

令和3年度高性能汎用計算機高度利用事業

「富岳」成果創出加速プログラム

「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象

・大気環境予測」成果報告書

令和4年5月30日

国立大学法人東京大学大気海洋研究所

佐藤 正樹

目次

1. 補助事業の目的.....	- 1 -
2. 令和3年度（報告年度）の実施内容.....	- 1 -
2-1. 当該年度（令和3年度）の事業実施計画.....	- 1 -
(1) 短時間領域スケール予測.....	- 1 -
(2) 全球スケール予測.....	- 1 -
(3) 先進的大規模データ同化手法.....	- 2 -
(4) プロジェクトの総合的推進	- 2 -
2-2. 実施内容（成果）	- 2 -
2-2-1. テーマ1：短時間領域スケール	- 2 -
(1) 成果概要.....	- 2 -
(2) 実施体制.....	- 3 -
(3) 成果内容.....	- 4 -
2-2-2. テーマ2：全球スケール予測	- 49 -
(1) 成果概要.....	- 49 -
(2) 実施体制.....	- 49 -
(3) 成果内容.....	- 50 -
2-2-3. テーマ3：先進的大規模データ同化手法.....	- 64 -
(1) 成果概要.....	- 64 -
(2) 実施体制.....	- 64 -
(3) 成果内容.....	- 65 -
2-2-4. プロジェクトの総合的推進.....	- 79 -
(1) 成果概要.....	- 79 -
(2) 実施体制.....	- 80 -
(3) 成果内容.....	- 80 -
2-4. 実施体制.....	- 86 -
別添1 学会等発表実績.....	- 88 -

補助事業の名称

「富岳」成果創出加速プログラム

「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」

1. 補助事業の目的

近年激甚化する集中豪雨等の極端気象現象からの防災・減災を実現するために、数日程度から数週間～季節スケールの大規模アンサンブルの気象・大気環境予測実験を富岳を用いて実施し、リードタイムをもった確率予測情報の提供が可能な新時代の予測技術を確立する。

気象災害の原因である集中豪雨や台風を予測するためには、積乱雲等を忠実に表現する高解像度のシミュレーションと、観測ビッグデータを用いて精度を向上させた初期値が不可欠である。さらに、高精度な信頼度（確率）情報が付加されることで災害リスク管理が可能になり、その情報利用価値は飛躍的に高まる。本事業においては、確率予測情報を付加した高精度な数値天気予報のために、日本域および地球全体の高解像度アンサンブルシミュレーションを実施し、気象場に加えて微量気体成分の観測ビッグデータを活用することで革新的な数値気象・大気環境予測技術を実現する。

以上の技術革新のもと、密接な連携協力を行うことで気象庁の「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」の推進を加速する。さらに国家的施策である「気候変動適応計画」で重要となる将来の災害の予測技術向上へ貢献する。

2. 令和3年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和3年度）の事業実施計画

(1) 短時間領域スケール予測

気象庁非静力学モデル局所アンサンブル変換カルマンフィルタ NHM-LETKF においては、台風などを対象に1000 メンバーを用いた日本全域実験を行う。領域気象モデル SCALE 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ SCALE-LETKF では、1000 メンバーでの30秒毎のフェーズドアレイ気象レーダー同化実験を行う。別途申請する占有利用が認められた場合、リアルタイム実証実験を行う。これらの実験結果から得られた情報について気象庁との意見交換を行う。都市広域の強風に関する解析では気象アンサンブル実験結果を用いて地表近傍のダウンスケールシミュレーションを実施する。さらに強風、猛暑などの極端気象に対する高解像度被害推定に関する検証を行う。（一般財団法人 気象業務支援センター、理化学研究所）

(2) 全球スケール予測

2020年度の結果を踏まえ、台風、および Madden-Julian oscillation (MJO)/Boreal Summer Intra-seasonal oscillation (BSISO) に代表される1~2ヶ月程度の時定数を持つ季節内変動について、高解像度化(水平3.5km)した非静力学正二十面体格子大気モデル NICAM を用いて数 10~100 メンバーのアンサンブル実験を実施する。NICAM(水平 14km)を用いて10年分のモデル台風統計情報をタイムスライスアンサンブル実験により取得する。NICAM(水平 14km)内における季節内振動の発達特性について 500~1000 メンバーのアンサンブル実験により調査する。海洋モデルと結合した NICAM(水平 14km)のアンサンブル実験により季節スケールでの海面水温誤差傾向の統計データを取得する。これらの結果から得られた情報について気象庁との意見交換を行う。（東京大学、海洋研究開発機構、理化学研究所）

(3) 先進的大規模データ同化手法

これまでに開発・最適化を進めた全球アンサンブルデータ同化システム NICAM-LETKF を用いて、気象・大気微量成分の両方を同化した 1024 メンバーアンサンブルデータ同化実験を実施する。また、水平 14km での高解像度アンサンブルデータ同化実験を行い、計算結果を「短時間領域スケール予測」「全球スケール予測」で初期値境界値として活用する。エアロゾル・温室効果気体濃度のデータ同化シミュレーションにおいては、低解像度 NICAM-LETKF を用いた 5-10 年スケールの長期実験を実施する。水安定同位体比をトレーサとするデータ同化実験を行い、トレーサ分布と大気モデル内の雲降水過程の評価を行う。(国立環境研究所、理化学研究所)

(4) プロジェクトの総合的推進

プロジェクトの総合的推進として、課題責任者は必要に応じて外部有識者及びオブザーバから構成される本課題の諮問委員会において実施計画および本課題の推進等に対する提言・指導を受け、それらを反映しながらプロジェクトを円滑に推進する。プロジェクト全体の連携を密にかつ円滑に運営するため、担当責任者間の意見調整の会議を主催し、文部科学省と担当責任者間との間の連絡窓口となる。実施項目ごとの研究会の開催等の実施項目を補助管理し、参画各機関の連携・調整を推進する。本課題で得られる成果等を集約・管理し、得られた成果を通じて、気象庁「2030 年に向けた数値予報技術開発重点計画」や「気候変動適応計画」へ貢献する。本プロジェクトを通じて、若手研究者や多様な人材の育成を図る。また、本プロジェクトで得られた成果については、シンポジウムや成果報告会等広報活動を通じて積極的に公表し、今後の展開に資する。広報活動においては、ホームページ等の広報媒体を通じて、本プロジェクトの成果を広く広報する。(東京大学)

2-2. 実施内容 (成果)

2-2-1. テーマ 1: 短時間領域スケール

(1) 成果概要

気象庁非静力学モデル局所アンサンブル変換カルマンフィルタNHM-LETKFを用いて令和元年東日本台風に関する1000メンバーアンサンブル実験を行った。その結果、気象庁現業予報と比較して進路、強度ともに改善した。また強風および暴風半径に対する風速確率を求め、気象庁の現業予報よりも小さな予報円を示すことが可能であることが分かった。

領域気象モデルSCALE局所アンサンブル変換カルマンフィルタSCALE-LETKFでは、1000メンバーでの30秒毎のフェーズドアレイ気象レーダー同化実験を行った。具体的には、2021年7月20日から8月8日と8月24日から9月5日までの東京オリンピック・パラリンピックの期間に合わせ、「富岳」の最大13,824ノードを占有利用して首都圏において30秒ごとに更新する30分後までの超高速降水予報のリアルタイム実証実験を実施した。予報データは単一の30分予報と10メンバーを用いたアンサンブル予報に基づく確率予報からなり、気象業務法に基づく予報業務許可のもと、理研の天気予報研究のウェブページおよび株式会社エムティーアイのスマートフォンアプリ「3D雨雲ウォッチ」で公開した。実験期間中は複数の顕著な降水事例を含む大部分の期間において、リアルタイムの計算とデータ転送により3分以下の処理時間を実現し、27分以上のリードタイムを達成した。

降水予報の精度については気象庁のレーダーおよびフェーズドアレイ気象レーダーそれぞれに基づくノウキャストと比較して複数の指標で検証を行った。また、顕著な降水事例については1000メンバーの30分降水予報のデータを得るための再実験を行い、予報誤差に大きく影響する解析値の力学場の特徴を調べた。

またSCALEと気象庁メソモデルasucaの比較実験などについて気象庁数値予報課と意見交換を行い、境界層スキームによる違いが明らかになった。また台風における強風についてアジア防災センターと意見交換を行い、当事業によって計算される強風の確率予測に期待している旨、コメントがあった。

都市広域の強風に関する解析として、NHM-LETKFによるアンサンブル実験結果を用いた2019年台風19号に関するダウンスケーリング実験を実施し、最外領域（空間解像度1km）のピーク時の風速が観測値と対応することを確認した。また、空間解像度50mでのNHMによる解析から、台風の構造に基づいた数十秒単位の風速変動構造が再現できることを確認した。

さらに、2018年猛暑日における東京都市域での弱風・温熱場予測について、最小空間解像度60mでの高解像度での領域気象モデル解析（The Weather Research and Forecasting model：WRF）を実施した。観測値との比較検証の結果、東京管区気象台や東京都都市域での高温発生状況が再現されていることを確認した。

年次計画			
内容（機 関 名）	令和2年度	令和3年度	令和4年度
【テーマ1】 「短時間領 域スケール 予 測」 (気象業務 支援センタ ー、気象研 究所、気象 庁、理化学 研究所、東 京工業大学)	HPCI第二階層を利用し た小規模テスト実験 富岳試行的利用による システム構築および 実効性能評価実験	観測ビッグデータ同化 を元にした大アンサン ブル計算による気象要 素確率情報の創出。ダ ウンスケールシミュレ ーションによる高解像 度被害推定実験。以上 を通じた科学的知見の 創出。	危険度分布確率メッシ ュ情報の創出。暴風、 特別警報級の大雨など の確率メッシュ情報の 創出。以上より科学的 知見の創出および大 アンサンブルを用いた 高精度確率予測に基づ く近未来天気予報シス テムの提示。

(2) 実施体制

テーマ 1 では多岐にわたる課題について効率的に研究を進めるために、サブテーマを設け、それぞれ下記のような研究内容と推進責任者を定め、研究を実施した。またそれぞれの研究テーマに関連して、当加速課題参加者以外の参加も呼びかけ、セミオープンな研究会を令和 3 年度に 2 回ずつ、実施した。

サブテーマ A: 大アンサンブルとアプリケーション 責任者：川畑拓矢（気象研究所）

- 1000 メンバーによる大アンサンブルの実行と確率予測や AI 解析など

サブテーマ B: 先端的データ同化と巨大アンサンブル手法 責任者：三好建正（理化学研究所）、副責任者：寺崎康児（理化学研究所）

- 非線形・非ガウスなど先端的データ同化や巨大アンサンブルなどに関する研究

サブテーマ C: 先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーション 責任者:伊藤純至(東北大学)

- 先端的な数値モデル開発と超高解像度シミュレーションを用いた物理機構の解明などに関する研究

(3) 成果内容

①サブテーマA: 大アンサンブルとアプリケーション

①-1. Forecasts of the July 2020 Kyushu heavy rain using a 1000-member ensemble Kalman filter

The potential factors that caused the July 2020 Kyushu heavy rain have been investigated with the help from a 1000-member ensemble simulation. The 1000 ensemble simulations were produced from the ensemble analyses of a 1000-member ensemble Kalman filter. The data assimilation method was the four-dimensional local diagonal ensemble transform Kalman filter 4D-LDETKF, which was chosen to ensure relatively independence between ensemble members. Three multivariate statistical techniques were used to identify the critical factors, two linear methods: (1) ensemble sensitivity analysis, (2) canonical correlation analysis; and a nonlinear method: (3) clustering with the generative topographic mapping algorithm.

The heavy rain is shown to be strongly associated with mesoscale frontal depressions along the Baiu front and high humidity areas on the south side of the depressions. The rainfall amount increases when the depressions are deepened and the moist flux on the south side of the depressions are enhanced. However, the rainfall locations are relatively sensitive to the locations of the front and the depression. This implies observations over the east of China are important to reduce uncertainties in this case.

参考文献

Duc, L., T. Kawabata, K. Saito, and T. Oizumi, 2021: Investigation of the potential factors that caused the July 2020 Kyushu heavy rain using a 1000-member ensemble simulation. *WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis*, Bonn, Germany.

①-2. 1000 メンバーアンサンブル気象予測とキキクルを用いた洪水の確率予測

洪水の早期の予測は防災・減災において重要な課題である。一級河川などの大規模河川の洪水予測については様々な研究がなされてきたが、中小規模の河川については観測結果の不足や流域が小さく降水の位置や強度に鋭敏であるため決定論的予測が難しいという事もありあまり予測研究がされてこなかった。この様な降水の予測精度に鋭敏な中小規模河川ではアンサンブル予報が有効であると考えられる。そこで Duc et al(2021)の 1000 メンバーのアンサンブル気象予測結果を用いて、令和 2 年 7 月豪雨で大規模な洪水が発生した球磨川流域の事例を対象に、洪水が発生しやすい本流と支流雨の合流点での洪水の確率予測を試みた。

洪水の予測モデルは気象庁のキキクル(洪水)を用いた。キキクルは流出過程をタンクモデルで計算し、河道の流下はマニング式と連続の式で計算するモデルである。解像度は 1km で各地点の流量の平方根を

「指数」とし、過去の大雨時の災害発生状況を基に決定された「基準値」と比較することで洪水の「危険度」を判定するモデルである。まず解析雨量を用いて 6 月 1 日 0 時 (JST) から 7 月 3 日 18 時までスピナップを行い、3 日 18 時から翌日 15 時の予報実験には 1000 メンバー、100 メンバーと気象庁のメソアンサンブル (MEPS) の降水予測を用いた。

結果の検証は大きな洪水被害が発生した小川と球磨川の合流部で行った。この合流部では球磨川本流の水位上昇により支流の小川から本流へ排水ができなくなるバックウォーターが発生し、洪水を引き起こした事が報告されている。

図 A-1 は小川における 1000 メンバー、100 メンバー、MEPS の結果である。赤線は解析雨量、黒線は決定論的予測、灰色の点線はアンサンブル平均を示す (第 1 軸に対応)。左図の紫、赤、黄色の点線はそれぞれ、50年、30年確率降水量と既往最大降水量における指数の値である (第 1 軸に対応)。この地点においては30年確率降水量の指数が既往最大降水量をほんの僅か上回っている。紫、赤、黄色の棒グラフはそれぞれ、50年、30年確率降水量と既往最大降水量の超過確率 (第 2 軸に対応) を示す。右図の紫、赤、黄色の点線はそれぞれ、基準値 1, 2, 3 における指数の値であり (第 1 軸に対応)、棒グラフはそれぞれの基準値の超過確率を示す。(a) に示す 1000 メンバーの予測では、決定論的予報は既往最大値を超過し、既往最大値の超過確率も 20%であった。(b) の 100 メンバーの予測では、決定論的予報は既往最大値を下回った。既往最大値の超過確率も 20%であった。(c) の MEPS では決定論的予報は既往最大値を超過したが、既往最大値の超過確率は 10%であった。(d) の 1000 メンバーの予測では、洪水の発生を見逃ないように設定された基準 1 の超過確率は 50%であり、降水警報に相当する基準 2 の超過確率は 20%であった。(e) の 100 メンバーの予測も基準 1 の超過確率は 40%であり、1000 メンバーよりも低い値をしめた。(f) の MEPS では基準 1 の超過確率は 30%であった。小川での洪水はバックウォーターによって発生したため、予測が難しい事例ではあったが、1000 メンバーの予測を用いることで洪水の発生確率が 50%であることを示した。このような小規模河川に対しても洪水のリスクを十分に評価できたことは大きな進展であった。

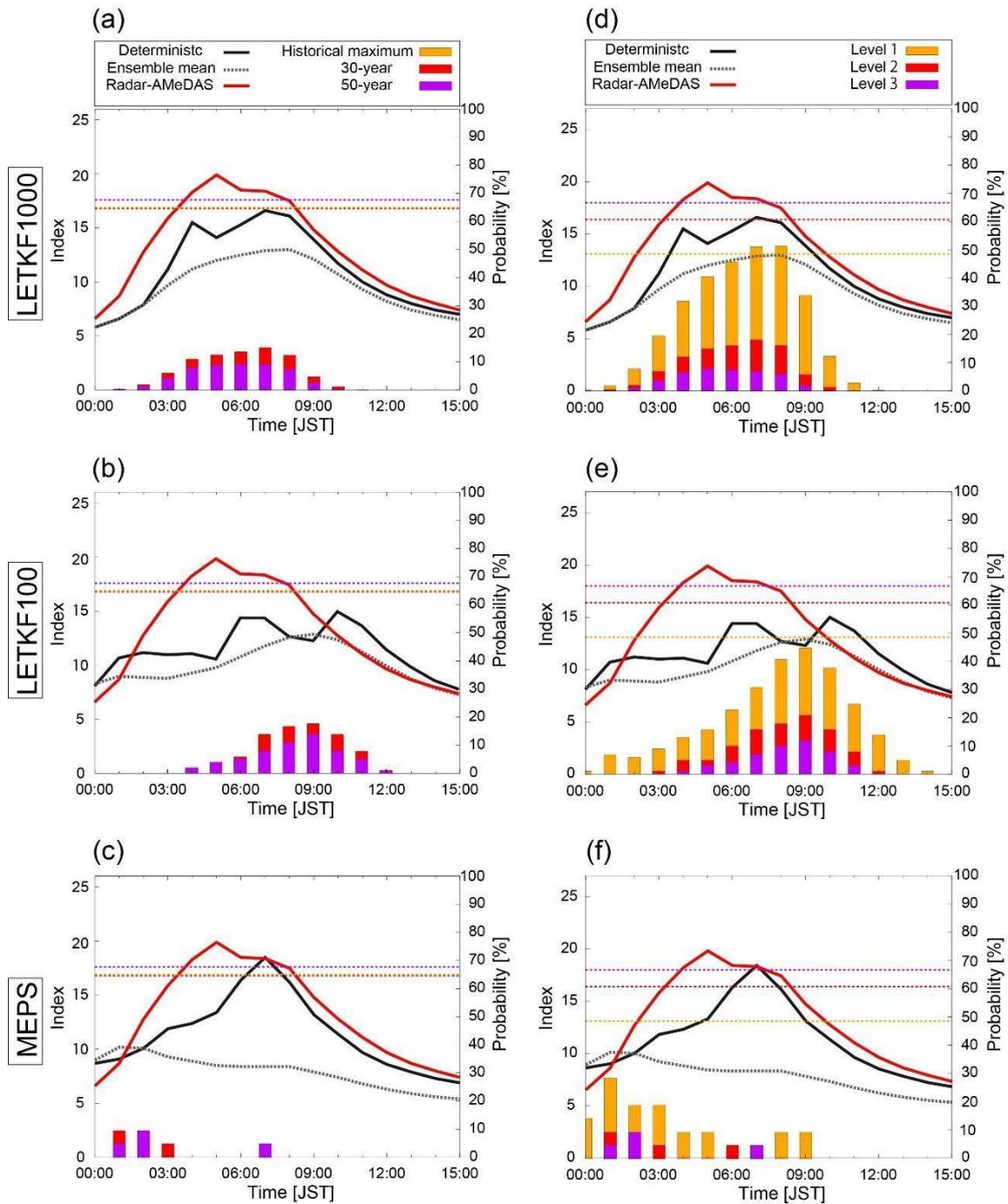


図 A-1：小川のアンサンブル予測結果。赤線は解析雨量、黒線は決定論的予測、灰色の点線はアンサンブル平均。左図の紫、赤、黄色の点線はそれぞれ、50年、30年確率降水量と既往最大値における指数の値。右図の紫、赤、黄色の点線はそれぞれ、基準値 1、2、3 における指数の値。紫、赤、黄色の棒グラフはそれぞれ点線紫、赤、黄色の超過確率（第 2 軸に対応）。

①-3. The probability forecast of high wind using an 1000-member ensemble (Pin-Ying Wu, Le Duc, and Takuya Kawabata)

Disasters due to high winds often occur in Japan and usually happen during the strike of

typhoons. Providing more informative forecasts is essential for people and the government to prevent and mitigate disasters as well as manage the risk. Compared to rainfall forecasts, the probability forecasts of risky winds are not well developed and are less used in weather forecasts nowadays. In addition to deterministic forecasts, the probability forecasts are critical for tackling the uncertainty in weather forecasts caused by the chaotic nature of the atmosphere. The ensemble technique is a widely used approach to produce probabilistic information and guide the uncertainty in the forecasts. Ensemble forecasts will become more common because of the non-stopping improvement of computing power. Therefore, more studies are desired to make the most benefit of ensemble forecasts for disaster prevention during high-impact weather.

In this study, we investigated the feasibility of producing probability forecasts of high winds using a large size ensemble, focusing on the case of the typhoon Hagibis (2019). The ensemble has 5-km grid spacing and 1000 members (Duc et al. 2021), which is the same grid-spacing but 50 times the member number compared with the current mesoscale ensemble prediction system used in Japan Meteorology Agency (JMA). The probability forecast of wind speed is calculated using the threshold of 15 and 25 m/s, which are the standard of the strong wind (強風) and fierce wind (暴風) defined by JMA, respectively. We focused on the time of the landing of typhoon Hagibis when it affected the Kanto area at 1200 UTC on 12 Oct. 2019.

For the threshold of 15 m/s, almost all members show wide ranges of the strong wind covering the Japan area (Fig. A-2a). The wind probability forecast indicates that more than a 90 % chance that the wind stronger than 15 m/s will happen at 1200 UTC over a wide area around Japan (Fig. A-2b). The range of the high probability area where the strong wind will happen with a chance larger than 50 % is roughly as wide as the strong wind range in the JMA operational typhoon forecast. On the other hand, the results of the fierce wind area show different agreement from the range announced by JMA (Fig. A-3). When using the definition of fierce wind (25 m/s) as the threshold, the ensemble members show larger uncertainty, and the contours of the wind speed equal to 25 m/s are dispersed. The range of probability that the fierce wind will happen with a chance of more than 90 % is much narrower than the case of the strong wind and is also smaller than the range of the fierce wind area announced by JMA.

The results suggest the feasibility of producing probability forecasts of high winds using ensemble forecasts. In addition, the probability forecast estimated by the ensemble forecast can provide additional information to the current weather forecast and help the management of high wind risk.

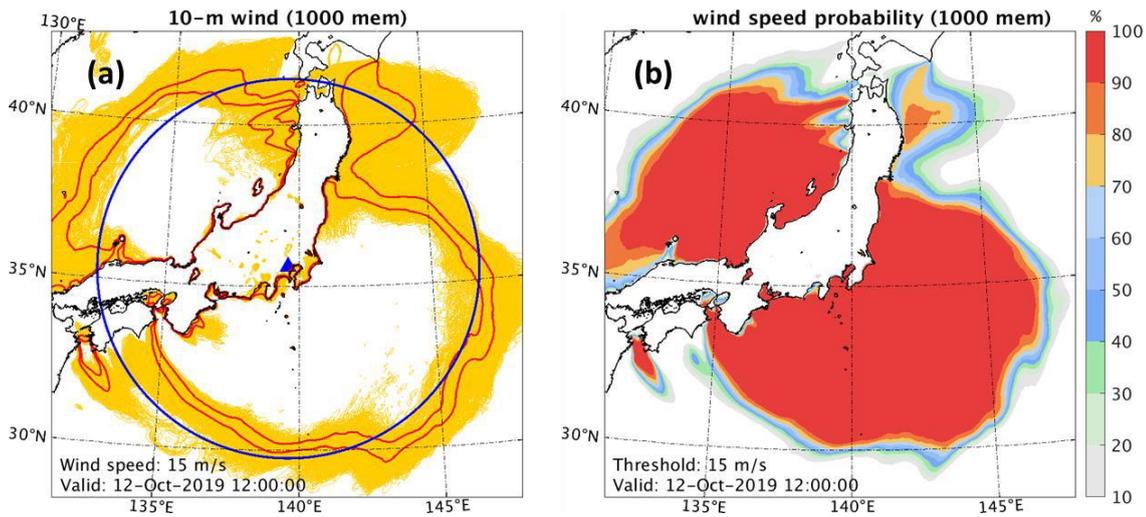


Figure A-2: (a) The contours of near-surface wind (10-m height) equal to 15 m/s of the 1000 members (yellow contours) and the location and the range of the strong wind in the JMA operational typhoon forecast (blue triangle and circle, respectively) at 1200 UTC on 12 Oct. 2019. (b) The probability forecast, calculated by the 1000-member ensemble, of the wind speed greater than 15 m/s at 1200 UTC on 12 Oct. 2019. The red contours in (a) indicate the 50 (outer) and 90 (inner) % of the probability forecast shown in (b).

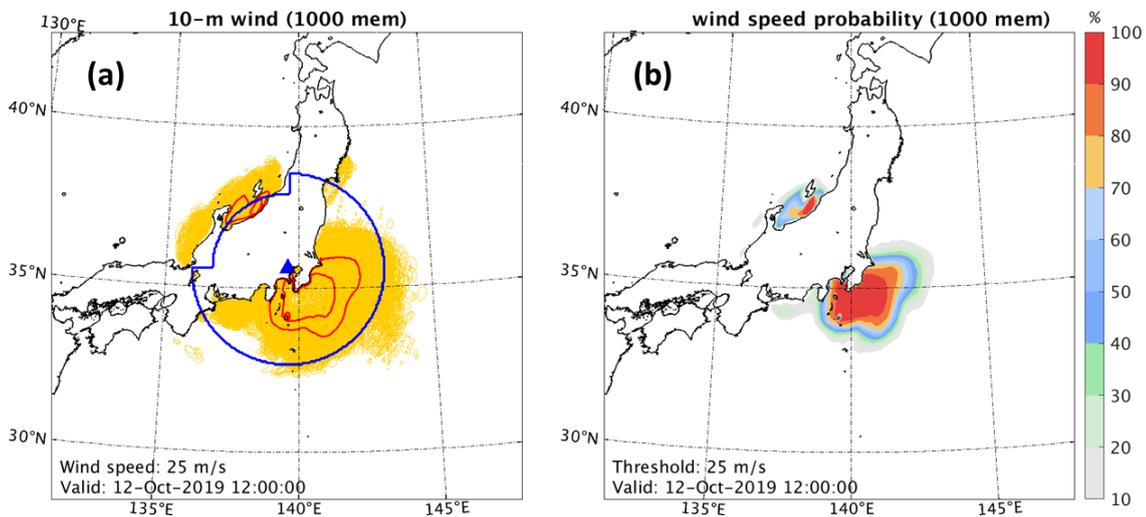


Figure A-3: The same as Fig. A-2, but for the wind speed of 25 m/s.

参考文献

Duc, L., T. Kawabata, K. Saito, and T. Oizumi, 2021: 1000-member ensemble forecasts for extreme events: the 2019 typhoon Hagibis and the July 2020 Kyushu. *The Joint WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis*, Online, 13-17 September 2021.

①-4. 1000 アンサンブル降雨による球磨川洪水予測

Duc et al. (2021)による 1000 アンサンブル降雨を入力として、図 A-4 に示す市房ダム及び川辺川ダム位置（川辺川ダムは建設予定があるが現存しない）での 1000 アンサンブル洪水予測を実施した。洪水モデルとしては星・山岡(1982)の貯留関数法を用いた。利点は計算速度で 1000 回×24 時間の計算がワークステーション (Xeon CPU E5-2670 (2.6GHz)) で 15 秒程度である。したがって、パラメータを変更しての試算が何度でも可能である。この結果を市房ダムについて図A-5 に、川辺川ダムについて図 A-6 に示す。全般的な傾向として、1000 アンサンブル流量の結果は 100 アンサンブル、21 アンサンブルの結果と比較して、95 パーセントイルの中にピーク流量を包含できるという側面で見ると優れていることが見て取れた。これは換言すると生起確率を算定する上での利点であるとも考えられる。

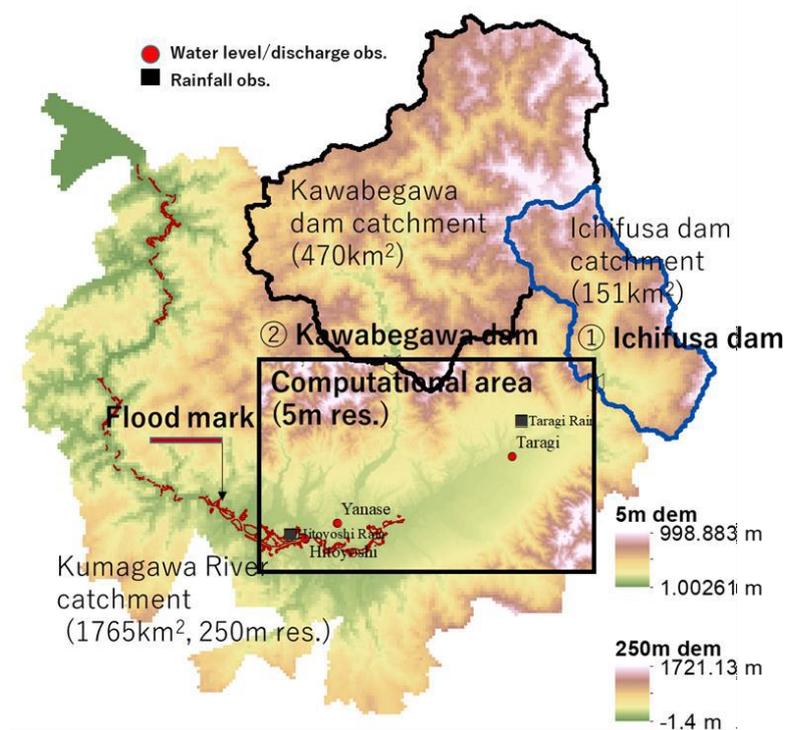


図 A-4 球磨川流域図

Duc L., T. Kawabata, K. Saito, and T. Oizumi: Forecasts of the July 2020 Kyushu Heavy Rain Using a 1000-Member Ensemble Kalman Filter, SOLA, 17, 41-47, <https://doi.org/10.2151/sola.2021-007>, 2021

星 清、山岡 勲：雨水流法と貯留関数法との相互関係、水理講演会論文集 26 巻 pp. 273-278、1982

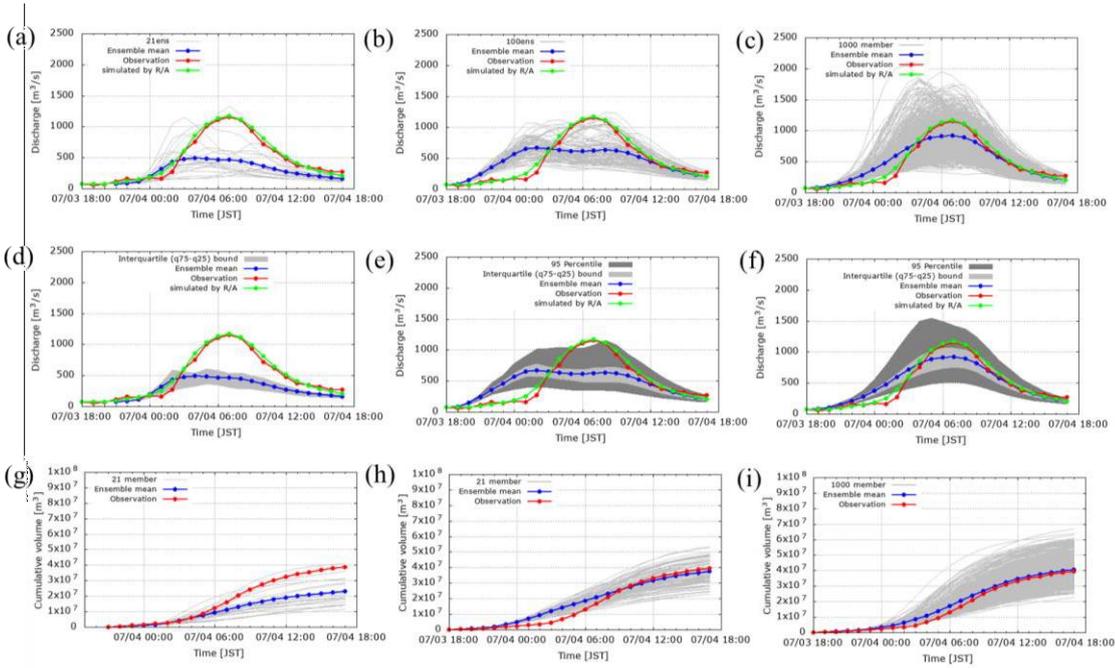


図 A-5: 計算・観測流量 (市房ダム) : 時間流量 (a) 21 member MEPS (b) 100 member (c) 1000 member; 時間流量の 95、75、25 パーセンタイル (d) 21 member MEPS (e) 100 member (f) 1000 member; 積算流量 (g) 21 member MEPS (h) 100 member (i) 1000 member

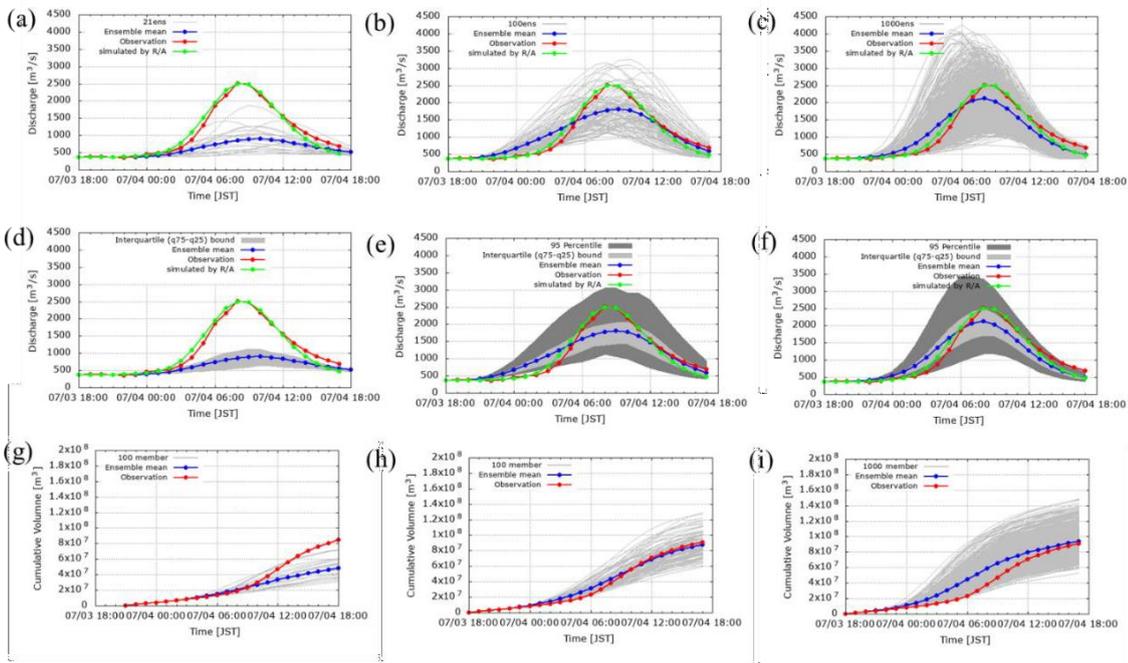


図 A-6: 計算・観測流量 (川辺川ダム) : 時間流量 (a) 21 member MEPS (b) 100 member (c) 1000 member; 時間流量の 95、75、25 パーセンタイル (d) 21 member MEPS (e) 100 member (f) 1000 member; 積算流量 (g) 21 member MEPS (h) 100 member (i) 1000 member

②サブテーマ B：先端的データ同化と巨大アンサンブル手法

②-1. スーパーコンピュータ「富岳」を用いた 1000 メンバー30 秒更新リアルタイム降水予報の実証実験
突発的かつ局所的な豪雨の予測に向けて、フェーズドアレイ気象レーダー(PAWR, Yoshikawa et al. 2013)による 30 秒毎の観測データを同化する領域アンサンブルデータ同化システムSCALE-LETKF が開発されてきた(Lien et al. 2017, Miyoshi et al. 2016a, b)。

実際にリアルタイムでの 30 秒間隔の予報の更新を可能にするため、SCALE と LETKF を単一のジョブとして実行しデータ入出力を簡素化し、境界値作成のための外側領域の計算を含めた全体のワークフローを構築した。昨年度はこのシステムと埼玉大学に設置されている情報通信研究機構(NICT)のマルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダー(MP-PAWR)を用いて、2020 年 8 月 25 日から 9 月 7 日までの期間に、首都圏において 30 秒毎に更新する 30 分後までのリアルタイム降水予報の実証実験を実施し結果を公開した。今年度はさらにこのシステムを拡張し、2021 年 7 月 21 日から 8 月 8 日、および 8 月 24 日から 9 月 5 日までの期間に、スーパーコンピュータ「富岳」を用いて初めて可能となる大規模な実証実験を実施した。

今年度は SCALE-LETKF による MP-PAWR のデータ同化において、メンバー数を従来の 50 から 1000 へと大幅に拡張した。また、30 分延長予報においても解析値のアンサンブル平均からの単一予報のみ行っていたのを、単一予報に加えて解析値のアンサンブルから抽出した 10 メンバーを初期値とする 30 分アンサンブル予報も行い、降水量に関する確率的な情報も提供できるようにした。MP-PAWR のデータ同化を行う領域は昨年度と同じであるが、境界値を準備するための外側領域の構成は大幅に簡素化し、外側(1.5km メッシュ)と MP-PAWRの同化を行う内側領域(500m メッシュ)の 2 個を用いた。外側領域に入力する初期値・境界値データには気象業務支援センターから取得した気象庁のメソモデル(MSM)の解析値・予報値を用いた。外側領域の予報も内側領域と同様に 1000 メンバーを用意し、MSM のデータには過去の予報データのデータベースを基に生成したランダム摂動を加えた。内側領域における MP-PAWR の観測データの NICT からのリアルタイム受信には去年度と同様に理化学研究所で開発された Just-In-Time Data Transfer (JIT-DT)を用いた。

「富岳」に SCALE-LETKF の単一ジョブ版を移植したのち、1000 メンバーでのリアルタイム予報のための 30秒毎のデータ同化を可能にするための開発を行った。まず計算の単精度化を行い、メンバー数が大きい場合にボトルネックとなる行列の固有値計算において、「富岳」上の計算効率に特化して開発されたライブラリ Kevd(Kudo and Imamura, 2019)を利用した。また、いくつかの点で並列化に関するコードを改善した。これらにより「富岳」上での大規模並列計算を大幅に高速化した。その上で、30 秒毎のデータ同化を実現するためのノード数を調査し、1 メンバー8 ノード(領域分割数 32 に相当)以上あれば可能となることがわかった(図 B-1)。並行して行う 30 分延長予報のアンサンブルの分も含めて全体では内側領域に 8888 ノード、外側領域に 2002 ノードで合計 10890 ノードを利用した。

実証実験期間中は、HPCI 一般利用課題(hp200062)のもとで「富岳」の一部分の 11,520~13,824 ノードを占有利用し計算を実施した。

図 B-2 に、実証実験期間中の 7 月 30 日に MP-PAWR で捉えられた顕著な降水事例を示す。高度 2km における降水強度の 15:30 の解析値と 30 分前からの予報値、および 30mm/h の降水量に相当する降水の発生確率の分布を示している。解析値では、特に降水領域の西側における新たな対流の細かな構造が表現されている。30 分予報では降水の空間的な広がり是不十分であるが、都心部の降水のうち東側の一部分を再現しており、アンサンブルメンバーの一部が特に強い降水の可能性を示していることがわかる。

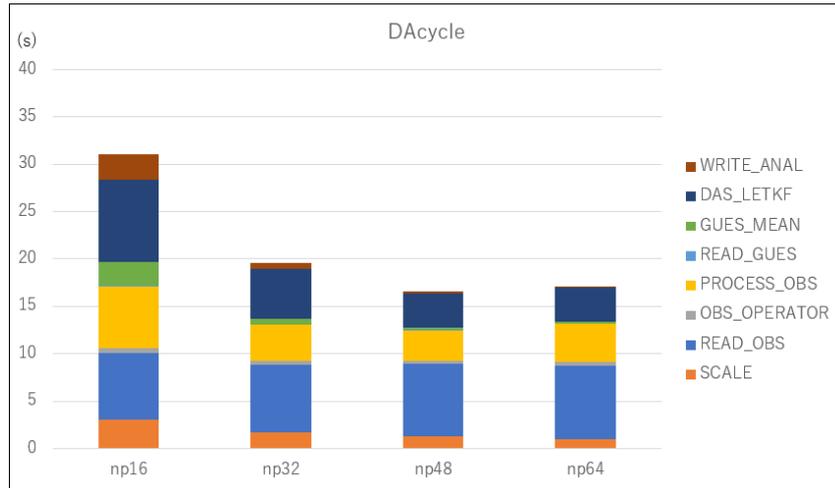


図 B-1：異なる領域分割数の場合におけるデータ同化 1 サイクルに要する時間(秒)とその内訳。横軸の“np”の後の数字が領域分割数を表し、利用ノード数に比例する。色分けした各項目はデータ同化サイクル中の各過程(主な過程:DAS_LETKF=データ同化, PROCESS_OBS=観測データ前処理, READ_OBS=観測データ読み込み, SCALE=30 秒予報)を表す。



図 B-2：2021 年 7 月 30 日午後 3 時 30 分における(左)SCALE-LETKF 解析値,(中)アンサンブル平均からの 30 分単一予報,(右)10 メンバーのアンサンブル予報に基づく 30mm/h 相当の降水の発生確率の分布. 高度2km における等価レーダー反射因子を降水量に変換. web ページ上で実際に表示した画面を用いている.

参考文献

- Kudo, S. and Imamura, T., 2019, January. Cache-efficient implementation and batching of tridiagonalization on manycore CPUs. In Proceedings of the International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (pp. 71-80).
- Lien, G.-Y., T. Miyoshi, S. Nishizawa, R. Yoshida, H. Yashiro, S. A. Adachi, T. Yamaura, and H. Tomita, 2017: The near-real-time SCALE-LETKF system: A case of the September 2015 Kanto-Tohoku heavy rainfall. SOLA, 13, 1-6, doi:10.2151/sola.2017-001.
- Miyoshi, T., and co-authors, 2016a: “Big data assimilation” revolutionizing severe weather prediction. Bull. Amer. Meteor. Soc., 97, 1347-1354, doi:10.1175/BAMS-D-15-00144.1.
- Miyoshi, T., and co-authors, 2016b: “Big data assimilation” toward post-petascale severe weather prediction: An overview and progress. Proc. the IEEE, 104, 2155-2179, doi: 10.1109/JPROC.2016.2602560.

Yoshikawa, E., T. Ushio, Z. Kawasaki, S. Yoshida, T. Morimoto, F. Mizutani, and M. Wada, 2013: MMSE beam forming on fast-scanning phased array weather radar. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 51, 3077-3088.

②-2. 機械学習を用いたモデルバイアス補正 : Lorenz96 モデル実験

予報モデルの系統的バイアス補正はデータ同化において重要な課題の一つである。現在用いられている手法の多くは、モデルバイアスの状態変数への依存性に単純な関数形を仮定し、補正項を定数もしくは多項式のような基底関数の重ね合わせで表現している (Dee and Da Silva, 1998, Danforth et al., 2007)。一方で、近年では機械学習によるデータ駆動型モデリングの研究が進展し、未知のプロセスに基づく状態の時間発展をデータのみから推定する手法への注目が高まっている。昨年度に引き続きこの研究では、データ同化を通じたバイアス補正への機械学習の応用を行う。本年度はより実験設定を発展させ、系の一部のみ観測されるような状況におけるバイアス補正の問題を扱った。また、機械学習部分に Long-Short term memory (LSTM) を用いてきたが、今年度は単一時刻を入力とするニューラルネットワークおよび、他のより単純な構造によるリカレントニューラルネットワークとの性能の比較をすることにより、データ同化を通じたバイアス補正における LSTM の有効性を調べた。

複スケールのLorenz96 モデル (Lorenz 1996; Wilks 2005) から、8 変数のうちランダム選択される 6 変数のみ一定の観測誤差の下で観測できるとする擬似的な観測の時系列を生成し、大スケールの変数のみの Lorenz96 モデルを予報モデルに用いたデータ同化実験を行い、得られた解析値と予報値をバイアス補正のためのニューラルネットワークの学習に用いた。学習の際の損失関数は LSTM が他の構造のニューラルネットワークよりも小さな値に収束することが確かめられた (図B-3)。系の一部のみ観測される場合でも、バイアス補正によりデータ同化がより小さい共分散膨張で安定して動き、解析値の真値と比較した精度が向上することを確かめた。また、補正項を予報モデルに加えて、解析値の時系列から抽出した 100 個の初期値を用いた延長予報を行い精度を比較したところ、LSTM を用いた場合には初期値の誤差と延長予報における平均的な誤差成長の両方が改善していることがわかった (図B-4)。

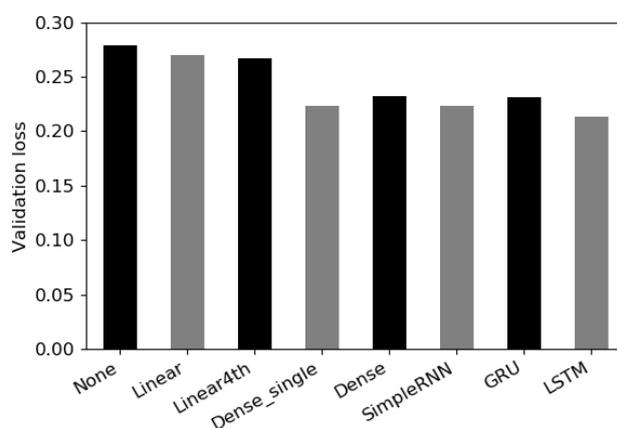


図 B-3 : 複スケールの Lorenz96 モデルを用いた理想実験における、各手法のバイアス補正における性能の比較。縦軸はバイアス補正後の第一推定値の解析値からの差の分散を表し、ニューラルネットワーク (NN) の学習における損失関数に対応する。左から None=補正なし、Linear、Linear4th=1 次、4 次の線形回帰、Dense_single=単一時刻のデータを入力とする NN、Dense=複数時刻のデータを用いた NN、

SimpleRNN=ゲートなしの RNN。

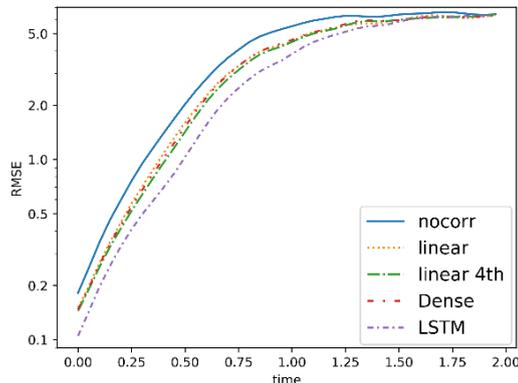


図 B-4 : 複スケールの Lorenz96 モデルを用いた理想実験における、予報時間の関数としての延長予報の精度。異なる色は異なるバイアス補正の手法に対応する。

参考文献

- Danforth, C.M. and Kalnay, E., 2008. Using singular value decomposition to parameterize state-dependent model errors. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(4), pp.1467-1478.
- Dee, D.P. and Da Silva, A.M., 1998. Data assimilation in the presence of forecast bias. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124(545), pp.269-295.
- Lorenz, E. N., 1996: Predictability: A problem partly solved. *Proc. Seminar on Predictability*, Vol. 1, Reading, United Kingdom, ECMWF, 1-18.
- Wilks, D. S., 2005: Effects of stochastic parametrizations in the Lorenz '96 system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 389-407.

②-3. Sensitivity testing for horizontal covariance localization scale with the SCALE-LETKF

In FY2021, we continued the development of the SCALE-LETKF as a regional scale precipitation forecasting system that included the testing of model parameters in an effort to optimize performance. One parameter that was tested was horizontal covariance localization scale, a length scale parameter used within the LETKF that determines the weighting of covariances at distances from each model grid. Determining the most suitable scale for localization is dependent on many factors, including scale of modeling, ensemble size and observation type, and is often performed through sensitivity testing with a range of different scales.

We tested horizontal covariance localization scales between 1-4 km for three case studies of severe weather from 2019. Experiments consisted of 1-hour rapid update cycling of a 500-m mesh with phased array weather radar (PAWR) observations, with 30-minute forecasts initialized from the ensemble mean every 30-seconds. Results showed that forecasts performed best with localization scales of between 1-2 km. At these scales, forecasts of convective activity were more consistent

with observations up to 30-minute lead times. Specifically, it was found that the rapid growth of convective activity leading to over-intensification in SCALE forecasts was reduced with smaller localization scales.

The investigation to examine why the use of different localization scales led to large differences in forecast skill focused on the state of the analyses. Vertical velocity analyses at 1-km height across the domain after 80 data assimilation cycles revealed much stronger low-level winds when a larger localization scale was set (Figure B-5), with regions of stronger convergence and updrafts, indicative of more favourable conditions for convection to develop. The investigation concluded that by using a smaller localization scale, the build up of unstable conditions could be reduced, thereby reducing the over-intensification of convective activity in forecasts that led to the model to lose forecast skill.

The study, Taylor et al (2022) has been recently submitted for publication to Weather and Forecasting Journal

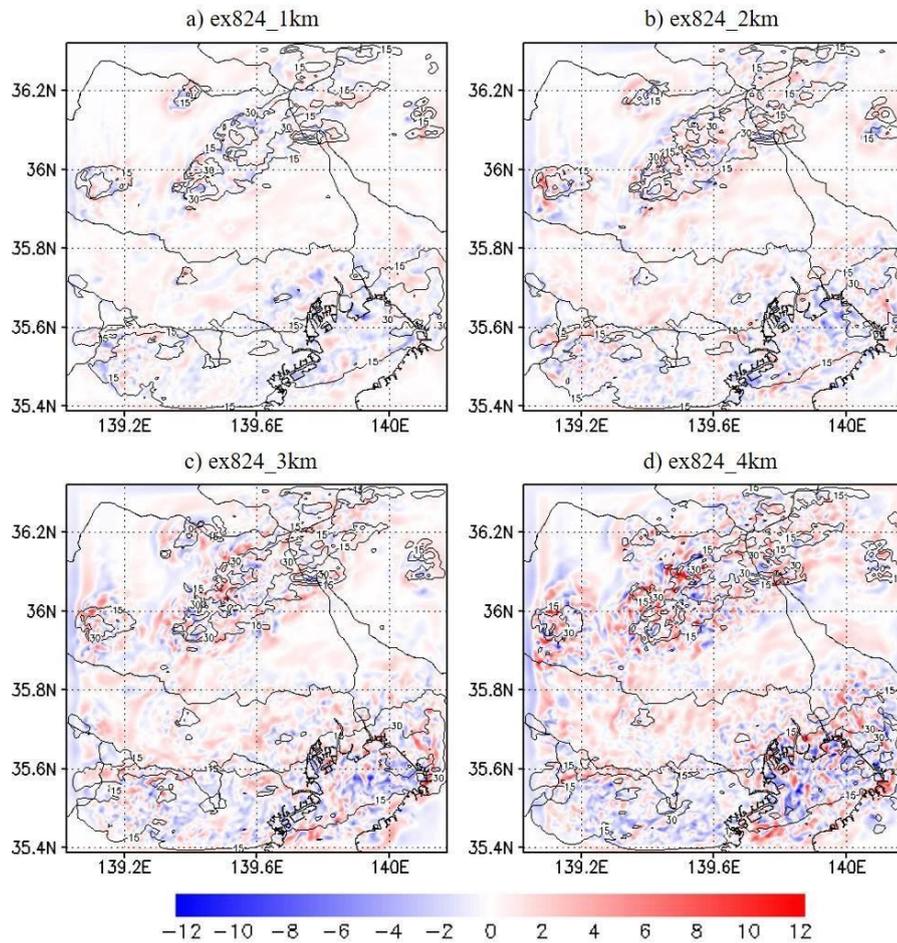


Figure B-5: Vertical velocity (ω , m s^{-1}) analyses at 1-km height for data assimilation experiments with localization scales of 1-km, 2-km, 3-km and 4-km, labeled ex824_1km, ex824_2km, ex824_3km and ex824_4km, respectively. Contours show radar reflectivity at 2-km height after 80 data assimilation cycles.

References

- Taylor, J., A. Okazaki, T. Honda, S. Kotsuki, M. Yamaji, T. Kubota, R. Oki, T. Iguchi, T. Miyoshi, 2021: Oversampling Reflectivity Observations from a Geostationary Precipitation Radar Satellite: Impact on Typhoon Forecasts within a Perfect Model OSSE Framework. *J. Adv. Modeling Earth Systems*, [doi:10.1029/2020MS002332](https://doi.org/10.1029/2020MS002332)
- Taylor, J., T. Honda, A. Amemiya, Y. Maejima, S. Otsuka, T. Miyoshi (2022) Sensitivity to Localization Radii for an Ensemble Filter Numerical Weather Prediction System with 30-Second Update. *Weather and Forecasting (Submitted)*

②—4. Oversampling Reflectivity Observations from a Geostationary Precipitation Radar Satellite: Impact on Typhoon Forecasts within a Perfect Model OSSE Framework

For the past two decades, precipitation radars (PR) onboard low-orbiting satellites such as Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) have provided invaluable insight into global precipitation variability and led to advancements in numerical weather prediction through data assimilation. Building upon this success, planning has begun on the next generation of satellite-based PR instruments, with the consideration for a future geostationary-based PR (GPR), bringing the advantage of higher observation frequency over previous and current PR satellites. In a recent study by Okazaki et al (2019), the feasibility of a future precipitation radar based onboard a geostationary satellite (GPR) that could obtain three-dimensional precipitation measurements was successfully tested. In FY2021, we took the first step to investigate whether these reflectivity observations from a GPR could be used to improve analyses and forecasts of global weather systems. We performed a series of data assimilation experiments that assimilated simulated GPR observations for a West Pacific tropical cyclone, with observations obtained with varying radar beam sampling spans. Results found that key convective features of the tropical cyclone (TC), including the eye, eyewall structure, and outer rainbands, were all better captured in simulations assimilating observations obtained with finer beam sampling spans. Observations were also found to have a positive impact on TC intensity in both model analyses and forecasts, with forecast errors for minimum sea level pressure improved at all lead times up to 18 h. TC intensity forecasts were also improved with increasingly finer beam span, suggesting an important potential benefit of oversampling for TC prediction. As an example, Figure B-6 shows mixing ratio of all hydrometeors for the Nature Run at 0000 UTC 2 August 2015 and the analyzed mixing ratio after 12 hours of cycling for experiments with no GPR observations assimilated and experiments with GPR observation assimilation with beams spans of 20-km and 5-km, representing no-oversampling and oversampling respectively. Experiments where GPR observations are assimilated show a much-improved structure to the moisture distribution, with convective features better represented in the analyses, including the eyewall and spiral outer rainbands.

The study, Taylor et al (2021), was published in the Journal for Advances in Modelling Earth Systems (JAMES) and was awarded the achievement of 13th RIKEN Incentive Ward (Obhu Award).

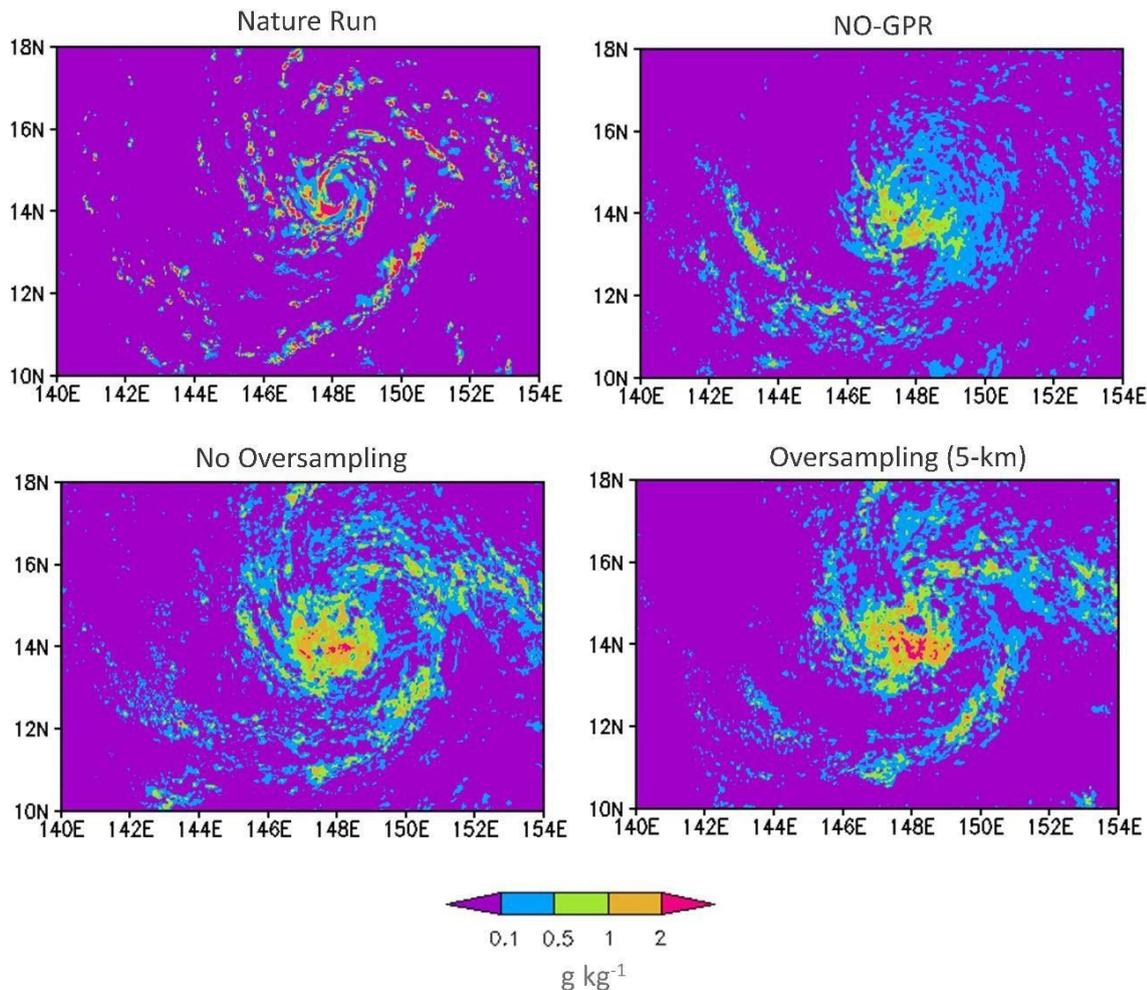


Figure B-6: Mixing ratio of all hydrometeors (g kg^{-1}), which includes rain, cloud water, cloud ice, snow and graupel at 2-km height at 0000 UTC August 2 2015 for the Nature Run and experiments with no GPR assimilation (NO-GPR), assimilation with GPR observations with no-oversampling (NO-OVERSAMPLING) and with oversampling with 5-km beam span (OVERSAMPLING).

②-5. 令和 2 年 7 月豪雨における、多地点フェーズドアレイ気象レーダー観測を想定した観測システムシミュレーション実験

熊本県南部の球磨川流域を中心とした地域に、甚大な水害をもたらした令和 2 年 7 月豪雨においては、2020 年 7 月 3 日 14 時頃から翌 4 日 10 時頃にかけて断続的に線状降水帯が発生し、人吉市のアメダスで 600 mm を超える 24 時間降水量が観測された。2020 年度より、九州全土をカバーする 17 台のフェーズドアレイ気象レーダー (PAWR) を仮想的に配置して、30 秒毎の PAWR 観測データを取得し、領域気象モデル SCALE (Nishizawa et al. 2015) に同化することで、令和 2 年 7 月豪雨における線状降水帯の予報精度にどのような影響を与えるか評価する観測システムシミュレーション実験 (Observing System Simulation Experiment; OSSE) を、スーパーコンピュータ「富岳」を用いて進めてきた。昨年度は主に、PAWR 同化の予報へのインパクトと、OSSE の初期時刻の違いによる結果の比較を中心に行ってきたが、2021 年度は、30 秒毎の PAWR 観測の同化実験に加え、気象庁の現業予測に用いられている従来型の気象レーダーに相当する、5分毎のレーダー観測を同化する実験を行い、両者の比較を行った。本報告内容および図 B-7、8、9 は、2022 年 3 月 7 日に日本気象学会が刊行する論文誌 SOLA に掲載された論文 (Maejima et al. 2022) の内容に基づく。基本的な実験設定は、2020 年度の報告書と同様である。OSSE の真値とな

る Nature run は 2020 年 7 月 3 日 18 時における気象庁メソ解析(JMA-MANAL)を初期値とし、水平 1km 解像度の SCALE にて時間発展を行った結果を用いた。OSSE における観測システムは、17 台の PAWR は九州島内の地方気象台及び特別地域気象観測所に設置した場合を想定し(図B-7)、データ同化システムは、領域気象モデル SCALE(Nishizawa et al. 2015)に局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(Hunt et al. 2007)を実装した SCALE-LETKF(Lien et al. 2017)を用いた。OSSE の初期時刻は 7 月 1 日 0900 JST とし、PAWR 観測に相当する 30 秒毎のレーダー反射強度と動径風を同化する実験(30SEC)と、従来型気象レーダーに相当する 5 分毎の観測データを同化する実験(5MIN)を行い、線状降水帯の予報へ影響を評価した。また予報への影響を評価するための基準として、観測データを同化しない実験(NO-DA)も併せて行った。

図 B-8 はレーダーによる観測データを同化した期間(2020 年 7 月 4 日 0230JST から 0400JST)における、解析値の二乗平均平方根誤差(RMSE)を示したものである。RMSE の算出に当たっては、図 B-7 のカラーシェードで示したレーダー射程範囲を評価領域とし、この領域で平均した値を図示した。30SEC では、30 秒毎の同化によって急速に RMSE が低下し、8dBZ 程度に落ち着いているのに対し、5MIN では NO-DA に比べて RMSE は低下しているものの、27dBZ 程度にしか RMSE が下がらず、両者の解析値の精度の差が大きくなった。さらに 30 秒毎の PAWR データの同化は、線状降水帯周辺的环境場にも影響を与えた。図 B-9 は 7 月 4 日 0400 JST を初期時刻とした 1 時間先の雨水混合比[$g\ kg^{-1}$]の予報値(図B-9a-d)、および2020 年 7 月 4 日 0400JST における 1000hPa 面の相当温位と水平風である(図B-9e-h)。Nature runは、豪雨による著しい被害をもたらされた熊本県南部を中心に、東西約 400km 以上にわたって線状降水帯が再現されているのに対し(図B-9d)、NO-DA では、降水帯の位置がこれより南に 100km 以上ずれており、球磨川周辺の豪雨は再現できなかった(図 B-9a)。5MIN も NO-DA 実験とほぼ同様の結果をしめしており、予報を改善することができなかったが(図 B-9b)、30SEC 実験はこれを大幅に改善した(図B-9c)。また相当温位場を見てみると、Nature run では線状降水帯の発生位置に対応して、340K 以下の低相当温位域が見られ、豪雨によるコールドプールが発生したと考えられる(図B-9h)。30SEC においても、Nature run と同程度の低相当温位域の発生が確認できるが、5MIN ではコールドプールの存在が不明瞭であり、NO-DA に近い結果となった(図B-9e-g)。30SEC では、PAWR データの同化によって積乱雲の成長が維持されやすい環境場が形成されることで、豪雨の予報改善につながったものと考えられる。

以上より、30 秒毎の PAWR を同化することによって、Nature run が示すような活発な線状降水帯の再現性が高まり、予報の改善にも寄与することがわかった。

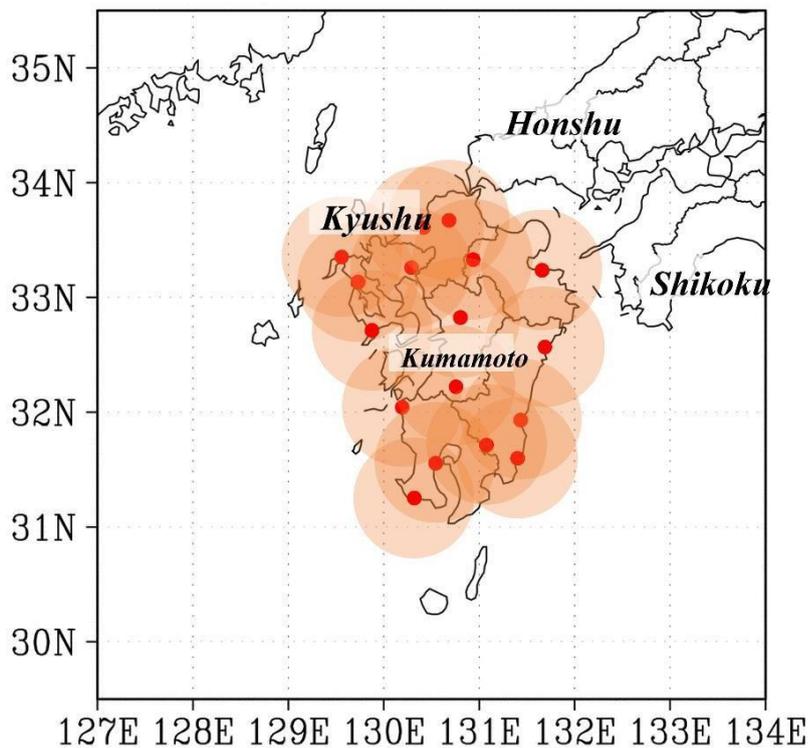


図 B-7: 仮想的なフェーズドアレイ気象レーダーネットワーク。赤点はフェーズドアレイ気象レーダーが設置された 17 の地点、オレンジ色の影はレーダーの観測範囲を示す。

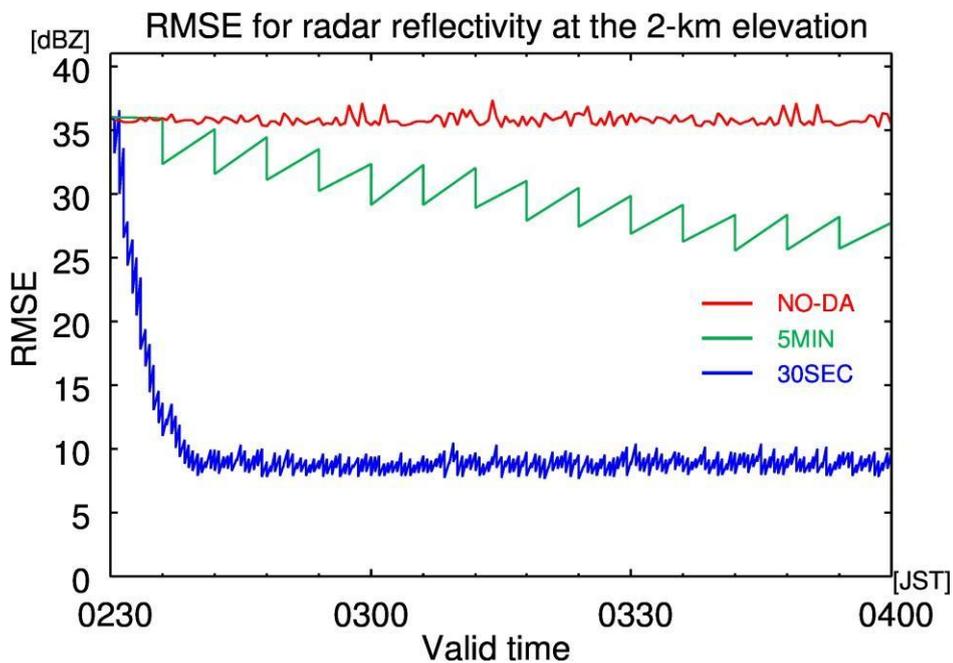


図 B-8: 2020 年 7 月 4 日 0230JST から 0400JST における、高度 2km のレーダー反射強度の二乗平均平方根誤差 (RMSE) [dBZ]。

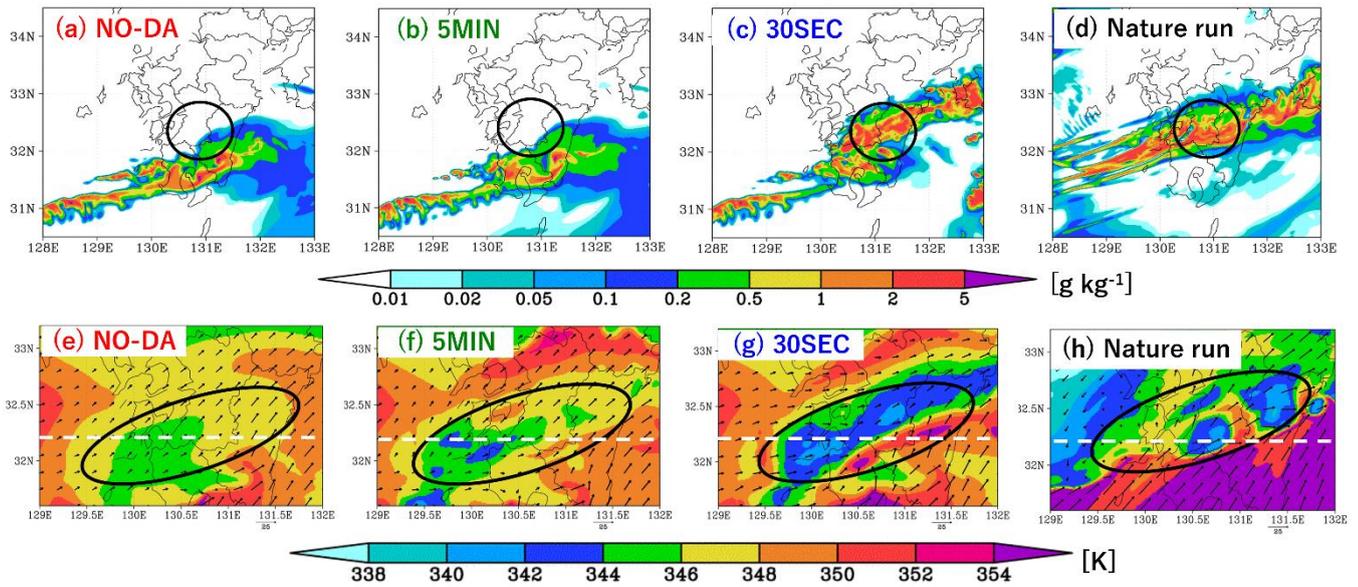


図 B-9: (a-d) 7 月 4 日 0400 JST を初期時刻とした 1 時間先の雨水混合比 [g kg^{-1}] の予報値。(e-h) 2020 年 7 月 4 日 0400JST における、1000hPa 面の相当温位 [シェード: K] と水平風 [ベクトル: m s^{-1}]

参考文献

- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Physica D*, 230, 112-126.
- Lien, G.-Y., T. Miyoshi, S. Nishizawa, R. Yoshida, H. Yashiro, S. A. Adachi, T. Yamaura, and H. Tomita, 2017: The near-real-time SCALE-LETKF system: A case of the September 2015 Kanto-Tohoku heavy rainfall. *SOLA*, 13, 1-6.
- Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, 8, 3393-3419.
- Maejima, Y., T. Kawabata, H. Seko, and T. Miyoshi, 2022: Observing system simulation experiments of a rich phased array weather radar network covering Kyushu for the July 2020 heavy rainfall event, *SOLA*, 18, 25-32.

②-6. 雷観測の効果的なデータ同化へ向けた同化手法の開発

雷活動は、雲内における氷粒子の衝突や帯電と密接に関係しているため、これらの観測を効果的にデータ同化出来れば雲内の雲粒子分布や気流構造の改善が期待される。しかし、アンサンブルカルマンフィルタを用いて雷観測を同化する場合、実際には雷が観測されているにも関わらず全てのアンサンブルメンバーが雷観測ゼロを予測している状況では、解析インクリメントが得られないという課題がある。同様の課題は気象レーダーの反射強度でもみられ、Yokota et al. (2018)はモデル変数のアンサンブル摂動と

反射強度観測の摂動との間の統計的な関係性に基づく回帰で得たアンサンブル摂動を用いることで、全てのアンサンブルメンバーが晴天の状況でも適切な解析インクリメントを得た。本研究では、Yokota et al. (2018)の手法を SCALE-LETKF(Lien et al. 2017)へ実装し、雷観測の同化への影響を 2017 年九州北部豪雨のシミュレーション実験で検証した。

Yokota et al. (2018)の手法を適用することで、ほとんどのアンサンブルメンバーが雷ゼロを予測している場合でも、適切な解析インクリメントが得られた。図 B-10 はシミュレーション実験の 1 サイクル目で得られたあられの解析インクリメントを示している。このとき、九州の中央付近で活発な雷活動が観測されていたにもかかわらず、ほとんどのアンサンブルメンバーは雷活動ゼロを予測していた。そのため、Yokota et al. (2018)手法を用いない CTRL 実験においては、九州中央部において解析インクリメントがほとんどみられない。一方で、Yokota et al. (2018)手法を用いた TEST 実験においては、活発な雷活動と密接に関連するあられを増やす解析インクリメントがみられる。得られた解析値からアンサンブル降水予報を行ったところ、Yokota et al. (2018)手法を利用して雷観測を同化した実験の方が用いない実験と比較して明らかに降水予報精度が改善されていた。今後、台風などの他の大気現象についても手法の有効性を検証する予定である。

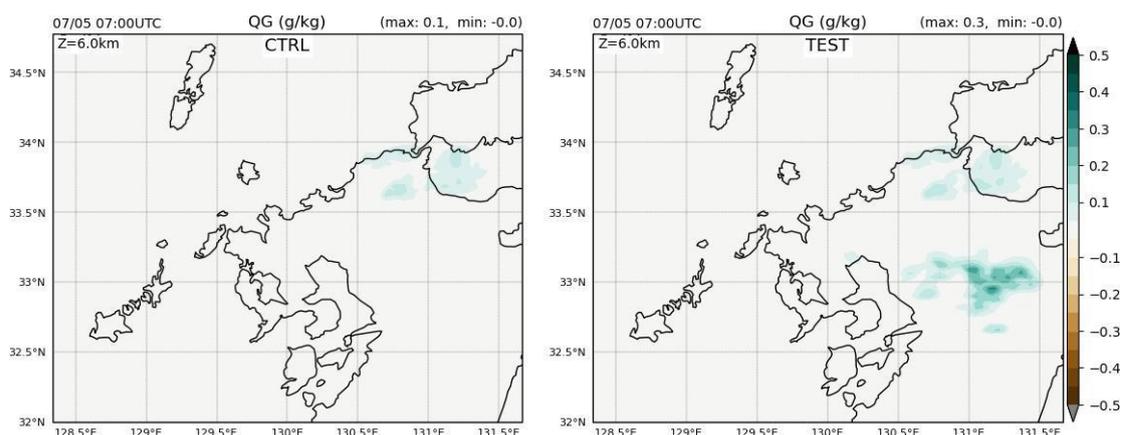


図 B-10: 高度 6 km におけるあられ混合比(g/kg)の解析インクリメント。(左)CTRL 実験(Yokota et al. 2018 手法なし)、(右)TEST 実験(Yokota et al. 2018 手法あり)をそれぞれ示す。

参考文献

- Lien, G.-Y., T. Miyoshi, S. Nishizawa, R. Yoshida, H. Yashiro, S. A. Adachi, T. Yamaura, and H. Tomita, 2017: The near-real-time SCALE-LETKF system: A case of the September 2015 Kanto-Tohoku heavy rainfall. SOLA, 13, 1-6, doi:10.2151/sola.2017-001.
- Yokota, S., Seko, H., Kunii, M., Yamauchi, H., & Sato, E. (2018). Improving short-term rainfall forecasts by assimilating weather radar reflectivity using additive ensemble perturbations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, 9047-9062. <https://>

②—7. Examining the sensitivity of EFSO accuracy to ensemble size using 1024-member NICAM-LETKF

As more and more observations become available, it is important to quantify the impact of assimilated observations on the subsequent forecast, which can help improve the use of these observations further. Currently, several approaches exist to estimate observational impact on the forecast skills. Ensemble forecast sensitivity to observations (EFSO) is one such approach that extends upon the adjoint-based forecast sensitivity to observations (FSO) method by utilizing ensemble of forecasts in replacement of an adjoint model. However, like any ensemble-based methods, EFSO also suffers from sampling error due to the use of limited-sized ensemble. This is more severe when ensemble-based correlations between different times are used in EFSO. The supercomputing resource of Fugaku has allowed the use of large number of ensemble members in numerical weather predictions. Many studies have demonstrated the use of large ensembles in the context of data assimilation, however, the use of large ensemble to quantify observation impact via EFSO is yet to be explored. In this study, we implemented the EFSO method for NICAM-LETKF and used a total of 1024 ensemble members on Fugaku to examine the sensitivity of the accuracy of EFSO estimated error reduction to ensemble size via sub-sampling.

When measuring EFSO accuracy in the form of difference between two globally summed values, as was done in the literature, it suggests little sensitivity of EFSO accuracy to ensemble sizes. In addition, counter-intuitive results were obtained where smaller ensemble appears to have the most accurate EFSO estimate. Using metrics that consider spatial variations of error reductions that include RMSE, Bias, and Pearson's correlation coefficient between the two sets of gridded data of error reductions, we can confirm the sensitivity of EFSO accuracy to ensemble size where EFSO with larger ensemble sizes leads to improved accuracy (smaller RMSE; Figure 11a and 11c). However, we also found that EFSO with smaller ensemble sizes tend to have smaller bias, which is likely due to the cancellation of noisy positive-negative spatial pattern in small-sized ensembles. Results from the relative skill score to the 1024-member EFSO suggests ensemble size of 128 or more can capture about 80 % of the performance of the 1024-member ensemble, in terms of RMSE (Figure 11b and 11d).

In addition to accuracy measure, we also looked fraction of beneficial observations (FBO). We found that EFSO with larger ensemble sizes leads to larger FBO (Figure 12). This is because observations that were identified as impactful (either detrimental or beneficial) in smaller ensemble sized EFSO become non-impactful (neutral) in larger ensemble sized EFSO. There are more detrimental observations than beneficial observations being re-identified as neutral. As a result of less detrimental observations, FBO increases with increased ensemble sizes. A manuscript that summarizes this work is currently in preparation (*Wu et al. 2022*).

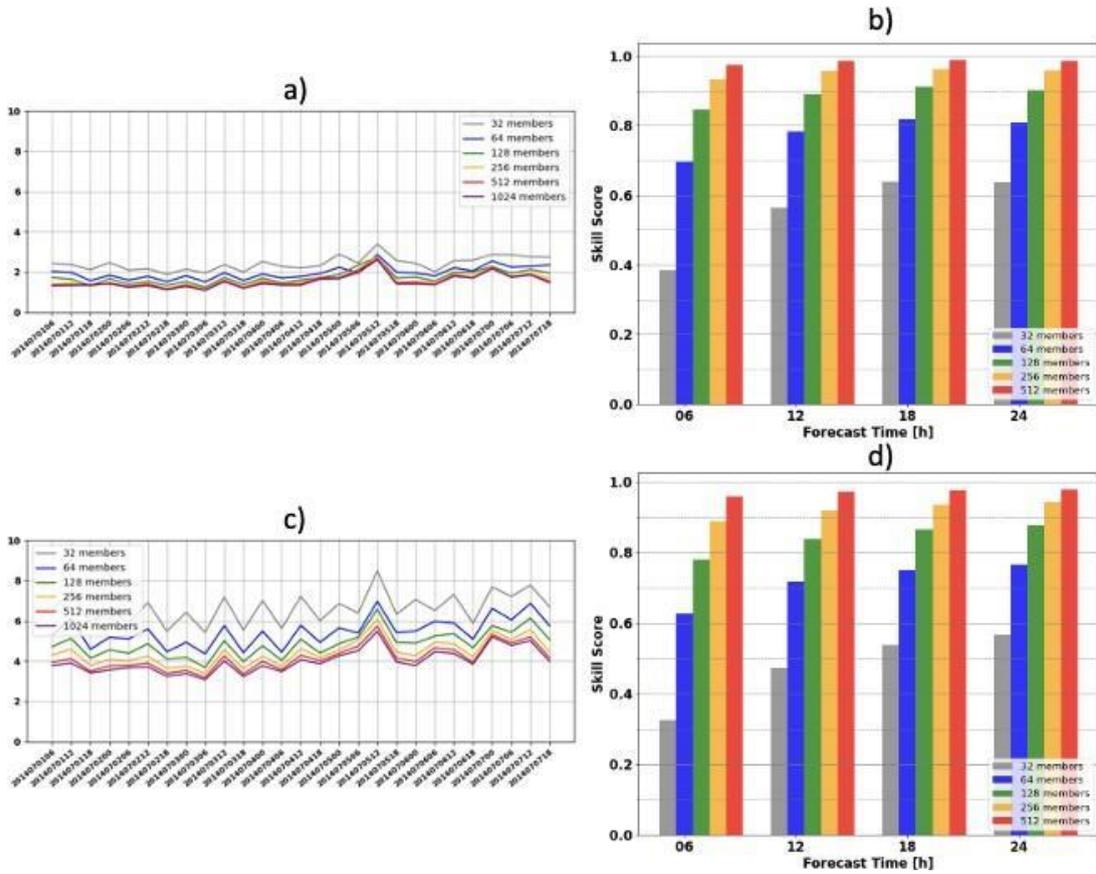


Figure B-11. a) Time series of RMSE of EFSO estimated error reduction against the true error reduction for 6-h forecast and b) time-averaged relative skill score of sub-sampled EFSO estimated error reduction against 1024-member EFSO estimated error reduction at 6-, 12-, 18-, and 24-h forecasts where NICAM's self-analysis is used as reference. c)-d) Same as a)-b), except where ERA-5 reanalysis is used as reference. Adopted from *Wu et al. (in prep.)*

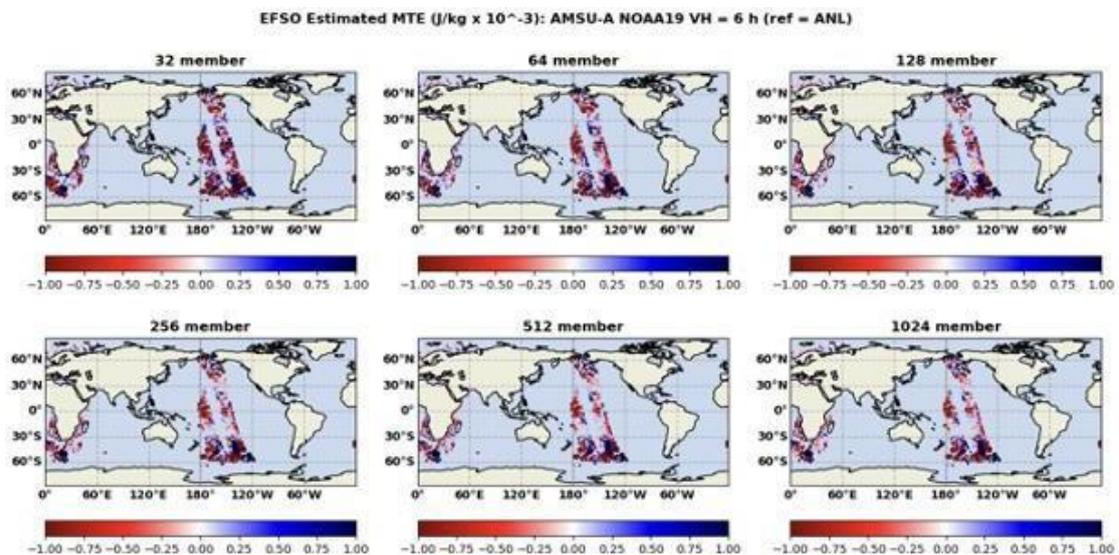


Figure B-12. EFSO estimated 6-h forecast error reductions ($10^{-3} \text{ J kg}^{-1}$) for satellite radiances of AMSU-A onboard the NOAA19 satellite from all 6 ensemble experiments where NICAM's self-analysis was used as reference: a) 32 members, b) 64 members, c) 128 members, d) 256 members, e) 512 members, and f) 1024 members. Negative values in red colors correspond to beneficial impact, positive values in blue colors correspond to detrimental impact, and zero values in white colors correspond to no impact or neutral impact. Adopted from *Wu et al. (in prep.)*.

②-8. 変分法によるスケール依存同化の検討

リモートセンシング観測の高度化によって、時間、空間的に広く分布する高頻度、高密度のデータが取得可能となってきた。本研究では、このような多様なスケールの情報を含む観測データを数値予報で有効に活用するためのデータ同化技術の高度化を検討した。気象庁現業メソ解析で 2020 年 3 月まで運用された JNoVA 4D-Var (Honda et al. 2005) に基づき、観測誤差 (R) の時空間相関、流れに依存する背景誤差 (B) を導入したシステム (Fujita et al. 2022) を用いた。

観測データの持つ様々なスケールの情報を有効に抽出するため、このシステムをさらに拡張し、ウェーブレット空間でのアンサンブル制御変数を導入したスケール依存ハイブリッド 4D-Var を実装した。また、ひまわり 8 号による大気追跡風観測の同化への対応として、水平・鉛直・時間方向の R 相関を Desroziers et al. (2005) の手法により診断し (図 B-13)、おおよその振る舞いを近似して組み込んだ。

スケール依存ハイブリッド 4D-Var で、大気追跡風観測の間引き間隔を変えた同化実験を行ったところ、低解像度観測の同化 (図 B-14(a)) と比較して、高解像度観測の同化 (図 B-14(b)) では、観測データの増加によりインクリメント (解析値 - 第一推定値) が大きくなることに加えて、インクリメントにより詳細な構造がみられた。インクリメントのパワースペクトルの比率を見ると、スケール依存ハイブリッド 4D-Var (図 B-15(b)) では、インクリメントのスケールごとの成分について最適化を行うため、ハイブリッド 4D-Var (図 B-15(a)) と比較して、観測データの解像度の違いがインクリメントにより明瞭に反映されることが分かった。

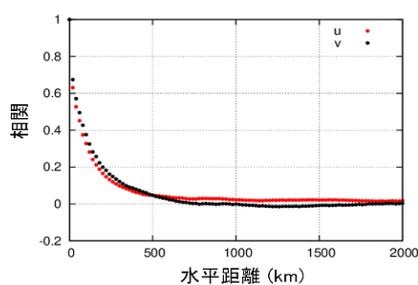


図 B-13: 診断による大気追跡風観測誤差水平相関 (赤: 東西風、黒: 南北風)。

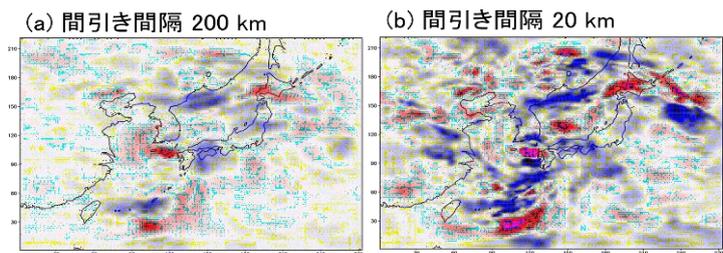
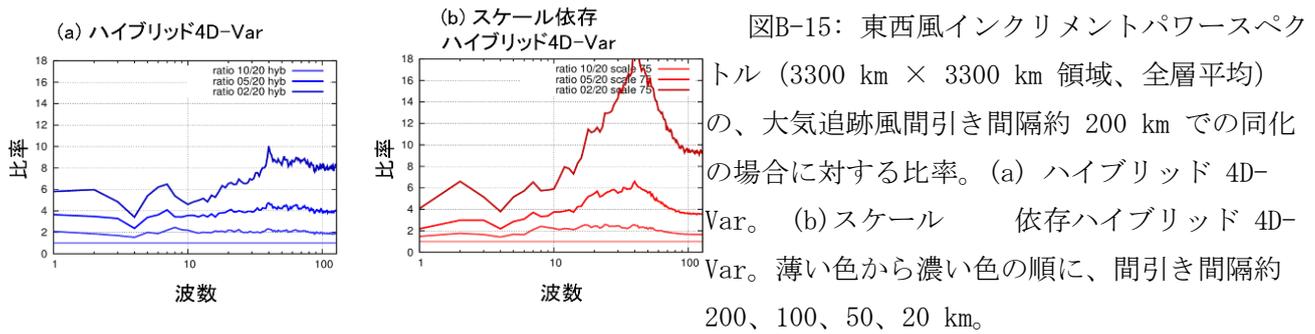


図 B-14: スケール依存ハイブリッド 4D-Var による大気追跡風同化実験の、同化ウィンドウ初期時刻におけるモデル面第 17 層 (約 600 hPa) 東西風インクリメント。(a) 大気追跡風の間引き間隔約 200 km。(b) 約 20 km。



②-9. 気候的背景誤差共分散を用いたハイブリッドデータ同化手法の開発

局所変換アンサンブルカルマンフィルタ (LETKF) に、ハイブリッド背景誤差共分散を導入する手法を開発した。この手法は予測アンサンブル摂動 (予測項) に、気候の摂動 (気候項) を追加することでハイブリッド背景誤差共分散を考慮する手法である (Kretschmer et al. 2015)。また、一般に LETKF で行われる観測誤差分散の膨張に基づく局所化ではなく、新たに観測空間のアンサンブル摂動を減衰させる局所化手法を導入し、この減衰局所化により予測項と気候項に異なる局所化スケールを適用可能であることを示した。全球大気モデル SPEEDY を用いた実験の結果、このハイブリッド背景誤差共分散により、特に観測が疎な地域で改善傾向がみられることが示された。またコントロール実験とした LETKF と比較し、気温予測精度が大きく改善していることが示された (図 B-16)。更に LETKF において、局所的な観測数とアンサンブル数に応じて異なる固有値分解を行う新しい解法を導入し、大アンサンブル実験において LETKF の計算量を大きく削減可能であることを示した (図 B-17)。以上の成果をまとめて、米国気象学会・Monthly Weather Review 誌に論文を発表した (Kotsuki and Bishop 2022)。

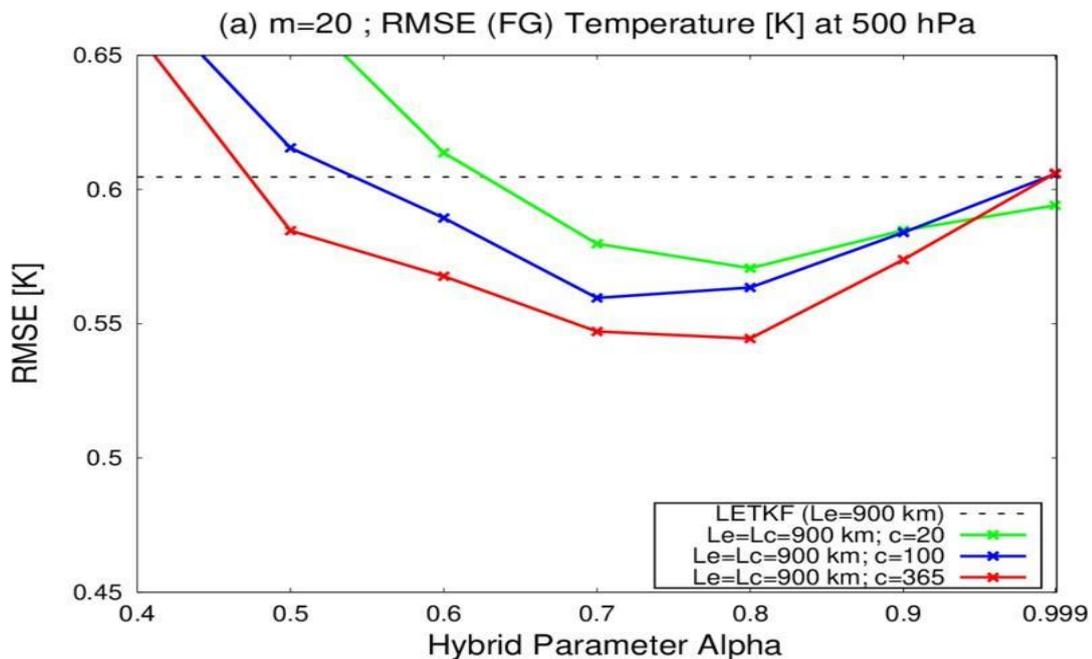


図 B-16: SPEEDY-LETKF を用いて行ったモデル第 4 層の気温予測 RMSE。点線はアンサンブル数 20 の LETKF 実験であり、緑線・青線・赤線はそれぞれ、気候項数を 20、100、365 としたときの Hybrid LETKF 実験を、ハイブリッドパラメータ α の関数として示している。Kotsuki and Bishop (2022) の Figure 7 か

ら引用。

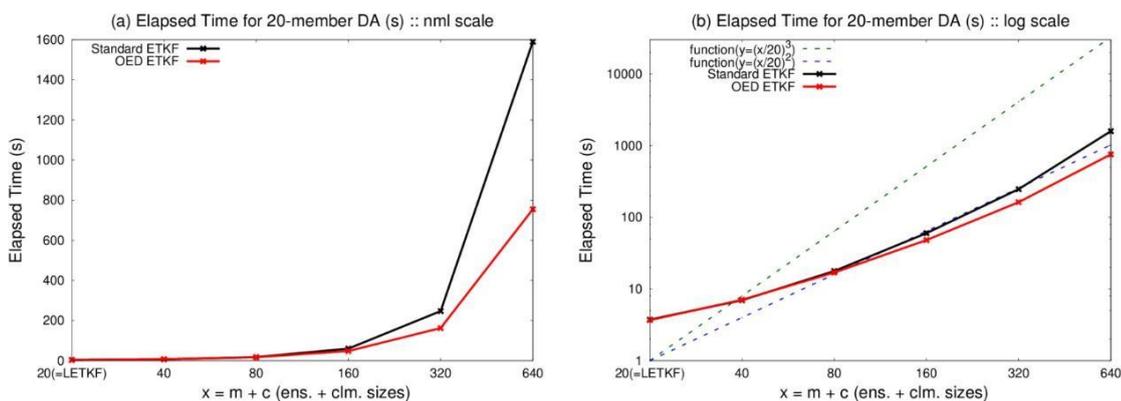


図 B-17: SPEEDY-LETKF を用いて行った、アンサンブル数により異なる 1 回あたりの計算時間の変化。黒線が Hunt et al. (2007) の既存の解放であり、赤線は新しく導入した手法。左右のグラフはそれぞれ、実数スケール、対数スケールの計算時間変化を示す。Kotsuki and Bishop (2022) の Figure 13 から引用。

②-10. 極端水文気象現象の予測に対する不確実性定量化

洪水・浸水を引き起こす極端気象現象は非線形性が強く、決定論的に 1 本のシミュレーションでこれを予測することは困難である。そのため大量のアンサンブルによって予測の不確実性を正確に定量化した確率予測が有望だとされている。しかし、現状のアンサンブル予測は基本的にはシミュレーションの入力としての初期値の不確実性のみを観測データを用いて定量化するにとどまっておき、シミュレーションに用いる気象モデルのパラメタリゼーション選択やモデルパラメータに起因する「シミュレーションに内在する不確実性」は扱われていない。つまり気象モデルそのものは完全に正しいという暗黙の仮定が置かれている。

本研究はスーパーコンピュータ「富岳」による巨大アンサンブル気象計算と機械学習の融合により、シミュレーションに内在する不確実性を定量化して極端気象現象予測の性能改善を目指した。(1) 複数のパラメタリゼーションの重み付け平均としてモデルの時間発展を表現することで本来離散的なパラメタリゼーション選択をパラメータ最適化の問題に帰着させる Blended model、(2) 分散分析の枠組みで大量のパラメータの中からモデルの出力に強い影響を及ぼすパラメータを抽出する感度解析、(3) パラメータに対するモデルの反応を機械学習で置き換えることでパラメータの評価を高速に行う Surrogate modeling、の技術を組み合わせた。これにより、スーパーコンピュータ「富岳」4000 ノードを使用して、24 時間の降水量観測を用いて、その後 48 時間の降水量予測性能を向上させるアンサンブルの生成に成功した。アンサンブルの生成に必要な計算時間は 2 時間程度であり、十分に実時間実行可能な手法の開発に成功した。

図 B-18 は 2015 年関東・東北豪雨を題材とした理想化実験で、気象モデル WRF の 35 個のパラメータに対して提案手法を適用した結果である。前述した感度解析により 35 個から 8 個まで重要なパラメータを絞り込み、その 8 個のパラメータの事後確率分布を、降水量観測を用いたマルコフ連鎖モンテカルロ法で推定した結果である。

マルコフ連鎖モンテカルロ法では本来 10^6 回程度パラメータの評価を繰り返す必要があるが、本研究ではこれを前述した surrogate model によって行っているため、十分現実的な計算時間で図 B-18 のような結果を得ることができる。降水量観測だけでは完全にパラメータを真値の周りに拘束することは難しいものの、お

おむね正確な事後確率分布の推定ができています。

このパラメータの事後確率分布を用いて降水量予測を行い、降水量の予測値を洪水氾濫モデルに入力して河川流量を求めたものが図 B-19b である。一様な事前分布からサンプリングしたシミュレーション結果(図 B-19a)に比べて河川流量の予測精度が改善している。以上の結果はシミュレーション結果を真値とした理想化実験によるものであるが、実観測を用いた実験でも同様の河川流量予測の性能改善を確認することができた。

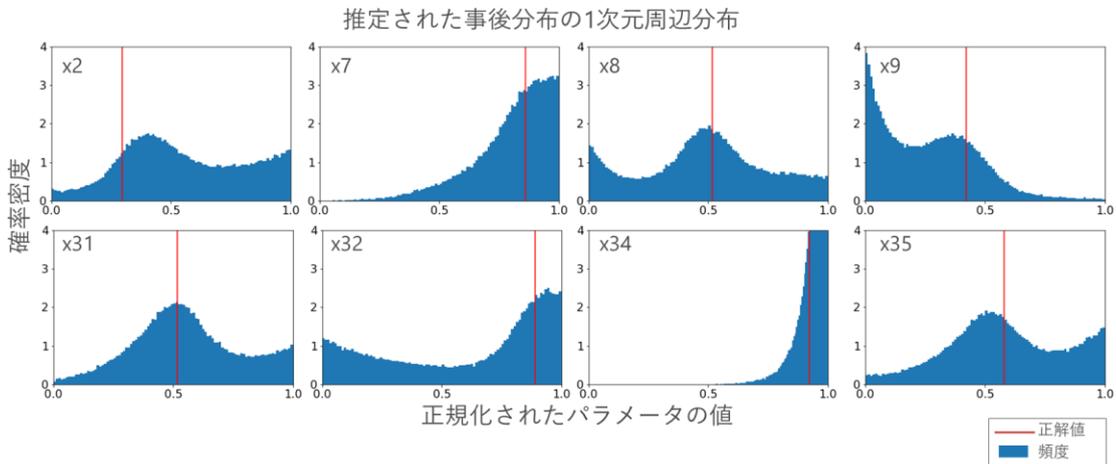


図 B-18: 気象モデル WRF の 8 つのパラメータの事後確率分布の推定結果(青)。赤線はシミュレーションによる正解値。詳しくは本文を参照のこと。

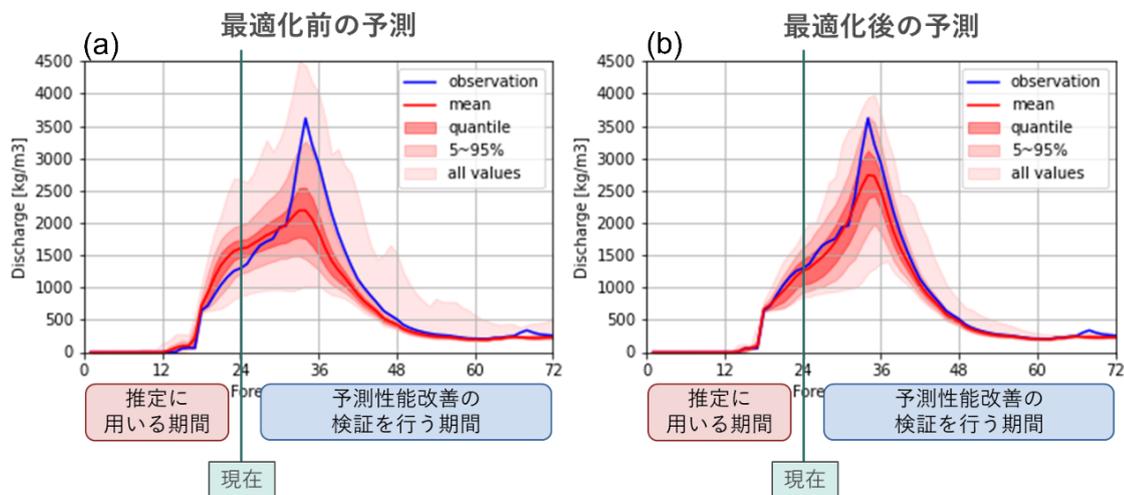


図 B-19: 気象モデル WRF による降水量予測を入力として計算した鬼怒川の河川流量予測結果。(a)モデルパラメータをあらかじめ指定した最大値・最小値の間で拘束した一様分布からサンプリングして予測を行った結果。(b)本研究の手法でモデルパラメータの事後確率分布を求めてそこからサンプリングして予測を行った結果。青線はシミュレーションで作成した正解値。赤線が 500 メンバーのアンサンブル予測の平均値。

②-11. アンサンブルカルマンフィルタを用いた海洋データ同化システムの開発

近年の衛星やアルゴフロートなどの観測網の発展に伴い、水温・塩分・海面高度がより高頻度・高解像度で観測されるようになった。しかし、衛星は雨域を観測できず、アルゴフロートの観測数も全球海洋内部の時空間変動を正確に捉えるほど十分ではない。データ同化はシミュレーションと観測を融合しながら、

欠損値のない精度の高い 3 次元の海洋場を再現できる。

そこで、本研究では衛星・現場観測値をアンサンブルカルマンフィルタで日毎に同化する海洋データ同化システムの開発を行なっている。前年度、感度実験の結果から、relaxation-to-prior perturbations (RTPP; Zhang et al. 2004)と incremental analysis update (IAU; Bloom et al. 1996)を組み合わせることで、力学バランスと解析値の精度の両方が改善されることを実証した。しかし、黒潮続流域の水深 500-1000m の中層に分布する低塩分水の構造がいまだに壊れていることが判明した。前線や中規模渦が分布する黒潮続流域は予報値と観測値の差（イノベーション）が大きく、表現誤差が大きいことが示唆される。大気データ同化システムにおいて全天候赤外放射輝度を同化する際、晴天域と雲域の大きな輝度温度差に起因して、大きなイノベーションが生じることが問題となる。Minamide and Zhang (2017)はその影響を緩和するため、動的に観測誤差を膨張させる手法「adaptive observation error inflation (AOEI)」を提案し、その有効性を示した。そこで、本研究では、海洋データ同化システムに AOEIを実装した AOEI 実験と実装しない CTL 実験の結果を比較し、低塩分水の構造に着目しながら、AOEI の有効性を調べた。

CTL 実験において、黒潮続流域で水温・塩分の解析インクリメントが密度成層を弱めることで、鉛直拡散係数を大きくしていた。そのため、強い塩分の鉛直拡散が生じ、低塩分水の再現性が悪化していた。一方、AOEI 実験では黒潮続流域で観測誤差が膨張したことに伴い、水温・塩分の解析インクリメントが減少した（図 B20-c）。その結果、CTL 実験でみられた悪化メカニズムが抑えられ、低塩分水構造が維持されていた（図 B20-d）。さらに、AOEI 実験では解析値の力学的バランスや水温・塩分・流れ場の精度が CTL 実験より有意に改善していた。

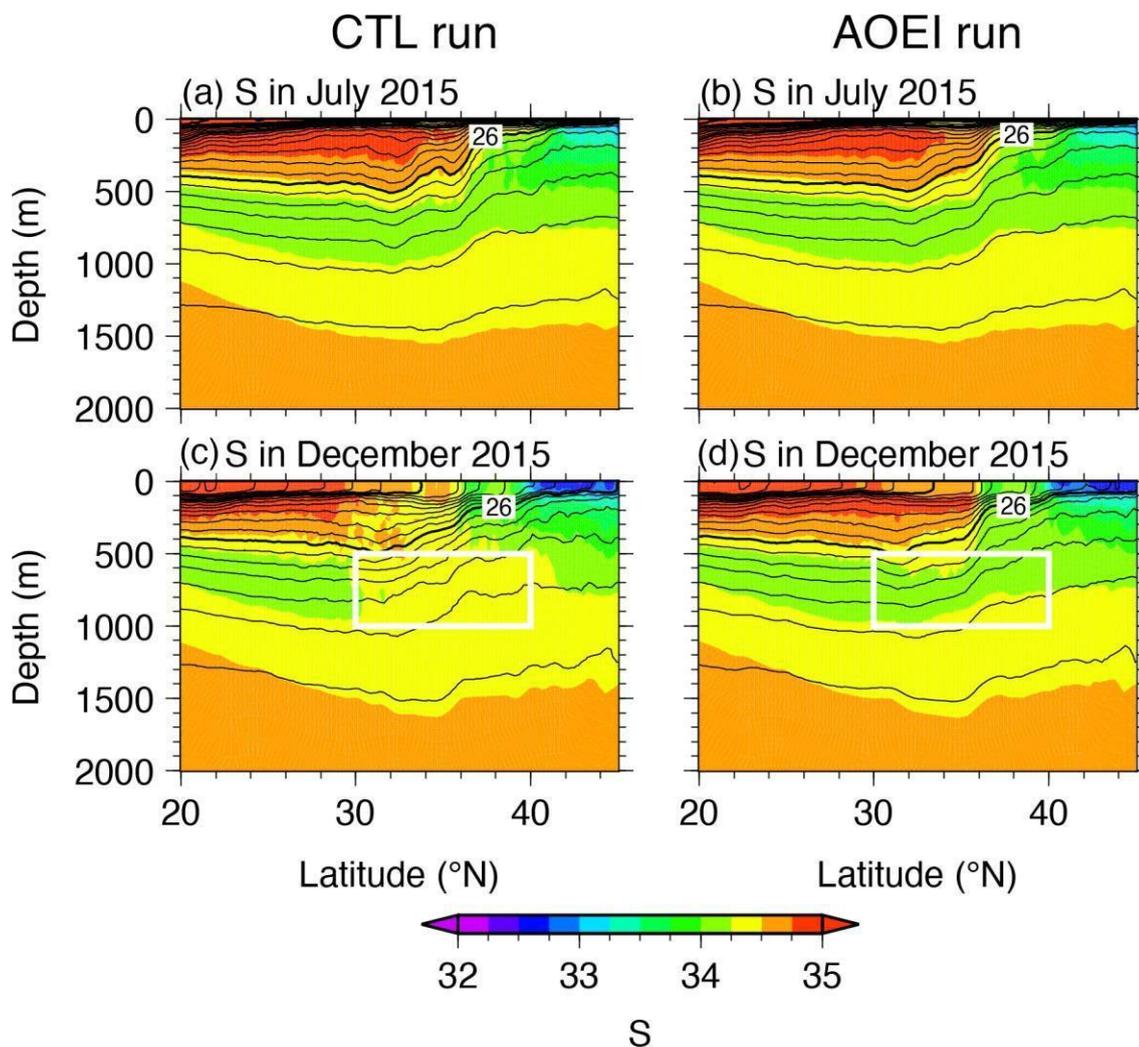


図 B-20: (a) CTL 実験および (b) AOEI 実験の実験開始月 (2015 年 7 月) における 150° E に沿った塩分 (色) とポテンシャル密度 (等値線) の南北断面図。 (c)、(d) それぞれ (a)、(b) と同様、ただし 2015 年 12 月。

参考文献

Bloom, S. C., L. L. Takacs, A. M. da Silva, and D. Ledvina, 1996: Data assimilation using incremental analysis updates. *Mon. Weather Rev.*, **124**, 1256-1271, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<1256:DAUIAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<1256:DAUIAU>2.0.CO;2).

Minamide, M., and F. Zhang, 2017: Adaptive observation error inflation for assimilating all-sky satellite radiance. *Mon. Weather Rev.*, **145**, 1063-1081, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0257.1>.

Zhang, F., C. Snyder, and J. Sun, 2004: Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Mon. Weather Rev.*, **132**, 1238-1253, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1238:IOIEAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1238:IOIEAO>2.0.CO;2).

②-12. A Machine Learning Approach to the Observation Operator for Satellite Radiance Data Assimilation

In data assimilation (DA), the observation operator (OO) is required to convert the model variables to the model equivalent of the observations. Most of the OOs for satellite microwave brightness temperature (BT) from AMSU-A are based on radiative transfer model (RTM). We used machine learning (ML) as OO (ML-OO) to assimilate AMSU-A BT in this study. The DA system comprises Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) and the Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF). The Radiative Transfer for TOVS (RTTOV) is combined with bias correction to assimilate BT (RTTOV-OO). The conventional observations and BT were assimilated for one month using this reference system (Table B-1). The forecast data during this period were paired with the corresponding observations to train several neural network models (NNs) to obtain ML-based OO. The new OO was tested in the same month next year. There are 3 experiments: (1) conventional observations and BT were assimilated using RTTOV-OO (CONV-AMSUA-RTTOV); (2) the same observations were assimilated but using ML-OO (CONV-AMSUA-ML); (3) only conventional observations were assimilated (CONV).

The RMS difference (RMSD) from ERA-interim for temperature and zonal wind were used to evaluate the performance of different OOs. The temperature RMSD in CONV-AMSUA-ML is 2% higher than that in CONV-AMSUA-RTTOV but 4% lower than that in CONV (Figure B-21). Therefore, ML-OO is adequate to assimilate BT although it is slightly worse than RTTOV-OO. Because ML OO treated the biases internally, most of the channels have small biases less than 0.03 K (Figure B-22a) although two channels have larger biases (Figure B-22b), which is a result of the significant changes of the satellite characteristics. If those changes are small, ML-OO doesn't require a separate bias correction procedure so that the DA system design is simplified. A manuscript that summarizes this work is currently in review in JMSJ (Liang et al. 2022).

Table B-1 The experiments for training and testing the machine learning model. Letters A to G indicate the corresponding experiments described in the main text.

	Training experiments		test experiments	
	Jan. 2015 (DA spin-up)	Feb. 2015 (DA cycle)	Jan. 2016 (DA spin-up)	Feb. 2016 (DA cycle)
CONV-AMSUA-RTTOV	A	B	D	E
CONV-AMSUA-ML		build the ML model (C)		F
CONV				G

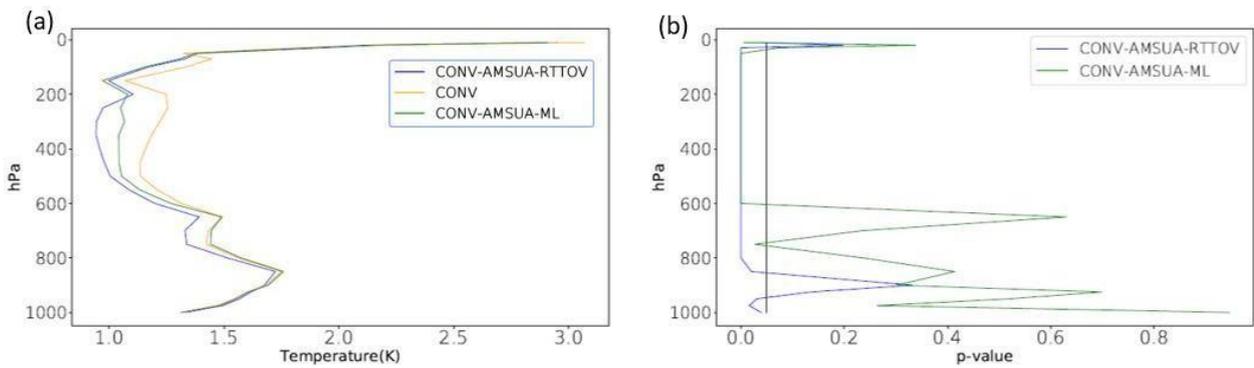


Figure B-21: Evaluating by ERA-interim, the root mean square difference (RMSD) of the (a) temperature (K) from three experiments. The p-values from two t-tests between CONV-AMSUA-RTTOV and CONV, and between CONV-AMSUA-ML and CONV are shown in (b) for temperature. The vertical line indicates the threshold 0.05 of the p-value.

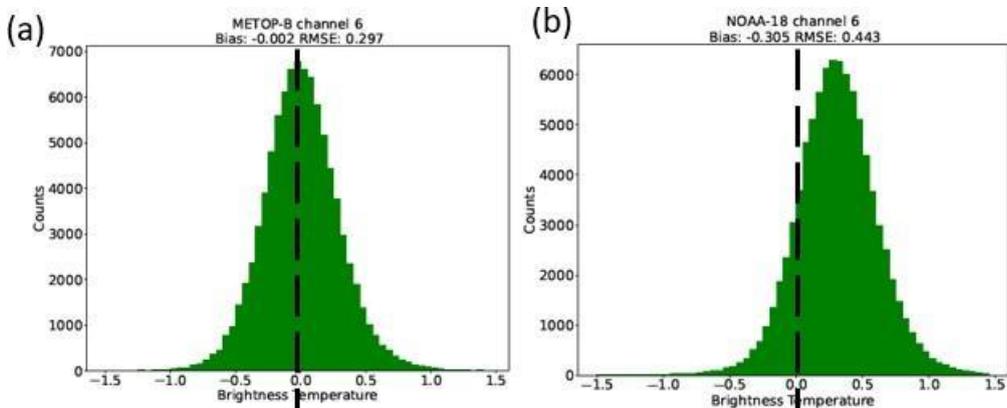


Figure B-22: The histograms of the observations minus model background (OMB) from experiment CONV-AMSUA-ML for (a) METOP-B channel 6 and (b) NOAA-18 channel 6.

②-13. 全球水平解像度 56km・1024 メンバーの NICAM-LETKF を用いた令和 2 年 7 月豪雨の事例実験

2020 年 7 月前半に、活発化した梅雨前線によって九州地方を中心に豪雨となり、熊本県では球磨川の氾濫によって甚大な被害がもたらされた。豪雨による被害軽減のためには、その気象学的な要因を分析し、予測を向上することが不可欠である。しかし、線状降水帯による降水を時空間的に精度良く予測することは非常に難しい。近年の計算機性能の向上によって、より多くのサンプルを用いた確率的予測が可能になってきた。本研究では、「京」の後継機であるスーパーコンピュータ「富岳」を使用して、全球水平解像度 56km・1024メンバーの NICAM-LETKF 実験を実施し、豪雨の確率予測及びアンサンブルを使ったラグ相関解析による要因解析を行った。本研究では、水平解像度 56km のNICAM-LETKF システム (Satoh et al. 2014, Terasaki et al. 2017, 2019) を使用した。雲微物理スキームは、水蒸気を含まない乾燥大気 1 kgあたりに含まれる雲・降水粒子の質量(混合比と呼ぶ)を予測する1 モーメントバルクスキームを用いた。アンサンブル数は 1,024 とし、共分散膨張手法は Relaxation To Prior Spread (RTPS) を用いた ($\alpha = 0.95$)。同化した観測データは、従来型観測、改良型マイクロ波サウンダ (AMSU-A)、マイクロ波水蒸気サウンダ (MHS) 及びクロストラック走査マイクロ波放射計 (ATMS) である。データ同化サイクルは、スピニアップのために令和 2 年 6 月 1 日 0000 UTC から 6 時間毎のデータ同化サイクルを開始し、7 月 7 日 1800 UTC まで行った。アンサンブル予測実験は、6 月 24 日 1200 UTC を初期値とした 10 日予報、29 日 1200 UTC を初期値とした 5 日予報、29 日 1200 UTC を初期値とした 4 日予報を実施した。そして 1 日おきに 7 月 5 日までを初期値とした 1 週間のアンサンブル予測を行った。

図 B-23 は、モデルの各格子点における日積算雨量が 100mm を超えた大雨を予測するアンサンブルメンバーの数の割合を示す。1,024 個のアンサンブルを持つことの有効性を評価するために、1,024 サンプルの中からランダムに少数のサブサンプルを抽出した場合と比較した。32 個や 64 個のサブサンプルでは分布が疎らで比較的高い割合で大雨を予測しているが(図 B-23a, b)、母数となるサンプル数が少ないため、実際に大雨を予測しているアンサンブルメンバーの数は少ない。しかし、サンプル数が増えるにつれて、確率分布は滑らかになり、九州や太平洋沿岸の強い降水域をよく捉えることができた。以上の成果をまとめて、Scientific Online Letters on the Atmosphere に論文を発表した(Terasaki and Miyoshi 2022)

Precipitation probability ($> 100 \text{ mm}$: 2020/07/03/12Z – 2018/07/04/12Z)
 Initial time: 2020/06/29/12Z (FT96 – FT120)

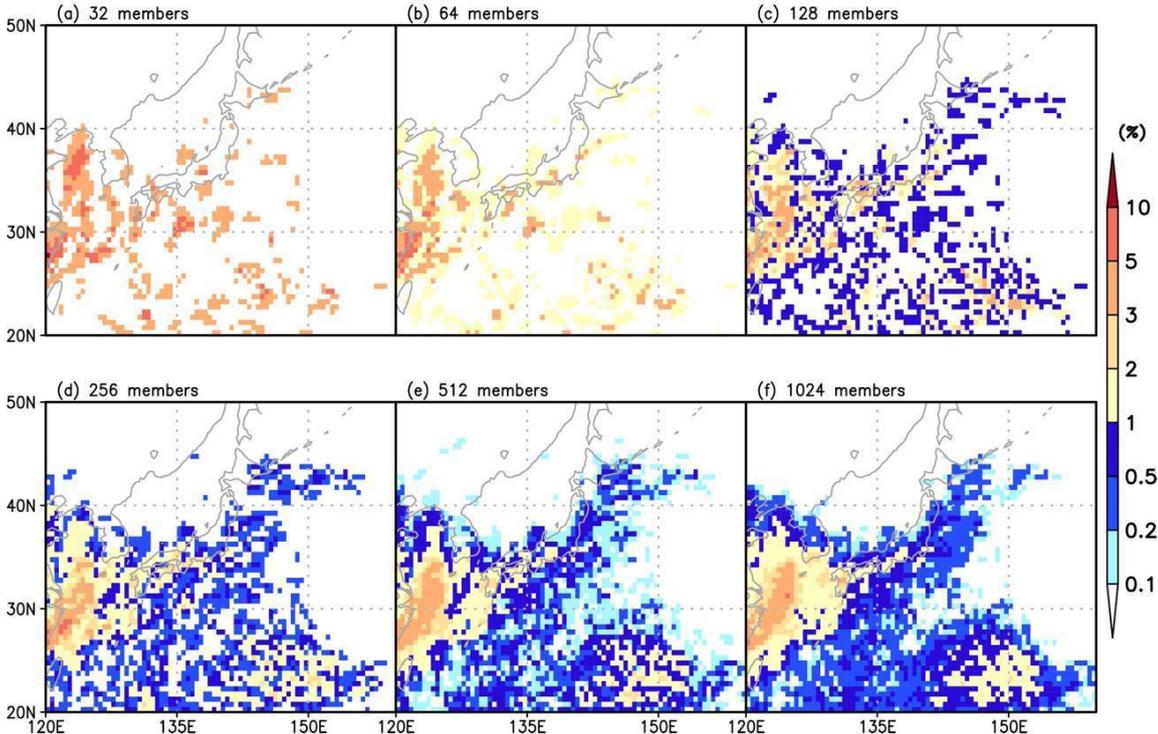


図 B-23: 日降水量が 100mm を超えるアンサンブルベースの確率。(a)～(e)は 32、64、128、256、512 メンバー それぞれ 1024 メンバーからサブサンプリングしたもの、(f) 1024 メンバー。予測開始時刻は 2020 年 6 月 29 日 1200UTC。

参考文献

- Satoh, M., H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A. T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, T. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue, and H. Kubokawa, 2014: The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: Description and development. *Prog. in Earth and Planet. Sci.*, **1**, 18, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Terasaki, K., and T. Miyoshi, 2017: Assimilating Advanced Microwave Sounding Unit-A satellite radiances with the NICAM-LETKF. *J. Meteorol. Soc. J.*, **95**, 433-446, doi:10.2151/jmsj.2017-028.
- Terasaki, K., S. Kotsuki, and T. Miyoshi, 2019: Multi-year analysis using the NICAM-LETKF data assimilation system. *SOLA*, **15**, 41-46. doi:10.2151/sola.2019-009.
- Terasaki, T., and T. Miyoshi, 2022: A 1024-member NICAM-LETKF experiment for the July 2020 heavy rainfall event. *SOLA*, **18A**, 8-14, doi:10.2151/sola.18A-002.

②-14. 深層学習アンサンブルカルマンフィルタ (DL-EnKF) による不完全モデル実験

深層学習をアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) に局所的に組み込んだ DL-EnKF を、現実大気のリモートセンシングデータ同化に適用した場合の知見を得るために、2 スケール Lorenz-96 モデルと、そのうちの小規模現象をパラメタライズした Lorenz-96 モデルを用いて、観測データの分布が一定の場合と時間的にランダムに変動する場合について、データ同化実験を行った。まず、DL-EnKF に組み込むニューラルネットワークを、パラメタライズしたモデルによる数値シミュレーションデータによって学習させた。次に、2 スケールモデルによる数値シミュレーションから作成された観測データを DL-EnKF によって同化し、得られた解析値の

精度を、2 スケールモデルの数値シミュレーションを真値として検証した。比較のために、ニューラルネットワークを 2 スケールモデルの数値シミュレーションデータによって学習させた場合の実験も行った。

実験の結果、データ同化における非線形性が強い場合、DL-EnKF の解析精度は EnKF より優り、精度の改善はニューラルネットワークの入力変数の半径の大きさにあまり依存しないことが確認できた（図 B-24）。また、EnKF に対する DL-EnKF による解析精度の改善の大きさは、パラメタライズしたモデルでニューラルネットワークを学習させても、2 スケールモデルで学習させた場合と大きく変わらないことがわかった。この結果から、DL-EnKF を現実大気に適用する場合、ニューラルネットワークを数値予報モデルによる数値シミュレーションデータで学習させるのが有力な方法といえる。

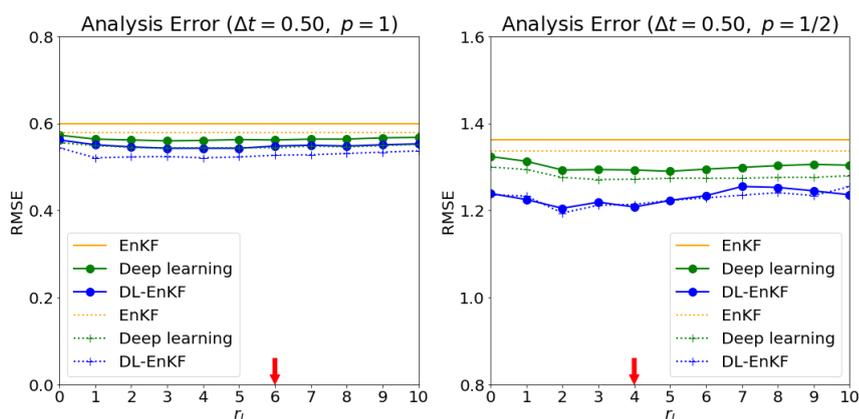


図 B-24: DL-EnKF と EnKF による解析値の RMSE の比較。左: 全格子点に観測データがある場合、右: 観測データの存在確率が 1/2 の場合。実線: パラメタライズしたモデルで学習させた場合、破線: 2 スケールモデルで学習させた場合。橙: EnKF、緑: 深層学習のみ、青: DL-EnKF。横軸はニューラルネットワークの入力半径、矢印は EnKF の共分散局所化半径（単位はともに格子間隔）。観測データの誤差標準偏差は 1、時間間隔は 0.50。

③サブテーマ C: 先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーション

③-1. 大気海洋結合モデルで再現された 2018 年台風第 24 号の眼の中の深い対流雲

2018 年、台風第 24 号に対する航空機観測が行われた。眼への貫通飛行を行った際、雲頂高度が 9 km を超える対流雲が見られた（図 C-1）。このような対流雲は過去に報告されたことがほとんどない。本研究は、眼の中で見られた深い対流雲を大気海洋結合モデルで再現することに成功し（原著論文 Hirano et al. (2022) の Fig. 10 および Fig. 11 参照）、その生成要因を明らかにした。

大気海洋結合モデルの結果を確認したところ、台風の進路や中心気圧の定性的な時間変化、壁雲の構造が再現されていた。また、眼の領域における雲水・雲氷の分布に着目すると、観測で見られた対流雲と同じ特徴を持つ雲が再現されていた。次に、眼の中で見られた対流雲の生成要因を調べた。眼の領域における熱力学的な特徴を調べたところ、対流雲が現れたタイミングで暖気核が弱まり、対流が立つのに好都合な条件となっていることがわかった。また、眼の中の対流雲は、壁雲が外側に移動し、壁雲における対流加

熱が弱まる際に発生していた。この影響を調べるために、眼の中での下降流を診断的に求めたところ、眼の中で対流が起こった際には、下降流やそれに伴う断熱加熱が小さいことがわかった。これらの結果は、台風の影響が弱まり、壁雲が外側に移動したことで、眼の中で対流が立ちやすくなったことを示唆する。

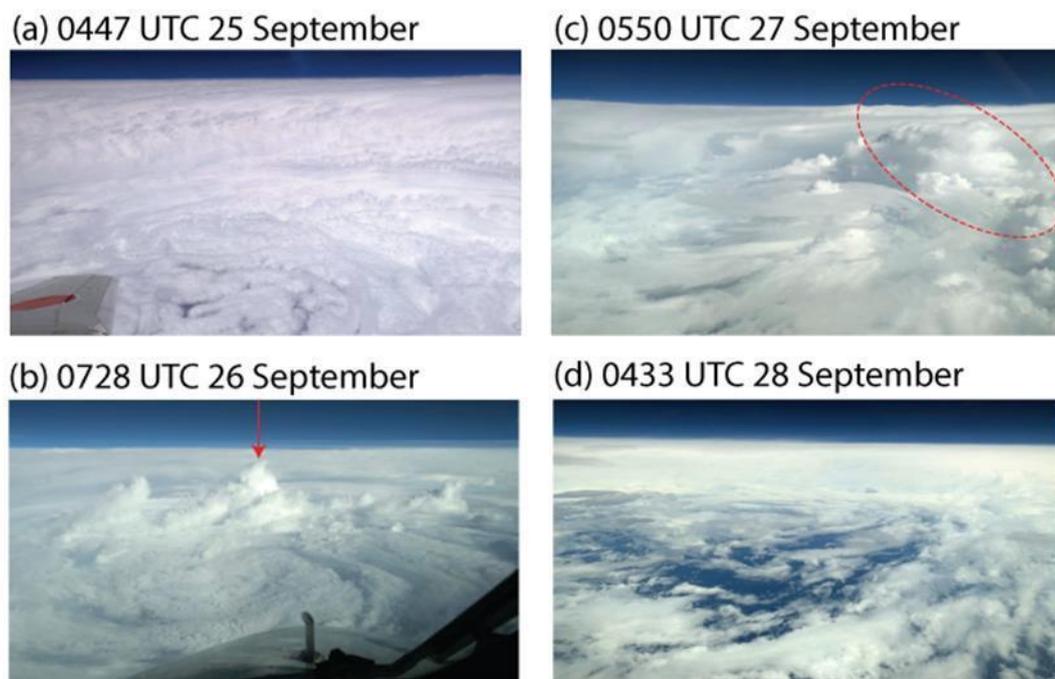


図 C-1：高度 43000 フィートを飛行する航空機から撮影した眼の中の写真 (Hirano et al. 2022)。撮影時刻は各写真の上に示した。9 月 26 日の赤矢印の先や、9 月 27 日の赤破線で囲まれた雲が、対流雲に対応する。

③-2. 晴天乱気流の高解像計算に基づく飛行機の揺動低減方法の考察

乱気流は航空安全の脅威であり、現在でも乱気流に関連した事故は航空事故件数の多くを占めている。乱気流の中でも特に晴天乱気流 (CAT、Clear Air Turbulence) は雲を伴わないため、機上レーダーで事前に存在を知ることが困難である。CAT は風速が急激に変化する領域で誘起される KH (Kelvin-Helmholtz) 不安定性の渦が主な原因とされ、その中でも飛行機と同等のスケールの渦が大きな揺れをもたらすと指摘されている (Sekioka, 1970)。これらは積乱雲など対流雲に伴う気流変動とは異なり、対流雲から離れた場所で発生する、つまり視認が困難なケースが多いという特徴がある。

関東南部では冬季にしばしば CAT が発生することが知られており (遠峰ら、1987、及川ら、2010)、乱気流遭遇報告である PIREP (Pilot Report) が頻繁に記録される。発生高度は 2~4 km であり、羽田・成田離着陸便による交通の密度が高い場所であるため遭遇が多くなる。乱気流により飛行機が揺動すると、機内の状況に応じて目的地変更や着陸やり直し等発生する場合もあり、効率的な運航を阻害する。従って揺動低減に向けた取り組みは急務であり、JAXA や DLR などの研究機関においては、機上 LIDAR を用いたリアルタイム揺動低減システムの開発が行われている。

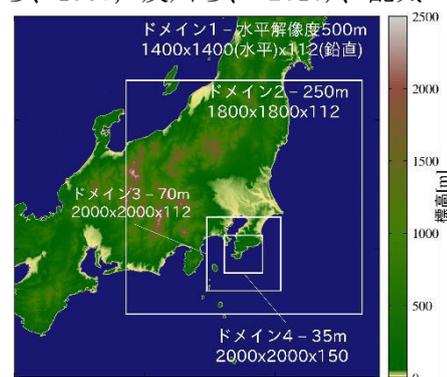


図 C-2 計算領域設定

(Machida et al. 2018, Vrancken et al. 2016)

本研究では、大規模気象シミュレーションを用いて当時の乱気流場を再現し詳細に構造を解析することで、揺れ低減に重要な知見を得ることを目標とする。気象シミュレーションはスーパーコンピュータ「富岳」を用いて行い、35 m 解像度で関東南部の乱気流場を再現した。また、再現した乱気流場に対する飛行機の応答を飛行力学に基づき推定し、結果を当日の旅客機のフライトデータと比較することで全体的な結果の評価を行った。

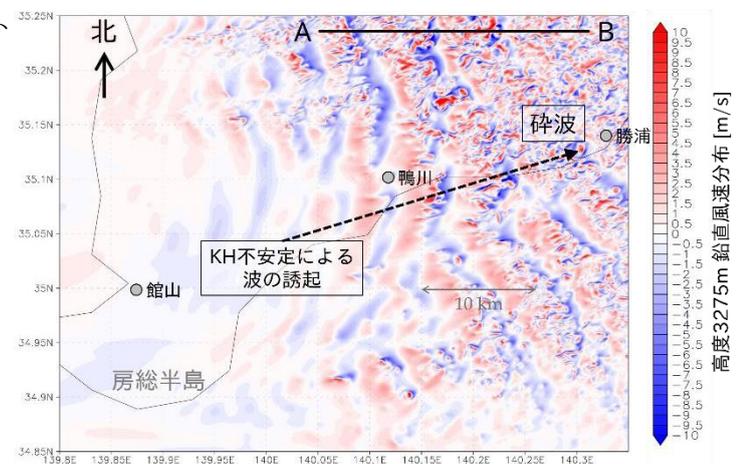
計算対象事例は 2020 年 12 月 30 日 7:00-12:00 UTC に南関東の高度 2-4 km で CAT への遭遇が相次いだ事例である。当日の乱気流再現のため、数値気象計算は気象庁の現業非静力学モデル asuca を用いた計算を行った。図 C-2 に示すように、計算領域は最も広い水平解像度 500 m のドメイン 1 から、関東南部を詳細に解く解像度 35 m のドメイン 4 までの 4 つを設定した。すべてのドメインで、格子スケール乱流渦を直接解く Large Eddy Simulation (LES) とした。計算資源は富岳を使用し、382 ノードを用い計 4 週間を要した。

ドメイン 1 (解像度 500 m、図省略) の計算結果および当日の天気図・観測データ (図省略) から、積雲雲頂での KH 不安定の誘起が CAT 発生の原因であると推察した。関東上空 10 km には 90 m/s で流れるジェット気流が位置し、その下部には高度が下がれば風速が急激に下がる、鉛直シアの大きい領域が高度 2-4 km に位置していた。一方地上付近では局地前線上空に積雲が立ち上がり、雲中の上昇気流により地表付近の遅い空気が上昇した結果この鉛直シアが強化され、積雲の上空である高度 2-4 km で KH 不安定が誘起されていた。気象観測および乱気流報告数統計から同様の事例は 2020 年 12 月～翌年 2 月までの間 5 回発生していたとみられ、冬季の南関東では頻繁に起こる事例として認識されている。

ドメイン 4 (解像度 35 m) では、KH 波だけでなくその碎破による細かい渦までもが再現されていた。図 C-3 に鉛直風速の瞬時場を示した。可視化時刻・位置は乱気流遭遇報告が集中していた 12 月 30 日 10 時 UTC、関東南部高度約 3 km に合わせている。鉛直風速 (赤: 上昇流、青: 下降流) の規則的な KH 不安定波が確認できる。KH 波は西から北東に向かって移流している。波の誘起から碎破に至る過程を確認できる。

図 C-4 に、再現した乱気流場に対する飛行機の応答 (左) と、当日の旅客機のフライトデータ (右) との比較を示した。飛行機の応答は飛行機の重心に関する運動方程式に、乱気流による外力を加えて模擬した。離陸直後の 133 m/s で飛行する B747-100 を想定し、必要な空力性能値は加藤寛一郎氏の教科書 (1982) の手法から推定した。結果として図 C-3 に示すフライト

パス A-B においてドメイン 1 (d01-500m) の気流を入力すると KH 波に対応する揺れが再現された一方、ドメイン 4 (d04-35m) では碎破した渦に対応する大きな揺れが再現され、フライトデータでも高周波の揺れが目立った。飛行機は大きなスケールの渦ではなく、碎破して細分化された渦の影響を大きく受けると確かめ (Sekioka, 1970 の指摘と対応)、関東南部の積雲や KH 波起因の低周波の揺れを前兆とみなすマクロな視点での乱気流遭遇回避方を提案した。しかし、今回はフライトデータ (1 秒) と比べて比



較的長周期の揺れ (4 秒) の再現となってお

図 C-3 ドメイン 4, 12/30 10UTC 高度 3275m 水平断面における鉛直風速の様子

り、今後さらに細かい渦の碎破を再現できる高い解像度の気象計算が必要であると示唆された。

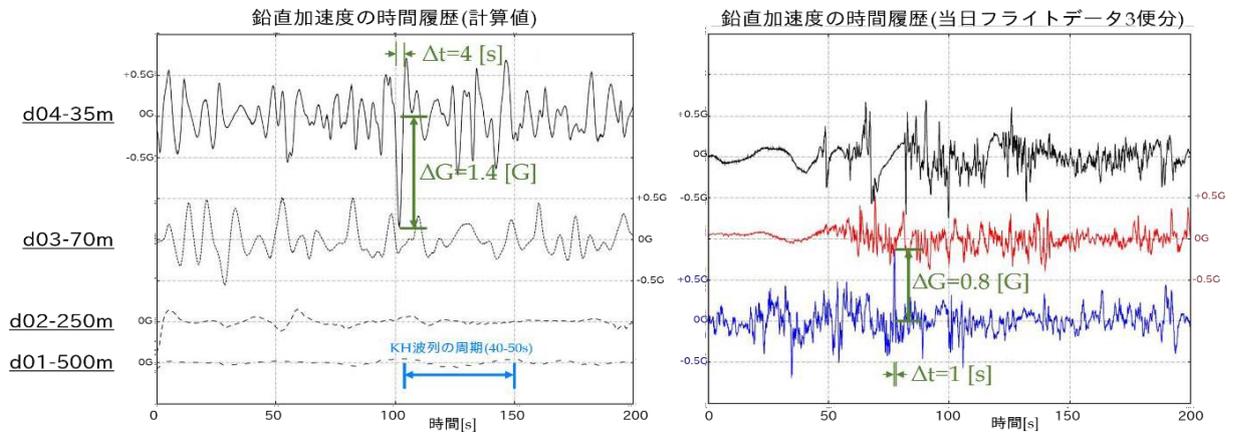


図 C-4 (左)12/30 10UTC の乱気流場から推算した飛行機の揺れ, (右)当日のフライトデータから取り出した揺れ

参考文献

- P. Vrancken, M. Wirth, G. Ehret, B. Witschas, H. Veerman, R. Tump, H. Barny, P. Rondeau, A. Dolfi-Bouteyre, and L. Lombard, 2016: Flight tests of the DELICAT airborne LIDAR system for remote clear air turbulence detection, EPJ Web of Conferences, 119, 14003.
- S. Machida, H. Inokuchi, and N. Matayoshi, 2018: Overview of demonstration project of JAXA onboard turbulence detection system, 19 th Coherent Laser Radar Conference, Okinawa, Japan.
- Sekioka, M, 1970: Application of Kelvin-Helmholtz Instability to Clear Air Turbulence, J. Appl. Meteorol. Climatol., Vol. 9
- 及川ら、2010: 航空機が遭遇する乱気流域の予測計算における計算分解能と予測精度, 天気、Vol. 57.
- 加藤寛一郎、1982: 航空機力学入門、東京大学出版会 .
- 遠峰ら、1987: 晴天乱気流の数値計算, 天気、Vol. 34.

③-3. 雷を直接計算する気象雷モデルの開発と地上観測を用いた高速化と評価 (北海道大学)

豪雨を引き起こす積乱雲に伴って起こる雷は、落雷によって電子機器の故障や破損につながるなど、高度に電子化された現代社会において脅威であり、精度の良い雷の予測が求められている。本年度は、将来的に現業期間で利用することを見据え、気象雷モデル)の高速化を実施した。また、雷を直接計算せずに雷頻度を経験的に診断する手法との比較を通して、気象雷モデルの有効性の評価を行った。

具体的には気象雷モデルで最も計算コストが高いポアソン方程式の求解にガウス・ザイデル前処理を実装することで、計算コストの低減を図った。これにより、気象雷モデルの雷計算の部分の計算コストを約 8 割削減できた。次に、雷を直接計算せずに雷頻度を経験的に診断する手法(Hayashi et al. 2021)と、Sato et al. (2022)として出版されている気象雷モデル (図 C-5, a)、及び LIDEN の結果 (図 C-5, b) とを比較したところ、雷を直接計算しない手法では雷頻度を大幅に過大評価することが明らかになり (図 C-5, c)、気象雷モデルによる雷頻度の予測が有効であることが明らかになった。

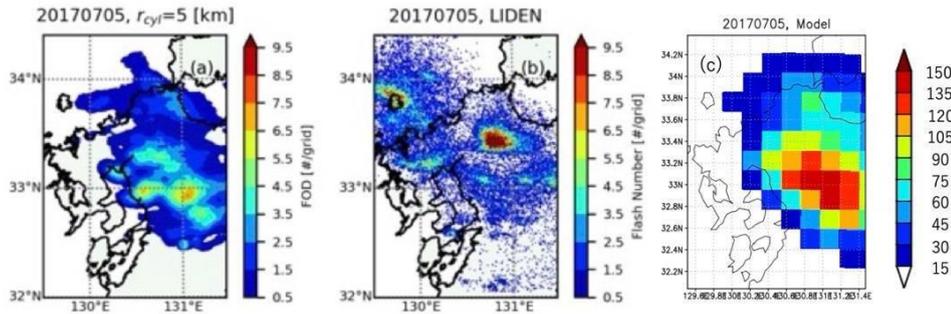


図 C-5 : (a) 気象雷モデルによって計算された雷頻度と (b) LIDEN によって観測された雷頻度の分布、および(c) 雷を直接計算しない数値モデルの結果から見積もった雷頻度。(a)と(b)および(c)ではカラーバーの範囲が異なるので注意。(a), (b)は Sato et al. (2022)より引用

参考文献

Hayashi, S., A. Umehara, N. Nagumo, and T. Ushio, (2021), The relationship between lightning flash rate and ice-related volume derived from dual-polarization radar, *Atmos. Res.* **248**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105166

Sato, Y., S. Hayashi, and A. Hashimoto, (2022), Difference in the lightning frequency between the July 2018 heavy rainfall event over central Japan and the 2017 northern Kyushu heavy rainfall event in Japan, *Atmos. Sci. Lett.*, **23**(1), doi: 10.1002/asl.1067

③-4. 台風に伴う北向き非地衡風の PRE へのインパクト -雲解像モデル実験-

台風が日本の南海上にある時、本土で大雨が降ることがあり、台風によって水蒸気が日本の上空に運ばれ前線を刺激する、という説明がされる。このような台風による遠隔降水の強化は海外でも知られており、‘PRE’ と呼ばれ、近年の研究では転向する台風の前面での北向きの深い水蒸気輸送に関係していると報告されている。Saito (2019)は、2009 年第 18 号台風の接近時に西日本で観測された等高度線を横切る顕著な北向きの非地衡風について、高層観測データと水平格子間隔 10km の気象庁非静力学モデル(NHM)による再現実験で調べ、水平風加速度成分による力学的成因で非地衡風が説明できることを示した。また Saito and Matsunobu (2020)は、台風に伴う非地衡風による北向き水蒸気フラックスについて解析し、Saito (2019)の実験において日本の南岸域の中上層で非地衡風による水蒸気輸送に相当する水蒸気を削った場合に日本付近の降水がどの程度減るかを感度実験で調べ、実験開始後 1-6 時間後の西日本の降水量が大きく減少することを示した。ここでは、Saito and Matsunobu (2020)で示された中上層の加湿による降水量増大のメカニズムについてより詳しく調べるために、水平格子間隔 2km の雲解像モデルによる実験を行った。

Saito and Matsunobu (2020)の実験に基づき、2009 年 10 月 6 日 18UTC のメソ解析を初期値とする水平解像度 10km の NHM の 6 時間予報値 (10 月 7 日 00UTC) に対して、日本の南岸域(130-137 E, 30-33 N)で平均した各高度の北向き水蒸気フラックスの鉛直プロファイルを求め、北向き非地衡風が正となる 3km よりも上層の水蒸気を非地衡風の寄与分だけ減らして、降水量がどう変わるかを調べた。この時刻を初期値として、水平格子間隔 2km の雲解像モデルへのネスティングを行った実験を CNTL、水蒸気改変実験を TEST とした。図 C-6 に 10 月 7 日 00UTC (FT=0)~02UTC (FT=2)における $z^*=9.05\text{km}$ の水平風と水蒸気量混合比の TEST-CNTLの差分(g/Kg)を示す。水蒸気を減らした領域が北に移流して西日本上空に到達している。

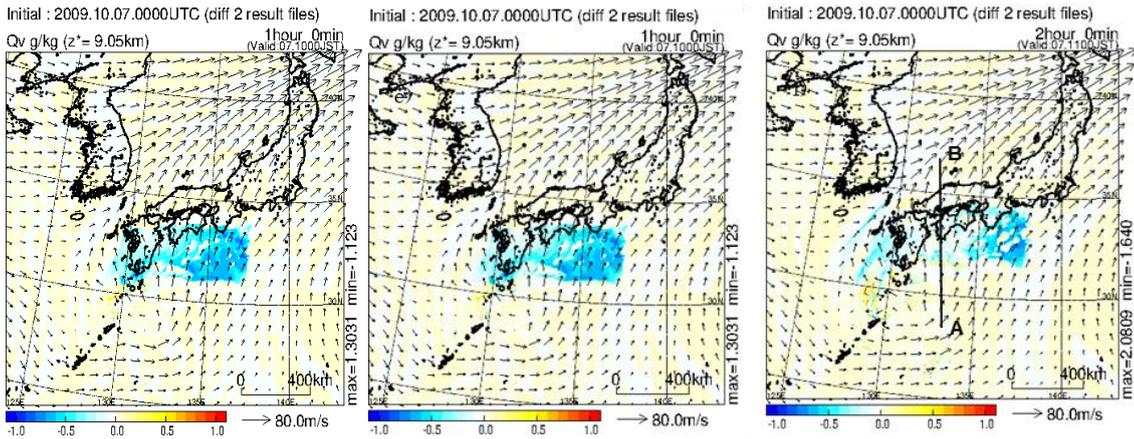


図 C-6 10 月 7 日 00UTC (FT=0) ~02UTC (FT=2) における $z^*=9.05\text{km}$ の水平風と水蒸気量混合比の TEST-CNTL の差分(g/Kg)。Saito et al. (2022) より。

図 C-7 は、FT=3 の前 1 時間の標準実験と改変実験の降水量とその差、および西日本(130-137 E, 31-34N)域で平均した 1 時間降水強度の時間変化である。西日本の降水が FT=3 では領域平均で約 30%減少している。この時間の 132.5E の南北鉛直断面での雪と雨水の混合比の差分を図 C-8 に示す。西日本上空での雪の減少がその下での降水を減らしている。対流セルの高さや鉛直流の大きさ、湿潤絶対不安定層 (MAUL) 域の厚みにも違いが見られた (図略)。

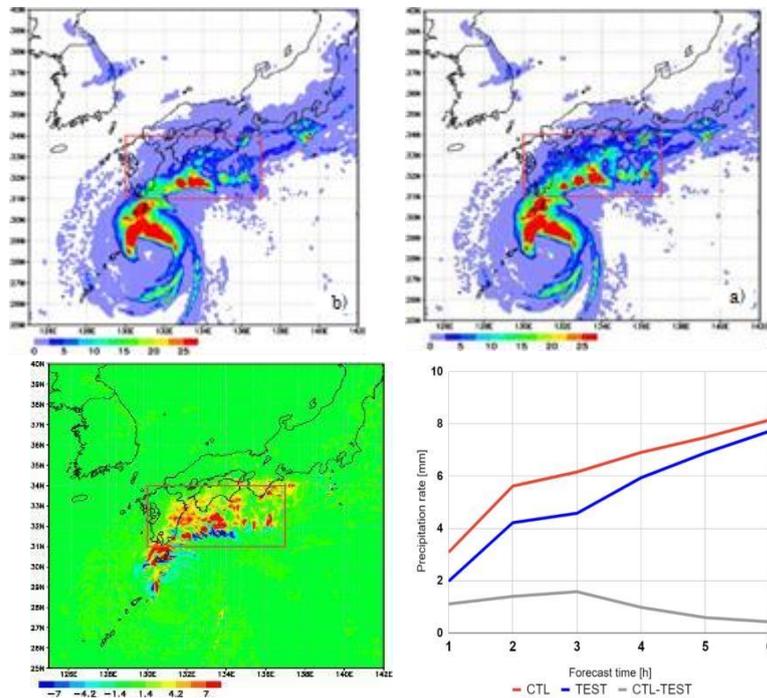


図 C-7 a) 10 月 7 日 03UTC の 2kmNHM の CNTL による 1 時間降水量 (FT=2-3) b) a) と同じだが TEST によるもの。c) 差分 (CNTL-TEST) d) 西日本 (赤枠; $130-137^{\circ}\text{E}$, $31-34^{\circ}\text{N}$) で平均した CNTL (赤) と TEST (青) と差 (グレー) の時間降水量の比較。

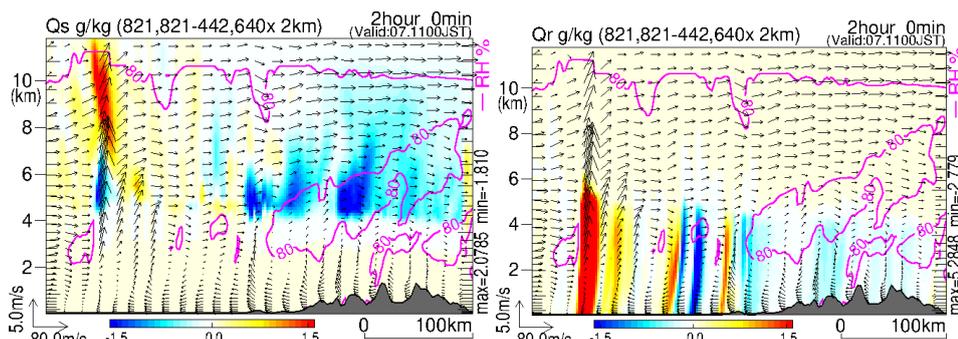


図 C-8 10 月 7 日 02 UTC (FT=2) の 132.5° E に沿った雪 (Qs; 左) と雨 (Qr; 右) の TEST-CNTL の差分 (シェード) と TEST の相対湿度 (コンター) の鉛直断面図。(図 A-1 の A-B 線中央の領域(400km)を拡大。

参考文献

- Saito, K., 2019: On the northward ageostrophic winds associated with a tropical cyclone. SOLA, 15, 222-227.
- Saito, K. and T. Matsunobu, 2020, Northward moisture transport associated with a tropical cyclone and its impact on PRE. SOLA, 16, 198-205.
- Saito, K., T. Matsunobu, and T. Oizumi, 2022: Effect of upper-air moistening by northward ageostrophic winds associated with a tropical cyclone on the PRE enhancement. SOLA, 18, 81-87.

③-5. 台風全域・発達全期間 LES

京や「富岳」の高い計算能力を活かし、台風の大規模な LES を実施している(Ito et al., 2017)。気象庁非静力学モデル(JMA-NHM) を利用し、台風全域をカバーするような 2000km×2000km の計算領域を確保しながら、水平解像度を 100m としている。水平一様な環境において、側面境界は二重周期とした理想化した計算設定とした。京で行った LES においては、最大風速や最低気圧は大きく変化しなかったものの、大気下層に微細構造(ロール構造)が表現されるようになった。この微細構造は台風の中心からの距離に応じて 3 種類あった。最も外側のロール構造は観測でみられてきたものと合致する。一方、台風の中心付近には詳細な観測がなく実態がほとんど知られていなかった。中心付近の 2 種類のロール構造はこの LES ではじめてみられたロール構造であった。ロール構造の下降流に伴い、台風中心付近では特に風速変動が大きくなっていった。また上空の壁雲の内部にも特徴的な構造がみられた。

「富岳」では、上述の LES の 4 時間の時間積分の所要時間が 20 時間程度となっており、京コンピュータと同一のノード数を用いた場合、約 8 倍のスピードで実行できた。京で行った計算では、予め弱い渦を中心に配置した初期値から、水平解像度 2km の計算で 120 時間積分し、台風を発達させ、成熟した台風の計算結果を内挿した初期値から、LES を 10 時間積分した。「富岳」では、ジョブ自体の高速化とともに、ジョブの実行のための待ち時間が大幅に短縮されている。京では 5 年かかる見込みであった発達の全期間を含めた LES を今年度完了することができた。

このように「富岳」で実現した台風全域・発達全期間 LES の計算結果を、同一の計算条件で水平解像度が粗い Ito et al. (2017) の結果と比較した(図 C-9)。発達のペースは、両者でよく似ている。定常に達した後の強度は、水平解像度 2km のアンサンブル計算の弱いメンバーとほぼ同一であった。また外側の半径にわたって微細構造が存在することが、今回「富岳」で行った計算結果の特徴であった。

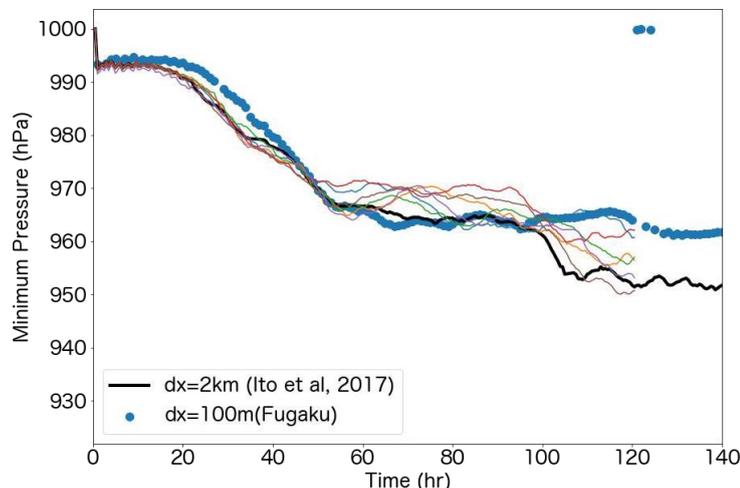


図 C-9 最低気圧の時系列の比較。青点は今回計算した全期間 LES、黒点と細線は Ito et al. (2017) で準備ランとそのアンサンブル。

参考文献

Ito, J., Oizumi, T. and Niino, H, 2017: Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones. *Sci. Rep.*, **7**, 3798.

③-6. 2019 年台風 19 号の強風再現に着目した NHM ダウンスケーリング実験

近年、台風が強い勢力を保持して日本列島に上陸する事例が増加しており、今後も温暖化によりその傾向がより顕著になることが予想されている。市街地では現行の耐風設計基準を越える強風が発生することが考えられる。その時の安全性に関する検証や被害推定においては、実際の極端気象の気流特性を再現した都市・建築スケールのシミュレーションの実施が有効であると考えられ、実気象場の構造に基づいて生成される高周波数を含む風速変動の再現が必要である。

本研究では、東京や横浜で記録的な最大瞬間風速を記録した 2019 年台風 19 号を対象に、NHM による高解像度ダウンスケーリング実験を実施した。最外領域の初期・境界条件には気象庁メソ客観解析を用い、図 C-10 に示すような解像度 1 km、250 m、50 m の 3 領域を設定した。

図 C-11 に、最内領域での東京都心周辺の地上 30 m、146 m における瞬間風速場を示す。地上 146 m の可視化図からは台風の主流方向に沿った 2、3 km 程度の幅の帯状の強風構造の中に曲線的な細かい風速変動が重層する構造が再現された。地上 30 m ではより微細な乱れが生成した。東京管区気象台の風速観測点に対応する数値解析の時系列データから、気象場に基づいて周期が 1 分未満の風速変動が再現され、22%程度の乱流強度が得られたことを確認した。一方で、実現現象の風速との対応には課題が見られた。上陸位置は実況では伊豆半島であるのに対し、解析では伊豆半島と御前崎の間の湾内を進んで上陸し、40-50km 程度西寄りの経路をとって東京へ最接近した。ピーク時の実況の風速は平均風速 16.8 m/s、最大瞬間風速 41.5 m/s であったが、解析での平均風速は 23 m/s 程度であり実現現象より大きかった一方、最大瞬間風速は 33 m/s にと

どまった。実現象の再現性の向上と被災リスク推定の定量性を実現するためには、アンサンブル解析データの活用し、経路や台風構造の差異に対する不確実性の考慮、気象モデルにおける地表の境界条件の再現性を補うための工学的な LES(ラージ・エディ・シミュレーション)との連成解析を行う必要性が示唆された。

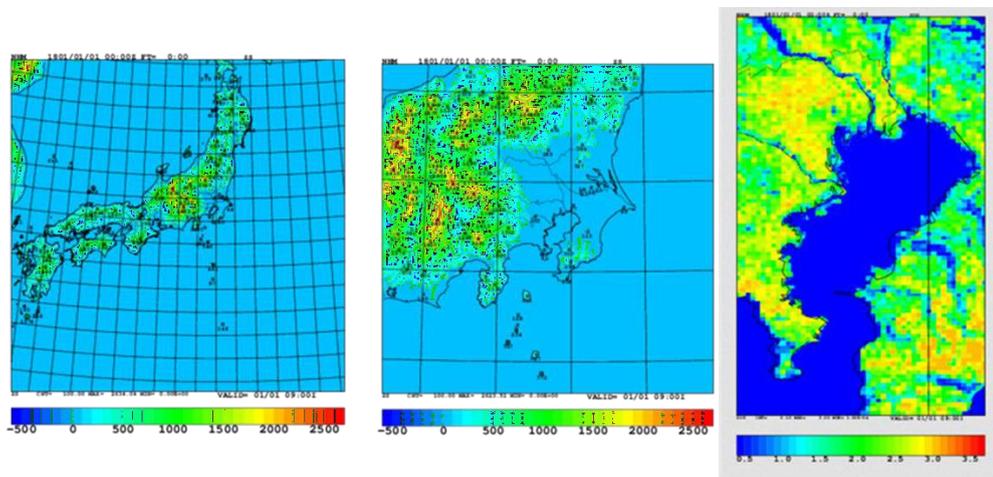


図 C-10 計算領域。(左から順に解像度 1km、250m、50m の領域である。)

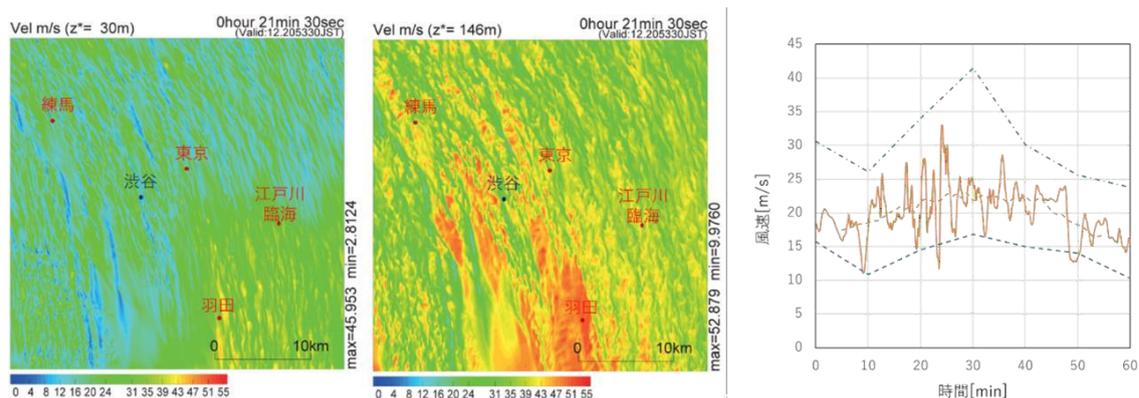


図 C-11 東京最接近時の最内領域において再現された瞬間の風速場の可視化(地上 30 m、146 m)および東京管区気象台観測点(地上 35 m)位置における解析による平均風速と瞬間風速の時刻歴。(平均と瞬間風速はそれぞれ橙破線、橙実線で示した。また実測による平均風速と最大瞬間風速を解析のピークに合わせてそれぞれ青破線と青一点鎖線で示した。)

③-7. 2019 年台風 19 号アンサンブル解析結果に基づく強風発生のばらつき推定

アンサンブル解析により求められた確率情報に基づく台風時の強風解析として、本年度はアンサンブル変分同化手法(EnVar)を用いたNHM解析により得られた2019年台風19号の1000メンバーの結果(解像度5km)から、解析対象の東京都心における風速が大きいケースを防災上特に重要な「極大ケース」として抽出し、「極大ケース」の上位3メンバーのダウンスケーリング解析を解像度1kmまで実施し、メンバーの特性を確認した。

図C-12に、1時間ごとの瞬時値データから分析したEnVar1000メンバーの東京管区気象台の観測点位置(地上10m)での最大風速の分布を示す。14.5m/sから7m/sの範囲で分布し、上位3メンバーは14m/sを超過した。経路は各メンバーで変動が比較的に見られ、実際の上陸地点である伊豆半島付近を中心

に、御前崎付近から房総島半島付近までの範囲で変動する様子が確認された。

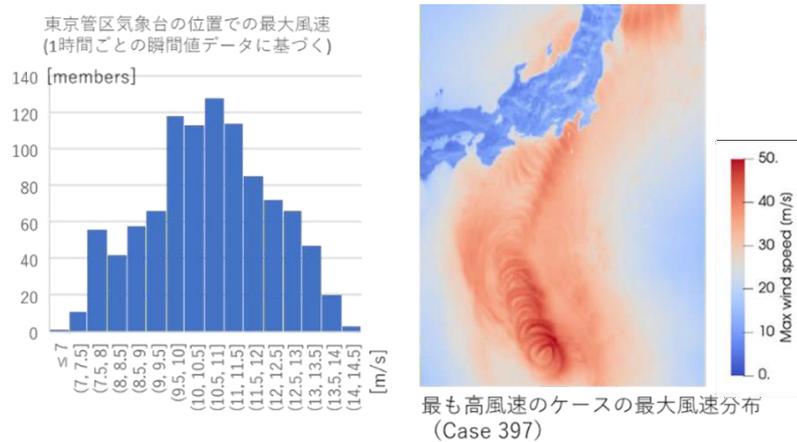


図 C-12 EnVar による 1000 メンバーの東京管区気象台の位置における最大風速の分布

図 C-13 に、上位 3 メンバーの上陸時 (2019 年 10 月 12 日 19:00 JST) と東京最接近時 (21:00) における降水、気圧、風速の解析結果を示す。抽出したケースは、①-1 で記述した確定論的解析に比べるといづれも伊豆半島において上陸し、その後東京西部を通過する、非常に似通った経路を取っていた。また東京最接近時刻における領域内の最大風速は各ケースとも①-1 のケースより 5-3 m/s 高く、また最小気圧は 4-5hPa 程度低かった。今回の極大ケースの選定方法により、類似の性質を持つ強風のケースを複数抽出することができたことが推察された。

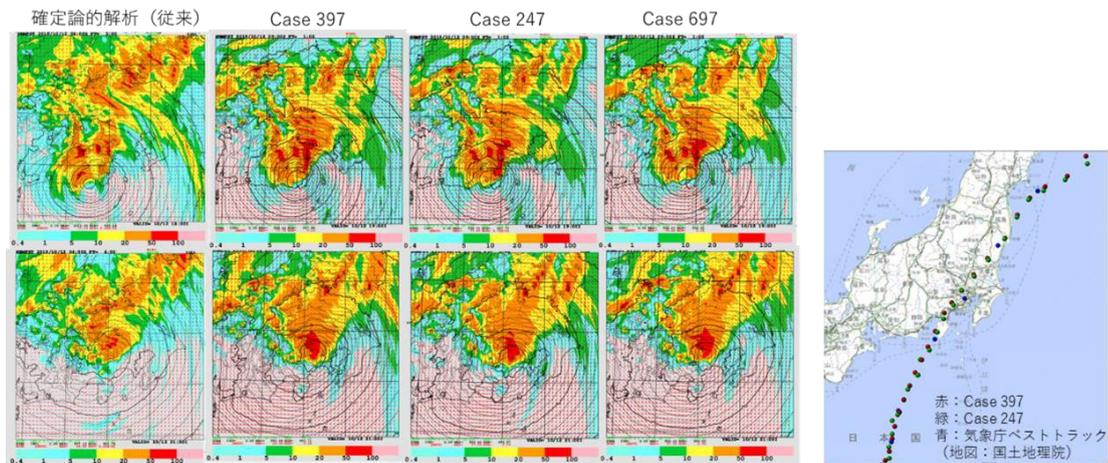


図 C-13 「極大ケース」上位 3 メンバーの上陸時・東京最接近時の降水・気圧・風速分布および経路図。

③-8. つくば竜巻の経路に関するアンサンブル解析

実市街地における竜巻の地表付近の渦挙動は、地形や建物等との干渉を受けることから極めて複雑であり、不確実性が強い。したがって、突風や竜巻の負圧による被害の推定には、物理現象論的な分析に加え、アンサンブル解析によりその確率的性質を明らかにすることが重要である。本年度は、その第一段階として初期条件に変化を与えることとし、2012 年 5 月 6 日つくば竜巻の構造を北条地区の実際の被害経路に導

入して実施した既報の再現解析をもとに、竜巻渦のスケールに比べてわずかな初期位置のずれを導入した解析を 3 ケース追加実施し、風速と圧力分布の高解像度(61cm、0.2 秒間隔)のデータベースを作成し、最大瞬間風速の軌跡に基づいた強風の分析を行った。

図 C-14 に、初期位置を 3m ずつずらした竜巻の解析 4 ケースの屋根高さ程度の断面における最大瞬間風速(3 秒平均)の分布を示す。

今回実施した各ケースでは竜巻本体の渦の経路にほとんど差異は生じなかった。また、青破線のように、複数のケースの同じ位置で、経路の左右両側に斜め後方から経路中心へ伸びた、周囲より顕著に強い強風を経験したことを示す筋状の領域が存在することが確認された。一方で、赤円内の領域で顕著のように、建物スケールで見た場合の強風の広がり方は各ケースで比較的異なっている。より詳細な非定常解析による渦構造や速度場の分析の必要性が明らかになるとともに、アンサンブル解析により発生しやすい被害を抽出できる可能性が示唆された。

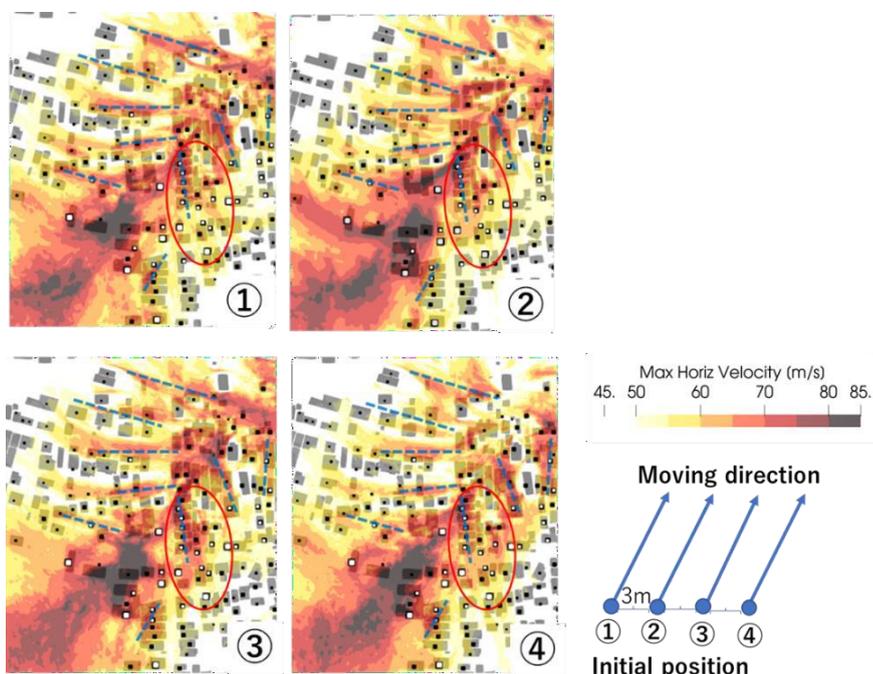


図 C-14 つくば竜巻の再現解析にわずかな初期位置のずれを導入した解析により形成された最大瞬間風速(3 秒平均)の分布。

③-9. 2018 年猛暑日における東京都市域での弱風・温熱場予測

近年異常気象と都市化(ヒートアイランド)による都市部での気温の上昇が進んでおり、2018 年 7 月には 1 か月の熱中症搬送者数、死亡者数としては 2008 年からの調査開始以降過去最高となるなど、猛暑のリスクが上昇している。こうした猛暑について、猛暑時の気温の変動や気象場の微細構造が市街地内の気温のピーク値や暑熱リスクに及ぼす影響は明らかにされていない。本年度は、東京都市域での弱風・温熱場予測について、最小空間解像度 60m での高解像度での領域気象モデル解析により、東京都市域での高解像度被害推定を行った。領域気象モデルの解析については WRF (Version 3.7.1) を用いて実施し、関東地方で高温が観測された 2018 年 7 月 22 日 21 時から 24 日 0 時 (JST) までの 27 時間とした 4 Domain の解析である。Domain1

~2 では WRF、Domain3~4 では WRF-LES を用いた。

図 C-15 に東京（地上高さ 35m）、青梅（地上高さ 10m）、熊谷（地上高さ 17m）の各地点における温度、風速、風向の時系列データを示す。最高温度とその到達時刻に着目すると東京では 13 時 30 分に 38.5°C、WRF では 13 時 57 分に 38.0°C で、最高温度に到達した時刻に遅れがあるものの、WRF によって得られた最高気温は観測と非常に近い値が得られている。また、風向の変化に着目すると、WRF、観測ともに 13 時、14 時過ぎから、風向が北から南に切り替わっており、WRF によって得られた解においても海風の侵入に伴う風向の変化が再現されていると考えられる。以上より、午前中は北風となっており、13 時頃に最高気温に到達したあと、強い南風に切り替わり気温が低下する変化が WRF でも再現されていることが確認された。

一方で、青梅、熊谷においても、WRF の解析結果では、13 時までと 18 時以降の風向の変化、12 時～15 時ごろの高温の発生が再現されているが、風向が変化する時刻が 2～3 時間程度ずれており、最高気温についても 2°C 程度過小になっている。この気温と風向の観測値との差異については初期値の海水面温度や地形データの解像度によって、海風の侵入時間帯や経路に差異が生じ、WRF では観測よりも海風の侵入が遅れたためだと考えられる。以上より、内陸部の青梅、熊谷での気温・風向の再現性について課題はあるものの、観測値との比較検証の結果、WRF によって得られた解が、東京管区气象台や東京都都市域における高温発生状況を再現していることが確認された。

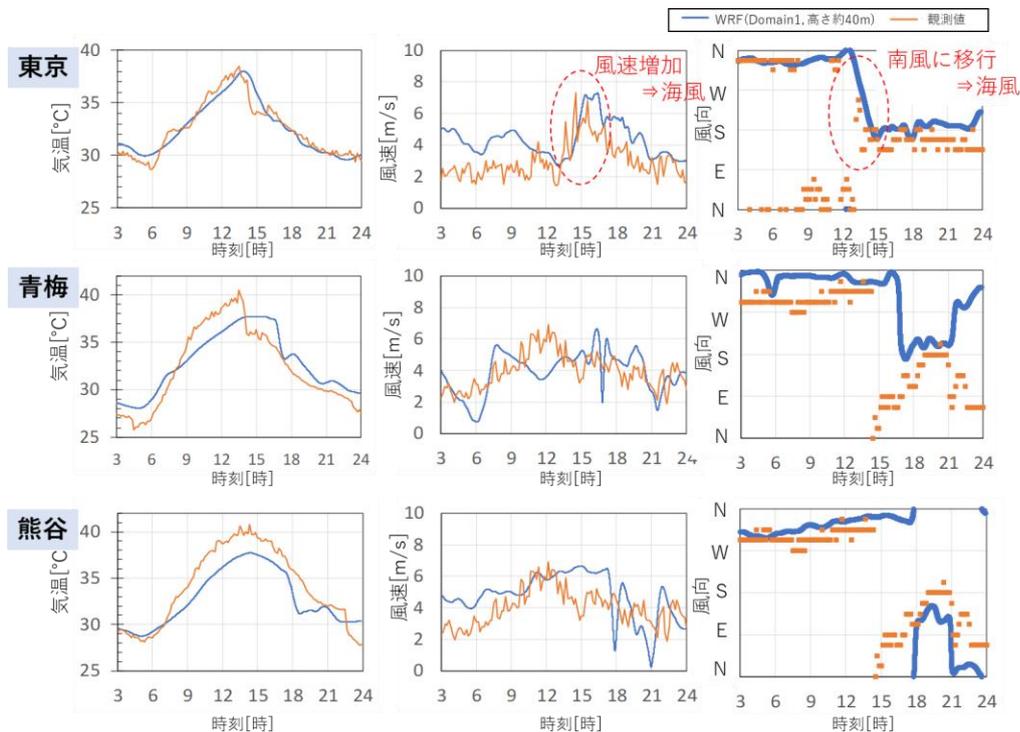


図 C-15 猛暑時（2018 年 7 月 23 日）の東京、青梅、熊谷における高温発生に関する検証参考文献

Kawaguchi, M., Tamura, T., and Mashiko, W., 2020: A numerical investigation of building damage

during the 6 May 2012 Tsukuba tornado using hybrid meteorological model/engineering LES method. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 204, 104254.

川口真晴、田村哲郎、台風下の実市街地における強風・風圧のピーク特性に関する LES 解析、第 35 回数値流体シンポジウム、E08-1、オンライン、2021 年 12 月。

新井舞子、河合英徳、田村哲郎、2018 年猛暑日における東京都市域での弱風・温熱場予測に関する研究、第 35 回数値流体シンポジウム、E12-3、オンライン、2021 年 12 月

2-2-2. テーマ 2 : 全球スケール予測

(1) 成果概要

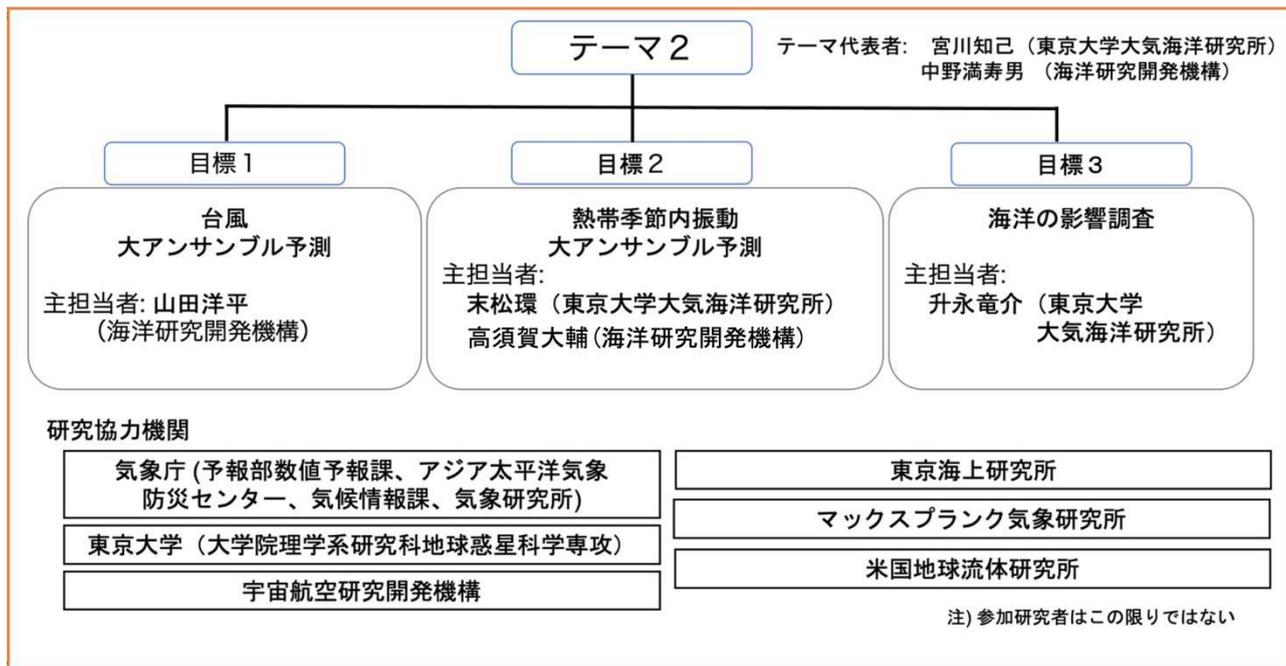
2020 年度の結果を踏まえ、台風および季節内変動について、高解像度化(水平 7km および 3.5km)した非静力学正二十面体格子大気モデル NICAM を用いて 100 メンバーのアンサンブル実験を実施し、再現性能とその解像度依存性について確認した(詳細①)。また、NICAM(水平 14km)を用いて 10 年分のモデル台風統計情報をタイムスライスアンサンブル実験により取得した(詳細②)。NICAM(水平 14km)内における季節内振動の発達特性について 2000 メンバーのアンサンブル実験により調査した(詳細③)。海洋モデルと結合した NICAM(水平14km)のアンサンブル実験により季節スケールでの海面水温誤差傾向の統計データを取得し、Flux 調整により誤差拡大を抑制しつつ季節スケールの予測実験を行う手法の開発を行った(詳細④)。これらの結果から得られた情報について気象庁との意見交換を行った。特に、今回NICAMで予測した台風発生に重要な要素であった、偏東風波動と呼ばれる太平洋熱帯域によく見られる擾乱に伴って生じる初期渦、いわゆる「台風の卵」が、現在の気象庁の手法では十分に捕捉されていないことが今後の予報改善における課題として挙げられた。また気象庁より、日本付近の黒潮とその続流域を適切に表現するのに必要な解像度が、季節によって変わる海洋混合層の厚さに影響されている可能性について確認して欲しいとの要望があった。

(2) 実施体制

テーマ 2 では図2-1 に示す研究体制のもとで、全球での週～季節スケールの極端現象・台風予測実現に向け、

- 目標 1 : 台風の大アンサンブル予測
- 目標 2 : 熱帯季節内振動の大アンサンブル予測
- 目標 3 : 海洋の影響調査

と 3 つの目標を掲げて研究・開発を実施している。



2-1: テーマ 2 体制図

(3) 成果内容

詳細① NICAM による台風大アンサンブル実験 (目標 1)

(海洋研究開発機構, 東京大学大気海洋研究所)

2020 年度は、水平格子間隔 14km の全球非静力学正二十面体格子大気モデル NICAM (Satoh et al. 2014) を使用して、2019 年に房総半島に甚大な被害をもたらした台風 15 号を対象とした 1600 のアンサンブルメンバーを有する高解像度・大アンサンブル実験を実施した。2021 年度はさらに高解像度の水平格子間隔 7km と 3.5km の NICAM を使用して各 120 メンバーのアンサンブル実験を行い、台風 15 号および季節内振動の再現性を報告する。

水平格子間隔 14km のアンサンブル実験の調査では、台風 15 号の発生 3 日前(9 月 1 日)から 8 日前(8 月 27 日)に計算を開始した実験では現実の台風 15 号のように日本に接近、上陸する台風を再現するアンサンブルメンバーが多いことが確認できた。この理由の一部としてアンサンブル実験の中で台風 15 号の種の数の増加、および位置が現実になくなるという点が挙げられる。そこで 3.5km と 7km の実験では台風 15 号発生前の 6 日前から 3 日前の 4 日間(8 月 29 日～9 月 1 日)を計算開始時刻と決定した。アンサンブルメンバーの数は計算開始時刻毎に 30 メンバーあり、合計で 120 メンバーである。大気初期値は NICAM-LETKF JAXA Research Analysis system (NEXRA; Kotsuki et al. 2019) を用いた。モデルの設定は水平格子間隔と時間間隔以外は全て同じで、解像度に応じたパラメータ調整はおこなっていない。

ここでは初期値(NEXRA)に含まれていた台風 15 号の種の位置を起点とした渦擾乱の数および経路に注目して水平格子間隔依存性および計算開始時刻依存性を調査した。9 月 4 日 18 時 UTC より前の時刻では、現実の台風 15 号は台風強度に達する前の状態であるが、気象庁のベストトラックおよび気象庁のアーリードボラック解析(Kishimoto, 2009)から位置情報を取得可能である。その位置情報から NEXRA の中で渦擾乱の存在

を確認したところ、全てのアンサンブルメンバーがベストトラックの位置から半径 10 度以内に渦擾乱を含んでいることが確認できた。この渦擾乱を台風 15 号の種と仮定する。図 2-2 に台風 15 号の種を起点とし、96 時間以上持続した渦擾乱の数および経路の比較を示す。

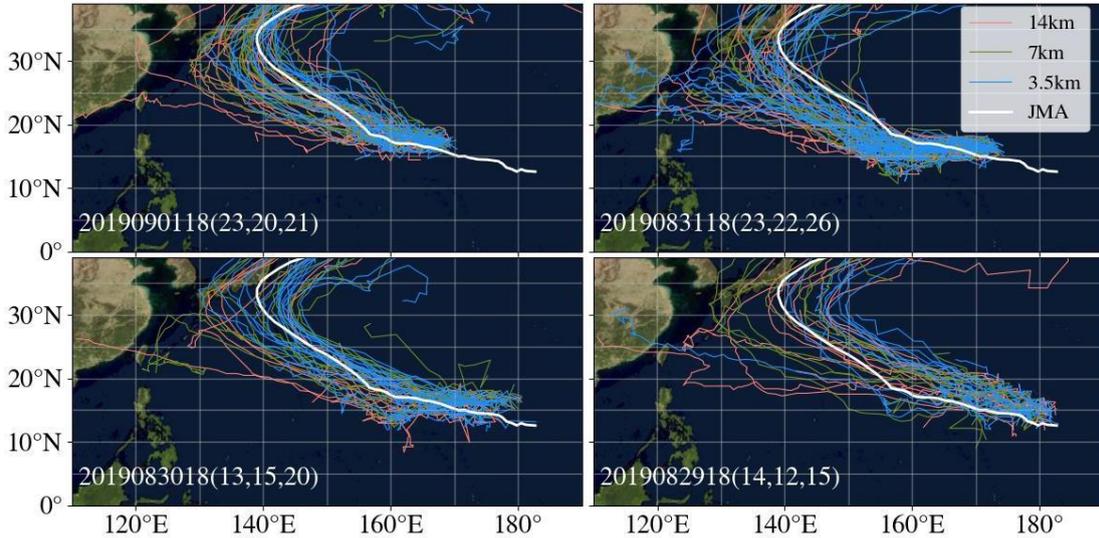


図 2-2: 令和元年房総半島台風(台風 15 号)の種から開始した渦擾乱の経路の水平格子間隔と計算開始時刻依存性。実線は渦擾乱の経路を示し、色は水平格子間隔の違いを意味する。白線はベストトラックの経路を示す。各パネルの左下の数字は計算開始時刻を示す。括弧内の数字は左から順に、水平格子間隔 14km、7km、3.5km で種から開始した渦擾乱の数を示す。

8 月 29 日開始のアンサンブル実験では台風 15 号の種を起点とする渦擾乱は、全ての解像度で 30 メンバーのうち半分以下にとどまっているが、計算開始時刻が発生時刻に近づくにつれてメンバー数が増加していた。特に水平格子間隔 3.5km の実験では 8 月 30 日に計算を開始した実験以降は 6 割以上のメンバーが渦擾乱を表現していた。詳細な理由は調査の必要があるが、高解像度化によって渦擾乱が持続しやすくなったと考えられる。一方で水平格子間隔や計算開始時刻に依存せず、共通して渦擾乱の経路の起点が現実の台風 15 号よりも北側にずれていることが図 2-2 で確認できる。

個々の渦擾乱の経路はアンサンブルメンバー間で変動が大きい。水平格子間隔の進路への影響を定量的に調査するため、6 時間毎のベストトラックおよびアーリーボラック解析の台風 15 号の位置に対するアンサンブル実験で抽出された渦擾乱(図 2-2)の位置の誤差を算出し、進路誤差のアンサンブル平均とアンサンブルメンバー間の変動の時間変化を図2-3 に示す。渦擾乱の継続時間はアンサンブルメンバーによって異なる。つまり時刻によってサンプル数が異なっていることに注意する必要がある。

計算開始直後の進路誤差に注目すると、開始後 6 時間後の段階で位置誤差のアンサンブル平均は 100km を超えている。これは水平格子間隔や計算開始時刻に依存せずに確認された経路の起点の北側へのずれに起因すると考えられる。このずれの大きさは計算開始時刻に依存しており 8 月 30 日と 31 日には 300km を超えている。これは台風 15 号の発生から計算開始時刻が遡るにつれて NEXRA 内の台風 15 号の種の位置の誤差が大きく、そのアンサンブルメンバー間での変動も大きくなっていったことの影響と考えられる。計算開

始時点での台風 15 号の種の位置の変動が大きいことにより、8 月 31 日と 9 月 1 日開始実験に比べて 8 月 29 日と 30 日開始実験で進路誤差のアンサンブルメンバー間の変動も大きくなったと考えられる。計算開始から時間が経過するにつれてアンサンブルメンバー間の進路誤差は増大する傾向にある。進路予測の解像度依存性に注目すると、計算開始時刻による変動があり、系統的な違いは確認できなかった。

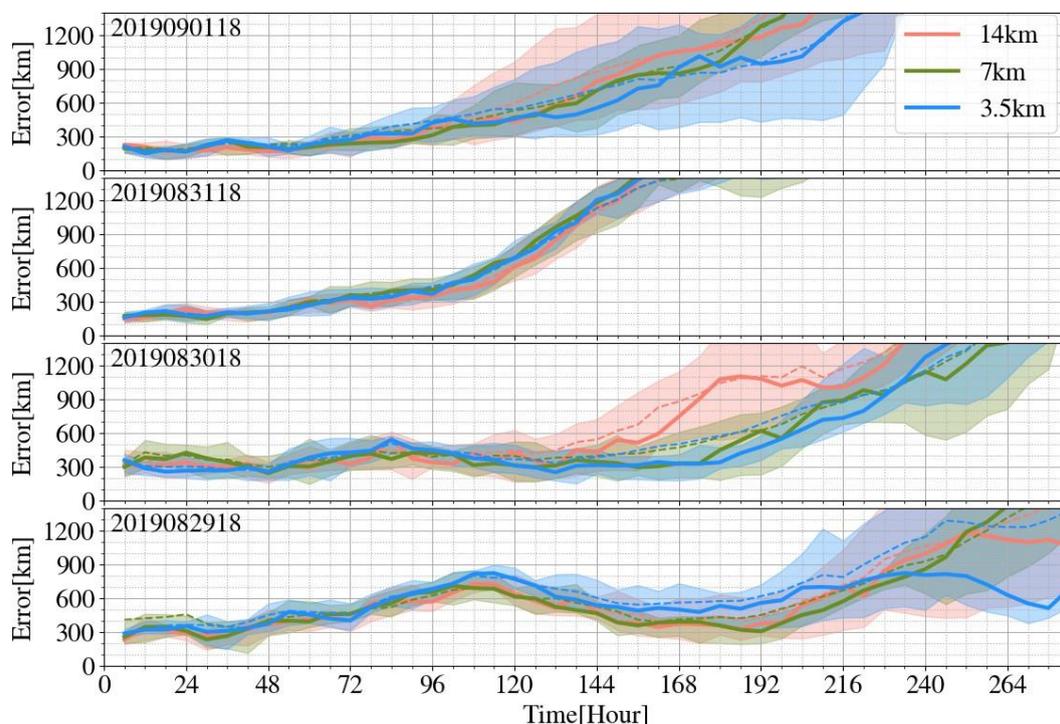


図 2-3: 台風 15 号のアンサンブル実験における渦擾乱の進路誤差の時間変化の水平格子間隔と計算開始時刻依存性。横軸は計算開始時刻からの経過時間を示す。線の色の違いは水平格子間隔の違いを意味する。実線はアンサンブル平均値し、波線は中央値を示す。透過性のある塗りつぶしは四分位範囲を示す。パネルの左上の数字は計算開始時刻を示す。

次に同実験の中の季節内振動の予測精度およびその解像度依存性を確認するために、夏季季節内振動 (BSISO) のインデックス (Kikuchi 2021) を算出し、先行研究に倣い (Matsueda and Endo, 2011)、その Root mean square error (RMSE) と Bivariate correlation (CORR) を評価した。RMSE と CORR の水平格子間隔と計算開始時刻依存性を図 2-4 に示す。

RMSE は計算開始から時間と共に増大し、アンサンブルメンバー間の変動も増大している (図 2-4 左)。これらの特徴は水平格子間隔や計算開始時刻に対する依存していない。一方で、RMSE の増加率は解像度に依存しており、水平格子間隔が細くなるにつれて増加率は大きくなる。CORR についても同様の特徴が確認できる (図 2-4 右)。Miyakawa et al. (2014) や Shibuya et al. (2021) では、水平格子間隔 14km の NICAM を用いた実験結果から本アンサンブル実験よりも精度の高い季節内振動の予測スキルを示している。この違いは対象事例の違いも挙げられるが、モデルの設定の違いに大きく起因すると考えられる。

スーパーコンピュータ「富岳」を利用することによって、今までは困難だった水平格子間隔 3.5km での 100

メンバーを超える数週間スケールの大アンサンブル実験を実施し、季節内振動の予測精度の解像度依存性をこれまでよりも高い信頼性を持って確認できた。

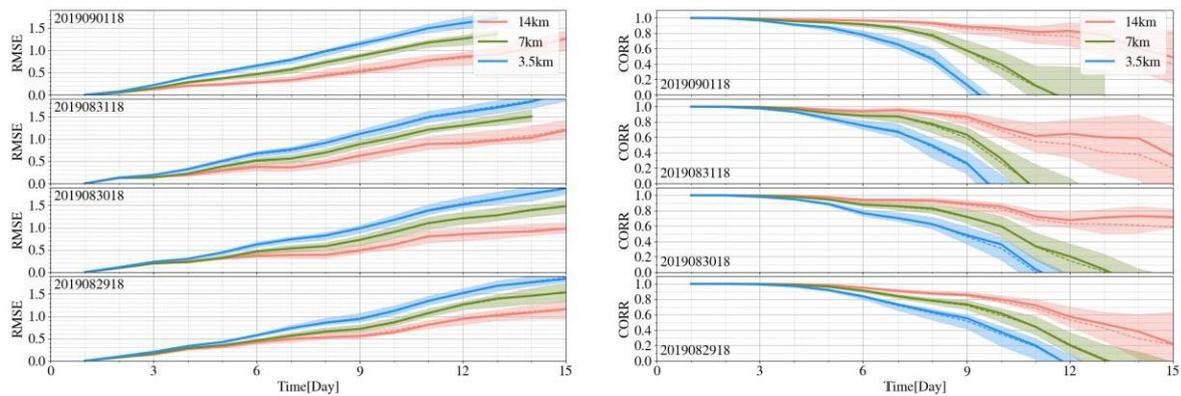


図 2-4: BSISO の RMSE(左)と CORR(右)の水平格子間隔と計算開始時依存性。横軸は計算開始時刻からの経過時間[日]を示す。線の色の違いは水平格子間隔の違いを意味する。実線はアンサンブル平均値、波線は中央値を示す。透過性のある塗りつぶしは四分位範囲を示す。パネルの左上または左下の数字は計算開始時刻を示す。

参考文献

- Kikuchi, K., 2021: The boreal summer intraseasonal oscillation (BSISO): A review. *J. Meteor. Soc. Japan*, 99, 933-972.
- Kishimoto, K., 2009: Revision of JMA's early stage Dvorak analysis and its use to analyze tropical cyclones in the early developing stage. *RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review*, No. 10, 12 pp., <http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/techrev/text10-1.pdf>.
- Kotsuki, S., K. Terasaki, K. Kanemaru, M. Satoh, T. Kubota, and T. Miyoshi, 2019: Predictability of record-breaking rainfall in Japan in July 2018: Ensemble forecast experiments with the near-real-time global atmospheric data assimilation system NEXRA. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 15, 1-7, <https://doi.org/10.2151/SOLA.15A-001>.
- Matsueda, M., and H. Endo, 2011: Verification of mediumrange MJO forecasts with TIGGE. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L11801, doi:10.1029/2011GL047480.
- Miyakawa, T., M. et al., 2014: Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model demonstrated using a supercomputer. *Nat. Commun.*, 5, 3769, doi:10.1038/ncomms4769.
- Satoh, M., et al., 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18.
- Shibuya, R., et al., 2021: Prediction skill of the Boreal Summer Intra-Seasonal Oscillation in global non-hydrostatic atmospheric model simulations with explicit cloud microphysics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 99, 973-992, doi:10.2151/jmsj.2021-046.

詳細② NICAM の台風統計情報（目標 1）

（海洋研究開発機構）

一般的にモデルはバイアスを持っている。台風の予測結果を評価するには、現実の環境場に応答して台風が発生したのか、モデルがもつバイアスにより台風が発生したのかを切り分ける必要がある。そのためにはモデルが持つ台風の統計情報を取得する必要がある。これを取得するには複数の年に対して大アンサンブル実験を行う必要がある。ここでは、全球非静力学モデル NICAM(Satoh et al. 2014)の台風の気候学的な統計情報を得るために、北西太平洋で台風の活動が活発な北半球の夏季 6 月から 9 月に注目して 2009 年から 2019 年を対象とした大アンサンブル実験をタイムスライス形式(Bengtsson et al. 1996)で実施した。ここでは台風統計情報の一部を報告する。なお北西太平洋域以外の熱帯低気圧も台風と称す。

数値実験の計算開始は各年の 5 月～8 月の 20 日頃とし、計算終了は 9 月末日とした。それぞれの開始時間に対して 64 メンバーの大アンサンブル実験を実施した。初期値には海洋研究開発機構のアプリケーションラボが提供する Atmospheric General Circulation Model for the Earth Simulator—LETKF experimental Ensemble reanalysis 2 (ALERA2: Enomoto et al. 2013)を利用した。本実験の NICAM のモデル設定は Kodama et al. (2021)と概ね同じである。相違点はエアロゾルを考慮しない点、海面水温を外部強制固定ではなく深さ 15m のスラブ海洋モデルを利用して計算した点である。なお、スラブ海洋モデルで算出した海面水温は時定数 7 日で米国海洋大気庁(NOAA)より提供される観測値(OISST v2.1; Huang et al. 2020)に緩和した。アンサンブル実験で発生した台風は Nakano et al. (2015)の手法を用いて抽出した。ここでは北半球の夏季を実験対象としているため、北インド洋、北西太平洋、北東太平洋、北大西洋の台風の活動度の年々変動に注目する。

図 2-5 には 8 月に計算を開始した実験の北半球の 4 つの海盆における 9 月の台風発生数の年々変動を示す。それぞれの海盆をベストトラック (IBTrACS v4.0; Knapp et al. 2010, 2018)と比較する。北インド洋では 9 月に台風の発生数が少ない様子がよく捉えられている(左上)。北西太平洋では発生数が過小な傾向が確認できる(左下)。北大西洋は年によって過大評価の年と過小評価の年があることが確認できる(右上)。北東太平洋域では観測の発生数がアンサンブルメンバーの変動の範囲に収まり、年々変動も良く再現していることが確認できる。

月毎の発生数は計算開始月によって変動していたため、観測の台風発生数の年々変動に対するアンサンブル平均の年々変動の相関係数を表にまとめる(表 2-1)。北インド洋は現実で発生数が少ないため解析から除外した。北西太平洋の年々変動は低い傾向があった。これは全体的に過小評価である点と 2014 年といった特定の年に過大評価になる傾向があることが影響していると考えられる。北大西洋においても有意な相関はほとんど確認できなかった。これは 8 月計算開始時に見られた年々変動と同様に過大評価と過小評価が年によって異なり、年々変動の表現を悪くしたと考えられる。北東太平洋は 6 月を除き、有意に相関しており年々変動の表現が良いことがわかる。先行研究では水平格子間隔 270km、135km、90km、60km のモデルを比較して水平格子間隔が細くなると北東太平洋の台風の発生数の再現性が向上することが報告されている(Strachan et al. 2013)。本実験で利用した NICAM は水平格子間隔 14km であり、先行研究のモデルよりも高解像度である。物理的なメカニズムは明らかにできていないが、NICAM が高解像度な点が北東太平洋の台風の年々変動の再現性を良くした可能性がある。

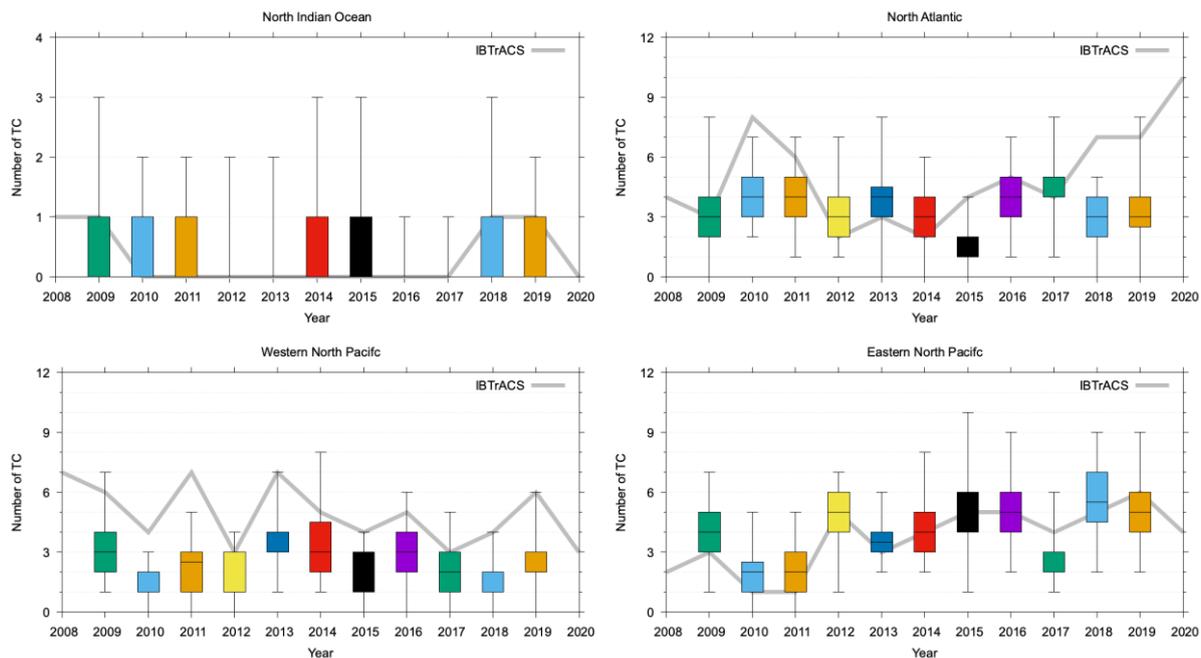


図 2-5: 北半球の海盆別 9 月台風発生数の年々変動。左上は北インド洋、左下は北西太平洋、右下は北東太平洋、右上は北大西洋を示す。各年の 64 メンバーアンサンブル実験のメンバー間の変動を箱ひげ図で示す。灰色の実線は観測値を示す。

表 2-1: 計算開始月別月間台風発生数の年々変動の相関係数(*付きは有意な相関、p 値<0.05)

	6 月	7 月	8 月	9 月
北西太平洋域				
5 月計算開始	0.26	0.41	0.00	0.38
6 月計算開始		0.29	0.04	0.30
7 月計算開始			-0.10	0.38
8 月計算開始				0.70*
北大西洋域				
5 月計算開始	0.71*	0.10	0.40	0.46
6 月計算開始		-0.10	0.45	0.37
7 月計算開始			0.27	0.38
8 月計算開始				0.30
北東太平洋域				
5 月計算開始	-0.2	0.60*	0.59*	0.79*
6 月計算開始		0.69*	0.65*	0.78*
7 月計算開始			0.48	0.72*
8 月計算開始				0.9*

参考文献

- Bengtsson, L., M. Botzet, and M. Esch, 1996: Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricane? *Tellus*, 48A, 57-73.
- Enomoto, T., et al., 2013: Observing-system research and ensemble data assimilation at JAMSTEC. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)*, S. K. Park and L. Xu, Eds., 509-526, Springer.
- Huang, B., et al., 2020: Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1, *Journal of Climate*, 34, 2923-2939. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1
- 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): Unifying tropical cyclone best track data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 363-376. doi:10.1175/2009BAMS2755.1
- Knapp, K. R., H. J. Diamond, J. P. Kossin, M. C. Kruk, C. J. Schreck, 2018: International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4. [indicate subset used]. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.25921/82ty-9e16
- Kodama, C., et al., 2021: The Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): experimental design, model description, and impacts of model updates, *Geosci. Model Dev.*, 14, 795-820, doi:10.5194/gmd-14-795-2021
- Nakano, M., M. Sawada, T. Nasuno, and Satoh, M., 2015: Intraseasonal variability and tropical cyclogenesis in the western North Pacific simulated by a global nonhydrostatic atmospheric model, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 565-571, doi:10.1002/2014GL062479.
- Satoh, M., et al., 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18.
- Strachan, J., P. L. Vidale, K. Hodges, M. Roberts, and M. Demory, 2013: Investigating global tropical cyclone activity with hierarchy of AGCMs: the role of model resolution. *J. Climate*, 26, 133-152, doi:10.1175/JCLI-D-12-00012.1.

詳細③ NICAMによるマッデン・ジュリアン振動 (MJO) の大アンサンブル実験 (目標 2)

(海洋研究開発機構, 東京大学大気海洋研究所)

マッデン・ジュリアン振動 (MJO) は、 $O(1,000)$ -km スケールで組織化した大規模な対流活発域が熱帯インド洋上から西太平洋にかけてゆっくりと東進する現象であり、約 30-90 日の時定数を持った準周期的な季節内変動である。その特徴的な時空間スケールに起因して、MJO は熱帯域での局地降水のみならず、熱帯低気圧の発生、中緯度域の異常気象やエルニーニョ・南方振動の引き金や終息に関わるなど、全球規模の気象・気候場に対して影響を与える主要因の1つである (Zhang, 2013)。このため、MJO の発生・伝播のタイミングを決定する物理メカニズムの理解、およびモデルによる MJO の予測特性の把握は、数日から季節スケールまでの気象現象の適切な予測を提供するにあたって重要である。

MJO の伝播の物理に関するこれまでの研究では、MJO 対流に対する大規模な力学応答に伴う水蒸気変動がその本質であるとする見方が主流であり (e.g., D. Kim et al., 2014; Adames and Wallace, 2015)、予測

性能の議論の際にもその見方を援用する研究がなされてきた (e.g., H. Kim et al., 2016)。この見方に立てば、MJO を実現するプロセスは MJO スケールの大気場によって概ね一意に決まっているという解釈につながるのが自然である。

一方で、全球非静力学モデル NICAM を用いた MJO 実験の結果によれば、MJO スケールの大気プロセスのみに基づく議論では MJO 伝播の物理・予測特性の理解には不十分であることが示唆されている。Miura et al. (2007) は、MJO の西太平洋への伝播は、日付変更線の東側から水蒸気を伴う総観規模擾乱が侵入して西太平洋を湿潤化させたタイミングで達成される場合があることを指摘した。また、Miura et al. (2015) は 1 ヶ月を大きく超えるリードタイムで MJO の伝播を表現できる事例もあることを示し、その伝播タイミングの決定には季節進行に伴う海面水温の変化が重要である可能性を指摘している。このように、MJO の伝播が総観規模擾乱のような確率的なプロセスの影響を受けたり、一方で季節進行のような強制プロセスの影響を受けたりするという知見は、MJO の伝播を実現するプロセスの自由度は複数存在しうることを意味しており、それは MJO の予測が根源的にどの程度の不確実性を持つかという問題にも直結する。したがって、個々の MJO の伝播のタイミングが何によってどの程度揺らぐかを定量的に把握し、その物理的要因を明らかにすることが必要である。

この問題意識の解決に向けたステップとして、本年度は 2 つの MJO 事例に対して 14km メッシュの NICAM を用いた大規模アンサンブル再現実験を実施し、MJO の西太平洋への伝播タイミングの揺らぎ方とその要因の比較検討を行った。アンサンブル実験は、2018 年 11 月上旬と 12 月上旬にインド洋で発生した MJO (以下、それぞれ MJ01, MJ02 と表記) を対象として、それぞれ 10/25~11/03・11/23~12/02 の各日 00UTC から 45 日間積分したものであり、各初期日の大気状態に NICAM-LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA; Kotsuki et al., 2019) により生成された 100 メンバーの解析値を使用することで、合計 2000 メンバーの実験を実現した。

MJ01, MJ02 の各 1000 メンバー実験に対して、Kikuchi et al. (2012) で定義された MJO 位相空間上の振幅と位相の時間発展の追跡を行ったところ、それぞれ 678 メンバー、892 メンバーで MJO が西太平洋 (Phase 7) に伝播していることを認めた。そこで、それらのメンバー間で MJO が西太平洋に伝播するタイミングがどれだけ揺らいでいるかを確認するため、位相が Phase 7 に到達した日付で分別したメンバー数の頻度分布を示したものが図 2-6 である。MJ01 と MJ02 の分布特性を比較すると、MJ01 では西太平洋の伝播タイミングが一意に定まる傾向にある (11/20 の単一ピーク; 図 2-6a) のに対し、MJ02 では一意に定まらずに分岐する性質を持つ (12/22 と 12/30 の 2 ピーク; 図 2-6b) ことがわかる。この結果は、MJO の伝播を実現する大気プロセスの自由度は場合によって大きく異なることを初めて明確に示すものである。

ここでの主な疑問点として、1) MJ02 の伝播タイミングの分岐解の間にはどのような物理的な違いがあるか、2) MJ01 と MJ02 で伝播タイミングの分布特性が大きく異なるのはなぜか という 2 点が挙げられる。まず、1) について迫るため、図 2-6b で見られる 2 つのピークに対応したメンバー “Early 解” (353 メンバー) と “Late 解” (249 メンバー) のコンポジット解析を行い、両者を比較した。図 2-7a, b はそれぞれ Early 解と Late 解における赤道域の可降水量および OLR 偏差の時間経度断面図であるが、MJO の伝播に伴う海大陸から西太平洋における湿潤化のタイミングに大きな違いがあることがわかる。具体的には、Early 解では 12/15 頃には当該領域の湿潤化が達成されている一方、Late 解では 12/25

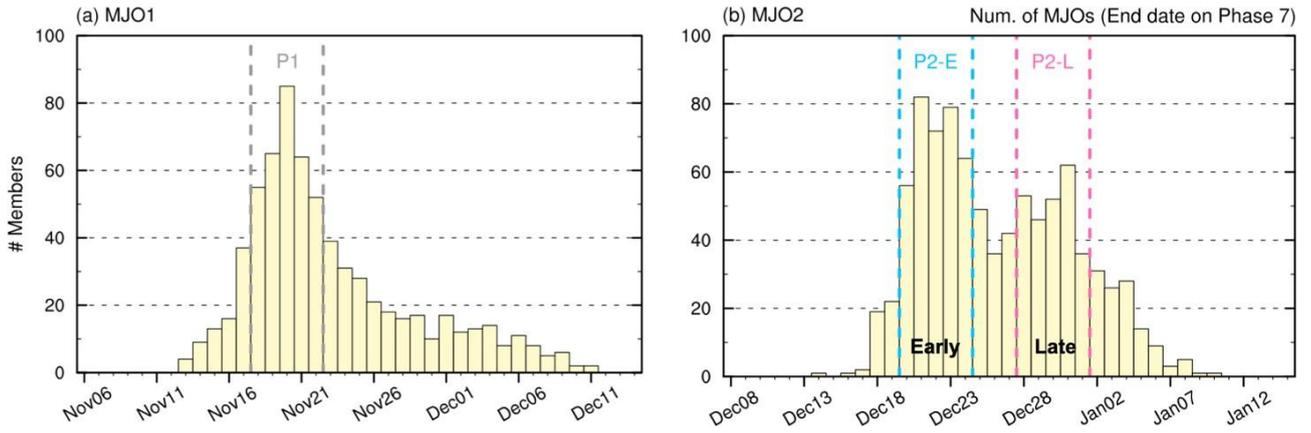


図 2-6: Kikuchi et al. (2012) で定義された MJO 位相空間で Phase 7 (西太平洋) に到達したメンバーを、その到達日ごとに分別した際のメンバー数の頻度分布。(a) MJO1、(b) MJO2 のアンサンブル実験に対する結果。(b)に示す “Early” (12 月 20 日~24 日)と “Late” (12 月 28 日~1 月 1 日) は頻度分布における 2 つのピークを代表するメンバーで定義した。

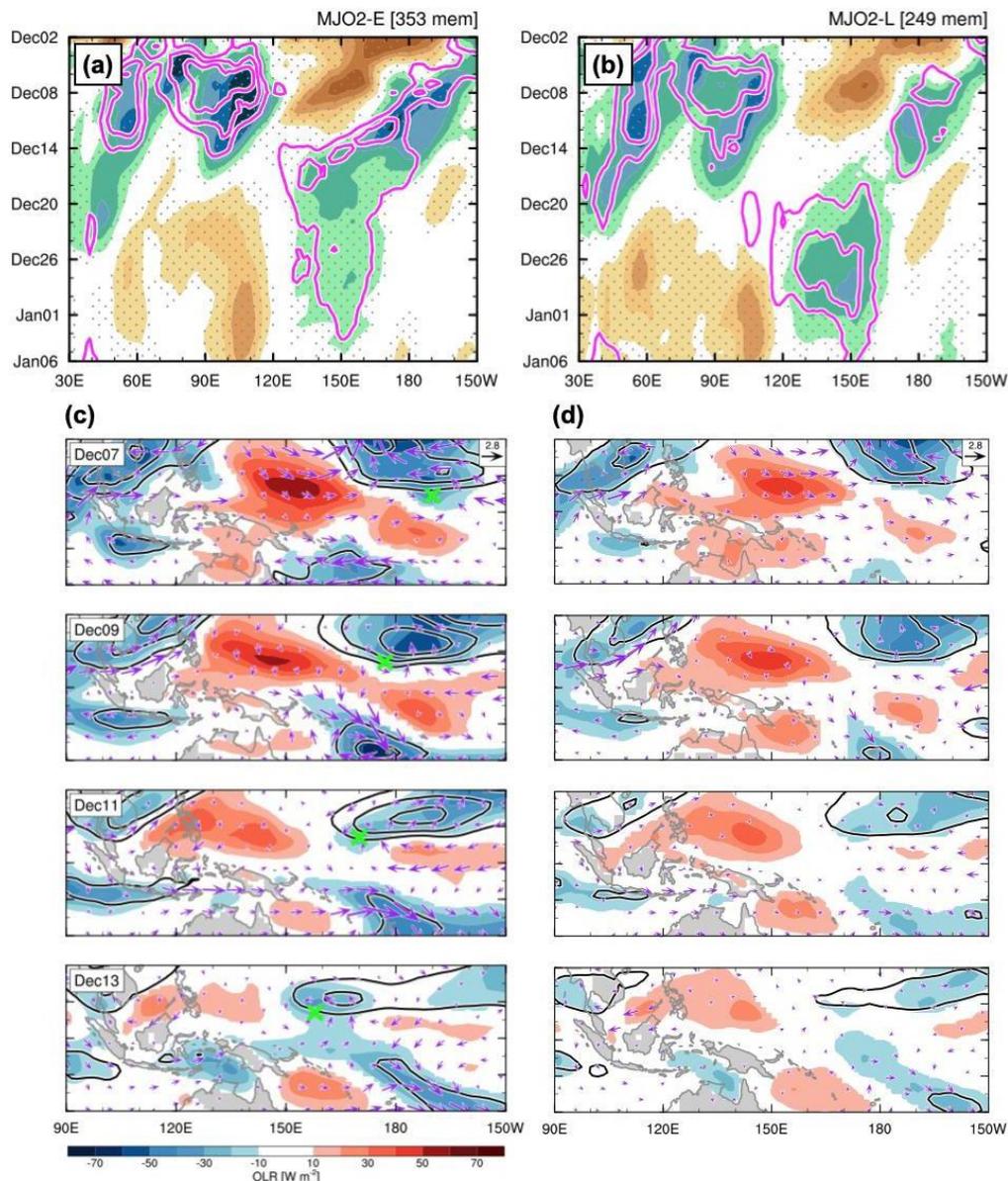


図 2-7: (a, b) 10S-15N で平均した可降水量 (シェード) と OLR (等値線) 偏差の時間経度断面のコンポジット図。MJ02 における (a) Early 解と (b) Late 解に対する結果。点描は可降水量偏差で 99%有意なシグナルを示す。(c, d) 12 月 7 日から 13 日まで 2 日毎に示した OLR (シェード)、850hPa 水平風 (矢印)、可降水量偏差 (等値線) の時間発展のコンポジット図。MJ02 における (c) Early 解と (d) Late 解に対する結果。OLR および 850hPa 水平風は 99%有意なシグナルのみ示す。(c) における緑印は西進渦擾乱の中心を表す。

頃まで湿潤化に時間がかかっており、それに対応する形で MJ0 の伝播タイミングも Late 解では約 10 日遅れている。また、その湿潤化プロセスにおける両者の違いは、Early 解では日付変更線以東から西進する水蒸気シグナルの侵入が海大陸から西太平洋の湿潤化に寄与しているように見える一方で (観測と類似; 図略)、Late 解ではその寄与は十分弱いことである。このプロセスに対応する下層の力学場および対流・水蒸気場の時間発展を面的に確認したところ (図 2-7c, d)、Early 解で見られた西進するシステムは対流と結合した総観規模の渦擾乱 (混合ロスビー重力波ないし TD-type 擾乱) であることがわかった。この結果から帰結されることは、西進渦擾乱の発達の有無という確率的寄りのプロセスが海大陸から西太平洋の湿潤化にかかる時間スケールに影響して MJ0 の伝播タイミングを大きく制御するということ、また、MJ02 については観測や Early 解で見られたプロセス以外にもその伝播を許す自由度が存在するということである。

MJ02 の伝播タイミングの差異につながった西進渦擾乱の発達の有無の理由を調べるため、西太平洋に西進渦擾乱が侵入する時点を対象として渦運動エネルギーの収支解析を行った。その結果、西進渦擾乱が発達できた Early 解では、wave-convection coupling および下層の東西風収束に伴う wave accumulation がより

強く起きていたことを確認した。これに関連した興味深い結果として、wave-convection coupling の強弱については熱帯-中緯度相互作用の観点から解釈できる点が挙げられる。観測において、西進渦擾乱が西太平洋に侵入する直前に中緯度から上層トラフが海大陸域まで貫入し、その前面で上昇流の強制とそれに対応した湿潤領域が認められ (図 2-8a)、西進渦擾乱が海大陸域まで持続的に対流結合する上で好都合な環境場となっていたことを踏まえ、同様の視点で Early 解と Late 解を比較したところ (図 2-8b)、Early 解の方が観測で見られたような上層トラフの海大陸への貫入がより顕著であり、それに対応した力学的な強制も強く現れていたことがわかった。この上層トラフの深まりは中緯度のロスビー波列の熱帯域への侵入を反映したもので、インド洋の MJ0 対流に伴う Walker 循環が Early 解の方でより強く、西太平洋上空の西風が強まっていたことでロスビー波の熱帯域への貫入を許容しやすい場であったことと整合していた。これらの結果から、MJ0 の伝播タイミングの決定に対して、MJ0 自身と中緯度からの上層トラフの貫入に伴う力学的強制との相互作用が重要な役割を果たすことが明らかとなった。

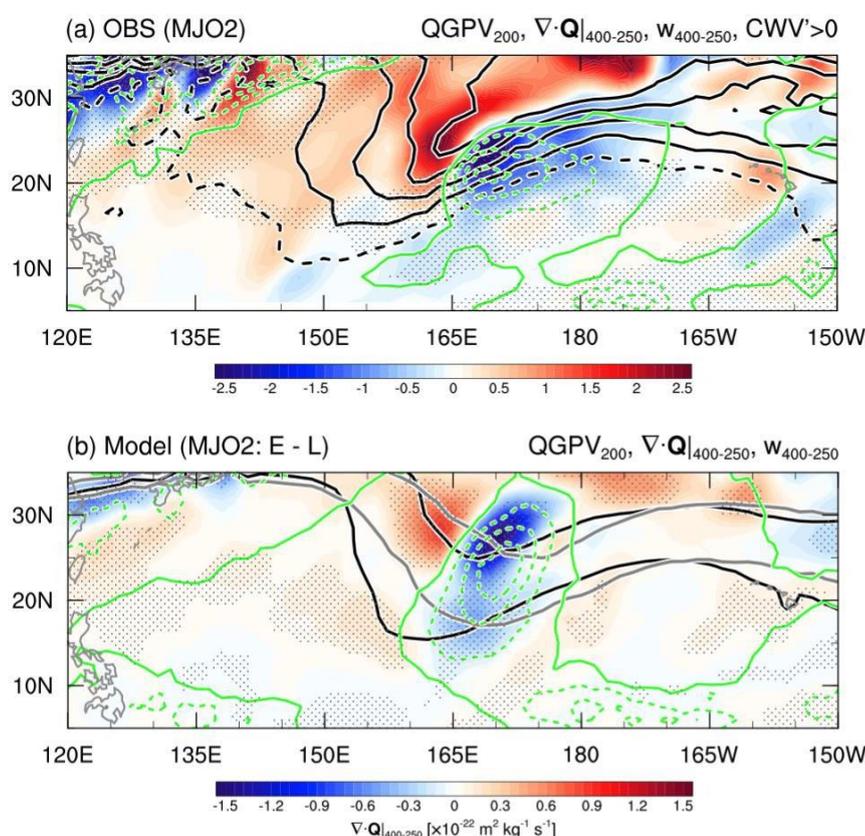


図 2-8: (a) ERA-Interim から計算した 200hPa での準地衡渦位 (黒線)、400-250hPa で平均した Q ベクトル収束 (シェード) と鉛直 P 速度偏差 (緑線)、可降水量偏差が正の領域 (点描) の水平分布。2018 年 12 月 3 日から 7 日の時間平均として示している。

(b) (a)と同様だが、Q ベクトル収束と鉛直 P 速度偏差については MJ02 における Early 解から Late 解を引いた差分図。黒線は Early 解、灰色線は Late 解における 200hPa での準地衡渦位で、点描は Q ベクトル収束の差分が 99%有意なシグナルを示す。

もう一つの疑問点である「MJ01 と MJ02 で伝播タイミングの分布特性が異なる理由」について、先行研究 (e.g., Miura et al., 2015) の知見も踏まえ、MJ0 が実現していた時の海面水温分布が影響したという仮説を立て、11 月に顕在化した MJ01 期間中の海面水温に対して、初期値に常に固定した場合 (i.e., 季節進行を除去; SSTFIX 実験) と 12 月に顕在化した MJ02 期間中の海面水温に差し替えた場合 (SST-MJ02 実験) の 2 つの感度実験を考案した。その他の条件は MJ01 の標準実験と同一とし、それぞれ 1000 メンバーのアンサンブル実験を行って伝播タイミングの分布特性を比較した。その結果、標準実験や SSTFIX 実験では MJ01 の伝播タイミングは一意に定まる傾向を見せていたのに対し、SST-MJ02 実験では

その一意性の傾向が弱まり、解が分散するような振る舞いが見られた。このことは、2018 年 12 月の海面水

温分布が 11 月に比べて MJO の伝播を実現させる大気側の自由度を増やしていた可能性を意味する結果であり、MJO の顕在化に対して背景場を与える下部境界条件の重要性を示唆するものである。

参考文献

- Adames, Á. F., and Wallace, J. M. (2015). Three-dimensional structure and evolution of the moisture field in the MJO. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(10), 3733-3754.
- Kikuchi, K., Wang, B., & Kajikawa, Y. (2012). Bimodal representation of the tropical intraseasonal oscillation. *Climate Dynamics*, 38(9), 1989-2000.
- Kim, D., J.-S. Kug, and A. H. Sobel (2014). Propagating vs. Non-propagating Madden-Julian oscillation events. *Journal of Climate*, 27, 111-125.
- Kim, H. M., Kim, D., Vitart, F., Toma, V. E., Kug, J. S., & Webster, P. J. (2016). MJO propagation across the Maritime Continent in the ECMWF ensemble prediction system. *Journal of Climate*, 29(11), 3973-3988.
- Kotsuki, S., Terasaki, K., Kanemaru, K., Satoh, M., Kubota, T., & Miyoshi, T. (2019). Predictability of record-breaking rainfall in Japan in July 2018: Ensemble forecast experiments with the near-real-time global atmospheric data assimilation system NEXRA. *SOLA*, 15A-001.
- Miura, H., Suematsu, T., and Nasuno, T. (2015). An ensemble hindcast of the Madden-Julian oscillation during the CINDY2011/DYNAMO field campaign and influence of seasonal variation of sea surface temperature. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 93, 115-137.
- Miura, H., Satoh, M., Nasuno, T., Noda, A. T., and Oouchi, K. (2007). A Madden-Julian oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model. *Science*, 318(5857), 1763-1765.
- Zhang, C. (2013). Madden-Julian oscillation: Bridging weather and climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(12), 1849-1870.

詳細④ 高水平解像度大気海洋結合モデル NICOCO 実験の実施 (目標 3)

(東京大学大気海洋研究所, 海洋研究開発機構)

大気の間々の対流活動は、豪雨などの災害の要因となるが、小さい水平スケールを持つため数値モデルでその挙動を適切に表現するためには非常に高い水平解像度が必要である。一方、西岸境界流や海洋渦などの 100 km 程度の小さい水平スケールを持つ海面水温の構造が、移動性高低気圧や寒冷前線の活動へ影響を及ぼし得ることが近年の研究で明らかになりつつある (Parfitt and Seo 2018; Masunaga et al. 2020)。これらのことから、高水平解像度の大気海洋結合モデルの性能向上が、季節スケール予報のさらなる精度向上に重要であると考えられる。本課題では、大気モデル (NICAM) と海洋モデル (COCO) の水平解像度をそれぞれ 14km と 0.25 度とした設定で大気海洋結合モデル NICOCO (Miyakawa et al. 2017) の全球積分を行い、その性能評価と改良に取り組んでいる。これらは、個々の大気の大気対流や海洋渦を概ね表現することができる解像度である。

結合モデル NICOCO は、その高い水平解像度から高い性能を発揮することが期待されるが、数か月程度の積

分であっても、季節に依存せずに熱帯域で海面水温が2度程度ドリフトすることが確認されている。今年度は冬季に着目してその特徴についてより詳細な調査を行った。NICOCO の水温ドリフトについては、下向きの短波放射が過剰であることが主要因であることが明らかとなった。このことから、NICAM が雲量を過小評価する傾向にあることが水温ドリフトの根本的な原因であることが明確となった。このようなドリフトは、水平・鉛直解像度向上やモデルパラメータのチューニングでは低減できないことも確かめられた。

台風の発生・成長や、マッデン・ジュリアン振動などの熱帯における季節内変動の表現を改善し、季節間から季節スケール予報の精度を向上させるためには海面水温ドリフトを低減することが必須である。そこで、フラックス調節手法 (Sausen et al. 1988) の検討と実装を今年度は行った。フラックス調節量を見積もる際に高解像度結合モデルを用いた試行錯誤を行う必要が無いように留意し、任意定数を必要としないフラックス調節手法 (von Storch 2000; Weaver and Hughes 1996) を適用することとした。

日本付近において海面からの上向き乱流熱放出が最も顕著になる北半球冬季について事例解析を行い、本フラックス調節手法の性能評価を行った。本結合モデルの 10 アンサンブルを作成することで統計的に信頼できる結果を得た。フラックス調節を用いない場合には熱帯・亜熱帯域や沿岸域で2度程度の海面水温ドリフトを生じる (図 2-9a) が、フラックス調節を入れることで概ねドリフトが解消された (図 2-9b)。本解析のような短い時間スケールに対してフラックス調節の導入を行った前例は少ないが、数週間スケールにおいてもフラックス調節が有効であることが明らかになった。

一方で、水温ドリフトの低減具合は海域ごとに異なることも確認された。本事例では北半球亜熱帯域 (図 2-9b 赤丸) で水温ドリフトがほぼ解消されたが、赤道太平洋付近 (図 2-9b 黒丸) では低減具合が比較的小さいことが分かった。その要因について調査したところ、参照となる水温の時間発展が非線形である場合には、特定の月や季節に対して一定値のフラックス調節量を与える一般的な方法では水温ドリフトを十分に低減することができない場合があることが見出された。そこで、フラックス調節量をより高頻度で更新する設定を導入したところ (図 2-9c)、非線形的な時間発展を示す時系列についても十分に水温ドリフトが解消できることが明らかとなった。

さらに、フラックス調節を行ったうえで、大気と海洋の相互作用プロセスが適切に表現されるかを確認するために、海上風と海面水温の間のラグ相関解析を行った。フラックス調節を行う実験における海上風と海面水温の間の相関は、フラックス調節を行っていない実験や観測データと概ね整合的な分布を示した。一方、海面水温の分布を境界条件として与える Atmospheric General Circulation Model (AGCM) 実験ではこの相関が全く観測と異なることが確認された。これらの結果は、フラックス調節を入れることによって、結合モデル内で表現されるべき物理プロセスが受ける悪影響は小さいことを示唆している。このように、全球大気海洋結合モデルを用いた季節間から季節スケール予報に対して、フラックス調節の手法が有用であることが示唆された。

本年度は、水平解像度をさらに向上させ、大気モデルと海洋モデルの解像度をそれぞれ 3.5km と 0.1 度とした結合実験にも取り組んだ。これらは、一般に雲解像度と渦解像度と呼ばれる解像度であり、全球結合モデルでの実行としては世界最高水準である。計算コストが極めて高い実験であるが、スーパーコンピュータ「富岳」の高い計算性能を利用することで 8 つものアンサンブルを 40 日間積分について作成することができた。初期解析として日本近辺を温帯低気圧が通過する事例について確認したところ、大気の水平解像度を 3.5km にした場合の上昇流の分布 (図 2-10a) は、水平解像度 14km の実験 (図 2-10c) に比べてはるかに詳細な構造を示すことが確認された。海面水温についても、0.1 度解像度 (図 2-10b) の方が 0.25 度解像度 (図 2-10d) に比べて海洋渦の活動が飛躍的に活発になっていることがうかがえる。これらは、大気自体の詳細なプロセス

の表現が向上することを意味するとともに、海面水温の微細構造の影響が大気へより正確に伝わることを示唆し、大気と海洋の分布の表現性が全般にわたって向上することが見込まれる結果である。

なお、水平解像度向上させるだけでは上記の海面水温ドリフトは低減されないことも確認され、フラックス調節を導入することの必要性をさらに明確にする結果といえる。これらの結果に対して、気象庁の職員との意見交換を行った。データ同化を通じて、初期値における黒潮の流路を適切に表現することの重要性と、本結果を特に夏季に適用することの重要性について議論した。

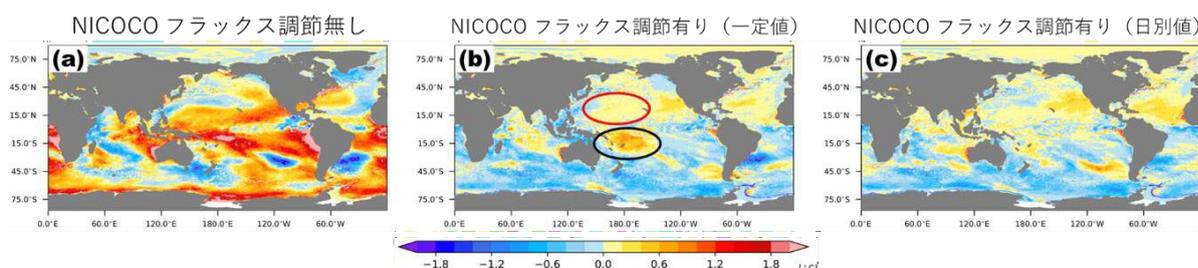


図 2-9 2010 年 1 月 5 日を初期値とした NICOCO 実験についての、2 月 13 日における海面水温ドリフト量。対応する水平解像度の海洋モデル COCO を大気再解析 JRA-55do で駆動した結果を参照値としている。(a)フラックス調節を用いない実験、(b)積算期間中一定値のフラックス調節量を付加する実験、(c)フラックス調節量を毎日更新するフラックス調節実験の結果。

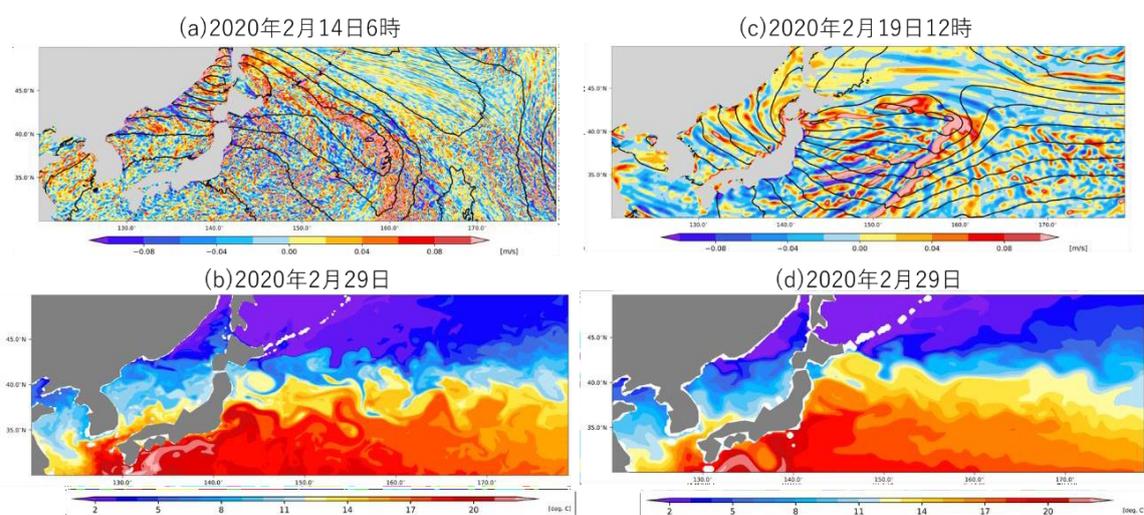


図 2-10 大気モデル 3.5km、海洋モデル 0.1 度の水平解像度の NICOCO による、(a) 高度 1km における上昇流 (m/s) と海面気圧 (等値線；4hPa 間隔)、(b)海面水温の日平均値の分布。(c)、(d)は(a)、(b)とそれぞれ同様だが、大気モデル 14km、海洋モデル 0.25 度の設定による結果。日付はそれぞれパネル上部に示されている。

参考文献

Ma, X., and Coauthors, 2015: Distant influence of Kuroshio eddies on North Pacific weather patterns? *Sci. Rep.*, 5, 17785, <https://doi.org/10.1038/srep17785>.

Weaver, A. J., & Hughes, T. M. C. (1996). On the incompatibility of ocean and atmosphere models

and the need for flux adjustments. *Climate Dynamics*, 12(3), 141-170.

Masunaga, R., H. Nakamura, T. Miyasaka, K. Nishii, and Y. Tanimoto, 2015: Separation of climatological imprints of the Kuroshio Extension and Oyashio fronts on the wintertime atmospheric boundary layer: Their sensitivity to SST resolution prescribed for atmospheric reanalysis. *J. Climate*, 28, 1764-1787, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00314.1>.

Miyakawa, T., Yashiro, H., Suzuki, T., Tatebe, H., & Satoh, M. (2017). A Madden-Julian Oscillation event remotely accelerates ocean upwelling to abruptly terminate the 1997/1998 super El Niño. *Geophysical Research Letters*, 44(18), 9489-9495.

Parfitt, R., and H. Seo, 2018: A new framework for near-surface wind convergence over the Kuroshio Extension and Gulf Stream in wintertime: The role of atmospheric fronts. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 9909-9918, <https://doi.org/10.1029/2018GL080135>.

Sausen, R., Barthel, K., & Hasselmann, K. (1988). Coupled ocean-atmosphere models with flux correction. *Climate Dynamics*, 2(3), 145-163

Von Storch, J.-S. 2000: Signatures of air-sea interactions in a coupled atmosphere - ocean GCM. *Journal of Climate*, 13(19), 3361 - 3379.

2-2-3. テーマ3：先進的大規模データ同化手法

(1) 成果概要

これまでに開発・最適化を進めた全球アンサンブルデータ同化システム NICAM-LETKF を用いて、気象・大気微量成分を同化した 1024 メンバーアンサンブルデータ同化実験を実施した。水平 14km での高解像度アンサンブルデータ同化実験では、大気微量成分を追加した同化サイクル実施時の計算性能評価を行い、エアロゾル課程の単精度化・計算最適化の必要性について明らかにした（詳細①）。また、計算結果を「短時間領域スケール予測」「全球スケール予測」で初期値境界値として順次提供を進める準備を行い、時間を要する実験結果のポストプロセス処理を、シミュレーションと同時に行うシステムについての高度化を行なった（詳細②）。エアロゾル・温室効果気体濃度のデータ同化シミュレーションにおいては、低解像度 NICAM-LETKF を用いたエアロゾルデータ同化実験を実施し観測との良い一致を得た。さらに 5-10 年スケールの長期シミュレーションで重要となる放射収支の再現性向上に向けた、エアロゾル-雲相互作用の評価を行い、用いる雲微物理スキームの選択がエアロゾルの有無による効果の差よりも結果に与える影響が大きいことを示した（詳細③）。水安定同位体比をトレーサとするデータ同化実験および気候値再現性を確認するための長期実験を実施し、トレーサ分布と大気モデル内の雲降水過程の評価を行った（詳細④）。

(2) 実施体制

令和3年度は以下の2つのサブテーマと研究推進担当者を設け、それぞれ研究・開発を実施した。また、テーマ3全体の情報交換の場として、1月に会合を開催し、研究内容についての情報交換を行

った。

- サブテーマA：大規模データ同化計算技術開発（詳細①）（詳細②）
主担当者：八代尚（国立環境研究所）、副担当者：寺崎康児（理化学研究所）
- サブテーマB：大気トレーサの大アンサンブル同化（詳細③）（詳細④）
主担当者：五藤大輔・田上雅浩・八代尚（国立環境研究所）

(3) 成果内容

- ① 14km メッシュ・1024 メンバー・大気微量成分入りアンサンブル同化実験
（サブテーマA、国立環境研究所・理化学研究所）

これまでに開発・最適化を進めた全球アンサンブルデータ同化システム NICAM-LETKF システムを用いて、全球 112km メッシュおよび 14km メッシュ解像度での実験を行なった。この計算は結果をテーマ1・テーマ2に提供することを想定しているため、テーマ2で行われた 2019 年 9 月の台風 15 号(Faxai)を対象とした実験に合わせたシミュレーション期間を設定した。具体的には、8月26日18時UTCから11日間の初期値・境界値を提供するために、8月11日から1024メンバーでの6時間毎のデータ同化シミュレーションサイクルを実施した。観測データとしては従来型の気象観測データセットである NCEP PREPBUFR に加えて、衛星搭載センサの AMSU-A、MHS、ATMS によって得られた放射輝度温度を利用した。これらの衛星データのもつバイアス（スキャンバイアス及びエアマスバイアス）は Terasaki and Miyoshi (2017) によって導入・評価済みのオンラインバイアス推定手法によって補正した。ただし、この適応型バイアス補正手法は異なるモデル水平解像度・鉛直層数に応じて推定値を安定化させるためのスピナップを必要とするため、少ないアンサンブル数（64 メンバー）でのスピナップの期間を 40 日間とり、2019 年 7 月 1 日から計算を開始した。本実験設定では、鉛直層数を 78 層、モデルトップを 50km に設定し、大気トレーサとして二酸化炭素に加え、エアロゾル及びその関連トレーサ 24 種（鉍物ダスト 10 粒径、海塩 4 粒径、炭素性粒子 7 種、硫酸塩、SO₂、DMS）を追加した。また、力学コアを含む主要な計算区間の浮動小数点演算は単精度で行なった。図 E-1-1 に、アンサンブル1メンバーあたり富岳 80 ノード 1920 コアを利用した場合の、NICAM パートの 9 時間シミュレーションでの経過時間を示す。エアロゾル・GHG トレーサを含まない Control 実験と比較して、トレーサを含む Aerosol&GHG 実験では計算時間が 1.6 倍増加した。シミュレーションモデル内の各過程に着目してみると、力学コアではトレーサ移流、物理過程では境界層乱流過程の計算時間が、移流・拡散を計算するトレーサの数の増加に比例して伸びている。また、エアロゾル過程にかかる計算時間が全体を 30%増加させており、無視できないことがわかった。エアロゾルに関わる物理過程は単精度計算に未だ対応しておらず、富岳での計算最適化にも余地が残されている区間である。データ同化シミュレーションで活用するモデルコンポーネントの拡大に伴い、プログラム最適化を適用する範囲をより拡大していく必要があることが示唆された。加えて本実験では、雲微物理過程に関して他のプロジェクトにおいて精緻化された成果を取り込んだプログラムを利用したた

めに、昨年度報告したベンチマーク結果と比較して計算時間が倍以上に増加している。この結果も科学的な要請に伴うプログラムの改良・拡充に合わせた、継続的な計算最適化の重要性を示すものであり、本研究課題が蓄積するシミュレーションモデルのチューニングに関する知見を体系的にまとめ、ソフトウェア開発サイクルに取り入れていくことが、さらなる科学計算の大規模化に必要な不可欠であることが示された。

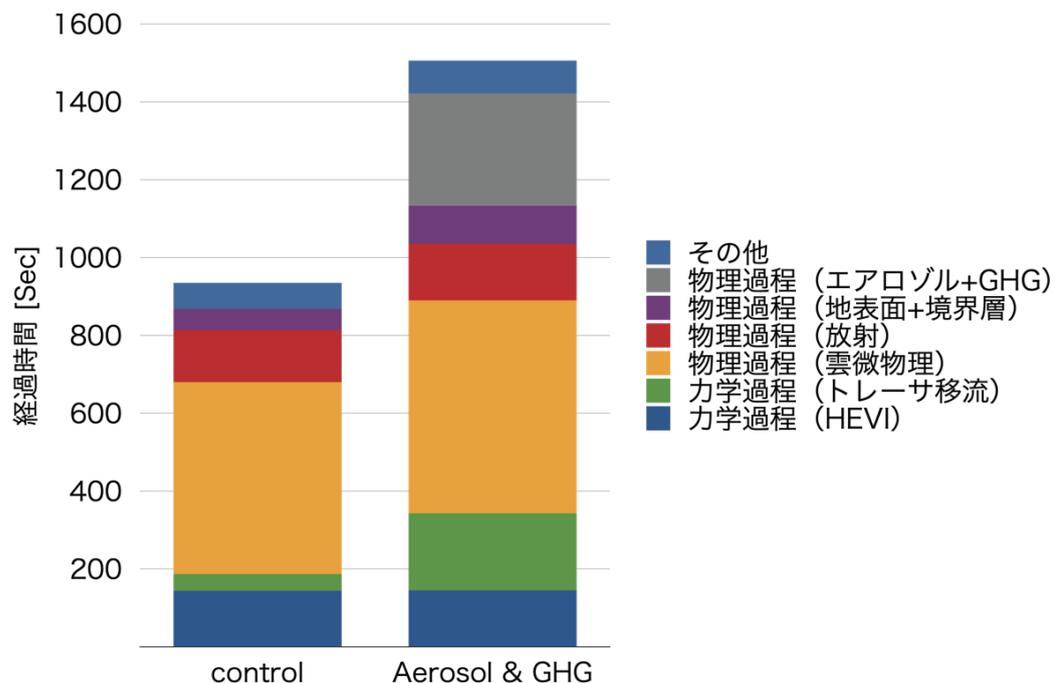


図 E-1-1 : 14km メッシュ NICAM-LETKF 同化シミュレーションにおける、NICAM パートの計算時間内訳。それぞれ、エアロゾル・GHG トレーサを含まない場合(左)と含む場合(右)を表す。

参考文献

Terasaki, K., and T. Miyoshi, 2017: Assimilating AMSU-A radiances with the NICAM-LETKF. J. Meteor. Soc. Japan, 95, 433-446. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2017-028>

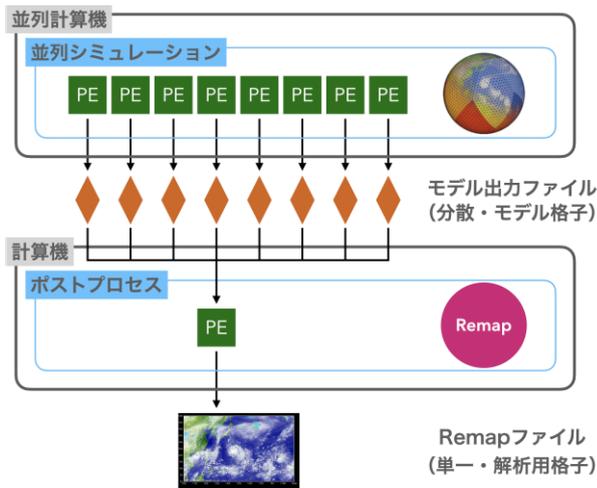
② 高解像度アンサンブルデータ同化データのポストプロセス処理高度化 (サブテーマA、国立環境研究所・理化学研究所)

①の NICAM-LETKF 高解像度アンサンブルデータ実験結果をテーマ1・テーマ2に提供するべく、計算結果のポストプロセスを順次実施した。NICAM のポストプロセスにかかる時間の短縮はテーマ3だけでなく、テーマ2でのシミュレーション実験にも関わる重要な課題であるため、以下に示すカプラーを用いた並列・並行ポストプロセス機能の拡充を実施した。

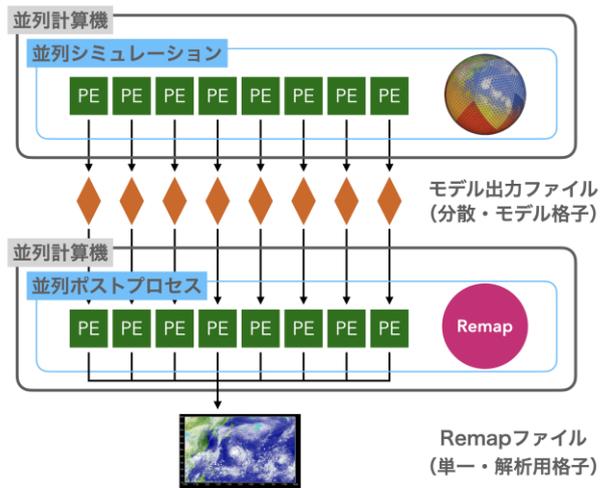
NICAM はファイル IO 性能の最大化のために、分散ファイルでの入出力を採用している。プロセス並列化のためにモデルの3次元格子は水平方向に分割され、入出力するファイルもこの単位に

合わせて分割されている。各プロセスは独立して自分の担当するデータを読み書きするため、ファイル I/O のスループットを最大化することが可能になり、多くのスーパーコンピュータシステム（スパコン）が採用する並列ファイルシステムとの親和性が高く、ファイルステージング機能も有効に活用することが可能になる。一方で分散されたファイルは、データ解析や可視化を行う際に専用のソフトウェアを開発する必要があり、既存のアプリケーション等が使いづらいという難点がある。加えて、NICAM は正二十面体格子系を採用しているため、そのままでは経度方向の平均化や他の気象再解析データとの比較解析を行うことが出来ない。そのため、シミュレーション実行後に緯度経度格子系へ変換（Remap）するポストプロセス操作を実施している。図 E-2-1に、NICAM で採用してきたポストプロセス処理方法の概要を示す。「京」コンピュータ利用開始時には、図の a)に示すように、シミュレーションで出力された結果をポストプロセス用の計算機を用いて、1プロセスまたは数プロセスでの Remap 処理を行っていた。この方法では、計算機を変更するためのデータ転送に時間を要し、また変換処理にかかる時間もシミュレーションが高解像度化するにつれて現実的ではなくなった。長い場合ではデータ転送と変換に数ヶ月必要であった。そこで、シミュレーションを行なったスパコンと同一の計算機でポストプロセス処理を行う図の b)のような方法へ移行した。この方法では、データを他の計算機に転送する時間が省略され、また正二十面体格子から緯度経度格子への内挿処理の並列度を上げることが出来る。ただし、この方法でも一旦シミュレーション結果はファイル出力されるため、ファイル I/O にかかる負荷と時間は依然として大きい。加えて、スパコンの計算ノードは一台一台のメモリ量があまり大きくないため、格子変換後のファイル書き出し時にノード間のデータ集約を行う際にメモリ上限を越えることがある。そのため、通信と書き出しの順番を工夫するなどの開発が行われた。図の c)は、処理順序は b)と同様であるが、シミュレーションの出力結果をスパコンの高速なローカルファイルシステム上に書き出す方法である。例えば、富岳には第一階層のファイルシステムとして、NVMe SSD が搭載されている。富岳の第二階層ファイルシステムは大容量であるが、最大 200GB/s の転送性能を同じボリュームのユーザ全体でシェアするため低速である。一方、第一階層をノード内テンポラリー領域として利用する場合、ノードあたり 293MB/s、125MB/s の読み込み・書き出し性能をほぼフルに発揮することが可能である（Sato et al., 2020）。このような高速なローカルファイルシステムを有効に利用することにより、ファイル I/O 時間を短縮し、シミュレーションからポストプロセス、解析・可視化までの研究のサイクル全体を高速化することが可能になった。同様の手法はシミュレーションとデータ同化の全体を高速化するためにも採用されている（Yashiro et al., 2016, 2020）。

a) ポストプロセス用計算機利用の場合



b) 並列ポストプロセスの場合



c) 並列ポストプロセス(ローカルディスク利用)の場合

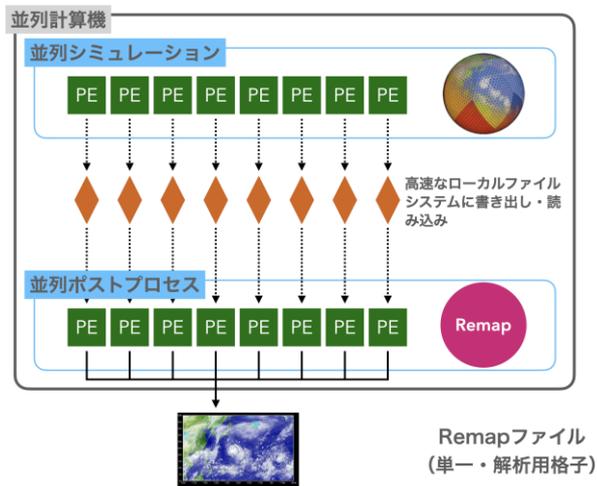


図 E-2-1 : 解析用データ作成のためのポストプロセス計算方法の概略図。

しかし上記のような並列ポストプロセス処理には、シミュレーションの高解像度化に伴って処理に利用するプロセス数が多くなりすぎるという問題点がある。例えば図 E-2-1 の c)では、ローカルファイルシステム上に出力したファイルの移動を極力抑えるために、シミュレーションを行なったプロセス数と同等のプロセス数を用いてポストプロセスを行うが、処理時間の大半は最終的な単一のファイルを1プロセスから書き出す時間に律速されるため、他の多数のプロセスが何もしていない時間が大きくなる。結果としてポストプロセスに計算資源を余分に消費してしまうことになる。Remap 並列処理とファイル書き出しにかかる合計時間を最短にするような、最適なプロセス数での変換には、より高度なシミュレーション・ポストプロセス連携が必要である。また、ローカルファイルシステムへの書き出しが利用できない多くのスパコンでも高速化できるような手法が望まれる。そこで本研究では、カップラーを用いた並列・並行ポストプロセス機能を拡充する開発を行い、その性能について評価を行なった。図 E-2-2 に、並列・並行ポストプロ

セスの概要を示す。本研究では、NICAM と全球海洋モデル COCO を結合するために用いられている汎用カップラーJcup (Arakawa et al., 2014, 2020, 2022) を用いて、NICAM とポストプロセスプログラム CoupledIO を同時実行する。カップラーの機能により、時系列出力のためのデータは逐次多対多の MPI 通信によって CoupledIO 側に転送される。転送されたデータは格子変換され、ファイル出力される。CoupledIO プログラムに用いるプロセス数は負荷に応じて調節可能であるため、最適なプロセス数を選択することで、計算資源を節約し、シミュレーションの実施時間内でポストプロセスを完了することが可能になる。CoupledIO プログラムは「京」コンピュータ時代に開発されたが、ファイル出力部分は MPI-IO を用いた単純バイナリのデータを出力する機能しか持っていなかった。本研究ではこれを拡充し、NetCDF を用いた書き出し機能を追加した。このとき、NetCDF ファイルは気候・予報メタデータ規約 (CF conventions) に準拠したメタデータフォーマットを採用した。各出力変数のモデル内での名称と、CMIP 等で用いられる変数名 (省略名と長い名前) との対応については、JSON 形式で記述されたパラメータテーブルを読み込んで参照することで実現した。NetCDF フォーマットでの出力機能の追加により、ファイルの可逆・不可逆圧縮が可能になり、モデル格子でのファイルを書き出さないことと併せて、本研究課題全体の課題であるストレージエリアの必要容量削減を行う準備が出来たといえる。

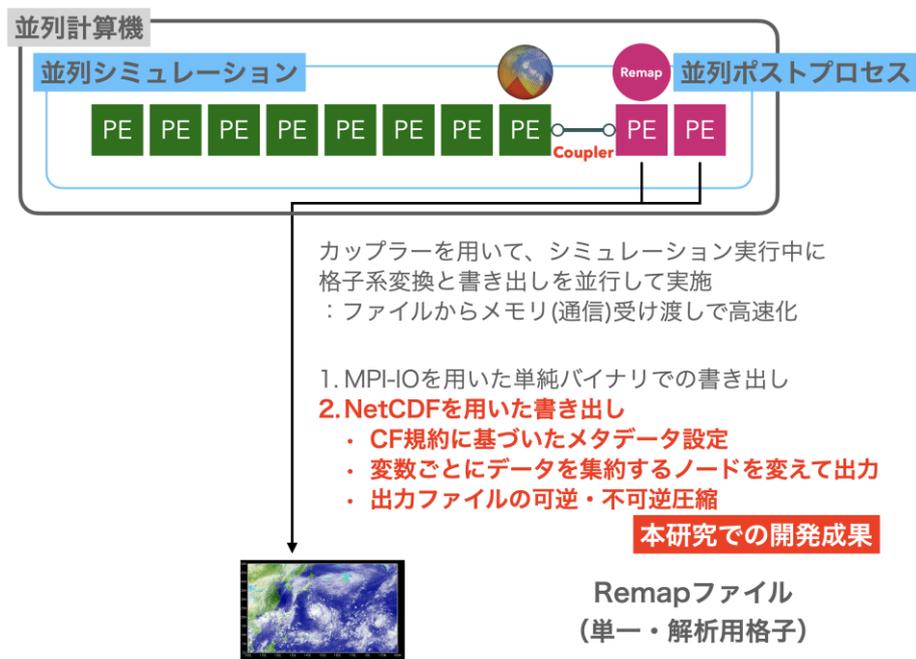


図 E-2-2 : 図 E-2-1 と同様、ただし並列・並行ポストプロセスの場合。

本研究での開発ではさらに、Remap 後の単一ファイル書き出し時間の削減のために、変数毎にデータを集約するノードを変えて出力できるよう改良を行なった。ファイルベースではなく MPI 通信ベースで複雑なデータの送信元・受信先の組み合わせ設定を行うことが出来たのは、カップラーの高度な機能に依るところが大きい。図 E-2-3 に CoupledIO を用いたファイル出力時間の測定結果を示す。この測定では NICAM224km メッシュ、鉛直 40 層を用い、CoupledIO 側のプロセス数を 1 から 16 プロセスまで変化させて実行時間の測定を行なった。出力データは 3 次元変数が

16 種類、2次元変数が 26 種類である。図中の灰色の棒グラフで示した値 (NetCDF get_and_write) が本研究で開発した機能での出力にかかる時間であり、格子系変換と変換後のデータ集約、およびファイル出力時間を合計したものである。このうち、変換後のデータ集約と NetCDF 形式でのファイル出力時間の合計を黄色の棒グラフで示している (NetCDF write_data)。結果より、プロセス数の増加によって格子系変換にかかる時間の若干の削減が見られるが、この問題サイズ・プロセス数の範囲では、ほぼ変わらない時間で一連の処理が行われることが明らかになった。黄色の棒グラフの値はほぼ変化していないように見えるが、より詳しい解析では、出力するプロセスの分散によってファイル出力時間はプロセスが増えるにつれて削減されるが、その前段のデータ集約にかかる時間がプロセス数の増加に伴い増大し、両者の効果が相殺していることがわかった。より高解像度のシミュレーションとの連成では、よりファイル出力を分散した効果が顕著に現れると予想されるため、プロセス数を増加することによる高速化が見込まれる。青とオレンジの棒グラフは、これまでに実装されていた MPI-IO でのファイル出力を用いた場合の結果である。格子系変換にかかる時間 (青: GrADS get_and_write と橙: GrADS write_data の差) は NetCDF 出力の場合の傾向とほぼ同じであるが、MPI-IO を用いた出力部分にかかる時間が長く、さらにプロセス数が増加するほど遅くなる傾向にあり、A64FX システムでの MPI-IO の実装に最適化の余地が多く残されていることを示唆している。

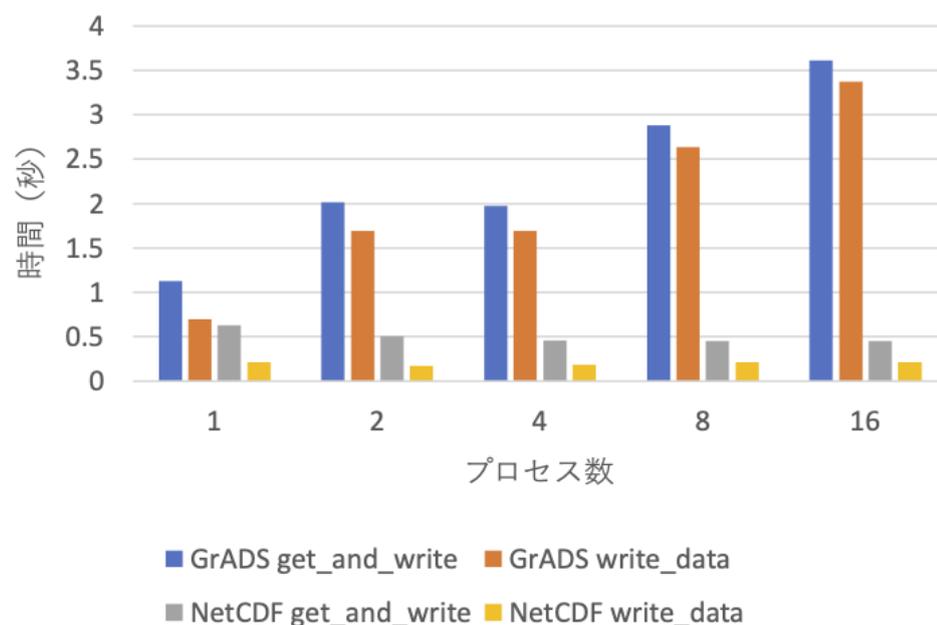


図 E-2-3 : CoupledIO の実行時間評価結果。

参考文献

- Arakawa, T., T. Inoue, and M. Satoh (2014) Performance Evaluation and Case Study of a Coupling Software ppOpen-MATH/MP. *Procedia Computer Science*, 29, 924-935, doi:10.1016/j.procs.2014.05.083.
- Arakawa, T., Inoue, T., Yashiro, H., Satoh, M. (2020). Coupling library Jcup3: its

- philosophy and application Progress in Earth and Planetary Science 7(1), 6.
<https://dx.doi.org/10.1186/s40645-019-0320-z>
- Arakawa, T., H. Yashiro, and K. Nakajima (2022): Development of a coupler h3-Open-UTIL/MP. In International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPCAsia2022). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 72-83. DOI:<https://doi.org/10.1145/3492805.3492809>
- Sato, M., Ishikawa, Y., Tomita, H., Kodama, Y., Odajima, T., Tsuji, M., Yashiro, H., et al. (2020). Co-Design for A64FX Manycore Processor and “Fugaku.” In Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. Atlanta, Georgia: IEEE Press.
<https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/3433701.3433763>
- Yashiro, H., K. Terasaki, T. Miyoshi, and H. Tomita (2016): Performance evaluation of a throughput-aware framework for ensemble data assimilation: the case of NICAM-LETKF, Geoscientific Model Development, Volume 9, issue 7, Page 2293-2300, doi:10.5194/gmd-9-2293-2016.
- Yashiro, H., Terasaki, K., Kawai, Y., Kudo, S., Miyoshi, T., Imamura, T., et al. (2020). A 1024-Member Ensemble Data Assimilation with 3.5-Km Mesh Global Weather Simulations. In Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. Atlanta, Georgia: IEEE Press.
<https://dl.acm.org/doi/10.5555/3433701.3433703>

③ エアロゾルデータ同化 (サブテーマ B、国立環境研究所)

エアロゾルは、大気汚染物質として環境問題を考える上で重要であるだけでなく、太陽・地球放射フラックスを直接散乱・吸収し、あるいは雲凝結核となることで雲の微物理特性を変えて間接的に放射フラックスを変化させるため、気候変動を考える上で重要な物質である。今年度は、5-10年スケールの低解像度・長期でのシミュレーションで重要となる放射収支の再現性向上に向け、先進的なエアロゾルデータ同化で焦点となる雲-エアロゾル相互作用をより詳細に表現可能な、雲微物理スキームを用いた高解像度実験を実施し、またエアロゾル衛星データ同化実験の結果検証を行なった。具体的な研究成果として以下の2つを報告する。

1. NICAM 14km メッシュ解像度での雲-エアロゾル相互作用の比較実験
2. NICAM-LETKF 56km メッシュ解像度でのエアロゾル衛星データ同化の解析結果検証

1. NICAM 14km メッシュ解像度での雲-エアロゾル相互作用の比較実験

全球非静力学モデル NICAM (Tomita and Satoh, 2004; Satoh et al., 2008; Satoh et al., 2014) を用いた大気中エアロゾルのシミュレーションに関して、全球 14km 格子の高解像度で計算されたエアロゾルの再現性は、人工衛星あるいは地上観測の結果と比べても概ね良好であることがこれまでの研究によって確かめられている (Goto et al., 2020)。本研究では、エアロゾルと雲・降水の相互作用に着目し、NICAM の雲・降水に関するモデル表現を変えたときに、放射フラックスのモデル再現性がどのように変化するかを調べた。

用いたモデルは、NICAM で大気汚染物質を計算することができる NICAM-Chem (Goto et al., 2018) であり、搭載されたエアロゾルモジュールは SPRINTARS (Takemura et al., 2005) を基にして開発された (Suzuki et al., 2008)。NICAM のバージョンはNICAM.19 で、雲微物理モジュールは NSW6 (Tomita, 2008)、雲から雨に変換される auto-conversion は標準版では降水効率と雲凝結核の逆数が線形関係にある Berry (1968)を用いたが、本研究の感度実験として降水効率と雲凝結核の逆数が非線形関係にある Khairoutdinov and Kogan (2000)も用いた。エアロゾルを考慮するかしないかの 2 通りと 2 種類の Auto-conversion を組み合わせて合計 4 つのシミュレーションを実施した。モデル解像度は全球 14km 格子鉛直 78 層で、7 月の 1 ヶ月間を積分した。

図 E-3-1 には、雲水量 (海上のみ)・降水量・低層雲量・外向き短波放射フラックス・外向き雲短波放射フラックスの帯状年平均に関して、NICAM による 4 種類のシミュレーション結果と観測結果を示した。雲水量に注目すると、2 種類の Auto-conversion の式の違いは雲水量再現性に大きな違いをもたらすことがわかった。これまで NICAM で標準的に用いられてきた Berry (1968) を用いると、MAC-TWP の観測結果に比べてかなり過小評価であることがわかり、より高度化された Khairoutdinov and Kogan (2000)を用いるのが良いことが示された。なお、エアロゾルの有無によっても雲水量の違いが現れ、Khairoutdinov and Kogan (2000)を用いた北緯 50 度付近では 20 gm^{-2} 程度の違いが生じていたが、エアロゾルの差は Auto-conversion の差よりも雲水量の変化は小さかった。雲水量だけではなく、関連する他の物理量に関して、エアロゾルによる

結果の差は、Auto-conversion との差よりも相対的に小さいこともわかった。また降水量は、4 つのシミュレーション結果に大きな違いはなく、観測との違いはエアロゾル及び Auto-conversion モジュールの違いでは説明できなかった。低層の雲量は、雲水量と同様の傾向が見られ、Khairoutdinov and Kogan (2000)を用いることで雲量が増加したが、ISCCP で得られた観測結果との差はエアロゾル及び Auto-conversion モジュールの違いでは説明できなかった。短波放射フラックスは、雲水量及び雲量の違いが反映され、Khairoutdinov and Kogan (2000)を用いることで短波放射フラックスが増加した。南半球 (7 月なので冬半球) では Berry (1968)を用いた結果の方が CERES による観測結果に近かったが、北半球 (7 月なので夏半球) では Khairoutdinov and Kogan (2000) 用いた結果の方が CERES による観測結果に近かった。特に雲短波放射フラックスに関しては、Auto-conversion モジュールの違いによって、北緯 50 度付近では 30 Wm^{-2} 程度であり、大きな差が生じることが明らかとなった。Auto-conversion モジュールは、雲微物理特性の観点から見ると、Khairoutdinov and Kogan (2000)の方が観測をよく再現できることがわかっている (Suzuki et al., 2015)、今後は Khairoutdinov and Kogan (2000)を標準とした

シミュレーションを実施する方針とした。

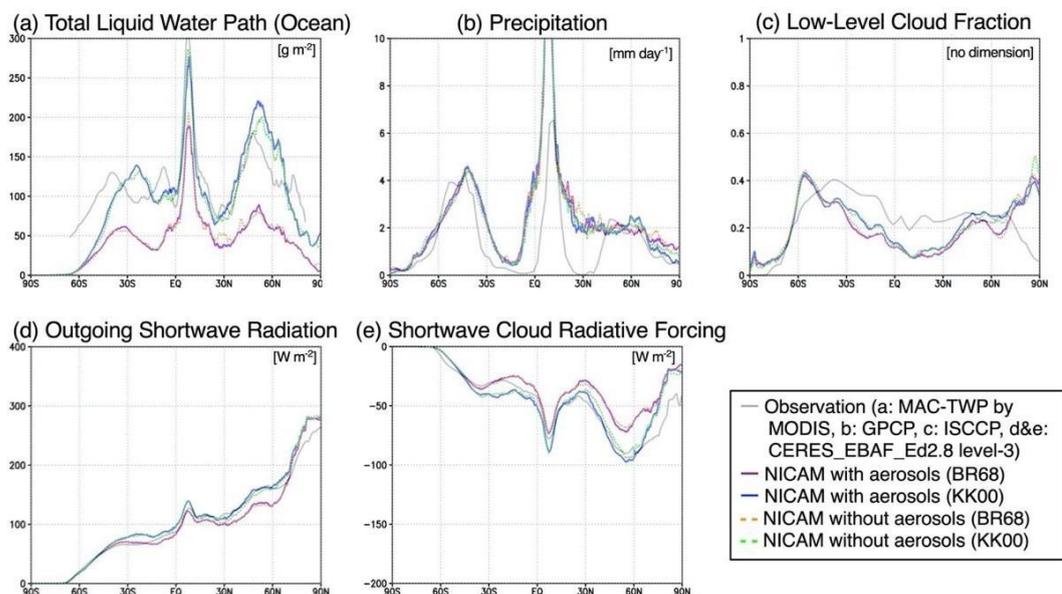


図 E-3-1 : (a) 雲水量 (海上のみ)、(b) 降水量、(c) 低層雲量、(d) 外向き短波放射フラックス、(e) 外向き雲短波放射フラックス、の帯状年平均分布図。各パネルでは、NICAM による 4 種類のシミュレーション結果 (エアロゾル有無及び 2 種類の auto-conversion モジュールで、BR68 は Berry (1968) を表し、KK00 は Khairoutdinov and Kogan (2000) の Auto-conversion モジュールを示す) と観測結果 (雲水量は MODIS から推定された MAC-TWP、降水量は GPCP、雲量は ISCCP、放射フラックスは CERES) が示されており、線の違いは右下のパネルに記載した。

2. NICAM-LETKF 56km メッシュ解像度でのエアロゾル衛星データ同化の解析結果検証

NICAM-Chem の低解像度モード (全球 56km 格子) を用いて、2018 年春季にアジアで発生した大規模なダストイベントを対象としたエアロゾルデータ同化を実施した (Cheng et al., 2021)。大気汚染物質のデータ同化研究においては、全球 56km 解像度は高解像度の部類にある。用いた同化手法は局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF: Hunt et al., 2007; Miyoshi et al., 2007) をエアロゾルに適用したものであり、中国科学院大気物理研究所・国立環境研究所で継続して開発・改良してきた (e.g., Dai et al., 2019)。同化に利用した観測データは、極軌道衛星 GCOM-C/SGLI から得られたエアロゾル成果物 (Yoshida et al., 2021) に含まれているエアロゾル光学的厚さ (AOT) である。同化結果の検証は、同化に用いていない別の観測である地上ライダーネットワーク (AD-net: the Asian dust and aerosol lidar observation network; Shimizu et al., 2016) や地上 AOT 観測網 (AERONET: Holben et al., 1998) との比較を通じて実施した。

図 E-3-2 は、日本にある AERONET のうちの大阪サイトにおけるモデル検証結果を示している。この図から、大阪では 3 月 29 日と 4 月 1 日に AOT 高値が AERONET で観測されたが、3 月 29 日は

NICAM-Chem が過大評価で、4月1日には過小評価傾向であった。GCOM-C/SGLI の AOT を同化することで、AERONET 観測とのバイアスは軽減されるようになることが確かめられた。実際に、3月28日～3月31日と4月1日～4月3日の両期間における AERONET 観測との RMSE を計算すると、同化によって RMSE が小さくなることがわかった。図 E-3-3 は、得られた NICAM-Chem 同化結果をさらに検証するために、3次元のエアロゾル情報（エアロゾル消散係数）に関しても大阪での時系列比較を行った。同化することによって、3月31日の高度 2-4 km に見られるダストを再現することが確かめられた。しかし、地表面付近に見られる高濃度エアロゾルは、同化の有無に関わらず、観測で見られる複雑な鉛直構造をうまく再現することはできなかった。これは、同化している GCOM-C/SGLI の AOT が 2次元量であり、同化によって複雑な鉛直分布を再現することが難しいためである。これを軽減するためには、NICAM-Chem モデル自身の精緻化を進める必要がある。

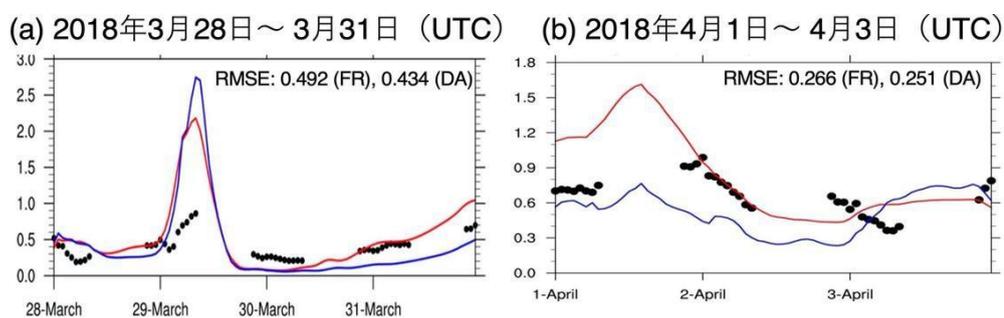


図 E-3-2: (a) 2018 年 3 月 28 日～ 3 月 31 日 (UTC) 及び(b) 2018 年 4 月 1 日～ 4 月 3 日 (UTC) の期間で大阪における AOT の時系列分布。図には、NICAM-Chem のエアロゾル同化なしのシミュレーション (青線; FR)、同化ありのシミュレーション (赤線; DA)、AERONET 地上観測 (黒丸) の結果が示されている。図中の数値は期間中のシミュレーションと観測の RMSE (不確実性) を示す。図は Cheng et al. (2021) の結果を一部修正したものである。

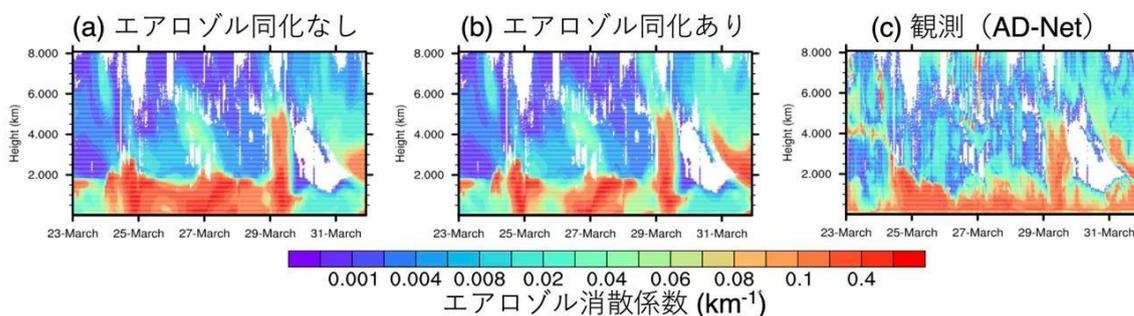


図 E-3-3: 大阪におけるエアロゾル消散係数の時系列高度分布で、(a) NICAM-Chem のエアロゾル同化なしのシミュレーション結果、(b) 同化ありのシミュレーション結果、(c) AD-net ライダー観測。図は Cheng et al. (2021) の結果を一部修正したものである。

参考文献

- Berry, E. X., Modification of the Warm Rain Process. In Proceedings first conf. on weather modification Albany, NY. American Meteorological Society paper presented at 1st National Conference on Weather Modification, April 28-May 1, pp. 81-85 (1968).
- Cheng, Y., et al., Enhanced simulation of an Asian dust storm by assimilating GCOM-C observations, *Remote Sensing*, 13(15), 3020 (2021).
- Dai T., et al., Hourly aerosol assimilation of Himawari-8 AOT using the four-dimensional local ensemble transform Kalman filter. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(3), 680-711 (2019).
- Goto, D., et al., Global aerosol simulations using NICAM.16 on a 14 km grid spacing for a climate study: improved and remaining issues relative to a lower-resolution model. *Geosci. model Dev.*, 13, 3731-3768 (2020).
- Goto D., et al. Multi-scale Simulations of Atmospheric Pollutants Using a Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model. In: Vadrevu K., et al. (eds) *Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia*. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, Cham (2018).
- Holben, B.N. et al., AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sens. Environ.* 66, 1-16. (1998).
- Hunt, B.R. et al., I. Efficient Data Assimilation for Spatiotemporal Chaos: A Local Ensemble Transform Kalman Filter. *Phys. D Nonlinear Phenom.* 230, 112-126 (2007).
- Khairoutdinov, M., and Y. Kogan, A new cloud physics parameterization in a large-eddy simulation model of marine stratocumulus. *Monthly Weather Review*, 128, 229-243 (2000).
- Miyoshi, T. et al., Localizing the Error Covariance by Physical Distances within a Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF). *SOLA*, 3, 89-92. (2007).
- Sato, M., et al., The Non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: description and development, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 1, 18 (2014).
- Shimizu, A. et al., Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia. *Opt. Eng.*, 56, 031219. (2016).
- Suzuki, K., et al., Global cloud-system resolving simulation of aerosol effect on warm clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19817 (2008).
- Suzuki, K., et al., Evaluation of the warm rain formation process in global models with satellite observations, *J. Atmos. Sci.*, 72, 3996-4014 (2015).
- Takemura, T., et al., Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model, *J. Geophys. Res.*, 110, D02202 (2005)
- Tomita, H., New microphysics with five and six categories with diagnostic generation of cloud ice, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 86A, 121-142 (2008)
- Yoshida, M. et al., Murakami, H. Satellite Retrieval of Aerosol Combined with Assimilated Forecast. *Atmos. Chem. Phys.* 21, 1797-1813 (2021)

④ 水安定同位体比データ同化（サブテーマ B、国立環境研究所）

水の安定同位体 ($^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ と $\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$) は、普通の水分子 ($^1\text{H}^{16}\text{O}$) と比較して、飽和水蒸気圧や拡散係数が小さい。このため、蒸発や凝結の際に、より重い水分子である水の安定同位体の濃度が液体水に偏る分別という性質を持つ。水の安定同位体に対する水分子の存在割合である水の安定同位体比は、水蒸気が降水するほど低くなる。大気中の水蒸気は蒸留の程度が大きいため、その水蒸気の変化が凝縮や蒸発といった相変化によるものなのか、それとも他の水蒸気との混合であるのかを区別することができる。本研究では、このような水の安定同位体の変動を理解し、それを数値気象予報の高度化に活かすため、衛星で観測された水同位体データを用いた気象モデルにデータ同化することで、水の安定同位体比が数値気象予報の改善に貢献できるのかを調査するものである。昨年度までに、水の安定同位体比を全球雲システム解像モデル NICAM に導入し、NICAM-WISO を開発した。今年度は、開発したモデルを用いた実験を行なった。具体的には下記の通りである。

1. NICAM-WISO 気候実験 : NICAM-WISO による気候実験を行い、モデルの大気水循環がもつバイアスや不確実性を明らかにする。
2. NICAM-WISO データ同化システムの開発 : NICAM-WISO を用いたデータ同化システムを開発し、水同位体データ同化の初期実験を行う。

1. NICAM-WISO 気候実験

昨年度までに開発したNICAM-WISO を用いた気候実験をおこなった。空間解像度は GL07 (約 56km)、鉛直 78 層に設定し、12 年間のシミュレーション (1979 年~1989 年) を行った。はじめの 1 年はスピナップとして除外し、後半 10 年間分の平均値を気候値とした。また、空間解像度を変えたときの影響を評価するために、空間解像度を GL05 (約 256km) および GL09 (約 14km) としたシミュレーションを実施した。これらシミュレーション期間は 1979 年~1982 年までとし、後半 3 年を平均し解析に利用した。

図 E-4-1 (a) にシミュレートされた降水中の水素安定同位体比 ($\delta^2\text{H}$) の全球分布と観測された値とを示す。モデルは特徴的な同位体分布の傾向をよく再現していた。例えば、降水同位体比は熱帯域で高く、高緯度域ほど低くなる緯度効果が見られる。また、ユーラシア大陸の西岸から東岸にかけて同位体比が低下する内陸効果やヒマラヤなどの高標高域で同位体比が低下する高度効果が見られた。このような同位体分布の特徴により、シミュレートされた降水同位体比は観測データとも近く、空間方向にとった相関係数は 0.88 であった (図 E-4-1 (b))。ただし、いくつかの観測点において、モデルは降水 $\delta^2\text{H}$ を過大評価していることが明らかになった。1 つは高標高域の観測点 (赤丸の領域) であり、これらはアンデス北部の高標高域であった。もう 1 つは寒冷域の観測地点であり、これらにはシベリアやグリーンランドが含まれていた。

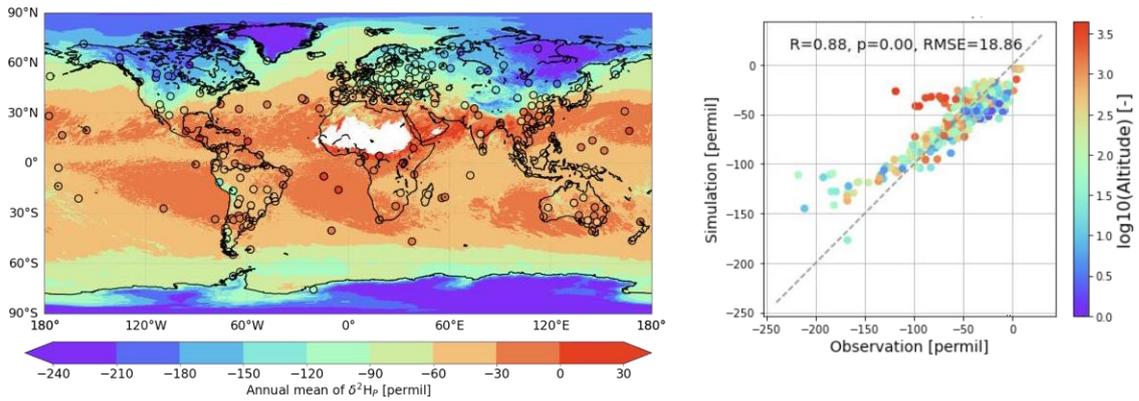


図 E-4-1 : (a) 年平均した降水 $\delta^2\text{H}$ の空間分布。シェードは計算値、プロットは観測値である。(b) 計算および観測された降水 $\delta^2\text{H}$ の比較。色の違いは、観測点の標高の違いを意味する。

高標高域および寒冷域で確認されたモデルの過大評価について、空間解像度を変えることで改善されるかを確認した。図 E-4-2 に、それぞれのシミュレーションから計算された降水 $\delta^2\text{H}$ と観測値との比較結果を示す。空間解像度を変えた影響は、アンデス北部の高標高域において特に顕著であった。この地域のバイアスは、空間解像度が高くなるほど改善された。

降水の安定同位体比はもとなる水蒸気が蒸留するほど低くなるため、空間解像度を高くしたことで、観測地点の上流域にあたる水循環過程の改善が降水同位体の過大バイアスを低くしたことに繋がったと考えられる。ただし、GL09 のシミュレーションでも、依然として過大なバイアスは残っており、アンデス北部域の水循環を再現するには更に高い解像度が必要だと予想される。その一方、高緯度域のバイアスについては、降水同位体比のバイアスが改善されなかった。これは空間解像度とは異なる影響、物理課程の影響が考えられる。ここでは、雲微物理過程について焦点をあて、そのバイアスについて考察する。

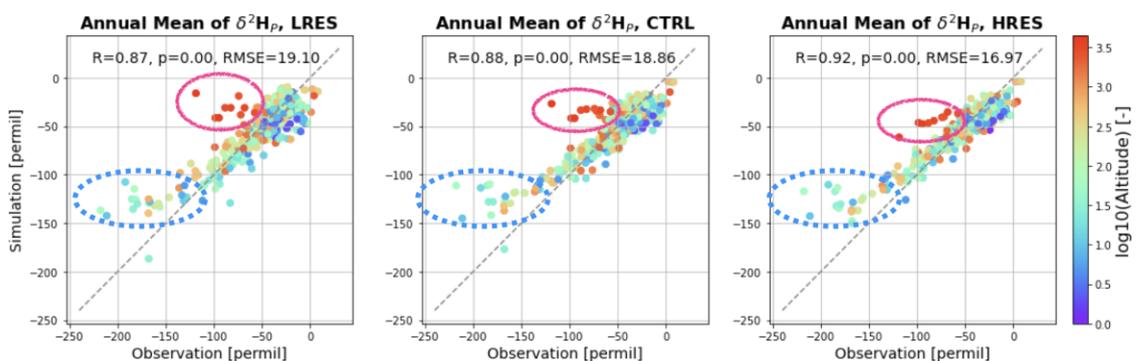


図 E-4-2 : 計算および観測された降水 $\delta^2\text{H}$ の比較。左から、GL05、GL07、GL09 シミュレーションによる結果。

シミュレートされた降水の安定同位体比の特徴を調べるために、図 E-4-3 に δ -ダイアグラムを示す。シミュレートおよび観測された降水の安定同位体比は、黒い実線である天水線（傾き 8、切片 10）付近に分布していた。シミュレートされた降水同位体比は、観測されたものをよく再現

できているが、大きく2つの違いが見出された。1つ目は、シミュレートされた降水同位体比の範囲が小さいことである。降水同位体比の計算値の範囲は-221~29‰であるのに対し、観測された範囲は-325~31‰であった。降水の安定同位体比は降水するほど低くなるので、降水同位体比の変動範囲が小さいのは、特に高緯度域であまり降水してない可能性を示唆するものである。現に、高緯度域ではシミュレートされた可降水量は過大であり、特に対流圏中層で顕著な湿潤バイアスが確認された(図示せず)。そのため、降水の安定同位体比の範囲が小さいのは、対流圏中層の湿潤過程に関連した不確実性が考えられる。 δ -ダイアグラム上におけるもう1つの違いは、天水線に対する降水の安定同位体比の分布傾向の違いである。観測値は天水線付近に満遍なく分布しているが、気温0°C以下において、計算値は天水線の上部に分布しやすい傾向が見られる。低温下で、水蒸気と氷との間で分別するほど、天水線の上に分布することが理論的に知られており、0°C以下のサンプルが一般的にシフトしているのは、水蒸気と氷との間での過剰な同位体分別が指摘される。このような分別が生じる要因としては、モデルの中に氷が過剰に生成されている可能性が考えられる。

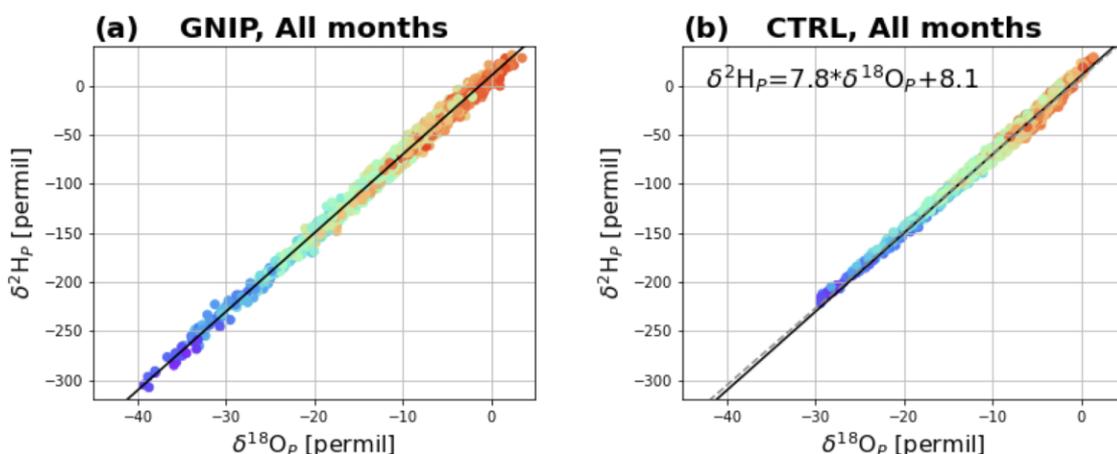


図 E-4-3 : 観測および計算された δ -ダイアグラム。

2. NICAM-WISO データ同化システムの開発

衛星によるリトリバルされた水同位体情報をもとに数値気象予報を改善するために、NICAM-WISO によるデータ同化システムの開発をおこなった。具体的には、各水物質の安定同位体比をデータ同化変数として追加した。NICAM-WISO の中では、水の安定同位体の混合比を予報変数として取り扱っているが、ここでは水の安定同位体比を同化変数として利用した。水の安定同位体の混合比は、普通の水の混合比とほぼ線形の関係にあり、水の混合比以上の情報を抽出することが難しいためである。

データ同化システムに水の安定同位体を同化変数として実装した後、IASI によってリトリバルされたデータを想定して、NICAM-WISO によるデータ同化の初期実験を行なった。

シミュレーションの空間解像度は GL05 (約 256km)、鉛直層数は 78 層、対流スキームと大規模凝結スキームを用いて行なった。初期実験では、アンサンブル数を 64 とし、10日ほどスピニングを取った後に行なった。データ同化システムにあたる IASI は、対流圏中層に感度のあるセンサーで

あり、高度約 4.5km における水蒸気量と同位体比データを取得することができる。

対流圏中層の水蒸気量および水蒸気同位体比をデータ同化することで、水蒸気同位体比の場が解析されるのかを確認し、システムが動作しているかを確認した。初期実験の結果を図 E-4-4に示す。実験開始して1日後の結果であるが、水蒸気同位体比のデータ同化がうまく機能していることがわかった。データ同化なしの場合、水蒸気同位体比は平均化されスムーズな分布となるが、データ同化することで、参照した気象場に近づくように水蒸気同位体比が解析されるため、水蒸気同位体比にピークが見られる。例えば、ヒマラヤの北部に水蒸気同位体比が低くなっている領域があり、それはこのあたりを通過する低気圧と関連していた。今後、アンサンブル数を大幅に増やし、実験期間を長くしたデータ同化実験を行う。アンサンブル数を増やすことで、ローカリゼーション・ファクターをゆるくすることができるため、より広い範囲に水の安定同位体比の影響を含めた解析が行えると考えられる。

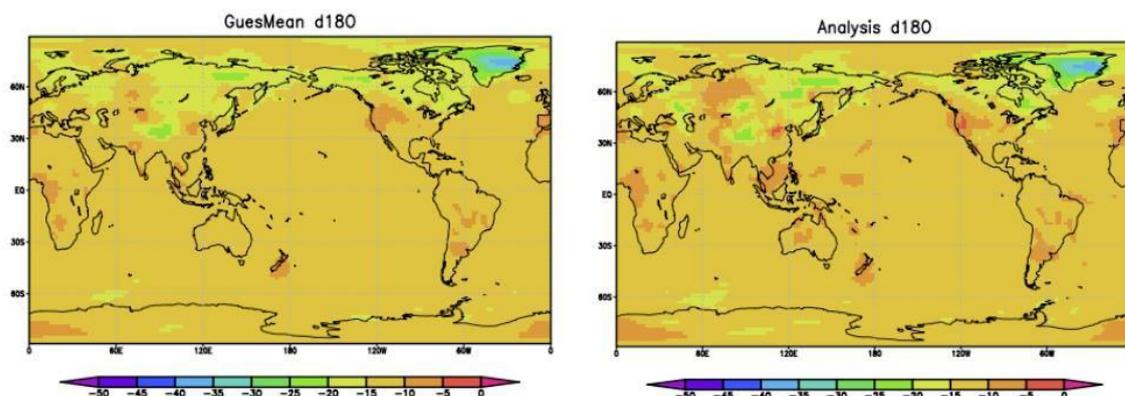


図 E-4-4：解析前後の水蒸気同位体比の分布。

2-2-4. プロジェクトの総合的推進

(1) 成果概要

プロジェクトの総合的推進として、プロジェクト全体の連携を密にかつ円滑に運営するため、担当責任者間の意見調整のための会議「富岳コアミーティング」を7回開催し、文部科学省と担当責任者間との間の連絡窓口を務めた。実施項目ごとの研究会の開催等の実施項目を補助管理し、参画各機関の連携・調整を推進した。

外部有識者及びオブザーバから構成される本課題の諮問委員会を2022年3月11日に開催し、実施計画および本課題の推進等に対する提言・指導を受けた。その際、2022年1月12日に実施した「富岳」成果創出加速プログラム課題205の進捗状況ヒアリングの説明資料、ヒアリングにおけるフィードバックコメント、コメントに対する本課題テーマ責任者による回答を提示した。今後、諮問委員会の意見を反映することにより、プロジェクトを円滑に推進することができる。

本課題で得られた成果等を集約・管理し、得られた成果を通じて、気象庁「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」や「気候変動適応計画」への貢献を進めた。具体的には、本課題の研究成果を気象庁「局地

アンサンブル予報システム」の開発に活用を検討し、気象庁においても「富岳」の利用を拡充し、線状降水帯に資する数値予報モデルの開発を加速化している。また、気候変動適応計画に基づき環境省が推し進める気候変動適応情報プラットフォームへの領域・全球大アンサンブル実験結果の登録について検討を進めた。

本プロジェクトを通じて、若手研究者や多様な人材の育成を図るために、東京大学や理化学研究所においてインターンシップやオンラインスクールを開催した。本プロジェクトで得られた成果について、2021年9月4日に一般向けのシンポジウム「第2回シンポジウム～『富岳』× 極端気象予測 ～『富岳』による極端気象予測の新しい世界～」、2022年3月11日に第2回成果報告会を開催し、これらの広報活動を通じて積極的に公表した。広報活動においては、ホームページ(<https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/>)やTwitter, FacebookのSocial Networking Service等の広報媒体を通じて、本プロジェクトの成果を広く広報した。

(2) 実施体制

本課題の実施体制は、図F-1のとおりである。

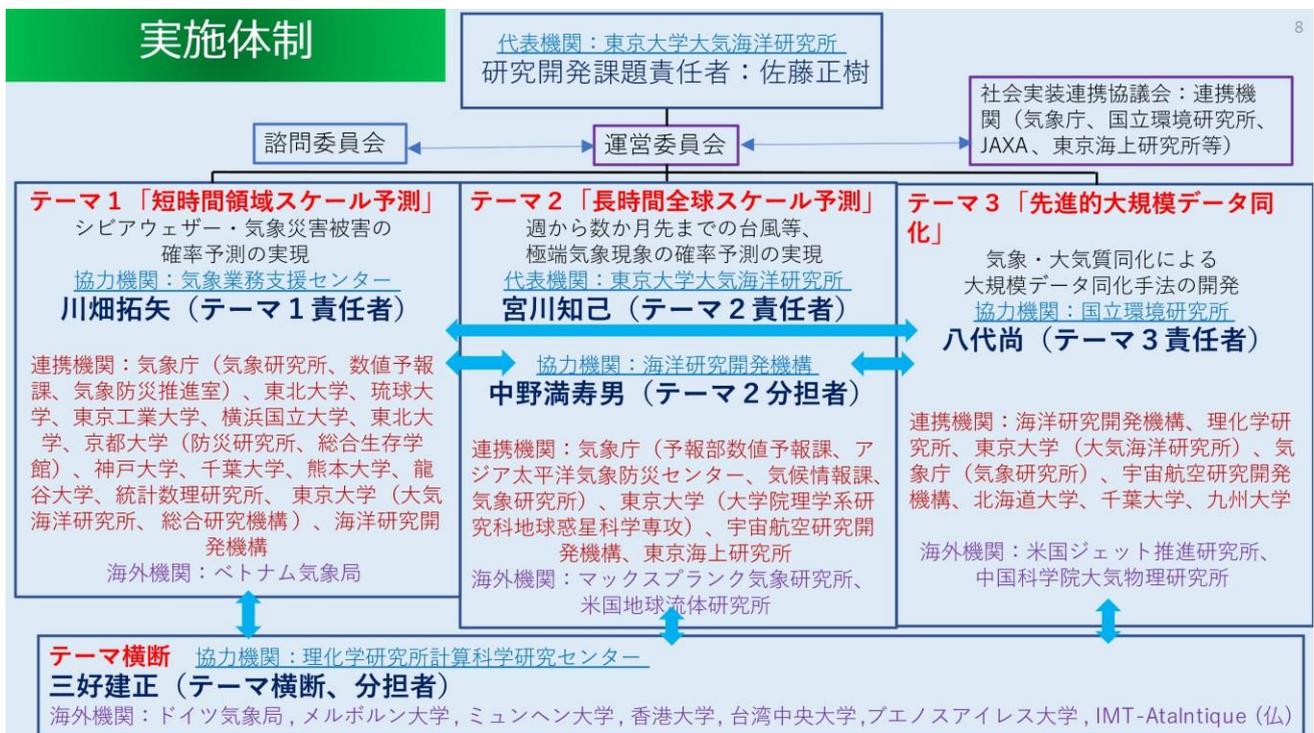


図 F-1: 実施体制

(3) 成果内容

① プロジェクトの総合的推進の活動

①-1. 統括的な課題推進

文部科学省・RISTと担当責任者間との間の連絡窓口を務め、メンバー登録・報告書作成等の事務手続きを一元的に統括し、担当責任者間との間の連絡窓口を務めた。

①-2. 運営委員会

プロジェクト全体の連携を密にかつ円滑に運営するため、担当責任者間の意見調整のための会議運営委員会(「富岳コアミーティング」とよぶ)を7回開催した。

①-3. 諮問委員会 2021年3月16日開催

総合的推進として、外部有識者及びオブザーバから構成される本課題の諮問委員会を開催し、実施計画および本課題の推進等に対する提言・指導を受けた。今後、諮問委員会の意見を反映することにより、プロジェクトを円滑に推進することができる。

①-4. 連携・調整

実施項目ごとの研究会の開催等の実施項目を補助管理し、参画各機関の連携・調整を推進した。

①-5. シンポジウムの企画・開催

2020年9月26日に第1回シンポジウム「豪雨・台風の高度な予測をめざして」を企画・開催した。事務局として、開催に関して、ホームページ、SNS、各種メーリングリスト等による広報アナウンス、参加者登録作業・登録者への連絡、オンライン配信作業、発表資料の公開等を総合的に担当した。

①-6. 成果発表会の企画・開催

2021年3月16日に第1回成果発表会を企画・開催した。事務局として、開催に関して、ホームページ、SNS、各種メーリングリスト等による広報アナウンス、参加者登録作業・登録者への連絡、オンライン配信作業、発表資料の公開等を総合的に担当した。

② 社会実装連携

本研究の成果の社会実装について、関係機関と協議を行った。

②-1. 気象庁との意見交換、気象庁による「富岳」の利用促進(テーマ1)

本課題の研究成果を、気象庁「局地アンサンブル予報システム」の開発に活用を進めている。気象庁においても、「富岳」の利用を拡充し、線状降水帯に資する数値予報モデルの開発を加速化している。具体的には以下の取り組みを進めている。

- ・ 高解像度数値予報モデル(解像度1km)の開発
- ・ 気象庁スーパーコンピュータと「富岳」間の回線を整備し、梅雨期を中心に、開発中の数値予報モデルを「富岳」上でリアルタイムで実行
- ・ 赤外サウンダデータ、ひまわり大気追跡風データ等の高密度・高頻度データの同化技術開発、二重偏波レーダーデータの偏波情報の利用開発。

気象庁において、「富岳」を利用した大学等と連携した開発も想定している。具体的には、「富岳」の計算機資源・数値予報実行環境を活用し、大学・研究機関等と連携して技術開発を推進している。また、「富岳」における数値予報モデルの実行結果を大学・研究機関等でも解析し、線状降水帯のメカニズム解明や、数値予報モデル改善に資する知見の提供を行っている。

気象庁「線状降水帯予測精度向上ワーキンググループ(第3回)」(2021年12月24日開催)資料2「線状降水帯の予測精度向上に向けた取組の強化・加速化対策」において、本課題との連携が示されている。

②-2. 気象庁(気候情報課)(テーマ2)

月～季節スケール予測についての意見交換を行った。

第2回「富岳」気象テーマ2x 気象庁研究会(2022年1月31日開催)を実施した。

②-3. 東京海上日動火災保険(テーマ2)

東京海上研究所の主任研究員と、主な風水災などによる保険金支払い状況や損害保険業界における需要についての情報交換、および台風季節予測についての共同研究を継続的に実施。

②-4. JAXA との連携 (テーマ3)

JAXA で運用中の「世界の気象リアルタイム NEXRA」の開発、改良へ貢献した。テーマ3で新たに開発した新 NICAM-LETKF システムを、NEXRA をアップデートする形で移植を行った。今後も緊密に連携し、本プロジェクトで得られた知見を提供していく。また NEXRA で創出されたアンサンブルデータを、本課題のアンサンブル実験の初期値として利用した。

②-5. 国立環境研究所 (テーマ3)

本加速課題研究成果は、温室効果ガス(GHG)観測衛星 GOSAT プロジェクトと連携した GHG 排出量推定に活用することを計画しており、パリ協定に基づくグローバルストックテイクに貢献。

②-6. 気候変動適応計画 (テーマ3)

気候変動適応計画に基づき環境省が推し進める気候変動適応情報プラットフォームへの領域・全球大アンサンブル実験結果の登録について検討を進めた。

③ 人材育成への取り組み

本課題の活動において、以下の人材育成の取り組みを実施した。

③-1. NICAM 開発者会議・tutorial

2022年1月18, 20, 21日、参加者30名。

全球非静力学大気モデルNICAM と海洋モデルCOCO との結合モデルNICOCO の実験、NICAM 同化システムNICAM-LETKF の実験。講師：八代尚(国立環境研究所)他

2020年9月2-30日、参加者70名

③-2. AORI サイエンスキャンプ

講師：佐藤正樹(教授)、松岸修平(学術専門職員)他

2022年2月22-25日、参加者20名。

実施場所：東京大学大気海洋研究所

③-3. AORI インターンシップ：NICAM 講習会

2021年8月17-18日実施(参加者5名)

2022年3月14-15, 30-31日実施(参加者9名)

全球非静力学大気モデル NICAM の方程式系・差分法・構造の理解、および NICAM を用いた台風等の数値実験、解析を行う。

講師：佐藤正樹(教授)、宮川知己(准教授)、升永竜介(特任研究員)、松岸修平(学術専門職員)他

実施場所：東京大学大気海洋研究所

③-4. 2021年度「理研データ同化オンラインスクール(基礎編)」

2021年9月1-29日実施(毎週水曜午前：講義、毎週火曜・金曜午前：チュータリング)

(受講生6名、聴講生10名)

全球非静力学大気モデル NICAM の方程式系・差分法・構造の理解、および NICAM を用いた台風等の数値実験、解析を行う。

講師：三好建正(理化学研究所)

実施場所：Zoom を使用したオンライン開催

④ 広報活動

④-1. Web ページ・SNS 作成及び運用

本課題の研究成果や活動等を広く広報するために、Web ページ（<https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/index.html>）を通じ、プレスリリース等の研究成果やイベント開催情報を随時更新し最新の情報を周知した。令和3 年度中に、当該Web ページをリニューアルした。Web ページ作成と同時にFacebook、Twitter を作成し、本課題 Web ページの情報に加え、スーパーコンピュータ「富岳」に関する情報等も周知した。

図 F-2: 本課題の Web ページ表紙ページ。



④-2. シンポジウムの開催

本プロジェクトでの研究成果を広く一般の方々に周知するため、令和 3 年 9 月 4 日にオンラインにて第 2 回シンポジウム「『富岳』× 極端気象予測 ～『富岳』による極端気象予測の新しい世界～」を開催した（図 F-2）。約 200 名の一般から参加いただいた。本シンポジウムでは、より高精度な「線状降水帯」の事前予測、

「スーパー台風」の日本への襲来予測等の実現を目指し、スーパーコンピュータ「富岳」を用いて、近年激甚化する集中豪雨・台風等の極端気象現象からの防災・減災を実現するための数値予測研究を進めていることを周知するとともに、それまでの研究成果を報告した（図 F-3）。

図 F-3: 第 2 回シンポジウムリーフレット

「富岳」成果創出加速プログラム
防災・減災に資する大アンサンブル気象・大気環境予測

提供：情報通信研究機構（NICT）

「富岳」× 極端気象予測
 ～「富岳」による極端気象予測の新しい世界～

2021年
 9月4日(土)
 13:30▶16:30

事前申込
 参加無料

8/25 締切

オンラインイベント

お申込み <https://resd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/sympo2021.html>
 詳細・お申込みは上記アドレスにアクセス下さい。
 ※定員になり次第締め切らせていただきます

主催 東京大学 大気海洋研究所
 後援 一般財団法人 高度情報科学技術研究機構
 お問合せ 東京大学大気海洋研究所 富岳気象課題事務局
 メールアドレス：fugakuatmos@gmail.com
 ホームページ：https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/index.html

プログラム

13:30-13:35 ご挨拶
 宅間 裕子（文部科学省研究振興局参事官（情報担当）付 計算科学技術推進室長）

13:35-13:45 「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の
 大アンサンブル気象・大気環境予測」課題の紹介報告
 【司会】寛川知己 東京大学 大気海洋研究所
 佐藤 正樹（組織代表）（東京大学 大気海洋研究所・教授）
 昨年より開始した「富岳」成果創出加速プログラムの本研究班では、集中豪雨や台風等の極端気象予測の向上のために、「富岳」による高精度の大アンサンブルシミュレーションを行ってきました。本講演では、今夏の顕著な気象現象を振り返るとともに、本演壇でどのように極端気象予測の向上に取り組んでいるか紹介いたします。

13:45-14:25 ～テーマ1～「次世代の数値予報に向けた気象モデルの開発」
 佐藤 隆祐（北海道大学理学部地球惑星科学部門・特任准教授）
 数値予報は高度に電子化された社会において大きな脅威です。また防災をはじめとした公共交通機関の安全運行のために、高い精度で予測することが求められています。しかしながら現在の数値天気予報では雲を表現できていません。北海道大学では1～2日前に雲精度を精度よく予測するために雲を直接扱う気象モデルの開発をしています。この気象モデルと富岳を用いた短期的な計算結果の紹介や、将来の雲予測に関する展望について紹介いたします。

14:25-14:40 ～Topics～「富岳」を使ったゲリラ豪雨予報
 三好 健正【テーマ組織代表】（理化学研究所 計算科学センター データ同化研究チーム
 ・チームリーダー）
 2021年7月20日から8月8日までと8月24日から9月5日までの期間、演壇において30秒ごとに更新する30分後までの超高速性数値降水予報のリアルタイム検証実験を行っています。「富岳」を生かすことで前年より20倍大きな1000通りのアンサンブル計算を行い、システム全体を改良しました。また、30分後までの予報を10通り計算し、確率的な予報を行いました。この発表では、本実験について紹介します。

14:40-14:45 質疑応答
 14:45-14:55 休憩

14:55-15:35 ～テーマ2～「令和元年以降半島台風の発生前からの予測シミュレーション」
 山田 洋平（海洋研究開発機構 地球環境部門・特任研究員）
 令和2年9月15日や令和3年9月15日に発生した、千島列島に大きな被害をもたらした「富岳」を用いて令和元年以降半島台風を対象とした2週間から1か月の1000通りの全気象観測データ同化シミュレーションを実施しました。台風発生以前の段階からシミュレートした結果、令和元年以降半島台風と同様に発生し、日本に接近するケースが考えられていたとわかりました。特に、2週間前の段階から、従来の半島半島台風のように強い勢力を維持して関東地方を通過する予測もありました。1000通りの実験を通して、台風の発生、発達、経路は大規模な大気の大気環境場の影響を受けることがわかります。本講演では、台風を事前に予測するための大気の大気環境場の重要性について解説し、台風の2週間前からの延長予測の可能性の現状について紹介します。

15:35-16:15 ～テーマ3～「気象シミュレーションソフトは富岳をどれくらいうまく活用出来るか？」
 八代 尚【テーマ3代表】（国立環境研究所 地球システム情報・主任研究員）
 「富岳」の性能を高め、大規模な気象シミュレーション実験を防災・減災に役立てるには、新しいコンピュータの特性を活かしたソフトウェアの改良が重要となります。我々は「富岳」開発当初から、計算機、気象シミュレーションモデル、そして観測データをシミュレーションに取り込むデータ同化システムとの間の協調設計（コデザイン）を進め、2020年には世界最大規模の気象計算を「富岳」を用いて実現しました。本講演では「富岳」での気象シミュレーションソフトウェアの開発における我々の取り組みについて、計算科学という側面から紹介します。

16:15-16:30 質疑応答

図 F-4: 第 2 回シンポジウムの会場の様子（令和 3 年 9 月 4 日）

（左：オンライン配信の様子、右：シンポジウム後の講演者・事務局集合写真）



④-3. 成果報告会等の開催

本プロジェクトでの研究成果を関係者間で共有すると共に専門家にも周知する為、令和3年3月16日にオンラインにて第1回成果発表会を開催した(図F-4)。諮問委員・課題参加者に加えて、気象・防災に関する専門家、一般からの参加者も含めて200名近い方の参加を得た。気象災害の原因である集中豪雨や台風に対して、大規模アンサンブルの高解像度な気象・大気環境予測実験によって、避難・防災に資する確率予測情報の提供が可能な新時代の予測技術の確立を目標としていることを伝え、初年度の成果を報告した。本課題で得られた知見および成果について、諮問委員をはじめとした関係者と共有した。

また同日13名の発表者によるポスター発表を行い、質疑に対応する等より詳細な研究内容を伝えることができた。

さらに成果発表会後、諮問委員会を開催し、初年度の取り組みや成果等に対する評価および助言をいただいた(図F-5)。

図F-5: 第2回成果発表会リーフレット

「富岳」成果創出加速プログラム
防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測

2021年度 成果発表会

近年、毎年のように、集中豪雨や台風が襲来し、令和3年夏季には梅雨前線や停滞前線による豪雨で各地に被害が生じました。現在の科学的知見では、人間の影響が地球温暖化させてきたことには疑い余地がないとされ、温暖化した気候では極端な大雨や極端気象現象の深刻さが増大するとされています。本課題では、将来さらなる激甚化が予想される集中豪雨や台風等の極端気象現象からの防災・減災を実現するために、数日程度から数週間～季節スケールの大規模アンサンブルの気象・大気環境予測実験をスーパーコンピュータ「富岳」を用いて実施し、リードタイムをもった確率予測情報の提供が可能な新時代の予測技術の確立を目指します。本成果発表会では、本課題における2年目の成果を報告し、今後の富岳による気象・大気環境予測研究の課題について議論いたします。

第1部 成果発表会 13:00-15:45

- 13:00-13:05 宅間 裕子【文部科学省研究振興局参事官(情報担当)付 計算科学技術推進室長】ご挨拶
- 13:05-13:15 佐藤 正樹【課題代表】(東京大学 大気海洋研究所・教授)「『防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測』課題の研究紹介」
- 13:15-13:25 川畑 拓矢【テーマ1代表】(気象研究所・室長/気象業務支援センター)「豪雨・台風に対するリスク予測」
- 13:25-13:45 吉村 健一【テーマ1】(東北大学 大学院工学研究科・大学院生)「冬季の南関東で発生する積乱気流の高解像度シミュレーションおよび飛行中の旅客機への影響解析」
- 13:45-14:00 雨宮 新【テーマ横断】(理化学研究所 計算科学研究センター・特別研究員)「富岳を用いた2021年夏の30秒更新リアルタイム降水予測実験」
- 14:00-14:05 質疑応答
- 14:05-14:15 休憩
- 14:15-14:30 宮川 和己【テーマ2代表】(東京大学 大気海洋研究所・准教授)「高解像度全球モデルを用いた週～季節スケールの極端現象リスク予測」
- 14:30-14:45 升永 竜介【テーマ2】(東京大学 大気海洋研究所・特任研究員)「高解像度全球海洋結合モデルを用いた季節内から季節スケールの向上に向けた取り組み」
- 14:45-14:53 八代 尚【テーマ3代表】(国立環境研究所 地球システム領域・主任研究員)「大気環境シミュレーションとデータ同化」
- 14:53-15:15 田上 雅浩【テーマ3】(国立環境研究所 地球システム領域・特別研究員)「水同位体 NICAM 開発成果」
- 15:15-15:30 質疑応答
- 15:30-15:45 ポスター発表紹介

第2部 ポスター発表 16:00-17:00

- ・大隈 伸 (気象業務支援センター):「令和2年7月以降の豪雨事例を対象としたキタキルを用いた Impact based forecast の試み」
- ・前島 康光 (理化学研究所):「令和2年7月豪雨を対象とした高解像度 PWR の観測システムシミュレーション実験」
- ・青藤 和雄 (気象業務支援センター):「台風に伴う北向き非地面層の PRR へのインパクト - 数値モデル実験 -」
- ・小林 健一 (神戸大学):「雷による洪水予測メカニズムの分析 - 多数降雨アンサンブルによる影響評価に向けて -」
- ・平野 龍一 (筑波大学):「大気海洋結合モデルで再現された2018年台風24号の眼の中の深い対流層」
- ・藤田 匡 (気象研究所):「重分法による3D-2D-1Dのスケール依存性の検証」
- ・大石 俊 (理化学研究所):「高解像度海洋アンサンブルデータ同化システムにおける適応観測誤差影響の有用性」
- ・津古 弘 (気象研究所):「メソアンサンブルと1km-scaleを用いた豪雨解析」
- ・Ting-Chi Wu (理化学研究所):「Examining the sensitivity of ensemble size to the accuracy of EFSO」
- ・James Taylor (理化学研究所):「Convective-Scale Imbalance Induced by 30-Second Update Radar Data Assimilation」
- ・吉村 健一 (東北大学):「冬季の南関東で発生する積乱気流の高解像度シミュレーションおよび飛行中の旅客機への影響解析」
- ・雨宮 新 (理化学研究所):「富岳を用いた2021年夏の30秒更新リアルタイム降水予測実験」
- ・高須 寛大 (海洋研究開発機構):「NICAMを用いた大アンサンブル実験で見られたML0の東進特性の検証」
- ・升永 竜介 (東京大学):「高解像度全球海洋結合モデルを用いた季節内から季節スケールの向上に向けた取り組み」
- ・関山 剛 (気象研究所):「衛星学習を使った気象シミュレーション代理モデルの可能性」
- ・田上 雅浩 (国立環境研究所):「水同位体 NICAM 開発成果」

2022年3月11日(金) 13:00-17:00
参加無料・オンライン開催・事前申込制
※本成果発表会は一般の方にもご参加いただけますが、専門性の高い講演内容となります。ご理解ください。

お申込み <https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/seika2021.html>

詳細・お申込みは上記アドレスにアクセスして下さい。
定員になり次第締め切らせていただきます。

主催 東京大学 大気海洋研究所
後援 一般財団法人 高度情報科学技術研究機構
お問合せ 東京大学大気海洋研究所 富岳気象課題事務局
メールアドレス: fugakuatmos@gmail.com
ホームページ: <https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/index.html>

図F-6: 第2回成果発表会の様子(令和4年3月11日)

(左: 発表の様子、右: 成果発表会後の講演者・事務局集合写真)



2-3. 活動（研究会の活動等）

- R3. 4. 28 第1回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
- R3. 7. 2 第2回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
- R3. 9. 4 第2回シンポジウム（オンライン、参加人数：約200人）
「『富岳』× 極端気象予測 ～『富岳』による極端気象予測の新しい世界～」
- R3. 9. 7 第3回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
- R3. 10. 26 第4回運営委員会（オンライン、参加人数：6人）
- R4. 12. 21 第5回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
- R4. 2. 2 第6回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
- R4. 3. 11 第2回成果発表会・ポスター発表（東京大学大気海洋研究所における発表とオンラインのハイブリッド開催、参加人数：約150人）
- R4. 3. 11 諮問委員会（東京大学大気海洋研究所における対面会議とオンラインのハイブリッド開催、参加人数：約15人）

2-4. 実施体制

業務項目	担当機関	担当責任者
(1) 短時間領域スケール予測	一般財団法人 気象業務支援センター 理化学研究所 計算科学研究センター	川畑拓矢:室長（テーマ1責任者）：数日先までの豪雨等シビアウエザーの確率予測を実現） 三好建正:チームリーダー（協力機関分担者）：テーマ横断的に同化技術の協力を分担

<p>(2) 全球スケール予測</p>	<p>国立大学法人東京大学</p> <p>国立研究開発法人海洋研究開発機構</p> <p>理化学研究所 計算科学研究センター</p>	<p>宮川知己:准教授 (テーマ2 責任者): 週から数か月先までの台風等、極端気象現象の確率予測を実現</p> <p>中野満寿男:研究員 (協力機関分担者): 週から数か月先までの確率予測を分担</p> <p>三好建正:チームリーダー (協力機関分担者): テーマ横断的に同化技術の協力を分担</p>
<p>(3) 先進的大規模データ同化手法</p>	<p>国立研究開発法人国立環境研究所</p> <p>理化学研究所 計算科学研究センター</p>	<p>八代尚:主任研究員 (テーマ3 責任者): 気象・大気質同化による大規模データ同化手法を開発</p> <p>三好建正:チームリーダー (協力機関分担者): テーマ横断的に同化技術の協力を分担する</p>
<p>(4) プロジェクトの総合的推進</p>	<p>国立大学法人東京大学</p>	<p>佐藤正樹:教授 (研究開発課題責任者): プロジェクトの総合的推進</p>

別添1 学会等発表実績

(1) テーマ1: 短時間領域スケール予測

①論文 (査読付き)

- Hirano, S., Ito, K., H. Yamada, S. Tsujino, K. Tsuboki, C.-C. Wu, 2022: Deep Eye Clouds Observed in Tropical Cyclone Trami (2018) during T-PARCCII Dropsonde Observations, *J. Atmos. Sci.*, doi:10.1175/JAS-D-21-0192.1.
- Sato, Y., Hayashi, S., Hashimoto A., 2022: Difference in the lightning frequency between the July 2018 heavy rainfall event over central Japan and the 2017 northern Kyushu heavy rainfall event in Japan, *Atmos. Sci. Lett.* 23(1), e1067, doi:10.1002/asl.1067
- Duc, L., K. Saito and D. Hotta, 2021: Analysis and design of covariance inflation methods using inflation functions. Part 2: Adaptive inflation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 147, 2375-2394, doi: 10.1002/qj.4029
- Saito, K., L. Duc, T. Matsunobu and T. Kurihana, 2021: Perturbations by the ensemble transform. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrological Applications*, 4, 115-141, doi: 10.1007/978-3-030-77722-7_5
- Saito, K., T. Matsunobu, and T. Oizumi, 2022: Effect of upper-air moistening by northward ageostrophic winds associated with a tropical cyclone on the PRE enhancement. *SOLA*, 18, 77-80 (TBA), doi:10.2151/sola.2022-014 (in press)
- Kotsuki, S., and Bishop, H. C. 2022: Implementing Hybrid Background Error Covariance into the LETKF with Attenuation-based Localization: Experiments with a Simplified AGCM. *Mon. Wea. Rev.*, 150, 283-302. doi: 10.1175/MWR-D-21-0174.1
- Fujita, T., H. Seko, and T. Kawabata, 2022: Effects of Flow Dependency Introduced by Background Error in Frequent and Dense Assimilation of Radial Winds Using Observation Error Correlated in Time and Space. *Mon. Wea. Rev.*, 150, 481-503, doi: 10.1175/MWR-D-21-0121.1
- Okamoto, K., M. Hayashi, T. Hashino, M. Nakagawa, and A. Okuyama, 2021: Examination of all-sky infrared radiance simulation of Hiwamari-8 for global data assimilation and model verification, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 147, 1-17, doi: 10.1002/qj.4144
- Ito, J. and H. Mouri, 2021: Estimating instantaneous surface momentum fluxes in boundary layers using a deep neural network, *AIP Advances*, 11, 045021.
- Nakanishi, M., H. Niino, and T. Anzai, 2022: Stability functions in the stable surface layer derived from the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) scheme. *J. Meteor. Soc. Japan.* 100, 245-256.
- Tochimoto E., S. Iizuka, and T. Ohigashi 2022: Influence of an upper-level trough on the formation of a Baiu frontal depression that caused a torrential rainfall event in southern Kyushu, Japan, on July 4, 2020, *SOLA*, 18A, 1-7,
- Tochimoto E., and H. Niino 2022: Comparing frontal structures of extratropical cyclones in the Northwestern Pacific and Northwestern Atlantic storm tracks, *Mon. Wea. Rev.*, 150, 369-392.

Tochimoto, E., and H. Niino, 2022: Tornadogenesis in a quasi-linear convective system over Kanto Plain in Japan: A numerical case study. *Mon. Wea. Rev.*, 150, 259-282.

Tochimoto, E., S. Yokota, H. Niino, and W. Yanase 2022: Ensemble experiments for a maritime meso-beta-scale vortex that spawned tornado like vortices causing shipwrecks, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 100(1), 141-165.

②論文 (査読なし)

斉藤和雄, 2021: インパクトベースの気象予測に向けて. *水文・水資源学会誌*, 34, 349-350. doi: 10.3178/jjshwr.34.349

伊藤純至, 名越利幸, 2021: 三陸沿岸の冬季強風の高解像度シミュレーション, *日本気象学会東北支部だより*, 92, 1-2.

③-1 国際会議・シンポジウム (口頭発表)

Hirano, S., K. Ito, H. Yamada: Deep Hub Clouds in the Eye of Tropical Cyclone Trami(2018), 34rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Online, May 2021.

Sato, Y., Hayashi, S., Hashimoto, A., Development of a lightning model and implementation into a meteorological model developed in Japan~ Validation through the comparison with the ground base measurement, EGU 2021 EGU21-6984

Hirano, S., K. Ito, H. Yamada: Deep Hub Clouds in the Eye of Tropical Cyclone Trami(2018), AMS 101st Annual meeting, Online, Jan 2021.

Kotsuki, S., Oishi, K., and Miyoshi, T.: Improving the stability of the Local Particle Filter and Its Gaussian Mixture Extension: Experiments with an Intermediate AGCM. WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis, September 13-18, 2021.

Kotsuki, S., Terasaki, K., Satoh, M., and Miyoshi, T.: Ensemble-Based Data Assimilation of GPM DPR Reflectivity into the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM. JpGU 2021, on-site May 30-June 1, 2021, on-line June 3-6, 2021

Kotsuki, S., Oishi, K., and Miyoshi, T.: Improving the stability of the Local Particle Filter and Its Gaussian Mixture Extension: Experiments with an Intermediate AGCM. JpGU 2021, on-site May 30-June 1, 2021, on-line June 3-6, 2021

Saito, K.: Short range precipitation forecast (1). Seminar at Viet Nam Hydrological and Meteorological Administration. December 27, 2021. (invited)

Saito, K.: Heavy rainfall over central Vietnam 2021 Sep10-12 and QPE at VNMHA. Seminar at Viet Nam Hydrological and Meteorological Administration. December 27, 2021. (invited)

Saito, K.: Short range precipitation forecast (2). Seminar at Viet Nam Hydrological and Meteorological Administration. January 11, 2022. (invited)

Fujita, T., H. Seko, T. Kawabata, K. Sawada, D. Hotta, and Y. Ikuta: Assimilation of Radial Winds with Observation Error Correlated in Time and Space. ISDA-Online, Online, April 2021.

Fujita, T., H. Seko, T. Kawabata, K. Sawada, D. Hotta, and Y. Ikuta, Enhancement in Assimilation

of Doppler Radar Radial Winds. JpGU 2021, Online, June 2021. (invited)

Okamoto, T. Ishibashi, I. Okabe, K., M. Hayashi, T. Hashino, M. Nakagawa, A. Okuyama, 2021: All-sky infrared radiance assimilation of Himawari-8 in the JMA global system, Bureau of Meteorology annual R&D workshop, Online, 8 - 11 Nov 2021. (invited)

Okamoto, K., M. Hayashi, T. Hashino, M. Nakagawa, A. Okuyama, I. Okabe, T. Ishibashi, 2021: Preliminary assimilation of all-sky IR radiances of Himawari-8 in the global data assimilation system at JMA, The 23rd International TOVS Study Conference, Online, 24 - 30 Jun 2021.

Ito, J., Niino, H., Yoshino, K., 2021: Large Eddy Simulation on Horizontal Rolls in Atmospheric Boundary Layer at Narita Airport and its Evaluation, JpGU Meeting, Online, Jun 3.

Oizumi, T., L. Duc, K. Kobayashi, T. Kawabata, and K. Saito, 2021: Flood prediction with the JMA Runoff model and 1000-member weather forecast, Japan Geoscience Union 2021, June 2021. (Invited)

Oizumi, T., L. Duc, K. Kobayashi, T. Kawabata, T. Ota, and K. Saito, 2021: Flood prediction with the JMA Runoff Index model and 1000-member weather forecast, 18th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society, August 2021. (Invited)

③-2 国際会議・シンポジウム（ポスター発表）

Kotsuki, S. and Bishop, C.: Local Ensemble Transform Kalman Filter Experiments with Hybrid Background Error Covariance: A Case with an Intermediate AGCM. WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis, September 13-18, 2021.

Kotsuki, S., Terasaki, K., Satoh, M., and Miyoshi, T.: Ensemble-Based Data Assimilation of GPM DPR Reflectivity into the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM. WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis, September 13-18, 2021.

Fujita, T., H. Seko, T. Kawabata, K. Sawada, D. Hotta, and Y. Ikuta: Enhancement of Variational Assimilation of High-Frequency and High-Resolution Radial Wind. WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis, Online, September 2021.

Takuya KAWABATA, Le Duc, Tsutao Oizumi, Kazuo Saito,: Ensemble Data Assimilation and Probabilistic Forecast with 1000 Members Coupled with a Hydrological Model Using the Supercomputer "Fugaku" Aiming to the Impact-Based Forecast, WCRP-WWRP SYMPOSIUM ON DATA ASSIMILATION AND REANALYSIS, 2021

Takuya Kawabata, Genta Ueno, An Adaptive R Estimator with a Storm-Scale Particle Filter, WCRP-WWRP SYMPOSIUM ON DATA ASSIMILATION AND REANALYSIS 2021

・④-1 国内学会・シンポジウム（口頭発表）

澤田洋平, 機械学習が加速する極端気象現象予測の不確実性定量化, 「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会, 2022年3月

澤田洋平, 極端水文気象現象に対する予測の不確実性定量化, 第10回JCAHPCセミナー, オンライン, 2021年5月

佐藤陽祐, 林修吾, 橋本明弘, 岩下武史, 気象雷モデルでの数値予報に向けたモデル改良の取り組み, 日本気象学会 2021 年秋季大会, 三重, 2021 年 12 月

佐藤陽祐, 林修吾, 橋本明弘, 平成 29 年九州北部豪雨と平成 30 年 7 月豪雨の雷特性に関する数値的考察, 日本気象学会 2021 年春季大会, オンライン, 2021 年 5 月

Kotsuki, S., and Bishop, H. C., Implementing Hybrid Background Error Covariance into the LETKF with Attenuation-based Localization: Experiments with a Simplified AGCM. データ同化ワークショップ, February 17, 2022

小槻峻司, 齋藤匠, 気候的背景誤差情報を用いたデータ同化手法高度化と観測位置最適化. 水文・水資源学会 / 日本水文科学会 2021 年度研究発表会, online, September 15-18, 2021

大泉伝, Le Duc, 小林健一郎, 川畑拓矢, 斉藤和雄, 1000 メンバーアンサンブルと流域雨量指数を用いた球磨川の洪水予測. 日本気象学会春季大会, オンライン, 2021 年 5 月

大泉伝, Le Duc, 小林健一郎, 川畑拓矢, 太田琢磨, 斉藤和雄, 2021: 1000 メンバーアンサンブル気象予報の洪水予測への利用, 日本気象学会 2021 年度秋季大会, 2021 年 12 月

斉藤和雄, 松信匠, 大泉伝, 台風に伴う北向き非地衡風 PRE へのインパクト (2) 雲解像モデル実験. 日本気象学会春季大会, オンライン, 2021 年 5 月 18 日

藤田匡, スケールを考慮したドップラー速度の変分法データ同化の検討. 日本気象学会 2021 年度秋季大会, 三重, 2021 年 12 月

伊藤純至, サブ km 解像度の数値気象モデルにおける鉛直流の解像度依存性とその特徴, 日本気象学会 2021 年度春季大会, オンライン, 2021 年 5 月

伊藤純至, メソ気象モデルを利用した台風全域ラージ・エディ・シミュレーション、「富岳」成果創出加速プログラム交流会, オンライン, 2021 年 3 月

川口真晴, 田村哲郎, 台風下の実市街地における強風・風圧のピーク特性に関する LES 解析, 第 35 回数値流体シンポジウム, E08-1, オンライン, 2021 年 12 月.

新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎, 2018 年猛暑日における東京都市域での弱風・温熱場予測に関する研究, 数値流体力学シンポジウム, E12-3, 2021 年 12 月

・④-2 国内学会・シンポジウム (ポスター発表)

・⑤研究会等

斉藤和雄, 松信匠, 大泉伝, 台風に伴う北向き非地衡の PRE へのインパクト —上層加湿に伴う降水強化 (雲解像モデル実験) —. 第 23 回非静力学モデルに関するワークショップ, オンライン, 2021 年 10 月 28 日

佐藤陽祐, 林修吾, 橋本明弘, 富岡拓海, 領域気象雷モデルの開発・検証と今後の開発について, 第 23 回非静力学モデルに関するワークショップ, オンライン, 2021 年 10 月

藤田 匡, 瀬古弘, 川畑拓矢, ドップラー速度の変分法データ同化の高度化の検討, 第 12 回データ同化ワークショップ, オンライン, 2022 年 2 月

藤田 匡, 瀬古弘, 川畑拓矢, 岡本幸三, 変分法によるドップラー速度等のスケール依存同化の検討, 「富岳」成果創出加速プログラム防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測 2021 年度成果発表会, オンライン, ポスター発表, 2022 年 3 月

斉藤和雄, 松信匠, 大泉伝, 台風に伴う北向き非地衡の PRE へのインパクト ―雲解像モデル実験―. 「富岳」
成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」 2021
年度成果発表会. オンライン, 2022 年 3 月

伊藤純至, 佐藤正樹, 松岸修平, 気象庁非静力学モデルによる航路上の気象影響評価, 航空気象研究会, オ
ンライン. 2022 年 2 月

吉村僚一, 伊藤純至, 鈴木健斗, Patrick Antonio Schittenhelm, 焼野藍子, 大林茂, 2020 年 12 月 30 日に発
生した乱気流事例の asuca による LES 解析およびフライトシミュレーション, 第 23 回非静力学モデル
に関するワークショップ, オンライン, 2021 年 10 月

吉村僚一, 伊藤純至, 鈴木健斗, Patrick Antonio Schittenhelm, 焼野藍子, 大林茂, 冬季の南関東中下層で
発生する晴天乱気流の大規模数値シミュレーション及び飛行機の揺動評価, 航空気象研究会, オンライ
ン, 2022 年 2 月

・⑥一般向け講演会等

佐藤陽祐, 天気予報とスーパーコンピュータ、北大道新アカデミー、理系コース、2021 年 10 月 8 日
川畑拓矢, 極端な豪雨に対する予測研究の現状と今後の展望, 第 2 回気候変動適応セミナー 2021 年 11
月 10 日

・⑦新聞/TV/WEB 配信/雑誌等

川畑拓矢, Le Duc, 大泉伝, 西日本版に球磨川線状降水帯, 読売新聞, 2021 年 4 月 2 日
大泉伝, RCC テレビ特別番組 集中豪雨から命を守る【2021GW スペシャル】, 中国放送, 2021 年 5 月 5 日
川畑拓矢, 大泉伝, Le Duc 「半日前予測 気象庁が挑む」日本経済新聞, 2021 年 6 月 30 日
大泉伝, 川畑拓矢, かんさい情報ネット ten. 「備え・本格的な豪雨シーズン突入・警戒高まる “線状降水
帯”」, 読売テレビ, 2021 年 7 月 2 日
佐藤陽祐, 林修吾, 橋本明弘 「豪雨なのに, 雷が頻繁に鳴ったり鳴らなかつたりするのはなぜ? ~豪雨に伴
う雷頻度の違いを数値シミュレーションで再現することに初めて成功~」北海道大学 プレスリリース,
2021 年 9 月 6 日
佐藤陽祐, 林修吾, 橋本明弘, スパコン「富岳」活用__雷頻度の違い解明, 日刊工業新聞, 2021 年 9 月 9 日
川畑拓矢, 台風の進路予測 誤差半分, 読売新聞, 2021 年 9 月 16 日
佐藤陽祐 「スパコン「富岳」が豪雨なのに雷が鳴ったり鳴らなかつたりする理由を解明!」ナゾロジー, 2021 年 9
月 18 日

・⑧書籍

・⑨プログラム・DB 公開

・⑩特許出願・取得

・受賞等

小槻峻司, 千葉大学 先進学術賞, 2021 年 11 月 26 日
伊藤純至, 日本気象学会 正野賞, 2021 年 12 月 7 日
堀田大介, 日本計算力学連合 日本計算力学奨励賞, 2021 年 7 月 29 日

(2) テーマ2 : 全球スケール予測

①論文 (査読付き)

Na, Y., Fu, Q., Leung, L. R., Kodama, C., Lu, R. (2022): Mesoscale Convective Systems Simulated by a High-Resolution Global Nonhydrostatic Model over the United States and China. *J. Geophys. Res. Atmos.*, <https://doi.org/10.1029/2021JD035916>.

Chikira, M., Yamada, Y., Abe-Ouchi, A., Satoh, M. (2022): Response of convective systems to the orbital forcing of the last interglacial in a global nonhydrostatic atmospheric model with and without a convective parameterization. *Clim. Dyn.*
<https://doi.org/10.1007/s00382-021-06056-5>.

Kohyama, T., Suematsu, T., Miura, H., & Takasuka, D. (2021). A Wall-like Sharp Downward Branch of the Walker Circulation above the Western Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, e2021JD034650.

Ikehata, K. and Satoh, M. (2021) Climatology of tropical cyclone seed frequency and survival rate in tropical cyclones. *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL093626. <https://doi.org/10.1029/2021GL093626> (accepted 2021/09/09; first published 2021/09/13). This paper is cited by AGU EOS: Learn, J. (2021), Cyclone “seed” survival affects hurricane season intensity, *Eos*, 102, <https://doi.org/10.1029/2021E0210607>.

Inoue, T., Rajendran, K., Satoh, M., Miura, H. (2021) On the semidiurnal variation in surface rainfall rate over the tropics in a global cloud-resolving model simulation and satellite observations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 99, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-066>.

Shibuya, R., Nakano, M., Kodama, C., Nasuno, T., Kikuchi, K., Satoh, M., Miura, H., Miyakawa, T. (2021) Prediction skill of the Boreal Summer Intra-Seasonal Oscillation in global non-hydrostatic atmospheric model simulations with explicit cloud microphysics. *J. Meteorol. Soc. Japan.*, 99, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-046>.

②-1 国際会議・シンポジウム (招待講演)

Miyakawa, T. 2022: Model Improvement, WCRP workshop on Future of Climate Modelling, 21-24 March, 2022, online.

Miyakawa, T., T. Suematsu, R. Masunaga, T. Kawasaki, R. Shibuya, C. Kodama, M. Nakano, H. Yashiro, M. Satoh, 2021: Introduction to the Ocean-Coupled Components of DYAMOND2, the Inter-Comparison Project for Global “Storm-Resolving” Numerical Models, PASC2021, July 2021 Geneva (online).

Satoh Masaki, Chihiro Kodama, Hisashi Yashiro, Tomoki Miyakawa, Yohei Yamada, Woosub Roh, 2021: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) studies on the supercomputer Fugaku: Challenges and next directions. AGU Fall Meeting 2021, 12-16 December.

Masunaga, R., N. Schneider: Surface wind responses to mesoscale sea-surface temperature over western boundary currents assessed by spectral transfer functions, JpGU 2021, June 2021, Online conference.

Suematsu, T., T. Yanase, H. Miura, C. Kodama, and M. Satoh: A consecutive development of MJO

events reproduced by three-months SST-forced experiments with NICAM, Japan Geoscience Union Meeting 2021, 2021-06-03, online.

- C. Kodama, H. Yashiro, M. Nakano, T. Suematsu, D. Takasuka, Y. Takano, R. Masunaga, Y. Yamada, T. Arakawa, H. Miura, T. Nasuno, T. Seiki, W. Roh, A. T. Noda, T. Ohno, T. Miyakawa and M. Satoh, 2021/12/14, Overview of NICAM activity on the supercomputer Fugaku, AGU2021, IN22A-01, Online.
- C. Kodama, H. Yashiro, M. Nakano, T. Suematsu, D. Takasuka, Y. Takano, R. Masunaga, Y. Yamada, T. Arakawa, H. Miura, T. Nasuno, T. Seiki, W. Roh, A. T. Noda, T. Ohno, T. Miyakawa, and M. Satoh, 2021/9/8-9: Challenge to a global cloud-resolving climate simulation with NICAM, CPM2021, Online.
- C. Kodama, Y. Yamada, T. Ohno, T. Seiki, H. Yashiro, A. T. Noda, M. Nakano, W. Roh, M. Satoh, T. Nitta, D. Goto, H. Miura, T. Nasuno, T. Miyakawa, Y.-W. Chen, M. Sugi, 2021/6/4: HighResMIP climate simulations with NICAM and beyond on supercomputer Fugaku, JpGU Meeting 2021, AAS01-12, Online.

②-2 国際会議・シンポジウム（口頭発表）

- Miyakawa, T., Yamada, Y., Suematsu, T., Masunaga, R., Takasuka, D., Nakano, M., Kodama, C., Yashiro, H., Satoh, M., Miyoshi, T., Kodama, T., and Kawasaki, T., 2021: Overview of global scale large ensemble simulations using NICAM on Fugaku, JpGU 2021, June 2021, Online
- Miyakawa, T., Yamada, Y., Suematsu, T., Masunaga, R., Takasuka, D., Nakano, M., Kodama, C., Yashiro, H., Satoh, M., Miyoshi, T., Kodama, T., and Kawasaki, T., 2021: Towards S2S-scale Large-ensemble Prediction Using Global Cloud/cloud-system Resolving Model NICAM on Fugaku, AOGS, August 2021, online.
- Masunaga, R., T. Miyakawa: Global large ensemble simulations with a cloud-resolving atmosphere and eddy-resolving ocean model, JpGU 2021, June 2021, Online conference.
- Yamada, Y., Nakano, M., Miyakawa, T., Kodama, C., Chen, Y., Yashiro, H., Nasuno, T., Satoh, M., 2021: A 1000-member 14-km mesh global ensemble experiment to target typhoon FAXAI (2019). JpGU 2021, June 4, 2021.
- C. Kodama, Y. Yamada, T. Ohno, T. Seiki, H. Yashiro, A. T. Noda, M. Nakano, W. Roh, M. Satoh, T. Nitta, D. Goto, H. Miura, T. Nasuno, T. Miyakawa, Y.-W. Chen, and M. Sugi, 2021/4/29: HighResMIP climate simulations with NICAM and beyond on supercomputer Fugaku, EGU General Assembly 2021, EGU21-8580, Online.
- Suematsu, T., Y. Yamada, C. Kodama, T. Miyakawa, H. Miura, and M. Satoh: Microphysics dependency on the reproducibility of the MJO in the DYAMOND winter phase experiment on NICAM, Japan Geoscience Union Meeting 2021, 2021-06-04, online.
- Suematsu, T., Y. Yamada, C. Kodama, and T. Miyakawa: A comparison of the microphysics dependency on the reproducibility of the MJO under different resolutions using NICAM, European Geophysical Union 2021, 2021-04-19-30, online.
- Suematsu, T., C. Kodama, Y. Yamada, H. Miura, D. Takasuka, and T. Miyakawa: Microphysics dependency

in 3.5km NICAM DYAMOND phase 2 experiments, American Geophysical Union Fall meeting 2021, 2021-12-17, New Orleans and online.

Nasuno, T., 2021: Impacts of cloud microphysics modifications on diurnal convection and the ISO over the Maritime Continent: A case study of YMC-Sumatra 2017. Japan Geoscience meeting 2021 (virtual), June 4, 2021.

Masunaga, R., T. Miyakawa: lobal coupled simulations with cloud-resolving atmosphere and eddy-resolving ocean coupled models, OSM 2021, February 2022, Online conference.

Kohsuke Ikehata, Masaki Satoh, 2021: Climatology of Tropical Cyclone Seeds and Survival Rates to Tropical Storms. AOGS 2021 Vitual 18th Annual Meeting 1-6 August 2021(5 Aug. 2021).

Masaki Satoh, Woosub Roh, Shuhei Matsugishi, Yasutaka Ikuta, Naomi Kuba, Hajime Okamoto, 2021: Evaluation and improvement of cloud and precipitation processes of NICAM with ULTIMATE. Improvement and calibration of clouds in models 2021, Toulouse, France, Apr. 12 - 16 (online Presentation).

②-3 国際会議・シンポジウム (ポスター)

Yamada, Y., Kodama, C., Noda, A. T., Satoh, M., Nakano, M., Miyakawa, T., Yashiro, H., and Nasuno, T., 2021: Evaluating performances of one-year simulation by using 3.5 km mesh global nonhydrostatic model. EGU General Assembly 2021, April 29 (online), 2021, Poster

Yamada, Y., Nakano, M., Miyakawa, T., Kodama, C., Chen, Y., Yashiro, H., Nasuno, T., Satoh, M., 2021: Evaluation of Typhoon Faxai (2019) in a 1000-member Ensemble Simulation with a 14 km Mesh Global Nonhydrostatic Model. AOGS 2021, August 6, 2021(online), Poster

Y. Na, Q. Fu, L. Ruby, and C. Kodama, 2021/12/15: Mesoscale Convective Systems Simulated by a High-Resolution Global Nonhydrostatic Model over the United States and China, AGU2021, A35S-08, Online.

A. Rehbein, T. Ambrizzi, M. Satoh, and C. Kodama, 2021/9/10: Spatio-temporal representation of the Amazonian mesoscale convective systems by the Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM), CPM2021, Online.

Nasuno, T., M. Nakano, H. Murakami, K. Kikuchi, and Y. Yamada, 2021: Responses of the TC and precursor activities to the Pacific SST anomaly in 2018 boreal summer. AOGS2021 18th Annual meeting (virtual), Aug. 4, 2021, poster.

Masunaga, R., T. Miyakawa: Global coupled simulations with cloud-resolving atmosphere and eddy-resolving ocean coupled models, AGU fall meeting 2021, December 2021, Online conference (iPoster).

③-1 国内学会・シンポジウム (招待講演)

宮川知己 2021:全球雲解像海洋結合モデル NICOCO 現状と展望, 海洋学会 2021 年度秋季大会共催シンポジウム B 中緯度大気海洋相互作用研究の現状と展望 2021 年 9 月 18 日 (online)

山田洋平, 小玉知央, 佐藤正樹, 中野満寿男, 那須野智江, 杉正人, 2021: エルニーニョに対する強い台風の応答と内部変動, 海洋学会 2021 年度秋季大会, 2021 年 9 月 17 日 (online), 口頭 (招待講演)

③-2 国内学会・シンポジウム (口頭発表)

佐藤正樹, 2021: 防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測 (ゴードン・ベル賞ファイナリスト課題). HPCI フォーラム ースーパーコンピュータ「富岳」への期待ー, 2021 年 3 月 9 日 (火) オンライン開催

宮川知己, 山田洋平, 末松環, 升永竜介, 高須賀大輔, 中野満寿男, 小玉知央, 八代尚, 佐藤正樹, 三好健正, 小玉貴則, 川崎高雄: 「富岳」におけるNICAM を用いた全球スケール予測の取り組み 日本気象学会 2021 年度春季大会 (online, 2021.5)

宮川知己, 山田洋平, 末松環, 升永竜介, 高須賀大輔, 中野満寿男, 小玉知央, 八代尚, 佐藤正樹, 三好健正, 小玉貴則, 川崎高雄: 「富岳」におけるNICAM を用いた全球スケール予測の取り組み 日本気象学会 2021 年度秋季大会 (三重, 2021.12)

升永竜介, 宮川知己: 全球雲解像-渦解像結合モデル実験へ向けた取り組み, 日本気象学会 2021 年度 (三重, 2021.12).

升永竜介: 大気再解析における高解像度海面水温データの意義, 日本海洋学会 2021 年度秋季大会「中緯度大気海洋相互作用研究の現状と展望」(オンライン会議, 2021.9).

升永竜介, Niklas Schneider: 海面水温に対する海上風の応答についての数値モデルの再現性, 日本海洋学会 2021 年度秋季大会 (オンライン会議, 2021.9)

山田洋平, 小玉知央, 佐藤正樹, 中野満寿男, 那須野智江, 杉正人, 2021: 全球非静力学モデル NICAM を用いた 2019 年台風 15 号の高解像度大アンサンブル実験, 第 23 回非静力学モデルに関するワークショップ, 2021 年 10 月 28 日 (online).

山田洋平, 宮川知己, 中野満寿男, 小玉知央, 那須野智江, Chen Ying-Wen, 八代尚, 佐藤正樹, 2021: 1000 メンバー全球高解像度台風アンサンブル実験, 気象学会 2021 年度秋季大会, 12 月 8 日 (三重).

末松環, 小玉知央, 山田洋平, 三浦裕亮, 高須賀大輔, 宮川知己: NICAM-DYAMOND 2 実験で再現された MJO の雲微物理依存性について, 日本気象学会 2021 年秋季大会, 2021-12-8、津.

④研究会等

宮川知己, 山田洋平, 末松環, 升永竜介, 高須賀大輔, 中野満寿男, 小玉知央, 八代尚, 佐藤正樹, 三好健正, 小玉貴則, 川崎高雄 (2022): 富岳を用いた NICAM/NICOCO アンサンブル実験による台風延長予測に向けた取り組み, 2021 年度長期予報研究連絡会研究会, 2022/1/17.

宮川 知己 (2022): DYAMOND2 参加モデルの比較解析, NICAM developers meeting (NDM.21), オンライン, 2022 年 1 月 18-21 日

升永 竜介 (2022): NICOCO 実験の現状について, NICAM developers meeting (NDM.21), オンライン, 2022 年 1 月 18-21 日

笠見 京平 (2022): 令和 2 年台風第 10 号の再現実験, NICAM developers meeting (NDM.21), オンライン, 2022 年 1 月 18-21 日

⑤新聞/TV/WEB 配信/雑誌等

山田洋平, 2021: 令和元年房総半島台風の発生前からの予測シミュレーション, 2021 年度シンポジウム「富

- 岳」× 極端気象予測 ～「富岳」による極端気象予測の新しい世界～, 2021年9月4日 (online)
- 小玉知央, 2021: 第23回高校生のための科学講演会・第19回先生のための科学講座「ノーベル賞2021: 化学賞・物理学賞を解説」 (主催: 宮崎県理科・化学教育懇談会) 講師, 2021/12/12.
- NHKスペシャル「パーフェクト・プラネット～生命あふれる“奇跡の惑星”～」1月1日(土・祝)総合 午後7時20分～8時34分 (取材協力: 末松環, 宮川知己, 小玉知央, 野田暁)
- 末松環, 2021: 湘南白百合学園中学・高等学校オンライン講習: 地球の大気ってどんなところ?、2021-08-23、online
- 佐藤正樹, 2021: 特別企画「真鍋淑郎博士の業績と素顔」業績の紹介. 日本気象学会 2021年秋季大会 2021年12月4日.
- Masaki Satoh, 2021: Detection, attribution, and projection of tropical cyclones affected by global warming. OIST seminar, Fluid Mechanics Unit, November 2, 2021. (seminar)
- 佐藤正樹, 2021: 地球温暖化に伴って凶暴化する台風. 日本商工会議所講演会 2021年10月21日. (招待講演)
- 2021/11/15 [AGU EOS] Learn, J. (2021) Cyclone “seed” survival affects hurricane season intensity, Eos, 102, <https://doi.org/10.1029/2021E0210607>. AGU EOS (2021年11月15日)
- 2021/06/30 日本経済新聞朝刊にて 佐藤正樹教授らの取材記事が掲載。「豪雨もたらす線状降水帯 気象庁が挑む「半日前予測」 豪雨防災は今⑤」(2021年6月30日日本経済新聞電子版)

⑥受賞等

- 2021年6月6日: “Progress in Earth and Planetary Science Most Cited Paper Award 2021”: Progress in Earth and Planetary Science (PEPS) に掲載された論文 Stevens et al. (2019) 受賞。

(3) テーマ 3 : 先進の大規模データ同化

①論文 (査読付き)

- Arakawa, T., H. Yashiro, and K. Nakajima (2022): Development of a coupler h3-Open-UTIL/MP. In International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPCAsia2022). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 72-83. DOI:<https://doi.org/10.1145/3492805.3492809>
- Miyoshi, T., K. Terasaki, S. Kotsuki, S. Otsuka, Y.-W. Chen, K. Kanemaru, K. Okamoto, K. Kondo, G.-Y. Lien, H. Yashiro, H. Tomita, M. Satoh, and E. Kalnay (2022): Chapter 25 - Enhancing data assimilation of GPM observations, *Precipitation Science*, Elsevier, 2022, Pages 787-804, ISBN 9780128229736, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822973-6.00020-2>.
- Goto D., Uchida J. (2022) Uncertainty in Aerosol Rainout Processes Through the Case of the Radioactive Materials Emitted by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in March 2011. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-010>.
- Sekiya, T., Miyazaki, K., Eskes, H., Sudo, K., Takigawa, M., and Kanaya, Y.: A comparison of the impact of TROPOMI and OMI tropospheric NO₂ on global chemical data assimilation, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 1703-1728, <https://doi.org/10.5194/amt-15-1703-2022> (2022).
- Cheng, Y., Dai T., Goto D., Murakami H., Yoshida M., Shi G., Nakajima T. (2021) Enhanced simulation of an Asian dust storm by assimilating GCOM-C observations, *Remote Sensing*, 13(15), 3020, <https://doi.org/10.3390/rs13153020>.
- Dai T., Cheng Y., Goto D., Li Y., Tang X., Shi G., Nakajima T. (2021) Revealing the sulfur dioxide emission reductions in China by assimilating surface observations in WRF-Chem, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 4357-4379, <http://doi.org/10.5194/acp-2020-1259>.
- Dupuy, E., H. Akiyoshi, Y. Yamashita (2021): Impact of unmitigated HFC emissions on stratospheric ozone at the end of the 21st century as simulated by chemistry-climate models, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126, doi:10.1029/2021JD035307.
- Yamashita, Y., H. Akiyoshi, M. Takahashi (2021): Analysis of Arctic Spring Ozone Anomaly in the Phases of QBO and 11-Year Solar Cycle for 1979-2017, *Atmosphere*, 12(5), 582, doi:10.3390/atmos12050582.
- Tada, M., K. Yoshimura, K. Toride, Improving Weather Forecasting by Assimilation of Water Vapor Isotopes, *Sci Rep*, 11, 18067, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97476-0>
- Okazaki, A., T. Miyoshi, K. Yoshimura, S.J. Greybush, and F. Zhang, (2021): Revisiting online and offline data assimilation comparison for paleoclimate reconstruction: an idealized OSSE study, *JGR-Atmos.*, 2021. <https://doi.org/10.1029/2020JD034214>
- Kathyat, G., A. Sinha, M. Tanoue, K. Yoshimura, H. Li, H. Zhang, H. Cheng, (2021): Interannual oxygen isotope variability in Indian summer monsoon precipitation reflects changes in moisture sources, *Commun Earth Environ* 2, 96, 2021. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00165-z>
- Toride, K., K. Yoshimura, M. Tada, C. Diekmann, B. Ertl, F. Khosrawi, M. Schneider, (2021): Potential of mid-tropospheric water vapor isotopes to improve large-scale circulation and

weather predictability. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091698, 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020GL091698>

Miyazaki, K., K. Bowman, T. Sekiya, M. Takigawa, J. L. Neu, K. Sudo, G. Osterman, H. Eskes, (2021): Global tropospheric ozone responses to reduced NO_x emissions linked to the COVID-19 worldwide lockdowns. *Sci. Adv.* 7, eabf7460.

②論文 (査読なし)

山下陽介, 谷本浩志, 小田知宏 (2021): グローバル・ストックテイクに向けた人為起源 CO₂ 排出量推定に貢献する衛星観測計画と大気輸送モデル開発の展望, *日本気象学会誌「天気」*, Vol. 69, 61-74

③-1 国際会議・シンポジウム (招待講演)

Yashiro, H. (2022): Challenges to large-scale weather/climate simulation for disaster prevention and mitigation, *The International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPC Asia 2022)*, Online, 12-14 Jan. 2022

Yashiro, H., Kawai, Y., Terasaki, K., Kudo, S., Miyoshi, T., Imamura, T., Minami, K., Nakano, M., Kodama, C., Satoh, M., and Tomita, H. (2021): Performance optimization and scalability of NICAM-LETKF on supercomputer Fugaku, *EGU General Assembly 2021*, Online, 19-30 Apr. 2021

③-2 国際会議・シンポジウム (口頭発表)

Yashiro, H. (2022): Computing hardware development, *WCRP Workshop on Future of Climate Modelling*, Online, 21-24 Mar. 2022

Yashiro, H., K. Terasaki, T. Miyoshi, and H. Tomita (2022): A global 3.5km-mesh 1024-member ensemble data assimilation benchmark - Our challenges on the supercomputer Fugaku, *The International Symposium on Data Assimilation - Online (ISDA-Online)*, Online, 14 Jan. 2022

Tanoue, M., M., Takano, Y., Yoshimura, K., and Yashiro, H.: (2021) A comparison of precipitation isotopes between cloud processes using a global non-hydrostatic model, *AGU Fall meeting, New Orleans + Online, USA*, 13-17 December 2021.

Yoshimura, K., K. Toride, M. Tada, (2021): Impact of water vapor isotopes observation on tropospheric atmospheric circulation, A41C-08, *AGU Fall Meeting 2021*, 2021/12/16.

Yashiro, H., T. Arakawa, S. Sumumoto, K. Nakajima (2021): h3-Open-UTIL/MP: A General-purpose Coupling Library Bridging Legacy HPC Applications and the Future, *International Workshop on the Integration of (Simulation + Data + Learning) : Towards Society 5.0 by h3-Open-BDEC*, Online, 30 Nov. and 3 Dec. 2021

Yatagai, A., K. Yoshimura, Y. Ueno, S. Nishioka, (2021): Isotopic variation of winter precipitation and water vapor in northern Japan - Observation and simulation by Iso-GSM/Iso-RSM -, PP15B-0908, *AGU Fall Meeting 2021*, 2021/12/13.

Tanoue, M., M., Takano, Y., Yoshimura, K., and Yashiro, H. (2021): Stable isotopes in precipitation and water vapor simulated by isotope-incorporated NICAM, *EGU General Assembly*

- 2021, online, 19-30 Apr 2021, EGU21-9376, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9376>, 2021
- Khosrawi, F., K. Toride, K. Yoshimura, C. Diekmann, B. Ert11, F. Hase and M. Schneider, (2021): Can the assimilation of IASI water isotopologue observations improve the quality of tropical diabatic heating?, Water isotopes: From Weather to Climate, 2021/11/15-17.
- Bong, H., A. CAUQUOIN, E.-C. Chang, M. Werner, N. Yeo, K. Yoshimura, (2021): Inter-comparison of water isotope-enabled models and reanalysis nudging effects: step forward in SWING project, Water isotopes: From Weather to Climate, 2021/11/15-17.
- Okazaki, A., A. Cauquoin, K. Kino, K. Yoshimura, (2021): Development of MIROC5-iso and its comparison with isotopic climate proxies, Water isotopes: From Weather to Climate, 2021/11/15-17.
- Yoshimura, K., (2021): Advances in water isotope observation, simulation, and model-data integration, Water isotopes: From Weather to Climate, 2021/11/15-17.
- Sekiya, T., Miyazaki, K., Eskes, H., Sudo, K., Takigawa, M., and Kanaya, Y., (2021): A comparison of the impact of TROPOMI and OMI tropospheric NO2 on global chemical data assimilation and emission inversion, 507, IGAC 2021 Virtual Conference, 2021/9/13
- Sekiya, T., Miyazaki, K., Ogochi K., Sudo, K., Takigawa, M., Eskes, H., Boersma, F., (2021): Impacts of Horizontal Resolution on Global Data Assimilation of Satellite Measurements, 3.10, CEOS AC-VC-17, 2021/6/9
- Yashiro, H., Kawai, Y., Terasaki, K., Kudo, S., Miyoshi, T., Imamura, T., Minami, K., Nakano, M., Kodama, C., Satoh, M., and Tomita, H. (2021): Performance optimization and scalability of NICAM-LETKF on supercomputer Fugaku, EGU General Assembly 2021, Online, 19-30 Apr. 2021

③-3 国際会議・シンポジウム (ポスター)

- Tanoue, M., Y. Takano, K. Yoshimura, H. Yashiro (2021) Modelling the water isotopes with the global cloud-system-resolving model: Evaluation against site observation and gridded dataset. Water isotopes: From Weather to Climate, Online, 15-17 November 2021
- Shoji, S., A. Okazaki, K. Yoshimura, (2021): Data assimilation using oxygen isotope ratios of proxies aimed at the last millennium climate reconstruction, Water isotopes: From Weather to Climate, 2021/11/15-17.
- Eguchi, N., K. A. Walker, N. Saitoh, Y. Yoshida, K. Yoshimura, K. Toride, M. Fujiwara, Y. Kawatani, Y. Eguchi Yamashita, R. Nassar, D. Jones, D. Plummer, K. Strong, (2021): FTS satellite observation mission for understanding chemical and dynamical processes in the upper atmosphere, MSD47-P05, JpGU2020, 2020/7/12-15. [Poster]

④-1 国内学会・シンポジウム (口頭発表)

- 八代尚 (2022): 大規模気象・気候計算への挑戦と課題, 「富岳」成果創出加速プログラム 研究交流会「富岳百景」, オンライン, 2022年3月14-15日
- 八代尚 (2022): 大気環境シミュレーションとデータ同化, 「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に

資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」2021 年度成果発表会, オンライン+現地開催(柏市), 2022 年 3 月 11 日

田上雅浩 (2022): 水同位体 NICAM 開発成果, 「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」2021 年度成果発表会, オンライン+現地開催(柏市), 2022 年 3 月 11 日

八代尚 (2022): 全球大気モデル NICAM の最近の取り組み紹介, 2021 年度 次世代陸モデル開発・応用・社会実装に関する合同ワークショップ, オンライン, 2022 年 3 月 10-11 日

八代尚, 寺崎康児, 中野満寿男, 小玉知央, 河合佑太, 富田浩文 (2021): 計算機システムと気象・気候分野のアプリケーションのコードデザイン: NICAM-LETKF の経験から, 日本気象学会 2021 年度秋季大会, オンライン+現地開催(津市), 2021/12/2-8

芳村圭, 多田真嵩, 取出欣也, 水蒸気同位体比データ同化による気象予測精度の改善, 日本気象学会 2021 年度秋季大会, オンライン+現地開催(津市), 2021/12/2-8

田上雅浩, 高野雄紀, 芳村圭・八代尚 (2021): 同位体 NICAM によりシミュレートされた降水 d-excess の検証, 日本気象学会 2021 年度秋季大会, オンライン+現地開催(津市), 2021/12/2-8

住元真司, 荒川隆, 坂口吉生, 松葉浩也, 八代尚, 埴敏博, 中島研吾 (2021): WaitIO-Socket:異種システム上の複数 MPI プログラムを結合する通信ライブラリの試作, 情報処理学会 研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) , オンライン, 2021/12/6-7, 2021-HPC-182, 12, p1-9, <http://id.nii.ac.jp/1001/00213034/>

関谷高志, 宮崎和幸, Henk Eskes, 須藤健悟, 滝川雅之, 金谷有剛 (2021): 新型コロナウイルス蔓延期間における全球 NOx・SO2 排出量減少が 二次生成無機エアロゾル分布に与えた影響, 03-09, 第 26 回大気化学討論会, 2021/11/11

山梨祥平, 八代尚, 片桐孝洋, 永井亨, 大島聡史 (2021): ppOpen-AT における演算精度と消費電力を考慮した自動チューニング方式の提案, 情報処理学会 研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) , オンライン, 2021/9/27, 2021-HPC-181, 7, p1-16, <http://id.nii.ac.jp/1001/00214109/>

八代尚 (2021): 気象シミュレーションソフトは富岳をどれだけうまく活用できるか?, 「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」2021 年度シンポジウム「「富岳」×極端気象予測～「富岳」による極端気象予測の新しい世界～」, オンライン, 2021 年 9 月

八代尚 (2021): 気象・気候アプリケーションソフトにおける緩やかな変革、また異なる計算手法との緩やかな融合に向けて, PC クラスタワークショップ in 柏 2021, オンライン, 2021 年 6 月

田上雅浩, 高野雄紀, 芳村圭, 八代尚 (2021): Iso-NICAM による水同位体比の全球雲システム解像シミュレーション, 日本気象学会 2021 年度春季大会, オンライン, 2021/5/16-21

丹羽洋介, 町田敏暢, 森本真司, 菅原敏, 石島健太郎, 坪井一寛 (2021): 高解像度シミュレーションでみえる温室効果ガスの鉛直輸送, 日本気象学会 2021 年度春季大会, オンライン, 2021/5/16-21

④-2 国内学会・シンポジウム (ポスター)

Yashiro, H., Terasaki, Kawai, Y., K., Kudo, S., Miyoshi, T., Imamura, T., Minami, K., Nakano, M., Kodama, C., Satoh, M., and Tomita, H. (2021): System-Application Co-design for Supercomputer Fugaku and Global Ensemble Weather Data Assimilation, JpGU Meeting 2021, オンライン, 2021 年 6

月 (Poster)

⑤研究会等

関谷高志 (2022): 全球 50km 解像度の大気化学データ同化システムの開発とその応用, 第 12 回データ同化ワークショップ, 2022/2/17

八代尚 (2022): NICAM.21 概要, NICAM developers meeting (NDM.21), オンライン, 2022 年 1 月 18-21 日

八代尚 (2021): 「富岳」における気象・気候シミュレーションの挑戦, 惑星科学研究センター(CPS)セミナー, オンライン, 2021 年 5 月

八代尚 (2021): 気象シミュレーションモデル開発と計算機に関する近年の動向, 今後の台風予測研究に関する研究会, オンライン, 2021 年 4 月

⑥新聞/TV/WEB 配信/雑誌等

八代尚: 首相官邸SNS での紹介ツイート「Global top #supercomputer #Fugaku has achieved a meteorological calculation that is about 500 times larger than the world's daily ensemble data assimilation calculations and heralds improved climate-change prediction accuracy. [#InnovationJapan](https://lnky.jp/HgqljiU)」, 2021 年 11 月 29 日, <https://twitter.com/JapanGov/status/1465256839428587520?s=20&t=RlnwnYhyYlWyzhwsn0q7ug>

八代尚: 産経新聞 [クローズアップ科学] ノーベル賞の眞鍋氏 温暖化研究に道、気象予測でも貢献, 2021 年 10 月 17 日

八代尚: 2020 年ゴードン・ベル賞ノミネートの八代主任研究員に聞く(第 1 回)- 2020 年ゴードン・ベル賞ノミネートの八代主任研究員に聞く(第 2 回), 国立環境研究所地球環境研究センターニュース, 2021 年 9 月号, Vol. 32, No. 6

八代尚: 2020 年ゴードン・ベル賞ノミネートの八代主任研究員に聞く(第 1 回)- 2020 年ゴードン・ベル賞ノミネートの八代主任研究員に聞く(第 1 回), 国立環境研究所地球環境研究センターニュース, 2021 年 8 月号, Vol. 32, No. 5

宮崎和幸, 関谷高志, 滝川雅之: プレスリリース「世界規模のロックダウンによる大気汚染物質の減少量と気候システムへの影響を算出」, 2021 年 6 月 10 日, https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20210610/

芳村圭, 多田真嵩, 取出欣也: プレスリリース「宇宙から観測した「重い水蒸気」で天気予報を変える」, 2021 年 9 月 14 日, <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3652/>

⑦受賞等

寺崎康児, 河合佑太, 富田浩文, 三好建正, 八代尚, 理化学研究所, 理研梅峰賞, 2022 年 3 月 23 日

(4) テーマ横断技術

①論文 (査読付き)

- Honda, T. and T. Miyoshi, 2021: Predictability of the July 2018 Heavy Rain Event in Japan Associated with Typhoon Prapiroon and Southern Convective Disturbances, SOLA, 17, 113-119
- Taylor, J., A. Okazaki, T. Honda, S. Kotsuki, M. Yamaji, T. Kubota, R. Oki, T. Iguchi, T. Miyoshi, 2021: Oversampling Reflectivity Observations from a Geostationary Precipitation Radar Satellite: Impact on Typhoon Forecasts within a Perfect Model OSSE Framework. J. Adv. Modeling Earth Systems, Vol. 13, 7
- Honda, T., Y. Sato, and T. Miyoshi, 2021: Potential impacts of lightning flash observations on numerical weather prediction with explicit lightning processes, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126, e2021JD034611
- Ruiz, J., Lien, G.-Y., Kondo, K., Otsuka, S., and Miyoshi, T.: Reduced non-Gaussianity by 30 s rapid update in convective-scale numerical weather prediction, Nonlin. Processes Geophys., 28, 615-626
- Terasaki, K. and T. Miyoshi, 2022: Ensemble Kalman Filter Experiments at 112-km and 28-km Resolution for the Record-Breaking Rainfall Event in Japan in July 2018. In: Park S.K., Xu L. (eds) Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. IV). Springer, Cham. 525-542
- Miyoshi, T., K. Terasaki, S. Kotsuki, S. Otsuka, Y- W- Chen, K. Kanemaru, K. Okamoto, K. Kondo, G- Y- Lien, H. Yashiro, H. Tomita, M. Sato, and E. Kalnay, 2022: Enhancing data assimilation of GPM observations. In: Silas M. (Eds) Precipitation Science, Measurement Remote Sensing, Microphysics, and Modeling. Elsevier, 787-804
- Terasaki, K., and T. Miyoshi, 2022: A 1024-Member NICAM-LETKF Experiment for the July 2020 Heavy Rainfall Event, SOLA, accepted
- Yasumitsu Maejima, Takuya Kawabata, Hiromu Seko, Takemasa Miyoshi, Observing System Simulation Experiments of a Rich Phased Array Weather Radar Network Covering Kyushu for the July 2020 Heavy Rainfall Event, SOLA, 2022, Volume 18, Pages 25-32
- Kawai, Y., & Tomita, H. (2021). Numerical Accuracy of Advection Scheme Necessary for Large-Eddy Simulation of Planetary Boundary Layer Turbulence, Monthly Weather Review, 149(9), 2993-3012

②-1 国際会議・シンポジウム (招待講演)

- Takemasa Miyoshi, Weather Predictability and Data Assimilation: Perspectives Toward General Theory of Prediction, OIST-RIKEN Collaboration 1st Symposium: Green and blue planet -How can ecological research shape our future?, Okinawa, 2021/4/6
- Takemasa Miyoshi, Big Data, Big Computation, and Machine Learning in Numerical Weather Prediction, 14th International Conference on Mesoscale Convective Systems and High-Impact Weather in East Asia (ICMCS-XIV), online, 2021/4/30

- Amemiya, A., T. Miyoshi, 1000-member 18-km-mesh SCALE-LETKF experiment with conventional observations in summer 2020, Asia Oceania Geosciences Society 18th Annual meeting, online, 2021/8/4
- Takemasa Miyoshi, Enhancing Precipitation Prediction Algorithm by Data Assimilation of GPM Observations, PMM session of the joint PI meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2021, online, 2022/1/12

②-2 国際会議・シンポジウム（口頭発表）

- Takemasa Miyoshi, Takumi Honda, Arata Amemiya, Shigenori Otsuka, Yasumitsu Maejima, James Taylor, Hirofumi Tomita, Seiya Nishizawa, Kenta Sueki, Tsuyoshi Yamaura, Yutaka Ishikawa, Shinsuke Satoh, Tomoo Ushio, Kana Koike, Erika Hoshi, and Kengo Nakajima, Big Data Assimilation: Real-time Demonstration Experiment of 30-second-update Forecasting in Tokyo in August 2020, EGU2021, online, 2021/4/26
- Jianyu Liang, Koji Terasaki, and Takemasa Miyoshi: A Machine Learning Approach to the Observation Operator for Satellite Radiance Data Assimilation, EGU2021, online, 2021/4/27
- S. Ohishi, T. Hihara, H. Aiki, J. Ishizaka, Y. Miyazawa, M. Kachi, and T. Miyoshi ‘Development of an ensemble Kalman filter-based regional ocean data assimilation system’, The second international Operational Satellite Oceanography Symposium (OSOS-2), Online, 2021/5/26
- Jianyu Liang, Koji Terasaki, and Takemasa Miyoshi: A Machine Learning Approach To The Observation Operator For Satellite Radiance Data Assimilation, JpGU, online, 2021/6/3
- S. Ohishi, T. Hihara, H. Aiki, J. Ishizaka, Y. Miyazawa, M. Kachi, and T. Miyoshi ‘Improving the salinity structure by AOEI in an EnKF-based ocean data assimilation system’, Japan Geoscience Union Meeting 2021, Online, 2021/6/3
- J. Taylor, A. Amemiya, T. Honda, Y. Maejima, and T. Miyoshi ‘Optimizing the localization scale for a convective-scale ensemble radar data assimilation system’, JpGU, Online, 2021/6/3
- Amemiya, A., T. Miyoshi, 1000-member 18-km-mesh SCALE-LETKF experiment with conventional observations in summer 2020, Japan Geoscience Union meeting, online, 2021/6/4
- Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation: Real-time Demonstration Experiment of 30-second-update Forecasting in Tokyo in August 2020, Japan Geoscience Union Meeting, Online, 2021/6/4
- Takemasa Miyoshi, Experimental platform for design and advance evaluation of frequent satellite observations to innovate weather, ocean and land surface, Japan Geoscience Union Meeting, Online, 2021/6/4
- S. Ohishi, T. Hihara, H. Aiki, J. Ishizaka, Y. Miyazawa, M. Kachi, and T. Miyoshi ‘Improving the salinity structure by AOEI in an EnKF-based ocean data assimilation

system' , Asia Oceania Geosciences Society 18th Annual Meeting (AOGS 2021), Online, 2021/8/4

- Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation: Real-time Demonstration Experiment of 30-second-update Forecasting in Tokyo in August 2020, Asia Oceania Geosciences Society virtual 2021 18th Annual meeting, Online, 2021/8/4
- Takemasa Miyoshi, Improving Precipitation Prediction by Data Assimilation of Gpm and Other Satellite Observations, Asia Oceania Geosciences Society virtual 2021 18th Annual meeting, Online, 2021/8/4
- Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation: Real-time Demonstration Experiments of 30-second-update Forecasting in Tokyo in 2020 and 2021, T. Miyoshi [et al.]Takemasa Miyoshi, Takumi Honda, Arata Amemiya, Shigenori Otsuka, Yasumitsu Maejima, James Taylor, Hirofumi Tomita, Seiya Nishizawa, Kenta Sueki, Tsuyoshi Yamaura, Yutaka Ishikawa, Shinsuke Satoh, Tomoo Ushio, Kana Koike, Erika Hoshi, and Kengo Nakajima, WMO Joint WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis, Online, 2021/9/17
- S. Ohishi, T. Miyoshi, M. Kachi, Y. Miyazawa, N. Hirose, N. Usui, Y. Fujii, N. Hirose, and Y. Tanaka 'Regional ocean data assimilation systems in Japan' , UN Ocean Decade Kickoff Conference for the Western Pacific and its Adjacent Areas, Online, 2021/11/26
- Arata Amemiya, Takumi Honda, Shigenori Otsuka, Yasumitsu Maejima, James Taylor, Hirofumi Tomita, Seiya Nishizawa, Kenta Sueki, Tsuyoshi Yamaura, Yutaka Ishikawa, Shinsuke Satoh, Tomoo Ushio, Kana Koike, Erika Hoshi, and Takemasa Miyoshi, 1000-member 30-second-update real-time precipitation forecast experiment using the supercomputer Fugaku, ISDA-online: Data Assimilation Infrastructure - Software, Frameworks, HPC, online, 2022/1/14
- Honda, T., Y. Sato, and T. Miyoshi, Assimilation of Lightning Flash Observations Using the Ensemble Kalman Filter with Additive Ensemble Perturbations: A Simulation Study, American Meteorological Society 102nd Annual Meeting, online, 2022/01/24
- Maejima, Y, T. Miyoshi Control Simulation Experiment for August 2014 Severe Rainfall Event Using a Regional Model. AMS 102nd Annual Meeting, online, 2022/1/24
- Taylor, J., A. Amemiya, T. Honda, S. Otsuka, Y. Maejima, T. Miyoshi, 2022: Convective-Scale Imbalance Induced by 30-Second Update for Radar Data Assimilation, AMS 2022 Annual Meeting, online, 2022/1/27
- Taylor, J., A. Amemiya, T. Honda, S. Otsuka, Y. Maejima, T. Miyoshi, 2022: Convective-Scale Imbalance Induced by 30-Second Update for Radar Data Assimilation, RCCS International Symposium, online, 2022/2/7
- Terasaki, K., and T. Miyoshi, A 1024-Member Data Assimilation and Forecast Experiment with NICAM-LETKF Using Fugaku: A Heavy Rainfall Event in Kyushu in July 2020. The 4th R-CCS international symposium, online, 2022/2/7

- S. Ohishi, T. Miyoshi, and M. Kachi, 'Improving the salinity structure by an adaptive observation error inflation in an EnKF-based ocean data assimilation system', Ocean Sciences Meeting 2022, Online, 2022/3/1

②-3 国際会議・シンポジウム（ポスター発表）

- S. Ohishi, T. Hihara, H. Aiki, J. Ishizaka, Y. Miyazawa, M. Kachi, and T. Miyoshi 'Fusion of high-frequency satellite observations and ocean simulation', OIST-RIKEN Joint Symposium, Series 1, Okinawa, 2021/4/6
- Maejima, Y, F. Tomizawa, T. Ushio and T. Miyoshi: Toward assimilation of high-precision 3-D lightning location data for severe thunderstorm forecast, Japan Geoscience Union Meeting 2021, online, 2021/6/3
- Otsuka, S., Y. Maejima, P. Tandeo, and T. Miyoshi, Development of an integrated NWP-DA-AI system for 30-second-update 3D precipitation prediction. JpGU2021, AAS04-P03, online, 2021/6/4.
- Honda, T., T. Miyoshi, Predictability of the July 2018 Heavy Rain Event in Japan Associated with Typhoon Prapiroon and Southern Convective Disturbances, Japan Geoscience Union Meeting, online, 2021/6/4
- Jianyu Liang, Koji Terasaki, and Takemasa Miyoshi: A Machine Learning Approach To The Observation Operator For Satellite Radiance Data Assimilation, AOGS, online, 2021/8/5
- J. Taylor, A. Okazaki, T. Honda, S. Kotsuki, M. Yamaji, and T. Miyoshi 'Oversampling Reflectivity Observations from a Geostationary Precipitation Radar Satellite: Impact on Typhoon Forecasts within a Perfect Model OSSE Framework', AOGS, Online, 2021/8/5
- J. Taylor, A. Amemiya, T. Honda, Y. Maejima, and T. Miyoshi 'Implementations for a 30-second update for a convective-scale ensemble radar data assimilation system', AOGS, Online, 2021/8/5
- Kawai Yuta, Sueki Kenta, Hirofumi Tomita: A study on the impact of advection schemes on convergence of convective updraft ensembles with respect to the grid spacing, The Fifth Convection-Permitting Modeling Workshop 2021, 2021/9/10
- S. Ohishi, T. Miyoshi, and M. Kachi 'LETKF-based ocean research analysis in the Western North Pacific and Maritime Continent regions', The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY 2021, Online, 2022/1/18
- Honda, T., Y. Sato, and T. Miyoshi, Towards the effective use of lightning flash observations for numerical weather prediction, 4th R-CCS International Symposium, online, 2022/02/07
- Maejima, Y, T. Miyoshi Control Simulation Experiment for August 2014 Severe Rainfall Event Using a Regional Model. The 4th R-CCS International Symposium, online, 2022/2/7

- S. Ohishi, T. Miyoshi, and M. Kachi ‘Improving the salinity structure by AOEI in an EnKF-based ocean data assimilation system’, The 4th R-CCS International Symposium, Online, 2022/2/7
- Otsuka, S. and T. Miyoshi, Algorithm development for the 3D precipitation nowcasting with deep learning. The 4th R-CCS International Symposium, online, 2022/2/7
- Kawai Yuta, Hirofumi Tomita: Investigation of numerical errors with the Discontinuous Galerkin method for atmospheric high-resolution simulations, The 4th R-CCS International Symposium, 2022/2/7

③-1 国内学会・シンポジウム（招待講演）

- 三好建正、ビッグデータ同化：ゲリラ豪雨予測から予測科学へ、進化型共生システムシンポジウム-未来の機械工学を考える-、オンライン、2021/4/12
- 三好建正、ビッグデータ同化：ゲリラ豪雨予測から予測科学へ、2021 年度パナソニック総合技術シンポジウム(第 39 回)専門技術セッション、PanasonicWonder Lab Osaka、2021/12/3

③-2 国内学会・シンポジウム（口頭発表）

- 本田匠, 三好建正: 平成 30 年 7 月豪雨の予測可能性: 台風 Prapiroon と東シナ海上の擾乱の影響, 日本気象学会春季大会, オンライン, 2021/5/18
- 河合佑太, 富田浩文: 不連続ガラーキン法を用いた大気境界層乱流のラージエディシミュレーション, 日本気象学会 2021 年度春季大会, 2021/05/18
- 三好建正, 30 秒ごとの衛星データのリアルタイム活用への期待, 専門分科会 5「気象衛星ひまわり 8 号・9 号の利用とその後継衛星への要望」日本気象学会 2021 年度春季大会, オンライン, 2021/5/19
- 三好建正, 数値天気予報における研究と現業の連携のあり方, 専門分科会 3「気象庁データを利用した気象研究の現状と展望」日本気象学会 2021 年度春季大会, オンライン, 2021/5/20
- 河合佑太, 富田浩文: 不連続ガラーキン法を用いた大気境界層乱流のラージエディシミュレーション, JpGU Meeting 2021, オンライン, 2021/06/04
- 三好建正, 「富岳」を使ったゲリラ豪雨予報, 2021 年度シンポジウム「「富岳」×極端気象予測〜「富岳」による極端気象予測の新しい世界〜」、オンライン, 2021/9/4
- 大石俊, 三好建正, 可知美佐子, 「高頻度海洋アンサンブルデータ同化システムにおける適用型観測誤差膨張の有効性」、日本海洋学会 2021 年度秋季大会, オンライン, 2021/9/16
- 三好建正, 気象・海洋・陸面予測を革新する高頻度衛星観測網の設計事前評価プラットフォーム, 地球観測ワークショップ, オンライン, 2021/9/28
- 三好建正, ビッグデータ同化と AI によるリアルタイム気象予測の新展開, 2021 年度 JST-理研 合同 AIP 公開シンポジウム, オンライン, 2021/12/1
- 前島康光, 三好建正: 領域気象モデルを使った局地豪雨の制御シミュレーション実験, 日本気象学会 2021 年度秋季大会, 三重/オンライン, 2021/12/6
- 三好建正, 「富岳」を使ったリアルタイムのゲリラ豪雨予報, 日本気象学会 2021 年度秋季大会, 三重/オンライン, 2021/12/8

- ・ 河合佑太, 末木健太, 富田浩文: 高解像度大気計算における力学スキームの離散精度の影響に関する研究, 日本気象学会 2021 年度秋季大会, 2021/12/8
- ・ 雨宮 新, 本田 匠, 大塚 成徳, 前島 康光, James Taylor, 富田 浩文, 西澤 誠也, 山浦 剛, 末木 健太, 石川 裕, 佐藤 晋介, 牛尾 知雄, 小池 佳奈, 星 絵理香, 三好建正, 1000 メンバー30 秒更新 SCALE-LETKF を用いた 2021 年夏のリアルタイム降水予報実験, 第 12 回データ同化ワークショップ, オンライン, 2022/2/17
- ・ 雨宮 新, 本田 匠, 大塚 成徳, 前島 康光, James Taylor, 富田 浩文, 西澤 誠也, 山浦 剛, 末木 健太, 石川 裕, 佐藤 晋介, 牛尾 知雄, 小池 佳奈, 星 絵理香, 三好建正, 富岳を用いた 2021 年夏の 30 秒更新リアルタイム降水予報実験, 「富岳」成果創出加速プログラム 防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測 2021 年度成果発表会、オンライン、2022/3/11

③-3 国内学会・シンポジウム (ポスター発表)

- ・ 前島康光, 富澤風翔, 牛尾知雄, 三好建正, 高頻度・高分解能雷観測データ BOLT の同化に向けた観測演算子の構築, 日本気象学会春季大会, オンライン, 2021/5/19
- ・ 三好建正, 30 秒ごとの衛星データのリアルタイム活用への期待, 専門分科会 5「気象衛星ひまわり 8 号・9 号の利用とその後継衛星への要望」日本気象学会 2021 年度春季大会, オンデマンド講演 (ポスター・スライドセッション) オンライン, 2021/5/20
- ・ 三好建正, 数値天気予報における研究と現業の連携のあり方, 専門分科会 3「気象庁データを利用した気象研究の現状と展望」日本気象学会 2021 年度春季大会, オンデマンド講演 (ポスター・スライドセッション) オンライン, 2021/5/20
- ・ 三好建正, jh200062-NAH グリラ豪雨予測のリアルタイム実証実験, JHPCN 第 13 回シンポジウム, オンライン、2021/7/9
- ・ 三好建正, グリラ豪雨予測を目指した「ビッグデータ同化」の研究. 第 8 回 HPCI システム利用研究課題成果報告会, オンライン, 2021/10/29
- ・ 三好建正, 令和 2 年 7 月豪雨に関する数値天気予報ビッグデータ同化実験、第 8 回 HPCI システム利用研究課題成果報告会, オンライン, 2021/10/29
- ・ 三好建正, 「富岳」を使ったリアルタイムのグリラ豪雨予報、日本気象学会 2021 年度秋季大会、三重 / オンライン、2021/12/2
- ・ 本田匠, 佐藤陽祐, 三好建正, 雷観測の観測システムシミュレーション実験: 2017 年九州北部豪雨事例, 日本気象学会秋季大会, オンライン、2021/12/2
- ・ 大塚成徳・三好建正, 深層学習による 3D 降水ナウキャストの高精度化に向けた開発, 日本気象学会 2021 年度秋季大会, WF-25, online, 2021/12/3
- ・ 大石俊, 三好建正, 可知美佐子, 「高頻度海洋アンサンブルデータ同化システムにおける適応型観測誤差膨張の有効性」、第 12 回データ同化ワークショップ、オンライン、2022/2/17
- ・ 前島康光, 川畑拓矢, 瀬古弘, 三好建正: 令和 2 年 7 月豪雨を対象とした高密度 PAWR の観測システムシミュレーション実験, 「富岳」成果創出加速プログラム 2021 年度成果報告会, オンライン, 2022/3/11

- ・ 大石俊、三好建正、可知美佐子、「高頻度海洋アンサンブルデータ同化システムにおける適応型観測誤差膨張の有効性」、「富岳」成果創出加速プログラム 防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測 2021 年度成果発表会、オンライン、2022/3/11

④-1 研究会等（招待講演）

- ・ Takemasa Miyoshi, Seminar "Fusing Big Data and Big Computation in Numerical Weather Prediction", Fluid Mechanics Unit (Professor Pinaki Chakraborty) Seminar, Online, 2021/4/20
- ・ 前島康光, 川畑拓矢, 瀬古弘, 三好建正: 令和 2 年 7 月豪雨を対象とした高密度 PAWR の観測システムシミュレーション実験, 「富岳」成果創出加速プログラムサブテーマ 2 ミーティング, オンライン, 2021/6/25
- ・ Miyoshi Takemasa, Fusing Big Data and Big Computation in Numerical Weather Prediction, Data-Centric Engineering Webinar Series, Online, 2021/11/3
- ・ 三好建正、「富岳」を使ったゲリラ豪雨予報 ～2021 年夏季のリアルタイム実証実験～、サイエンティフィック・システム研究会科学技術計算分科会 2021 年度会合 富岳スペシャル 3.0 ～新時代の防災・減災～、オンライン、2022/1/20

④-2 研究会等（口頭発表）

- ・ 三好建正、台風予測に関わるデータ同化の今後の研究に関する議論、およびムーンショット提案紹介について、今後の台風予測研究に関する研究会、オンライン、2021/4/15
- ・ Takemasa Miyoshi, Observing Systems Simulation Experiment (OSSE) Evaluating New Observing Systems Before Deployment, RCCS-café, Online, 2021/6/7
- ・ 大石俊、三好建正、可知美佐子、「アンサンブルカルマンフィルタを用いた海洋データ同化システムの開発：AOEI による海洋内部の塩分構造の改善」、第 25 回海洋データ同化夏の学校、オンライン、2021/8/11
- ・ 本田匠, 佐藤陽祐, 三好建正, 雷観測の観測システムシミュレーション実験: 2017 年九州北部豪雨事例, 異常気象研究集会, オンライン, 2021/11/25
- ・ 雨宮新, 三好建正, 2021 年夏の 1000 メンバー30 秒更新リアルタイム降水予報実験の事後解析, 第 4 回先端的データ同化と巨大アンサンブル研究会, オンライン, 2021/12/16
- ・ 大石俊、三好建正、可知美佐子、「高頻度海洋アンサンブルデータ同化システムにおける適用型観測誤差膨張の有効性」、名古屋大学宇宙地球環境研究所 研究集会「宇宙地球環境の理解に向けての統計数理的アプローチ」、オンライン、2021/12/21
- ・ 雨宮新, 三好建正, 対流スケールのアンサンブル予報の後処理手法の検討, 第 5 回大アンサンブルとアプリケーション研究会, オンライン, 2022/2/22
- ・ Amemiya, A., T. Miyoshi, Big data assimilation for rapid-update precipitation forecasting, R-CCS Cafe, online, 2022/3/7

⑤一般向け講演会等

- ・ 三好建正、数値天気予報の要：データ同化とその展望、第 60 回玉城嘉十郎教授記念公開学術講演会、京都大学、2021/12/20
- ・ 三好建正、新たな時代の気象学ー予測から制御へ、第 60 回無名塾、オンライン、2022/3/1

⑥新聞/TV/WEB 配信/雑誌等

プレスリリース：

- 2021/7/7 台風の強風予測を改善ーもしも静止気象レーダ衛星があったらー
- 2021/7/13 「富岳」を使ったゲリラ豪雨予報ー首都圏で 30 秒ごとに更新するリアルタイム実証実験を開始ー
- 2022/3/7 シミュレーションで線状降水帯の豪雨予測精度を改善

TV

- ・ テレビ朝日 報道ステーション 2021/7/13 最新予測は 3 次元でリアルタイムに/“富岳”で「30 分前」予測可能に
- ・ フジテレビ バイキング MORE 2021/7/15 大気不安定…突然の雷&ひょうに”雨柱”も”予測困難”ゲリラ豪雨 清原気象予報士が追跡
- ・ フジテレビ イット! 2021/7/16 命脅かす 3 つの「予測困難豪雨」/ゲリラ豪雨予測へ「富岳」投入/梅雨後も警戒「線状降水帯」
- ・ NHK 総合・東京 NHK ニュース おはよう日本 2021/7/21 局地的大雨「富岳」で予測 実証実験
- ・ 日テレ ZIP! 2021/7/21 富岳で豪雨予測 実証実験
- ・ 日テレ ZIP! 2021/7/21 豪雨「富岳」で高精度予報
- ・ NHK 総合・東京 NHK ニュース おはよう日本 2021/7/21 実験 スパコン「富岳」で局地的大雨 高精度予測へ
- ・ BS フジ ガリレオ X 2021/10/10 第 252 回 「減災」災害から逃げる科学
- ・ NHK ワールドオンデマンド BOSAI: Science that Can Save Your Life 2021/6/19-2022/9/25 #5 Localized Torrential Rain

新聞

- ・ 電波新聞 2021/07/16 理研など 「富岳」使い豪雨予報 リアルタイムで実証実験
- ・ 日刊工業新聞 2021/7/19 ゲリラ豪雨「富岳」で予報 理研など あすから実証 30 秒ごとに更新 30 分後まで予測
- ・ 毎日新聞 2021/7/20 ゲリラ豪雨「富岳」で予報 理研など あすから実証 30 秒ごとに更新 30 分後まで予測
- ・ 産経新聞 2021/7/20 スパコン きょうから実証実験 「富岳」でゲリラ豪雨予測
- ・ 読売新聞（大阪） 2021/7/20 「富岳」30 分内の豪雨予測 理研など 五輪・パラに合わせ首都圏で実験きょうスタート
- ・ 日経 2021/7/27 富岳でゲリラ豪雨予測、理研、実証実験、被害の軽減に
- ・ 読売新聞 2021/4/2 防災コロナ「富岳」の挑戦

- ・ 北海道新聞 2021/11/6 スパコン富岳で災害予測に活用
- ・ 静岡新聞 2021/11/8 スパコン富岳で災害予測
- ・ 熊本日日新聞 2021/11/8 ゲリラ豪雨、津波浸水… スパコン「富岳」で災害予測 理研など AIも活用、迅速な避難へ スーパーコンピューター
- ・ 神戸新聞 2021/11/13 「富岳」 災害予測でも存在感 ゲリラ豪雨や津波浸水、研究進む 複合災害、兵庫県南東部を再現し探る
- ・ 沖縄タイムス 2021/11/17 「富岳」活用で災害予測／ゲリラ豪雨や津波浸水／理研など 減災目指す
- ・ 中国新聞 2021/11/14 スパコン富岳で災害予測 ゲリラ豪雨や津波の浸水 複合型への備えに活用も
- ・ 東奥日報 2021/11/23 スパコン富岳で災害予測ゲリラ豪雨地震津波理研など救える命あるかも

WEB

- ・ goo ニュース 2021/7/14 「富岳」を用いたリアルタイム降水予報の実証実験を実施、理研らの共同研究グループ (他サイトでも転載)
- ・ livedoor ニュース 2021/7/20 スパコン「富岳」でゲリラ豪雨を予測、20日から実証実験 (他サイトでも転載)
- ・ PC Watch 2022/3/7 理研、レーダ複数台活用で線状降水帯の予測精度が向上すると実証 (他サイトでも転載)

(5) プロジェクトの総合的推進

①論文 (査読付き)

- Goto, Y., Satoh, M. (2022) Statistical Analysis of “Senjo-Kousuitai” in East Asia and Characteristics of Associated Large-scale Circulations in the Baiu season. SOLA, 18A, <https://doi.org/10.2151/sola.18A-003> (accepted 2022/02/18; online published 2022/03/24).
- Ikehata, K. and Satoh, M. (2021) Climatology of tropical cyclone seed frequency and survival rate in tropical cyclones. Geophys. Res. Lett., 48, e2021GL093626. <https://doi.org/10.1029/2021GL093626> (accepted 2021/09/09; first published 2021/09/13). This paper is cited by AGU EOS: Learn, J. (2021), Cyclone “seed” survival affects hurricane season intensity, Eos, 102, <https://doi.org/10.1029/2021E0210607>.
- Inoue, T., Rajendran, K., Satoh, M., Miura, H. (2021) On the semidiurnal variation in surface rainfall rate over the tropics in a global cloud-resolving model simulation and satellite observations. J. Meteor. Soc. Japan, 99, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-066> (accepted 2021/06/16).
- Shibuya, R., Nakano, M., Kodama, C., Nasuno, T., Kikuchi, K., Satoh, M., Miura, H., Miyakawa, T. (2021) Prediction skill of the Boreal Summer Intra-Seasonal Oscillation in global non-hydrostatic atmospheric model simulations with explicit cloud microphysics. J. Meteorol. Soc. Japan., 99, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-046>, (accepted 2021/03/26).
- 佐藤正樹, 川畑拓矢, 宮川知己, 八代尚, 三好建正 (2021) 「富岳」による新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測. 繊維学会誌, 77(2), 54-58, <https://doi.org/10.2115/fiber.77.P-54>. (published: 2021/02/15, online published: 2021/02/24)
- Kodama, C., Ohno, T., Seiki, T., Yashiro, H., Noda, A. T., Nakano, M., Yamada, Y., Roh, W., Satoh, M., Nitta, T., Goto, D., Miura, H., Nasuno, T., Miyakawa, T., Chen, Y.-W., and Sugi, M. (2021) The Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): experimental design, model description, and impacts of model updates. Geosci. Model Dev., 14, 795-820 <https://doi.org/10.5194/gmd-14-795-2021> (Accepted: 28 Nov 2020 - Published: 04 Feb 2021).
- Yamada, Y., Kodama, C., Satoh, M., Sugi, M., Roberts, M. J., Mizuta, R., Noda, A. T., Nasuno, T., Nakano, M., Vidale, P. L. (2021) 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. Progress in Earth and Planetary Science, 8, 11, <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00397-1> (accepted 2020/12/03; published 2021/01/22).
- Judt, F., Klocke, D., Rios-Berrios, R., Vanniere, B., Ziemann, B., Auger, L., Biercamp, J., Bretherton, C., Chen, X., Dueben, P., Hohenegger, C., Khairoutdinov, M., Kodama, C., Kornblueh, C., Lin, S.-J., Nakano, M., Neumann, P., Putman, W., Roeber, W., Roberts, M., Satoh, M., Shibuya, R., Stevens, B., Vidale, P. L., Wedi, N., Zhou, L. (2021) Tropical

cyclones in global storm-resolving models. J. Meteor. Soc. Japan, 99,
doi:10.2151/jmsj.2021-029 (accept 2020/12/28; EOR published 2021/01/21).

- Matsugishi, S., Satoh, M. (2021) Sensitivity of Horizontal Scale of Convective Self-aggregation to Sea Surface Temperature: Radiative Convective Equilibrium Experiments with a Global Nonhydrostatic Model. J. Adv. Model Earth Syst., submitted (2021/05/28).
- Inoue, T., Rajendran, K., Satoh, M., Miura, H. (2021) Dataset for "On the semidiurnal variation in surface rainfall rate over the tropics in a global cloud-resolving model simulation and satellite observations." Meteorological Society of Japan. Dataset. <https://doi.org/10.34474/data.jmsj.16616554> (published 2021/09/20).

②論文 (査読なし)

- 佐藤正樹, 2021: 変化する気候における極端気象・気候. 特集 IPCC シンポジウム/気候講演会. グローバルネット. 2021年12月号.

③-1 国際会議・シンポジウム (招待講演)

- Satoh Masaki, Chihiro Kodama, Hisashi Yashiro, Tomoki Miyakawa, Yohei Yamada, Woosub Roh, 2021: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) studies on the supercomputer Fugaku: Challenges and next directions. AGU Fall Meeting 2021, 12-16 December (invited).

③-2 国際会議・シンポジウム (口頭発表)

- Kohsuke Ikehata, Masaki Satoh, 2021: Climatology of Tropical Cyclone Seeds and Survival Rates to Tropical Storms. AOGS 2021 Virtual 18th Annual Meeting 1-6 August 2021 (Oral presentation 5 Aug. 2021).
- Masaki Satoh, Woosub Roh, Shuhei Matsugishi, Yasutaka Ikuta, Naomi Kuba, Hajime Okamoto, 2021: Evaluation and improvement of cloud and precipitation processes of NICAM with ULTIMATE. Improvement and calibration of clouds in models 2021, Toulouse, France, Apr. 12 - 16 (online Presentation).

④国内学会・シンポジウム (口頭発表)

- 佐藤正樹, 2021: 防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測 <ゴードン・ベル賞ファイナリスト課題>. HPCI フォーラム ―スーパーコンピュータ「富岳」への期待―, 2021年3月9日(火) オンライン開催

⑤新聞/TV/WEB 配信/雑誌等

- 佐藤正樹, 2021: 特別企画「真鍋淑郎博士の業績と素顔」業績の紹介. 日本気象学会 2021年秋季大会 2021年12月4日.

- Masaki Satoh, 2021: Detection, attribution, and projection of tropical cyclones affected by global warming. OIST seminar, Fluid Mechanics Unit, November 2, 2021. (seminar)
- 佐藤正樹, 2021: 地球温暖化に伴って凶暴化する台風. 日本商工会議所講演会 2021 年 10 月 21 日. (招待講演)
- 2021/11/15 [AGU EOS] Learn, J. (2021) Cyclone “seed” survival affects hurricane season intensity, Eos, 102, <https://doi.org/10.1029/2021E0210607>. AGU EOS (2021 年 11 月 15 日)

プレスリリース

- 日本経済新聞電子版 2021 年 10 月 6 日掲載.
- 2021/06/30 日本経済新聞朝刊にて 佐藤正樹教授らの取材記事が掲載。「豪雨もたらす線状降水帯 気象庁が挑む「半日前予測」 豪雨防災は今④」
(2021 年 6 月 30 日日本経済新聞電子版)

⑥受賞・国際共同（協力）研究

- 2021 年 6 月 6 日: “Progress in Earth and Planetary Science Most Cited Paper Award 2021”: Progress in Earth and Planetary Science (PEPS) に掲載された論文 Stevens et al. (2019) 受賞