響しているか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 のベストトラックを Fig. 3 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-2)。その後、強度を弱めながら南下し、15 日 12Z に消滅した。

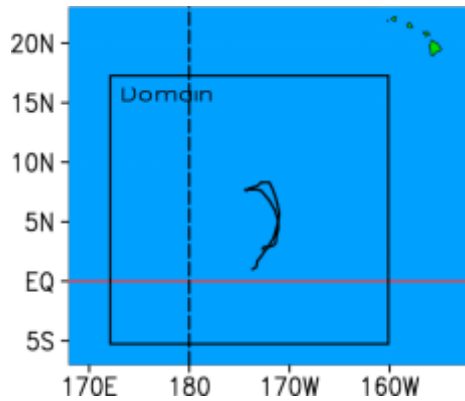


Fig. 3 Best track of PALI by JTWC. A black rectangle indicates the experimental domain.

3. 研究手法

3.1 アンサンブル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、Table.1 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° × 1°
Vertical resolution	11 (From 1000hPa to 10hPa)
SST fixed at the initial time.	
Boundary data perturbed every 6 hour.	

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、Table.2 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
Forecast time	8 days
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch scheme

3.1.2 コリオリ力の感度実験

本研究では、コリオリ力の影響を考察するために、異なるコリオリ力を与えるダウンスケール実験を行った。実際のコリオリ力を与える通常の実験を CTL と呼び、相対的に 1 度北に動かした緯度のコリオリ力を与える実験を +01° と呼ぶ。同様に、10 度北の実験を +10° と呼び、1 度刻みに全てで 10 種の感度実験を行った。それぞれ、南北方向にコリオリ力を変化させた (β 効果) 一方、いずれも東西は実際と同じ経度を与えた。また、感度実験についてはコリオリ力のみ異なるものを与えており、初期値・境界値の大気の情報には、CTL と同じものを用いていた。

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。

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 2 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事が分かる。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いる環境場であったが、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。

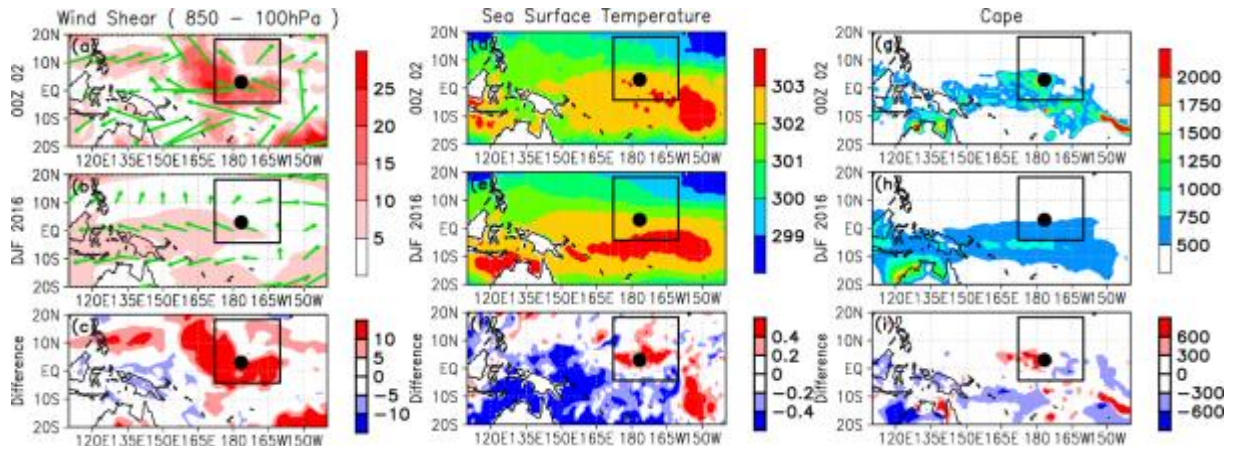


Fig. 4 Environmental condition around PALI by ERA-interim. (a), (b) and (c) show vertical wind shear, (d), (e) and (f) show sea surface temperature, (g), (h) and (i) show CAPE. (a), (d) and (g) are 00Z 02 2016, (b), (e) and (h) are DJF mean, (c), (f) and (i) are the difference between 00Z 02 and DJF. A black rectangles indicate the model domain and black points show PALI in 00Z 02.

4.2 ダウンスケール実験解析結果

4.2.1 トラック

Fig. 5に、CTLと全ての感度実験のトラックを示した。このトラックは、3.2で記述した手法による作

成している。CTLで南下したメンバーが、感度実験では南下しないという違いが見られた。しかしながら、全ての実験のほとんどのメンバーが、赤道から北緯10度に位置しているため、今回は実験によるトラックの違いについては考慮していない。

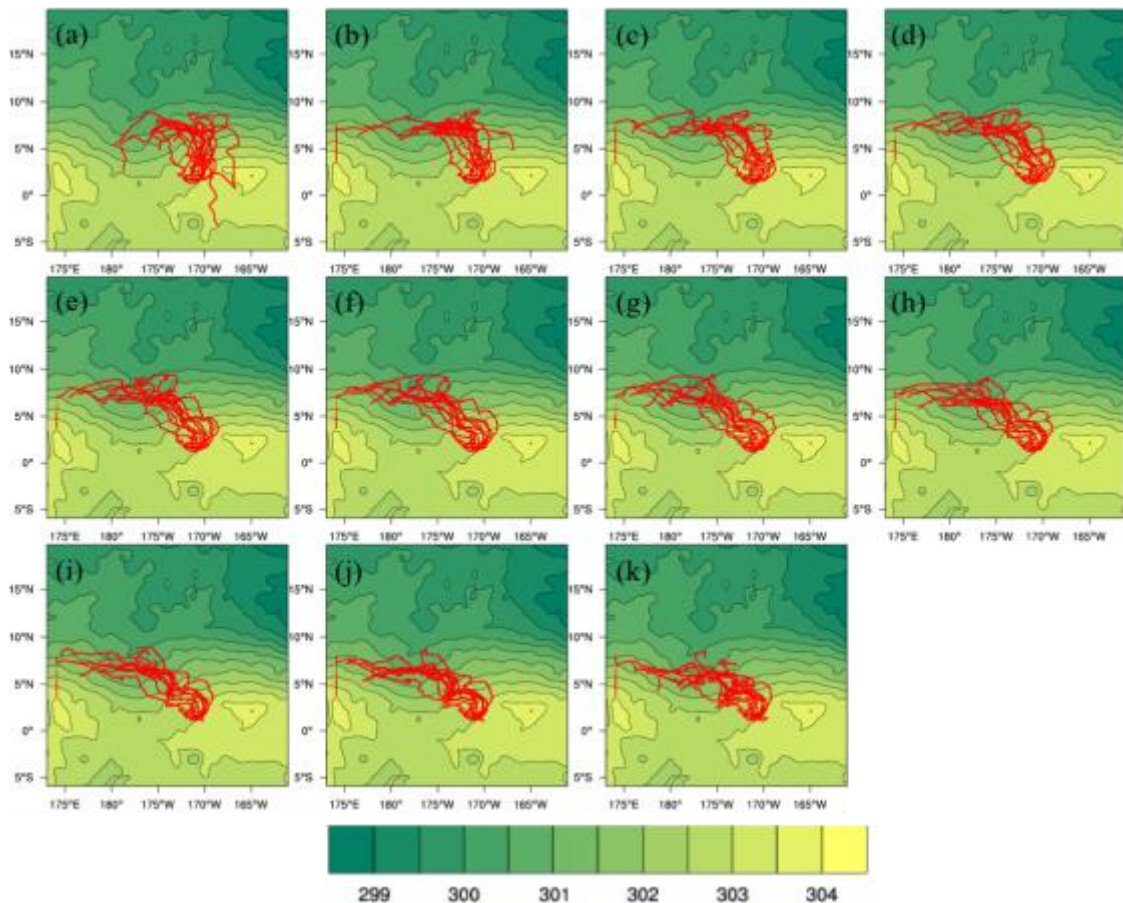


Fig. 5 Red lines are 11 members' tracks, shaded in color are sea surface temperature (K) by ensemble downscale experiments. (a) indicates CTL, (b) to (k) show all sensitivity experiments from 01° to 10°.

4.2.2 最盛期のハリケーンの様子の違い

Fig.6 に、計算初期時刻及び、予報時間 144 時間の各実験の海面気圧のアンサンブル平均値とアンサンブルスプレッドを示した。予報時間 144 時間は、ベストトラックにおける PALI の最盛期（1 月 13 日 00Z）に対応している。また、3.2 で記述したトラッキング手法により作成したトラックを用いて、図の中心が各メンバーのハリケーンの中心に対応するようにしており、アンサンブルスプレッドに位置ずれの影響は含まれていない。Fig.6 より、全ての実験でアンサンブル平均の台風強度に達していることが

分かる。さらに、+05°や+06°ではアンサンブルスプレッドが小さく、CTL や+08°、+09°、+10°では、アンサンブルスプレッドが大きくなっている。つまり、北緯 10 度（+05°に対応する）付近でバラつきが小さくなり、その南北でバラつきが大きくなるのが分かる。ハリケーンの大きさに注目すると、 17ms^{-1} 以上を示すベクトルが表示されている領域が、おおよそ CTL から+10°に向かって広がっていることから、同じ初期渦を用いた予報実験の場合、コリオリパラメータを大きくするほど（高緯度ほど）、ハリケーンのサイズが大きくなる傾向にあると推測できる。

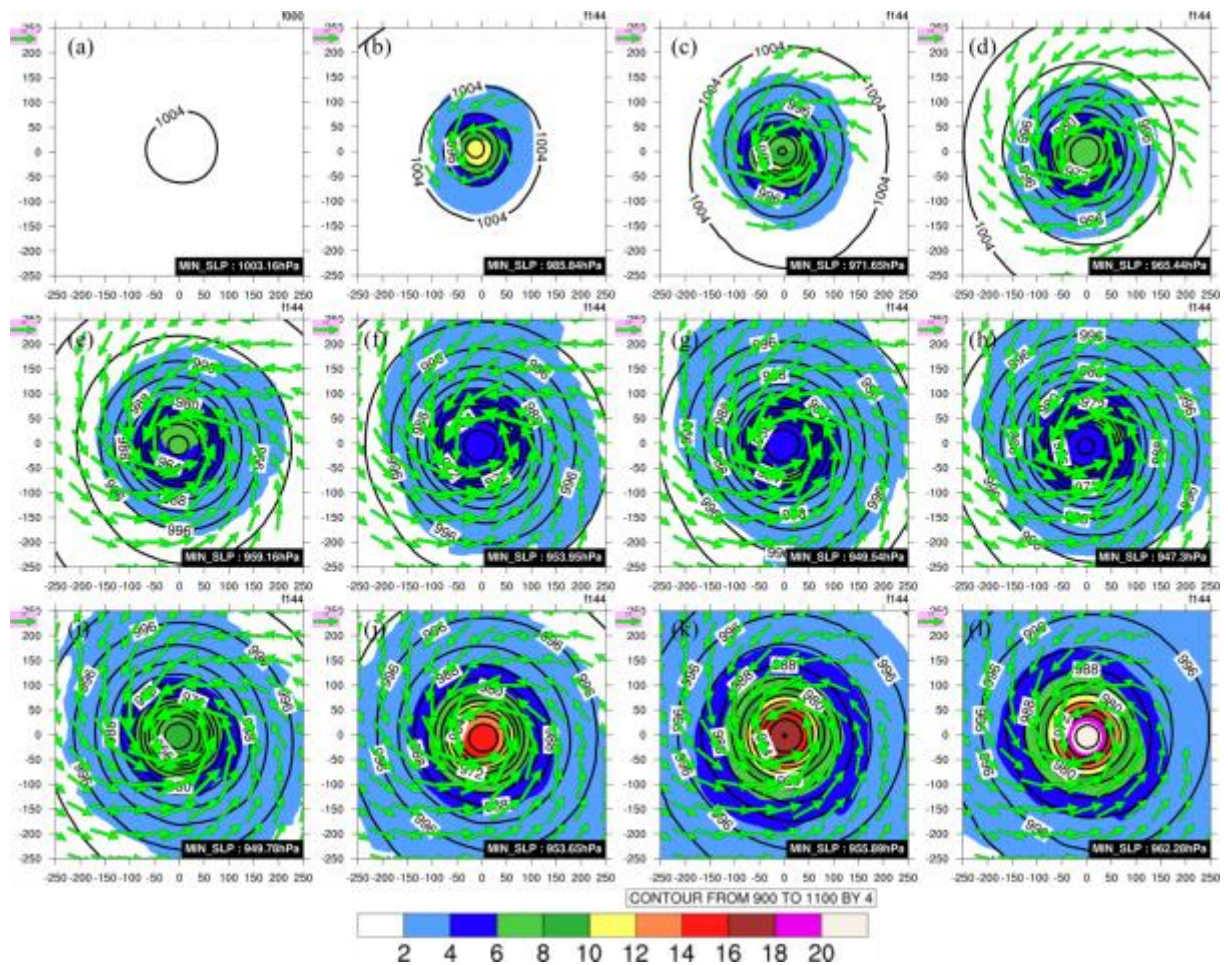


Fig. 6 Contour are ensemble mean sea level pressure (hPa), shaded in color are ensemble spread (hPa) and vectors show 10m horizontal wind more than 17ms^{-1} . The domain shown in each panel is 250km by 250 km from the storm center. (a) indicates the initial time and (b) to (l) show CTL and all sensitivity experiments from 01° to 10° .

4.2.3 最盛期のハリケーン強度の違い

Fig.7 に、最盛期（予報時間 144 時間で、Fig.6(b) から (l) に対応している）CTL と全ての感度実験のハリケーンの強度（地上 10m 風速の最大値）のパラつきを、箱ひげ図で示した。こちらの図でも、全ての実験の全てのメンバーで、台風強度（ 17ms^{-1} ）に達し

ていることが確認できる。

各実験の強度の中央値に注目すると、+05°で最も強くなっており、両端に向かって弱くなっている傾向があることが分かる。+05°の実験は、おおよそ北緯 10 度に対応しており、Fig.2 で示したコリオリパラメータ毎の北半球の台風発生数のピークと一致し

ている。

また、各実験の強度のバラつき（Fig.7における箱ひげの伸び方）に注目すると、強度のピークである+05°で最もバラつきが小さくなっており、両端に向かって、バラつきが大きくなっている傾向にあることが分かる。

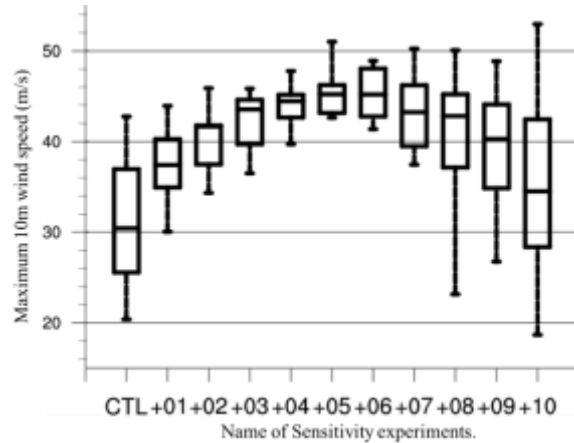


Fig. 7 Box plots about hurricane intensity at the mature stage of PALI by sensitivity experiments.

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 2 日前の 1 月 6 日 00Z を計算初期時刻に設定することで、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出来た。

コリオリ力の感度実験とその解析結果から、コリオリ力がハリケーン強度（地上 10m 風速の最大値）に大きく影響する緯度帯と、あまり影響しない緯度帯があることが示唆された。今回の解析では、北緯 10 度付近に対応する、+05°の実験で最も強くなり、北緯 5 度付近に対応する CTL、北緯 15 度に対応する +10°の実験に向かって、弱くなる傾向があることが分かった。また、強度のバラつきに注目すると、強度のピークである、+05°でバラつきが小さくなり、CTL や +10°のバラつきが大きくなる結果が得られた。このことから、同じ初期渦から予報実験を行った場合に、緯度によってハリケーンの強度予報のバラつきに違いがあり、北緯 5 度付近、15 度付近でそれが大きくなると推測される。

今後は、各実験間や、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、コリオリ力がハリケーン強度、及びそのバラつきにどの程度影響を与えるのか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, ppp669-700.
- 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.
- 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., Dudhia, 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：2017年6月13日)