

高解像度中層大気大循環モデルにおける対流性重力波の生成・伝播

課題責任者

渡辺 真吾

海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

著者

野口 峻佑*¹, 渡辺 真吾*¹, 小新 大*^{1,2}, 佐藤 薫*²

*¹ 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター, *² 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

本課題では、モデル上端が高度約 150 km まで拡張された大気大循環モデル JAGUAR を用いて、中層大気における顕著現象を対象とする季節内～季節スケール予測実験を行っている。その際、中層大気の循環駆動において重要な役割を果たす重力波の再現性が問題となるが、現状その波源の把握さえ十分とは言い難い。そこで本年度は、このモデルにおいて表現される重力波の生成・伝播過程の特性調査に重点を置き、台風から放射される重力波の再現実験を行った。試行の結果、重力波陽解像設定の JAGUAR において、低波数成分のみを拘束するスペクトルナッジングを活用することにより、2019 年台風 19 号を現業解析と同等な強度で再現することに成功した。これにより、台風を波源とする螺旋状もしくは同心円状の重力波が、中間圏界面付近まで伝播する様子を表現することが可能となった。また、JAGUAR と再解析とでは、このような重力波の表現能力に開きがあることも確認した。

キーワード : 大気重力波, 中層大気, 高解像度大気大循環モデル, 台風, スペクトルナッジング

1. はじめに

大気重力波は、中層大気の循環駆動において重要な役割を果たす。旧来の気象予測モデルにおいてはその作用のみが重力波パラメタリゼーションの形で取り入れられてきたが、モデルの高解像度化に伴いその振る舞いを解像できつつある現在、その再現性の詳細把握やその陽的解像計算により享受できる恩恵の明示が求められている。本課題「中層大気の内～季節スケール予測」では、地表から中層大気全域を含む広範囲における大気変動を対象とした高解像度予測シミュレーションを行い、上記の要求に応えることを目標の 1 つとしている。

昨年度は、中層大気における顕著現象の代表である、成層圏突然昇温とその後の成層圏界面上昇イベントに着目した予測実験を行った。モデル上端が高度約 150 km まで拡張された大気大循環モデル (JAGUAR: Japanese Atmospheric GCM for Upper Atmospheric Research, Watanabe and Miyahara 2009 [1]) を用いて、高解像度 (水平約 20 km、重力波パラメタリゼーション不使用) と低解像度 (水平約 300 km、重力波パラメタリゼーション併用) の 2 つの設定で予測を実施・比較したところ、高解像度設定の優位性を裏付ける結果が得られた。その一方で、高解像度設定においても、上空循環場の再現に改善の余地があり、また初期値化にも工夫が必要なことから、上空の散逸過程のチューニングやスペクトルナッジング (空間波数帯を限定した循環拘束) を活用した予測開始手法の導入を行った。

そこで本年度は、まず、これらの改変を取り入れ、高解像度設定における再現性をより高めた予測実験を再度行った (その結果の一部に関しては付録を参照)。その上で、JAGUAR における重力波の (特にその生成・伝播過程の) 表現特性とスペクトルナッジングの効果をより詳細に把

握する必要が生じたため、高解像度設定での調査計算を多数追加した。

本稿では、その一環として実施した、台風から放射される重力波の JAGUAR によるシミュレーション結果について報告する。台風に伴う激しい鉛直運動によって発生し、中層・高層大気まで同心円状に伝播する重力波は、高解像度中層大気大循環モデルがその効力を発揮できる題材であり (例えば、Liu et al. 2014 [2] など)、また波源との対応関係を推察しやすいことから、モデルによる重力波の生成・伝播過程の表現能力を調べるのに適している。本研究では、スペクトルナッジングを駆使して実際の台風を可能な限り再現し、JAGUAR における組織化した対流からの重力波の生成・伝播過程の現状を提示する。対象事例は、近年の台風の中でも非常に強い勢力にまで発達した 2019 年台風 19 号 (Hagibis) である。

2. 実験設定

付録や昨年度と同様に、JAGUAR を T639L340 (水平約 20 km、鉛直約 300 m)、時間刻み幅 30 秒の重力波解像設定で走らせた。この設定では、積雲パラメタリゼーションとしては Arakawa-Schubert スキームを用いているが、重力波パラメタリゼーションは用いていない。積分対象期間は、2019 年 10 月 1 日から 13 日であり、海面水温は OISST v2.1 を与えた。

台風進路を再現するため、現状入手可能な全球再解析データの中で最も高解像度な ERA5 を基準データとして、スペクトルナッジングを行った。試行錯誤の結果、10 月 5 日までの期間は T479 (水平約 25 km) 相当の高波数まで循環場を拘束し、台風の発生位置を担保すれば、以降は T21 (水平約 600 km) 相当の低波数までの拘束で台風進路を概ね再現できることがわかった。拘束の頻度は 6 時

間隔、時定数は6時間とした。また、上空の基本場をある程度現実的に再現するために、一応、積分開始直後の3日間は、1 hPa 以上を JAGUAR-LETKF システムにより作成した解析値 (Koshin et al. 2021 [3]) へと、T21 までの低波数成分のみ拘束した。それ以降は、解像される重力波への悪影響を避けるために、ERA5 のみを用いた、成層圏までの (10 hPa から 1hPa にかけて値が 1 から 0 へと遷移する鉛直荷重をかけた) 循環拘束へ移行した。本稿では、さらに10月9日からはナudgingを全て廃した予測ランの結果について記す。

3. 結果

まず、台風強度の確認結果として、台風中心気圧の時系列を図1に示す。ここでは、拘束に用いた ERA5 に加えて、気象庁のベストトラックおよび全球客観解析 (予測モデルの水平解像度は TL959 であり、水平格子間隔は約 20 km と JAGUAR と同程度) をあわせて示している。これより、JAGUAR において表現された台風の最低気圧は、10日の 930 hPa 程であり、気象庁全球客観解析と同程度にまで達していることがわかる。基準とした ERA5 (予測モデルの水平解像度は TL639 であり、提供データの水平格子間隔は約 25 km) と比べて 30 hPa 程中心気圧が深まっており、JAGUAR は再解析データよりも現実的な台風を再現する能力がある、と言える。しかしながら、JAGUAR と気象庁全球客観解析のどちらも、6-7日にかけて急発達し、8日頃には最低気圧 (915 hPa) に達しているベストトラックにまでは及んでいない。この発達タイミングの遅れおよび強度の不足に関しては、この水平解像度もしくは採用している雲物理過程による限界と関係している可能性がある。

上記のように、JAGUAR はこの台風を現業に近い強度で再現できるが、発達のタイミングにおいては現業同様に課題が残ることがわかったため、以降は JAGUAR におい

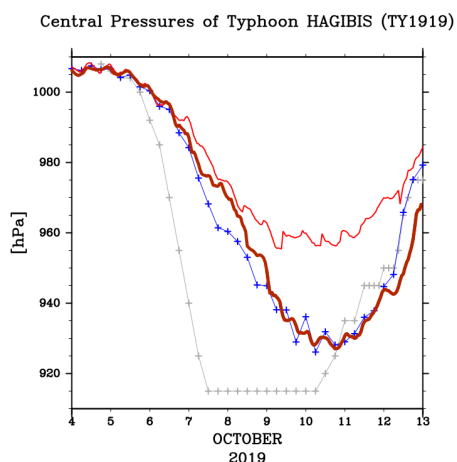


図1: 2019年台風19号の中心気圧の時系列。赤色の実線で ERA5、臙脂色の太実線で JAGUAR シミュレーション結果を示す。ともに1時間間隔。あわせて、灰色および青色の十字点 (および細線) で、気象庁ベストトラックおよび気象庁全球客観解析を示す。

て表現される台風上空の重力波挙動の、ERA5 との比較に集中する。図2に、JAGUAR シミュレーションおよび ERA5 での台風最盛期 (10日 00UTC) における、鉛直風のスナップショットを示す。

この時刻において台風は日本の南海上に位置して北上しているが、左列の上部対流圏 (図2 a, d: 200 hPa) にてみてとれる通り、JAGUAR は、この台風に伴う強い鉛直風に加えて、その北東に伸びる前線や南東の活発な対流などの周辺環境場を、概ねよく再現できている。一方で、台風の構造に焦点をあてると、JAGUAR における上昇流は ERA5 と比べて大きく (軸対称成分としては 3-4 倍程、図省略)、その周辺に螺旋状に伸びる上昇流/下降流の微細な構造がより明瞭に表現されていることもわかる。

このため、中部成層圏 (図2 b, e: 10 hPa) における JAGUAR と ERA5 の様相は大きく異なっている。JAGUAR においては台風上空の螺旋状のパターンがより広範囲に伝わっており、日本上空においても波状の構造が通過している様子がみられる。その一方で、ERA5 においてはそのような台風を中心としたパターンはみられない。(東方からの波の伝播もしくはそれとの干渉の結果と推測される) 台風の東側における縞状構造が残っているだけであり、台風からの重力波の伝播は不明瞭となっている。また、日本上空においてもわずかに波状の構造を観察できるが、その振幅は JAGUAR と比べて小さい。実際、運動量フラックス等の定量評価を行なってみても、この高度で既に、ERA5 における重力波による運動量輸送は JAGUAR におけるその4分の1以下しかない (図省略)。なお、これら差異の要因としては、前述の表現されている台風構造の差異以外にも、ERA5 と JAGUAR とでの、重力波の上方伝播過程に対する表現特性の差異が大きいと考えられる。すなわち、鉛直層配置、時間積分方法、人為的散逸などの観点から必ずしも重力波の解像には適さず、また、より低解像度なモデルに基づくデータ同化過程も入る ERA5 においては、重力波の伝播が JAGUAR と比べて抑制されているものと推察できる。

JAGUAR において上方へ放射された重力波は、現業モデルや通常の再解析ではカバーできない中間圏界面付近 (図2 c: 0.003 hPa) まで伝播し、さらに上空の熱圏における変動にも影響を与えていた。この高度では、台風を中心とした同心円状の波構造が赤道以南・権太以北までの広範囲に及んでいる。台風直上においては、水平波長の短い微細な構造を確認でき、そのような波が外側へ広がる長波長の波とは分離される形で上方へ伝播している様子を窺える。また、同心円 (もしくは螺旋) 状の波構造にも方角によって斑があり、例えば台風の西側の波構造の方が東側と比べて明瞭であるなど、背景場によるフィルター効果 (この時の上部成層圏から下部中間圏においては西風が卓越している、図省略) が作用している様もみてとれる。しかしながら、中間圏以上は背景場の変動が大きく、潮汐の卓越や砕波に伴う2次生成も絡むためにその時間発展は複雑となるうえ、モデルおよびその影響を受ける解析値にも不確か性が大きい。このため、詳細な波構

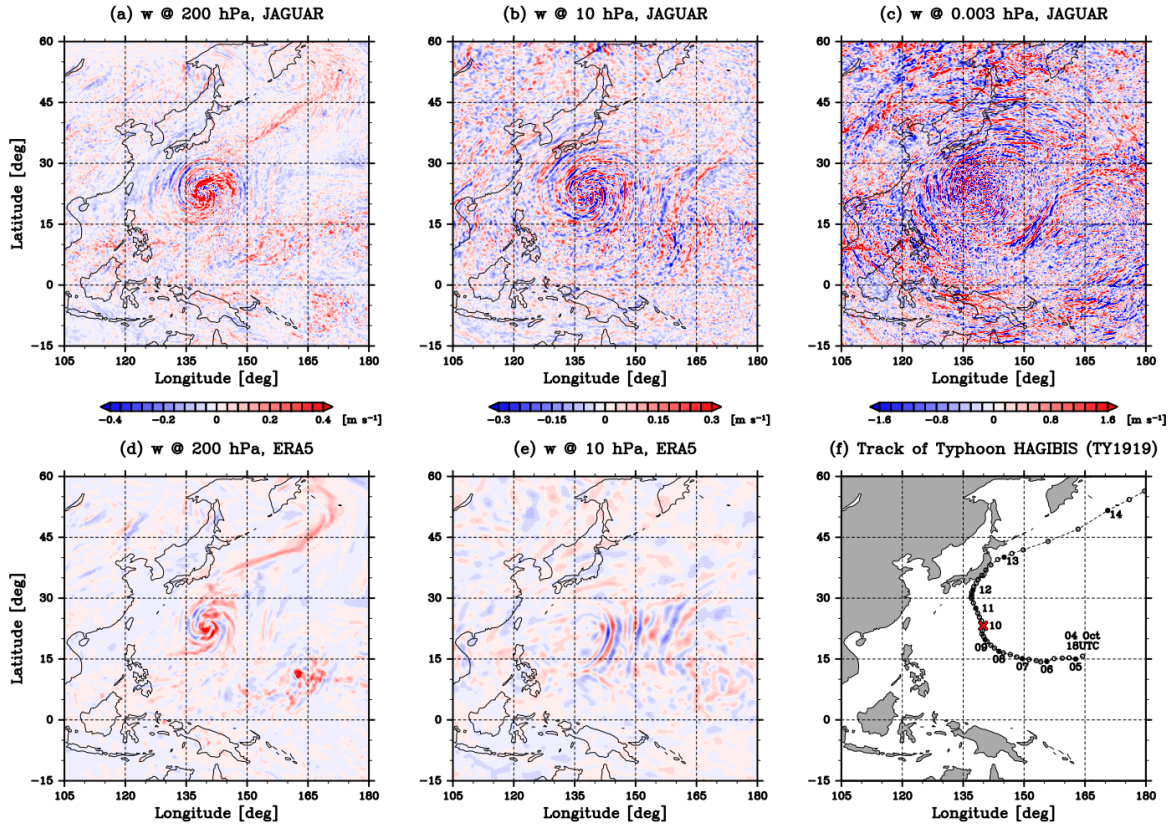


図 2: 2019 年台風 19 号に伴う重力波の様子。(f) のベストトラック (黒丸印で各日 00UTC を表す) にて赤バツ印で示した、10 月 10 日 00UTC における鉛直風の水平分布を示す。上段に JAGUAR シミュレーション結果、下段に ERA5 で、左から (a, d) 200 hPa、(b, e) 10 hPa、(c) 0.003 hPa における分布を配置。ERA5 のカラーバーは上段と共通。比較のため、JAGUAR シミュレーション結果の (a)、(b) は ERA5 と同じ格子へと変換処理済みのものを用いた。

造の解釈には慎重になる必要がある。JAGUAR における台風の強度・発達タイミングなど重力波の生成源となる大気挙動の再現性が向上した暁には、衛星観測 (例えば、Yue et al. 2014 [4] など) やレーダー観測 (例えば、Sato 1993 [5]; Dhaka et al. 2003 [6] など) との比較によって、不確実性を低減していくことが望まれる。

4. まとめ

高解像度 (重力波陽解像) 設定の JAGUAR における重力波の生成・伝播過程の現状を把握するため、台風から放射されて中層・高層大気へ上方伝播する重力波のシミュレーションを行った。初期値化改良のために導入したスペクトルナッジングを転用することによって、2019 年台風 19 号を JAGUAR において再現し、螺旋状もしくは同心円状の重力波が中間圏界面付近まで伝播することを示した。このような擾乱は電離圏における変動も引き起こす (例えば、Chou et al. 2017 [7]; Chernogor et al. 2021 [8] など) ことから、本年度の計算は、天気予報と宇宙天気予報を結ぶうえでも重要となる、重力波陽解像設定の恩恵を示すものである。

ただし、JAGUAR における台風の再現に関しては課題が残る。少なくとも 2019 年台風 19 号に関しては、その強度はベストトラックに及ばず、発達タイミングも遅れてい

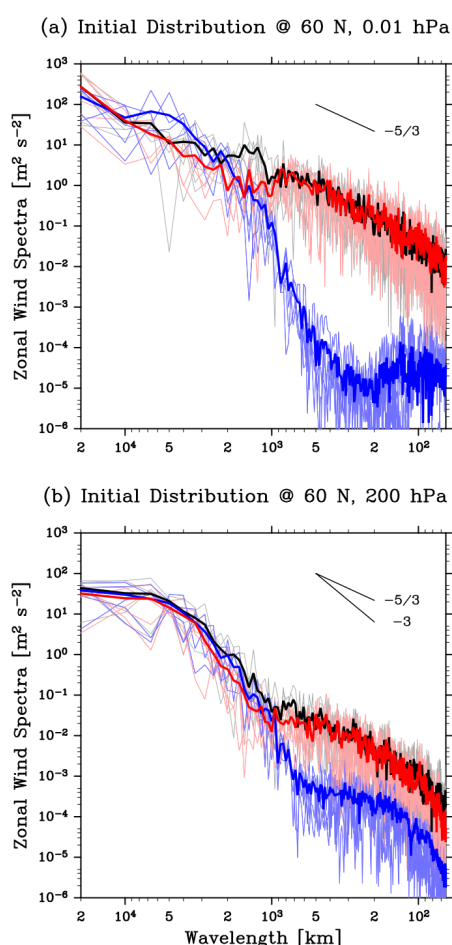
た。一応、中心気圧はスペクトルナッジングの基準とした ERA5 よりも 30 hPa 程深まっており、気象庁全球客観解析と同程度の強度まで発達したとは言えるが、依然として不足している。より現実的な時間発展を得るには雲物理過程等の洗練が必要であると考えられる。また、水平解像度の制限によって、表現された対流の構造ひいては上空へ伝播する重力波の波長等に偏りが生じてしまっている可能性もある。より高解像度な設定での実験結果を適宜参照しながら、JAGUAR で再現を保証できる範囲を調査していく必要がある。

A. 付録

昨年度に報告した、2009 年 1 月の成層圏突然昇温およびその後の成層圏界面上昇イベントに対する予測実験を、(1) 上空の散逸過程のチューニング (成層圏界面の再形成高度を現実的にするための、水平拡散の鉛直プロファイルの変更) および (2) 初期値化方法の改良 (予測開始直前の 1 日間の格子点ナッジングから 3 日間のスペクトルナッジングへ変更) を反映して、再度実施した。ここでは、(2) の効用について記す。なお、本実験は台風等の再現を目的とするものではないため、JAGUAR-LETKF 解析値を基準に、対流圏においては T42 (水平約 300 km)、成層圏以高においては T21 以下の低波数成分のみを拘束

する設定になっている。また、高波数成分まで含めた大気運動の参照のために、2009年の1-2月を通じてスペクトルナッジングを継続して行うことによって、高解像度擬似解析場も作成している。

初期値化方法の改良の結果、図Aに示した初期値の水平波数(k)スペクトルにて確認できるように、本年度に再実施した予測では、擬似解析場と同様な擾乱のスケール分布が再現されており、重力波等の小規模擾乱に関係した $k^{-5/3}$ に従う大気運動が予測開始直後から表現されるようになってきていることがわかる。昨年度の初期値化方法でも、対流圏(図A b)の総観規模擾乱に起因した k^{-3} に従う範囲までならばそれほど問題はないが、波長約1000 km以下の $k^{-5/3}$ がより卓越する上部中間圏(図A a)においては表現すべき状態からの落差が大きく、その後



図A: JAGUARによる予測開始時の東西風の帯状擾乱スペクトル。(a) 200 hPa および (b) 0.01 hPa の北緯60度におけるスペクトルを表示。赤色で本年度に実施した(スペクトルナッジングを導入して初期値化法を改良した)予測、青色で昨年度に実施した予測の結果について示す。どちらも2009年1月の成層圏突然昇温前後の5初期日(1月10、15、20、25、30日)についての結果であり、太線で平均を示す。あわせて、黒線に対応する時刻における高解像度擬似解析場についての結果も示す。

の急激な調節過程によって循環場に不自然な挙動が現れてしまっていた。

謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業CREST「大型大気レーダー国際共同観測データと高解像大気大循環モデルの融合による大気階層構造の解明」(JPMJCR1663)の支援を受けて実施した。計算にはJAMSTECの地球シミュレータおよびDAシステムを用い、作図およびデータ加工には地球流体電脳ライブラリおよびGTOOLを用いた。

文献

- [1] Watanabe, S., and Miyahara, S., “Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model”, *J. Geophys. Res.*, 114, D07110, 2009.
- [2] Liu, H.-L., McInerney, J. M., Santos, S., Lauritzen, P. H., Taylor, M. A., and Pedatella, N. M., “Gravity waves simulated by high-resolution Whole Atmosphere Community Climate Model”, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 9106-9112, 2014.
- [3] Koshin, D., Sato, K., Kohma, M., and Watanabe, S., “An update on the 4D-LETKF data assimilation system for the whole neutral atmosphere”, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, in review.
- [4] Yue, J., Miller, S. D., Hoffmann, L., and Straka III, W. C., “Stratospheric and mesospheric concentric gravity waves over tropical cyclone Mahasen: Joint AIRS and VIIRS satellite observations”, *J. Atmos. Sol. Terrestrial Phys.*, 119, 83-90, 2014.
- [5] Sato, K., “Small-scale wind disturbances observed by the MU radar during the passage of Typhoon Kelly”, *J. Atmos. Sci.*, 50(4), 518-537, 1993.
- [6] Dhaka, S. K., Takahashi, M., Shibagaki, Y., Yamanaka, M. D., and Fukao, S., “Gravity wave generation in the lower stratosphere due to passage of the typhoon 9426 (Orchid) observed by the MU radar at Shigaraki (34.85° N, 136.10° E)”, *J. Geophys. Res.*, 108(D19), 4595, 2003.
- [7] Chou, M. Y., Lin, C. C. H., Yue, J., Tsai, H. F., Sun, Y. Y., Liu, J. Y., and Chen, C. H., “Concentric traveling ionosphere disturbances triggered by Super Typhoon Meranti (2016)”, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 1219-1226, 2017.
- [8] Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q., Rozumenko, V. T., Zheng, Y., and Luo, Y., “Supertyphoon Hagibis action in the ionosphere on 6-13 October 2019: Results from multi-frequency multiple path sounding at oblique incidence”, *Adv. in Space Res.*, 67(8), 2439-2469, 2021.

Generation and Propagation of Convective Gravity Waves in a High-Resolution Middle-Atmosphere General Circulation Model

Project Representative

Shingo Watanabe Research Center for Environmental Modeling and Application,
Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and
Technology

Authors

Shunsuke Noguchi *¹, Shingo Watanabe *¹, Dai Koshin *^{1,2}, Kaoru Sato *²

*¹Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

*²Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

Using the atmospheric general circulation model JAGUAR with its model top extended to an altitude of about 150 km, we are conducting sub-seasonal to seasonal prediction experiments targeting extreme events in the middle atmosphere. Since gravity waves (GWs) play an important role in driving the circulation of the middle atmosphere, the reproducibility of GWs is a critical issue. In this year, we have conducted experiments reproducing GWs excited by a super typhoon Hagibis (TY1919), with the aim to validate the characteristics of GW generation and propagation in JAGUAR. By utilizing the spectral nudging technique, JAGUAR succeeded in reproducing the typhoon with almost the same intensity as the operational global analysis of the Japan Meteorological Agency. JAGUAR is capable of simulating the propagation of spiral or concentric typhoon-generated GWs from the troposphere to the mesopause or above, which is not resolved in commonly used reanalysis data. It highlights an advantage of GW-resolving simulation by JAGUAR.

Keywords : gravity wave, middle atmosphere, high-resolution atmospheric general circulation model, typhoon, spectral nudging

1. Introduction

Gravity waves (GWs) play an important role in driving the circulation of the middle atmosphere by transferring momentum and energy from below. Although their effects have been parameterized in general circulation models, explicit treatment of them may provide new insights in the atmospheric science.

In this project, we conduct GW-resolving (or -permitting) prediction experiments by using a high-top (extended to an altitude of about 150 km) model named Japanese Atmospheric General circulation model for Upper Atmospheric Research (JAGUAR, Watanabe and Miyahara 2009 [1]). By investigating the reproducibility of extreme events, we attempt to enhance knowledge on details of phenomena in the middle atmosphere and their practical predictability.

The target event of FY2020 is the propagation of spiral GWs from a super typhoon Hagibis (TY1919), which provides opportunities to validate the characteristics of GWs generated by organized convections in JAGUAR.

2. Experimental Settings

We have conducted a reproduction experiment of the typhoon for a period from 1 to 13 October 2019 using JAGUAR with a high-resolution T639L340 (about 20 km horizontally, about 300 m vertically, no gravity wave parameterization) setting, by adopting the spectral nudging technique. With this technique, the small-scale flow evolves as the model drives, while the large-scale flow is relaxed to a given reanalysis (ERA5). After a period

of strong constraint before the genesis of the typhoon (i.e., 1-5 October), the track of the typhoon is reproduced well with only a weak constraint (relaxation time of 6 hours) of large-scale flow (wavelengths longer than about 1800 km). The minimum central pressure of the typhoon reproduced in JAGUAR is deepened about 30 hPa from that of ERA5, which reaches almost the same as the operational global analysis of the Japan Meteorological Agency.

3. Results

This report introduces how typhoon-generated GWs are represented in the JAGUAR simulation compared with ERA5, as shown in Figure 1, snapshots of vertical wind at the peak of the typhoon. The strong upwelling of the typhoon itself in the upper troposphere (Figs. 1a, d) is expressed more clearly in JAGUAR, including fine wave structures around it, while the synoptic environment (e.g., a front extending to the northeast of the typhoon and active tropical convections in the southeast) is reproduced well in both JAGUAR and ERA5.

In the middle stratosphere (Figs. 1b, e), we can find a gap in the representation of GWs above the typhoon. The JAGUAR simulation represents widespread concentric waves radiated from the spiral motion of the typhoon. On the other hand, ERA5 does not show such a clear concentric pattern. Although there are some wavy patterns on the eastern side of the typhoon, no evident waves are observed on the western side. A comparison of momentum fluxes also shows a consistent underrepresentation of the upward propagating GWs in ERA5 compared with JAGUAR.

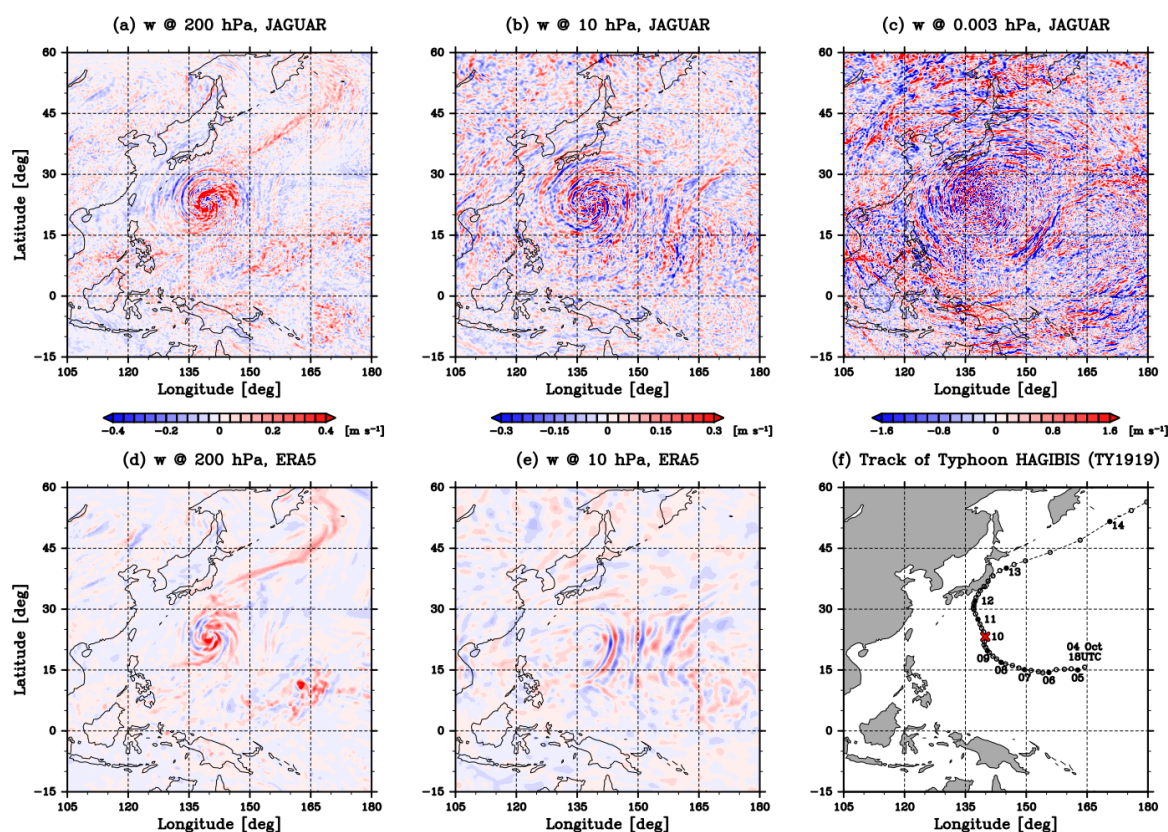


Fig. 1: Gravity waves associated with Typhoon Hagibis (TY1919). Horizontal distributions of vertical wind at 00 UTC on 10 October, indicated by a red cross in the best track (black circles indicate 00 UTC for each day) in (f). Upper panels show the distributions in the JAGUAR simulation, and lower panels show those in ERA5 at (a, d) 200 hPa, (b, e) 10 hPa, and (c) 0.003 hPa. Color bars of ERA5 are the same as those in the upper panel. The JAGUAR simulation results (a) and (b) have been converted to the same grid as in ERA5 for comparison.

The upward-propagating GWs represented in JAGUAR reach around the mesopause (Fig. 1c), which is not covered by the current models in many operational numerical weather prediction centers. At this altitude, the concentric wave structure centered on the typhoon spreads further and covers a wider area. We can also find a dispersive property of waves (i.e., short-scale waves just above the typhoon and longer-scale waves propagating outward) and an anisotropic propagating property due to the filtering effect of the background wind (i.e., more pronounced wave patterns in the western side of the typhoon survived under the westerly condition in the upper stratosphere and mesosphere).

4. Concluding Remarks

We have conducted experiments reproducing GWs excited by a super typhoon Hagibis to validate the characteristics of GW generation and propagation in JAGUAR. By utilizing the spectral nudging technique, JAGUAR succeeded in reproducing the typhoon with almost the same intensity as the operational global analysis of the Japan Meteorological Agency. JAGUAR is capable of simulating the propagation of spiral or concentric typhoon-generated GWs from the troposphere to the mesopause

or above, which is not resolved in reanalysis data. However, due to the limited representation of convections in JAGUAR (which adopts cumulus parameterizations), it is doubtful that the resolved GWs are not affected by artificial settings. Further investigations through comparisons with cloud-resolving models and observations are demanded.

Acknowledgement

This work was partly supported by CREST, Japan Science and Technology Agency (JPMJCR1663), “Study of atmospheric hierarchical structure by fusion of observation data from a global radar network and high-resolution general circulation models”. The numerical experiments were conducted on the Earth Simulator and Data Analyzer system. The GFD-DENNOU Library and GTOOL were used for graphics and data handlings.

References

- [1] Watanabe, S., and Miyahara, S., “Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model”, *J. Geophys. Res.*, 114, D07110, 2009.