

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

全球非静力学モデルを用いたアジア域におけるスーパー台風の温暖化応答に
関する研究

(2RF-1701)

平成29年度～令和元年度

Study of Super-Typhoon Response to Global Warming in the Asian Region Using Global
Non-hydrostatic Model

<研究代表機関>

国立研究開発法人海洋研究開発機構

<研究協力機関>

東京大学大気海洋研究所

理化学研究所計算科学研究センター

国立研究開発法人国立環境研究所

気象庁気象研究所

令和2年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 全球非静力学モデルを用いたアジア域におけるスーパー台風の温暖化応答に関する研究	8
(国立研究開発法人海洋研究開発機構)	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
III. 英文Abstract	33

1. 成果の概要

課題名 2RF-1701 全球非静力学モデルを用いたアジア域におけるスーパー台風の温暖化応答に関する研究

課題代表者名 小玉 知央 (国立研究開発法人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雲解像モデル開発応用グループ研究員)

研究実施期間 平成29～令和元年度

研究経費(累計額) 17,901千円
(平成29年度:6,068千円、平成30年度5,765千円、令和元年度:6,068千円)

本研究のキーワード 地球温暖化、台風、高解像度全球気候シミュレーション、HighResMIP、IPCC第6次評価報告書

研究体制

- (1) 全球非静力学モデルを用いたアジア域におけるスーパー台風の温暖化応答に関する研究
(国立研究開発法人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雲解像モデル開発応用グループ)

研究協力機関

東京大学大気海洋研究所、理化学研究所計算科学研究センター、国立研究開発法人国立環境研究所、気象庁気象研究所

1. はじめに(研究背景等)

強い熱帯低気圧(以下、台風)は日本をはじめとするアジア域、そして世界各地で暴風や豪雨、洪水、高潮といった大きな自然災害をもたらす。気候モデルを用いたシミュレーションから、特に大きな被害をもたらす風速59 m/s以上又は中心気圧945 hPa以下の「スーパー台風」の数は地球温暖化に伴って増加すると予測されており、過去の観測からもスーパー台風の増加を示唆する結果が得られている。また、最近では地球温暖化の加速傾向が観測されていることから、地球温暖化に伴う台風の変化についても既に起こり始めている可能性がある。従って、適応策のための信頼性の高い予測情報を得ることは緊急の課題である。

しかし、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)評価報告書で引用されている多くの気候モデルは台風の構造を表現するには水平解像度が粗く、台風の重要構成要素である雲の効果を経験則によりパラメータ化しているためスーパー台風をほとんど再現できない。このため、台風の風速のバイアス補正が行われており、予測の信頼性には大きな疑問がある。研究代表者らは気候モデルとしては世界最高解像度でかつ雲のパラメータ化を行わない全球非静力学モデルNICAMを用いて気候実験を行い、風速のバイアス補正を行うことなく台風発生数やスーパー台風を再現することに成功した。これは信頼性の高い台風将来予測に向けた重要な一歩であるが、予測に影響を与えるバイアスも確認されており、改善をほどこした最新モデルを用いた気候シミュレーションが必要となっていた。

2. 研究開発目的

本研究ではアジア域のスーパー台風を対象に、既存モデルに比べて物理的に適切なモデルを用いて信頼性の高い温暖化台風予測を提供すること、およびデータの解析・公開を通じてIPCC AR6(第6次評価報告書)をはじめとする国際研究コミュニティへ貢献することを全体およびサブテーマ目標とする。より具体的には、台風予測に影響を与えるバイアスを低減した最新版の高解像度全球非静力学モデ

ルNICAMを用い、CMIP6（結合モデル相互比較プロジェクト）の構成プロジェクトであるHighResMIP（高解像度モデル相互比較プロジェクト）に従って過去・現在・将来気候実験を実施する。台風およびスーパー台風の発生分布や進路、強度の再現性を確認するとともに、台風に影響を与える基本場についても再現性を評価する。将来気候実験についても台風およびスーパー台風の解析を実施し、特に日本を含むアジア域に接近するスーパー台風の頻度について将来予測結果を示す。また、台風の構造の再現性とその将来変化についても解析する。あわせて台風発生に大きな影響を及ぼす季節内振動や台風の種の解析を行い、台風発生の予測結果に対する理解を深める。解析結果を国際誌へ投稿するとともに、得られたデータをCMIP6の枠組みで公開することでIPCC AR6（第6次評価報告書）へ貢献する。以上の活動を通じて、これまで問題の多かったスーパー台風の温暖化応答についてより信頼性の高い予測結果を得るとともに、アジア域を中心とする世界の適応策の策定に向けた情報を提供する。また、今後予想されるCMIP7プロトコル策定に資する知見を集積し、CMIP7時代に向けた高解像度気候モデリンググループの拠点形成を目指す。

3. 研究開発の方法

（1）全球非静力学モデルを用いたアジア域におけるスーパー台風の温暖化応答に関する研究

モデルにおける台風の再現性を向上させるため、季節から数年スケールの感度実験を実施して台風およびその環境場である基本場について再現性を調査し、モデルの物理設定を確定させる。CMIP6 HighResMIPのプロトコルに従ってNICAMの実行環境およびモデル出力変数を整備するとともに、地球シミュレータ上で長期積分を行うための実行システムを構築する。以上を用いて水平解像度56、28、14 kmで10～100年程度の過去・現在・将来気候実験を実施し、得られたデータを順次、CMIP6の枠組みで公開する。

過去・現在の再現実験のデータを用いて台風の解析を行い、台風の将来予測に必要な再現性が得られているか検証する。台風全般およびスーパー台風の発生数や進路、強度に着目して全球および海盆スケールの統計量を評価するとともに、水平解像度の依存性を確認することで高解像度化のメリットと課題を明らかにする。台風の発生や進路に影響を及ぼす環境場である基本場についても、バイアス低減の施策の効果が得られているかどうか検証する。

将来気候実験データを用い、台風の将来気候変化について全球および各海盆で解析を行う。台風全般およびスーパー台風の発生数や進路、強度、構造等の予測結果を提示するとともに、水平解像度の依存性も踏まえながら結果を考察する。特に日本を含むアジア域に着目した将来変化を提示し、適応策への利用可能性を議論する。

台風そのものに加え、季節内変動や台風の種といった台風発生に大きな影響を及ぼす諸現象について、再現性の評価と長期トレンドの解析を行う。これにより台風発生の将来変化の物理的メカニズムを考察するとともに、台風の解析結果も踏まえながらポストCMIP6に向けた課題を抽出する。

4. 結果及び考察

（1）全球非静力学モデルを用いたアジア域におけるスーパー台風の温暖化応答に関する研究

1) NICAMの物理過程調整、実行環境の構築、プロダクト実験実施、およびデータ公開

台風および基本場の再現性を向上させるため、NICAMの物理過程を変更した感度実験を多数実施して再現性の評価を行い、プロダクト実験で利用するモデル物理過程の設定を決定した。従来のモデル設定と比較して大きな影響があった主な変更とそのインパクトは以下の通りである。

- 地形性重力波抵抗の導入：北東太平洋における台風発生位置バイアスの低減。西風ジェットの北偏バイアスの緩和。
- 陸面モデルの更新およびエアロゾル導入：大陸上の高温バイアスの低減。
- 雲微物理スキームの更新：台風周辺における降水バイアスの低減。全球の雲・降水システムの再現性改善。

あわせてHighResMIPのプロトコルに従ってモデルに与える外部境界条件を整備するとともに、地球

表4.1.1 プロダクト実験一覧

水平解像度	積分期間
56 km	1950-2050 (101年)
28 km	
14 km	1950-1960 (11年)
	2000-2010 (11年)
	2040-2050 (11年)

シミュレータ上で長期積分を行うための実行環境を構築した。プロダクト実験として56 kmおよび28 kmメッシュ実験を過去・現在・将来に渡り連続して約100年間、14 kmメッシュ実験を過去・現在・未来の代表的な約10年間、それぞれ実施した。特に過去から現在までのプロダクト実験データについて、DIAS（データ統合・解析システム）を通じてCMIP6の枠組みで主要変数を公開した。

2) 現在気候における台風および基本場の再現性解析

過去から現在までのモデル再現実験データについて、台風およびそれを取り巻く基本場の再現性について水平解像度の依存性に注目しながら解析を行った。

全球の台風発生数については高解像度化に伴い減少し、観測データに近づく傾向が見られた。特にアジア域（北西太平洋・北インド洋）において顕著に減少したが、北東太平洋では逆に高解像度化で増加した。このような海盆毎の水平解像度依存性の違いは、台風の水平スケールの違いが関連していると考えられる。特に強い台風であるスーパー台風については、高解像度化によってほとんどの海盆で増加して観測データに近づく傾向が見られた（図4.1.1）。高解像度化によって台風の構造のモデルでの表現が改善されたためであると考えられる。

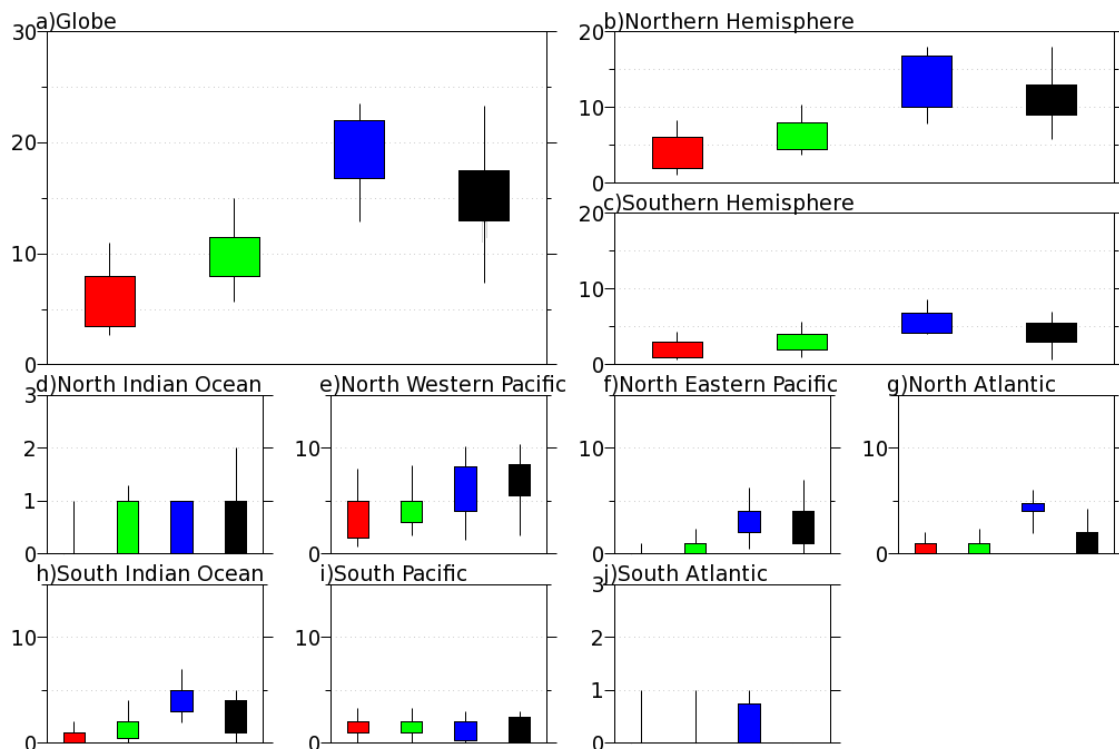


図4.1.1 スーパー台風の年間発生数の変動とその解像度依存性。56 km (赤色)、28 km (緑色)、14 km (青色)メッシュのNICAMの結果とIBTrACS(黒色)の結果を示す。髭の上端は最大値、箱の上端は75パーセント値、箱の下端は25パーセント値、髭の下端は最小値を示す。a) 全球、b) 北半球、c) 南半球、d) インド洋、e) 北西太平洋、f) 北東太平洋、g) 北大西洋、h) 南インド洋、i) 南太平洋、j) 南大西洋。

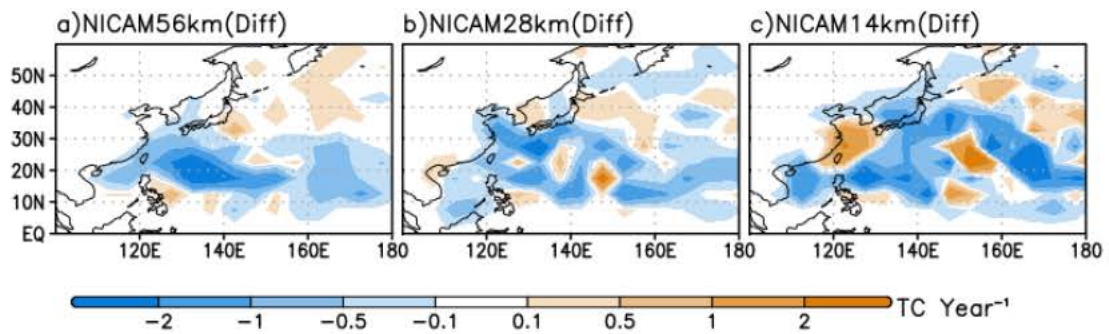


図4.1.2 北西太平洋域のスーパー台風の将来変化。(e) 56 km、(f) 28 km、(g) 14 km メッシュ NICAMの結果。将来気候は56 km、28 kmメッシュでは2025年から2049年までと定義し、14 kmメッシュでは2040年から2049年までとした。(e-g)の暖色は将来増加したことを示し、寒色は減少したことを示す。存在頻度は6時間毎のトラックデータに基づき東西5°南北5°の矩形領域に1年間にスーパー台風が存在した回数で定義している。

基本場の再現性を解析した結果、従来のNICAMに比べて大幅に改善していることが明らかになった。特に台風の進路に影響を与える東西風については北偏バイアスが緩和されていることから、これが日本方面へ転向する台風の再現性にもよい影響を与えていると考えている。また、大陸上における高温バイアスが大きく低減しており、台風の発生に影響を及ぼすアジアモンスーンの再現性向上も期待できる。一方で二重ITCZ（熱帯収束帯）バイアスの存在など、降水分布についてはまだ課題が残っている。

3) アジア域におけるスーパー台風の温暖化応答の解析

過去・現在・将来気候実験データを用いて、台風およびスーパー台風の温暖化応答を解析した。その結果、温暖化によって全球の台風発生数は減少するがスーパー台風については増加するという予測結果が得られた。特に日本を含む北西太平洋域についてはスーパー台風の発生数には明瞭な変化は見られなかったが、日本に襲来するスーパー台風の頻度については全体としてやや減少するという予測結果が得られた（図4.1.2）。強い台風の構造を解析した結果、再現性の高い高解像度モデルのみにおいて強風域の半径が拡大傾向であることが分かった。これは、ある地域における強風頻度を評価するためにはスーパー台風の数と構造を両方再現・予測できる高解像度モデルが必要であることを示している。スーパー台風は頻度が低いこと、海面温度の上昇パターンに台風予測が依存すること等を考慮すると、海盆毎の定量的な評価や増減の地域性については今後の大規模アンサンブル実験の実現を待つ必要がある。

4) 台風の再現性・温暖化応答に影響を与える諸現象の解析

台風の発生に影響を及ぼす季節内変動について再現性および長期トレンドの解析を行った。NICAMの高解像度気候実験の結果を解析した結果、季節内変動の再現性能はCMIP5モデルと比較して世界トップレベルであることが分かった。

台風発生の前段階である台風の種について、HighResMIPに参加するモデルデータを用いてマルチモデル解析を実施した。その結果、全球的な台風発生数の減少という将来変化予測は「台風の種の数」の減少で概ね説明できることが明らかになった。一方、「種が台風に成長する割合（生存率）」についてはモデル間でばらつきが大きいことも分かった。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

これまでの台風将来予測で用いられている気候モデルでは風速のバイアス補正や雲のパラメータ化

が行われ、予測の信頼性には大きな疑問があった。また、台風の分布に加えて強度を気候モデルで再現することは難しく、海盆毎にスーパー台風の予測を行うことは困難であった。本研究では風速のバイアス補正や雲のパラメータ化といった経験則を排した物理的に適切なモデルを用いて台風の分布を再現するとともに、従来の全球気候モデルでは再現が難しいスーパー台風についても海盆毎の台風発生数を概ねよく再現することに成功した。スーパー台風の全球発生数が将来減少するという予測結果は従来の気候モデルと同様の結果であるが、本研究の結果から、北西太平洋域におけるスーパー台風の発生数についてはあまり変化がなく、日本とその南海上の存在数は全体としてむしろ減少傾向になると予測された。一方で強い台風の強風域は拡大すると予測されているが、このような強風域の変化を予測するためには本研究のような高解像度モデルが必要であることを初めて実証した。以上の結果は、本研究で得られた温暖化台風予測が既存モデルの結果に比べて信頼性が高いことを示している。同時に、スーパー台風の海盆毎の定量的な予測や地域毎の強風頻度予測を行うためには、本研究と同程度の高解像度モデルを用いた大アンサンブル実験が必要であることを示唆しており、より実用的な温暖化適応策への応用に向けた道筋を示すことができた。

台風の発生に関連した現象の気候変化についても科学的な理解が進展した。特に季節内振動については、NICAMの季節内振動の再現性が世界最高レベルであることを示すとともに、その長期トレンドについて議論を喚起する新たな結果が得られた。また、台風の種のマルチモデル解析を世界に先駆けて実施し、台風の種の数が台風発生数の減少にとって重要であることを示した。

本研究で用いたNICAMは全球非静力学モデルとしてはほぼ唯一のCMIP6 HighResMIPへ参加するモデルである。本研究を契機にこれまでは難しかった従来の気候モデルとの比較が容易になるとともに、国際研究協力体制の深化によって解像度やアンサンブル数、雲パラメータ化、大気海洋結合などが台風の将来予測に与える影響について議論が進展し、ポストCMIP6に向けた課題の洗い出しにつながった。

今回整備したNICAM16-Sの開発や評価には国内の多くの研究機関が関与しており、ポストCMIP6に向けた協力体制の強化につながるだけでなく、研究を通じて全球非静力学モデルNICAMの性能が全体として向上したことの意義も極めて大きい。本研究では台風に着目した解析を中心に実施したが、これまでにない高解像度の長期実験データセットが広く利用可能になったことは台風以外の様々な研究においても恩恵があり、既に活用が始まっている。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本課題ではCMIP6に沿ったプロダクト実験を実施して広くデータを提供するとともに、IPCC第6次評価報告書 (AR6) の引用を目指して4本の論文 (Nakano and Kikuchi 2019, Kodama et al. 2020, Roberts et al. under review, Yamada et al. in revision) を提出した。IPCC AR6の極端現象の章ではLead Authorとして研究協力者の佐藤正樹教授が参加していることから、これらの研究結果も反映されることが期待できる。また、得られたデータを世界中の研究者がそれぞれの視点で解析することで、IPCC AR6やその後の研究を通じて各国の政策へ影響を与えることを期待している。

スーパー台風については発生数が全球で増加するとともに、強い台風の強風域が拡大するという予測結果を信頼性の高いモデルで得られたという点で意義がある。特に強風域のサイズ予測については現時点で本モデル以外では難しく、独自性の高い予測として適応策の参考情報になると考えている。また、CMIP6へ提供した生データだけでなく、台風強風域のサイズをはじめとする加工データについても必要に応じて提供可能である。現時点ではスーパー台風の数を海盆毎に定量的に予測するためにはサンプル数に課題がある。近い将来、富岳コンピュータをはじめとする高性能スパコンの登場によってアンサンブル数を増やすことができれば定量的な評価も可能になり、適応策へより実用的な貢献ができると考えている。以上のような活動は、持続可能な開発目標 (SDGs) の目標13「気候変動に具体的な対策

を」への貢献にもつながるものである。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) M. NAKANO and K. KIKUCHI: Geophys. Res. Lett., 46, 4441-4449 (2019) Seasonality of intraseasonal variability in global climate models.

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) C. Kodama, T. Ohno, A. T. Noda, H. Yashiro, Y. Yamada, M. Nakano, T. Seiki, T. Nasuno, Y.-W. Chen, T. Miyakawa, M. Satoh, and M. Sugi: Status and outlook of a high-resolution climate simulation using NICAM toward CMIP6 HighResMIP, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari, Chiba, Japan, 2017.
- 2) 中野 満寿男: NICAMを用いた北半球夏期季節内振動 (BSISO) と台風発生の予測, 長期予報研究会「長期予報と大気大循環」, 気象庁, 東京, 2017 (招待講演) .
- 3) M. Satoh, C. Kodama, T. Ohno, A. T. Noda, H. Yashiro, Y. Yamada, M. Nakano, T. Seiki, T. Nasuno, Y.-W. Chen, T. Miyakawa, M. Sugi, and W. Roh: High-resolution climate simulations using the Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, NICAM, European Geosciences Union General Assembly 2018, Vienna, Austria, 2018.
- 4) M. Satoh, C. Kodama, T. Ohno, A. T. Noda, H. Yashiro, Y. Yamada, M. Nakano, T. Seiki, T. Nasuno, Y.-W. Chen, T. Miyakawa, M. Sugi, and W. Roh: High-resolution climate simulations using the Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, NICAM, European Geosciences Union General Assembly 2018, Vienna, Austria, 2018.
- 5) Y. Yamada, M. Satoh, M. Sugi, C. Kodama, A. T. Noda, M. Nakano, and T. Nasuno: Widening of Tropical Cyclone Scale Projected By Multi-Decadal Experiments with a 14km-Mesh Global Nonhydrostatic Model, 33rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Ponte Vedra, FL, U.S., April 16 - 20 2018.
- 6) C. Kodama, M. Satoh, T. Ohno, A. T. Noda, H. Yashiro, Y. Yamada, M. Nakano, T. Seiki, T. Nasuno, Y.-W. Chen, T. Miyakawa, M. Sugi, and W. Roh: Preliminary results of a high-resolution climate simulation using the Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, NICAM, for CMIP6 HighResMIP, 15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, Honolulu, Hawaii, USA, 2018.
- 7) M. Nakano, K. Kikuchi, T. Nasuno, Y. Yamada, M. Satoh, and M. Sugi: Future Changes in the Intraseasonal Variability and Typhoon Activity in a Nonhydrostatic Global Atmospheric Model, AOGS2018, Honolulu, USA, 2018.
- 8) 小玉知央, 佐藤正樹, 大野知己, 野田暁, 八代尚, 山田洋平, 中野満寿男, 清木達也, 那須野智江, Ying-Wen Chen, 宮川知己, 杉正人, Woosub Roh, 2018/11/01: 全球非静力学モデルNICAM気候実験における水平解像度依存性, 日本気象学会2018秋季大会, B406, 仙台.
- 9) Yamada, Y., C. Kodama, M. Satoh, T. Ohno, A. T. Noda, H. Yashiro, M. Nakano, T. Seiki, T. Nasuno, Y.-W. Chen, T. Miyakawa, M. Sugi, and W. Roh, 2018: Performance of tropical cyclone activities simulated by NICAM for HighResMIP: Preliminary results. 2018 American Geophysics Union Fall Meeting, Washington D. C., U.S., December 9-14 2018.
- 10) 山田洋平, 台風セミナー2019 (2019) 地球温暖化と台風 (導入編) (招待講演) .
- 11) 山田洋平, 佐藤正樹, 小玉知央, 2019年度日本建築学会大会 (北陸) 構造部門 (荷重) : 頻発する極端気象に対する強風被害調査・要因分析・荷重設計 (2019) 極端気象の現状に対する理解—観測とシミュレーション (招待講演) .

- 12) 小玉知央, 2019年度第4回SPEED研究会 (エコイノベーションとエコビジネスに関する研究会) (2019) 高解像度気候モデルが予測する将来の台風活動 (招待講演) .
- 13) 小玉知央, 日本気象学会2019秋季大会 (2019) 全球非静力学モデルNICAMにおける温帯低気圧の水平解像度依存性.
- 14) C. KODAMA, Y. YAMADA, T. OHNO, T. SEIKI, H. YASHIRO, A. T. NODA, M. NAKANO, W. ROH, M. SATOH, T. NITTA, T. NASUNO, T. MIYAKAWA, Y.-W. CHEN, and M. SUGI, AGU Fall Meeting 2019 (2019) Model updates and early results of a decadal high-resolution climate simulations using the Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, NICAM, for CMIP6 HighResMIP.
- 15) C. KODAMA, PRIMAVERA Final General Assembly (2020) Early results of extratropical cyclone analysis in NICAM HighResMIP simulations.
- 16) 山田洋平, 小玉知央, 佐藤正樹, 杉正人, M. J. Roberts, 水田亮, 野田暁, 那須野智江, 中野満寿男, P. L. Vidale, 日本気象学会2020年度春季大会 (2020) HighResMIPマルチモデルアンサンブルの出力を用いた台風発生数の将来変化への台風の種の寄与の解析 (採択済み・新型コロナウイルス感染症の感染拡大により予稿集の発行により大会開催とする方針を気象学会が発表)
- 17) Y. Yamada, C. Kodama, M. Satoh, M. Sugi, M. J. Roberts, R. Mizuta, A. T. Noda, T. Nasuno, M. Nakano, P. L. Vidale, JpGU2020 (2020) Projected future changes in tropical cyclone genesis and its seed frequencies by using HighResMIP multi model ensemble simulation (採択済み・新型コロナウイルス感染症の感染拡大により延期の上でオンライン開催を予定) .

7. 研究者略歴

研究代表者

小玉 知央

東北大学大学院理学研究科卒業、博士（理学）、令和2年3月時点で国立研究開発法人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雲解像モデル開発応用グループ研究員

研究分担者

1) 山田 洋平

東京大学大学院理学系研究科卒業、博士（理学）、令和2年3月時点で国立研究開発法人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雲解像モデル開発応用グループポストドクトラル研究員

2) 中野 満寿男

九州大学大学院理学府修了、博士（理学）、令和2年3月時点で国立研究開発法人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雲解像モデル開発応用グループ技術研究員

11. 成果の詳細

II-1 全球非静力学モデルを用いたアジア域におけるスーパー台風の温暖化応答に関する研究

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球環境部門 環境変動予測研究センター

雲解像モデル開発応用グループ

小玉 知央

同上

山田 洋平・中野 満寿男

<研究協力者> 大野 知紀・清木 達也・八代 尚・野田 暁・佐藤 正樹・三浦 裕亮・那須野 智江・宮川 知己・Ying-Wen Chen・杉 正人

平成29～令和元年度研究経費（累計額）：17,901千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成29年度：6,068千円、平成30年度：5,765千円、令和元年度：6,068千円）

【要旨】

台風は日本をはじめとするアジア域、そして世界各地に大きな自然災害をもたらす。特に被害をもたらすスーパー台風については将来増加すると予測されているが、予測で用いられている気候モデルには水平解像度の粗さや雲パラメータ化に問題があり、予測の信頼性には大きな疑問がある。そこで本研究では、改良した高解像度の全球非静力学モデルNICAMを用い、CMIP6 HighResMIP（高解像度モデル比較プロジェクト）に沿った気候実験を実施した。その結果、これまでに比べてNICAMの台風および基本場の再現性が向上していることが分かった。台風の温暖化応答を解析した結果、全球および日本を含むアジア域（北西太平洋域）では温暖化によって台風発生数が減少するが、スーパー台風については全球で発生数が増加傾向であるものの、日本への襲来数はむしろ減少傾向という将来予測結果が得られた。強い台風の構造を詳しく解析した結果、水平解像度を高めると構造の再現性が向上するとともに、温暖化によって強風域が拡大する傾向が明瞭になることが分かった。また、台風の種についてHighResMIPマルチモデル解析を行い、台風の種の減少と台風の発生数の減少が関連していることが分かった。台風発生に関する季節内振動の再現性と長期トレンドについて解析を行い、NICAMは季節内振動の再現性がCMIP5のモデルと比較して世界最高レベルであることを確認した。

【キーワード】

地球温暖化、台風、高解像度全球気候シミュレーション、HighResMIP、IPCC第6次評価報告書

1. はじめに

強い熱帯低気圧（以下、台風）は日本をはじめとするアジア域、そして世界各地で暴風や豪雨、洪水、高潮といった大きな自然災害をもたらす。気候モデルを用いたシミュレーションから、特に大きな被害をもたらす風速59 m/s以上又は中心気圧945 hPa以下の「スーパー台風」の数は地球温暖化に伴って増加すると予測¹⁾されており、過去の観測からもスーパー台風の増加を示唆する結果が得られている²⁾。また、気象庁によると2015-2019年それぞれの年に観測された全球平均気温は過去約130年における上位5年を占めており、地球温暖化の加速傾向が観測されている。従って、地球温暖化に伴う台風の変化についても既に起こり始めている可能性があり、早急に適応策を立案するためには信頼性の高い予測情報を得ることが緊急の課題である。

しかし、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）評価報告書の被引用論文で利用されている多くの気候モデルは台風の構造を表現するには水平解像度が粗く、台風の重要構成要素である雲の効果を経験則によりパラメータ化しているためスーパー台風をほとんど再現できない。このため、台風の風速のバイアス補正が行われており、予測の信頼性には大きな疑問がある。研究代表者らは気候モデルとしては

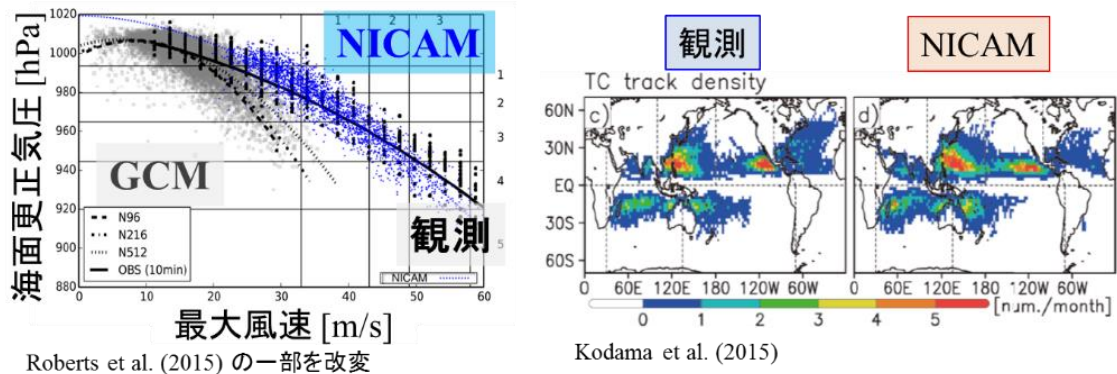


図1.1.1 (左) 台風の最大風速と中心気圧の関係。黒：観測、灰：一般的なモデル⁷⁾、青：14 kmメッシュNICAM。(中・右) 観測および14 kmメッシュNICAMにおける台風の経路⁶⁾。

世界最高解像度でかつ雲のパラメータ化を行わない全球非静力学モデルNICAM^{3,4,5)}を用いて気候実験⁶⁾を行い、風速のバイアス補正を行うことなく台風発生数やスーパー台風を再現することに成功した(図1.1.1)。これは信頼性の高い台風将来予測に向けた重要な一歩であるが、日本付近に到達する台風の数が少ないなど予測に影響を与えるバイアスも確認されており、改善をほどこした最新モデルを用いた気候シミュレーションが必要となっていた。

2. 研究開発目的

本研究ではアジア域のスーパー台風を対象に既存モデルに比べて物理的により適切なモデルを用いて信頼性の高い温暖化台風予測を提供すること、およびデータの解析・公開を通じてIPCC AR6(第6次評価報告書)をはじめとする国際研究コミュニティへ貢献することを全体およびサブテーマ目標とする。より具体的には、台風予測に影響を与えるバイアスを低減した最新版の高解像度全球非静力学モデルNICAMを用い、CMIP6(結合モデル相互比較プロジェクト)の構成プロジェクトであるHighResMIP(高解像度モデル相互比較プロジェクト)⁸⁾に従って過去・現在・将来気候実験を実施する。台風およびスーパー台風の発生分布や進路、強度の再現性を確認するとともに、台風に影響を与える基本場についても再現性を評価する。将来気候実験についても台風およびスーパー台風の解析を実施し、特に日本を含むアジア域に接近するスーパー台風の頻度について将来予測結果を示す。また、台風の構造の再現性とその将来変化についても解析する。あわせて台風発生に大きな影響を及ぼす季節内振動や台風の種の解析を行い、台風発生の予測結果に対する理解を深める。解析結果を国際誌へ投稿するとともに、得られたデータをCMIP6の枠組みで公開することでIPCC AR6(第6次評価報告書)へ貢献する。以上の活動を通じて、これまで問題の多かったスーパー台風の温暖化応答についてより信頼性の高い予測結果を得るとともに、アジア域を中心とする世界の適応策の策定に向けた情報を提供する。また、今後予想されるCMIP7プロトコル策定に資する知見を集積し、CMIP7時代に向けた高解像度気候モデリンググループの拠点形成を目指す。

3. 研究開発方法

本研究課題のタイムラインを図3.1.1に示す。それぞれの項目の概要は以下の通りである。なお、項目1)および基本場の解析に関しては、統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマA「全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発」(JPMXD0717935457)との共同研究として実施した。

1) NICAMの物理過程調整、実行環境の構築、実験実施、およびデータ提供

NICAMにおける台風の進路に影響を及ぼす基本場および台風の再現性を向上させるため、季節から数年スケールの感度実験を実施して再現性を調査し、モデルの物理設定を確定させる。併せてCMIP6 HighResMIPのプロトコルに従ってNICAMの実行環境を構築するとともに、CMIP6 HighResMIPの要求に応

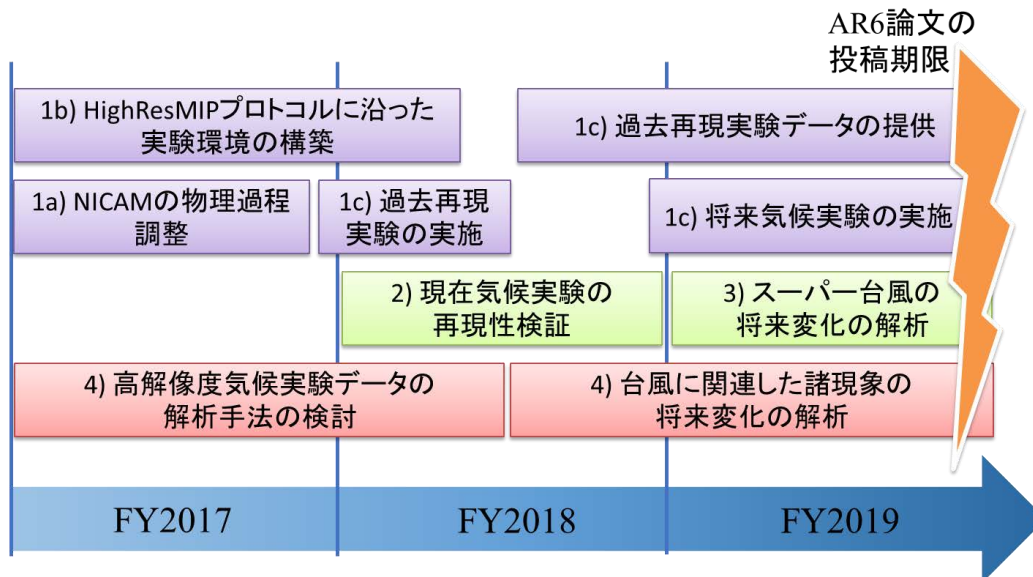


図 3.1.1 本研究課題のタイムライン。片括弧は 4 章の各節番号に対応している。

じてモデル出力変数を整備する。地球シミュレータ上でNICAMの長期積分が滞りなく実行できるように実行システムを構築する。

完成したNICAMの実行環境および実験設定を用い、水平解像度56、28、14 kmで10～100年程度の過去・現在・将来気候実験を実施する。得られたデータを順次、DIAS（データ統合・解析システム）を通じてCMIP6の枠組みで公開する。

2) 過去再現実験の再現性検証

台風および基本場について解析を行い、台風の将来予測に必要な再現性が得られているか検証する。台風全般およびスーパー台風の発生数や進路、強度に着目して全球および海盆スケールの統計量を評価するとともに、水平解像度の依存性を確認することで高解像度化のメリットと課題を明らかにする。基本場については亜熱帯ジェットや地上気温など、台風の発生や進路に影響を及ぼす要因についてバイアス低減の施策の効果が得られているかどうか検証する。

3) 将来気候実験の解析

将来気候実験データを用い、台風の将来気候変化について全球およびアジア域を含む各海盆で解析を行う。台風全般およびスーパー台風の発生数や進路、強度、構造等の予測結果を提示するとともに、水平解像度の依存性も踏まえながら結果を考察する。特に日本を含むアジア域に着目した将来変化を提示し、適応策への利用可能性を議論する。

4) 台風に関連した諸現象の解析

季節内振動や台風の種といった台風発生に大きな影響を及ぼす諸現象について、再現性の評価および長期トレンドの解析を行う。これにより台風発生の将来変化の物理的メカニズムを考察するとともに、台風の解析結果も踏まえながらポストCMIP6に向けた課題を抽出する。

4. 結果及び考察

1) NICAMの物理過程調整、実行環境の構築、プロダクト実験実施、およびデータ公開

a. NICAMの物理過程調整によるモデル物理設定の決定

表4.1.1は本研究において決定した新しいモデル物理スキームの設定（NICAM16-S）⁹⁾、および過去の気候実験で用いた旧バージョンの設定（NICAM.12）^{6,10)}である。NICAM.12を用いた長期気候実験^{6,10)}で

表4.1.1 NICAMの各バージョンにおける物理スキーム（更新点のみ）

モデルバージョン名	NICAM16-S	NICAM.12
雲微物理	改良版シングルモーメント6カテゴリスキーム ^{11,12,13} 、エアロゾル間接効果あり	シングルモーメント6カテゴリスキーム ^{11,14}
放射	MstrnX ¹⁵ 、更新版放射テーブル ¹⁶ 、雲微物理と結合、エアロゾル直接効果あり	MstrnX ¹⁵
重力波	地形性重力波抵抗 ¹⁷	なし
陸面	MATSIRO ¹⁸ 、湿り沼スキーム ¹⁹ 、アルベド更新	MATSIRO ¹⁸
海洋	境界条件へ固定（感度実験では一部、slab ocean利用）	slab ocean、境界条件へナッジング

は現実的な台風の発生数やその季節変化はよく再現できていたものの、日本への台風接近数の過小バイアス、北東太平洋での台風発生位置の西偏バイアス、北大西洋での台風発生数の過小バイアス、台風周辺降水の過剰バイアスなど、顕著なバイアスも確認されていた。また、基本場についてはジェットの内偏や陸上高温バイアスといった気候バイアスが存在し、これが台風の再現性に影響を及ぼしている可能性があった。そこで、モデルの物理スキームを変更した年スケールの感度実験を多数実施し、新しいNICAM16-Sの設定を確定させた。

台風の発生位置および進路に影響があった変更としては、地形性重力波抵抗の導入が挙げられる。台風の発生位置については東太平洋において位置バイアスが明瞭に軽減した（図4.1.1）。また、亜熱帯の西風ジェットの内偏バイアスが緩和されており（図省略）、日本方面へ襲来する台風の数についても増加して観測に近づく傾向が見られた。

NICAM16-SではNICAM.12と比較して大陸上における地上気温の高温バイアスが大きく減少した（2b節参照）。バイアスが改善した理由として、陸面モデルの更新およびエアロゾルの導入が寄与しているようである。陸面モデルの更新では、夏季シベリアにおいて土壌水分量の増加と気温の低下傾向という過去研究¹⁹から予想された結果が確認できた（図4.1.2）。また、エアロゾルは特に北アフリカおよび南

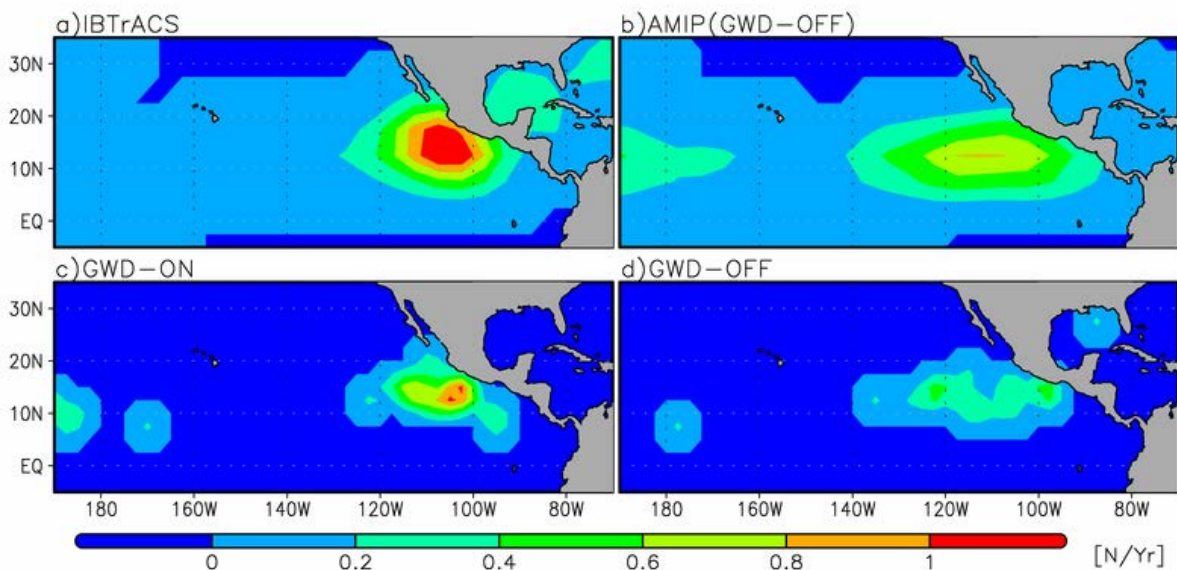


図4.1.1 東太平洋の台風の発生頻度分布 [発生数 Yr^{-1}]。発生頻度は 5×5 度の領域内で1年当りに発生した台風の数で定義した。a) 1979～2008年の観測（IBTrACS）、b) 旧版NICAMを用いた既存の気候実験（1979～2008年；地形性重力波抵抗スキームは未使用）、c) 地形性重力波抵抗スキームを使用した感度実験、d) 地形性重力波抵抗スキーム未使用の感度実験。

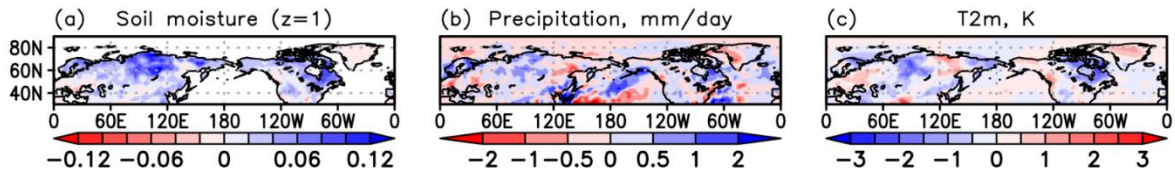


図4.1.2 陸面モデル更新による土壌最上層水分量(a)、降水量(b)および2 m気温(c)へのインパクト⁹⁾。56 kmメッシュ実験を4年実施し、後半3年の6-8月を平均した。

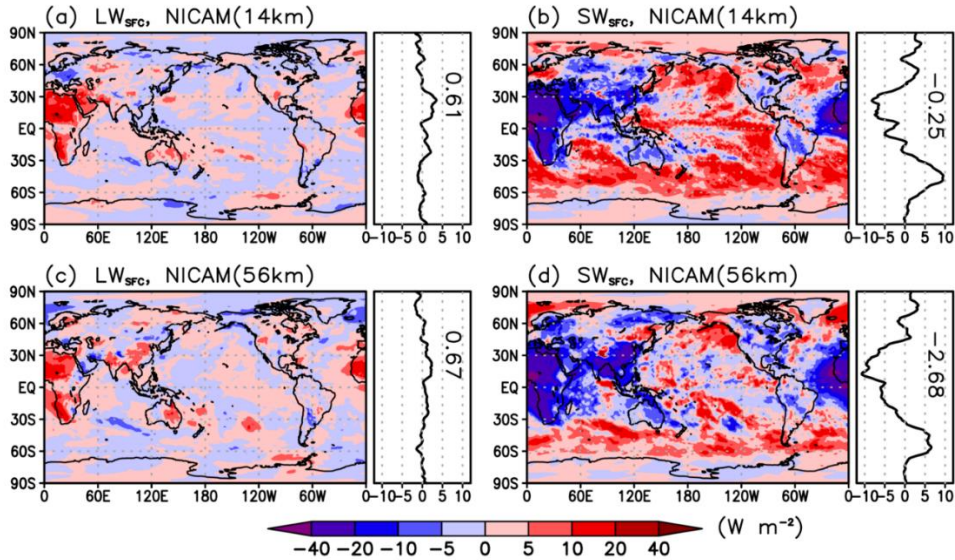


図4.1.3 エアロゾル導入による地表面の長波放射 (a, c) および太陽放射(b, d)に対するインパクト⁹⁾。下向きが正。14 km (a, b) および 56 km (c, d) メッシュ実験を1年平均。

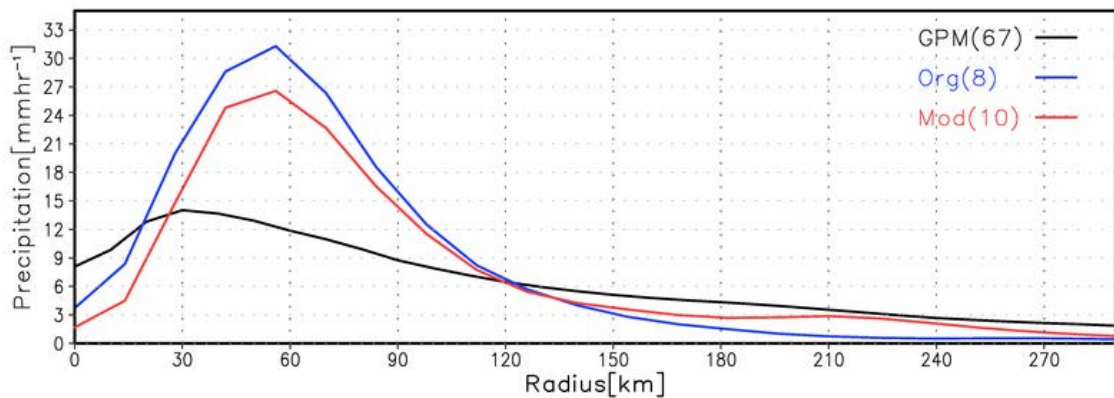


図4.1.4 中心気圧が945 hPa以下に低下した台風が最低中心気圧に到達時に方位角平均した降水量 [mm hr⁻¹] の半径分布の合成図。黒線は観測 (GPM)、青線はオリジナルの雲微物理スキーム使用時の結果、赤線は改良版雲微物理スキーム使用時の結果。括弧内の数字は合成した台風の数を示す。観測、実験共に一時間平均降水量から作成した。

アジア域で下向き太陽放射の減少（図4.1.3）をもたらしており、地上気温も低下傾向である（図省略）。感度実験ではサンプル数が少ないため、エアロゾルが台風に与えた影響を評価するのは現時点では難しいが、北アフリカで発生する偏東風波動が北大西洋の台風活動に影響を与えることが知られてお、北大西洋における台風発生数の改善（2a節参照）に対する一つの要因であると考えている。なお、プロトコル上の理由から海洋の実験設定がNICAM.12とNICAM16-Sで異なっており、これも高温バイアスを抑制する効果がある。

雲微物理スキームの更新は、台風に伴う雲・降水システムに対して大きな影響を与えている。図4.1.4は更新前後における台風に伴う降水量をGPM衛星観測データと比較したものである。観測に比べると降水量は依然として過剰であるが、改良前に比べて半径120 kmまでは降水量の過剰を最大で30%程度軽減することができている。また、その外側における降水量の過小バイアスも軽減できている。このようなインパクトは、雲微物理スキームの改良において固相の水、特に雪を大気に滞留させやすくしていることに起因している。台風は潜熱加熱をエネルギー源に発達することから、雲・降水分布のよりよい再現は台風の発達と構造の再現にとって重要であると考えている。

b. HighResMIPプロトコルに沿ったNICAMの実行環境構築

HighResMIPにおいて指定されたプロトコル⁸⁾に従い、56、28、14 kmメッシュNICAMを実行するための初期条件、境界条件の準備を行った。表4.1.2はTier 1（過去再現実験）、Tier 3（将来気候実験）それぞれの実験設定である。

Tier 1（過去再現実験）では海面温度および海水密接度として0.25° 格子の日平均値という高時空間分解能データを用いた。自然起源のエアロゾル（ダスト、海塩など）についてはエアロゾル・海洋と結合した220 kmメッシュNICAMを100年間積分し、後半90年間を平均することでモデル気候場を作成した。人為起源のエアロゾルについてはCMIP6から提供された簡易プルームモデル²²⁾により工場排出・バイオマス燃焼によるエアロゾル増加率を計算し、NICAMの雲・放射モデルへ渡すように変更を行った。

Tier 3（将来気候実験）についてはCMIP5におけるRCP8.5シナリオ相当のSSP585（共有社会経済パス）³¹⁾に沿った設定を用いた。なお、将来気候実験についてはCMIP6からの外部境界条件の提供が予定より1年近く遅れたことでプロダクト実験開始も同程度遅れたが、台風の解析を最優先で実施することで予測結果を予定通り示すことができた。

c. 実験の実施およびデータ提供

表4.1.3は実施したプロダクト実験の一覧である。56、28 kmメッシュ実験についてはプロトコルに厳密に従い、1950年から2050年まで連続的に積分を行った。14 km実験については計算資源の都合上、過去、現在、将来気候に相当する年代についてそれぞれ10年程度の積分を実施した。g07f_1950、

表4.1.2 NICAM HighResMIP実験の外部境界条件

	Tier 1（過去再現実験）	Tier 3（将来気候実験）
海水面温度・海水密接度	HadI SST2ベースの0.25° 日平均値 ²⁰⁾	CMIP5 RCP8.5モデルの変化量およびトレンドを上乗せ ²¹⁾
自然起源エアロゾル	エアロゾル・海洋と結合した低解像度NICAMの気候値	Tier 1と同様
成層圏エアロゾル	CMIP6用の歴史的変動データ	気候値
人為起源エアロゾル	簡易プルームモデルMACv2-SP ²²⁾	Tier 1と同じモデルだが、SSP585に沿った係数を利用 ²³⁾
温室効果気体の濃度	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , CFC-11, CFC-12 など ²⁴⁾	SSP585準拠 ²⁵⁾
太陽放射	バンド毎の月平均値 ²⁶⁾	最尤シナリオ
オゾン	CMIP6用の歴史的変動データ ²⁷⁾	SSP585準拠 ²⁸⁾
葉面積指数（LAI）	2004-2013の月平均気候場 ^{29, 30)}	Tier 1と同様

表4.1.3 プロダクト実験一覧

実験名	水平解像度	Tier	大気初期条件	積分期間
g07f_1950	56 km	1, 3	ERA-20C再解析 ³²⁾	1950-2050 (101年)
g08f_1950	28 km			1950-1960 (11年)
g09f_1950	14 km	1		2000-2010 (11年)
g09f_2000		3		2040-2050 (11年)
g09f_2040			g08f_1950実験の2040/1/1	

g08f_1950、g09f_1950実験のTier 1の期間についてはDIASを通じてCMIP6の枠組みで主要変数を公開済みである。

2) 現在気候における台風および基本場の再現性解析

a. 台風

ここではHighResMIPのプロトコルに沿ったNICAMのシミュレーションにおける台風の再現性を確認する。また水平56 km、28 km、14 kmメッシュの低、中、高解像度NICAMを比較することにより、台風の再現性に対する解像度の影響を検証する。台風の再現性確認のためにベストトラック(IBTrACS³³⁾)を使用した。HighResMIPでは1950年から2014年迄に観測された海面水温を外部条件として与えている。一方でIBTrACS version 4では1980年以降の台風の位置と強度の情報が記録されている。両者の期間が重複する1980年から2014年までを解析期間とする。ただし14 kmのNICAMの解析期間は2000年から2009年迄である。解析期間を2000年から2009年迄に統一した場合も基本的な傾向は同じである。台風の抽出は(34)と同じ手法を用いている。抽出手法時に用いた条件は全ての解像度で統一しており以下に示すとおりである。

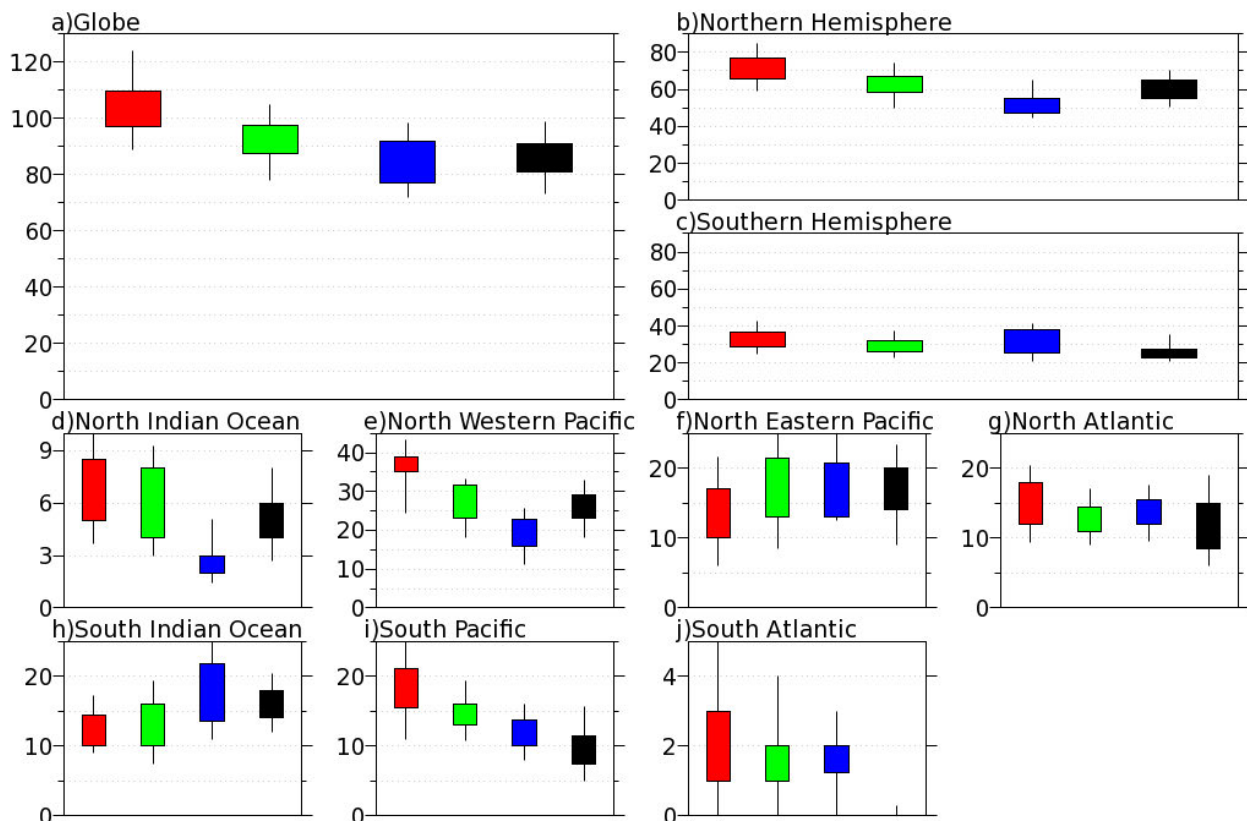


図4.1.5 台風の年間発生数の変動とその解像度依存性。56 km (赤色)、28 km (緑色)、14 km (青色)メッシュのNICAMの結果とIBTrACS(黒色)の結果を示す。髭の上端は最大値、箱の上端は75パーセント値、箱の下端は25パーセント値、髭の下端は最小値を示す。a) 全球、b) 北半球、c) 南半球、d) インド洋、e) 北西太平洋、f) 北東太平洋、g) 北大西洋、h) 南インド洋、i) 南太平洋、j) 南大西洋。

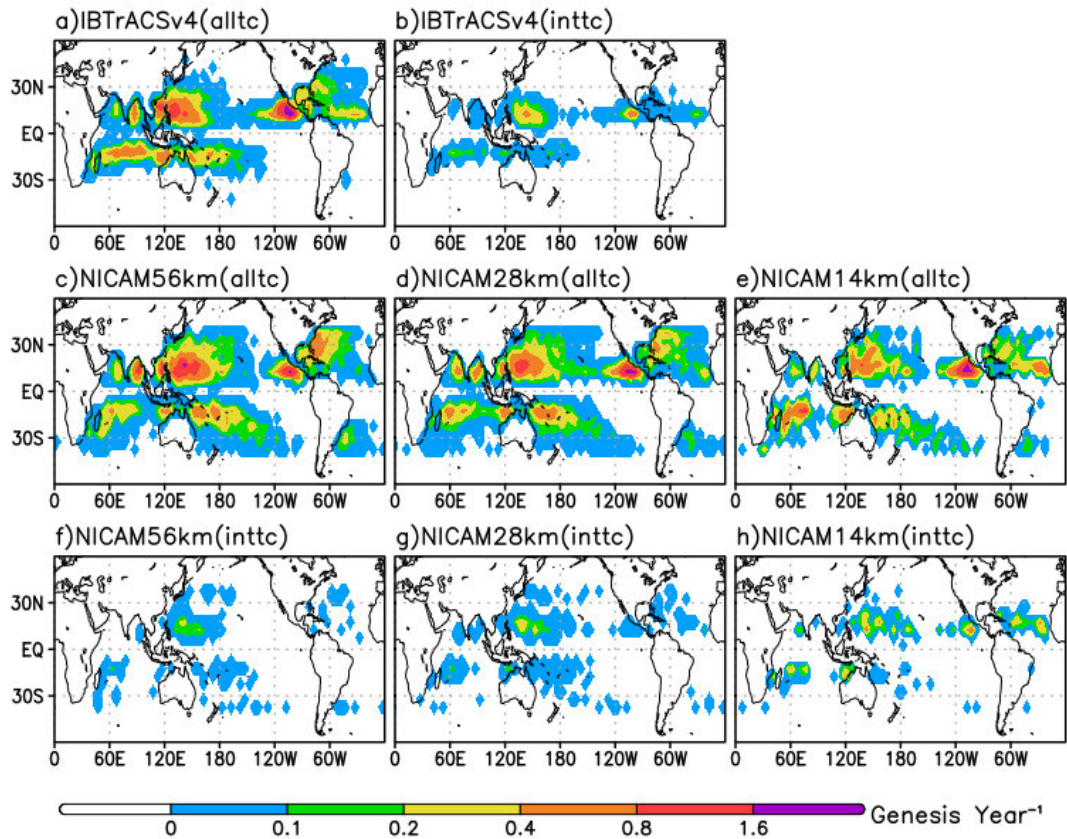


図4.1.6 台風の発生位置の分布とその解像度依存性。(a-b) ITrACSにおける全ての台風(a)およびスーパー台風(b)。(c-h) NICAMにおける全ての台風(c-e)およびスーパー台風(f-h)。NICAMの解像度は56 km (c, f)、28 km (d, g)および14 km (e, h)。

る。

1. 最大風速は 17.5 m s^{-1} 以上
2. 850hPa面の渦度の最大値は $3.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上
3. 700、500、300 hPaの気温偏差の和は8 K以上
4. 上記1～3の条件を連続して36時間以上満たす
5. 発生位置は北緯 40° から南緯 40° の洋上

本手法に基づき抽出した台風とITrACSに基づいた台風の年間発生数の変動を図4.1.5に示し、発生位置の分布を図4.1.6に示す。

全球の台風発生数は高解像度化に伴い減少し、ITrACSの結果に近づく(図4.1.5a)。発生位置の分布はどの解像度でも概ね現実的に再現されている(図4.1.6a, c-e)。発生数の解像度依存性は北半球(図4.1.5b)、特に北インド洋と北西太平洋において高解像度化に伴う減少の影響が大きい(図4.1.5d、図4.1.5e)。ITrACSでは台風の発生が多い、北インド洋のベンガル湾、北西太平洋の南シナ海やフィリピン北部で、高解像度化による減少が確認できる(図4.1.6c-e)。一方、北東太平洋では発生数の増加が確認できる(図4.1.5f)。北東太平洋の台風は水平スケールが小さいことが知られており、高解像度化により水平スケールの小さな台風の再現が改善されたためと考えられる³⁵⁾。北大西洋全体では解像度の違いによる系統的な発生数の変化は見られない(図4.1.5g)が、発生位置には差がみられた(図4.1.6c-e)。56 kmメッシュでは北米大陸の東海上での発生が顕著だが、高解像度化に伴い発生数は北米大陸の東海上で減少し、アフリカ大陸の西海上で増加する傾向が見られる。

南半球では高解像度化に伴う系統的な発生数の増減は確認できない(図4.1.5c)。これは南インド洋で増加、南太平洋で減少が解像度による変化を相殺したためである(図4.1.5h, i)。ITrACSでは南緯 30° よりも南極側での発生は少ない一方で、NICAMでは全ての解像度で南緯 30° より南極側での発生が多い

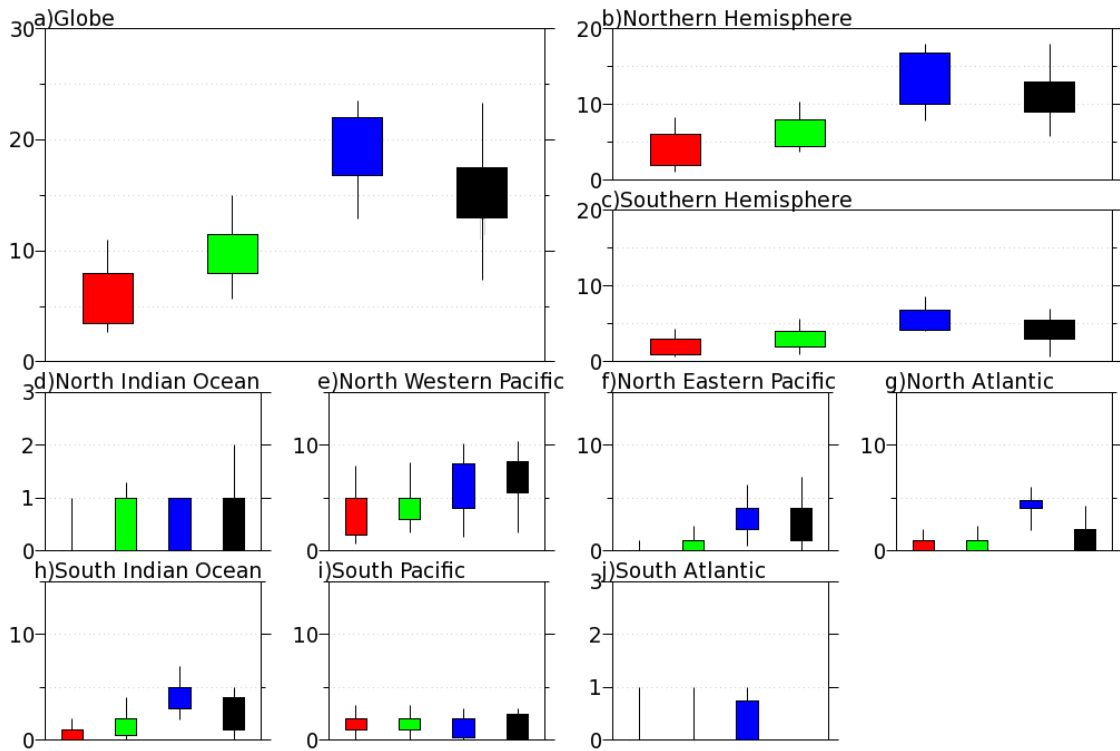


図4.1.7 スーパー台風の年間発生数の変動とその解像度依存性。56 km (赤色)、28 km (緑色)、14 km (青色)メッシュのNICAMの結果とIBTrACS(黒色)の結果を示す。髭の上端は最大値、箱の上端は75パーセント値、箱の下端は25パーセント値、髭の下端は最小値を示す。a) 全球、b) 北半球、c) 南半球、d) インド洋、e) 北西太平洋、f) 北東太平洋、g) 北大西洋、h) 南インド洋、i) 南太平洋、j) 南大西洋。

(図4.1.6a, c-e)。南太平洋では高解像度化に伴い発生数は減少しているが、高緯度での発生は増加している(図4.1.5i, 図4.1.6c-e)。この観測との不一致の改善に対して、台風の抽出手法の再考、あるいはシミュレーションにおいて台風(熱帯低気圧)と温帯低気圧のハイブリッドな構造を持つ低気圧が多いことが考えられる。

シミュレーションでは最低中心気圧が945 hPaを下回った台風をスーパー台風と呼ぶ。IBTrACSでは最大風速が 58 m s^{-1} を上回った台風をスーパー台風と定義して、シミュレーションにおけるスーパー台風の再現性を比較する。ほとんどの海盆でスーパー台風の発生数は高解像度化で増加することが確認できる(図4.1.7)。台風の強度は構造と関係があり、高解像度化によって台風の構造の表現が改善されてスーパー台風の発生数が増加したと考えられる。一方で北大西洋ではIBTrACSと比較してスーパー台風の数が過剰となっている(図4.1.7g)。これには台風の発生位置の違いが影響していると考えられる。北西太平洋については、北西太平洋南東部で発生した台風は暖かい熱帯の洋上を長時間移動する。これらの台風は海洋からより多くの熱を得ることが可能なため、強く発達しやすくなることが知られている³⁶⁾。一方で北大西洋については、低緯度側であるアフリカ大陸の西海上において高解像度化によって台風発生数が増加し(図4.1.6e)、特に14 kmメッシュNICAMではIBTrACSと比べて多くのスーパー台風が発生している様子がわかる(図4.1.6b, h)。

一般に低解像度のモデルでは台風の強度は過小評価されることが知られている³⁷⁾。本課題によって同一の実験プロトコルの下、長期間の気候シミュレーションを56 km、28 km、14 kmメッシュで実施したことにより、従来の気候モデルでも徐々に利用されるようになってきた50 km程度の解像度をさらに高めることで台風の強度の過小評価が改善されることを確認できた。一方で台風の発生位置の分布という点では、高解像度化によって北東太平洋での発生数の増加といった改善が見られるものの、ベンガル湾や南シナ海での発生数の減少といった観測との不一致がみられ、高解像度化だけで単純に再現性が向上

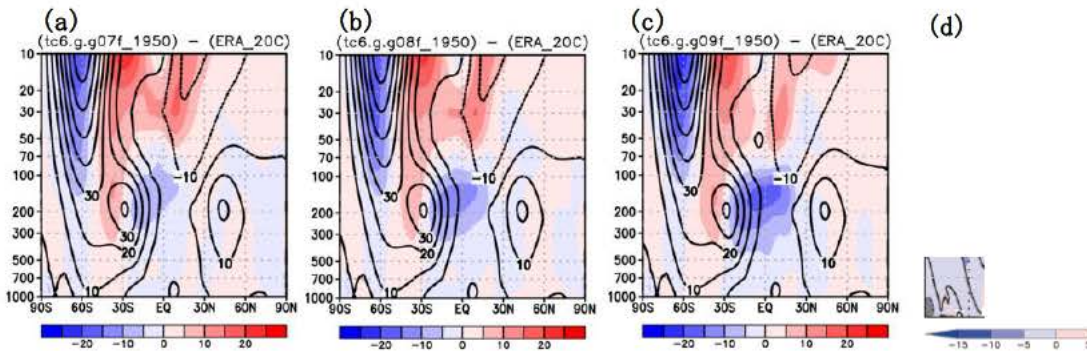


図 4.1.8 6-8月における東西平均した東西風。モデルのERA-20Cからのバイアスをシェードで示す。(a-c) 56, 28, 14 km メッシュのNICAM16-S (最新版) を用いた結果。平均期間は(a, b)が1950-2010年、(c)は1950-1960年。(d) 水平解像度14 km メッシュのNICAM.12 (旧版) を用いた結果⁶⁾。平均期間は1979-1998年。等値線はERA-20C再解析の値。

されないことがわかった。これはモデルの気候場のバイアスと関連していると考えられ、より信頼できるスーパー台風の将来変化を提供するためにはさらなるモデル開発が必要である。また、台風の再現性への解像度の影響を評価するためにはアンサンブル実験が必要であると指摘されている³⁸⁾。高解像度の大量アンサンブル実験には計算機の演算性能のみならず膨大化するデータ容量によるストレージの枯渇や大容量データのポスト処理が問題としてあげられる。データ圧縮やポスト処理の効率化といった点も考慮していく必要がある。

b. 基本場

前述のように、台風の発生や経路の再現にとって気候場の再現性は大きな影響を及ぼしうる。ここでは気候平均した基本場の再現性について評価するとともに、モデル更新前後の結果を比較してその更新の効果についても検証する。

図4.1.8は6~8月における東西平均した東西風の気候バイアス（観測に基づく再解析データからのずれ）である。西風ジェット的位置は台風の経路に大きな影響を与える。旧版であるNICAM.12 (図4.1.8d) では北半球において西風ジェットに北偏バイアスがあり、西太平洋において台風が日本方面へ転向せず中国方面へ西進しやすいというバイアスと関係していた。本研究で構築したNICAM16-S (図4.1.8a-c) ではこのバイアスは低減しており、1a節で言及した地形性重力波抵抗の導入が寄与している(図省略)。日本方面へ来る台風についてもNICAM16-Sではよい再現性が得られる傾向がある(図省略)。亜熱帯の西風ジェットの再現性については大きな水平解像度依存性は見られないが、熱帯の上部対流圏に存在する東風バイアスについては水平解像度を高めるとバイアスが悪化する傾向が見られている。この領域は準二年振動(QBO)と呼ばれる西風と東風の交代が約2年周期で起こっている領域であり、空間スケールの小さい大気重力波が重要な役割を果たしている。NICAM16-Sは鉛直解像度が粗いため、水平解像度を高めると過剰な大気重力波が成層圏へ伝搬することが分かっており、これが何らかの影響を及ぼしている可能性がある。気候場全体の改善という観点からは、水平解像度に加えて鉛直解像

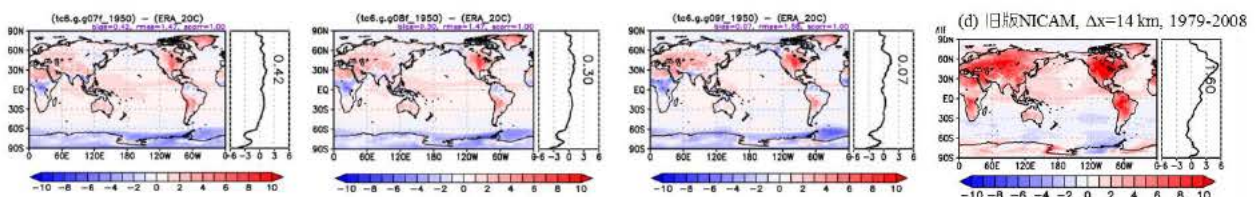


図 4.1.9 図 4.1.8 と同様だが地上気温の水平分布についてERA-20C再解析からのバイアスをシェードで示す。

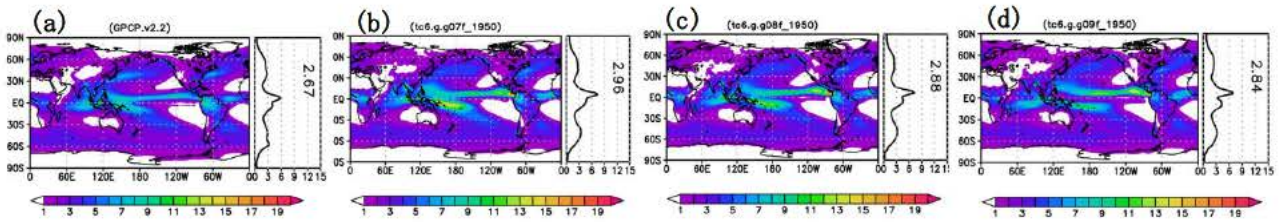


図 4.1.10 気候平均した降水量。(a) GPCP 観測、(b) 56 km メッシュ実験 (1950-2014 年)、(c) 28 km メッシュ実験 (1950-2014 年)、(d) 14 km メッシュ実験図。単位 mm/day。

度も増強することが望ましい。

図 4.1.9 は地上気温の気候バイアスである。これまでの 14 km メッシュ NICAM 気候実験に比べ、陸上における地上気温の高温バイアスはどの水平解像度を用いても大きく低減することが確認できた。従って、台風の発生位置、経路に大きく影響すると考えられるアジアモンスーンの再現性も向上していると期待できる。バイアス低減の理由については 1) a 節で議論した通りである。

以上より、台風の発生・経路に関する基本場については、従来の NICAM.12 に比べて今回構築した NICAM16-S では大きく改善していることが確認できた。一方で、降水の分布については再現性に課題が残っている (図 4.1.10)。低解像度モデルでは比較的よい再現性が得られているように見えるが、高解像度化によって熱帯で二重 ITCZ (熱帯収束帯) バイアスが顕著になることがわかる。但し降水の時間経

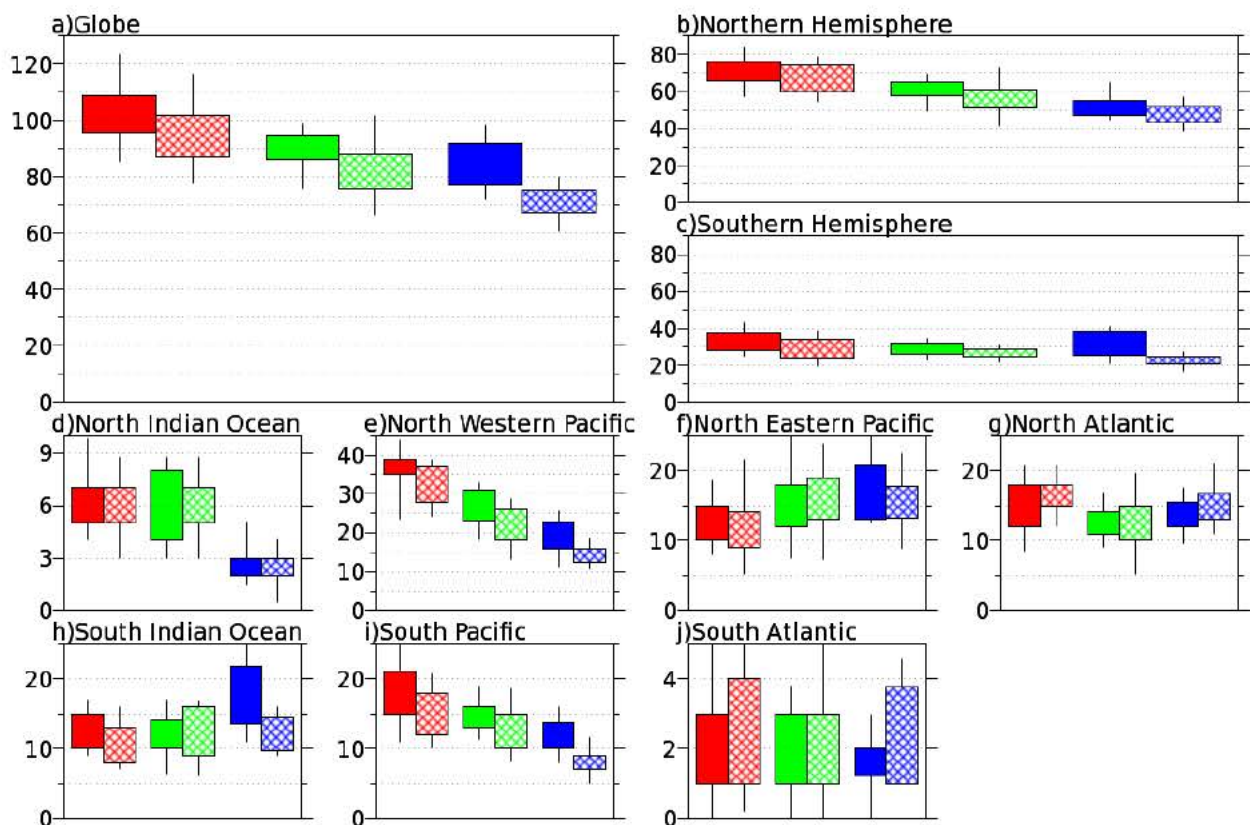


図 4.1.11 台風の年間発生数の将来変化とその解像度依存性。56 km (赤色)、28 km (緑色)、14 km (青色) メッシュの NICAM の結果を示し、塗り潰しは現在気候 (1990-2014)、網掛けは将来気候 (2025-2049) の年間発生数の変動を示す。ただし 14 km メッシュの NICAM は現在気候を 2000 年から 2009 年までとし、将来気候を 2040 年から 2049 年までとした。髭の上端は最大値、箱の上端は 75 パーセント値、箱の下端は 25 パーセント値、髭の下端は最小値を示す。a) 全球、b) 北半球、c) 南半球、d) インド洋、e) 北西太平洋、f) 北東太平洋、g) 北大西洋、h) 南インド洋、i) 南太平洋、j) 南大西洋。

過を見ると低解像度モデルでは極端に強い降水が起こりやすく、高解像度化によってこれは緩和され現実的な強度に近づく。降水分布のバイアスについては未だ議論途上であるが、大気海洋結合の効果を入れるとバイアスが緩和する⁶⁾ことから、対流の立ち上がりの早さが関係している可能性がある。

3) アジア域におけるスーパー台風の温暖化応答の解析

ここでは北西太平洋域、特に日本域の台風・スーパー台風に注目して、HighResMIPのプロトコルに沿ったNICAMのシミュレーションに基づく台風の温暖化応答を報告する。図4.1.11には全球と半球および海盆毎の台風の年間発生数の変化を示す。全球と半球規模では解像度に依存せず台風の減少傾向を予測している(図4.1.11a-c)。海盆毎の変化に注目すると、北西太平洋と南太平洋では解像度によらず発生数の減少傾向が確認できる(図4.1.11e, i)。14 kmメッシュのシミュレーションは56 km、28 kmメッシュのシミュレーションと解析期間が異なっている点に注意する必要があるが、これらの解像度に依存しない減少傾向は解析期間の違いにはよらなかった(図省略)。北大西洋では14 kmメッシュで増加傾向が確認できた(図4.1.11g)。南インド洋では28 kmメッシュを除き減少傾向を示した(図4.1.11h)。北インド洋と北東太平洋では25パーセント値と75パーセント値の範囲(四分位範囲)が現在気候と将来気候の大部分が重複する、あるいは他方の四分位範囲がもう一方の四分位範囲の中に収まっており顕著な変化は見られなかった(図4.1.11d, f)。

次に台風の発生頻度の水平分布の将来変化を確認する(図4.1.12上段)。全ての解像度で共通な特徴として北西太平洋熱帯域の減少、南太平洋収束帯域での減少、北大西洋アフリカ大陸の西海上熱帯域での増加が確認できる。一方で発生頻度の増減は解像度によって異なる海域も多く確認できる。例えば北インド洋のアラビア海では56 km、28 kmメッシュで増加が確認できるものの、14 kmメッシュでは減少が確認できる。この違いは解析期間の違いによるものではなかった(図省略)ものの、北インド洋の台風の数はサンプル数が少なく解像度の違いによって生じた有意な違いなのかを結論づけることは困難であり、アンサンブル数の増加等の方策が必要であると考えられる。

945 hPa以下に発達したスーパー台風の発生頻度の将来変化を図4.1.12の下段に示す。今回注目している北西太平洋域では全ての解像度ではっきりした変化傾向は確認できないが、北西大西洋やオーストラリアの北西海上では高解像度のシミュレーションで増加傾向が確認できる。

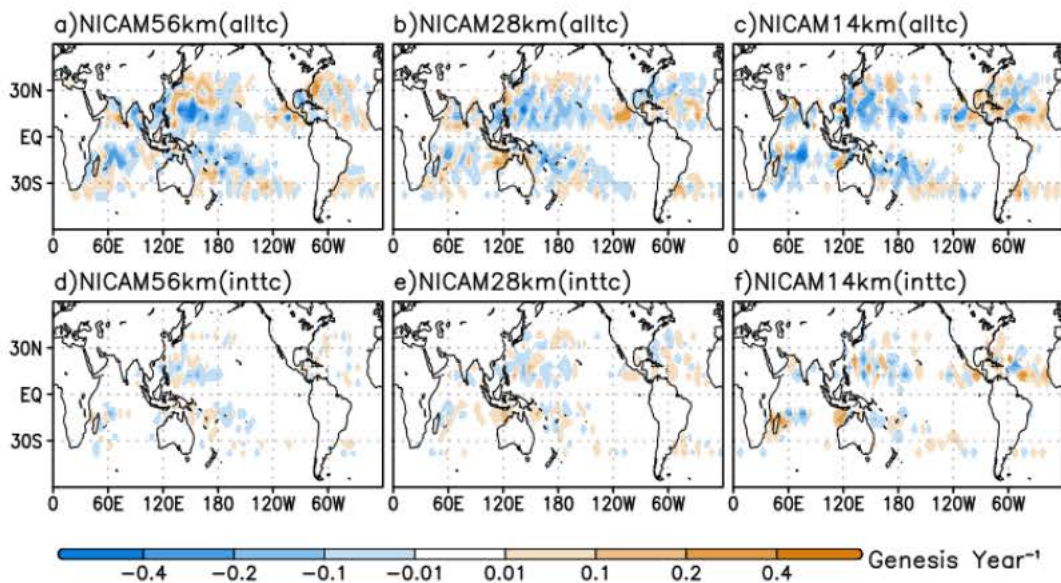


図4.1.12 台風の発生位置の分布の将来変化とその解像度依存性。56 kmメッシュ (a)、28 kmメッシュ (b)、14 kmメッシュ (c) NICAMの全ての台風と、56 kmメッシュ (d)、28 kmメッシュ (e)、14 kmメッシュ (f) NICAMとのスーパー台風の年間発生頻度を示す。

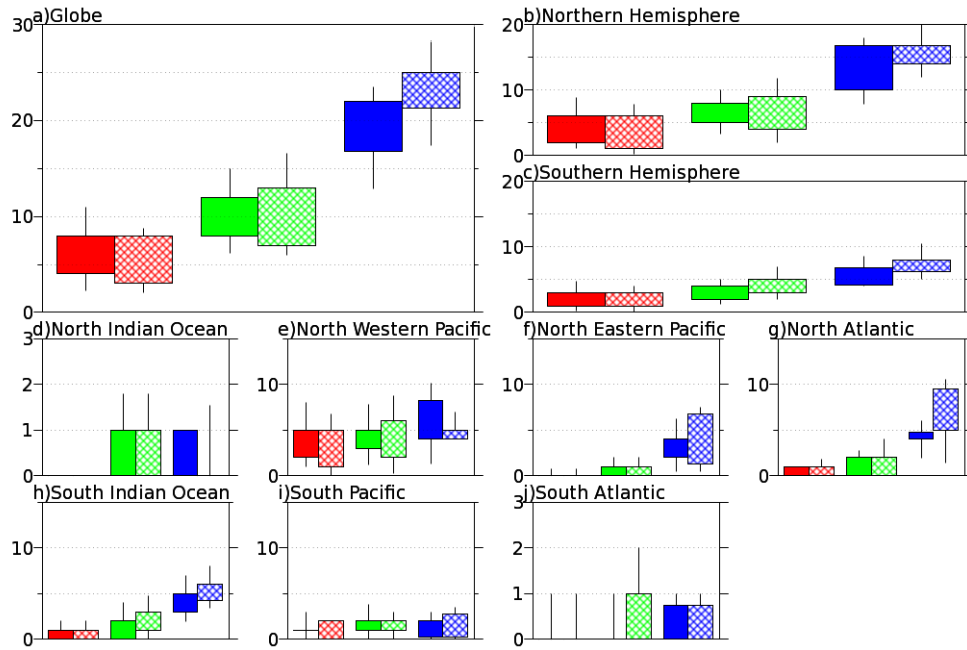


図4.1.13 図4.1.11と同じ、ただし最低中心気圧が945 hPa以下に発達したスーパー台風のみの結果を示す。

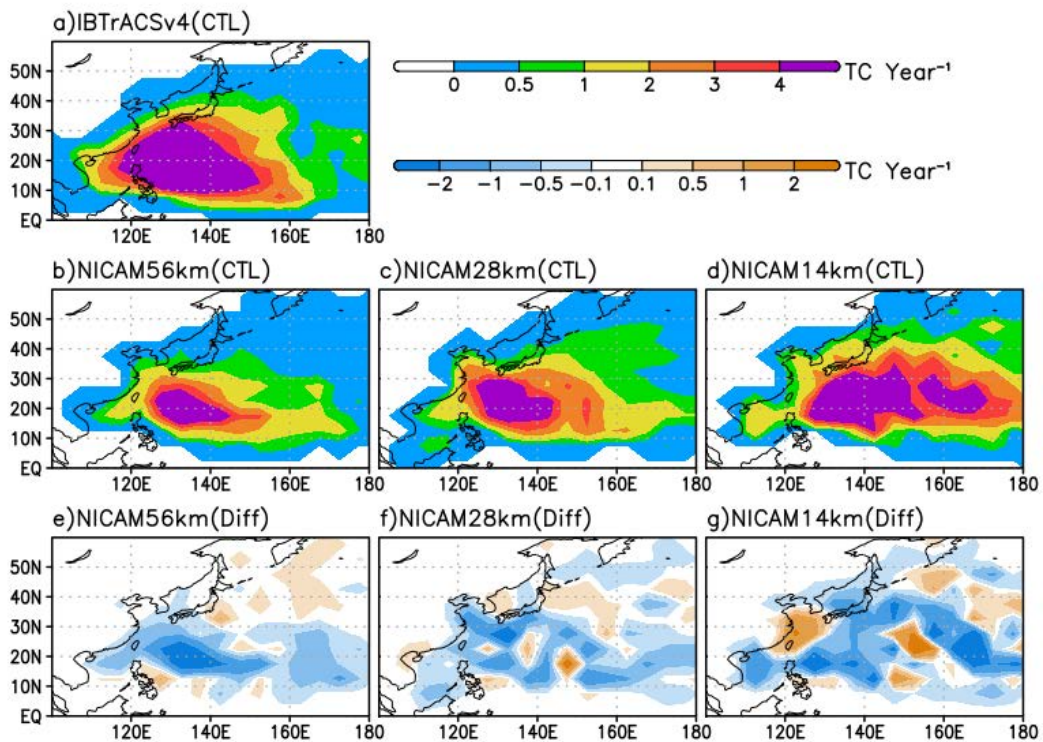


図4.1.14 北西太平洋域のスーパー台風の存在頻度と将来変化。IBTrACS (a)、56 kmメッシュ (b)、28 kmメッシュ (c)、14 kmメッシュ (d) NICAMの現在気候(1990年から2014年の平均、14 kmメッシュのみ2000年から2009年の平均)と、56 km (e)、28 km (f)、14 km (g) メッシュNICAMの将来変化を示す。将来気候は56 km、28 kmメッシュでは2025年から2049年までと定義し、14 kmメッシュでは2040年から2049年までとした。(e-g)の暖色は将来増加したことを示し、寒色は減少したことを示す。存在頻度は6時間毎のトラックデータに基づき東西 5° 南北 5° の矩形領域に1年間にスーパー台風が存在した回数で定義している。

スーパー台風の発生数に注目すると、全球では14 kmメッシュで顕著な増加傾向が確認できる(図4.1.13a)。14 kmメッシュでの増加傾向は北半球と南半球の両半球で確認できた(図4.1.13b, c)。特に増加が顕著に見られるのは北大西洋と南インド洋だった(図4.1.13g, h)。図4.1.12の下段で、それぞれの海盆の低緯度側で発生が増加していることから、長寿命化し強く発達しやすくなったと推察される。北西太平洋域では56 kmメッシュと28 kmメッシュの四分位範囲は現在に比べて将来で幅が広がりスーパー台風の発生数の変動が大きくなる一方で、14 kmメッシュでは四分位範囲が狭まり減少傾向を示している(図4.1.13e)。従って、北西太平洋域におけるスーパー台風の発生数の変化は明瞭ではない。

スーパー台風の日本への接近と上陸頻度がどのように変わるのを見るために、北西太平洋域のスーパー台風の存在頻度の水平分布を図4.1.14に示す。観測のベストトラックIBTrACS(図4.1.14a)に比べると、56 kmメッシュでは過小であるが、高解像度化に伴い、存在頻度の高い領域が広がる様子が確認できる(図4.1.14b, c, d)。14 kmメッシュではスーパー台風の存在頻度の高い領域の広がりが観測に近くものの、160°Eよりも東側で存在頻度が高い傾向がある(図4.1.14d)。将来変化に注目すると、日本に襲来するスーパー台風の頻度については全体としてやや減少するという予測結果が得られた(図4.1.14e, f, g)。より詳細には、56 kmメッシュでは東日本で増加傾向、西日本で減少の傾向が確認できる(図4.1.14e)。28 kmメッシュでは九州北部、中国地方、東北地方北部と北海道で増加が確認できる他は減少の傾向が確認できる(図4.1.14f)。14 kmメッシュでは九州南部で増加傾向が見られる他は減少が確認できる(図4.1.14g)。スーパー台風の存在頻度の変化は日本域内でも地域的に異なり、さらに解像度の違いによっても変動していることがわかる。北西太平洋域のスーパー台風のサンプル数は現在気候の観測で年平均6個程度だった(図4.1.7e)。日本に接近・上陸するサンプル数はさらに少なくなるため、解像度による地域的な分布の違いを定量的に評価するためにはアンサンブル実験等の実施が必要である。また、海面水温の上昇パターンが台風分布の予測に大きな影響を与えることから、将来予測の定量的・地域的な評価のためにはd4pdf³⁹⁾のような系統的な取り組みを高解像度で行う必要がある。さらに、スーパー台風の数は観測と比べて低解像度では過小であったが、高解像度化によって改善される傾向があった(図4.1.7e)。しかし14 kmメッシュ格子では存在頻度が観測と比べて160°Eよりも東で過剰な傾向が見られた(図4.1.14d)。こういった観測との齟齬を解消するためのモデルの改良も引き続き必

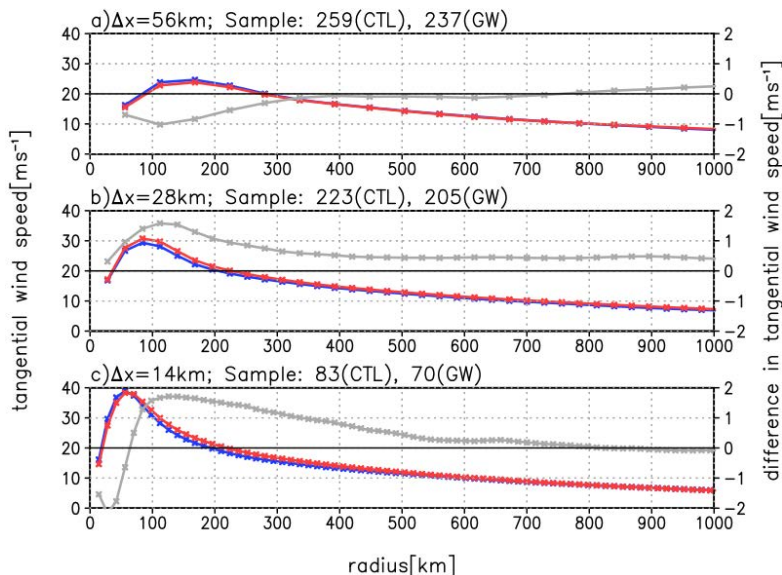


図4.1.15 方位角平均した高度10 mの接線風速の半径分布。56 km (a)、28 km (b)、14 km (c) メッシュNI CAMの結果を示す。青線は現在気候(CTL; 1990年から2014年まで)、赤線は将来気候(GW; 2025年から2049年まで)に発生した台風を最低中心気圧で並べ、気圧が低い方から数えて上位10%の合成図を示す(値は左側の縦軸)。サンプル数は図中に示したとおり。灰色線は将来変化を示す(GW-CTL; 値は右側の縦軸)。

要と考えられる。

台風の強度は台風の構造と関係することが知られており、解像度によって表現され得る強度について議論されている⁴⁰⁾。ここではHighResMIPのシミュレーションで発生した台風の構造の解像度依存とその温暖化応答について報告する。図4.1.15には台風の周りの方位角平均した接線風速の半径分布の合成図を示す。最大風速は56 kmメッシュで 25 m s^{-1} 程度、28 kmメッシュで 30 m s^{-1} 程度、14 kmメッシュで 40 m s^{-1} 程度であり、高解像度化に伴い最大風速が増加することが確認できる。また最大風速半径は高解像度化に伴い小さくなることを確認できる。

温暖化応答に注目すると、14 kmメッシュでは最大風速半径の外側で風速が大きくなり、内側で減少する傾向が確認できる(図4.1.15c)。この応答はNICAMを用いた異なるシミュレーションの結果⁴¹⁾と同じであった。一方で28 kmメッシュのシミュレーションでは全域で将来風速が増加する傾向があり、56 kmメッシュのシミュレーションでは風速が大きい領域(半径300 km以内)で将来風速が弱まること示された。強風域で台風の水平スケールを定義した時、非線形性はあるものの台風の大きさは強度と関係があることが報告されている⁴²⁾ことから、本解析においてサンプリング方法に議論の余地はあるものの、台風の構造変化は解像度によって異なる可能性があることが示唆された。

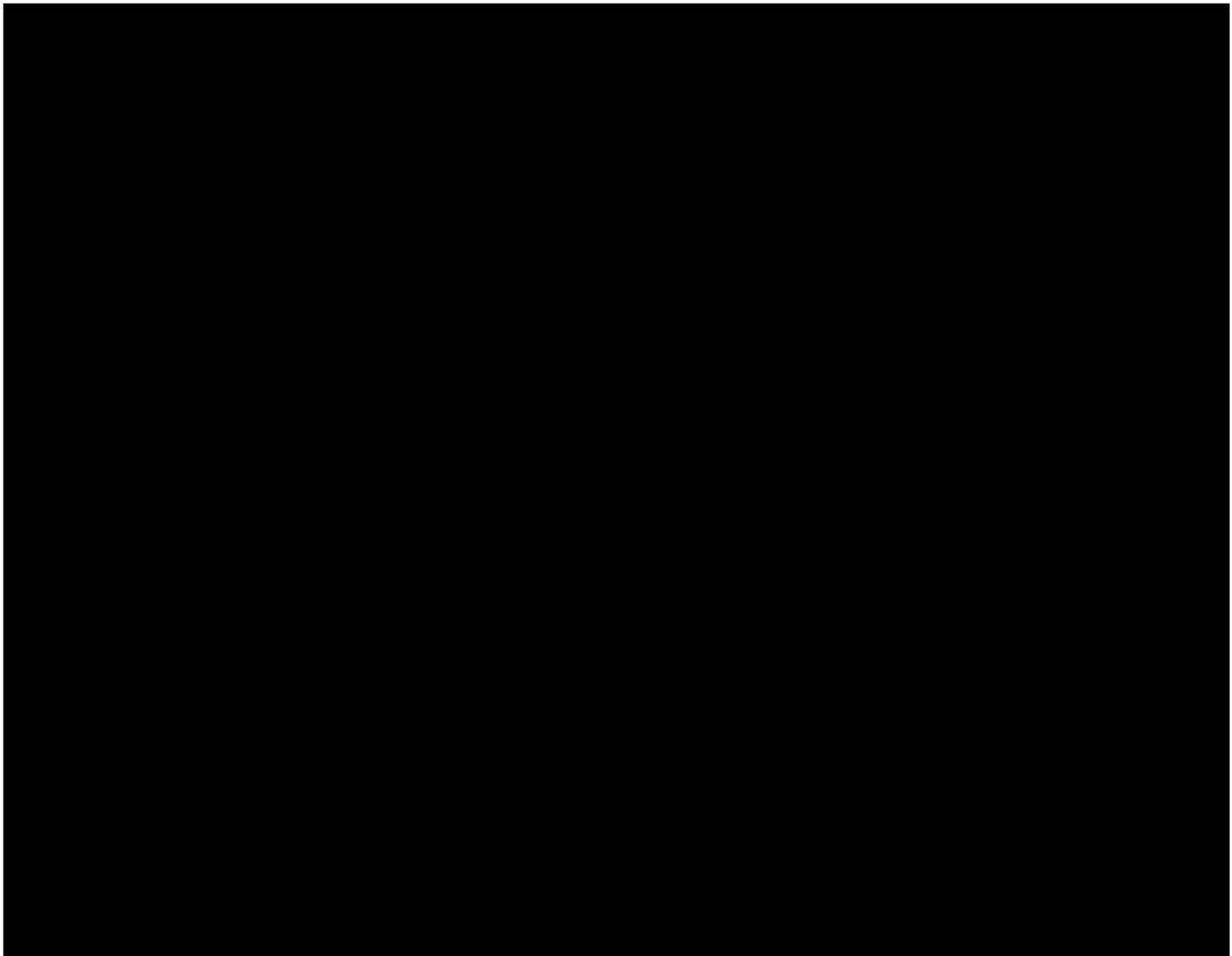


図4.1.16

4) 台風の再現性・温暖化応答に影響を与える諸現象の解析

a. 季節内振動

北西太平洋域では、モンスーン（季節風）に伴う南西風と、熱帯域で卓越している偏東風と呼ばれる東風とがぶつかる合流域や、それらの風の境界であるシアラインと呼ばれる領域で約6割の台風発生が起こる。このシアラインや合流域の場所や大きさは、季節内変動と呼ばれる熱帯大気の変動により大きく左右されることが知られており、したがって台風の発生個数はBSIS0の位相によって変動する⁴³⁾。

[Redacted text block]

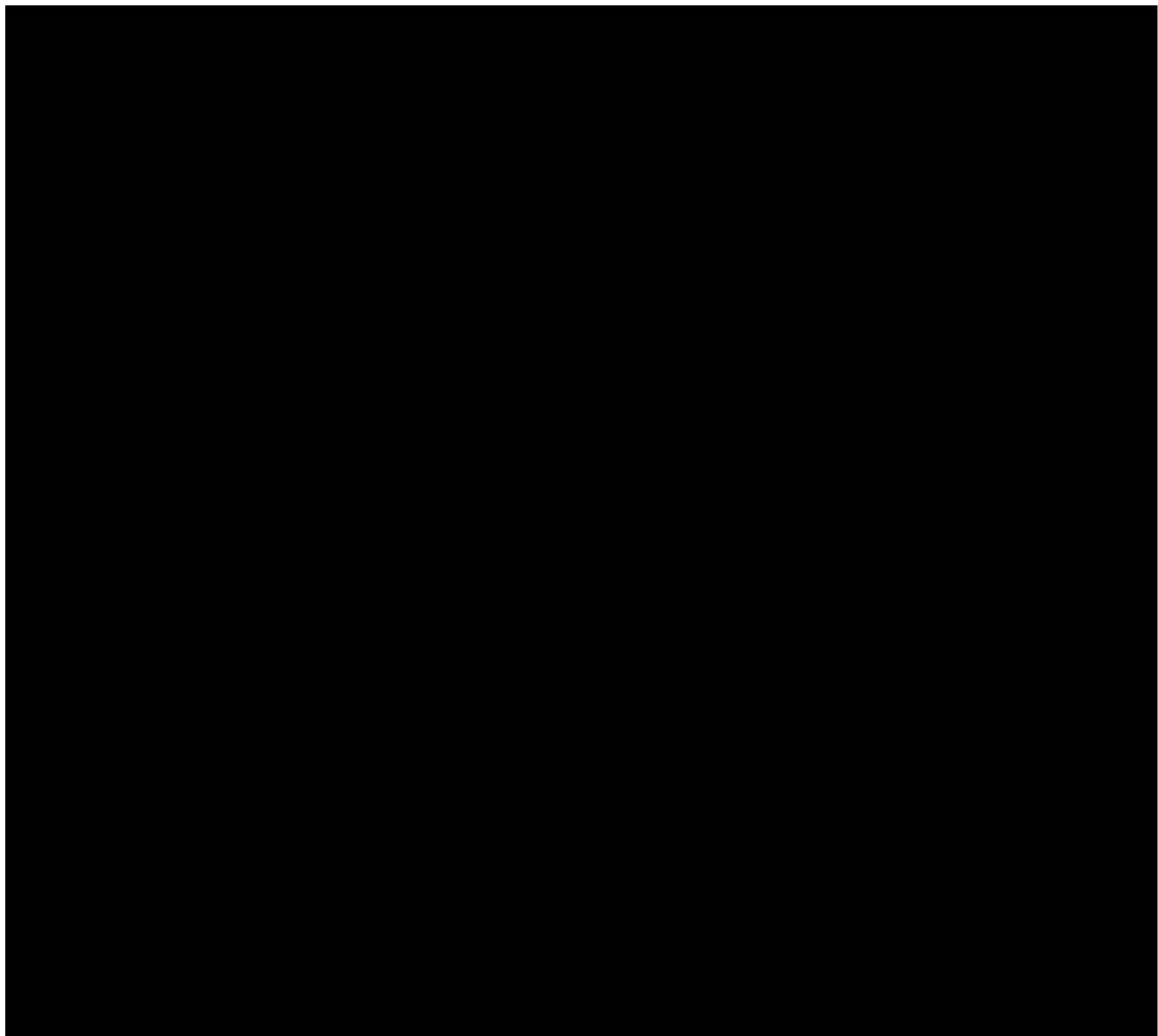
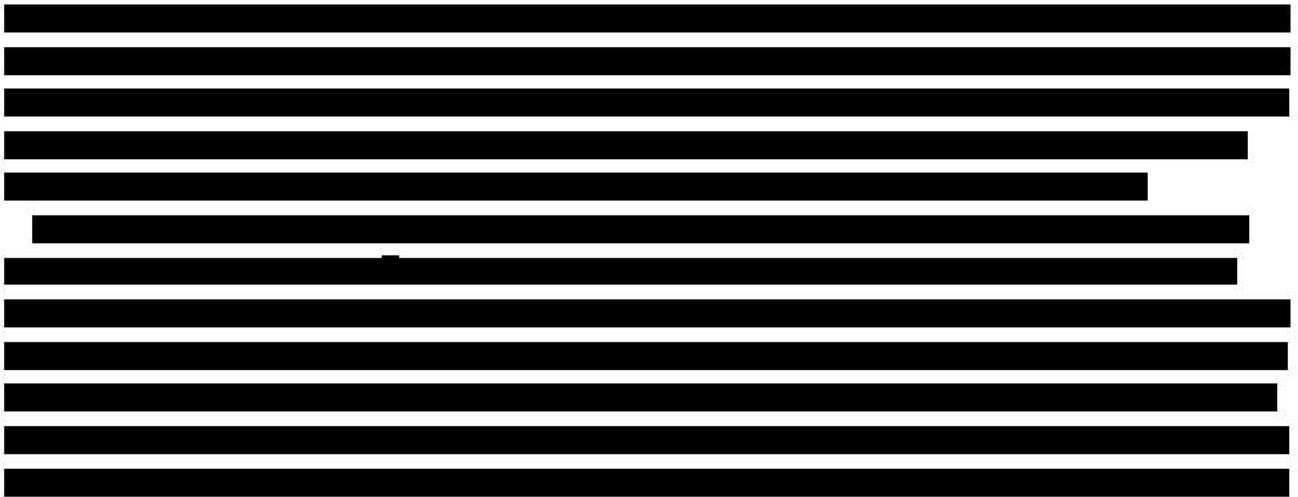


図4. 1. 17

[Redacted text block]



中間報告で示したようにNICAM AMIP実験であっても季節内変動の再現性能はCMIP5モデルと比較しても世界トップレベルであり、今後もモデルの改良によって季節内変動やそれによって引き起こされる台風などの極端現象の再現性能を高めていく必要がある。

b. 台風の種

台風発生数の予測において、その前段階である渦（台風の種）の動向の予測が近年注目を集めている。台風発生数の変化は「台風の種の数」と「種が台風に成長する割合（生存率）」の変化による寄与に分けることができる⁴⁶⁾。HighResMIPに参加する他モデルセンターが行った結果も含めて、このような台風の種の解析を実施した（図4.1.18）。その結果、多くのモデルで温暖化によって台風の種が減少し、台風発生数も減少すると予測していることが分かった。一方、台風の種が台風へ発達する割合（生存率）の温暖化変化についてはモデル間でばらつきが大きかった。このような解析は台風発生数の将来変化メカニズムを物理的に理解するとともに予測の信頼性を高める上で有用である。

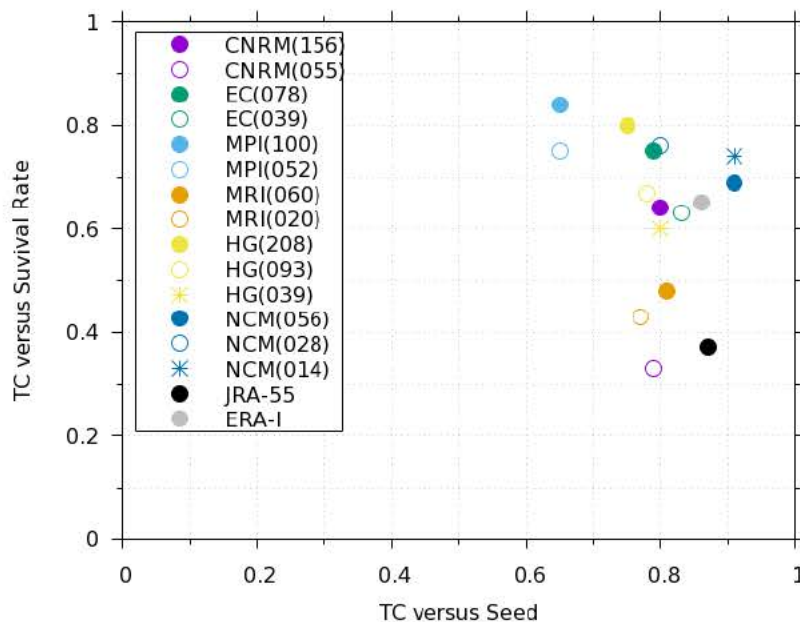


図4.1.18 HighResMIPマルチモデルおよび全球再解析データ（JRA-55、ERA-I；1980-2014年）における台風発生数と台風の種（横軸）および生存率（縦軸）それぞれとの年々変動の相関係数⁴⁷⁾。マルチモデルの結果は1950年から2049年。但しNCM(014)は1950-1960年、2000-2009年、および2040-2049年を利用した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまでの台風将来予測で用いられている気候モデルでは風速のバイアス補正や雲のパラメータ化が行われ、予測の信頼性には大きな疑問があった。また、台風の分布に加えて強度を気候モデルで再現することは難しく、海盆毎にスーパー台風の予測を行うことは困難であった。本研究では風速のバイアス補正や雲のパラメータ化といった経験則を排した物理的に適切なモデルを用いて台風の分布を再現するとともに、従来の全球気候モデルでは再現が難しいスーパー台風についても海盆毎の台風発生数を概ねよく再現することに成功した。これは高い水平解像度の全球非静力学モデルを用いたことに加え、継続的なモデル改良による基本場の改善の効果も大きい。スーパー台風の全球発生数が将来減少するという予測結果は従来の気候モデルと同様の結果であるが、本研究の結果から、北西太平洋域におけるスーパー台風の発生数についてはあまり変化がなく、日本とその南海上の存在数は全体としてむしろ減少傾向になると予測された。一方で強い台風の強風域は拡大すると予測されているが、このような強風域の変化を予測するためには本研究のような高解像度モデルが必要であることを初めて実証した。以上の結果は、本研究で得られた温暖化台風予測が既存モデルの結果に比べて信頼性が高いことを示している。同時に、スーパー台風の海盆毎の定量的な予測や地域毎の強風頻度予測を行うためには、本研究と同程度の高解像度モデルを用いた大アンサンブル実験が必要であることを示唆しており、より実用的な温暖化適応策への応用に向けた道筋を示すことができた。

台風の発生に関連した現象の気候変化についても科学的な理解が進展した。特に季節内振動については既存の気候モデルでの再現が難しいこともあり、世界的にはほとんど研究が進んでいない。本研究によってNI CAMの季節内振動の再現性が世界最高レベルであることを示すとともに、その長期トレンドについて議論を喚起する新たな結果が得られた。また、台風の種のマルチモデル解析を世界に先駆けて実施し、台風の種の数や台風発生数の減少にとって重要であることを示した。台風の種の数や種が台風へ成長する割合について、物理的な理解を深める必要がある。

本研究で用いたNI CAMは全球非静力学モデルとしてはほぼ唯一のCMIP6 HighResMIPへ参加するモデルである。本研究を契機にこれまでは難しかった従来の気候モデルとの比較が容易になるとともに、イギリス気象局等との国際研究協力体制が一段と深まった。ここで解像度やアンサンブル数、雲パラメータ化、大気海洋結合などが台風の将来予測に与える影響について議論が行われ、ポストCMIP6に向けた課題の洗い出しにつながっている。例えば、HighResMIPでは公式トラッキングツールによって台風をトラッキングしたデータが公開されている。しかし、本研究を行う過程でトラッキング手法について入念に検討した結果、モデルやデータの水平解像度に対してトラッキングのしきい値を注意深く設定する必要があることが分かった。ポストCMIP6では様々なトラッキング手法を簡単に扱えるよう提言を行っていく必要がある。

今回整備したNI CAM16-Sの開発や評価には国内の多くの研究機関が関与しており、ポストCMIP6に向けた協力体制の強化につながるだけでなく、研究を通じて全球非静力学モデルNI CAMの性能が全体として向上したことの意義も極めて大きい。本研究では台風に着目した解析を中心に実施したが、これまでにない高解像度の長期実験データセットが広く利用可能になったことは台風以外の様々な研究においても恩恵がある。例えば温帯低気圧やアジアモンスーン、アマゾンにおける降水などの解析において既に活用され始めている。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本課題ではCMIP6に沿ったプロダクト実験を実施して広くデータを提供するとともに、IPCC第6次評価報告書 (AR6) の引用を目指して4本の論文 (Nakano and Kikuchi 2019, Kodama et al. 2020,

Roberts et al. under review, Yamada et al. in revision) を提出した。特にIPCC AR6の極端現象の章ではLead Authorとして研究協力者の佐藤正樹教授が参加しており、これらの研究結果も反映されることが期待できる。また、得られたデータを世界中の研究者がそれぞれの視点で解析することで、IPCC AR6やその後の研究を通じて各国の政策へ影響を与えることを期待している。例えばアマゾンにおける降水予測研究においてNICAMによる予測データの利用がはじまっている。

スーパー台風については発生数が全球で増加するとともに、強い台風の強風域が拡大するという予測結果を信頼性の高いモデルで得られたという点で意義がある。特に強風域のサイズ予測については現時点で本モデル以外では難しく、独自性の高い予測として適応策の参考情報になると考えている。また、CMIP6へ提供した生データだけでなく、台風強風域のサイズをはじめとする加工データについても必要に応じて提供可能である。現時点ではスーパー台風の数を海盆毎に定量的に予測するためにはサンプル数に課題がある。近い将来、富岳コンピュータをはじめとする高性能スパコンの登場によってアンサンブル数を増やすことができれば定量的な評価も可能になり、適応策へより実用的な貢献ができると考えている。以上のような活動は、持続可能な開発目標（SGDs）の目標13「気候変動に具体的な対策を」への貢献にもつながるものである。

6. 国際共同研究等の状況

1) HighResMIP（高解像度モデル比較プロジェクト）と関連共同研究

カウンターパート：Malcolm J. Roberts (UK MetOffice・英国)、Pier Luigi Vidale (Reading大学・英国) ほか。

参加・連携状況：HighResMIPにおいて共同で行う解析方法の議論、NICAMデータの提供、論文の共同執筆。

国際的な位置づけ：HighResMIPはCMIP6のendorsed MIP（構成MIP）の一つである。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) M. NAKANO and K. KIKUCHI: Geophys. Res. Lett., 46, 4441-4449 (2019) Seasonality of intraseasonal variability in global climate models.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) C. KODAMA, T. OHNO, T. SEIKI, H. YASHIRO, A. T. NODA, M. NAKANO, Y. YAMADA, W. ROH, M. SATOH, T. NITTA, D. GOTO, H. MIURA, T. NASUNO, T. MIYAKAWA, Y.-W. CHEN, and M. SUGI: Geosci. Model Dev. Discuss., doi:10.5194/gmd-2019-369 (2020) The non-hydrostatic global atmospheric model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): Experimental design, model description, and sensitivity experiments.

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) C. Kodama, T. Ohno, A. T. Noda, H. Yashiro, Y. Yamada, M. Nakano, T. Seiki, T. Nasuno, Y.-W. Chen, T. Miyakawa, M. Satoh, and M. Sugi: Status and outlook of a high-resolution climate simulation using NICAM toward CMIP6 HighResMIP, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari, Chiba, Japan, 2017.
- 2) 中野 満寿男: NICAMを用いた北半球夏期季節内振動 (BSISO) と台風発生の予測, 長期予報研究会「長期予報と大気大循環」, 気象庁, 東京, 2017 (招待講演) .
- 3) M. Satoh, C. Kodama, T. Ohno, A. T. Noda, H. Yashiro, Y. Yamada, M. Nakano, T. Seiki, T. Nasuno, Y.-W. Chen, T. Miyakawa, M. Sugi, and W. Roh: High-resolution climate

- simulations using the Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, NICAM, European Geosciences Union General Assembly 2018, Vienna, Austria, 2018.
- 4) Y. Yamada, M. Satoh, M. Sugi, C. Kodama, A. T. Noda, M. Nakano, and T. Nasuno: Widening of Tropical Cyclone Scale Projected By Multi-Decadal Experiments with a 14km-Mesh Global Nonhydrostatic Model, 33rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Ponte Vedra, FL, U.S., April 16 - 20 2018.
 - 5) C. Kodama, M. Satoh, T. Ohno, A. T. Noda, H. Yashiro, Y. Yamada, M. Nakano, T. Seiki, T. Nasuno, Y.-W. Chen, T. Miyakawa, M. Sugi, and W. Roh: Preliminary results of a high-resolution climate simulation using the Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, NICAM, for CMIP6 HighResMIP, 15th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, Honolulu, Hawaii, USA, 2018.
 - 6) M. Nakano, K. Kikuchi, T. Nasuno, Y. Yamada, M. Satoh, and M. Sugi: Future Changes in the Intraseasonal Variability and Typhoon Activity in a Nonhydrostatic Global Atmospheric Model, AOGS2018, Honolulu, USA, 2018.
 - 7) 小玉知央, 2018/10/9-10: HighResMIP、とその先, NICAM開発者会議, 玉原.
 - 8) 山田洋平, 2018/10-9-10: HighResMIPの出力を用いた台風の構造の解像度依存性, NICAM開発者会議, 玉原.
 - 9) 小玉知央, 佐藤正樹, 大野知己, 野田暁, 八代尚, 山田洋平, 中野満寿男, 清木達也, 那須野智江, Ying-Wen Chen, 宮川知己, 杉正人, Woosub Roh, 2018/11/01: 全球非静力学モデルNICAM気候実験における水平解像度依存性, 日本気象学会2018秋季大会, B406, 仙台.
 - 10) Yamada, Y., C. Kodama, M. Satoh, T. Ohno, A. T. Noda, H. Yashiro, M. Nakano, T. Seiki, T. Nasuno, Y.-W. Chen, T. Miyakawa, M. Sugi, and W. Roh, 2018: Performance of tropical cyclone activities simulated by NICAM for HighResMIP: Preliminary results. 2018 American Geophysics Union Fall Meeting, Washington D. C., U.S., December 9-14 2018.
 - 11) 山田洋平, 台風セミナー2019 (2019) 地球温暖化と台風 (導入編) (**招待講演**) .
 - 12) 山田洋平, 佐藤正樹, 小玉知央, 2019年度日本建築学会大会 (北陸) 構造部門 (荷重) : 頻発する極端気象に対する強風被害調査・要因分析・荷重設計 (2019) 極端気象の現状に対する理解—観測とシミュレーション (**招待講演**) .
 - 13) 小玉知央, 2019年度第4回SPEED研究会 (エコイノベーションとエコビジネスに関する研究会) (2019) 高解像度気候モデルが予測する将来の台風活動 (**招待講演**) .
 - 14) 小玉知央, 日本気象学会2019秋季大会 (2019) 全球非静力学モデルNICAMにおける温帯低気圧の水平解像度依存性.
 - 15) C. KODAMA, Y. YAMADA, T. OHNO, T. SEIKI, H. YASHIRO, A. T. NODA, M. NAKANO, W. ROH, M. SATOH, T. NITTA, T. NASUNO, T. MIYAKAWA, Y.-W. CHEN, and M. SUGI, AGU Fall Meeting 2019 (2019) Model updates and early results of a decadal high-resolution climate simulations using the Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, NICAM, for CMIP6 HighResMIP.
 - 16) Y. YAMADA, C. KODAMA, M. SATOH, M. NAKANO, T. NASUNO, and M. Sugi, アジア・オセアニア域における大気水圏環境の研究集会 (2019) Tropical cyclone activity in ensemble simulations using a high resolution nonhydrostatic model.
 - 17) 山田洋平, 建築学会風工学・気象ワーキンググループ (国内) (2020) 台風と地球温暖化.
 - 18) M. NAKANO and K. Kikuchi, JiCoRe WS (2020) Long-term changes in the BSISO and MJO simulated by NICAM HighResMIP and reanalysis datasets.
 - 19) C. KODAMA, PRIMAVERA Final General Assembly (2020) Early results of extratropical cyclone analysis in NICAM HighResMIP simulations.

- 20) 山田洋平, 小玉知央, 佐藤正樹, 杉正人, M. J. Roberts, 水田亮, 野田暁, 那須野智江, 中野満寿男, P. L. Vidale, 日本気象学会2020年度春季大会 (2020) HighResMIPマルチモデルアンサンブルの出力を用いた台風発生数の将来変化への台風の種の寄与の解析 (採択済み・新型コロナウイルス感染症の感染拡大により予稿集の発行により大会開催とする方針を気象学会が発表)
- 21) Y. Yamada, C. Kodama, M. Satoh, M. Sugi, M. J. Roberts, R. Mizuta, A. T. Noda, T. Nasuno, M. Nakano, P. L. Vidale, JpGU2020 (2020) Projected future changes in tropical cyclone genesis and its seed frequencies by using HighResMIP multi model ensemble simulation (採択済み・新型コロナウイルス感染症の感染拡大により延期の上でオンライン開催を予定) .

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) JAMSTEC横浜研究所施設一般公開2017 気軽に聞こう 立ち寄りセミナー「気候シミュレーション・雲・台風」(2017年11月11日、海洋研究開発機構、参加者約159名) .
- 2) 平成30年度地球シミュレータ利用報告会「高解像度全球非静力学モデルを用いた台風の将来気候予測に関する研究」(2019年3月5日、品川グランドホール、参加者100名規模) .
- 3) エコプロ2019 環境再生保全機構サイエンスカフェ「台風を高解像度シミュレーションで再現・予測する!!!」(2019年12月5日、東京ビッグサイト、観客20名程度) .

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

<ポスター発表(学会等)>

- 1) M. Nakano, K. Kikuchi, T. Nasuno, Y. Yamada, M. Satoh, and M. Sugi: Future Changes in the Intraseasonal Variability and Typhoon Activity in a Nonhydrostatic Global Atmospheric Model, AAS03-P08, JpGU Meeting 2018, Chiba, Japan, 2018.
- 2) 山田洋平, 小玉知央, 佐藤正樹, 2018/5/16-19: NICAMを用いた熱帯低気圧の発生分布の再現性向上に向けた感度実験, 日本気象学会2018年度春季大会, P326, つくば.
- 3) C. Kodama, M. Satoh, T. Ohno, A. T. Noda, H. Yashiro, Y. Yamada, M. Nakano, T. Seiki, T. Nasuno, Y.-W. Chen, T. Miyakawa, M. Sugi, and W. Roh, 2018/5/20-24: Preliminary results of a high-resolution climate simulation using the Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model, NICAM, for CMIP6 HighResMIP, JpGU Meeting 2018, AAS01-P02, Makuhari Messe, Chiba, Japan.
- 4) 山田洋平, 小玉知央, 佐藤正樹, 2018/10/29-11/1: NICAM AMIP 型実験における台風の移動速度の将来変化, 日本気象学会2018年度秋季大会, P361, 仙台.

<セッションコンビナー>

- 1) 共同コンビナー (C. Kodama), High performance computing for next generation weather, climate, and environmental sciences using K, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari, Chiba, Japan, 2017.
- 2) 共同コンビナー (C. Kodama), High performance computing for next generation weather, climate, and environmental sciences, JpGU Meeting 2018, Makuhari, Chiba, Japan, 2018.
- 3) 共同コンビナー (C. Kodama), High performance computing for next generation weather,

climate, and environmental sciences, JpGU Meeting 2019, Makuhari, Chiba, Japan, 2019.

8. 引用文献

- 1) Christensen, J.H., K. Krishna Kumar, E. Aldrian, S.-I. An, I.F.A. Cavalcanti, M. de Castro, W. Dong, P. Goswami, A. Hall, J.K. Kanyanga, A. Kitoh, J. Kossin, N.-C. Lau, J. Renwick, D.B. Stephenson, S.-P. Xie and T. Zhou, 2013: Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 2) Mei, W., and S.-P. Xie, 2016: Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s. *Nat. Geosci.*, 9, 753-757, doi:10.1038/ngeo2792.
- 3) Tomita, H., and M. Satoh, 2004: A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, 34, 357-400, doi:10.1016/j.fluidyn.2004.03.003.
- 4) Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, 227, 3486-3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.
- 5) Satoh, M., and Coauthors, 2014: The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: Description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 1, 18, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- 6) Kodama, C., and Coauthors, 2015: A 20-year climatology of a NICAM AMIP-type simulation. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, 93, 393-424, doi:10.2151/jmsj.2015-024.
- 7) Roberts, M. J., and Coauthors, 2015: Tropical Cyclones in the UPSCALE Ensemble of High-Resolution Global Climate Models. *J. Clim.*, 28, 574-596, doi:10.1175/JCLI-D-14-00131.1.
- 8) Haarsma, R. J., and Coauthors, 2016: High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9, 4185-4208, doi:10.5194/gmd-9-4185-2016.
- 9) C. Kodama, T. Ohno, T. Seiki, H. Yashiro, A. T. Noda, M. Nakano, Y. Yamada, W. Roh, M. Satoh, T. Nitta, D. Goto, H. Miura, T. Nasuno, T. Miyakawa, Y.-W. Chen, and M. Sugi (2020), The non-hydrostatic global atmospheric model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): Experimental design, model description, and sensitivity experiments, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi:10.5194/gmd-2019-369.
- 10) Satoh, M., Y. Yamada, M. Sugi, C. Kodama, and A. T. T. Noda, 2015: Constraint on future change in global frequency of tropical cyclones due to global warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 489-500, doi:10.2151/jmsj.2015-025.
- 11) Tomita, H., 2008: New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 86A, 121-142, doi:10.2151/jmsj.86A.121.
- 12) Roh, W., and M. Satoh, 2014: Evaluation of Precipitating Hydrometeor Parameterizations in a Single-Moment Bulk Microphysics Scheme for Deep Convective Systems over the Tropical Central Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 71, 2654-2673, doi:10.1175/JAS-D-13-0252.1.

- 13) Roh, W., M. Satoh, and T. Nasuno, 2017: Improvement of a Cloud Microphysics Scheme for a Global Nonhydrostatic Model Using TRMM and a Satellite Simulator. *J. Atmos. Sci.*, 74, 167-184, doi:10.1175/JAS-D-16-0027.1.
- 14) Kodama, C., A. T. T. Noda, and M. Satoh, 2012: An assessment of the cloud signals simulated by NICAM using ISCCP, CALIPSO, and CloudSat satellite simulators. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117, doi:10.1029/2011JD017317.
- 15) Sekiguchi, M., and T. Nakajima, 2008: A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 109, 2779-2793, doi:10.1016/j.jqsrt.2008.07.013.
- 16) Seiki, T., M. Satoh, H. Tomita, and T. Nakajima, 2014: Simultaneous evaluation of ice cloud microphysics and nonsphericity of the cloud optical properties using hydrometeor video sonde and radiometer sonde in situ observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 6681-6701, doi:10.1002/2013JD021086.
- 17) McFarlane, N. A., 1987: The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1775-1800, doi:10.1175/1520-0469(1987)044<1775:TE00EG>2.0.CO;2.
- 18) Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe, 2003: Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Glob. Planet. Change*, 38, 209-222, doi:10.1016/S0921-8181(03)00030-4.
- 19) Nitta, T., K. Yoshimura, and A. Abe-Ouchi, 2017: Impact of Arctic Wetlands on the Climate System: Model Sensitivity Simulations with the MIROC5 AGCM and a Snow-Fed Wetland Scheme. *J. Hydrometeorol.*, 18, 2923-2936, doi:10.1175/JHM-D-16-0105.1.
- 20) Kennedy, J., Titchner, H., Rayner, N. and Roberts, M., 2017: input4MIPs.MOHC.SSTsAndSeaIce.HighResMIP.MOHC-HadISST-2-2-0-0-0, Version 20170201, Earth System Grid Federation, doi:10.22033/ESGF/input4MIPs.1221.
- 21) Kennedy, J., Titchner, H., Rayner, N. and Roberts, M., 2019: input4MIPs.CMIP6.HighResMIP.MOHC.MOHC-highresSST-future-1-0-1, Version 20190215., doi:10.22033/ESGF/input4MIPs.10361.
- 22) Stevens, B., S. Fiedler, S. Kinne, K. Peters, S. Rast, J. Müssé, S. J. Smith, and T. Mauritsen, 2017: MACv2-SP: a parameterization of anthropogenic aerosol optical properties and an associated Twomey effect for use in CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 10, 433-452, doi:10.5194/gmd-10-433-2017.
- 23) Fiedler, S., B. Stevens, M. Gidden, S. J. Smith, K. Riahi, and D. van Vuuren, 2019: First forcing estimates from the future CMIP6 scenarios of anthropogenic aerosol optical properties and an associated Twomey effect. *Geosci. Model Dev.*, 12, 989-1007, doi:10.5194/gmd-12-989-2019. <https://www.geosci-model-dev-discuss.net/gmd-2018-244/>.
- 24) Meinshausen, M., and Coauthors, 2017: Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling (CMIP6). *Geosci. Model Dev.*, 10, 2057-2116, doi:10.5194/gmd-10-2057-2017.
- 25) Meinshausen, M., and Z. R. J. Nicholls, 2018: UoM-REMI ND-MAGPIE-ssp585-1-2-1 GHG concentrations. Version 20181127. doi:10.22033/ESGF/input4MIPs.9868.
- 26) Matthes, K., and Coauthors, 2017: Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geosci. Model Dev.*, 10, 2247-2302, doi:10.5194/gmd-10-2247-2017.
- 27) Hegglin, M., D. Kinnison, J.-F. Lamarque, and D. Plummer, 2016: CCMI ozone in support of CMIP6 - version 1.0. Version 20160711. doi:10.22033/ESGF/input4MIPs.1115.
- 28) Hegglin, M., D. Kinnison, J.-F. Lamarque, and D. Plummer, 2018:

- input4MIPs. CMIP6. ScenarioMIP. UReading. UReading-CCMI-ssp585-1-0, Version 20181101, doi:10.22033/ESGF/input4MIPs.9544.
- 29) Shabanov, N. V., and Coauthors, 2005: Analysis and optimization of the MODIS leaf area index algorithm retrievals over broadleaf forests. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 43, 1855-1865, doi:10.1109/TGRS.2005.852477.
 - 30) Yang, W., and Coauthors, 2006: MODIS leaf area index products: from validation to algorithm improvement. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44, 1885-1898, doi:10.1109/TGRS.2006.871215.
 - 31) O'Neill, B. C., and Coauthors, 2016: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461-3482, doi:10.5194/gmd-9-3461-2016.
 - 32) Poli, P., and Coauthors, 2016: ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. *J. Clim.*, 29, 4083-4097, doi:10.1175/JCLI-D-15-0556.1.
 - 33) Knapp, K.R., et al., 2010, The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Unifying tropical cyclone data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 363-376, doi:10.1175/2009BAMS2755.1.
 - 34) Yamada, Y., et al., 2017, Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global nonhydrostatic model. 30, 9703-9724, doi:10.1175/JCLI-D-17-0068.1.
 - 35) Chavas, D.R., and Emanuel, K.A., 2010: A QuikSCAT climatology of tropical cyclone size. *Geophysical Research Letters*, 37, L18816, doi:10.1029/2010GL044558.
 - 36) Camargo, S.J., and Sobel, A.H., 2005, Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *Journal of Climate*, 18, 2996-3006, doi:10.1175/JCLI3457.1.
 - 37) Camargo, S.J., 2013, Global and regional aspects of tropical cyclone activity in the CMIP5 models. *Journal of Climate*, 26, 9880-9902, doi:10.1175/JCLI-D-12-00549.1.
 - 38) Roberts, M. J., and Coauthors, 2020: Impact of Model Resolution on Tropical Cyclone Simulation Using the HighResMIP-PRIMAVERA Multimodel Ensemble. *J. Clim.*, 33, 2557-2583, doi:10.1175/JCLI-D-19-0639.1.
 - 39) Mizuta, R., and Coauthors, 2017: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98, 1383-1398, doi:10.1175/BAMS-D-16-0099.1.
 - 40) Davis, C. A., 2018, Resolving tropical cyclone intensity in models. *Geophysical Research Letters*, 45, 2082-2087, doi:10.1002/2017GL076966.
 - 41) Yamada, Y., et al., 2017, Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global nonhydrostatic model. *Journal of Climate*, 30, 9703-9724, doi:10.1175/JCLI-D-17-0068.1.
 - 42) Wu, L., et al., 2015, Implications of the observed relationship between tropical cyclone size and intensity over the western north Pacific. *Journal of Climate*, 28, 9501-9506, doi:10.1175/JCLI-D-15-0628.1.
 - 43) Yoshida, R., Y. Kajikawa and H. Ishikawa, 2014, Impact of Boreal Summer Intraseasonal Oscillation on Environment of Tropical Cyclone Genesis over the Western North Pacific, *SOLA*, 10, 15-18, doi:10.2151/sola.2014-004.
 - 44) Oliver, E. C. J., 2016, Blind use of reanalysis data: apparent trend in Madden-Julian Oscillation activity driven by observational changes, *Int J Climatol*, 36, 3458-3468, doi:10.1002/joc.4568.
 - 45) Kikuchi, K., 2020, Extension of the bimodal intraseasonal oscillation index using

JRA-55 reanalysis, *Clim. Dyn.* 54, 919-933, doi:10.1007/s00382-019-05037-z.

- 46) Vecchi, G. A. and Coauthors, 2019: Tropical cyclone sensitivities to CO₂ doubling: roles of atmospheric resolution, synoptic variability and background climate changes. *Clim. Dyn.*, 53, 5999-6033, doi:10.1007/s00382-019-04913-y.
- 47) Yamada, Y., C. Kodama, M. Satoh, M. Sugi, M. J. Roberts, R. Mizuta, A. T. Noda, T. Nasuno, M. Nakano, and P. L. Vidale, Evaluation of the contribution of tropical cyclone seeds to changes in tropical cyclone frequency due to global warming in high-resolution multi-model ensemble simulations, *Prog. Earth Planet. Sci.*, in revision.

III. 英文Abstract

Study of Super-Typhoon Response to Global Warming in the Asian Region Using Global Non-hydrostatic Model

Principal Investigator: Chihiro KODAMA

Institution: Japan Agency for Marine-Earth Science and
Technology (JAMSTEC)

3173-25, Showa-machi, Kanazawa-ku,

Yokohama-city, Kanagawa 236-0001, JAPAN

Tel: +81-45-778-5623 / Fax: +81-45-778-5706

E-mail: kodamac@jamstec.go.jp

[Abstract]

Key Words: Global warming, Tropical cyclone, High-resolution global climate simulation, HighResMIP, IPCC AR6

Tropical cyclones often cause devastating natural disaster in the Asian region including Japan and all over the globe. Global climate models projected that so called super-typhoons (category 4 and 5 hurricanes) will be more frequent in future climate. However, such climate models had too coarse horizontal mesh for tropical cyclones and employed cloud parameterization scheme that hinders reliable future projections of tropical cyclones. Here, we use an updated high-resolution global non-hydrostatic model (NICAM) to perform climate simulations under the protocol of CMIP6 HighResMIP (High resolution model intercomparison project) to investigate future change in tropical cyclones including super-typhoons.

The model shows better performance in reproducing tropical cyclones and basic state compared with a previous model. Future climate simulations show that the genesis number of tropical cyclones is projected to decrease all over the globe and in the western north Pacific. The genesis number of super-typhoons is projected to increase on global average, consistent with previous studies. However, the number of super-typhoons that exist around Japan is projected to be less in the future climate. In-depth analysis of tropical cyclone structure shows that high-resolution is essential to represent mean structure of intense tropical cyclones and that the size of severe wind area around the intense tropical cyclones is projected to expand in the future climate.

Several phenomena that could relate to the genesis of tropical cyclones are also investigated in this study. HighResMIP multi-model analysis of tropical cyclone seeds (precursors of tropical cyclones) suggests that the decrease in the genesis number of tropical cyclones is related to a decrease in the number of tropical cyclone seeds and is not clearly related to a

survival rate of tropical cyclone seeds to develop tropical cyclones. We also confirmed better performance in a reproducibility of tropical intraseasonal variability in the NICAM simulations compared with those in a series of CMIP5 models.