

令和2年度高性能汎用計算機高度利用事業
「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3年5月28日
国立大学法人東京大学大気海洋研究所

佐藤 正樹

目次

補助事業の名称	- 2 -
1. 補助事業の目的	- 2 -
2. 令和2年度（報告年度）の実施内容	- 2 -
2-1. 当該年度（令和2年度）の事業実施計画	- 2 -
(1) テーマ1：短時間領域スケール予測	- 2 -
(2) テーマ2：全球スケール予測	- 2 -
(3) テーマ3：先進的大規模データ同化手法	- 3 -
(4) プロジェクトの総合的推進	- 3 -
2-2. 実施内容（成果）	- 4 -
2-2-1. テーマ1：短時間領域スケール	- 4 -
(1) 成果概要	- 4 -
(2) 実施体制	- 5 -
(3) 成果内容	- 5 -
2-2-2. テーマ2：全球スケール予測	- 55 -
(1) 成果概要	- 55 -
(2) 実施体制	- 55 -
(3) 成果内容	- 56 -
2-2-3. テーマ3：先進的大規模データ同化手法	- 76 -
(1) 成果概要	- 76 -
(2) 実施体制	- 76 -
(3) 成果内容	- 76 -
2-2-4. プロジェクトの総合的推進	- 89 -
(1) 成果概要	- 89 -
(2) 実施体制	- 89 -
(3) 成果内容	- 90 -
2-4. 実施体制	- 95 -

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2年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和2年度）の事業実施計画

(1) テーマ1：短時間領域スケール予測

「富岳」実機での運用を意識して、HPCI 第二階層を利用したシステム構築、計算を実施する。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100メンバー程度でかつ狭領域（数百km四方程度）における実験を実施して、「富岳」で目指す1000メンバーを用いた日本全域実験の準備を行う。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 では実観測データ同化実験を行い、「富岳」稼働時の準備を行う。「富岳」の試行的利用が可能となった場合には、「富岳」上へのシステム構築および実効性能評価等を行い、大規模実験に向けた準備を行う。準備段階で得られた情報について気象庁数値モデル開発担当者との意見交換を行う。（一般財団法人 気象業務支援センター、理化学研究所）

(2) テーマ2：全球スケール予測

HPCI 第二階層を利用して非静力学正二十面体格子大気モデル NICAM(水平14km)を用いた数10～100メンバー程度の1ヶ月アンサンブル実験を実施し、台風発生等のターゲット現象について、MJ0/BSIS0に代表される季節内変動の影響に関する統計情報を取得する。また、NICAM(水平14km)を用いた3ヶ月実験を複数のアンサンブル実験を実施し、海面水温の分布構造に対する大気の応答について調査する。これらの解析の結果を踏まえて、翌年以降の「富岳」を用いた実験に向けた実験設定・事例選定の準備を行う。（東京大学、海洋研究開発機構、理化学研究所）

(3) テーマ3：先進的大規模データ同化手法

HPCI 第二階層を用いて、気象場と微量気体成分の両方をデータ同化する NICAM-LETKF アンサンブルデータ同化システムの開発を行い、次年度以降の富岳を用いた高解像度大規模計算に向けたパイロットスタディを実施する。具体的には、衛星観測データにおいて温室効果ガス等が放射輝度に影響を及ぼす波長の観測値を同化に用いる技術について、開発と初期的な結果を確認する。また、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、気象場の同化方法や数 10 から 1000 メンバーまでのアンサンブル数の変化が再現性能に与える効果を調べる。富岳実機の試験利用が可能であった場合、グランドチャレンジ実験である 3.5km メッシュ 1000 メンバーアンサンブル同化実験を試行する。(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。さらに、これまでに得られた貴重なデータを維持するとともに、本課題で得られる成果等を保管・管理し、研究の維持・推進を実施するための研究環境を整備する。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、研究会の開催等、参画各機関の連携・調整を行い推進する。本プロジェクトで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

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 では実観測データ同化実験を行い、「富岳」稼働時の準備を行った。具体的には Oakforest-PACS にシステムを構築した上で、30秒毎に得られるフェーズドアレイ気象レーダー（PAWR）の反射強度及びドップラー速度を同化するリアルタイムシステムを開発し、2020年8月25日から9月5日まで、首都圏において30秒毎に更新する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。リアルタイムシステムの開発に当たって、2019年夏の事例について新しい対流の発達を数値天気予報の方がナウキャストよりも精度良く予測することを示したほか、PAWRの水平局所化の依存性を調査し、本実験設定では1~2kmが最適であると結論づけた。

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100メンバー程度でかつ狭領域（数百km四方程度）における実験を実施して、「富岳」で目指す1000メンバーを用いた日本全域実験の準備を行った。さらに、「富岳」上へのシステム構築および実効性能評価等を行い、大規模実験に向けた準備を行った。まず令和2年7月豪雨を対象にして、水平解像度を2kmとし、西日本領域で100メンバーによるNHM-LETKF実験を行い、気象庁メソモデルおよびメソアンサンブルによる予測と比較を行い、それぞれ降水精度および確率分布予測が上回ることを確認した。さらに「富岳」上へシステムを構築して、同領域で1000メンバーによるNHM-LETKF実験を実施し、洪水発生12時間前から決定論的予測、確率予測とも非常に良い精度であることが分かった。

また「富岳」の試行的利用が可能となったため、「富岳」上へのシステム構築および実効性能評価等を行い、大規模実験に向けた準備を行った。SCALE-LETKFでは1000個の大アンサンブルを用い、大規模実験に向けた準備として解析精度へのアンサンブル数の影響評価について初期的な結果を得た。実行性能評価について、従来型観測データのみを同化する水平解像度18km、1000メンバーのSCALE-LETKFを「富岳」（2000ノード）及びOakforest-PACS（501ノード）を用いて比較し、計算時間が約3分の1になることを確認した。両者のピーク性能を考慮すると、「富岳」での実行性能は、Oakforest-PACSでの実行性能より約27%低下していることが分かった。NHM-LETKFでは、一回の同化サイクル（3時間予報+1000メンバーLETKF+後処理）の場合、2,000ノード時間の性能で、これは「京」における性能の3-4倍に当たることが分かった。

以上の情報について気象庁数値モデル開発担当者との意見交換を行った。具体的には「富岳」におけるシステム構築情報を提供し、これを活用して気象庁担当者が現業予測システムの「富岳」への移植を行い、また気象庁メソモデルの性能評価を行うなどの成果を得た。

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。10,000メンバーアンサンブル実験。以上より科学的知見の創出および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2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

(要約)

サブテーマAにおいては、以下の開発を行った。

まず令和2年7月豪雨において1000メンバーによるNHM-LETKFを実行して、気象庁現業システムとの比較を行い、その性能が優れていることを示した(①-6節)。このアンサンブルシミュレーションを用いて球磨川流域の洪水計算を実施した。その結果、観測された流量とよく一致する計算であることが分かった(①-1)。さらに気象庁流域雨量指数プログラムを用いて同様に①-6を用いて計算したところ、洪水の発生する確率が50%と予測できることが分かった(①-2節)。NHM-LETKFを用いた日本領域再解析においては東北大スパコンを用いて10年間の再解析を実施し、5km解像度による結果がアメダスによる観

測と近いことを示した (①-5)。気象庁非静力学モデル (NHM) を用いて「富岳」の性能評価を行った結果、「京」と比べて 3-4 倍の性能であることが分かった (①-3 節)。さらに気象庁現業メソモデル (asuca) の「富岳」への移植を行い、いくつかのオプションが正常に動作することを確認した (①-4 節)。

先端的なデータ同化手法や巨大アンサンブルを用いたデータ同化に向けて、サブテーマ B では以下の開発を行った。

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 では実観測データ同化実験を行い、「富岳」稼働時の準備を行った。具体的には、従来型観測を同化する準リアルタイム実験を継続的に行い、平成 30 年 7 月豪雨において東シナ海付近の擾乱が豪雨の予測可能性に影響していたことが明らかになったほか (②-1 節)、令和 2 年 7 月豪雨について予測可能性の調査を行い、九州地方の南西からの水蒸気輸送と収束が豪雨を引き起こした一つの要因であることを示した (②-2 節)。さらに同豪雨事例に対して、仮想的に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) を配置した場合、線状降水帯による豪雨予報の精度がどの程度改善しうるかについて、「富岳」を使った観測システムシミュレーション実験により定量的に評価した (②-3 節)。平成 27 年関東東北豪雨事例を対象に、日本全国 4000 地点の稠密な地上観測データが予報精度に与えるインパクトを評価し、地上気圧データが最も予報改善に寄与したことを明らかにした (②-4 節)。このほか、30 秒毎に得られるフェーズドアレイ気象レーダー (PAWR) の反射強度及びドップラー速度を同化するリアルタイムシステムを開発し、2020 年 8 月 25 日から 9 月 5 日まで、首都圏において 30 秒毎に更新する 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 (②-5 節)。リアルタイムシステムの開発に当たって、2019 年夏の事例について新しい対流の発達を数値天気予報の方がナウキャストよりも精度良く予測することを示したほか (②-6 節)、PAWR の水平局所化の依存性を調査し、本実験設定では 1~2km が最適であると結論づけた (②-7 節)。このほか新規データの同化に向け、雷観測データやカイトによる観測データの観測システムシミュレーション実験を行い、初期的な成果を得た (②-8、9、10 節)。また、SCALE-LETKF に海洋モデルを結合し、台風に対する海洋の役割について調査を行い、台風の経路及び強度共に改善する結果を得た (②-11 節)。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を行い、共分散膨張や Incremental analysis update 法への感度を調査した (②-12 節)。

「富岳」の試行的利用が可能となったため、「富岳」上へのシステム構築および実効性能評価等を行い、大規模実験に向けた準備を行った。具体的には、「富岳」を使って 1000 個の大アンサンブルを使った大規模実験に向けた準備を行い、解析精度への影響評価について初期的な結果を得た。実行性能評価について、従来型観測データのみを同化する水平解像度 18km、1000 メンバーの SCALE-LETKF を富岳 (2000 ノード) 及び Oakforest-PACS (501 ノード) を用いて比較し、計算時間が約 3 分の 1 になることを確認した。しかし、両者のピーク性能を考慮すると、「富岳」での実行性能は、Oakforest-PACS での実行性能より約 27% 低下していることが分かった (②-13 節)。また、全球水平解像度 56km、1024 メンバーの NICAM-LETKF で令和 2 年 7 月豪雨の予測実験を「富岳」で実施し、豪雨発生の 5 日前から予測可能となり、アンサンブルラグ相関により九州地方の南西からの水蒸気輸送が強いほどより降水量が多くなることを示した (②-14 節)。

また、機械学習を用いた研究成果として、アンサンブルカルマンフィルタと深層学習を組み合わせた手法を開発し、Lorenz-96 モデルを用いた実験を行い解析精度が向上する結果を得た (②-15 節)。水文

気象への応用として、巨大アンサンブル計算と機械学習の融合による代理モデルを構築することで、計算コストを軽減し、予測に感度のあるパラメータの数は多くないという初期結果を得た(②-16節)。モデル出力値から衛星輝度温度を計算する放射伝達モデルを機械学習に置き換える研究を行い、衛星輝度温度を同化しない場合よりも改善しうる初期的な結果を得た(②-17節)。

非ガウスデータ同化について、SPEEDY-LETKF システムをベースとした粒子フィルタ(PF)を開発し、非ガウスな場における解析精度が改善する結果を得た(②-18節)。また、事前分布近似ガウス混合分布を用いたLPFGMを実装し、リサンプリング頻度やインフレーションを適切に設定することでLETKFより改善する可能性を示した(②-19節)。

サブテーマCでは、「富岳」の計算資源を活かすような、新たな物理過程を考慮した数値気象モデルの開発や、「富岳」の利用により研究が促進されるような超高解像度シミュレーションを実施した。また、そのようなシミュレーション実施に向けた予備的な研究も実施した。

台風に関して、これまで指摘されていなかった、台風が前線帯に接近した際に生じる非地衡成分による北向き水蒸気フラックスにより、中上層の加湿がもたらす遠隔降水の促進(③-1)や2019年台風19号において高い海面水温が進路を北偏させる機構(③-2)が明らかとなった。

最新の気象庁のメソスケール数値解析予報実験システムの「富岳」への移植も行った(③-3)。実行速度などまだ課題はあるものの、「富岳」において実行環境が整った。これにより「富岳」を利用し、現業システムの開発を行うことができるようになった。超高解像度のシミュレーションにより、あまり詳細に調べられていなかった圏界面付近の乱気流が再現された(③-4)。この計算データを利用し、航空機の飛行をシミュレーションする先端的な試みを行った。電荷分布を再現し発雷を再現するシミュレーションの開発と検証がなされた(③-5)。

都市部における突風や暑熱を再現するため、気象モデルと街区スケールの現象を扱う数値流体シミュレーションを連成した計算を行った(③-6)。特に、アンサンブルを利用し、流入風変動を再現する手法を検討した。その他に、三陸地方の複雑地形の風下にあたる大船渡における突風の再現の検証や(③-7)、梅雨前線上のメソ α スケール低気圧や令和2年7月豪雨に対する上層の渦位擾乱がもたらす影響(③-8)が調べられた。

このように新たな過程を考慮できる先端的な数値モデル開発とともに、様々な気象に対して、数値気象シミュレーションによりメカニズムを明らかにする研究が展開された。

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. 球磨川流域を対象とした超多数洪水アンサンブル予測

本年度は、図A-1に示すような球磨川流域の洪水を再現するためのモデルを開発した。市房ダム流域、川辺川ダム流域(現在まだ川辺川ダムは実在しない)については貯留関数法による流出計算を実施し、人吉市などを含む居住圏については浅水流方程式で5m解像度の洪水計算を実施した。浅水流方程式については「富岳」に実装してOpenMP、MPI並列計算が可能である。令和2年7月豪雨による洪水を再現するために浸水計算した結果を図A-2に示す。浸水計算結果は国土地理院による洪水痕跡を良く再現しているのがわかる。次にDuc et al. (2021)による1000アンサンブル降雨を流出モデルに入力した結果を市房ダムについて図A-3に示す。計算流量は観測流量をほぼ全域で包含し、特にベスト50メンバーは観測流量とよく一致している。図A-4には人吉市付近の浸水再現計算結果を示した。

実際には同様な洪水計算を 1000 回実施し、人吉市のアンサンブル浸水予測計算も実施したが、紙面の制限のため詳細は別報に譲る。

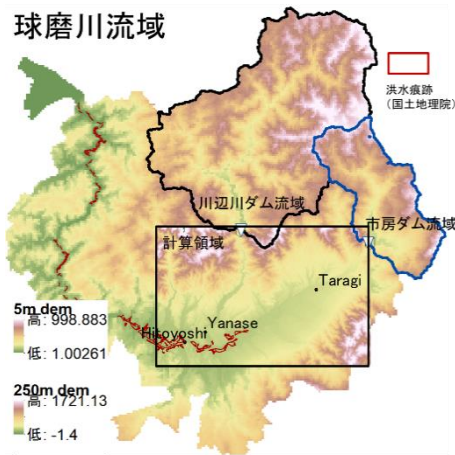


図 A-1 球磨川流域図

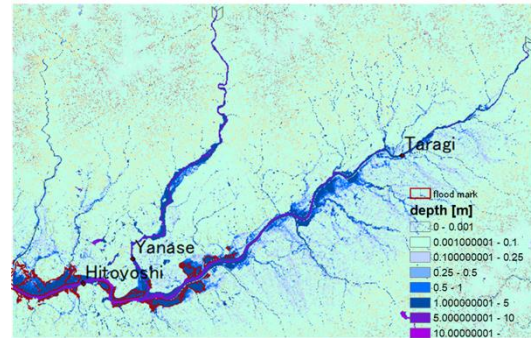


図 A-2 浸水計算結果 (図 A-1 の計算領域)

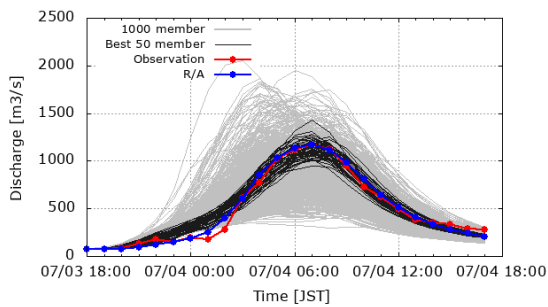


図 A-3 市房ダム 1000 流出計算結果

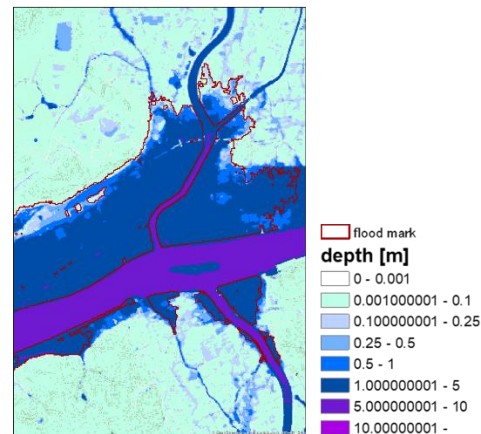


図 A-4 人吉市再現計算結果

①-2. 1000 メンバーアンサンブル予測結果と流域雨量指数を用いた球磨川の洪水予測

令和 2 年 7 月豪雨では熊本県を流れる球磨川が氾濫し各地で大きな被害が発生した。特に球磨村や人吉市ではこれまでに経験したことの無い高い位置まで浸水した事が報告されている。この様な洪水災害は毎年の様に発生しており、早期の予測は防災上重要な課題である。本研究では「富岳」をもちいてアンサンブル数値気象予測を行い、そのアンサンブル予測を用いて流域雨量指数を計算した。

降水予測は Duc et al(2021)の結果を用いた。水平解像度は 2km とし近畿地方から沖縄県を含む領域で予測を行った。アンサンブル数の違いを検証するため、メンバー数は 1000 メンバーと 100 メンバーとした。予報は 7 月 3 日 18 時 (JST) を初期時刻とする 24 時間である。流域雨量指数のデータフォーマットに合わせて 1km に内挿した。

気象庁の流域雨量指数は流出過程をタンクモデルで計算し、河道の流下は Manning 式と連続の式で計算するモデルである。まずレーダーで観測された解析雨量を用いて 6 月 1 日 0 時 (JST) から 7 月 3 日 18 時までスピニングを行い、3 日 19 時から翌日 15 時は 1000 メンバーと 100 メンバーのアンサンブル降

水予報結果を用いた予報実験を行った。結果の検証は大きな被害が出た球磨村渡地区を含むグリッドで行った。

図 A-5 に 1000 メンバーの降水データを用いた結果を示す。解析雨量を用いた再現実験では 7 月 4 日 6 時に観測史上最大（既往最大）の流域雨量指数を超過し、9 時にピークを迎えている。最も精度が良いと考えられる初期値から計算した決定論的予報では 6 時に既往最大値を超過し、9 時にピークを迎えている。既往最大値を 6 時に超過したメンバーは 37% であり、9 時の時点では 56% であった。また 30 年確率、50 年確率（30 年、あるいは 50 年に 1 回の発生確率）を超過したメンバーは最大でそれぞれ 51%、40% であり、ピークの時刻とも一致した。

図 A-6 に 100 メンバーの降水予報結果を用いて計算した結果を示す。決定論的予報は 1000 メンバーと同様に 9 時にピークを示しているが、予報開始からピークに至る過程で差異が見られた。既往最大値を 6 時に超過したメンバーは 9% であった。超過確率では、既往最大、30 年確率、50 年確率を超過したメンバー数はそれぞれ最大で 51%、42%、35% であったが、ピークの時刻とは解析雨量の結果と比較して 1、2 時間のずれがあった。

1000 メンバーと 100 メンバーの結果を比較すると、1000 メンバーの方が高い危険性を示した。1000 メンバーの予測精度が良かったのは、降水データの位置と時間の精度が 100 メンバーよりも良かったためと考えられる。例えば 100 メンバーのアンサンブル平均は予報開始直後に解析雨量と違うパターンを示している。この理由は先行降雨によってタンクがある程度満たされており、かつ地形が急峻であったため、流域に降った雨が地中に浸透せずに河川に流入しやすい状況になっており、降水の位置や時間に対して敏感に反応したためと考えられる。今後の課題としては、災害の予測には流域雨量指数だけでなく表面雨量指数や土壌雨量指数も加味した情報が重要であるので、それらの情報も加えて災害予測の可能性を調べていく必要がある。

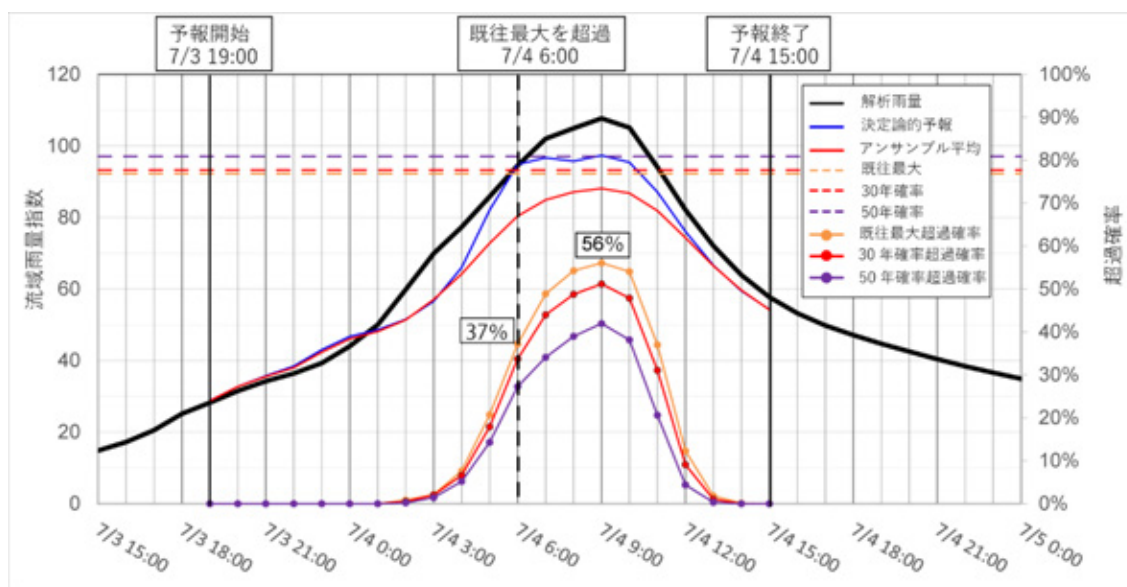


図 A-5 : 1000 メンバーの流域雨量指数

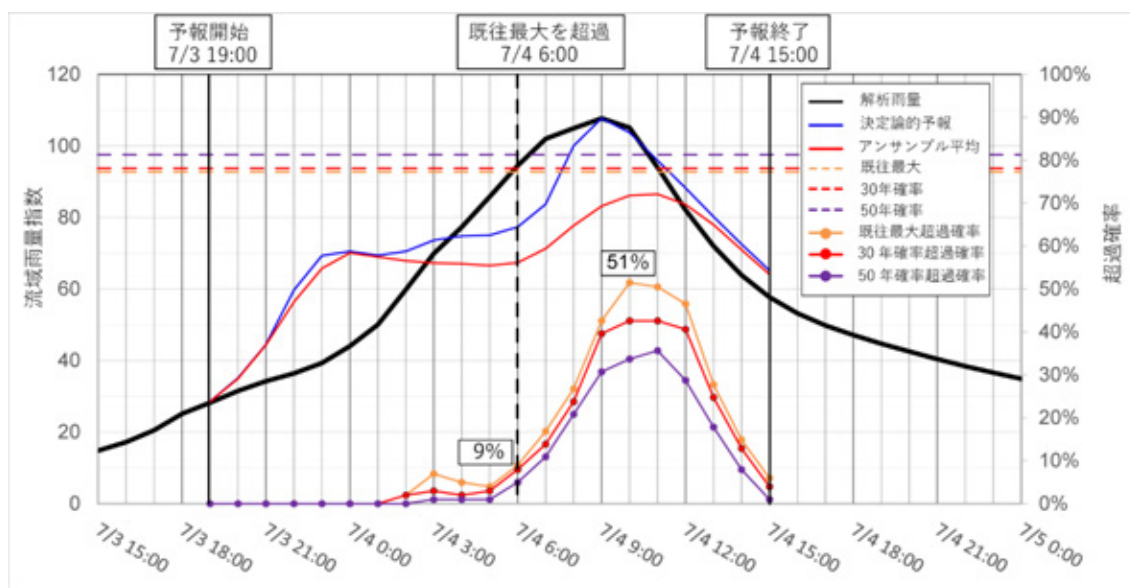


図 A-6 : 100 メンバーの流域雨量指数

①-3. 気象庁非静力学モデルの性能評価

気象庁非静力学モデル（以下、NHM）は本プロジェクトにおいて複数のユーザーが利用する主要なモデルである。「富岳」で用いるプログラムは、「京」で実行性能が出るように最適化された NHM 本体と、初期値・境界値を作成する NHM の並列前処理プログラムで構成されている。今年度は NHM を「富岳」に実装し、現業予報に近いモデル領域で計算に必要なノード数の調査やファイルの入出力を含む実行時間（ELAPSE）を計測した。図 A-7 に示す計測に用いた計算ドメインは、気象庁局地モデルの試験運用期間時の領域とした。

表 A-1 に計測結果を示す。「京」では 1 ノードあたりのメモリが 16GB であったため、水平解像度 1km の実験では分散前処理が必要であったが、「富岳」では 1 ノードあたりのメモリが 32GB に増えたため、分散前処理が必要で無いことを確認した。また「京」ではできなかった図 A-7 のような広領域での水平解像度 125m の実験ができることを確認した。計算速度は京では水平解像度 2km の実験では 400 ノードで 6 分（44 ノード時間）、水平解像度 500m の実験では 1600 ノードで 80 分（2133 ノード時間）かかっていたが、「富岳」では 48 ノードで 11 分（9 ノード時間）、1296 ノード 41 分（886 ノード時間）であり計算が 3-4 倍早くなったことが確認された。

「富岳」で行った 15-5km の LETKF のシステムの計算速度は、1000 メンバーの EnVAR（アンサンブル変分法）は 1000 ノードで 70 分（1167 ノード時間）、LETKF の場合は、1000 ノードで 40 分（666 ノード時間）であった。一回の同化サイクル（3 時間予報+1000 メンバー LETKF+後処理）の場合は、1000 ノードで 2 時間（2,000 ノード時間）必要であった。

本プロジェクトで目指す水平解像度 1km、1000 メンバーの予報実験に必要な計算資源を推定する。24 時間の数値気象予報の場合、図 A-7 に示す領域では、1,280,000 ノード時間（480 ノード*160 分*1000 メンバー）必要と考えられる。LETKF システムは 5-2km にする予定であり、モデルは気象庁の現業数値予報モデル asuca を使う予定である。推定での使用量は 700,000 ノード時間である。

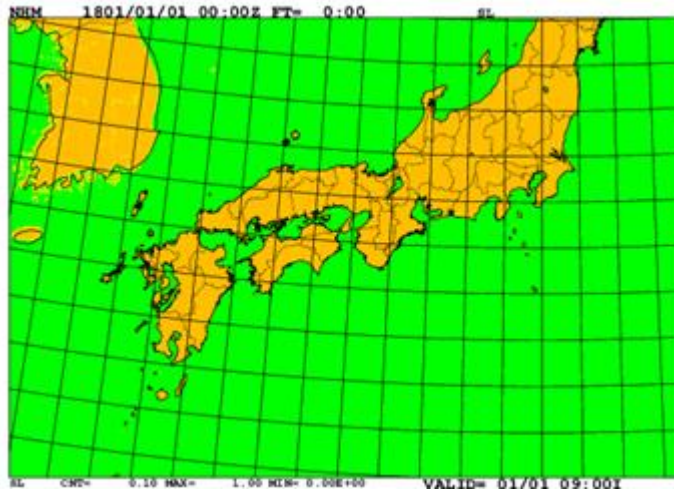


図 A-7 計測に用いた計算領域

水平解像度	格子数	実行結果		ノード数	ノードあたりの最大MPI数	実行時間
2km	800*550*60	前処理	○	48	4	0:01:41
		予報	○	48	4	0:11:39
1km	1599*1099*60	前処理	○	480	4	0:02:27
		予報	○	480	4	0:17:08
500m	3197*2197*85	前処理	○	1296	4	0:05:47
		予報	○	1296	4	0:41:46
250m	12641*40401*85	前処理	○	2616	4	0:14:13
		予報	○	2616	4	5:16:40
125m	10654*7321*85	前処理	○	9216	4	1:17:38
		予報	○	9216	4	5:22:57

表 A-1 NHM の前処理と本体の計測結果

①-4. 気象庁メソモデルの富岳への移植および評価

気象庁メソモデル(以下、asuca)を「富岳」へ移植し、そのパフォーマンスを評価した。評価した解像度は2, 1, 0.5 km、境界層スキームに対して荒い解像度に用いられるものから細かい解像度に用いられる3種のオプションMYNN、ADM、SGM、雲物理過程として様々なモデルに実装されている7種のスキームLFM、WSM6、NHMM_M1、NHM_M2、MORR_TWO_MOMENT、THOMPSON、WDM6、対流パラメタリゼーションであるKFスキームをOn, Off、さらにasucaからとNHMからのダウンスケールを実施した。また事例としては、2020年7月豪雨、2014年広島豪雨である。

結果、asucaは0.5kmでも安定して動作することが分かった。またSGMは計算安定性が悪く、実行できなかった。しかしMYNN、ADMはさほど違いが見られなかった。雲物理としては、2-momentスキームは入力に数濃度が必要であり、実行できなかった。NHMからのダウンスケールにおいては水物質の数濃度(大気1kgあたりの雲水、雨水などの個数)データを供給可能であるが、nusdasにおける要素名が変更されているためにそのままでは実行できなかった。このため、実行可能であった雲物理過程はLFM、WSM6

であり、これらの降水表現には大きな違いはなかった。KFは降水域を広くする効果があるものの地形に励起される降水が目立つ。asucaからのダウンスケールは問題なく動作するが、NHMからのダウンスケールは地形を作成するステップが必要であった。

下図に7月豪雨事例と広島豪雨事例について例を示すが、それぞれ観測と比べて遜色ない降水域、強度であった。

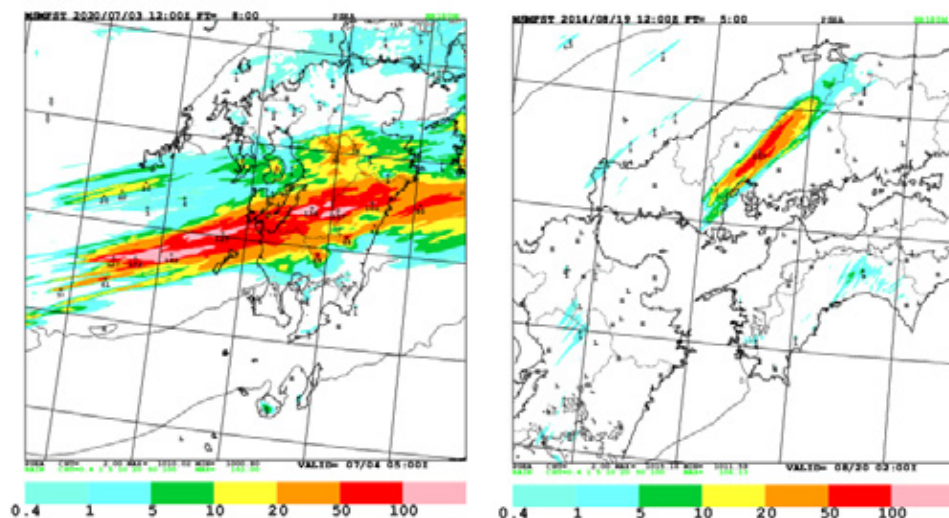


図 A-8 3時間降水量分布(シェード:mm)と地上気圧(コンター:hPa)、左)令和2年7月豪雨事例(用いたオプション:ADM、WMS6、KF_off、解像度:0.5km)、右)広島豪雨事例(用いたオプション:MYNN、LFM、KF_off、解像度:0.5km)。

①-5. 従来型観測を用いた高解像度日本領域再解析

25 kmメッシュ及び5 kmメッシュの気象庁非静力学モデル(NHM)に従来型観測のみを同化する日本領域再解析システムを実施している。データ同化手法にはアンサンブルカルマンフィルタ(LETKF)を用いている(Miyoshi and Kunii, 2012; Kunii, 2014)。全球再解析を側面境界に用いた場合の境界値摂動の調整や限られた観測データに対する有効性の確認などを調べた。当該システムでは、準備研究において、降水量分布の再現精度が2種類のダウンスケール(長期積分型および繰り返し初期値型)より優れていることを確認している(Fukui et al., 2018)。さらに、台風ボーガスの扱いを調整したうえで、システムを固定した。

HPCI第二階層として提供された計算資源(東北大学サイバーサイエンスセンター)を用いて、およそ10年間の再解析を実施した。得られた再解析データを2次元及び3次元(等圧面)の各気象要素について、標準メンバー、メンバー平均およびメンバー間の分散を保存した。これらのデータを用いて夏季の降水に着目した初期的検証を実施した。図は実施した再解析10年分の7月の降水強度の再現精度である。25 kmメッシュは強雨の頻度が少ないが、5 kmメッシュはアメダスで観測された頻度に近づくことを確認できた。

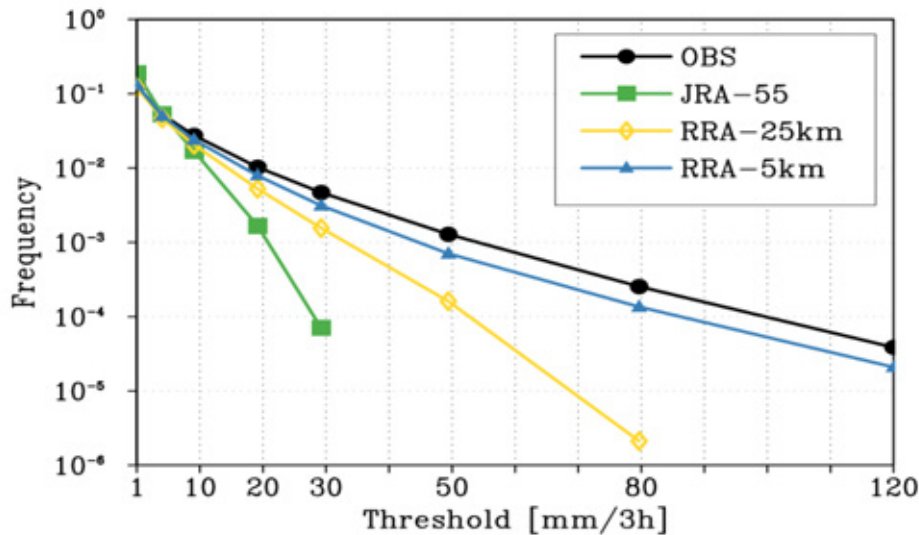


図 A-9 アメダス観測及び、気象庁全球再解析(JRA-55)、25 km、5 kmメッシュの領域再解析について、3時間降水量がしきい値を超える頻度（横軸はしきい値）。ここで、対象は日本列島上のアメダスで、JRA-55 及び 25km、5km の領域再解析は、各アメダス地点に内挿されたもの。

参考文献

- Fukui, S., T. Iwasaki, K. Saito, H. Seko, and M. Kunii, 2018: A feasibility study on the high-resolution regional reanalysis over Japan assimilating only conventional observations as an alternative to the dynamical downscaling. *J. Meteor. Soc. Japan*, 96, 565-585.
- Kunii, M., 2014: Mesoscale data assimilation for a local severe rainfall event with the NHM-LETKF system. *Wea. Forecasting*, 29, 1093-1105.
- Miyoshi, T., and M. Kunii, 2012: The local ensemble transform Kalman filter with the Weather Research and Forecasting model: Experiments with real observations. *Pure Appl. Geophys.*, 169, 321-333.

①-6. Forecasts of the July 2020 Kyushu heavy rain using a 1000-member ensemble Kalman filter

Forecast performances of the July 2020 Kyushu heavy rain have been revisited with the aim of improving the forecasts for this event. While the Japan Meteorological Agency's (JMA) deterministic forecasts were relatively good, the JMA's ensemble forecasts somehow missed this event. Our approach is to introduce flow-dependence into assimilation by running a 1000-member local ensemble transform Kalman filter (LETKF1000) to extract more information from observations and to better quantify forecast uncertainties. To save computational costs, vertical localization is removed in running LETKF1000. Qualitative and quantitative verifications show that the LETKF1000 forecasts outperform the operational forecasts both in deterministic and probabilistic forecasts.

Rather than a trick to save computational costs, removal of vertical localization is shown

to be the main contribution to the outperformance of LETKF1000. If vertical localization is removed, forecasts with similar performances can be obtained with 100 ensemble members. We hypothesize that running ensemble Kalman filters with around 1000 ensemble members is more effective if vertical localization is removed at the same time. Since this study examines only one case, to assess benefit of removing vertical localization rigorously when the number of ensemble members is around 1000, a larger set of cases needs to be considered in future.

参考文献

Duc, L., T. Kawabata, K. Saito, and T. Oizumi, 2021: Forecasts of the July 2020 Kyushu heavy rain using a 1000-member ensemble Kalman filter. *SOLA*, 17, doi:10.2151/sola.2021-007.

①-7 令和2年7月豪雨に関する確率予測

まず気象予測モデルと観測データを結びつけて初期値の精度を向上させる「データ同化」技術を用いて予測の精度の向上を図り、同時に“アンサンブルシミュレーション”を行い、予測の不確実性を評価した。

対象とした事例は、土砂崩れ・河川氾濫などで死者84名となる激甚災害をもたらした「令和2年7月豪雨」の中でももっとも被害の大きかった7月4日早朝に発生した熊本県球磨川の氾濫を引き起こした線状降水帯である。この線状降水帯を前日夕方から予測可能であるかを調べた。なお氾濫が発生した熊本県球磨川流域を図A-10右にしめしている。

まず、アンサンブルシステムとして日本全域を対象に水平解像度（計算の細かさ）5 kmで1000個のシミュレーションを実行して（図A-10左）、データ同化を行った。同化に用いた観測データは気象庁現業システムで同化しているデータのうち、衛星輝度温度、降水量データ、可降水量データを除いたものである。6月29日9時から3時間間隔で計算を行い、7月3日18時について1000個の初期値を得て、水平格子間隔2 kmでそれぞれ24時間予測を行った（アンサンブル予測）。さらに1000個の初期値を平均した新たな初期値を作成して、これを用いた1001個目の予測も行った（決定論予測）。これらを用いて、7月4日5時過ぎに発生したとみられる氾濫までの降水予測精度および確率予測精度を調べた。なお気象庁の現業メソアンサンブルシステムは水平格子間隔5 km、21個のシミュレーションで構成されており、本研究ではその2.5倍の水平解像度と約50倍のアンサンブルサイズである。

決定論予測による雨量（図A-11b）を観測値である気象庁解析雨量と比較すると（図A-11a）、球磨川流域で観測と同等の3時間で100 mm以上となっており、良い予測精度であることが分かる。次に、アンサンブル予測から3時間で50 mm以上の大雨に対する確率分布を求めたところ、発生した線状降水帯に沿って80%以上の高い予測確率が確認された（図A-11c）。また決定論予測では解析雨量に存在しない九州の西海上に延びた降水帯が強めに予測されているが、この領域の確率が低く予測されている。これらのことから、確率予測では、降水予測に対してその不確実性を的確に再現しているということが言える。

図A-12は計算を始めた3日18時から氾濫の起きた4日6時までの12時間の積算降水量で、200mmを60%という高い確率値で予測されている。今回の結果は、このように高い信頼度を伴って大雨が長く続く予測ができたということを意味している。今回の実験では、洪水発生12時間前になる7月3日18時以前の情報のみを用いた。すなわち早朝の氾濫に対して前夜の早い段階で、大雨の予測とその

信頼度を住民に伝えることが可能かもしれないということを意味しており、効果的な避難行動に繋がるものと期待される。

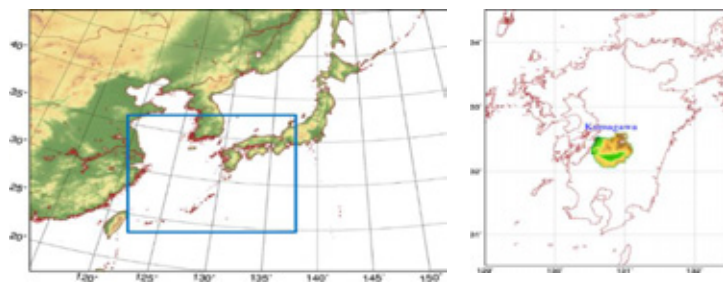


図 A-10 左：アンサンブル同化計算領域。青枠はアンサンブルおよび決定論予測計算領域。右：球磨川流域（カラー；標高）。

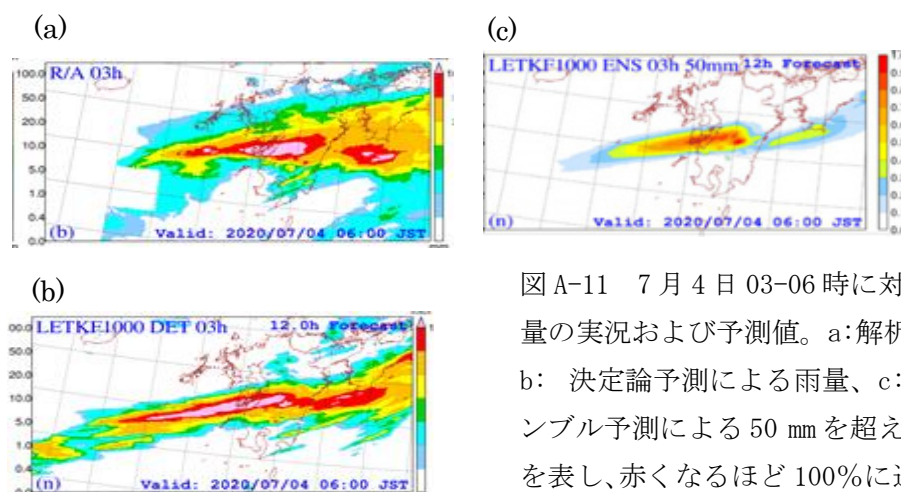


図 A-11 7月4日 03-06時に対する雨量の実況および予測値。a:解析雨量、b: 決定論予測による雨量、c:アンサンブル予測による50 mmを超える確率を表し、赤くなるほど100%に近づく。

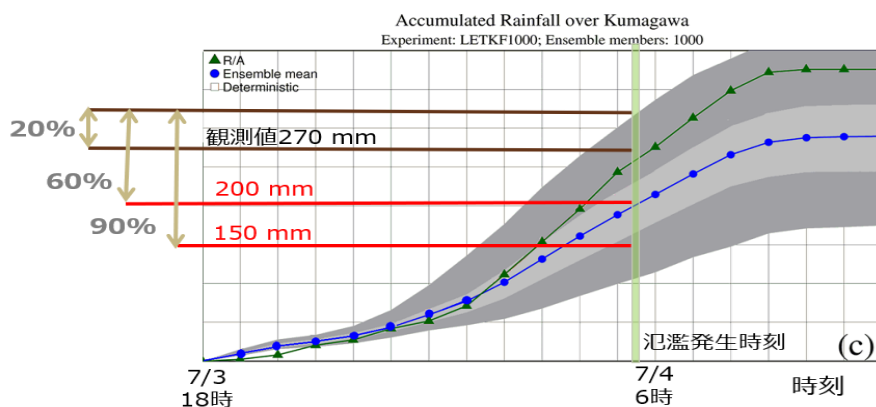


図 A-12 7月3日18時から7月4日6時の積算降水量 (mm)。緑：観測値、青：アンサンブル平均値、濃い灰色：98%、薄い灰色：50%の確率値。7月4日6時において、観測は270mm、予測は250mmと精度が高いが、確率値としては20%程度。ただし200mmの積算降水量に対する確率値は60%程度。

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. 領域データ同化システム SCALE-LETKF を用いた平成 30 年 7 月豪雨の研究

平成 30 年 7 月豪雨(Shimpo et al. 2019)においては、2018 年台風第 7 号が日本海上を通過した後に、活発化した梅雨前線によって西日本を中心に広範囲で多量の降水が観測された。この事例について Kotsuki et al. (2019)は、全球アンサンブルデータ同化システムによるアンサンブル予報の解析を行い、降水量と地上気圧とのアンサンブル相関をもとに日本海上の小規模な低気圧の重要性を指摘している。本研究では、領域アンサンブルデータ同化システム SCALE-LETKF(Lien et al. 2017)を用いて、平成 30 年 7 月豪雨の予測可能性を探る。Kotsuki et al. (2019)よりも高解像度な領域データ同化システムを使用し、2018 年台風第 7 号や東シナ海上の擾乱の影響に着目する。

降水予報のアンサンブル平均を各初期値について比較した。7 月 3 日 0000 UTC 以降を初期値とする予報では多量の降水が西日本域に予報されていたが、それ以前の初期時刻では西日本域の降水量が少なくなっていた。このことから、SCALE-LETKF システムでは平成 30 年 7 月豪雨を約 2 日前の時点で予測ができていた。初期時刻ごとの予報の比較を行なったところ、予報スキルが低かった初期時刻については 2018 年台風第 7 号の経路予報に大きな誤差がみられた。

図 B-1 は、2018 年台風第 7 号の経路予報が比較的良い初期時刻のアンサンブル予報を用いて計算した、西日本域の降水量(黒枠)と 850 hPa 南北風との間のアンサンブル相関を示している。両者の間には、特に日本の南海上において間に高い相関がみられる。この付近には、低気圧性の渦を伴う擾乱が位置しており、西日本域の降水量が多いメンバーの方が少ないメンバーに比べて、日本の南海上の擾乱とそれに伴う低気圧性の循環が発達していた。したがって、日本の南海上の擾乱が平成 30 年 7 月豪雨の予測に影響していたと考えられる。

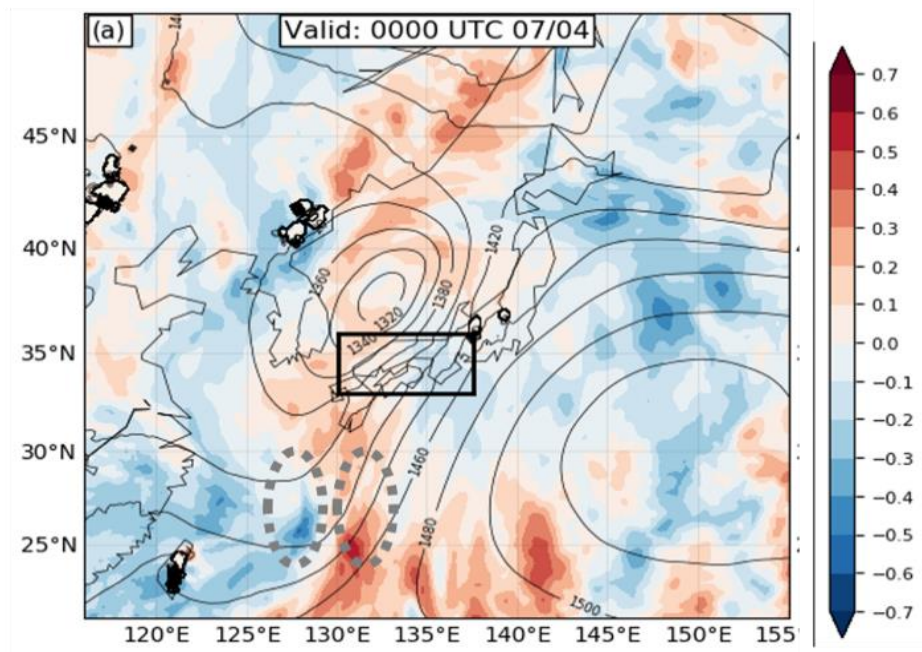


図 B-1：西日本域(黒枠)における 7 月 5 日と 6 日の積算降水量と 7 月 4 日 0000 UTC における 850 hPa 南北風との間のアンサンブル相関(シェード)。初期時刻は 7 月 3 日 0000 UTC。実線はアンサンブル平均のジオポテンシャル高度場(m)を示す。点線は東シナ海上の擾乱と関係する相関を示す。

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.
- 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. SOLA, 15A, 1-7. doi:10.2151/sola.15A-001
- Shimpo, A., K. Takemura, S. Wakamatsu, H. Togawa, Y. Mochizuki, M. Takekawa, S. Tanaka, K. Yamashita, S. Maeda, R. Kurora, H. Murai, N. Kitabatake, H. Tsuguti, H. Mukougawa, T. Iwasaki, R. Kawamura, M. Kimoto, I. Takayabu, Y. Takayabu, Y. Tanimoto, T. Hirooka, Y. Masumoto, M. Watanabe, K. Tsuboki, and H. Nakamura, 2019: Primary factors behind the Heavy Rain Event of July 2018 and the subsequent heat wave in Japan. SOLA, 15A, 13-18. doi:10.2151/sola.15A-003

②-2. Examining the predictability of the July 2020 heavy rainfall with the SCALE-LETKF

In FY2020, we examined the predictability of the July 2020 heavy rainfall, that saw record-breaking rainfall over Kyushu and led to severe flooding of the Kuma river, with the SCALE-LETKF. The research found that 5-day accumulated rainfall were well predicted several days in advance of the event with the SCALE-LETKF and that the heaviest rainfall would occur over Kyushu. Figure B-2 shows 5 day accumulated rainfall forecasts initialized from ensemble mean and compares with JMA precipitation analyses totals. Overall, the SCALE-LETKF was able to predict the large-scale distribution of rainfall during this period. However, the precise prediction of heaviest rainfall over Kyushu was often underestimated. This was attributed to the low resolution (18-km) configuration of the model, which was not able to represent the precise location of rainfall. Examination of atmospheric conditions from ensemble member forecasts showed extremely high humidity over central Kyushu during the time of heavy rainfall, together with strong low-level convergence, suggesting ideal conditions for strong convective activity. The research was written up in a paper that was published in the journal The Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA) by the Meteorological Society of Japan. Citation for the paper is as follows:

Taylor, J., T. Honda, A. Amemiya, Y. Maejima and T. Miyoshi, 2021: Predictability of the July 2020 Heavy Rainfall with the SCALE-LETKF. SOLA, in press. doi:10.2151/sola.2021-008

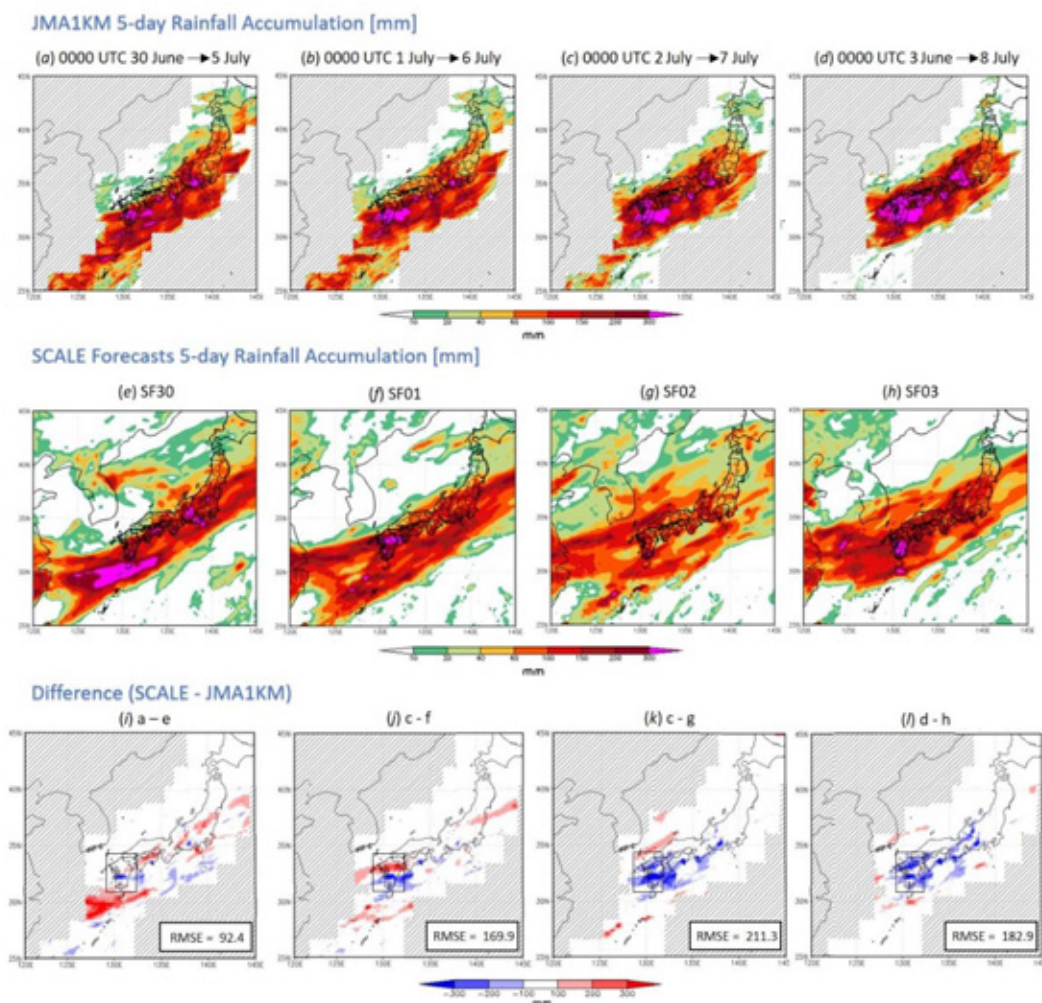


Figure B-2 : *Top-row*: 5-day accumulated precipitation (mm) calculated from Japan Meteorological Agency (JMA) Radar Precipitation Analysis (JMA1KM) in the period starting 0000 UTC on *a*) 30 June, *b*) 1 July, *c*) 2 July and *d*) 3 July. *Middle-row*: SCALE ensemble-mean 5-day forecasts of accumulated rainfall for forecasts initialized at 0000 UTC *e*) 30 June (SF30), *f*) 1 July (SF01), *g*) 2 July (SF02) and *h*) 3 July (SF03). *Bottom-row*: Difference between JMA1KM and SCALE precipitation forecasts (SCALE - JMA1KM). Blue/red shading corresponds to less/much precipitation in SCALE forecasts. The black box in *i*, *j*, *k*, *l* shows the domain used to calculate RMSE between the SCALE 5-day rainfall total forecasts and JMA1KM 5-day rainfall totals, the values of which are given in *i*, *j*, *k*, *l*. Hatching in *a*, *b*, *c*, *d*, *i*, *j*, *k*, *l* represent regions of no data.

②-3. 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600mmを超える24時間降水量が観測された。本研究では、仮想的に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) を配置した場合、線状降水帯による豪雨予報の精度がどの程

度改善しうるか評価することを目的に、「富岳」を用いた観測システムシミュレーション実験 (Observing System Simulation Experiment; OSSE)を行った。OSSE では、真の状態とみなすシミュレーション (Nature run)を走らせ、Nature run から仮想的な観測網によって取得される観測値を作成してこれを同化し、そのインパクトを評価する。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、30 秒毎のレーダー反射強度を SCALE-LETKF (Lien et al. 2017)を用いて同化した (TEST)。OSSE の初期時刻は7月1日 0900 JST (Case A)と、7月3日 1800 JST (Case B)の2つの実験を行い、その違いを評価した。またリファレンスとして、レーダー反射強度を同化しない実験 (NO-DA)も併せて行った。

図 B-3 は7月4日 0400 JSTにおける高度 1.5kmの雨水混合比の解析値 $[g\ kg^{-1}]$ である。ここでは雨の強度の指標として、乾燥大気 1 kg 当たりに含まれる雨水の質量を表す、雨水混合比 $[g\ kg^{-1}]$ を図示した。仮想的な PAWR を同化することによって、OSSE の真の状態である Nature run が示すような活発な線状降水帯が、Case A, Bともに再現されたことがわかる。ただし Case B の NO-DA においては、南北方向に狭いながらも、熊本県南部に降水帯が形成されたことを指摘しておく。続いて、同時刻のアンサンブル平均の解析値を初期値とした予報実験の結果を示す。図 B-4 は閾値 5 mm、40 km の位置ずれを許容した Fractions skill score (FSS) の時系列図である。NO-DA では FSS が 0.1~0.2 であり、豪雨がほとんど予報できていなかったが、TEST では FSS が大幅に改善しており、17 地点の PAWR データを同化することによって豪雨予報に良いインパクトを与えたことが示された。また Case A と B との比較を行うと、TEST の場合予報時間 3 時間以前で 0.05~0.15 のスコア改善が、NO-DA であっても予報時間 2 時間以前で 0.1 程度のスコア改善が見られており、OSSE の初期時刻を現象発生時に近づけることで、予報可能性が高まることが示された。

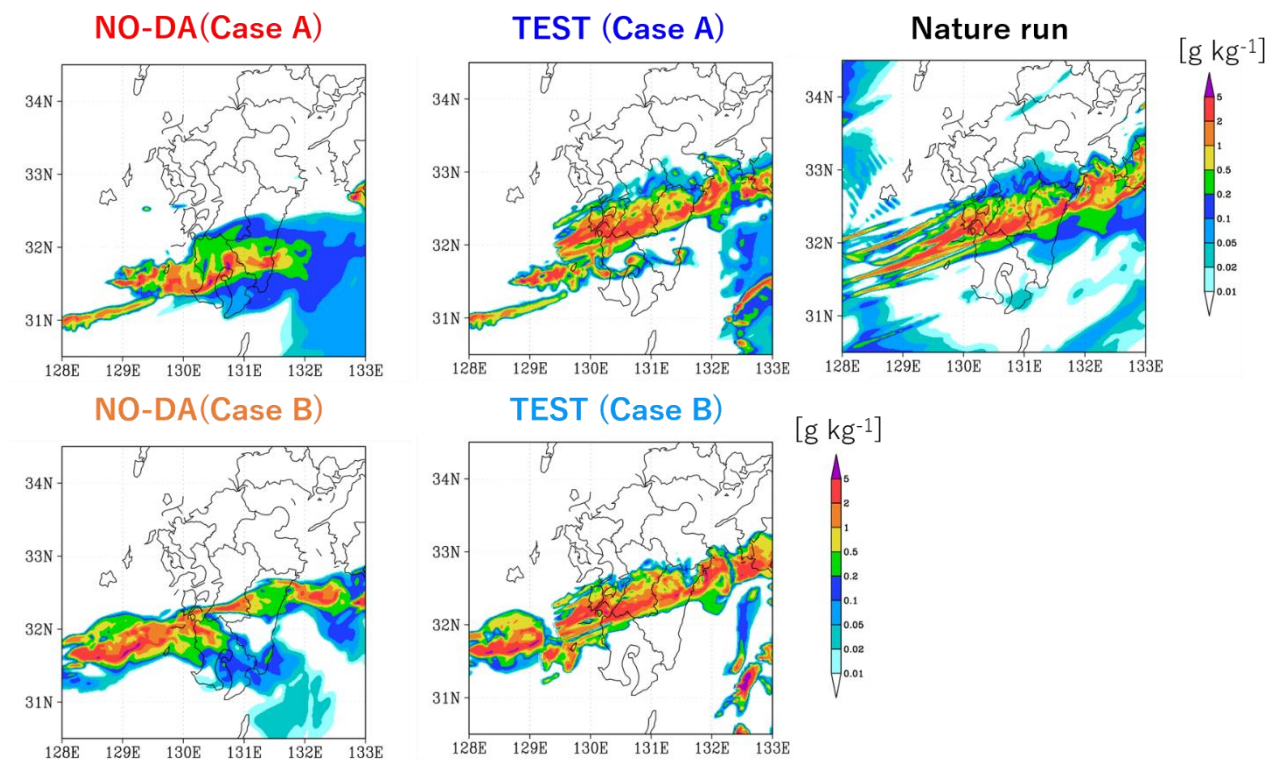


図 B-3 : 2020 年 7 月 4 日 04JST における高度 1.5km の雨水混合比 $[g\ kg^{-1}]$ (解析値)。

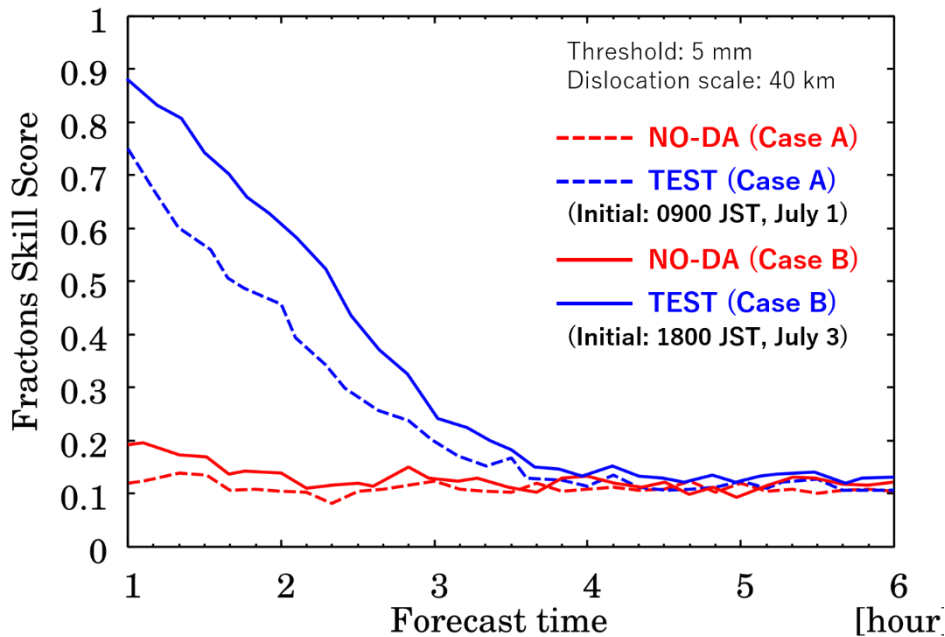


図 B-4 : 2020 年 7 月 4 日 04JST を初期時刻とした予報実験の Fractions Skill Score (FSS)。

②-4. EFSO を用いた稠密地上観測データ同化のインパクト評価

本研究では、領域データ同化システム SCALE-LETKF (Lien et al. 2017) に、個々の地上観測データの予報へのインパクトを定量的に評価する EFSO (Ensemble Forecast Sensitivity to Observation; Kalnay et al. 2012) を導入する。そして 2015 年 9 月 9～10 日に発生した「平成 27 年関東・東北豪雨」における稠密地上観測データ同化実験を対象に、個々の地上観測データの予報へのインパクトを EFSO によって評価した。データ同化実験は、1 時間毎に分割した従来型観測のみを同化した実験 (CTRL) と、PREPBUFR に加えて NTT ドコモ環境センサーネットワークの地上観測データのうち、相対湿度、気温、気圧を 1 時間毎に同化した実験 (TEST) の 2 つを行った。モデルの水平解像度は 4km、鉛直 50 層、アンサンブルメンバー数は 50 である。EFSO 値の評価時間は 1 時間、誤差ノルムは湿潤全エネルギーとした。図 B-5 は TEST における各地上観測点における EFSO 値 (左) と、環境センサーネットワークによる地上降水量の観測値 (右) を比較したものである。EFSO では、予報改善に貢献した観測に対しては負の値が、逆に改悪した場合は正の値が算出される。今回の実験では、全観測点に対して約 53% の地点で負の EFSO 値となり、これは同化した地上観測データのうち約 53% が予報改善に寄与していることを意味する。特に豪雨発生域である栃木県、茨城県付近や、豪雨発生の原因となった台風が通過した愛知県付近で絶対値の大きな負値が示されており、これらの地域で地上観測が予報改善により大きく寄与していることが明らかになった (図 B-5)。

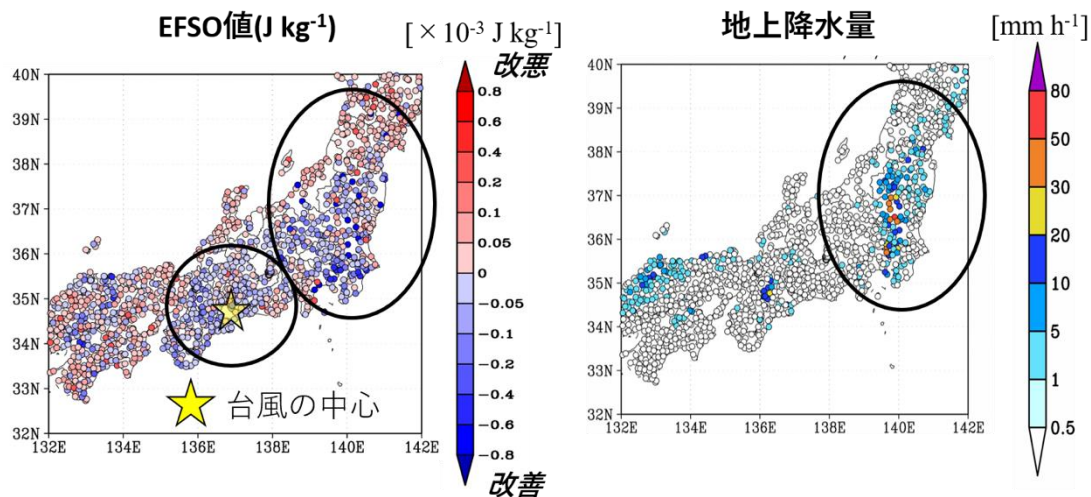


図 B-5 : 2015 年 9 月 9 日 21JST に EFSO 値 [J kg^{-1}] (左) と地上降水量 [mm h^{-1}] (右)。

参考文献

Kalnay, E., Y. Ota, T. Miyoshi and J. Liu, 2012: A Simpler Formulation of Forecast Sensitivity to Observations: Application to Ensemble Kalman Filters. *Tellus*, 64A, 18462. doi:10.3402/tellusa.v64i0.18462

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.

②-5. 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)。昨年度は、このシステムを用いて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する拡張を行うとともに、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。また、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、関東地方での 30 秒間隔データ同化を可能にした。今年度はその成果を踏まえ、令和 2 年 8 月 25 日から 9 月 7 日まで、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 web 上にて公開した。

図 B-6 は、実証実験に用いたシステム全体のワークフローを示している。領域 D1(18km メッシュ)、D2(6km)、D3(1.5km)は 6 時間毎に更新される。D1 では Lien et al. (2017)と同様に、米国大気環境予測センター(NCEP)から受信した観測データと初期値・境界値を用いてデータ同化サイクルを行い、その解析値を用いて 18 時間後までの予報を行う。D2、D3 では D1 からダウンスケールした予報をそれぞれ行う。最内の D4(500m メッシュ)において、D3 の予報値から生成した初期値・境界値のもとで、NICT (情報通信研究機構) からリアルタイムに受信する 30 秒ごとの MP-PAWR 観測を同化し、30 分後までの予報を行う。

PAWR 観測の受信には理化学研究所で開発された Just-In-Time Data Transfer (JIT-DT)を使用する。

アンサンブル数は D1 から D4 まで共通して 50 である。ただし D4 での延長予報は解析値のアンサンブル平均を初期値として単一メンバーで行った。実証実験期間中は、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)の運用する Oakforest-PACS を部分的に占有利用し計算を実施した。必要ノード数は D4 で 992、D1-D3 で最大 208 であり、システム全体では 1200 ノードを利用した。

図 B-7 は、実証実験期間中の予報のリードタイムを黒線（左目盛、単位：分）で示している。大部分のリードタイムは約 26-27 分であり、観測から 30 分予報の生成までの処理を約 3-4 分で安定して実行できたことを意味する。12 時間毎に一時的な 5-10 分の遅れがみられるが、12 時間のジョブを次のジョブに交代する際の MPI 通信の初期化等のため必要な中断である。その他、数値計算上の不具合などのため数回中断が生じた。それ以外の時間帯については、8 月 26 日 16 時(日本時間)～9 月 7 日 3 時までこたって継続して 30 秒毎に予報を更新することができた。

図 B-8 は、期間中の 9 月 2 日に MP-PAWR で捉えられた顕著な降水事例における、高度 2km における降水強度の観測値および 15:45 の解析値と 30 分後までの予報値を示している。観測値の網掛け部分は障害物による欠測領域である。解析値は観測された降水強度の細かな構造を再現しており、予報値は降水システム全体が強度を保ったまま北に向けて移動する特徴を捉えている。

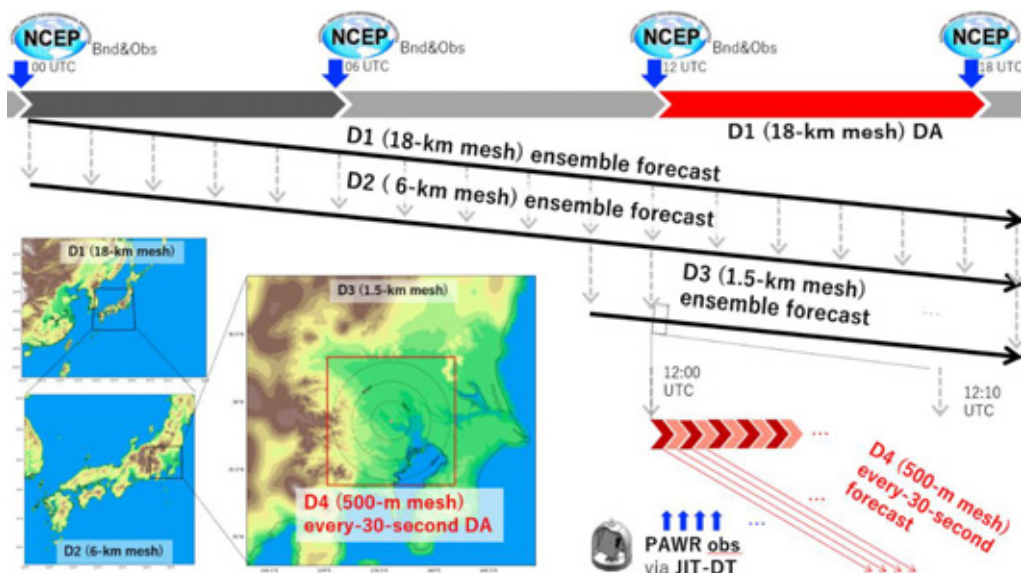


図 B-6 : SCALE-LETKF システム全体のワークフロー。詳細は本文参照。

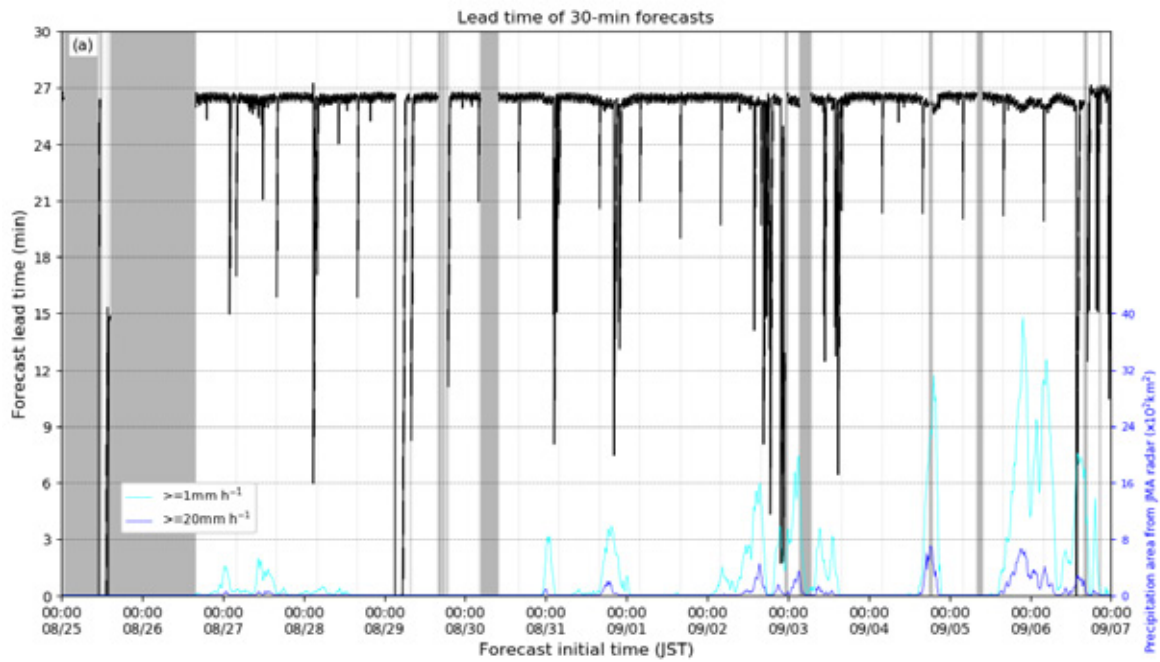


図 B-7： 実証実験期間中の予報リードタイム

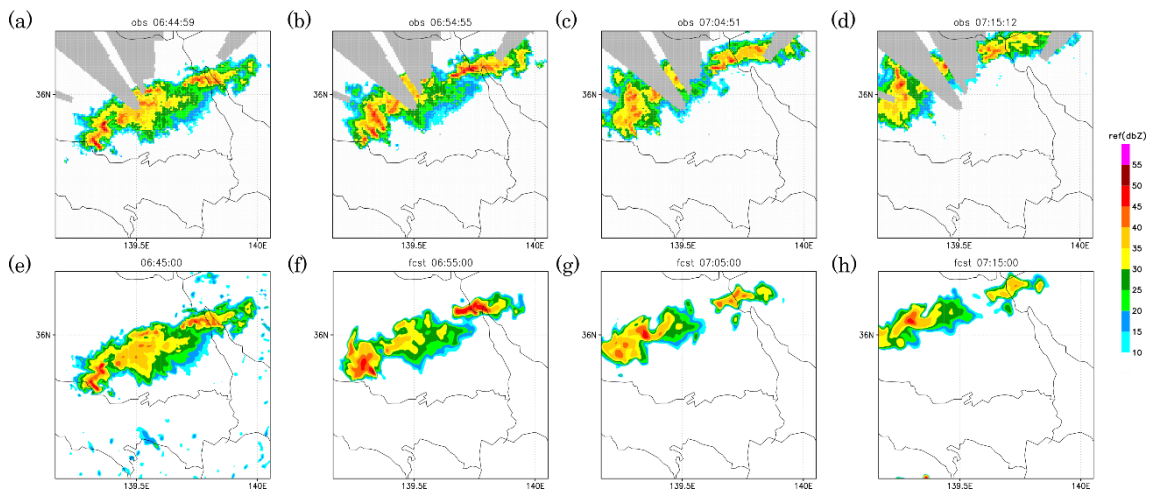


図 B-8： 9/2 15:45-16:15 JST における高度 2km のレーダー反射強度

上段：観測値 下段：15:45 の観測値および同時刻を初期値とした 10-30 分予報値

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.
- 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.

②-6. リアルタイム SCALE-LETKF システムによる数値気象予測と気象庁高解像度ナウキャストの比較

局所的な豪雨の高精度な数値気象予測を十分なリードタイムで得るには、積乱雲の時間発展を詳細に捉えた観測データを同化し、高精度な初期値を得ることが不可欠である。これまで、次世代気象レーダーであるフェーズドアレイ気象レーダーによる観測ビッグ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 を開発してきた。さらに、PAWR データをリアルタイムで同化し、なおかつ 30 秒毎に 30 分の延長予報を行えるように、SCALE-LETKF を拡張したトータルなリアルタイム予報システムを構築した。このシステムでは、さいたまマルチパラメータフェーズドアレイレーダー (MP-PAWR) の観測データを用いた。本研究では、構築したリアルタイム予報システムを 2019 年 8 月 24 日の首都圏における降水事例に適用し、気象庁高解像度ナウキャストとの比較を行った。

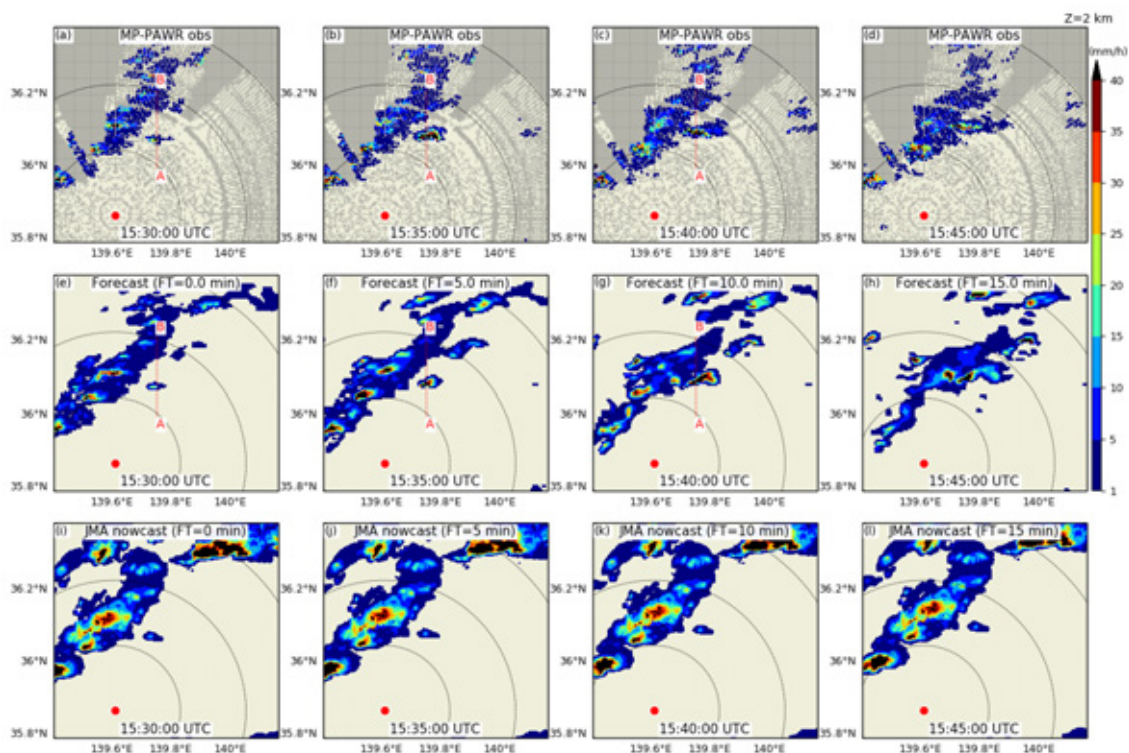


図 B-9 : (上段、a-d)MP-PAWR による観測、(中段、e-h)SCALE-LETKF による予報、(下段、i-l)気象庁高解像度ナウキャストにおける雨量強度 (mm/h)。各列の時刻は左から 15:30:00、15:35:00、15:40:00、15:45:00 UTC を示す。赤丸は MP-PAWR の位置、点線は MP-PAWR からの距離 (20 km ごと) を示す。

図 B-9 は MP-PAWR 観測と SCALE-LETKF による数値気象予測、気象庁高解像度ナウキャストを示している。SCALE-LETKF では、図中の A-B 線付近で新たに発達した対流が北進し、より大きな降水システムとマージする時間発展を正確に予報できている。一方で、気象庁高解像度ナウキャストでは初期時刻の降水パターンがそのまま移流されており、新しい対流の発達とマージを予測できていない。この結果は、高

頻度な観測データの同化に基づく数値気象予測システムの有用性を示している。

②-7. Sensitivity testing for horizontal covariance localization scale with the SCALE LETKF
- Part of the continual development of real-time numerical weather prediction system for severe weather

Sudden, heavy rainfall from small-scale convective systems present a major meteorological hazard, bringing the risk of flooding and threat to lives. The precise prediction of rapidly evolving, localized storms represents an extreme challenge, owing to multi-scale processes and highly non-linear evolution of these weather systems. This has led to the development of a new, revolutionary approach to weather prediction that uses rapid update cycling of a high-resolution mesh with latest rainfall information from high-density, phased array weather radar observations. The system, called the SCALE-LETKF (Lien et al. 2017), has been in development for several years and has been proven to improve analyses and prediction of rainfall (e.g., Miyoshi et al. 2016a, b).

In FY2020, development of the SCALE-LETKF continued, including testing of model parameters in an effort to optimize performance. One of the critical parameters to be tested was covariance localization, a length scale parameter used within the LETKF that determines the weighting of covariances at distances from each model grid. Localization is a common method for removing spurious correlations generated from the use of limited ensemble size. 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 PAWR observations, with 30-minute forecasts initialized from the ensemble mean every 30-seconds. Mean threat scores calculated from 80-forecasts of reflectivity against the reflectivity observations from the MP-PAWR at 3-km height, showed large variability on the length scale providing best forecast skill, which was different for each case study and at different forecastlead times (Figure B-10). However, in general, across the 30-min forecast, it was determined that the most suitable scale for the SCALE-LETKF was between 1-2 km. It was found using these smaller localization scales reduced the over-intensification of convective activity that would build up rapidly from the initialization of the forecasts. As an example, Figure B-11 shows forecasts initialized after 30 minutes cycling of radar reflectivity at 3-km height at 5-, 10- and 15-minute lead times for experiments where localization scale was 2-km and 4-km. At each of the three lead times, the intensity of convective activity is shown to be considerably weaker for 2-km localization forecasts, in better agreement with observations. Threat scores calculated with thresholds of 15 dBZ verified a localization scale

of between 1-2 km resulted in improved forecasts from the 3 case studies.

The investigation into why the use of different localization scales led to large differences in forecast skill revealed noisy correlation between model produced reflectivity and hydrometeors beyond 1-2 km distance that would indicate spurious errors relating to limited ensemble size. Ultimately, these correlation structures would have a detrimental impact to analyses when using larger localization scales. Single point analysis values from experiments also found unrealistically large fluctuations in temperature and wind speeds when using larger localization scales, that led to the generation of regions of very high instability, which was promoting the growth of very strong rates of convection.

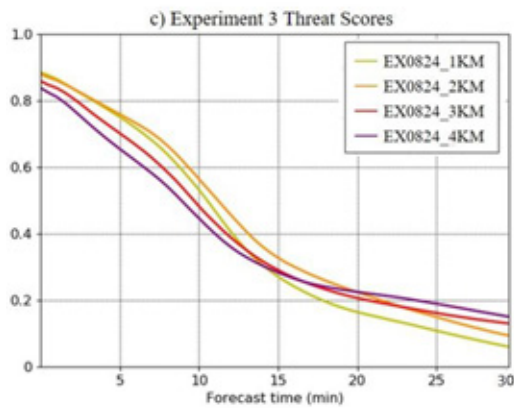
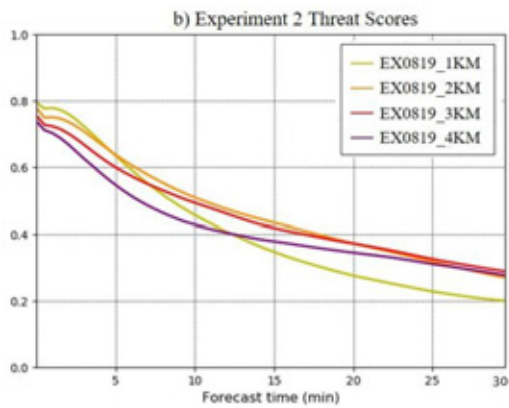
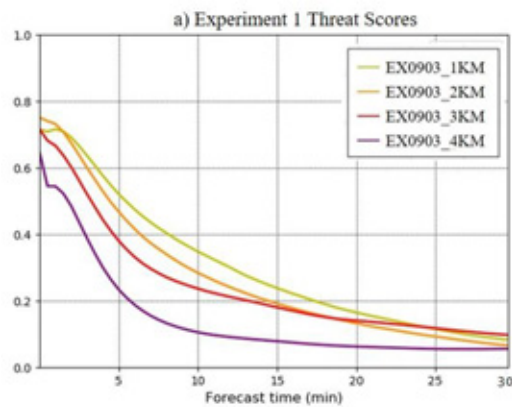


Figure B-10: Average threat scores over 30-min forecasts for sensitivity experiments for localization length scale for three case studies of severe weather. Threat scores represent an average of 80 forecasts performed during the last 40 minutes of cycling and were calculated with threshold of 15-dBZ.

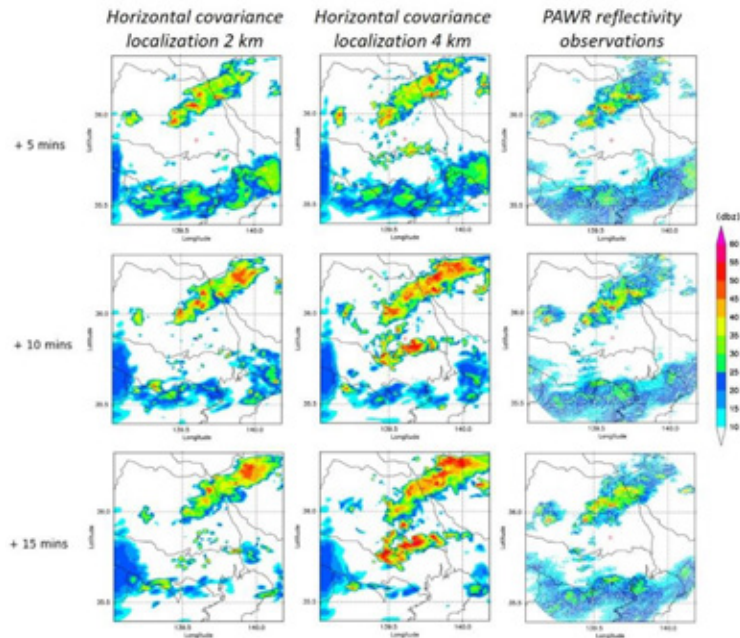


Figure B-11: Reflectivity (dBZ) forecasts at 5-, 10- and 15-minute lead times for experiments with covariance localization scales of 2- and 4-km

参考文献

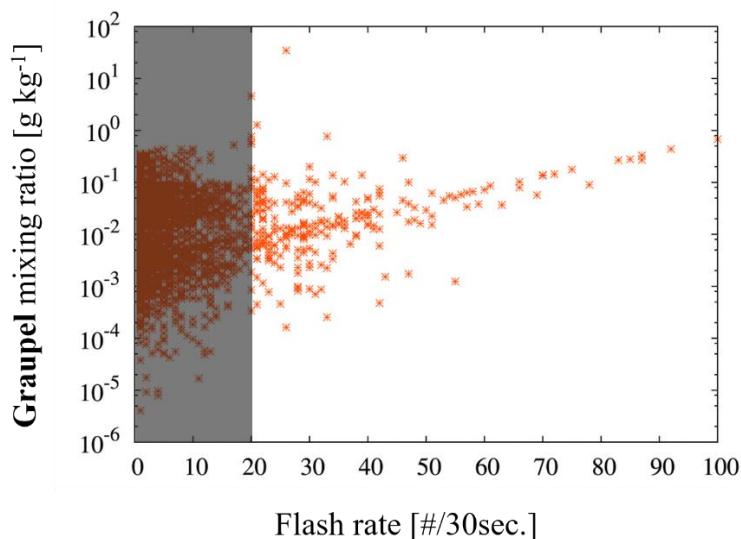
- Lien, G.-Y., T. Miyoshi, S. Nishizawa, R. Yoshida, H. Yashiro, S. A. Adachi, T. Yamaura, and H. Tomita, 2017: The near-real-time SCALE-LETKF system: A case of the September 2015 Kanto-Tohoku heavy rainfall. SOLA, 13, 1-6, doi:10.2151/sola.2017-001.
- Miyoshi, T., and co-authors, 2016a: “Big data assimilation” 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.

②-8. 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検討

豪雨をもたらす発達した積乱雲には、しばしば活発な雷活動が見られる。本研究では、空間解像度 100 m、時間解像度 1 マイクロ秒で雷の発光位置を観測するシステム “BOLT” のデータを、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF, Hunt et al. 2007) を用いて同化することを目標に、30 秒毎、100 m メッシュのモデル格子点値と、BOLT による雷発光頻度との関係性を調査することで、観測演算子の構築を

検討した。モデル格子点値は、2015年8月13日に関西地方で発生した雷雨事例を対象に、大阪大学吹田キャンパスのフェーズドアレイ気象レーダー(PAWR)をSCALE-LETKF(Lien et al. 2017)を用いて同化した解析値を用いた。BOLTの雷発光頻度は、SCALEの各格子点において、LETKF 1サイクルの間(30秒間)に観測された雷の発光回数を積算してカウントすることで算出した。雷発光頻度のデータから雷発生初期のデータを絞り込むため、Takahashi(1978)で示された条件(積算雲水量: $0.01 \leq Q_c \leq 10$ [g m^{-3}]、気温: $-30 \leq T \leq -3$ [$^{\circ}\text{C}$]、鉛直流: $w \geq 1$ [m s^{-1}])を適用した。

雷発光は、積乱雲中の直径が0.1 mm オーダーより大きな氷粒子の衝突によって起きることが知られている。そこで、SCALE-LETKFにおける氷粒子の量として、霰混合比(乾燥大気1 kg 当たりの霰の質量)の解析値 [g kg^{-1}]を採用し、これと30秒毎の雷発光頻度 [# / 30sec.]の散布図を図B-12に示すことで、数値モデルによる氷晶の多寡と、観測による雷発光頻度の関係性を調べた。なお、直径5 mm 未満の氷粒子を霰、直径5 mm 以上の氷粒子を雹と区別することがあるが、SCALEでは霰と雹を区別しない雲・降水の計算スキームが用いられているため、ここでは霰で統一する。図B-12による単純な比較では、雷の発光頻度と霰の混合比との間に相関関係を見つけることは難しいが、雷発光頻度が20回/30秒以上にデータを絞り込むことによって、相関係数0.714という高い相関関係があることが明らかになった。



図B-12 : 2015年8月13日00JST~02JSTにおける霰の混合比(解析値)と雷の発光頻度の散布図。縦軸は霰の混合比 [g kg^{-1}]、横軸は雷の発光頻度 [回 / 30秒] をそれぞれ示す。

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, doi:10.2151/sola.2017-001.
- Takahashi T., 1978 : Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms, *J. Atmos Sci.* 35 1536-1548.

②-9. 雷観測のデータ同化に関する理想化シミュレーション実験

雷活動は、雲内における雲粒粒子同士の衝突に伴う帯電に関係しており、雷活動の観測をデータ同化出来れば、雲内の降水粒子分布や気流構造の改善が期待される。実際、Allen et al. (2016)は静止気象衛星に搭載された雷センサによる雷活動の擬似的な観測を同化し、降水システムの解析の改善を報告している。しかし、数値気象予測への利用が進んでいる赤外輝度温度観測と比較して、雷活動観測の優位性は明らかではない。そこで本研究では、領域データ同化システム SCALE-LETKF を用いた理想化観測システムシミュレーション実験を行い、アンサンブル相関を用いて静止気象衛星による赤外輝度温度と雷活動の2種類の観測の比較を行った。

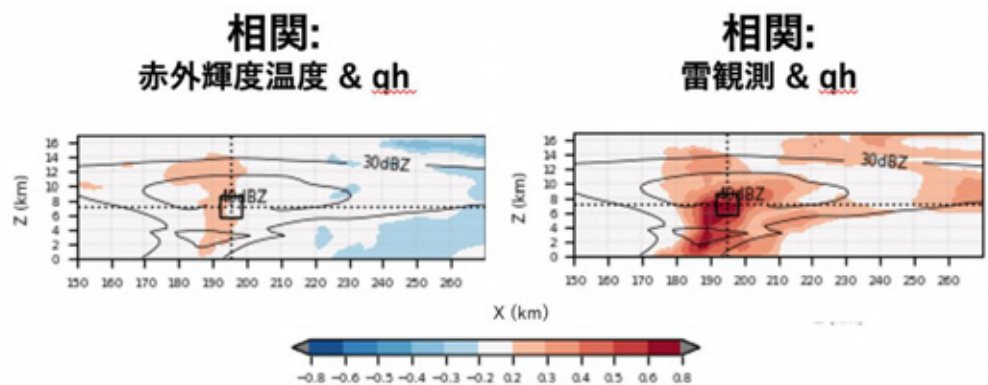


図 B-13 : (左)赤外輝度温度観測と(右)雷観測について計算した凝結生成物混合比(qh)との間のアンサンブル相関の鉛直断面。両観測はどちらも X=196 km に位置。コンターはアンサンブル平均のレーダー反射強度(dBZ)。濃い赤と青はそれぞれ正と負の強い相関を示す。

図 B-13 は、静止気象衛星からの赤外輝度温度と雷の擬似観測について計算した、凝結生成物混合比との間のアンサンブル相関を示している。高度 8 km 以下において、雷観測は高い相関を示しているが、赤外輝度温度は雲頂下の相関は低い。このことは、雷観測の方が赤外輝度温度観測に比べて、雲内の降水粒子分布とより密接に関係していることを示している。実際、擬似的な雷観測を試験的にデータ同化したところ、雲内の降水粒子分布の予報に改善がみられた。

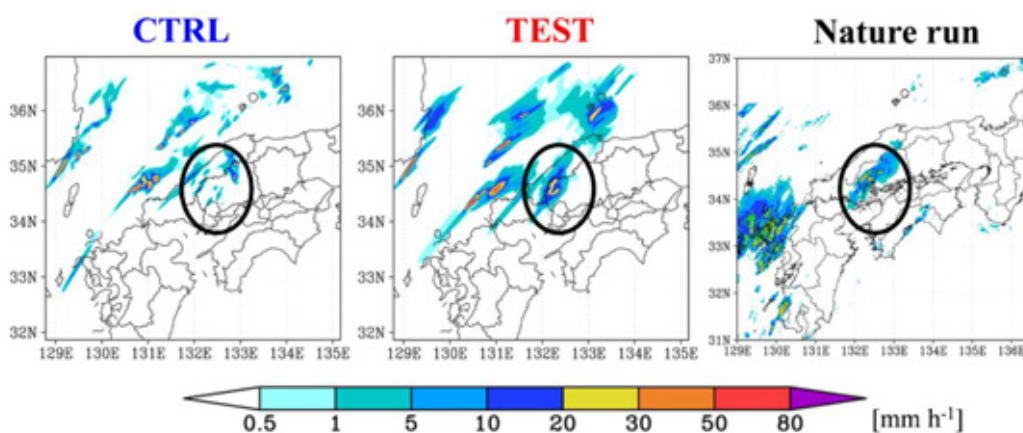
参考文献

Allen, B. J., Mansell, E. R., Dowell, D. C., & Deierling, W. (2016). Assimilation of pseudo-GLM data using the ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review.*, 144, 3465-3486, doi: 10.1175/MWR-D-16-0117.1

②-10. カイト観測システムを想定した OSSE

災害をもたらす豪雨の発生においては、特に地上 1 km 以下の大気下層の水蒸気場や収束・発散場が大きく寄与していることが多くの先行研究により明らかになっている。そこで、地上 1 km 程度まで上昇する特殊なカイトの糸に測器を取り付けて気象データを取得する新しい観測システムを考え、このシ

システムから得られる仮想的な観測データを同化する観測システムシミュレーション実験(OSSE)を通じて、2014年8月に発生した広島豪雨の予報へのインパクトを評価した。ここでは、真値とみなすシミュレーション(Nature run)からカイトの観測網に相当する仮想的な観測値を作成して同化する。OSSEはSCALE-LETKF(Lien et al. 2017)を用いて、2014年8月18日00 JSTから20日00 JSTの期間、30分毎のNCEP PREPBUFRのみを同化した実験(CTRL)と、PREPBUFRに加えてカイトのデータを同化した実験(TEST)を行った。さらにCTRL、TEST双方について20日00 JSTを初期時刻とした予報実験を行った。モデルの水平解像度は1 km、鉛直50層、アンサンブルメンバー数は50である。図B-14は予報実験における8月20日00 JST~01 JSTの1時間積算降水量である。カイトによる観測データを同化することによって、大気境界層内の水蒸気場が改善し、カイトデータを同化しなかった場合に比べて、予報降水量が30mm改善することが明らかになった。



図B-14：2015年8月20日00JST~01JSTにおける1時間積算降水量[mm h⁻¹]。CTRLはカイトのデータ同化なしの結果、TESTはカイトのデータ同化ありの結果、Nature runはOSSEにおける真の状態をそれぞれ示す。

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.

②-11. 大気データ同化システム中の台風に対する海洋の役割

台風の形成・発達には大気海洋間の相互作用が存在しており、たとえば風速の増大は海洋から大気への熱フラックス供給を大きくして成長を促進する正のフィードバックをもたらす一方、海洋をかき混ぜることで海面水温を低下させ熱フラックス供給を小さくして成長を抑制する負のフィードバックをもたらす。しかしながら、多くの気象実験で海面水温は所与の境界条件であり、相互作用は考慮されない。データ同化の観点からは、気象場とは無関係に作成された摂動に基づいていても、アンサンブルメンバー間の海面水温を変えることで台風の再現性が向上することが知られており(Kunii and Miyoshi. 2012)、大気海洋結合データ同化システムにおける台風への相互作用の影響を理解することは今後重要である。

本研究では、領域大気モデルと局所アンサンブルカルマンフィルタに基づいたデータ同化システム SCALE-LETKF (Lien et al. 2017) に鉛直 1 次元の簡易な海洋モデル Price-Weller-Pinkel モデル (PWP モデル、Price et al. 1986) を組み込んだ。このシステムを用い、水平解像度は 15km として 2015 年台風第 15 号を対象として実験を行った。昨年度の実験では PREPBUFR データのみを同化しており、PWP モデルの導入にともなう海面水温の日周期や台風直下の冷却は再現されたが、台風の成長は十分に再現できなかった。今年度は、台風のバイタルデータ (中心気圧と位置) を同化することで、再現性の改善を目指した。

図 B-15(左)は各アンサンブルメンバーにおける台風の中心位置を示しており、PWP モデルを適用した実験 (PWP 実験、赤線) の経路は、海面水温を所与とした実験 (CTL、青線) よりも観測された台風の経路 (黒線) により集中している。観測された台風の最盛期である 8 月 4 日には、アンサンブル平均台風の強度は PWP 実験では 930 hPa まで低下しており、CTL 実験の 950 hPa よりも大きな成長が見られた (図 B-15 右)。PWP 実験では大気海洋間の負のフィードバックによって台風の成長は抑制されているが、メンバー間の台風の中心位置が近いことによりアンサンブル平均した強度が大きく算出されることに加え、観測と近い経路を通るメンバーが多くバイタル同化が効果的に寄与したと考えられる。

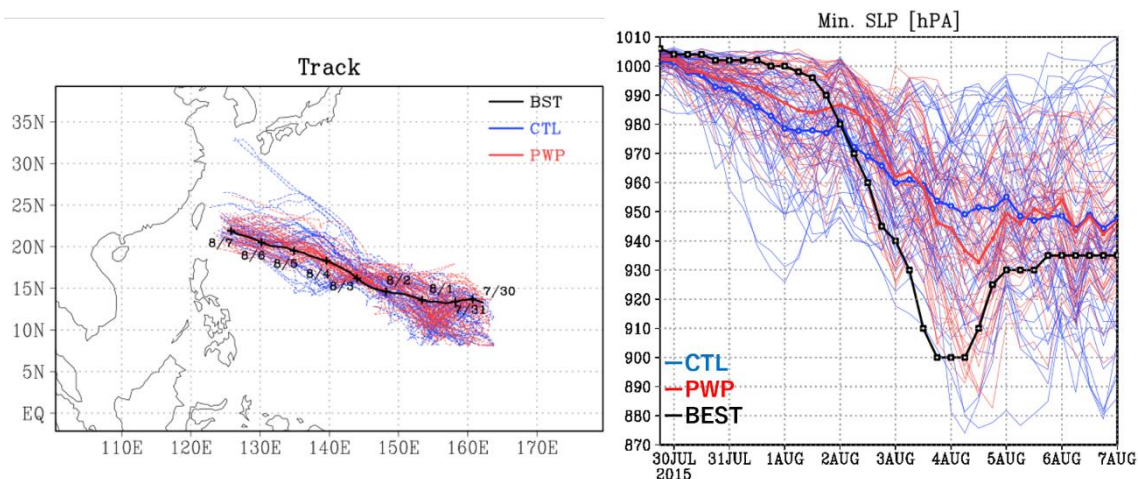


図 B-15 : (左) 各アンサンブルメンバーにおける台風の中心位置と (右) 中心気圧 (hPa)。黒線は観測値、青線は海面水温を所与とした実験の結果、赤線は PWP モデルを適用した実験の結果である。

参考文献

Kunii, M., T. Miyoshi, 2012: Including Uncertainties of Sea Surface Temperature in an Ensemble Kalman Filter: A Case Study of Typhoon Sinlaku (2008). *Weather and Forecasting*, 27, 1586–1596, DOI: 10.1175/WAF-D-11-00136.1

Lien, G. Y., T. Miyoshi, S. Nishizawa, R. Yoshida, H. Yashiro, S. A. Adachi, T. Yamaura, 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

Price, J. F., R. A. Weller, R. Pinkel, 1986: Diurnal Cycling: Observations and Models of the Upper Ocean Response to Diurnal Heating, Cooling, and Wind Mixing. *J. Geophys. Res.*, 91, 8411–8427.

②-12. 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

衛星やアルゴフロート（漂流型計測器）などの観測技術の発達によって、近年、海洋の観測数が増加している。それに伴い、様々な海洋データ同化システムが構築され、海洋客観解析データセットの作成や海洋観測網の評価などに役立てられている。さらに、漁業や海運業などへ貢献するために、リアルタイムでの海洋予測も行われている。予測を行う際にはその不確実性を表現できるデータ同化手法「アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF)」が有効であることなどから、海洋モデルへの EnKF の実装が進んでいる (e. g. Penny et al. 2013)。

近年の観測データの増加や計算機の発達に伴い通常の1週間程度より短い時間間隔での同化が可能になり、精度の改善が期待されている。そこで、1日という比較的短い同化サイクルで安定的に動作する EnKF を用いた海洋データ同化システム Stony Brook Parallel Ocean Model (sbPOM ; Jordi and Wang 2011) +LETKF を開発する。その際、力学的なバランスを維持しながら、アンサンブルスプレッドの縮退や重力波ノイズによる汚染を防ぐ有効な手法について調査した。

アンサンブルスプレッドの縮退を防ぐ4種類の共分散膨張法[1: Multiplicative inflation (MULT)、2: 不適用 (NONE)、3: Relaxation-to-prior perturbation (RTPP ; Zhang et al. 2004)、4: Relaxation-to-prior spread (RTPS)]と解析インクリメントを分散して与える Incremental analysis update 法 (IAU 法 ; Bloom et al. 1996) の適用・不適用の2種類を組み合わせた8種類の感度実験、6種類の RTPP と RTPS の緩和パラメータを与えた12種類の感度実験を行った。得られた解析値の地衡流非平衡成分を診断するために Nonlinear balance equation (NBE ; Zhang et al. 2001) の残差 Δ NBE、精度の比較をするために観測データとの Root mean square deviation (RMSD) を計算した。その結果、解析値の地衡流平衡やデータの精度は RTPP/RTPS と IAU によって有意に改善し、MULT によって有意に改悪していた。また、本研究によって、RTPP/RTPS と IAU を組み合わせることで海洋データ同化システムが安定的に動作し、最も良い地衡流平衡とデータの精度が得られた。なお、RTPP と RTPS の緩和パラメータは 0.8-0.9 程度で最も良かった。

	NONE+IAU	MULT+IAU	RTPP+IAU	RTPS+IAU	NONE	MULT	RTPP	RTPS
Δ NBE ($\times 10^{-10} s^{-2}$)	0.6	3.14	0.52	0.56	1.28	10.7	0.81	1.14
NONE+IAU実験 に対する改善率 (%)	0	-427	13.2	6.7	-105	-1702	-36	-91

表 B-1 : 2016-17 年および全領域で平均した各感度実験の Δ NBE と NONE+IAU 実験に対する改善率。赤色と青色はそれぞれ有意な改善および改悪を表す

参考文献

Jordi, A., and D. P. Wang, 2012: sbPOM: A parallel implementation of Princeton Ocean Model. Environ. Model. Softw., 38, 59-61, doi: 10.1016/j.envsoft.2012.05.013.
 Penny, S. G., E. Kalnay, J. A. Carton, B. R. Hunt, K. Ide, T. Miyoshi, and G. A. Chepurin, 2013: The local ensemble transform Kalman filter and the running-in-place algorithm

applied to a global ocean general circulation model. Nonlinear Process. Geophys., 20, 1031-1046, <https://doi.org/10.5194/npg-20-1031-2013>.

Zhang, F., C. A. Davis, M. L. Kaplan, and S. E. Koch, 2001: Wavelet analysis and the governing dynamics of a large-amplitude mesoscale gravity-wave event along the East Coast of the United States. Q. J. R. Meteorol. Soc., 127, 2209-2245, <https://doi.org/10.1002/qj.49712757702>.

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).

②-13. 富岳での 1000 メンバー-SCALE-LETKF の実行に向けた予備実験

「富岳」の環境を用いて、SCALE-LETKF の「富岳」上でのシステム構築および大規模実験に向けた予備実験を行った。まず、1000 メンバー、18km 解像度で 6 時間毎の従来型観測を同化する SCALE-LETKF(Lien et al., 2017)を「富岳」上で実行し、LETKF 部分の所要時間を Oakforest-PACS (OFP) で実行した場合と比較した。結果として、表 B-2 の通り、「富岳」では OFP に比べて所要時間が約 3 分の 1 となることを確認した。ただし、富岳と OFP のノード辺りピーク性能がそれぞれ 3.072、3.0464 とほぼ同じであり、ノード数は OFP と比べて富岳が約 4 倍であることを考慮すると、「富岳」での実効性能は約 27%低下していることが分かった。この予備実験の時点では LETKF のコードのスレッド並列化が富岳において十分に最適化されていなかったことが原因であると考えられる。

	総ノード数	所要時間(秒)
富岳	2002	76.8 (6 サイクルの平均)
Oakforest-PACS	501	226.0 (5 サイクルの平均)

表 B-2 : 富岳と OFP での 1000 メンバー-LETKF の所要時間の比較。

また、1000 までメンバー数を増やしたときの解析値の精度への影響を調べた。従来の 50 メンバーの場合を基準とし、6 から 1000 までの異なるメンバー数において、2 日間のスピニングを行った後の 2020 年 8 月 3 日の解析値及び第一推定値 (6 時間前の解析値からの予報値) の精度を比較した。比較には関東地方周辺にあたる東経 130-145 度、北緯 30-42 度における各高度、各変数について、ラジオゾンデおよび衛星追跡風観測と比較した平均二乗誤差の平方根(RMSE)および平均誤差(BIAS)を用いた。また同様の比較を NCEP GFS および気象庁メソ解析を基準にして行った。

結果として、東西風および気温に関してはメンバー数 24 以上においてメンバー数が増えるにつれ RMSE、BIAS とともに明瞭に減少する傾向がみられた (図 B-16)。また解析値のみならず 6 時間予報にあたる第一推定値も改善したことで、単に観測に近づけるだけでなく物理的な整合性の観点でも解析値が改善していることが示唆された。ただし一方で、水蒸気混合比と海面校正気圧についてはメンバー数を増やしても精度が改善しなかった (図 B-17)。また、各変数について 400 メンバーと 1000 メンバーの結果には明

瞭な違いがみられなかった。これらは、今回の実験で計算コストの理由でメンバー数にかかわらず同じ局所化長を用いたことが一因と考えられる。

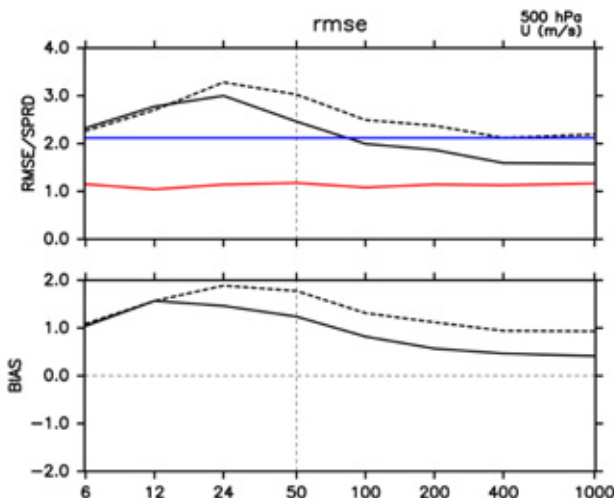


図 B-16 : 2020 年 8 月 3 日 00UTC における、LETKF のメンバー数ごとの解析値(黒実線)および第一推定値(黒破線)の、ラジオゾンデ観測と比較した 500hPa 付近の東西風の RMSE および BIAS. 青線は観測誤差、赤線はスプレッドを示す。

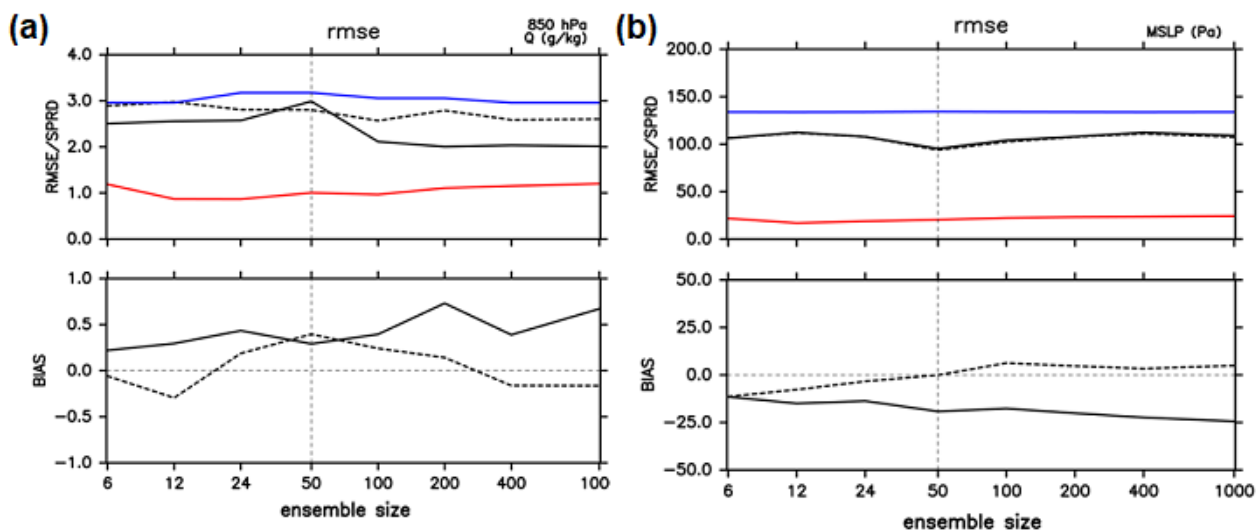


図 B-17 : 2020 年 8 月 3 日 00UTC における、LETKF のメンバー数ごとの解析値(黒実線)および第一推定値(黒破線)の、ラジオゾンデ観測と比較した (a) 850hPa 付近の水蒸気混合比および (b) 海面較正気圧の RMSE および BIAS. 青線は観測誤差、赤線はスプレッドを示す。

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.

②-14. 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

令和 2 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 (Sato et al. 2014, Terasaki et al. 2017, 2019) を使用した。雲微物理スキームは 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、スピン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-18 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。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-18 左)、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。本研究の成果を論文にまとめ、投稿準備を開始した。

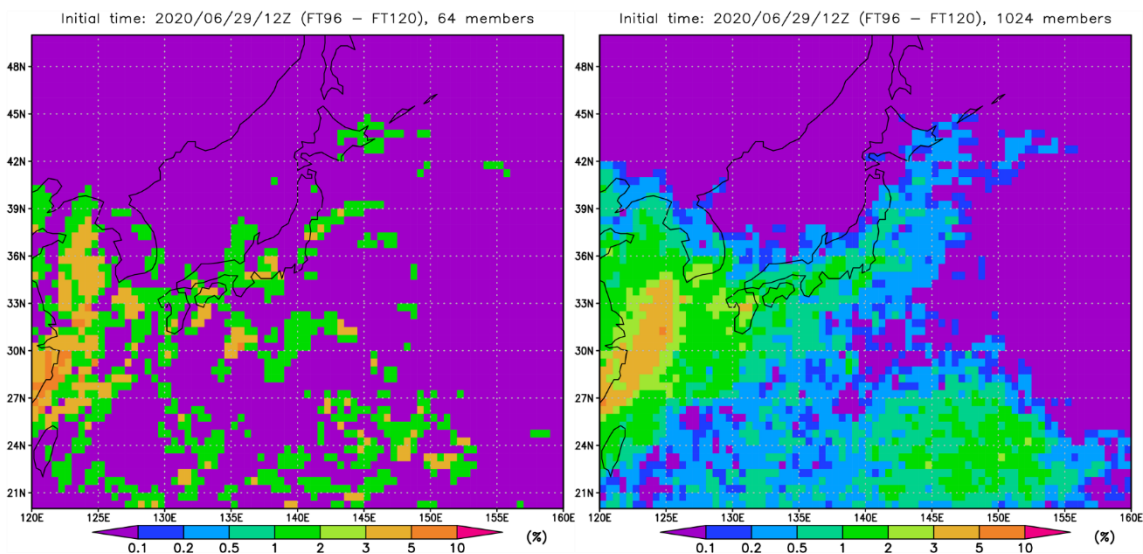


図 B-18 : 2020 年 6 月 29 日 1200UTC を初期値とした 1024 メンバーのアンサンブル予報に基づく、7 月 3 日 1200 UTC から 4 日 1200 UTC までの 24 時間積算降水量が 100mm を超える確率分布。(左) 64 サンプル、(右) 1024 サンプル。

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.

②-15. アンサンブルカルマンフィルタと組み合わせた深層学習によるデータ同化

非線形性が強い（非ガウス性が大きい）場合のデータ同化法として局所粒子フィルタなどが研究されているが、アンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）より優る解析精度を得るためには、アンサンブルサイズや観測データ数がある程度大きい必要がある（Penny and Miyoshi, 2016）。本研究では上記の場合を目的として、EnKF の解析値を深層学習によって局所的に修正する深層学習アンサンブルカルマンフィルタ（DL-EnKF）を提案する（図 B-19）。深層学習の入力には予報値と観測値だけでなく EnKF の解析値も加えることによって、広い空間範囲の観測データが持つ情報を間接的に取り込む。深層学習が想定する観測データの有無も入力とし、存在しない観測データは EnKF の解析値から作成して補う。

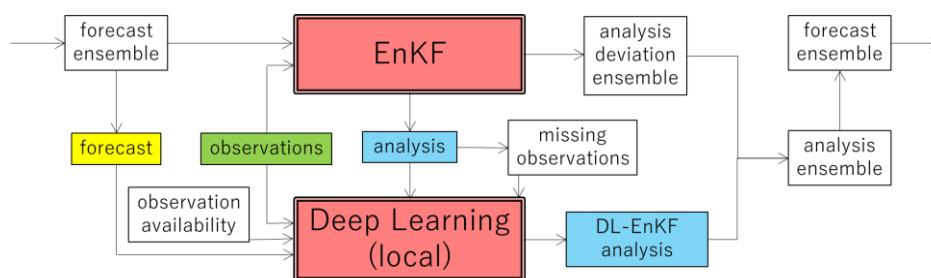


図 B-19 : DL-EnKF の処理の流れ。詳細は本文参照。

DL-EnKF の振舞いを調べるために、40 変数の Lorenz-96 モデルとアンサンブルサイズ 10 の serial EnSRF (Whitaker and Hamill, 2002) を用いてデータ同化実験を行った。深層学習の訓練・検証データは、データ同化に用いるモデルの数値シミュレーションから作成したが、アンサンブルサイズ 1000 の stochastic EnKF (Evensen, 1994) による解析値を教師データとする方法も試みた。主な結果は次の通り。

a) 最適な局所化半径による EnKF の解析値を深層学習の入力に加えると精度が向上し、入力の空間範囲（入力半径）に対する精度の依存性が減ることがわかった。

b) 観測データの空間分布が時間・空間的にランダムに変動しても、DL-EnKF は問題なく動作することが確かめられた。

c) ほぼ線形的な場合（観測データの時間間隔：0.05）には DL-EnKF の精度は EnKF より劣ったが、非線形性が強いと（時間間隔：0.5）EnKF より高精度の解析値が得られた（図 B-20）。

d) 上記の后者の場合、図 B-19 のデータ同化サイクルを回すことによって、深層学習のみの場合より精度が向上することが確かめられた（図 B-20）。

e) 大アンサンブル EnKF による解析値を教師データとしても、DL-EnKF による精度は数値シミュレーションを用いた場合と大差ないことがわかった。

f) 観測データを作成したモデルとは少し異なるモデルで観測データを同化しても、DL-EnKF による精度の改善は、同じモデルで同化した場合と同程度であった（図 B-20）。

最後の結果(f)は、現実大気のデータ同化においても、データ同化に用いる数値モデルによるシミュレーションで学習させれば、解析精度の向上が期待できることを示唆している。

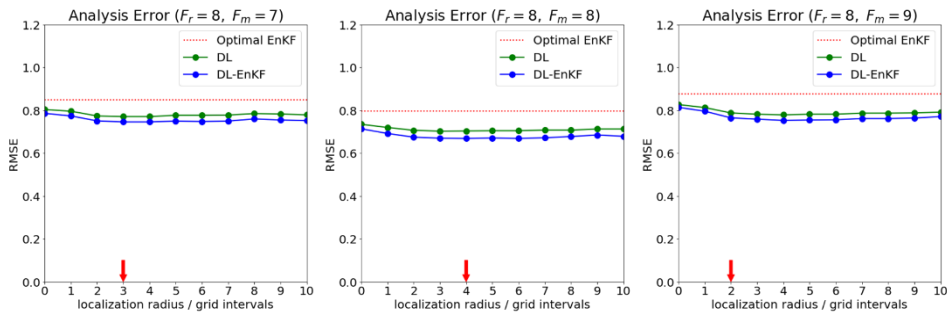


図 B-20 : Lorenz-96 モデルの解析誤差の比較（橙：EnKF, 緑：深層学習のみ, 青：DL-EnKF）。観測データは全格子点に時間間隔 0.5 で存在し、観測誤差標準偏差は 1。真値と観測値は強制項 $F=8$ のモデルで作成し、データ同化は強制項 $F=7$ (左), 8 (中), 9 (右) の 3 通りのモデルで実施。横軸は入力半径、矢印は EnKF の最適な入力半径を示す。

参考文献

- Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a non-linear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, 99(C5): 343-367.
- Penny, S. G. and T. Miyoshi, 2016: A local particle filter for high-dimensional geophysical systems. *Nonlin. Processes Geophys.*, 23, 391-405. doi:10.5194/npg-23-391-2016.
- Whitaker, J. S., and T. M. Hamill, 2002: Ensemble data assimilation without perturbed observations. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 1913-1924.

②-16. 極端水文気象現象の予測に対する不確実性定量化

洪水・浸水を十分なリードタイムで予測するためには、気象モデルと水文モデルの組み合わせにより、水文気象現象の全体を精緻に解く必要がある。2 つのモデル双方にパラメタリゼーション選択や未知パ

ラメータ選択の任意性があり、これらが水文気象現象のモデル化、ひいては水害の予測性能に多大な不確実性と誤差をもたらす。

本研究は巨大アンサンブル計算と機械学習の融合により、このような水文気象予測システムの不確実性の定量化を目指す。モデルの未知パラメータおよび、複数のパラメタリゼーションスキームの切り替えそれ自体を対象とし、異なる大量の設定でモデルを時間積分する。この巨大アンサンブルの計算結果を機械学習により解析し、パラメータ選択とモデル出力の関係を模擬する代理モデルを構築する。計算コストの小さい代理モデルが本来のモデルの挙動を代理できるという仮定の下、代理モデルの挙動から予測システムのどこにどのような不確実性があるかを網羅的・定量的に理解する。

今年度は初期的な結果として、領域気象モデルである Weather Research and Forecasting (WRF) の 11 個のモデルパラメータをターゲットとし、2015 年の関東東北豪雨を事例に上記の手法を適用した。

図 B-21 (a) は機械学習による代理モデルの模擬精度を示したものである。学習に使用するサンプル数が増えるほど、機械学習が WRF の 1 時間降水量を高精度に模擬できることがわかる。構築した代理モデルを用い、WRF の 11 パラメータのうち 1 時間降水量に感度のあるパラメータを Sobol' s index を計算することで求めた。通常この index を計算するためには 1 万回以上のモデルの時間積分が必要だが、代理モデルを用いることで無視できるほど小さい計算コストに抑えることができる。図 B-21 (b) にその結果を示す。大量にパラメータの存在するモデルでも、予報に重要な感度のあるパラメータの数は多くないということを示唆する結果になっている。

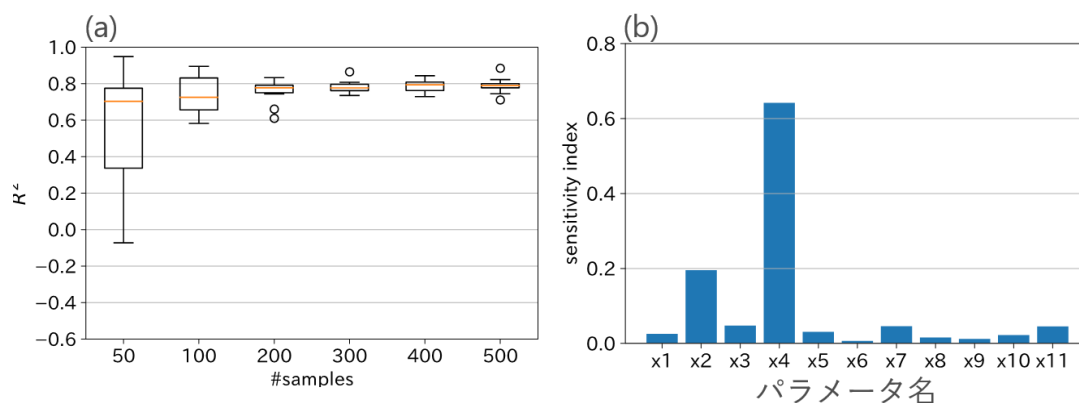


図 B-21 : (a) 機械学習による代理モデルのクロスバリデーションによる推定精度を学習に使ったモデルの数の関数としてあらわしたもの。(b) モデルパラメータのモデル出力に対する感度を Sobol' s index により測ったもの。値が大きいものほど感度が大きい。モデル出力は 1 時間降水量。詳細は本文参照。

②-17. A Machine learning approach to the observation operator for satellite radiance data assimilation

Assimilating satellite radiance proved to be useful to improve the performance of the numerical weather prediction (NWP) model. Because the satellite does not observe the model variable directly, an observation operator (OO) is required to derive the model equivalent of

the satellite radiance from the model variables. It is usually based on a complex radiative transfer model (RTM) with a bias correction procedure. Therefore, it usually takes time to build OO and start using the new data after launching the satellites. This study explores a data-driven approach to accelerate the development of the observation operator. Trained by data, machine learning (ML) can reveal the complex relationships between model variables and observations without knowing physical laws.

We tested ML as OO with the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) and the Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) system. This reference system assimilates conventional observations and the brightness temperature (BT) from the Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) using an OO for BT based on RTM (RTTOV) and an online bias correction method. We performed 1-month DA using the reference system to train an ML model. The outputs of the ML model were satellite BT, and the inputs were the corresponding NICAM model variables and bias predictors. Next, three experiments were conducted in the same month the following year. In the first experiment (CONV-AMSUA-RTTOV), we assimilated the conventional observations and the AMSU-A using the RTTOV as OO. In the second experiment (CONV-AMSUA-ML), we assimilated the conventional observations and the AMSU-A using ML as OO. In the third experiment (CONV), we only assimilated conventional observations.

The results from the experiment CONV-AMSUA-ML showed that the ML model treated the bias properly. By using ECMWF reanalysis data (ERA-interim) as the benchmark, the RMSD of the temperature and zonal wind in CONV-AMSUA-ML are slightly higher than CONV-AMSUA-RTTOV but lower than CONV (Figure B-22). Overall, the global average of the temperature RMSD in CONV-AMSUA-ML is 4% higher compared to CONV-AMSUA-RTTOV but 2% lower compared to CONV. Although the performance of the ML model is slightly worse than the traditional RTTOV based OO, it can successfully act as an OO to assimilate the satellite radiance and improve the result. The results are encouraging although we still rely on a physically based RTM to train the ML model.

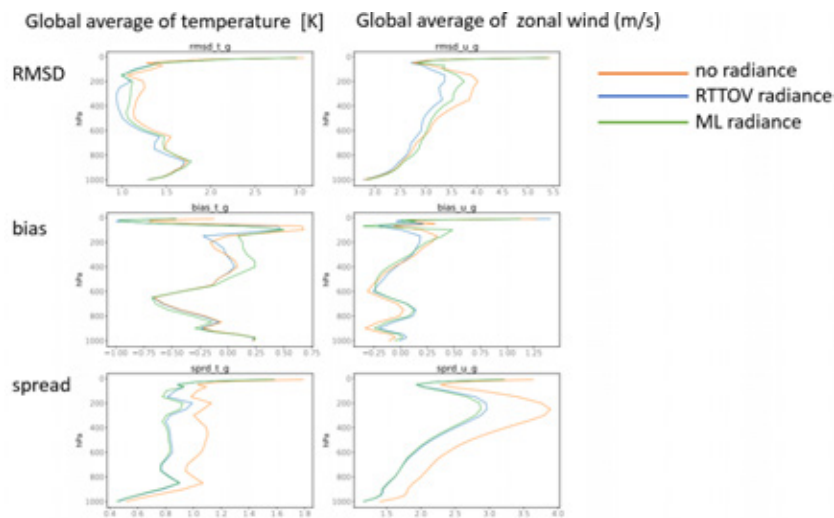


Figure B-22 : Evaluating by ERA-interim, (left column) the RMSD, bias, and spread of

temperature (K) and (right columns) zonal wind (m/s) from three experiments.

②-18. 背景誤差の非ガウス性定量化による非ガウスデータ同化手法

アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) は、二次の統計モーメントまでを扱った最小分散推定を行う。この結果は、誤差分布がガウス分布に従うときに最尤推定と一致する。Kondo and Miyoshi (2019, NPG) はアンサンブル数 10240 からなるアンサンブルデータ同化実験の結果を用いることで、大気における背景誤差の確率分布を詳しく検証した。その結果、背景誤差は多くの格子点でガウス分布であるものの、非線形性が強い熱帯の積雲対流やストームトラックでは非ガウス性が強くなり、EnKF の解析誤差が大きくなる傾向があることを確認した。このような非ガウス分布に対応するため、本研究では従来のアンサンブルデータ同化手法に粒子フィルタ (PF) を組み合わせたハイブリッドデータ同化手法と、観測誤差を非ガウス分布強度に応じ動的に膨張させる動的観測誤差膨張手法を考案し、強非線形システムにおけるデータ同化の精度向上を目的とする。

本研究では、低解像度の全球大気モデルによる SPEEDY-LETKF システム (Miyoshi 2005) をベースとして使用する。アンサンブル数は 80 とする。観測はラジオゾンデ観測 (線形観測演算子 $H(x)=x$) とモデル格子点の 2×2 に 1 点の一樣観測 (非線形観測演算子 $H(x)=\ln(|x|)$) を 6 時間毎に同化する観測システムシミュレーション実験を行った。CNTL を通常の LETKF、TEST1 をハイブリッドデータ同化手法、TEST2 を動的観測誤差膨張手法による実験とする。

図 B-23 は、モデル 4 層目 (500 hPa 付近) における気温の解析 RMSE の時系列である。TEST1 は PF が組み合わされているにもかかわらず発散せずに安定動作している。CNTL と比較しても TEST1、TEST2 とともに RMSE の収束がはやく、RMSE もそれぞれ 3.4 %、2.7 % 低減している。ラジオゾンデ観測のみを同化した別の実験では、解析精度に明確な差は確認されなかった (図略)。このことから、非線形観測演算子により観測空間における非ガウス性が大きくなり、非ガウスデータ同化の効果が現われたと考えられる。

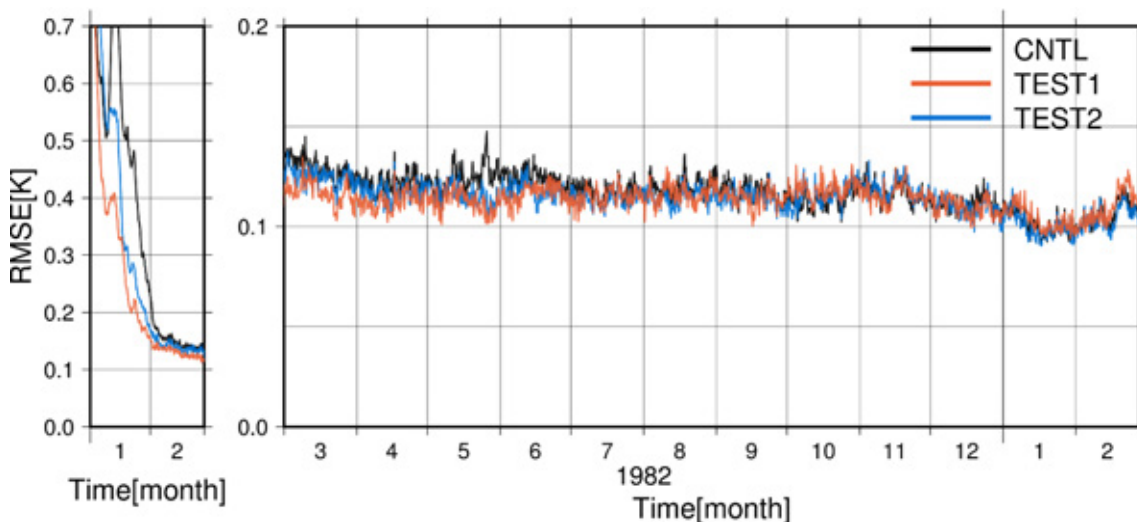


図 B-23 : モデル 4 層目 (~500 hPa) における気温の解析誤差 RMSE 時系列。

参考文献

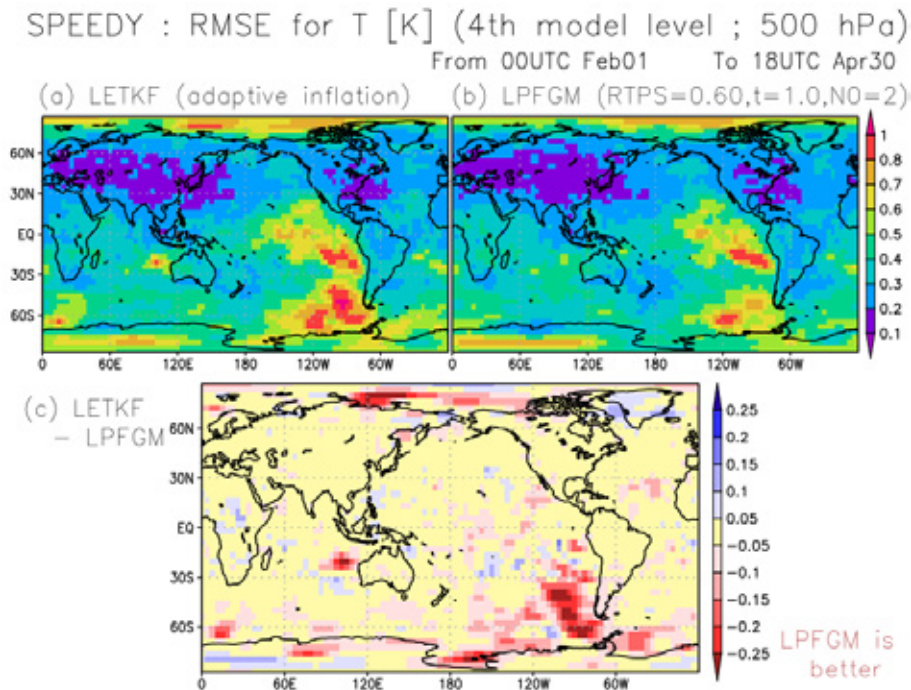
Kondo, K., and T. Miyoshi, 2019: Non-Gaussian statistics in global atmospheric dynamics: a study with a 10240-member ensemble Kalman filter using an intermediate AGCM. *Nonlinear*

Miyoshi, T., 2005: Ensemble Kalman filter experiments with a primitive-equation global model. Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park, 197pp.

②-19. 局所粒子フィルタの開発と安定化

アンサンブルデータ同化手法の1つである粒子フィルタ(PF)は、予報誤差に関する確率分布を多数のアンサンブルでモンテカルロ近似し、観測情報とのベイズ推定により事後分布を推定する。PFは、より一般的なデータ同化手法である一方で、確率分布の表現に膨大な粒子が必要であり、多次元系への適用は限定されてきた。近年、アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)で発展してきた技術である局所化を応用した局所粒子フィルタ(LPF)が提案され、数値天気予測モデル等の多次元力学系でもPFが適用可能であることが示されてきた。本研究では、低解像度全球大気モデルSPEEDYを使って、観測システムシミュレーション実験によりLPFとEnKFを比較した。またLPFの発展形としてドイツ気象局のPotthastらが提案しているLPFの事前分布近似ガウス混合分布を用いたLPFGMも実装した。

アンサンブル数40でLETKFとLPFGMを比較した結果を図B-24に示す。なお、局所化スケールはLETKFに対して事前にチューニングされた値をLPFGMでも用いた。気温・水蒸気・東西風・南北風の鉛直プロファイルと、地表面気圧を観測値として同化した。観測地点は、ラジオゾンデを模した配置(416地点)とした。LPFGMは、リサンプリング頻度、インフレーションなど、LETKFに比してチューニングパラメータが多くなるものの、適切なパラメータを設定する事でLETKFを上回りえる可能性がある事を示している。



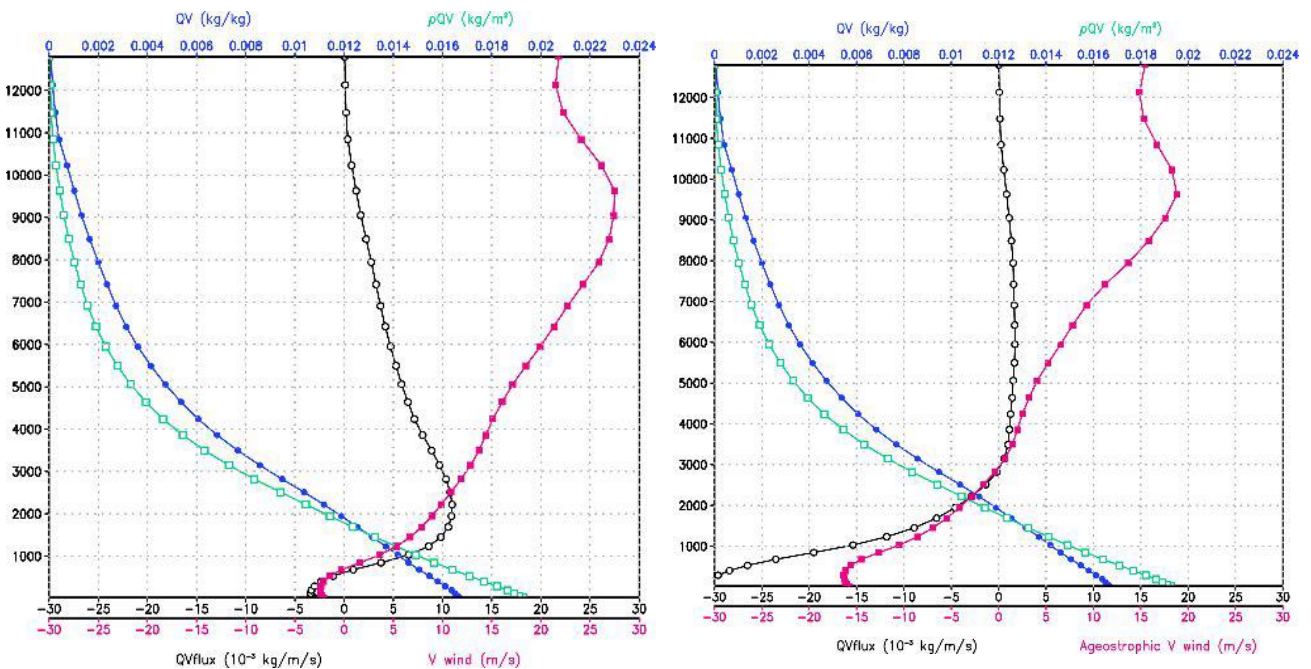
図B-24 : SPEEDY モデル4層目の気温の二乗平均平方根誤差の空間分布。(a) LETKF, (b) LPFGMであり、(c) はLETKFとLPFGMの差。4ヶ月の実験を行い、後半3ヶ月の平均値を示す。(c)の暖色はLPFGMがLETKFを上回る事を示す。アンサンブル数は40。投稿準備中の論文Kotsuki et al. (in prep)から引用。

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. 台風に伴う北向き水蒸気フラックスの遠隔降水へのインパクト

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。Saito (2019)は、高層観測データと JMA-NHM（気象庁非静力学モデル）による再現実験により、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調べ、その成因として水平風加速度成分による力学的成因で説明できることを示した。ここでは、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、日本の南岸域で平均した各高度の北向き水蒸気フラックスについて示すとともに、非地衡風による水蒸気輸送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た (Saito and Matsunobu 2020)。

Saito (2019)での 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 JMA-NHM による 6 時間予報について、日本の南岸域(130-137 E, 30-33 N)で平均した各高度の水蒸気量と、北向き風速および水蒸気フラックスの鉛直プロファイルを図 C-1 左上に示す。北向き風速は 1 km より上では正となり、300hPa (約 9km) 高度で最大値となる。図 C-1 右上で示すように、この 300hPa 高度においては非地衡風成分が北向き風速の 70%近くを占めている。日本の南岸域での南風成分における非地衡風の寄与分として、北向き非地衡風が正となる高度 3km 以上の水蒸気量を図 C-1 下のように減らして、モデルを 00 UTC (FT=6) からリスタートし、降水がどう変わるかを調べた。図 C-2 は、標準実験 (CTL) における FT=6-12 の 6 時間の降水量 (左上) と水蒸気改変実験 (EXP) での西日本 (130-137 E, 31-34N) 域で平均した 1 時間降水強度の時間変化とその差である。下層の水蒸気を変えていないにもかかわらず、西日本の降水が減少しており、FT=8-9 では領域平均で約 30%に達している。モデルは積雲対流パラメタリゼーションを含むが、改変実験における降水の減少はその殆どが雲物理過程による降水の減少であった。ここで得られた結果は、台風に伴う非地衡風は、対流圏の中上層を加湿することにより遠隔降水を強化していることを示唆している。



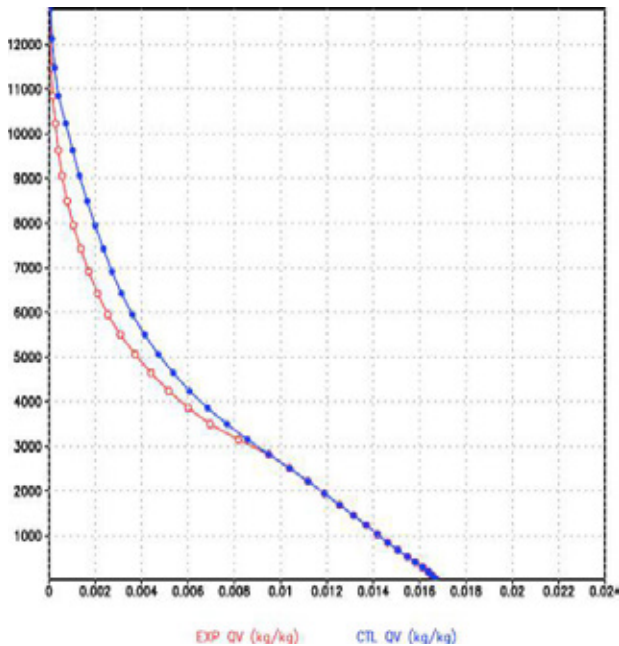


図 C-1 左上) 10月7日 00UTC の日本の南岸域(130-137 E, 30-33N)で平均した各高度の混合比(緑)と水蒸気量(青)、北向き風速(赤)および水蒸気フラックス(黒)の鉛直プロファイル(縦軸は高度、単位は m)。右上) 同じく非地衡風成分。下) 感度実験における水蒸気プロファイル(赤)。

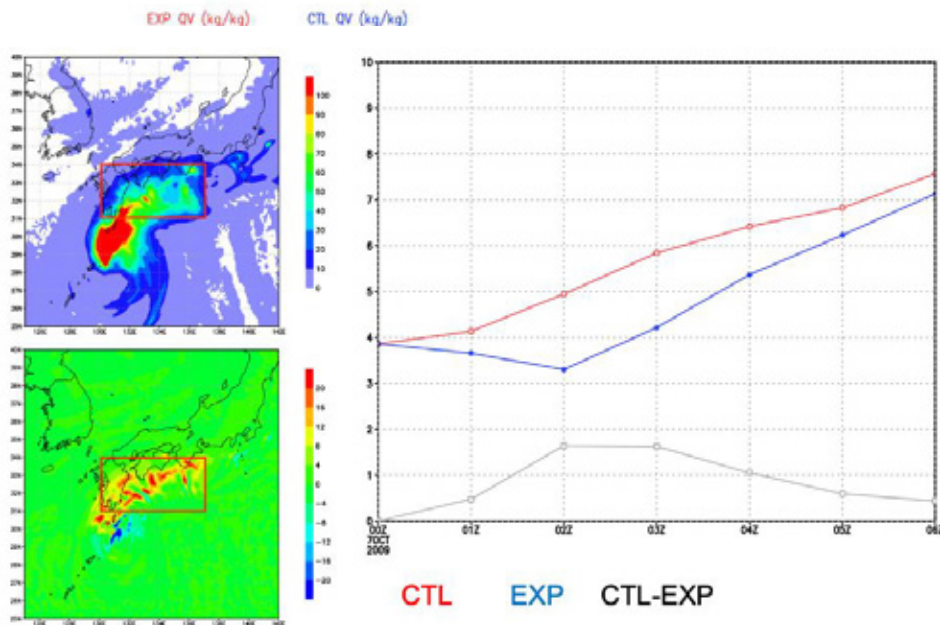


図 C-2 左上) 標準実験における FT=6-12 の 6 時間の降水量(シェード)。左下) 感度実験における降水の減少(シェードは標準実験からの偏差)。右) 西日本(130-137 E, 31-34N)域で平均した 1 時間降水強度の時間変化(縦軸は降水強度、横軸は時刻、灰色の線は実験間の差分)。

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.

③-2. 太平洋上の高い海面水温が 2019 年台風第 19 号に与えた影響

日本各地に大きな被害をもたらした 2019 年台風第 19 号（令和元年度東日本台風）の環境場の特徴のひとつとして、日本に上陸する前の北西太平洋の経路上の海面水温が平年よりも高かったことが挙げられる。海面水温が高いことは、台風の強化や進路の変化をもたらす可能性があるため、本研究では、海面水温が平年より高かったことの影響を、気象庁非静力学モデル NHM を用いて評価し、その信頼性を担保するため、全球アンサンブル摂動を用いて、各 10 メンバーのアンサンブル計算を行った。計算の結果、太平洋上の海面水温が高かったことにより、最大風速は約 5 m/s 強く、強風域も 50 km 拡大していた。また、台風中心から 500 km 以内の降水量が約 30%増加していたのに対して、中部地方から関東・東北地方にかけての降水量の増加は約 10%程度であった（詳細は Ito and Ichikawa 2021, 図 3 および同論文電子付録の図 A1 参照）。この違いは、太平洋の海面水温が高い実験で台風の移動速度が速くなっていたことによるものであった（図 C-3）。台風の移動速度は、海面水温が高い場合にアンサンブル統計で有意に増加していたが、その理由について詳細を調べたところ、強い台風が偏西風帯に接近した際に、対流活動が北側に偏在するため、その影響で台風が北偏していくという新たなメカニズムで説明できることが分かった。このことは、台風の進路を正確に予報するためには、海面水温や対流活動の正確な表現が必要であることを意味している。

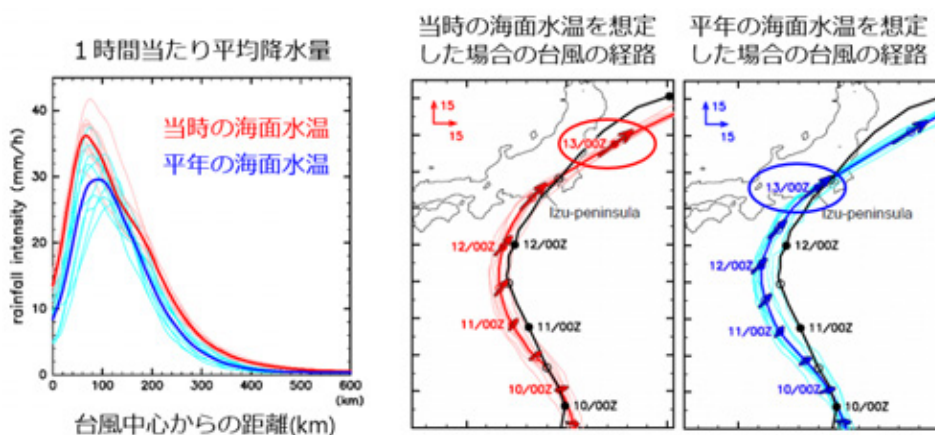


図 C-3 : (左図)台風中心付近の平均降水量。(右図)当時と平年の海面水温を想定した場合の台風進路の違い。赤、青線はシミュレーション結果、黒線は気象庁ベストトラック。右図の矢印は鉛直シアの強さと向きをあらわしている。

参考文献

Ito, K. and H. Ichikawa, 2021: Warm ocean accelerating tropical cyclone Hagibis (2019) through interaction with a mid-latitude westerly jet, SOLA, 17A, 1-6, doi:10.2151/sola.17A-001.

③-3. 気象庁数値解析予報実験システムの富岳への移植

「富岳」による研究・開発の成果を気象庁の現業システムに速やかに反映することを目的として、2020 年度、気象庁のメソスケール数値解析予報実験システム（メソ NAPEX）の「富岳」への移植に着手した。2021 年 3 月時点のメソ NAPEX は、水平解像度 5 km の領域モデル asuca による予報 (Mf) と、その初期値を作成する asuca に基づく 4 次元変分法による解析 (Ma) から成り、Ma は 3 時間毎に前サイクルの結

果を引き継いで実行され、Mf は Ma の結果を引き継いで同じく 3 時間毎に実行される。また、Ma と Mf はそれぞれ複数のジョブで構成され、ジョブ間にはそれぞれ依存関係がある。気象庁の現業システムではこの依存関係に基づいてジョブを投入する内製のジョブスケジューラシステムを運用しているが、今回「富岳」での実験環境では、個人環境で動作可能なシェルスクリプトベースの簡易的なジョブスケジューラを新たに構築する方針をとった。これにより、「富岳」において管理者権限を持たないユーザーであっても効率的にメソ NAPEX の一連の実験を実行できることを確認した（図は「富岳」に移植したメソ NAPEX の動作中に作成されるジョブステータス図の例）。「富岳」のメンテナンス期間における動作確認には「富岳」と同型の計算ノードを持つ名古屋大学スパコン「不老」も活用した。今回の移植に際してコンパイラ等の違いによる修正は必要であったものの、各ジョブの処理そのものを現業システムから大きく変更する必要は無かった。

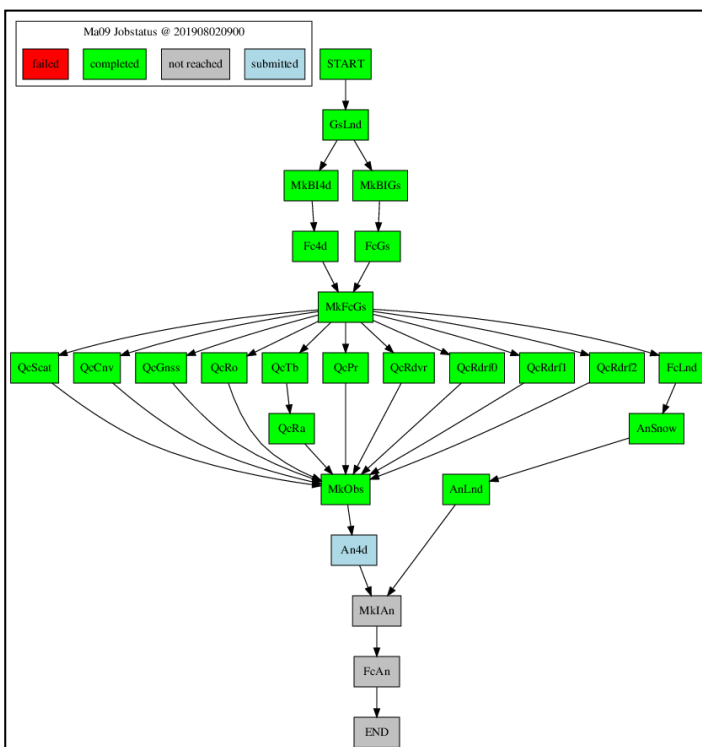


図 C-4 メソ NAPEX 実行中に描画される Ma のジョブステータス図の例。矢印でジョブ間の依存関係が示されており、緑色は正常終了したジョブ、青色は現在投入されているジョブ、灰色はまだ実行されていないジョブを表す（なお、異常終了すると該当ジョブが赤色になる）。

③-4. 気象モデルによる晴天乱気流の高解像度シミュレーション

乱気流は航空安全の脅威となっており、現在でも乱気流に起因する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は対流雲を伴わないため、機上レーダー等で事前に発生を知ることが困難である。晴天乱気流はせん断流から誘起されるケルビンヘルムホルツ不安定によりその原因の大部分が説明できる (Ellrod 1992) とされ、そこから発生する飛行機サイズの渦が飛行機に揺れを与えるとされる (Joseph 2004)。乱気流事故防止のために JAXA (宇宙航空研究開発機構) や DLR (ドイツ航空宇宙センター) 等の研究機関が技術開発を行っている (Machida et al. 2018, Vrancken et al. 2016) が、航空機搭載用の装置の性能実証のために必要なフライトテストの実施回数が限られていたり、常に

乱気流に遭遇できるとは限らないなど、実際に事故を引き起こす可能性のある強い乱気流の影響下での装置の検証は一般的に困難である (Veerman et al. 2014)。従って、気象場を計算し乱気流が実際の飛行機に与える影響を予測する手法を確立できれば、現実に近い条件で仮想的な飛行試験を実行でき、開発を効率的に進めることが可能となる。本取組では、気象モデルを用いた LES (Large Eddy Simulation: 大気乱流のうちスケールの大きい乱流渦を改造する計算手法) を行い当時の乱気流を高解像に再現した上で、飛行機の運動を模擬するフライトシミュレータから乱気流が飛行機にどの程度の鉛直加速度変化をもたらすかを見積もり、仮想飛行試験の実行可能性を調査する。

2014年12月16日に北関東上空で発生した晴天乱気流に起因する航空事故事例を対象に、東北大学のAFI-NITYスーパーコンピュータシステムにおいて計3ドメイン構成(約1.5億格子点)の数値気象予測を行った。ドメイン3は水平250m格子で解像しLESを行った。対象事例が発生した地点では鉛直風速約32m/sの振幅を持つ乱気流が再現されたとともに、この地点を横切る鉛直断面(図C-5)においてフライトシミュレーションを実行するとBoeing 777クラスの飛行機に+1.5G→+0.08Gの比較的強い鉛直加速度変化が発生することが示された。

しかし、予測された鉛直加速度変化は運輸安全委員会の事故調査報告書に記載された値よりも5割程度小さく、本来は計算でも大きな加速度変化が生じるはずである。現実に近い形で行うためには、「富岳」において飛行機サイズの渦まで解像できる水平10m-20m解像度の格子を用いたLESによる乱気流計算が必要であるとわかった。

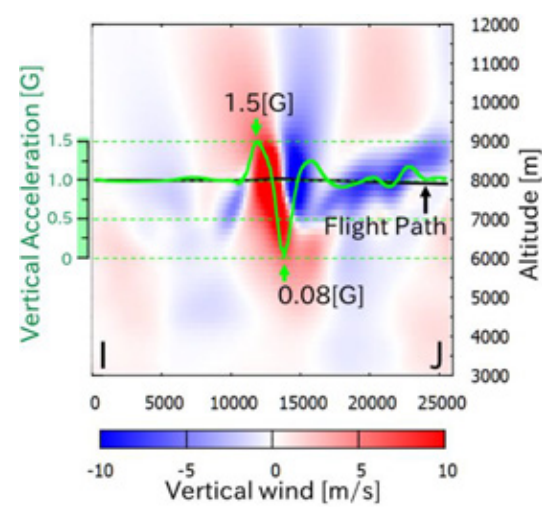


図 C-5 : 再現された鉛直風速場(赤青陰影)と飛行機が経験した加速度変化(緑線)及び対応する飛行経路(黒線)。

参考文献

Ellrod, G. P., and Knapp, D. I., 1992: An Objective Clear-Air Turbulence Forecasting Technique: Verification and Operational Use. *Weather and Forecasting*, 7, 150-165, 2004

Veerman, H.P.J., P. Vrancken, and L. Lombard. 2014: Flight testing delicat - A promise for medium-range clear air turbulence protection. *European 46th SETP and 25th SFTE Symposium*, LUELA, Sweden. fahal-01111380.

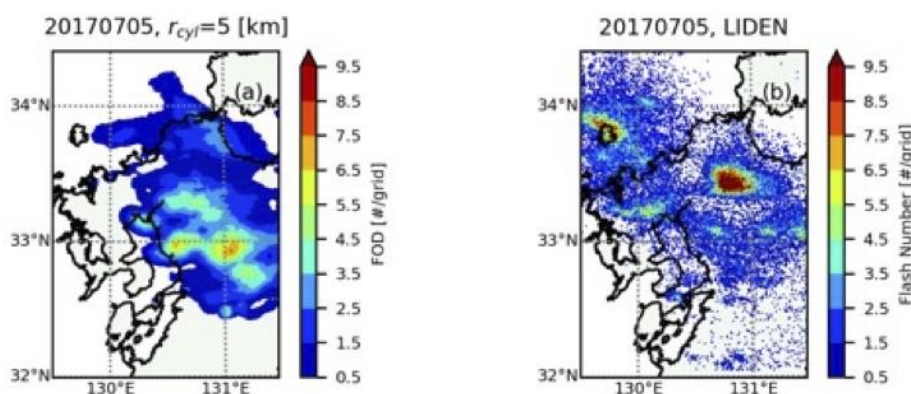
Joseph, B., Mahalov, A., Nicolaenko, B., and Tse, K. L., 2004: Variability of turbulence and its outer scales in a model tropopause jet. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61, 621-643.

Vrancken, P., 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.

Machida, S., H. Inokuchi, and N. Matayoshi, 2018: Overview of demonstration project of JAXA onboard turbulence detection system, *19th Coherent Laser Radar Conference*, Okinawa, Japan.

③-5. 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検証

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。現在でも気象庁を中心にして、雷の危険性を示す情報が発信されているが（例：雷ナウキャスト <http://www.jma.go.jp/jp/radnowc/>）、これらは観測の外挿や、経験的な手法で求められるため、雷が起こる直前でなければ雷の予測は難しい。一方、数値気象予測に基づく天気予報は、その予報精度が80%を超えるなど、1日前には精度の高い予報ができる。そのため、本プロジェクトでは将来的に雷予測を数値気象予測で行い、リードタイム1日程度での雷予測を目指して、雷を直接扱った気象雷モデルの開発と数値実験を行なった。気象雷モデルは、その膨大な計算コストがボトルネックになり一部の例を除いてはほとんど用いられていない。そこで本プロジェクトでは、「富岳」の圧倒的な計算能力を駆使して、気象雷モデルを用いた数値実験を行い、その検証を行った。具体的にはSato et al. (2019)にて開発された気象雷モデルを用いて、平成29年九州北部豪雨の事例を対象とした数値実験を行い、気象庁が観測を行なっている雷放電観測 Lightning DETection Network system (LIDEN, Ishii et al. 2014)との比較を通して、気象雷モデルの検証を行った。検証結果の一例を図C-6に示す。図C-6は気象雷モデルによって計算された雷頻度とLIDENで観測された雷頻度の比較である。気象雷モデルは雷の位置が観測より南東側にずれているものの、観測された雷頻度を概ね再現できていることが確認できた。



図C-6：(左) 気象雷モデルによって計算された雷頻度と (右) LIDENによって観測された雷頻度の分布

参考文献

- Ishii, K., H. Syugo, and F. Fujibe, (2014), Statistical Analysis of Temporal and Spatial Distributions of Cloud-to-Ground Lightning in Japan from 2002 to 2008. *Journal of Atmospheric Electricity*, 34, 79-86.
- Sato, Y., Y. Miyamoto, and H. Tomita, (2019), Large dependency of charge distribution in a tropical cyclone inner core upon aerosol number concentration, *Progress in Earth and Planetary Science*, 6(1), doi:10.1186/s40645-019-0309-7

③-6. NHM のアンサンブル解析に基づく流入変動風の作成

極端気象下での地表近傍の構造物の被災推定を行うためには、建物や地形を解像した LES により構造物の周りの乱流場や圧力場をあきらかにしていく必要がある。これらの LES を実施するためには境界条件として実気象を対象として得られた流速場を与えなければならない。本課題では数百メンバーオーダーの気象モデルのアンサンブル解析に基づき気象場の確率特性を明らかにし、地表近傍の構造物の被災推定を行う計画である。本年度は、実気象現象の強風を流入条件とし、都市を対象に CUBE (BCM-LES による非定常乱流解析コード) を用いた強風シミュレーションを行うことをめざし、流入変動風の整備を行った。

初めに、2019 年台風第 19 号について NHM による解析 (空間解像度 1 km) を実施し、初期時刻、解像度、微物理モデルなどの影響に関する探索を行った。本解析では都市上空の気象場の構造の再現を主眼に置いていることから、解析の初期時刻の見直しを行い、最接近の 6 時間前 (6:00UTC) からの解析を行ったところ、上陸位置等、台風の経路が改善し、中心気圧、降水分布 (図 C-7) についてもほぼ実況に対応したものとなり、台風の特徴を反映した積乱雲やその内部の擾乱構造についても比較的よい再現が見込まれることを確認した。また風速分布については、最接近時の NHM の風速値 (風速レベル) (図 C-8) を観測結果 (東京、江戸川臨海) と比較したところ、ある程度整合性が取れることを確認した。

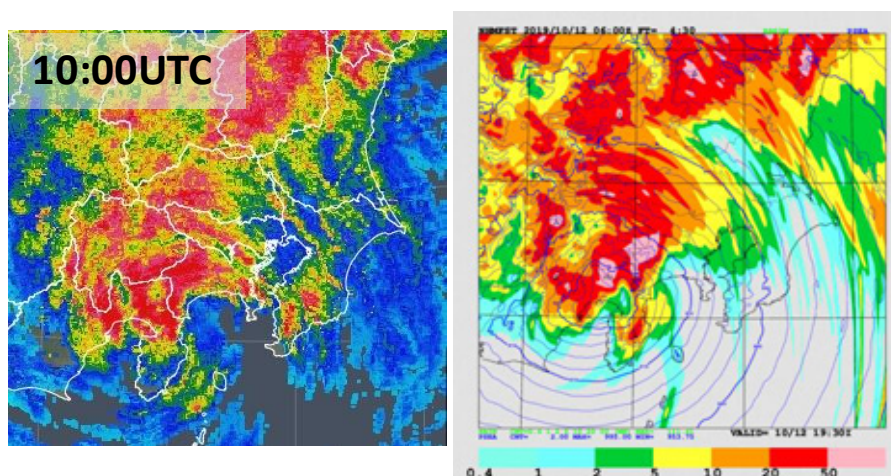


図 C-7 : 台風 19 号上陸時の降水分布の比較、左図が観測、右図がシミュレーション結果 (2019 年 10 月 12 日 10:00UTC)。

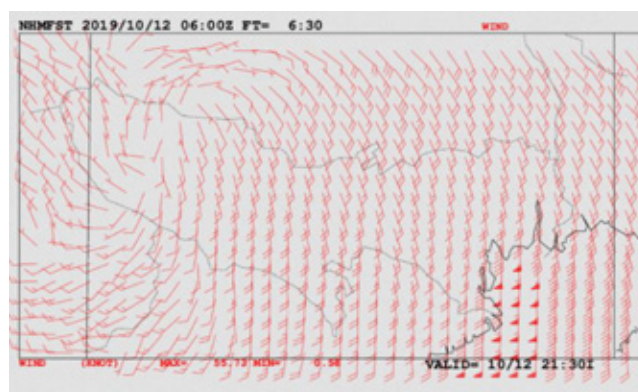


図 C-8 : NHM による東京最接近時の風速分布 (2019 年 10 月 12 日 12:30UTC)。

③-7. 猛暑に対する地表近傍での高解像度被害推定に関する検証

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は都市キャノピーモデルを用いた気象モデルの解析等の例はあるが、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。本課題では気象モデルアンサンブル推定結果を用いた流入条件に基づいた、熱放射・LESの連成解析を実施することにより、猛暑時の地表近傍での気温場・風速場の確率的な変動特性を明らかにすることを目標としている。本年度は、市街地の熱放射、LESの連成解析手法について、対数則に基づく地表での境界条件の導入・検討を行うとともに、実観測データとの比較・検証を実施し、ビル屋上での風速、街路内での気温についての再現性を確認した。解析では東京都沿岸部の市街地の建物形状と土地被覆を再現している。対象地では既往研究においてドップラーライダーにより、海上から流入する風速の鉛直分布と地上での観測により地表近傍の風速と気温が測定されていることから、解析値と観測値の比較を行った。その結果、歩行者空間における風速については、複雑形状を持つ建物の後流にある図C-10の地点2の風向や地点4の風速において観測値との差がみられたが、風向、風速ともにほぼ対応した値がみられる。また、高速道路の高架などのそばにある地点6~8では構造物の形状や、土地被覆からの地表面の境界条件に実態と差があることから、1℃程度の気温の差があるが、ほかの点についてはおおむね対応した結果となった（図C-9、図C-10）。

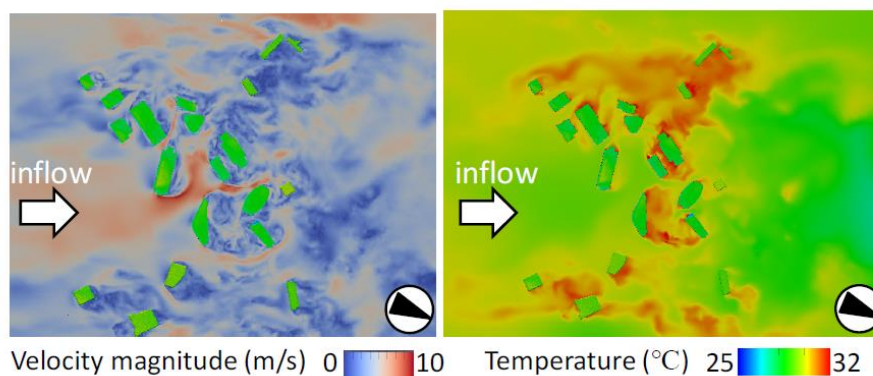
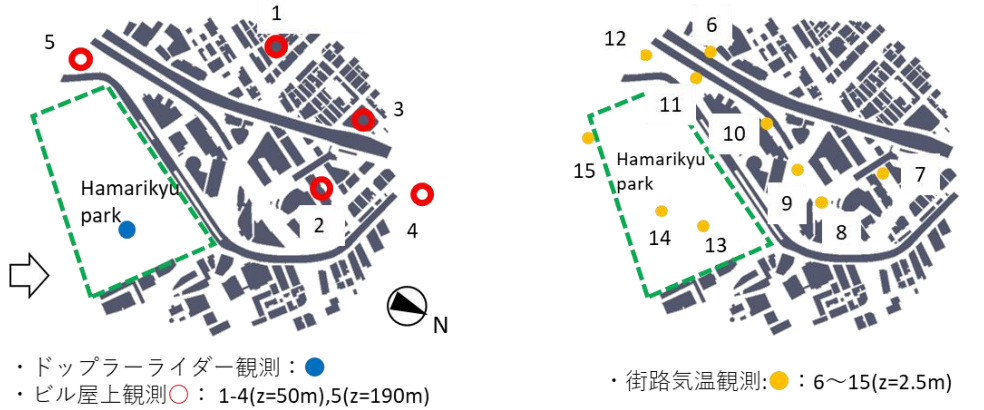
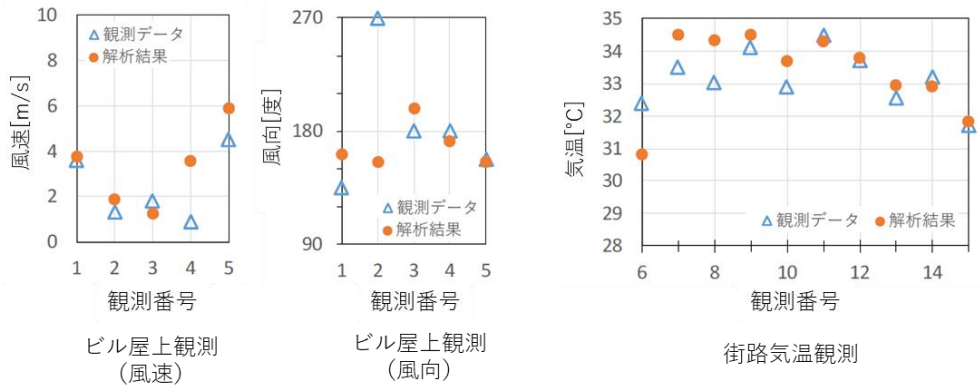


図 C-9：市街地の風速場と温度場の解析値（瞬間値、高さ 50m の水平断面）。



(a) 風速観測地点

(b) 気温観測地点



(c) 解析結果と各観測値の比較

図 C-10：市街地の熱放射，LES の連成解析手法と観測値の比較。

③-8. 三陸沿岸の冬季強風の高解像度シミュレーション

Mashiko (2019) により日本全国の気象官署の観測値を用いた、突風の発生数の統計調査が行われている。この調査によれば、三陸（大船渡・宮古）において、降水を伴わない突風発生数は全国でもっとも多い（降水を伴う場合は、太平洋沿岸において台風に伴い生じるケースが多い）。また、突風の風向が、大船渡は北西、宮古は南西にほぼ固定されている点も、三陸以外の地域ではあまりみられない特徴である。

このような特徴的な強風もしくは突風の出現には三陸海岸や北上山地の複雑な地形の影響が考えられる。このために現実的な地形を導入可能な、解像度を極端に高めたシミュレーションを行う。2018/19 シーズンにおいて大槌湾突堤で風速が強く、降水も無かった、2019年2月1日の強風の再現を試みた。

気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)によって、三陸沿岸の強風の再現を試みた。気象庁メソ解析値（水平解像度 5km、3 時間毎、モデル面）を初期値・境界値とした水平解像度 1km の低解像度ランを行う。2月1日午前0時（日本時間）から24時間積分した。格子数は 1000×1000×60 とする。さらに水平解像度を高め、100m とした高解像度ランを行う。格子数は低解像度ランと同程度（1000×1200×60）としている。そのため、計算領域は北上山地や三陸沖のみしかカバーできない。この計算は2月1日の午前3時に開始し、21時間積分する。高解像度ランの10分毎の結果を境界値として利用する。

大船渡（観測所に最も近いグリッド点）における、解像度毎の地上風速の時系列（図 C-11）を比較する。午前中は解像度による大船渡の地上風速の違いはあまりない。午後になると、高解像度ランのみ 15 m/s を越す強風が間欠的に出現するようになる。また風向は解像度に関わらず、昼過ぎはほぼ北西で揃っている。北上山地上では、午後は対流混合層が発達している。等温位線の高度変化の振幅は増大しており、上空の強い乱流混合を示唆する。また等温位線が北上山地に沿って降下しており、上空の大きな運動量が、北上山地の風下の大船渡にもたらされている。

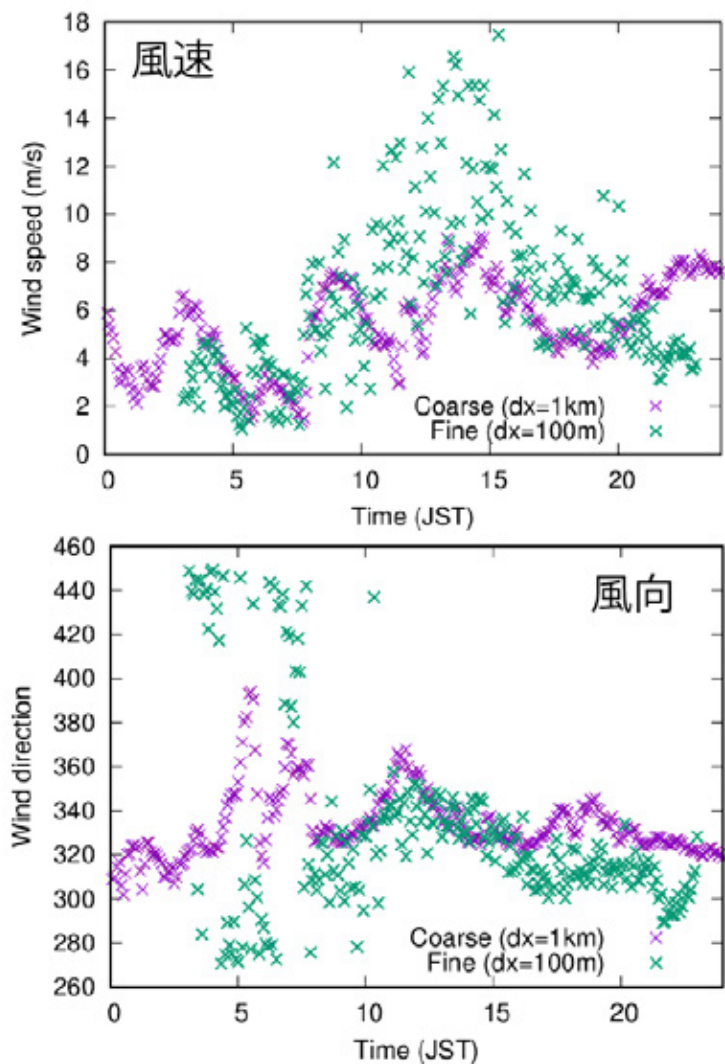


図 C-11 大船渡における風速・風向の時系列。紫が低解像度ラン、緑が高解像度ランを表す。方角は真北が 0 または 360 を示し、時計回りである（本事例では北西風が卓越している）。

参考文献

Wataru MASHIKO, A Statistical Study of Wind Gusts in Japan Using Surface Observations, J. Meteorol. Soc. Jpn., 97, 39-54, 2019

③-9. 梅雨前線上のメソ α スケール低気圧および令和 2 年 7 月豪雨に対する上層トラフの影響

令和 2 年 7 月は九州地方を中心に集中豪雨が発生した。今回の集中豪雨の発生に伴って、梅雨前線上にメソ α スケールの低気圧（以後、メソ α 低気圧）の存在が複数回確認されており、豪雨との関係が示唆されている (Araki et al. 2020; Hirockawa et al. 2020)。また、メソ α 低気圧の発生・発達に伴って、上層トラフが接近しており、メソ α 低気圧および豪雨への影響が示唆される。本研究は、特に九州地方の豪雨に着目し、対流圏上層のトラフがメソ α 低気圧および九州で発生した豪雨に与えた影響を数値シミュレーションを用いて調べた。

本研究では、Weather Research Forecasting (WRF) model を用いてシミュレーションを行った。水平解像度は、3 km (水平 1336 格子 x 1002 格子 x 50 層) である。シミュレーションの初期値・境界値には JRA-55 (Kobayashi et al. 2015) を用いた。シミュレーション開始時刻は、7 月 2 日 9 時、7 月 5 日 9 時、7 月 6 日 15 時の 3 つである。雲微物理過程は Thompson scheme (Thompson 2008) を用いた。積雲パラメタリゼーションは用いていない。Mellow-Yamada-Nakanishi-Niino level 2.5 スキームを用いた。これらの設定で、JRA-55 を初期値・境界値として行った数値シミュレーションを標準実験 (CNTL) とした。また、3 つの初期時刻の実験をそれぞれ、CNTL02, CNTL05, CNTL06 とした。

上層トラフがメソ α 低気圧および豪雨に与えた影響を調べるために、上層トラフの影響を初期値・境界値から取り除いた数値シミュレーション (NOUL) を行った。110-130E, 30-50N の領域内における、500hPa より上層の渦位 (PV) 偏差 (6, 7 月からの偏差で定義) によって誘起される 3 次元的な風、温度、気圧場を Piecewise PV inversion (Davis and Emanuel 1991) を用いて求め、CNTL の初期値・境界値から除くことで、NOUL の初期値・境界値とした。また、3 つの初期時刻の実験をそれぞれ、NOUL02, NOUL05, NOUL06 とした。

図 C-12 に CNTL によって再現された 12 時間降水量および 24 時間降水量の結果を示す。CNTL02 では、熊本付近に 12 時間で最大 300mm 程度の降水を再現した (図 C-12a)。降水量としては過少であるが、概ねの降水分布は良く再現できていた。また、CNTL05 では、九州北部での 24 時間で 200mm を超える降水量を再現していた (図 C-12c)。こちらも、観測と比較すると過小評価であり、位置も北側にずれているが、大まかな降水分布は再現出来ていた。CNTL06 でも九州北部で 24 時間最大 300mm 程度の降水を再現していたが、過小評価傾向であり、降水分布が少し北にシフトしていた (図 C-12e)。一方、大まかな降水分布は再現していたと考えられる。

上層トラフによるメソ α 低気圧および豪雨に対する影響を調べるために、CNTL02 と NOUL02 の結果を比較する。まず、7 月 4 日の降水量を比較する。NOUL02 では降水量は顕著に減少しており、九州での降水は鹿児島を除いてほとんど見られなくなっている (図 C-12b)。また、降水の分布は大きく南にシフトしている。この違いは、CNTL02 と NOUL02 のメソ α 低気圧の発達の違いに起因している。CNTL02 では、中国大陸上で対流に伴って低気圧が強化され、その後東進して九州での豪雨に寄与する。一方、NOUL02 では、CNTL02 と比較してメソ α 低気圧の強化が顕著に弱まったことで、九州での豪雨も見られなくなった。

続いて、CNTL05 と NOUL05 を比較する。CNTL05 と NOUL05 のメソ α 低気圧の違いを調べたところ、NOUL05 における気圧の弱まり、東進の遅れが見られた (図略)。一方で、降水量を見ると、NOUL05 では、少し降水域が南にシフトするが、九州北部で 24 時間降水量が 300mm を超える領域が見られ、量的に顕著な降水量の減少は見られなかった (図 C-12d)。

CNTL06 と NOUL06 のメソ α 低気圧を比較すると、こちらも NOUL06 では気圧の弱まりが見られた。また、CNTL では東シナ海での低圧部の南への張り出しが見られたが、NOUL06 ではあまり見られなくなっていた。その結果、NOUL06 では、300mm をおける降水域は見られるものの、CNTL06 と比較して降水域が北側の海上にシフトして

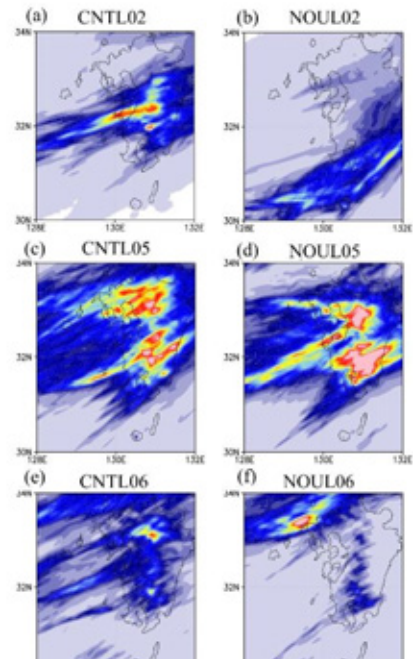


図 C-12 (a) CNTL02 と (b) NOUL02 における 12 時間降水量。(c) CNTL05 と (d) NOUL05 における 24 時間降水量。(e) CNTL06 と (f) NOUL06 における 24 時間降水量。単位は mm。

いた (図 C-12f)。

このように梅雨期の上層トラフの影響を評価する数値シミュレーションの手法を開発し、令和2年7月の事例における上層トラフの顕著な影響を調べた。

参考文献

- Araki, K., T. Kato, Y. Hirockawa, and W. Mashiko, 2021: Characteristics of atmospheric environments of quasi-stationary convective bands in Kyushu, Japan during the July 2020 heavy rainfall event. SOLA, 17, doi:10.2151/sola.2021-002.
- Davis, C. A., and K. A. Emanuel, 1991: Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis. Mon. Wea. Rev., 119, 1929-1953.
- Hirockawa, Y., T. Kato, K. Araki, and W. Mashiko, 2020b: Characteristics of extreme rainfall event in Kyushu district, southwestern Japan in early July 2020. SOLA, 16, 265-270.

2-2-2. テーマ2：全球スケール予測

(1) 成果概要

HPCI第二階層を利用して非静力学正二十面体格子大気モデルNICAM(水平14km)を用いた数10~100メンバー程度の1ヶ月アンサンブル実験を実施し、台風発生等のターゲット現象について、MJ0/BSIS0に代表される季節内変動の影響に関する統計情報を取得した。具体的には、房総半島に甚大な被害をもたらした2019年の台風15号 Faxai (9月5日発生) について、NICAM(水平解像度14 km)にNICAM-LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA)の内挿により得られた100通りの初期値を与えた再現実験を実施した。その結果、発生5日前の8月31日を初期日としてもアンサンブルメンバーの約6割においてFaxai類似の台風の発生が確認された。台風発生時の夏季季節内振動(BSIS0)は対流活動活発域がベンガル湾東部に位置していると診断されるケースが多かった。

NICAM(水平14km)を用いた3ヶ月実験を複数のアンサンブル実験を実施し、海面水温の分布構造に対する大気の応答について調査した。具体的には、日本付近の黒潮の安定期・中立的期・不安定期を含む2009-2011冬季について、各年11月20日-11月30日まで1日ずつずらした初期値を用いたアンサンブル実験を実施して、大気のス tormトラック活動度の指標を比較した。その結果、NICAMでは黒潮の状態と整合的にス tormトラックの活動度が変調していることが明らかになった。また、海洋の水平解像度0.25度および0.1度に設定した高解像度大気海洋結合システム(NICOCO)による1ヶ月実験を比較した結果、黒潮をはじめとする西岸境界流の表現が0.1度にすることで大きく改善することが明らかになった。

これらの解析の結果を踏まえて、翌年以降の「富岳」を用いた実験に向けた実験設定・事例選定の準備を行った。具体的には、台風の1000メンバーアンサンブル実験においては8月末を中心として初期日を前後に5日程度ずらし、それぞれについてNEXRAから内挿した100メンバー実験を行うことに決定した。また、日本域の高低気圧の大気海洋相互作用を対象とする研究においては水平0.1度を利用するメリットが大きいと結論づけた。

加えて富岳の試行的利用が可能となったため、富岳上へのシステム構築を行い、翌年度に予定していた台風1000メンバー大アンサンブル実験を前倒しで実施した。その結果、Faxai発生3日前~9日前においてほぼ同等の6割近いメンバーでFaxai類似台風を再現することができることが判明した。また、冬季マッデン・ジュリアン振動(MJ0)についての大アンサンブル実験も、600メンバーで前倒し実施した。その結果MJ0の振る舞いはアンサンブルメンバー間でも大きく異なり得ること、その差異が熱帯西太平洋域の水蒸気と関連していると思われることなどが明らかになった。

(2) 実施体制

テーマ2では図D-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。

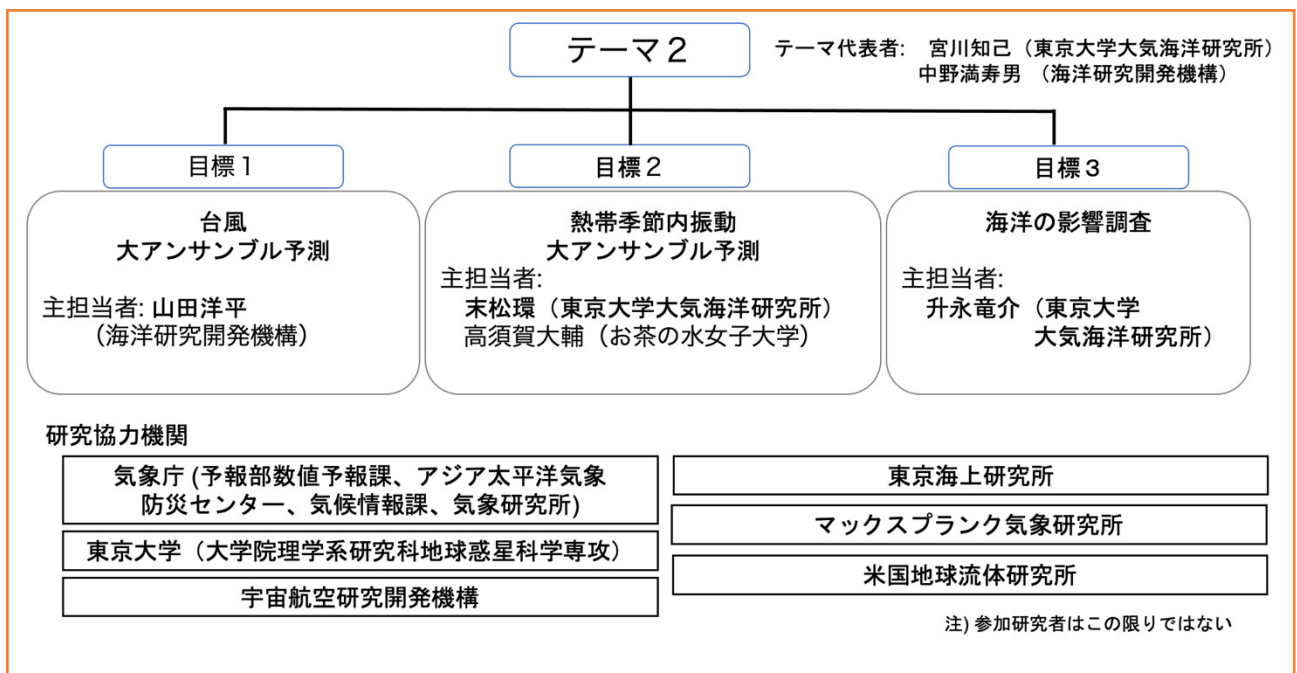


図 D-1: テーマ2 体制図

(3) 成果内容

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)

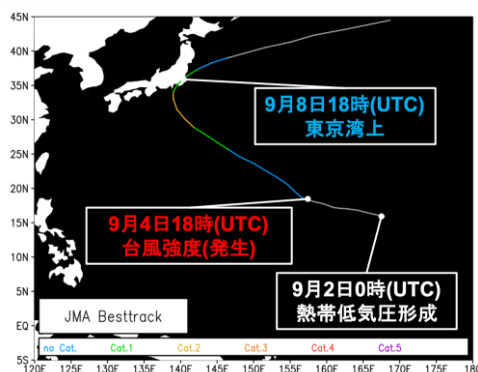
台風 (本稿では海盆による熱帯低気圧の呼び名は区別せず台風と表記する) は豪雨や暴風をとめない自然災害の要因となりうる極端気象現象である。日本は、地球上で最も多くの台風が発生する海盆である北西太平洋に位置している (Gray 1968)。このため、日本は毎年のように台風が接近または上陸し、豪雨や暴風による甚大な被害を受けている。

例えば、2019年9月に南鳥島の南海上で発生した台風15号Faxai (ファクサイ) は台風の勢力を維持したまま三浦半島を通過し、千葉市に上陸した (JMA 2020)。伊豆諸島や関東地方南部を中心に暴風や大雨が発生し、千葉県を中心に19地点で最大風速観測史上一位の記録が更新された (気象庁 2020)。千葉県ではこの暴風の影響で大規模な停電が発生した。長いリードタイムをもった信頼できる情報は災害に対して避難等の対策を講じる時間を与え、災害による被害軽減に資すると期待される。

近年の数値モデルの精度向上、アンサンブル平均手法やコンセンサス手法の導入により台風の進路予測の精度は向上傾向にある (Weber 2005; Yamaguchi et al. 2015; 気象庁 2018)。しかし、多くのアンサンブル実験では計算機資源の制約からモデルの水平解像度は粗い傾向にある。解像度の粗いモデルでは台風の構造を十分に表現することができない。これは降水や風の再現性に制約を与える可能性がある (気象庁 2018)。

Nakano et al. (2015) は全球14km高解像度格子の非静力学モデルNICAM (Satoh et al. 2014) を用いて2週間先までの台風の発生を予測する可能性を示した。本研究では、従来の粗い解像度のモデルによるアンサンブル実験では表現が困難であった降水や風といった災害に直結する情報の確率予測システムの構築を目標として、全球14kmの高解像度NICAMを用いて大メンバーのアンサンブル実験を行う。顕

著な災害をもたらしたことにより、気象庁によって「令和元年房総半島台風」と名称を定められた2019年台風15号Faxaiを実験対象とした。図D-2にFaxaiの経路を示す。



図D-2: 令和元年房総半島台風(台風15号Faxaiの経路)。気象庁ベストトラックより作成。

シミュレーションにおける台風の挙動は計算開始時刻により変動することが知られている(例えば Taniguchi et al. 2010)。計算開始時刻の感度を調べるために、HPCI 第二階層資源であるの東北大学 SX-ACE を利用して、計算開始時刻を2019年8月13日0時UTCから9月7日0時UTCまでの6時間ごとに変えたアンサンブル予備実験を実施した。シミュレーションで発生した台風は、台風の力学的な構造を考慮した Nakano et al. (2015) の台風抽出アルゴリズムを用いて抽出した。一月間のシミュレーションの中では複数の台風が発生する。Nakano et al. (2015) では現実に観測された台風の発生位置と時刻に基づきシミュレートされた台風の中から該当する台風の発生を判定している。ここでは Nakano et al. (2015) の手法に倣い現実に観測された Faxai の発生位置 A(東経 156.7 度、北緯 18.6 度)から半径 10 度以内を発生時刻(2019年9月4日18UTC)の前後5日に通過した台風を抽出した(条件1)。実際の台風による被害規模は台風の経路に影響を受けるため、ここでは抽出された台風が関東地方に接近したか否かを抽出条件に追加した。具体的には、現実の Faxai が2019年9月8日18時UTCに東京湾上の地点 B(東経 139.7 度、北緯 35.3 度)を通過したことから、地点 B への接近時刻を基準として、接近時刻の前後5日以内に地点 B から半径 10 度以内を通過することを抽出条件とした(条件2)。二つの条件を満たした台風を Faxai 類似台風と定義する。条件を満たした Faxai 類似台風は全体で 58 事例検出された。

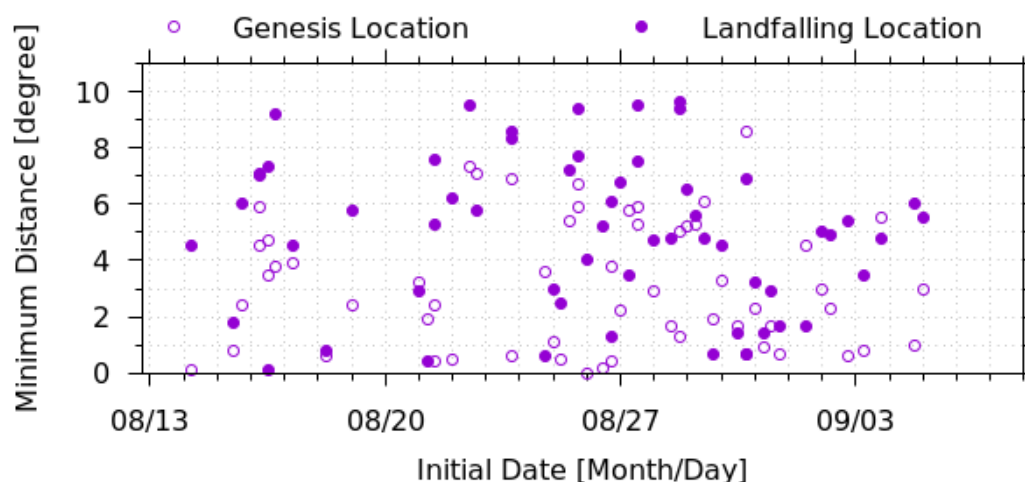


図 D-3: 計算開始時刻と Faxai 類似台風の発生位置(○)と接近位置(●)のずれ。横軸は計算開始時刻を示す。

図 D-3 には計算開始時刻ごとの Faxai 類似台風の発生位置(地点 A)と接近位置(地点 B)とのずれを示す。計算開始時刻と地点 A、B のずれには系統的な変化はみられないものの、8月25日から9月4日を計算開始時刻としたアンサンブル実験で、Faxai 類似台風が発生したメンバーの増加が確認できる。また、8月31日から9月1日を初期値としたメンバーでは発生・接近位置のずれが小さい傾向がある。この要因については、今後より詳しく調べることの重要性が示された。

本予備実験から Faxai を対象とした 1000 メンバーアンサンブル実験の実施は 8月25日以降が妥当であると考えられる。そこで現実の Faxai の発生時刻を考慮して、8月26日18時 UTC から、9月4日18時 UTC までを1日ずつずらして、各計算開始時刻に対して NICAM-LETKF JAXA Research Analysis system (NEXRA; Kotsuki et al. 2019) から内装した初期値を用いた 100 メンバー、合計 1000 メンバーの大アンサンブル実験を富岳を用いて実施した。Faxai 類似台風は予備実験と同じ方法で抽出した。

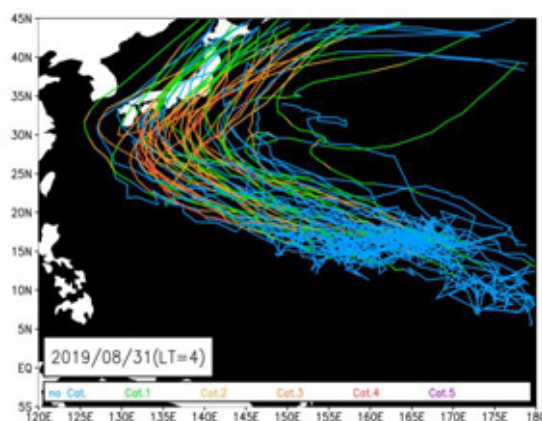


図 D-4: 2019 年 8 月 31 日 18 時 UTC を計算開始時刻とした時の 100 メンバーアンサンブル実験の中で発生した Faxai 類似台風の経路。

1000 メンバーアンサンブル実験のうち、2019 年 8 月 31 日 18 時 UTC を計算開始時刻とした時の 100 メンバーの結果を図 D-4 に示す。2019 年 8 月 31 日 18 時 UTC を計算開始時刻とした 100 メンバーのうち 63

メンバーで Faxai 類似台風が発生していた。経路に注目すると、計算開始時刻が同じであったとしても、経路には大きな変動があることがわかる。例えば、およそ 8 日後の接近時刻には Faxai 類似台風の位置は現実に近く関東地方を通過しているものや、西に外れて日本海や東に外れて本州東沖の太平洋上に存在するメンバーが確認できる。

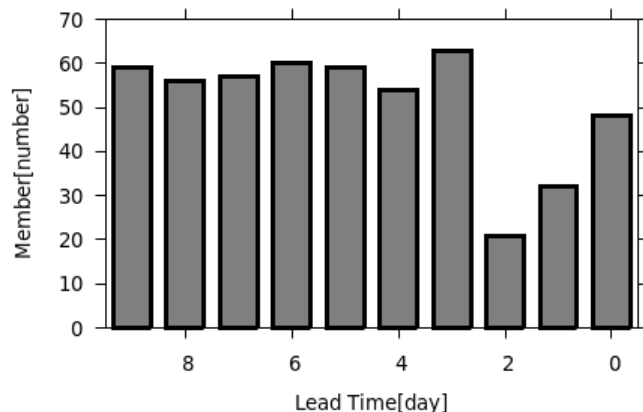


図 D-5: リードタイム毎の Faxai 類似台風発生確率。横軸はリードタイム、縦軸はリードタイム毎の 100 メンバーの内の Faxai 類似台風が発生したメンバー数(確率)を示す。

図 D-5 にリードタイムと Faxai 類似台風の発生確率を示す。リードタイム 9 日から 3 日までのアンサンブル実験ではおよそ 60%の確率で Faxai 類似台風が発生している一方で、リードタイム 2 日のアンサンブル実験では Faxai 類似台風の発生確率は 20%と低下していた。リードタイムが短い時の発生確率の低下は台風の構造や強度の発達が遅れ、台風抽出アルゴリズムによって検出できなかったことが考えられる。富岳を用いることによって、Nakano et al. (2015)では議論するのが困難であった発生確率を議論することができた。

夏季季節内変動(BSIS0; Kikuchi 2021)は台風の活動度を変調することが知られている(Nakazawa 2004; Satoh et al. 2012; Yoshida et al. 2014; Nakano et al. 2015)。アンサンブル実験の夏季季節内振動を調査したところ、対流活動活発域がベンガル湾東部に停滞するケースが多いことが確認された。そこで雲物理過程の設定を調節し、その感度を確認した。

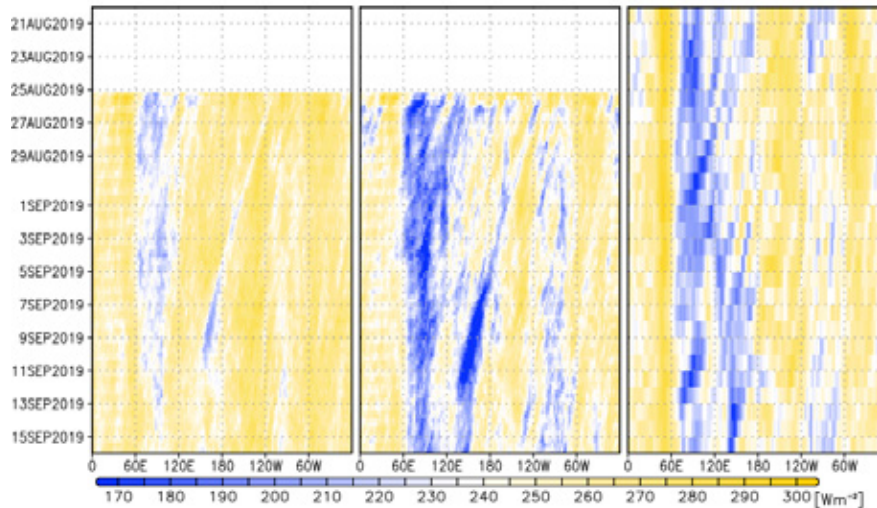


図 D-6: 外向き長波放射のホフメラー図。左図はデフォルト、中央図は改善後、右図は CERES (衛星プロダクト) を示す。

感度実験の一事例を図 D-6 に示す。左図のデフォルト設定では東経 60 度から 90 度付近のベンガル湾に対流活動活発域が停滞しているが、改善後(図 D-6 中央)は東経 120 度以東にも対流活動活発域が存在し、衛星観測と似た分布を示していることがわかる。BSISO と台風の発生や経路といった活動度との関係を確率的に調査することの重要性が確認された。

参考文献

- Gray, W. M., 1968: Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Monthly Weather Review*, 96, 669-700.
- Japan Meteorological Agency (JMA), 2020: Annual report on the activities of the RSMC Tokyo - Typhoon Center 2019. (11 Mar. 2021), <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/AnnualReport/2019/Text/Text2019.pdf>.
- Kikuchi K., 2021: The boreal summer intraseasonal oscillation (BSISO): A review. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, accepted.
- 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*, 15A, 1-7.
- Nakano, M., et al., 2015: Intraseasonal variability and tropical cyclogenesis in the western North Pacific simulated by a global nonhydrostatic atmospheric model, *Geophysical Research Letters*, 42, 565-571.
- Nakazawa, T., 2006: Madden-Julian oscillation activity and typhoon landfall on Japan 2004. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 2, 136-139.
- Satoh, M., et al., 2012: The Intra-Seasonal Oscillation and its control of tropical cyclones simulated by high-resolution global atmospheric models, *Climate Dynamics*, 39, 2185-2206.

- Satoh, M., et al., 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18.
- Taniguchi, H., W. Yanase, and M. Satoh 2010: Ensemble simulation of cyclone Nargis by a global cloud-system-resolving model-Modulation of cyclogenesis by the Madden-Julian oscillation, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 88, 571-591.
- Weber, H. C., 2005: Probabilistic prediction of tropical cyclones. Part I: Position. *Monthly Weather Review*, 133, 1840-1852.
- Yamaguchi, M., et al., 2015: Global distribution of the skill of tropical cyclone activity forecasts on short- to medium-range time scales. *Weather and Forecasting*, 30, 1695-1709.
- Yoshida, R., Y. Kajikawa and H. Ishikawa, 2014: Impact of Boreal Summer Intraseasonal Oscillation on Environment of Tropical Cyclone Genesis over the Western North Pacific. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 10, 15-18.
- 気象庁, 2018: 量的予報技術資料(予報技術研修テキスト)第24巻。(2021年4月26日), <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/yohkens/24/all.pdf>
- 気象庁, 2020: 災害時自然現象報告書 2020年第2号。(2021年3月11日), https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_202002.pdf

② マッデン・ジュリアン振動の再現性向上と全球雲解像モデル比較プロジェクトへの参加(目標2)
(東京大学大気海洋研究所)

世界各国の全球雲解像モデルモデルを相互比較する国際プロジェクト DYAMOND (Dynamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains; Stevens et al. 2019) が 2017 年に提案され 2018 年から段階的に進められている。プロジェクトの目的は、全球高解像度モデルの比較を通じ、storm-resolving スケール(1 km~5 km)のシミュレーションの様々な利点について理解を深めること、また次世代の数値モデル比較プロジェクトの礎を作ることとしており、アジア、ヨーロッパ、北米を拠点とする数多くの大気モデルグループが参加している。2020 年はその第2フェーズに入り北半球冬季をターゲットに各国の参加するモデルは 2020 年1月20日からの40日 hindcast 実験を実施し、同一のプロトコルにおいて結果を出力することを求められていた。NICAM は北半球夏季をターゲットとしていた DYAMOND 第1フェーズに続き、DYAMOND2 プロジェクトにも参加している。

NICAM の様な雲解像モデルは、積雲パラメタリゼーションを用いて雲の統計的な振る舞いを推定する気候モデルと比べ、高い解像度で大気中の水物質の変換を陽に計算することでより実態に近い形で雲をモデル内で表現可能にしている。しかし、長期積分の放射バランスと短い積分での雲の振る舞いの両方を現在の雲微物理過程の立式で現実的に表すのは難しく、雲微物理過程についての不確実性は未だ大きい。実際に、NICAM の季節スケール以上の長期積分での標準設定となっている highresMIP 実験(Kodama et al. 2019)で採用された雲微物理設定では、マッデン・ジュリアン振動(MJO)の様な対流システムの表現に課題が残っていた。

そこで、DYAMOND2 参加にあたり、2018年12月のMJOの再現性について物理パラメータスイープ実験を水平解像度14km、鉛直38層の粗い解像度で100ケース強実施し、数週間~数ヶ月の短期のシミュレ

ーションで現実的な雲システムを再現するのに適した物理パラメータセットを特定した。そのパラメータセットを DYAMOND2 の設定として採用し、プロトコルに従った積分結果を DYAMOND2 プロジェクトへデータ提供をした。さらに、予備実験として highresMIP 実験の雲微物理パラメータ設定の実験も並行して実施し、2つのシミュレーションの比較を行った。これら2つの実験は ECMWF の再解析データを初期値と海面データに与え、水平解像度 3.5km、鉛直 78 層で富岳を用いて積分を行なった。

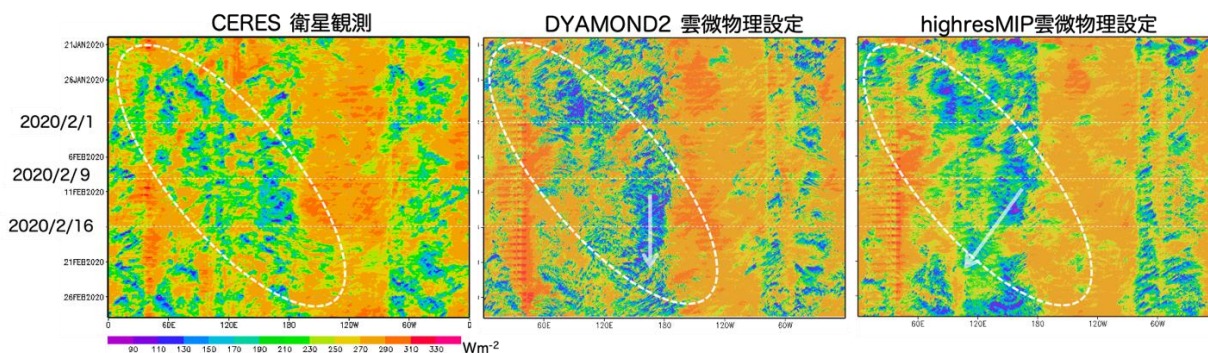


図 D-7: 赤道上的の外向き長波放射 ($W m^{-2}$) の時間-経度断面図。左から CERES の衛星観測、DYAMOND2 と highresMIP 設定の NICAM のシミュレーション結果を示す。白い楕円で囲まれた部分が東進する MJO に伴う対流活動のシグナル。二つの実験間での大域的な対流活動の位置の差異が現れ始める積分 20 日目に当たる 2020 年 2 月 9 日、とその前後の日付、2020 年 2 月 1 日と 2020 年 2 月 16 日を破線で示す。

DYAMOND2 設定と highresMIP 実験の積分結果の比較を行なったところ、積分 20 日目(2020 年 2 月 9 日)程度までは DYAMOND2 設定・HighresMIP 設定間で MJO の東進に大きな違いは見られなかったが、シミュレーション後半では DYAMOND2 設定では対流活動が西太平洋上に維持され現実の大気に近い振る舞いを示したのに対して、highresMIP 設定では対流活動がインド洋に遷移してしまうといった違いが現れていた(図 D-7)。さらに、二つの実験間での大域的な対流活動の位置の差異が現れ始める積分 20 日目に当たる 2020 年 2 月 9 日の前後の日付である 2020 年 2 月 1 日と 2020 年 2 月 16 日で対流活動の全球的な分布を外向き長波放射から比較した(図 D-8)。積分 12 日目の 2 月 1 日時点では DYAMOND2 設定も highresMIP 設定も現実とよく似た対流活動の分布を示しているが、積分 28 日目の 2 月 16 日になると highresMIP 設定実験は熱帯低気圧性の対流システムが発達するようになっており、対流活動の中心が現実に対して西側にずれる原因となっていた。今回の比較実験の結果、時間が経つにつれて雲微物理の設定によってシミュレーション内で異なる対流システムが系統的に選択されるようになることが示唆された。

今後は、雲微物理に依る対流システムの選択の分岐についてより詳細な解析を進め物理的な原因解明を進めることが求められる。また、今後は海洋モデルと結合した全球雲解像モデルの相互比較が活発化することが予想され、NICAM に海洋モデルを結合させた実験も実施していくことが課題となる。

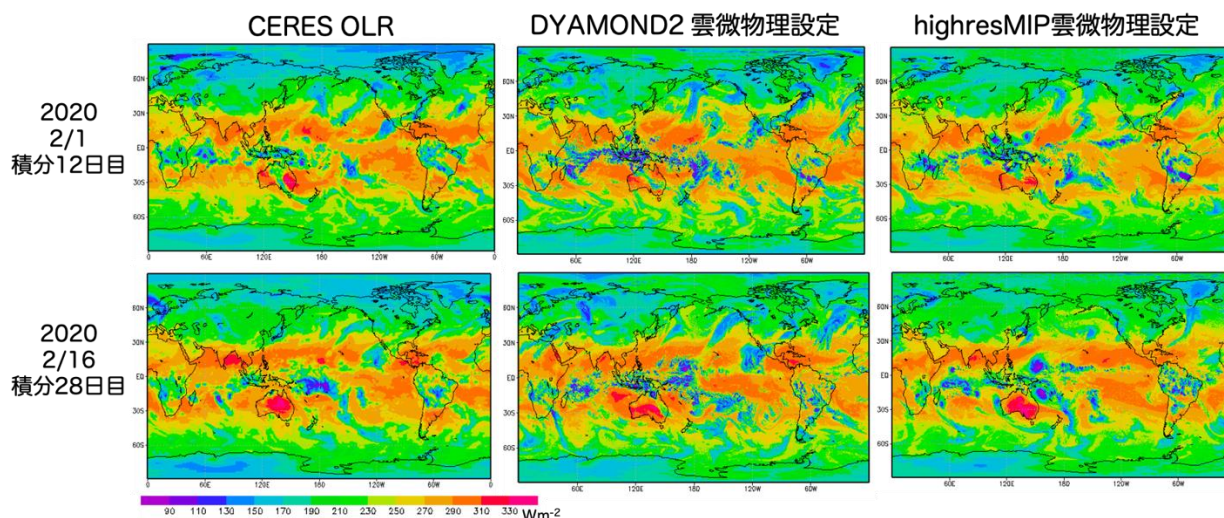


図 D-8: CERES の衛星観測 (左)、DYAMOND 2 実験 (中央)、highresMIP 設定実験 (右) 結果の外向き長波放射 (W m^{-2}) を 2 月 1 日 (積分 12 日目; 上段) と 2 月 16 日 (積分 28 日目; 下段) を示す。

参考文献

- Stevens, B., et al. DYAMOND: the DYNAMics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. *Prog Earth Planet Sci* 6, 61 (2019).
- Kodama, C., et al. The Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): experimental design, model description, and impacts of model updates. *Gosci. Model Dev.* 14, 795-820, (2021)

③ NICAM の高解像度化に向けた MJ0 物理アンサンブル季節実験 (目標 1・2)

(東京大学大気海洋研究所)

マッデン・ジュリアン振動 (Madden-Julian Oscillation; MJ0) はインド洋上で発生し 30 日から 60 日かけて西太平洋へと東進する活発な対流活動域に特徴付けられる、熱帯大気のもっとも顕著な季節内変動である。MJ0 は 0(10,000 km) の大きな空間スケールと 1 ヶ月を越える長い時間スケールを有することから、モデルによる MJ0 の再現は、数日程度の短い時間スケールから季節スケールまでの気象現象をシームレスに予測するための要とも考えられている。しかし、現在でも MJ0 の再現は多くのモデルが苦戦しているのが現状 (Jiang et al., 2015) であり、MJ0 再現の成功例 (e.g. Miura et al., 2007, Miyakawa et al., 2014) である NICAM においても解像度や各種物理過程のパラメータに MJ0 の再現性は大きく依存する。さらに、MJ0 の再現に最適化されたパラメータ設定は季節スケール以上の平均場の再現に適合するとは限らず、初期値応答問題としての MJ0 の再現ではなく自発的に MJ0 が発生する季節から年スケールの長期シミュレーションを今後行うためには MJ0 と背景場の再現を両立する物理過程のパラメータ設定を定めることが課題となる。実際に高解像度モデル比較プロジェクト (HighResMIP) 実験などの年スケールでのシミュレーションでこれまで用いられていた NICAM の実験設定では MJ0 の再現性に問題があり、今後の NICAM の高解像度化と季節予測の実施に向けた物理過程のパラメータ設定の改善

が求められている。そこで本研究では、水平解像度 14 km と 7 km それぞれで雲微物理パラメータを変える物理アンサンブル季節実験を実施し、MJ0 と平均場の再現性に対する水平解像度および雲微物理パラメータの依存性を調べることにした。

各物理アンサンブル実験の積分期間は複数の MJ0 イベントを含む 2018 年 11 月 1 日からの 90 日間とした（図 D-9）。物理アンサンブルとしては雲の組織化に感度のある氷晶の衝突併合成長率（autoconversion rate）の値を 3 通りに変えた。水平解像度 14 km と 7 km それぞれについて同一の実験設定で物理アンサンブル実験を実施した。ここではスピニアップを 5 日間として 2018 年 11 月 6 日から 45 日間の計算結果について報告する。また、ここでは 3 つの物理アンサンブルについて氷晶の衝突併合成長率を小さくとしたものから順にアンサンブル 1、2、3 と呼ぶこととする。

水平解像度 7 km 及び 14 km の計算結果を外向き長波放射（outgoing longwave radiation; OLR）の時間経度断面図（図 D-10 上段、図 D-11 上段）で比較すると、両者共に全ての物理アンサンブル実験において 11 月から 12 月にかけての MJ0 イベント（以後、MJ0-1 と呼ぶ）に伴った東進する対流活動がある程度再現されていた（図 D-10 上段、図 D-11 上段）。しかし、14 km メッシュの物理アンサンブル実験では、12 月から 1 月にかけての MJ0 イベント（MJ0-2）に伴う対流活動の組織化が弱い（アンサンブル 1）、もしくは対流活動が西太平洋上で発生し続けてしまい（アンサンブル 2、3）、再現性に問題がある。それに対して 7 km メッシュ実験では、MJ0-1 ほど明瞭ではないものの、MJ0-2 に対応する対流活動の東進が再現されていることが認められた。特に 7 km メッシュ実験のアンサンブル 1 では、MJ0-2 の発生にあたるインド洋上の対流活動の発生時期や MJ0 内の西進する対流システムについても再現されていた。

平均場の再現性を検証するため、それぞれの実験について OLR と降水の 45 日平均を比較した（図 D-10、図 D-11 中段、下段）。その結果、OLR の平均場の特徴として、水平解像度 7 km 実験では全アンサンブルにおいて海洋大陸から西太平洋上で OLR が低くなるバイアスがあること、インド洋上では氷晶の衝突併合成長率の増加と共に OLR が高くなる傾向を示すこと、が判明した。また、水平解像度 14 km 実験では水平解像度 7 km 実験と比べ OLR が全体的に高くなる傾向が見られたが、氷晶の衝突併合成長率に対する系統的な依存性は確認できなかった。降水分布に関しては、異なる水平解像度間および物理アンサンブル間において顕著な系統的差異は認められなかった。降水分布の観測データとの比較ではインド洋上で全体的に降水量が少ない傾向にあったが、太平洋上の降水分布と強度についてはある程度の再現性を示すことが判明した。

本研究の結果として、NICAM の高解像度化によって季節スケールの降水分布を再現しつつ 1 イベントを超えて MJ0 を再現できる可能性が示唆された。また、OLR に対する雲微物理パラメータの感度は水平解像度に依存する結果が得られたことから、高解像度化と共に系統的な雲微物理パラメータの変更の方法について今後より詳しく調べることの重要性が示された。

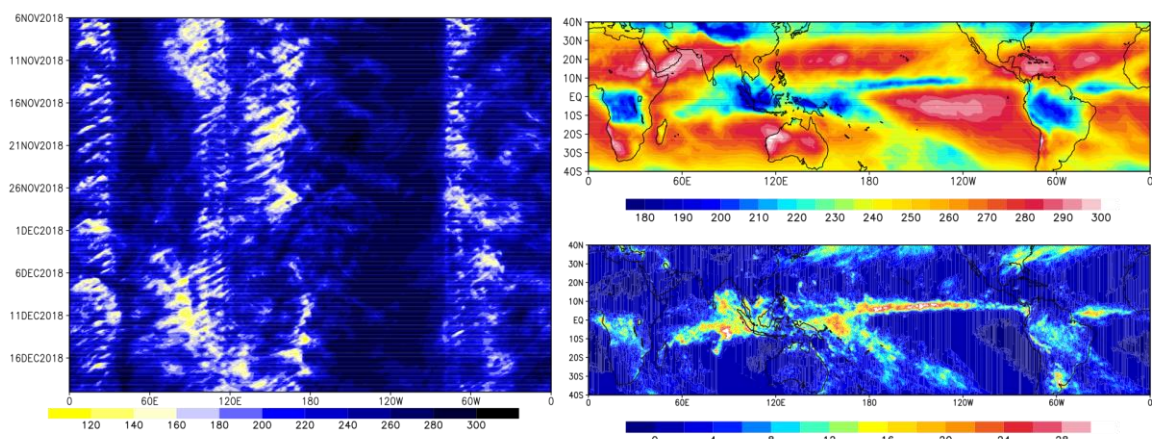


図 D-9 : 実験期間の OLR 及び降水分布。南北 5 度平均した NASA CERES OLR の時間経度断面図 (左; $W m^{-2}$) と 2018 年 11 月 6 日から 45 日平均した OLR の分布図 (右上; $W m^{-2}$) 及び GSMaP の降水分布図 (右下; mm/日)。

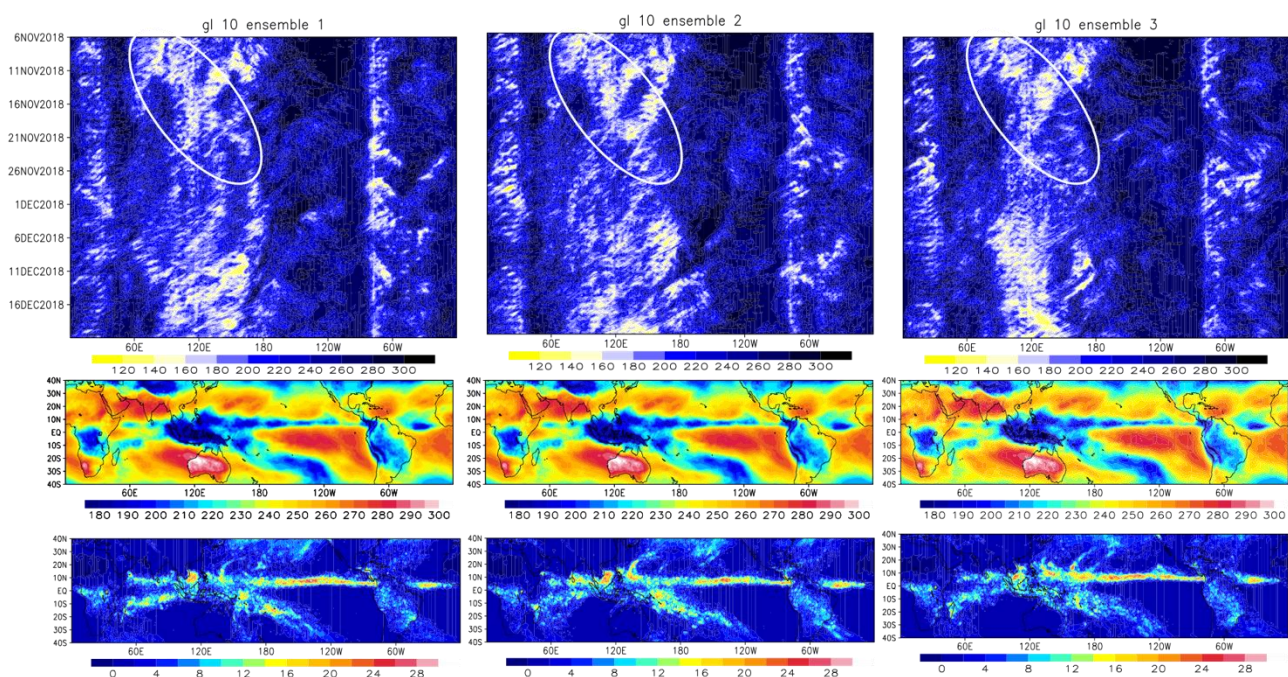


図 D-10 : 水平解像度 7 km 物理アンサンブル実験の結果。

左から右に氷晶の衝突併合成長率を増加させたアンサンブル 1~3 について、南北 5 度平均した OLR の時間経度断面図 (上段; $W m^{-2}$)、2018 年 11 月 6 日から 45 日平均した OLR の分布図 (中上; $W m^{-2}$) 及び降水分布図 (下段; mm/日)。

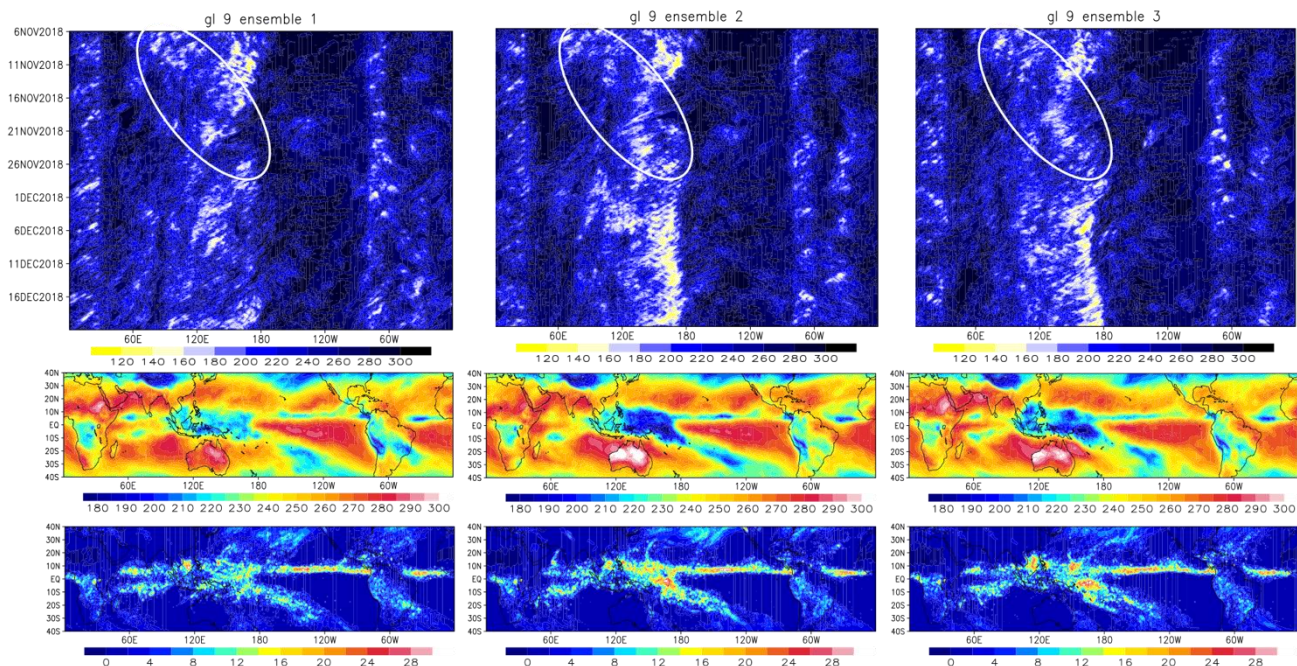


図 D-11： 図 D-10 と同様、但し水平解像度 14 km 物理アンサンブル実験の結果。

参考文献

- Jiang, X., et al., 2015: Vertical structure and physical processes of the Madden - Julian oscillation: Exploring key model physics in climate simulations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120.10, 4718-4748.
- Miura, H., et al., 2007: A Madden-Julian oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model. *Science*, 318.5857, 1763-1765.
- Miyakawa, T., et al., 2014: Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model demonstrated using a supercomputer, *Nature communications*, 5.1, 1-6.

④ 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 1・2)

(お茶の水女子大学)

台風や熱帯域で支配的な季節内擾乱であるマッデン・ジュリアン振動 (MJO) は、その特徴的な時空間スケールに起因して、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 つとなっている。熱帯低気圧の発生や中緯度域の異常気象・極端現象の予見につながるためにも、MJO の発生および伝播のタイミングを決定する物理機構を理解し、それらを適切に予測することが重要である。これまでの HPCI 戦略プログラムやポスト「京」プロジェクトにおける取り組みにより、全球非静力学モデル NICAM やその海洋結合版である NICOCO の 14km メッシュを用いたアンサンブル実験 (複数の MJO 事例を対象に全 54 メンバー) では、全体的な傾向として約 1 ヶ月先まで MJO の動向を精度よく予測できることが明らかとなっており (Miyakawa et al. 2014, 2017)、NICAM/NICOCO を用いた MJO 予測研究は世界トップクラスの性能で進められてきた。

一方で、NICAM/NICOCO は必ずしも全ての MJO 事例で上記のような予測スキルを持つわけではないこと

も報告されている。例えば、初期条件となる大気場の状況の違いにより、MJ0 の動向が予測可能な期間は 10 日から 1 ヶ月程度までばらつくこと (Kim et al. 2016) や、14km メッシュの NICAM において 1 ヶ月を大きく超えるリードタイムで MJ0 の発生・伝播が表現できる事例もあること (Miura et al. 2015) などが示されてきた。MJ0 の予測可能性のばらつきは、「各々の MJ0 の発生・伝播のタイミングが何によってどの程度揺らぎうるか」という問題と関連していると考えられ、MJ0 に伴って生じる種々の気象現象の予測の解釈にも大きく影響する。このため、MJ0 の振る舞いの揺らぎを定量的に把握するとともに、その背後に潜む物理的要因を理解しておくことが必要である。

そこで本年度は、大気内部変動としての MJ0 が持つと考えられる確率的プロセスの存在に着目して、単一の MJ0 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実験を実施し、メンバー間における MJ0 の伝播性質の比較検討を行った。対象事例として、2018 年 12 月上旬にインド洋で発生し、翌年 1 月上旬にかけて西太平洋までロバストに東進した MJ0 を選択した。2018 年 12 月 1 日から 6 日の各 00UTC において、NICAM-LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA, Kotsuki et al. 2019) により生成された 100 メンバーを初期値とした合計 600 メンバーの実験を完了させ、再現された MJ0 の伝播タイミングの差異を比較した。MJ0 の再現性評価および動向追跡には、Wheeler and Hendon (2004) で定義された MJ0 位相空間上の情報を利用した。

各メンバーに対して得られる MJ0 の位相・振幅の時間発展を追跡することにより、9 割以上のメンバー (563 メンバー) が西太平洋まで MJ0 に伴う循環が到達する様子を再現していることを確認した。その上で、MJ0 が西太平洋に到達するタイミングの表現に解分岐が生じるという知見が初めて得られた。図 D-12 は上記 563 メンバーを MJ0 が西太平洋 (MJ0 位相空間上で Phase 7) に到達した日付ごとに分別した頻度分布であるが、到達タイミングが明瞭に 3 つに分岐していることがわかる。観測された MJ0 は 2019 年 1 月 1 日～5 日にかけて西太平洋に到達しており (図略)、この振る舞いと整合的なメンバーが多数存在する (Hit; 238 メンバー) 一方で、12 月 20 日前後には到達してしまう伝播の速い解 (Early; 177 メンバー) と、1 月 10 日前後にまで到達がずれ込む伝播の遅い解 (Late; 71 メンバー) も十分なメンバー数で実現している。

図 D-13 は Early / Hit / Late の各集団のコンポジットによって得られた赤道域における対流・下層東西風・可降水量の時間経度断面図である。3 つの集団間で、下層の西風偏差が西太平洋 (150° E- 180°) で強化されるタイミングが明確に異なっていることが改めて確認され (図 2a-c)、それはインドネシア海洋大陸上 (120° - 150° E) での対流組織化に伴う西風域の形成時期のずれに起因していることがわかる。このずれを可降水量の変動との関連で見ると、12 月下旬以降に西太平洋が湿潤化可能であったかどうか (Early vs. Hit/Late)、また湿潤化可能な状況下であってもいつ湿潤化が進むか (Hit vs. Late) に大きく依存していることが明らかとなった (図 D-13d-f)。

同一の MJ0 事例に対するアンサンブル実験において MJ0 の伝播タイミングに解分岐が生じるという事実は、MJ0 の東進を駆動する性質、とりわけ西太平洋での湿潤化の進展を調節するプロセスが必ずしも決定論的に記述できるものではないことを示している。MJ0 の西太平洋への到達タイミングに見られた分岐解同士の代表的な差が数日から 10 日程度であることを鑑みると、MJ0 よりも遥かに短周期で確率的な総観規模擾乱の寄与が、MJ0 の東進とその予測にとって無視できない影響を及ぼしている可能性が考えられる。今後、このような作業仮説のもとに解分岐が生じた物理的要因について精査するとともに、他の MJ0 事例に対しても同様のアンサンブル実験を実施することで、MJ0 の伝播タイミングにおける

解分岐が MJ0 の背景場の違いに応じてどの程度変容するかについても調査することの重要性が示された。

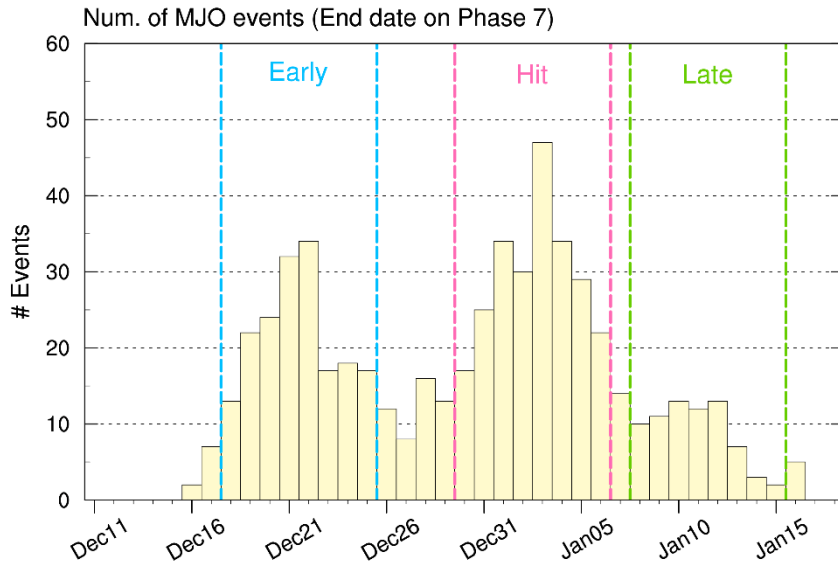


図 D-12: 西太平洋 (Phase 7) への MJ0 の到達が確認された 563 メンバーに対して Phase 7 への到達日別にメンバーを分別した頻度分布。観測された MJ0 の Phase 7 の到達日との比較から、青・ピンク・緑の破線で区切られた領域内にあるメンバーをそれぞれ “Early”, “Hit”, “Late” と分類した。

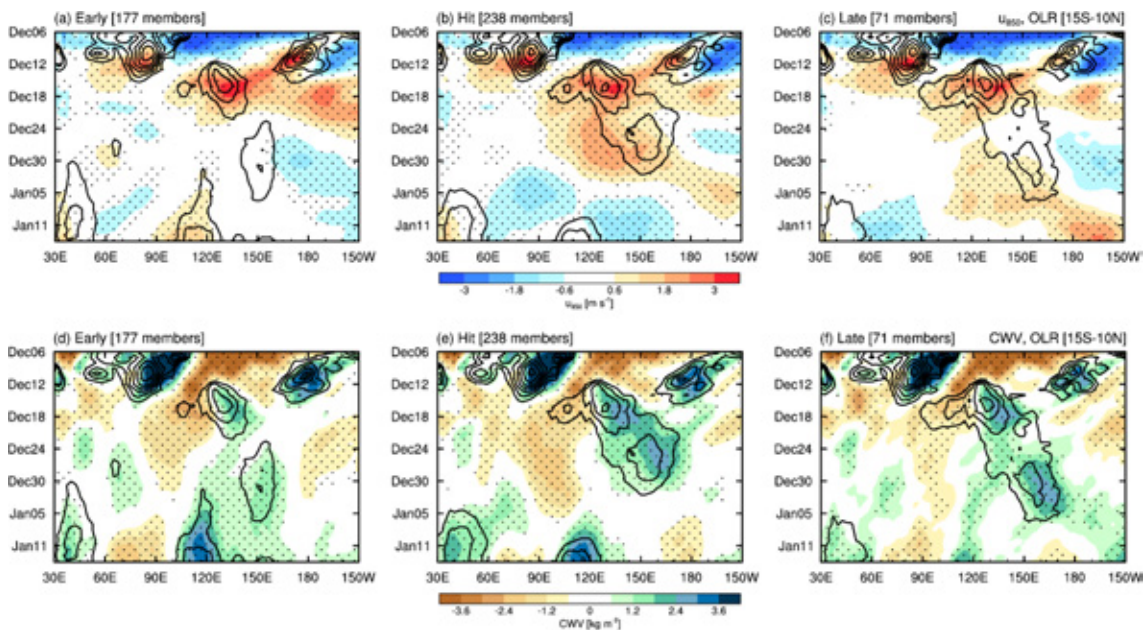


図 D-13: Phase 7 への到達日に基づいて (a, d) “Early”, (b, e) “Hit”, (c, f) “Late” に分類したメンバーにおける $15^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}$ 平均の (a-c) 850hPa 東西風 (シェード) と OLR 偏差 (等値線) および (d-f) 可降水量 (シェード) と OLR 偏差 (等値線) の時間経度断面のコンポジット図。OLR 偏差は負の領域のみ表示しており、点描部分はシェードで示された物理量に対して 99% 有意なシグナルを表す。

参考文献

- 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.
- Miyakawa, T. et al. (2014). Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model demonstrated using a supercomputer. *Nature communications*, 5(1), 1-6.
- 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.
- Miura, H., Suematsu, T., & 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.
- Wheeler, M. C., & Hendon, H. H. (2004). An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly weather review*, 132(8), 1917-1932.

⑤ SSTに対する大気応答特性の調査 (目標 3)

(東京大学大気海洋研究所)

黒潮の変動に伴う海面水温変動は、北太平洋におけるストームトラック活動(移動性高低気圧の活動)へ有意な影響をもたらすことが知られている(Qiu et al. 2014; Révelard et al. 2016)。熱帯域の海面水温変動も南北両半球のストームトラック活動へ有意な遠隔影響を及ぼす(Solman and Menéndez 2002)。また、黒潮やメキシコ湾流等の西岸境界流に沿って海上風の収束が形成されることが、高解像度の衛星観測や大気再解析から見出されている(図 D-14a 北米北部東岸海域)。これは、海面水温の微細構造に対する大気応答として知られている(Small et al. 2008)。本課題では、全球雲解像度大気モデル NICAM を用いて中緯度及び熱帯の海面水温のメソスケール構造に対する大気応答について調査を行った。中高緯度大気は日々の変動が大きいため、海面水温変動に対する大気応答を数値モデルで抽出するためには多くのアンサンブルが必要となる(Kushnir et al. 2002)。本課題は、豊富な計算機資源を利用し、雲を解像するほどの高解像度の全球大気モデルでこの問題に取り組む初めての試みである。

これまでに、黒潮続流の流路変動に対する大気応答の調査を行った。黒潮続流はその流路が十年規模で変動していることが指摘されている(Qiu et al. 2014)。2009 年は不安定流路期であり、黒潮続流は北に蛇行する流路をとることで三陸沖から東西へ延びる暖水偏差を形成した。(図 D-15a 赤丸)。一方、安定期である 2012 年には南寄りの流路をとり、三陸沖には冷水偏差が生じていた(図 D-15c 赤丸)。このような水温変動へ対する大気応答を調査するために、それぞれの年の冬季について水平解像度 14km の

NICAMによる3ヶ月実験のアンサンブルを実施した。アンサンブルは各年11月20日 - 11月30日まで1日ずつずらした初期値を用い、10メンバー作成した。

黒潮続流の変動に対する応答として、不安定期にはストームトラックが南へ寄り（図D-15b）、安定期には逆に北へ寄るとともに下流方向へやや伸長するという結果を得た（図D-15d）。これは、先行研究で指摘されている応答と整合的な結果であり、水温偏差に伴う対流活動の変調と、大気下層の傾圧性の変動に対する応答として解釈されている（Qiu et al. 2014）。さらに、エルニーニョ・ラニーニャ現象に対応する東部熱帯太平洋の水温変動に対しても、先行研究で得られた知見と整合的なストームトラック応答をNICAMは捉えることができることが確認された。このような大気応答に対しては対流活動が重要な役割を果たしていることが指摘されており、その応答プロセスをより明瞭に表現して詳細に解析を行うために、水平解像度とアンサンブル数をさらに向上させることの重要性が確認された。

さらに、西岸境界流に沿う海上風収束について、NICAMのアンサンブル実験を実地して調査を行った。数値モデルでこのような大気応答を適切に表現するためには、十分な水平解像度が必要であることが議論されてきたかが、鉛直解像度についてはまだ十分に調査されていない。そこで、本課題では、鉛直解像度の重要性についてNICAMを用いて調査を開始した。

これまでに、西岸境界流に伴う水温前線が比較的明瞭であった2009と2010年の冬季について、NICAMの10メンバーアンサンブルを、様々な鉛直層設定について、各年11月20日 - 11月30日まで1日ずつずらした初期値を用い、10メンバー作成した。従来から用いられてきた最下層面を約80mとするNICAMの設定では、大気再解析に比べて海上風収束の強度が過小評価されることが明らかとなった（図D-14b）。一方、最下層面を33m（図D-14c）や15m（図D-14d）のように徐々に海面に近づけることで収束強度が徐々に改善することが明らかとなった。この結果は、数値モデルを用いて海面水温や海水変動に対する大気の応答を定量的に調査するにあたり、十分な鉛直解像度が必要であることを示す知見である。

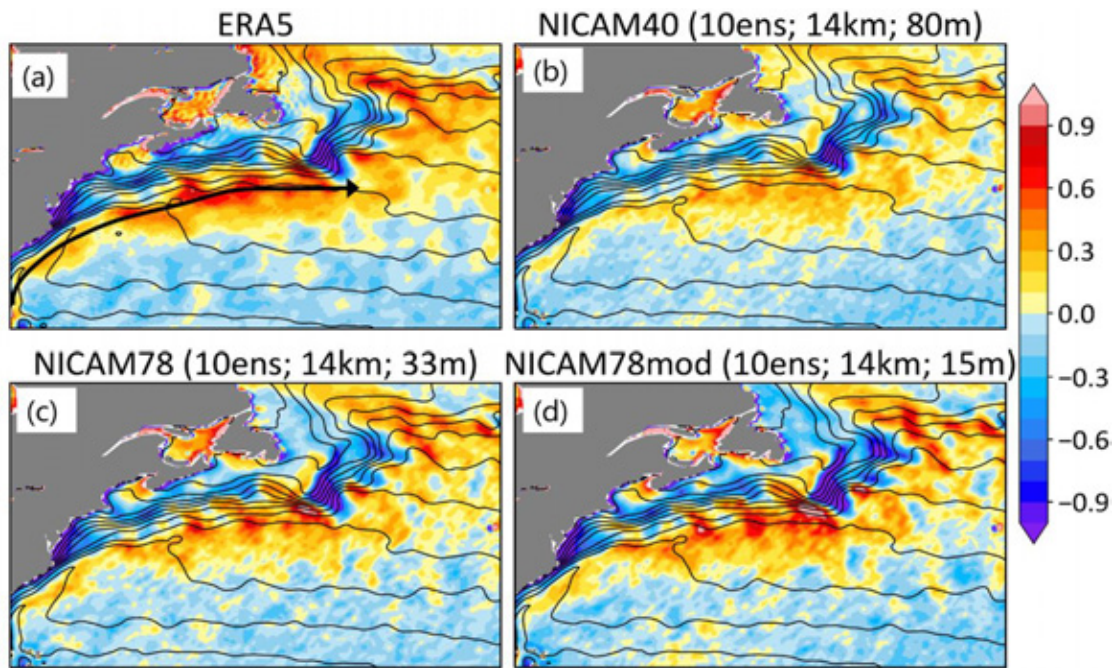


図 D-14 : (a)大気再解析 ERA5 に基づく、2009-10 年冬季（前年の 12 月から該当年の 2 月）の海面水温（等値線）と海上風収束（色）の分布。メキシコ湾流は概ね図中の黒矢印に沿って流れている。(b)は(a)と同様、ただし鉛直層数 40 層で最下層面を 80m とした設定の NICAM の 10 メンバーアンサンブル平均場。(c)は(b)と同じ、ただし、鉛直層数を 78 層に増やし、最下層面を 33m としている。(d)は(c)と同じ、ただし最下層面を 15m としている。

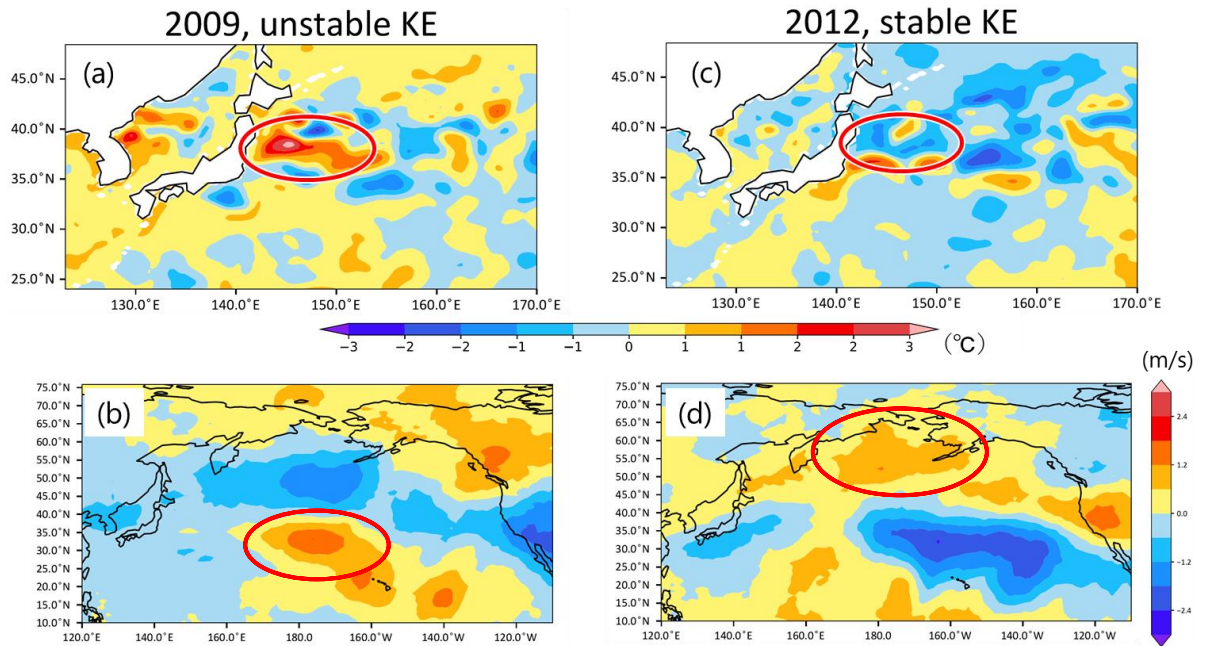


図 D-15 : (a)2009 年冬季 (2008 年 12 月 - 2009 年 2 月) の海面水温偏差と (b)その海面水温分布で駆動された NICAM の 2009 年 1 月におけるストームトラック活動偏差。偏差はそれぞれ対応する場の 2008 年 - 2011 年平均場からの差として定義されており、ストームトラック活動は 200hPa 面における 2-8 日のバンドパスフィルターを施した南北風の標準偏差として定義されている。(c)と (d) はそれぞれ(a)と (b)と同様。ただし、2012 年冬季の分布。

参考文献

- Kushner, Y., W. A. Robinson, I. Bladé, N. M. J. Hall, S. Peng, R. Sutton, 2002: Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation, *Journal of Climate*, 15, 2233 - 2256.
- Qiu, B., S. Chen, N. Schneider, 2014: A coupled decadal prediction of the dynamic state of the Kuroshio Extension system, *Journal of Climate*, 27, 1753 - 1764.
- Solman, S. A., C. G. Menéndez, 2002: ENSO-related variability of the Southern Hemisphere winter storm track over the eastern Pacific-Atlantic sector, *Journal of the atmospheric sciences*, 59, 2128 - 2140.
- Small, R. J., S. P. deSzoeko, S.P. Xie, L. O' Neill, H. Seo, Q. Song, P. Cornillon, M. Spall, S. Minobe, 2008: Air-sea interaction over ocean fronts and eddies, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 45, 274 - 319.
- Révelard, A., C. Frankignoul, N. Sennéchaël, 2016: Influence of the decadal variability of the Kuroshio Extension on the atmospheric circulation in the cold season. *Journal of Climate*, 29, 2123 - 2144.

⑥ 大気海洋結合モデル NICOCO の海洋高解像度化による影響調査（目標 3）

（東京大学大気海洋研究所）

大気個々の積乱雲や対流活動は、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といった 100 km 程度の水平スケールを持つ海面水温の構造が、大気の対流活動を通じて雲や降水の分布へ顕著な影響を与えていることが近年の衛星観測や数値モデルの高解像度化によって明らかになりつつある (Frenger et al. 2013)。このような近年の進展を踏まえ、本課題では大気モデル (NICAM) を雲解像度 (水平 14km 以下) とし、海洋モデル (COCO) を海洋渦解像度 (水平 0.1 度) として結合した高解像度大気海洋結合システム (NICOCO) を全球で駆動するという新たな試みに取り組んでいる。このような高解像度大気海洋結合モデルでアンサンブルを作成することで、これまで独立に議論されてきた大気の対流活動と海洋渦活動の相互作用が気候システムの形成に果たす役割を定量的に議論することができる。さらに、高解像度化によって大気場と海洋場がより現実的に再現されることが期待され、季節スケールの天気予報の改善に資する知見を得ることも目的としている。これまでに、大気モデルの解像度を 14km とし、海洋の水平解像度を 0.25 度および 0.1 度に設定した NICOCO による 1 ヶ月積算を実行することに成功し、その性能評価を開始した。

海洋の水平解像度を 0.25 度とした NICOCO について、2010 - 19 年の 3、6、9、12 月についてそれぞれ積分を実地し、その主に海面水温に着目してその基本性能について調査を行った。亜熱帯域における海面水温のバイアスは概ね 0.5 度未満と比較的小さいものの、熱帯域については 2 度程度の気候ドリフトを示すことがわかった。ドリフトは海洋大陸付近と沿岸域で比較的大きく、季節に依存しないことも確かめられた。また、中緯度域については黒潮やメキシコ湾流といった西岸境界流が極側へシフトするバイアスがみられ、それに伴い大きな暖水バイアスを生じることがわかった (図 D-16 右図)。これらは、多くの大気海洋結合モデルに共通の問題であることが知られている (Taguchi et al. 2012; Small et al. 2014)。

一方、海洋の解像度を 0.1 度とした NICOCO では、西岸境界流の流路とそれに伴う海面水温分布の表現が大きく改善することが明らかになった (図 D-16 左図)。また、大西洋域においては、メキシコ湾流の緯度が改善すると共に、アフリカ西岸沖に見られる暖水バイアスがやや軽減されることも確認された (図 D-17 青丸)。また、海洋内部について調査をすると、高解像度 NICOCO の方が、中部熱帯太平洋域における海洋混合層の厚さをより現実的に表現していることが確認された。これらの改善には海洋渦活動の表現が向上したことによる寄与が示唆されている (Delworth et al. 2012) が、詳細な物理プロセスについては明らかとなっていない。これらの解像度の違いが大気循環の表現にどのような影響をもたらすかについて、今後より詳しい調査を行うことの重要性が示された。

一方、海洋の解像度を上げるだけでは熱帯域に見られる気候ドリフトには十分な改善が見られないことも明らかになり、大気モデルの水平・鉛直解像度をさらに向上させることで気候ドリフトの軽減を試みる必要性が示された。また、フラックス調節の手法を適用してより現実的な海面水温分布を実現することで、台風や熱波の予報のような数週間から数カ月スケールの季節予報の改善に役立つ知見を得るアプローチが有効であることが示唆された。

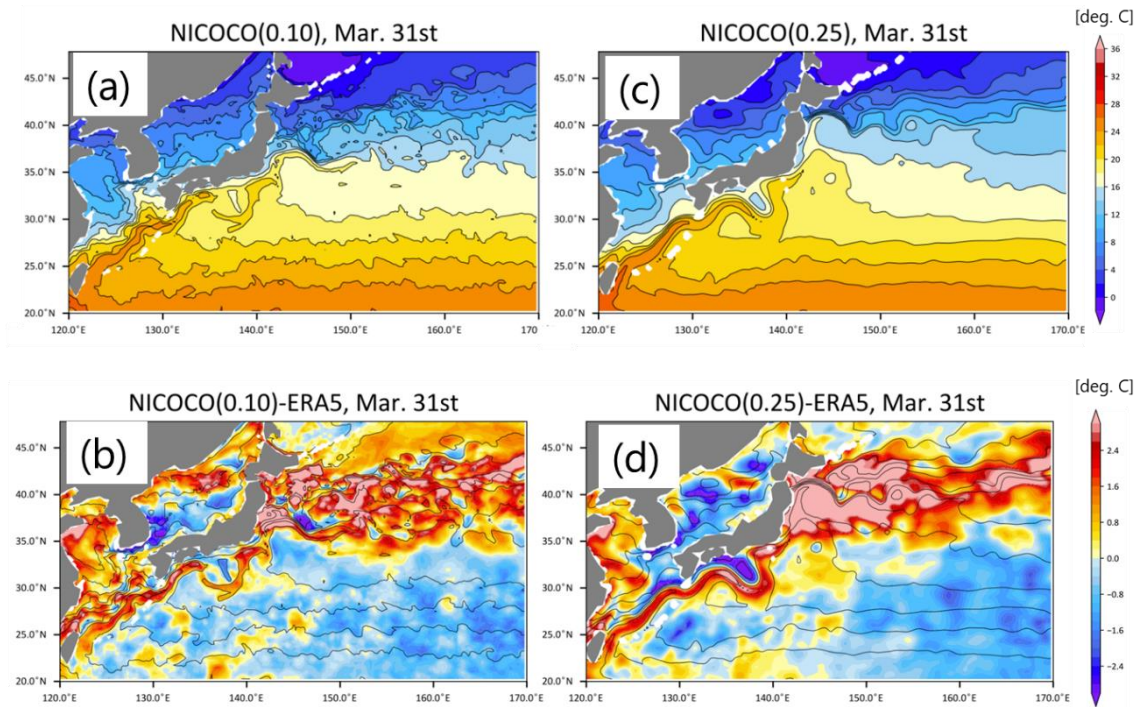


図 D-16 : (上図) 海洋を 0.1 度 (左図) と 0.25 度 (右図) とした NICOCO による 3 月 31 日の海面水温の 2010 - 12 年平均場。下図は上図と同様、ただし、色は観測値からの差。観測値には ERA5 の海面水温を用いている。

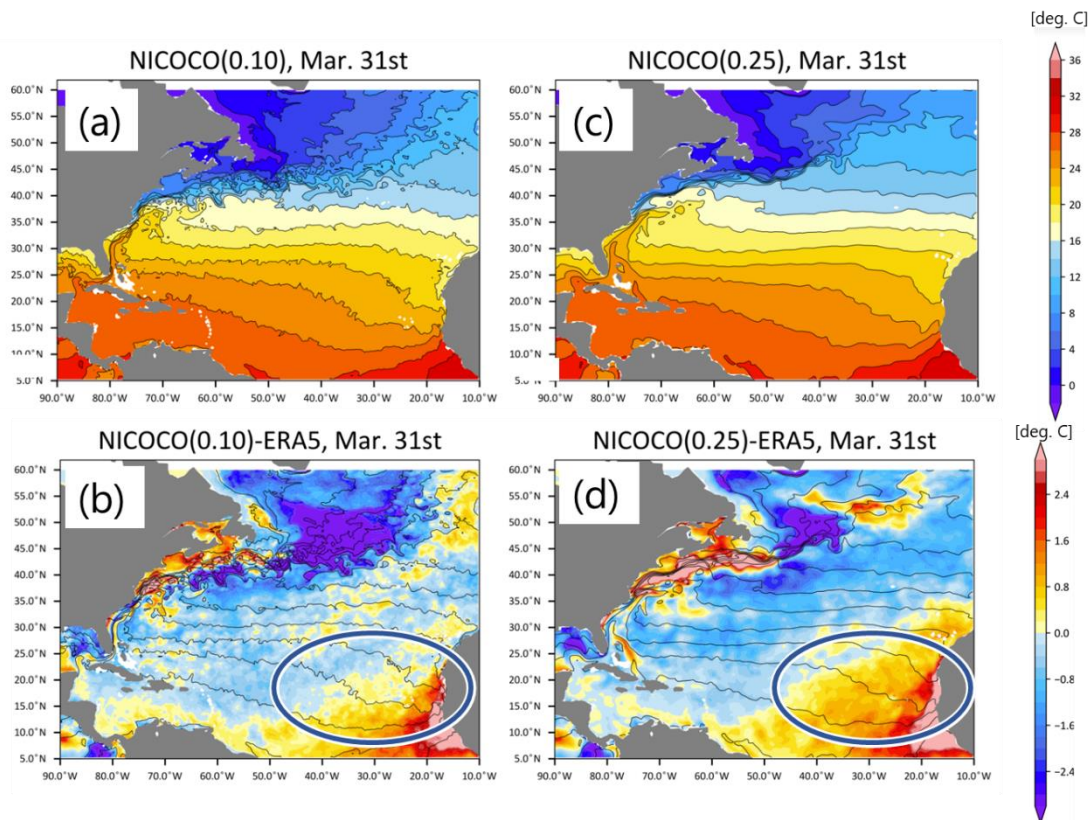


図 D-17 : 図 D-16 と同様。ただし、北大西洋域について示している。

参考文献

- Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, K. Takaya, A. Goto, 2012: Seasonal evolutions of atmospheric response to decadal SST anomalies in the North Pacific subarctic frontal zone: Observations and a coupled model simulation, *Journal of Climate*, 25, 111 - 139.
- Frenger, I., N. Gruber, R. Knutti, M. Münnich, 2013: Imprint of Southern Ocean eddies on winds, clouds and rainfall, *Nature Geoscience*, 6, 608 - 612.
- Delworth, T. L., and co-authors, 2012: Simulated climate and climate change in the GFDL CM2.5 high-resolution coupled climate model, *Journal of Climate*, 25, 2755 - 2781.
- Small, R and co-authors, 2014: A new synoptic scale resolving global climate simulation using the Community Earth System Model, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6, 1065 - 1094.

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

HPCI 第二階層を用いて、気象場と微量気体成分の両方をデータ同化する NICAM-LETKF アンサンブルデータ同化システムの開発を行い、次年度以降の富岳を用いた高解像度大規模計算に向けたパイロットスタディを実施した（詳細④）。衛星観測データにおいて温室効果ガス等が放射輝度に影響を及ぼす波長の観測値を同化に用いる技術について、開発と初期的な結果を確認した（詳細②）。また、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、気象場の同化方法や数 10 から 1000 メンバーまでのアンサンブル数の変化が再現性能に与える効果を調べた（詳細③）。

富岳実機の試験利用が可能であったため、グランドチャレンジ実験である 3.5km メッシュ 1000 メンバーアンサンブル同化実験を実施した。この実験では 2014 年から継続的に進められてきた「富岳」と気象・気候アプリケーションとのコデザイン開発の成果を反映し、「富岳」全計算ノードの 82%を使用してスーパーコンピュータ「京」で約 2 週間かかる計算を約 4 時間で計算可能であることを示した。世界最大規模の気象計算である本成果をまとめた論文は ACM ゴードン・ベル賞のファイナリストに選出された（詳細①）。

(2) 実施体制

テーマ3では以下の3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、令和2年度には2回の会合（8月・3月）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）
主担当者：八代尚（国立環境研究所）、副担当者：寺崎康児・河合佑太（理化学研究所）
- サブテーマB：大気微量成分と気象場の統合的なデータ同化（詳細②）（詳細③）
主担当者：寺崎康児（理化学研究所）、副担当者：八代尚（国立環境研究所）
- サブテーマC：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：田上雅浩・八代尚（国立環境研究所）

(3) 成果内容

① 3.5km メッシュ 1024 メンバー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）

「京」を始めとするペタフロップススケールのスパコンの登場により、これまでになく高い空間解像度での気象・気候シミュレーションが可能となり、解像度の向上によってもたらされるシミュレーション再現性の改善が示された(Miyamoto et al., 2013; Kodama et al., 2015)。また、全球大気の大アンサンブルデータ同化においても、これまでになく大アンサンブル数での実験が行われ、アンサンブル数を増加することによってより多くの観測データの情報をモデル格子点に作用させ

ることが可能になることが示された(Miyoshi et al., 2015)。これら「モデル空間解像度の向上」と「アンサンブル数の増加」は、近年爆発的に増加する地球観測ビックデータを余すことなく活用し、気象と大気環境の予測精度を向上するために必要であり、将来の気象予報システムが向かうべき方向であると考えられる。海外に目を向けても、全球 1km メッシュ解像度での気象予報や気候変動予測を目指す取り組みが近年強化されている(Stevens et al., 2019; Müller et al., 2019)。

高解像度・大アンサンブルの気象・気候シミュレーションを支えるのは、スーパーコンピュータの性能向上である。一方で、シミュレーションモデルやデータ同化システムのソフトウェア的改善のスピードは計算機ハードウェアの変革のスピードに対して遅い。気象予報機関が実際の日々の気象予測に用いているアプリケーションソフトウェアは多数のコンポーネントで複雑に構成されており、その全体を最新の計算機アーキテクチャに追従するよう変更することは容易ではない。アーキテクチャ対応だけでなく計算の大規模化(スケールアップ)に対しても、そのままでは実現できないようなソフトウェアの構造的問題を抱えていることがしばしばある。理化学研究所の主導の元開発が進められたスーパーコンピュータ「富岳」は、当初から単純なベンチマークプログラムの性能だけではなく、実アプリケーションでの性能を「京」から劇的に向上させることを目標に開発が行われた。本研究では、気象予報業務に直結する複雑度をもったデータ同化シミュレーションを題材として、「富岳」のもつ先進的な機能を十分に活用し、計算大規模化の実現に必要な技術的課題を洗い出し、その知見を将来の気象予報に還元することを目的として、「富岳」の大部分を用いたグラウンドチャレンジ実験を実施した。

本実験には全球非静力大気モデル NICAM (Satoh et al., 2014) と、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ LETKF (Hunt et al., 2007) によって構成される NICAM-LETKF データ同化システム (Terasaki et al., 2015) を用いた。モデルの水平解像度は最高で 3.5km メッシュ、鉛直層はモデルトップを 40km とし下層ほど間隔を狭くとした 94 層を用いた。アンサンブルサイズは最大で 1024 メンバーであり、6 時間の同化ウィンドウでのデータ同化サイクル 1 回をベンチマーク対象とした。データ同化サイクルには、9 時間の予報積分(シミュレーションパート)と、モデル予報値の観測空間への変換および LETKF の適用(データ同化パート)の両方が含まれる。図 E-1 に、3.5km メッシュ、1024 メンバーでの計算とデータのフローを示す。NICAM 1 メンバーの計算には 2,048 プロセス(512 ノード)を用い、プロセスあたり 0.2GiB の境界値データ(メンバー間で共通)と 0.15GiB の初期値データを高速ストレージから読み込み、プロセスあたり 0.7GiB のリスタートデータ(データ同化に受け渡す変数、1 時間おき 7 時刻)と 0.2GiB のデータ同化には受け渡さないリスタートデータを高速ストレージに書き出す。524,288 プロセス(131,072 ノード)を用いて 256 メンバーを同時実行し、これを 4 セット行うことで、1024 メンバーの結果を得る。富岳の高速ストレージ(SSD)は 16 ノード(64 プロセス)毎に 1 台装備されており、1 台あたりおよそ 180GiB、総計で 1.3PiB のデータをデータ同化パートに受け渡す。データ同化パートではシミュレーション空間から観測空間への変換(Sto0, 観測演算子)が行われ、ターゲット時刻の前後 3 時間の全アンサンブル予報結果を観測データの空間座標位置に内挿し観測値との比較を行う。LETKF ではこの比較結果に対し時間・空間・変数に対する局所化を適用しつつ、次のモデルシミュレーションの初期値となるターゲット時刻のリスタート変数に修正を加える。このデータフローで発生する大量のファイル I/O を高速化するために、本研究では Yashiro et al. (2016) によって開発されたシステムデザイ

ンを採用した。このデザインでは、データスループットを最大化するためにすべてのプロセスが独立してファイルを書き出す。また、データの移動距離を最短にするために、プロセスから最も近いローカルディスクにファイルを書き出す。これにより、共有ファイルシステムへのファイル書き込みの競合を回避し、とりうる最大の並列度で独立した読み書きが実現される。また、シミュレーションとデータ同化では必ずデータの「転置」を行う必要がある。これは、シミュレーションが全大気の格子点を網羅するプロセスグループで実行されるのに対し、データ同化では各プロセスが全アンサンブルメンバーの同一格子点のデータを用いて実行されるためである。Yashiro et al. (2016) のデザインでは、出来る限り少ないプロセスグループ内でのデータの持ち替えを行うようなプロセス配置・データ配置を行い、通信によるデータ移動の距離と回数を削減する工夫がなされている。これに加え、本研究では Sto0 データの分散読み書きを新たに実装し高速化を行った。Sto0 処理は各プロセスが重複せずに受け持つ水平格子点群の内部にある観測点に対し、プロセス毎に独立して実行されるが、続く LETKF では水平局所化半径に従って別プロセスが作成した Sto0 データも必要とする。そのため、これまでは一旦全 Sto0 データをマスターノードに集約して書き出しと読み込みを行っていた。本研究ではこの単一プロセスによるデータ読み書きのボトルネックを廃止し、全データを全プロセスで共有した後に、その後の局所化で用いる範囲のみを残してプロセス毎にファイルを個別に書き出す方式に改めることで、データの分散並列 I/O を実現した。

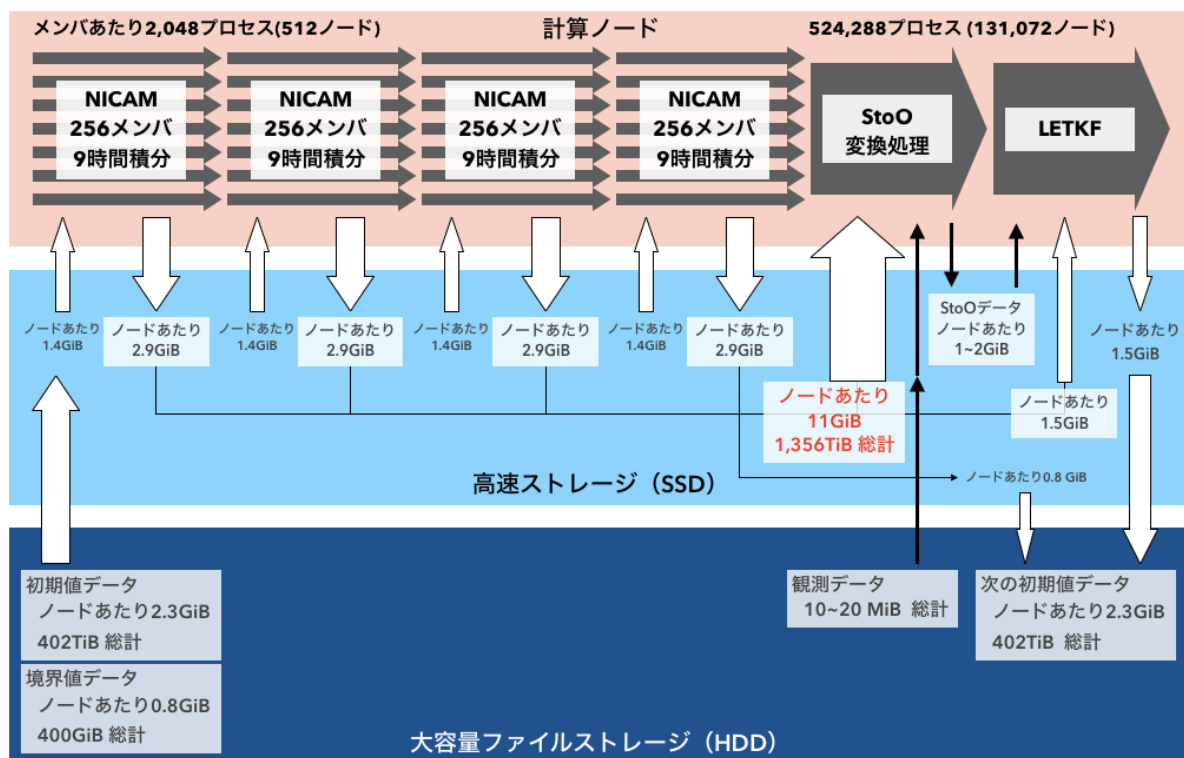


図 E-1 : NICAM-LETKF 実験における計算とデータフローの模式図。

データサイズとプロセス数は 3.5km メッシュ、1024 アンサンブル実験時の値で記述している。

NICAM-LETKF 実験に先立ち、NICAM および LETKF それぞれの計算最適化を実施した。NICAM-LETKF は「富岳」開発プロジェクトで 9 つの重点アプリケーションのひとつに選定され、2014 年の開発開始

から継続した性能最適化が進められてきた(Sato et al, 2020)。ソースコード内の典型的な計算区間をカーネルとして抽出し、「京」および Fujitsu FX100 の実機性能プロファイラの結果からエミュレーションを行い予測した性能をもとに計算最適化を進めた。その後、性能推定を「富岳」CPU シミュレータ、「富岳」試作 CPU を用いた方法に切り替えながら、より精度の高い方法で最適化の適用効果について評価を行ってきた。その結果、NICAM シミュレーションにおいてアプリケーションの要求する Byte/FLOP 比（高いほどメモリ性能に律速される）は「京」時代に用いていたソースコードと比較して 8% 減少し、CPU 単位では「京」から「富岳」へのメモリ性能向上倍率である 4 倍を超える 4.7 倍の高速化の達成を確認した。また、大部分の浮動小数点演算を倍精度（8 バイト）から単精度（4 バイト）に変更することで、さらに 1.6 倍の高速化を得た。尚、シミュレーションの混合精度化にあたっては、計算性能とシミュレーション精度の両面からの評価が行なわれている（Nakano et al., 2018）。本研究では、さらに実機を用いた高並列計算でのスケーリング評価を実施した。ノードあたりの格子数を保ったままノード数を 2 ノードから 512 ノードまで増加させる実験では、計算を大規模化しても計算時間が伸びないことを確認した。

表 E-1 に、NICAM-LETKF 実験での問題設定を示す。実験は 3 種類の水平解像度、4 種類のアンサンブルサイズ設定を用いて行い、これに加えてデータ同化パートについて倍精度と混合精度での 2 通りの実験を行った。シミュレーションパートに関しては、すべて混合精度で実行した。

表 E-1 : NICAM-LETKF 実験での問題サイズ設定

実験名	水平解像度 [km]	アンサンブル数	総格子数 (3次元変数)	プロセスあたり水平格子点数(シミュレーション)	プロセスあたり水平格子点数(データ同化)	利用ノード数
56 km, 256 mem	56	256	4, 282, 122, 240	21, 780	80	512
56 km, 512 mem	56	512	8, 564, 244, 480	21, 780	160	512
56 km, 768 mem	56	768	12, 846, 366, 720	21, 780	240	512
56 km, 1024 mem	56	1, 024	17, 128, 488, 960	21, 780	320	512
14 km, 256 mem	14	256	68, 513, 955, 840	21, 780	80	8, 192
14 km, 512 mem	14	512	137, 027, 911, 680	21, 780	160	8, 192
14 km, 768 mem	14	768	205, 541, 867, 520	21, 780	240	8, 192
14 km, 1024 mem	14	1, 024	274, 055, 823, 360	21, 780	320	8, 192
3.5 km, 256 mem	3.5	256	1, 096, 223, 293, 440	21, 780	80	131, 072
3.5 km, 512 mem	3.5	512	2, 192, 446, 586, 880	21, 780	160	131, 072
3.5 km, 768 mem	3.5	768	3, 288, 669, 880, 320	21, 780	240	131, 072
3.5 km, 1024 mem	3.5	1, 024	4, 384, 893, 173, 760	21, 780	320	131, 072

図 E-2 に、データ同化パートの計算性能をまとめる。まず、アンサンブル数の違いに着目すると、アンサンブル数の増加に伴い計算時間は増加する。これは主に、LETKF のコア計算部分で行われるアンサンブル数 \times アンサンブル数の配列の固有値計算と、アンサンブル数 \times アンサンブル数およびアンサンブル数 \times 局所化された観測点数の行列の掛け算の演算量が、アンサンブル数の増加に比例して大きくなるからである。とくに、倍精度演算では非線形の経過時間の増加が見られる。一方、固有値計算と行列 \times 行列演算を単精度で行った場合、経過時間はアンサンブル数が増えるほど倍精度に比べて高速化することが示された。本研究では、理研が開発を進めてきた固有値計算ライブラリ Kevd (Kudo and Imamura, 2019) を導入することで、一般的な数値計算ライブラリである LAPACK を用いた固有値計算より高速化した結果を得た。Kevd を用いた単精度計算では、matrix deflation と呼ばれる計算高速化が倍精度計算の場合よりも効果を発揮することで、アンサンブル数に対して線形な時間増加に留まったと考えられる。次に、水平解像度の違いに着目した場合、同じアンサンブル数ではプロセスあたりが担当する格子数が変わらないため、ウィークスケーリングと呼ばれる性能指標で評価されることになる。混合精度 56km メッシュから 3.5km メッシュの計算では、全ノードで読み込む総データ量は 5TiB から 1.3PiB へ増加している。にもかかわらず経過時間はほとんど変化しておらず、本研究で採用したデータ中心のシステムデザインが有効であることが示された。一方で経過時間の内訳では、固有値計算にかかる時間のプロセス間インバランスがアンサンブル数の増加につれて増大する傾向にあった。これは用いた観測データが地理的偏りを持っていることに起因しており、データ中心のデザインを優先した副作用として、インバランスを避けることが難しくなったためである。データ移動コストの削減と計算負荷の均一化はトレードオフの関係にあり、本研究の成果はスパコンのハードウェアの中で性能向上が遅いファイル I/O の高速化を優先したほうが全体の計算時間を短縮できることを示唆している。

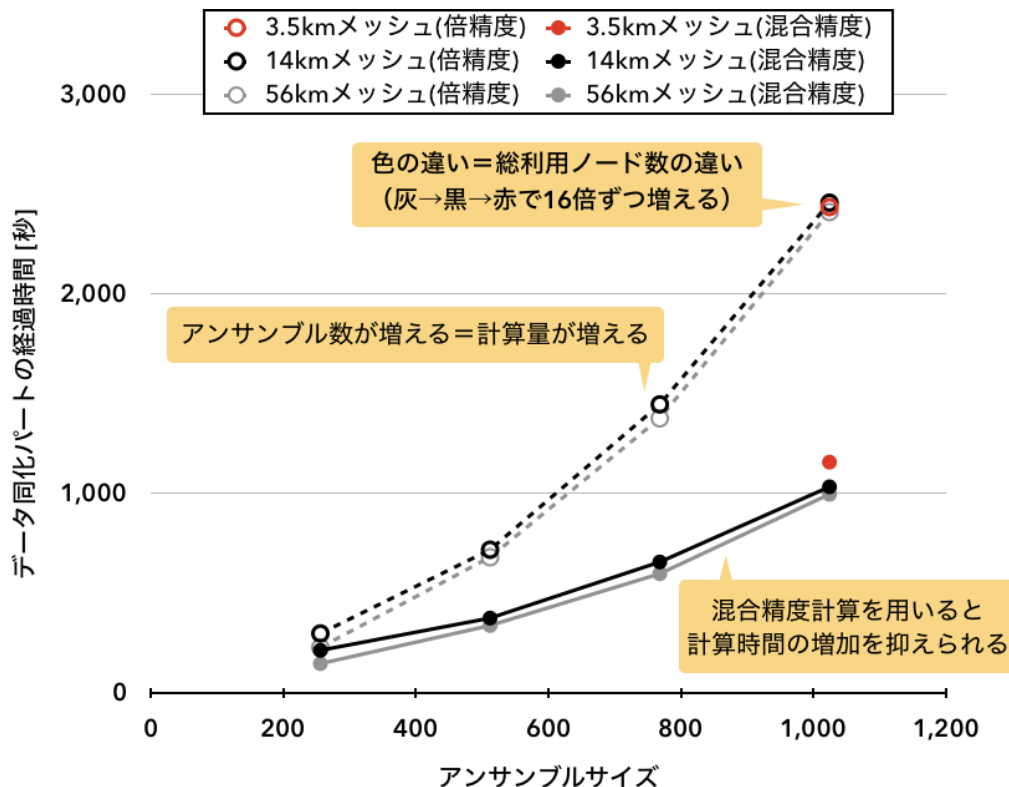


図 E-2： データ同化パートの計算性能。3 種類の解像度、4 種類のアンサンブルサイズ、2 種類の浮動小数点計算精度設定を用いた場合の経過時間を示す（ただし、3.5km メッシュは 1024 メンバーでの実験のみ）。

全球 3.5km メッシュの最大規模実験は 2020 年 7 月 24 日から 8 月 1 日の間、ノード全系を占有する中で行われた。小規模の実験は滞りなく進められたが、131,072 ノード実験は途中で実行が停止する等、多くのエラーに見舞われた。特に多くのエラーを引き起こす原因はファイル I/O にあった。実行バイナリやパラメータファイル等サイズが小さいファイルであっても、13 万台の計算ノードからのアクセスが集中した場合に高確率でエラーが発生した。これを回避するために、ほとんどの入力ファイルをローカル SSD に事前に分散してコピーする方式をとった。大規模実行では並列 I/O だけでなく、主要なファイルへのアクセスの分散を行うことが重要である。また、13 万台あるノードのうち 1 台でも実行中に故障した場合は計算が中断するという問題があった。このような問題は並列度が増加する将来のスパコンで頻発することが考えられるため、ノード障害からの早い復旧を実現するような仕組みの開発は今後より重要になると考えられる。CPU の周波数設定と電力モード設定は、当初 2.2GHz の FLA エコモードを選択したが、待機電力が少ないエコモードを利用した場合、電力消費量が高い演算区間に突入した際のショックが大きくノード故障が頻発したため、エコモードの利用を停止し障害頻度を低減した。

データ同化サイクル全体の経過時間評価では、14km メッシュ解像度での 1 サイクル実験を行い、「富岳」の 5% である 8,192 ノードを用いて、シミュレーションパートにおよそ 1000 秒 x4 セット = 4000 秒、データ同化パートに 1000 秒を要し、トータル 2 時間以内で計算が完了することを実証した。これは実際の気象予報業務においても許容可能な計算時間である。3.5km メッシュ解像度で

の計算は前述のシステムエラーを開始しながら進める必要があったため、シミュレーションパートとデータ同化パートを別々に行った。また、シミュレーションパートは4セットのうち1セットのみ、1時間の積分から性能を推定した。その結果、1サイクルに必要な時間はトータル4時間以内と見積もられた。このとき、シミュレーションパートとデータ同化パートの演算性能はそれぞれ29PFLOPS(ピーク性能比6.6%)と79PFLOS(ピーク性能比17.8%)であった。「京」を用いて同様の計算を行った場合にはおよそ2週間を要する。我々は「富岳」の効率的な利用によって、およそ100倍の計算速度を達成した。

本研究成果をまとめた論文(Yashiro et al., 2020)は、ACMゴードン・ベル賞のファイナリストに選出された。

参考文献

- Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, and H. Tomita, “Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 40, no. 18, 2013, doi: 10.1002/grl.50944.
- Kodama, C., Yamada, Y., Noda, A. T., Kikuchi, K., Kajikawa, Y., Nasuno, T., Tomita, T., Yamaura, T., Takahashi, H. G., Hara, M., Kawatani, Y., Satoh, M., Sugi, M. and Satoh, M.: A 20-year climatology of a NICAM AMIP-type simulation, *J. Meteorol. Soc. Japan.*, 93(4), 393-424, doi:10.2151/jmsj.2015-024, 2015.
- Miyoshi, T., K. Kondo, and K. Terasaki, “Big ensemble data assimilation in numerical weather prediction,” *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 48, no. 11, pp. 15-21, 2015, doi: 10.1109/mc.2015.332.
- Stevens, B. et al., “DYAMOND: the dynamics of the atmospheric general circulation modeled on non-hydrostatic domains,” *Prog. Earth Planet. Sci.*, vol. 6, no. 1, p. 61, 2019, doi: 10.1186/s40645-019-0304-z.
- Müller, A. et al., “The ESCAPE project: energy-efficient scalable algorithms for weather prediction at exascale,” *Geosci. Model Dev.*, vol. 12, no. 10, pp. 4425-4441, 2019, doi: 10.5194/gmd-12-4425-2019.
- Satoh M. et al., “The non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development,” *Prog. Earth Planet. Sci.*, vol. 1, no. 1, 2014, doi: 10.1186/s40645-014-0018-1.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, “Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter,” *Phys. D Nonlinear Phenom.*, vol. 230, no. 1-2, pp. 112-126, 2007, doi: 10.1016/j.physd.2006.11.008
- Terasaki, K., M. Sawada, and T. Miyoshi, “Local ensemble transform Kalman Filter Experiments with the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM,” *SOLA*, vol. 11, no. 0, pp. 23-26, 2015, doi: 10.2151/sola.2015-006.
- Yashiro, H., K. Terasaki, T. Miyoshi, and H. Tomita, “Performance evaluation of a throughput-aware framework for ensemble data assimilation: The case of NICAM-LETKF,”

Geosci. Model Dev., vol. 9, no. 7, 2016, doi: 10.5194/gmd-9-2293-2016.

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>

Nakano, M., H. Yashiro, C. Kodama, and H. Tomita, “Single precision in the dynamical core of a nonhydrostatic global atmospheric model: Evaluation using a baroclinic wave test case,” Mon. Weather Rev., vol. 146, no. 2, 2018, doi: 10.1175/MWR-D-17-0257.1.

Kudo, S., and T. Imamura, “Cache-efficient implementation and batching of tridiagonalization on manycore CPUs,” 2019, pp. 71-80, doi: 10.1145/3293320.3293329.

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>

② NICAM-LETKF での赤外大気測定干渉計の大規模データ同化に向けた研究開発(サブテーマ B、理化学研究所)

数値予測の改善において、膨大なデータをもたらす衛星観測は非常に重要な役割を果たしている。マイクロ波放射計と比べてチャンネル数が桁違いに多い IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) などの赤外ハイパースペクトルサウンダは、多くの大気の情報を含んでおり、世界各国の現業システムにおいて数値予測を改善することが知られている。一方で、赤外ハイパースペクトルサウンダは、二酸化炭素やメタン、一酸化二窒素、一酸化炭素など通常の大気モデルが予測していない化学物質に感度のある周波数帯を用いて観測しているため、これらをより適切に同化するには、輸送モデルや化学モデルを用いる必要がある。本研究では、全球数値予測システム NICAM-LETKF (Terasaki et al. 2019, Yashiro et al. 2020) を用いて、比較的反応性が低く輸送モデルで予測可能な二酸化炭素を NICAM 輸送モデルで陽に予測し、IASI の二酸化炭素に感度のあるチャンネルの同化を試みた。

本実験では、アンサンブル数は 64 とし、対流圏下層から中層に感度のある 3 チャンネルのみを同化した。図 E-3 は IASI を同化することによる ERA-interim に対する全球平均の解析精度の変化率を表している。高度場は対流圏全層においてほぼ変化が見られないが、気温と東西風は対流圏中層から上層にかけて 1% 程度の改善が見られた。水蒸気場に最も大きな改善が見られ、500hPa 付近を中心として、最大約 8% 改善した。本研究の結果から、IASI に含まれる膨大な情報を有効活用し数値予測の改善を目指すために、より多くのチャンネルの同化を進める必要性が示された。

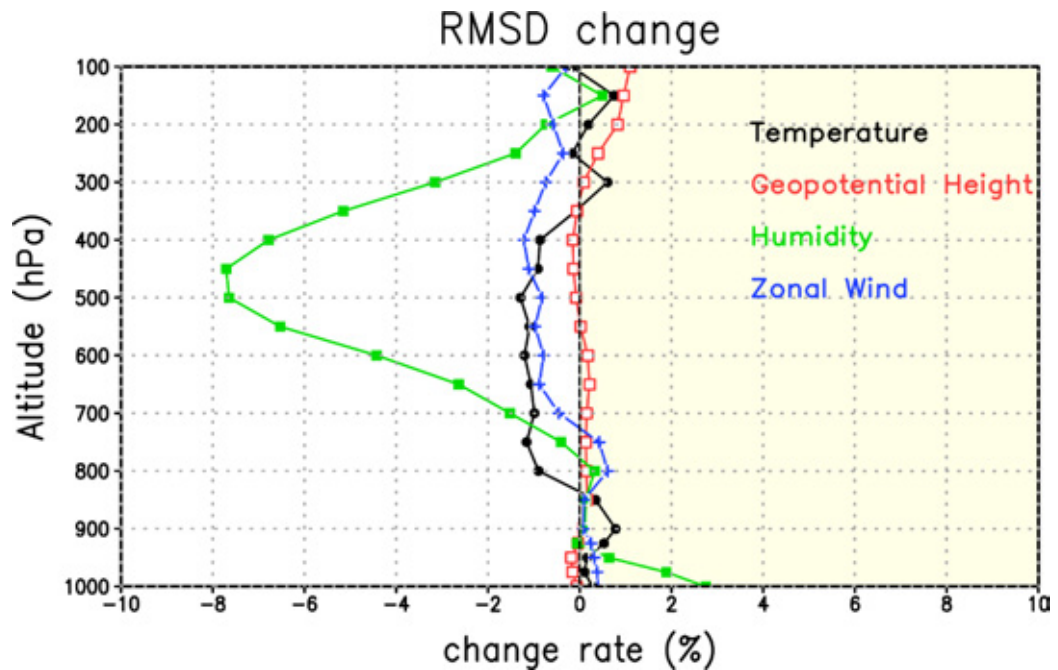


図 E-3 : IASI を同化した場合としない場合の気温、高度場、水蒸気量及び東西風の解析誤差の変化率 (2015 年 10 月 11 日 0 時から 10 月 20 日 0 時の 10 日平均)。負の値は、IASI を同化することで、解析が改善したことを示す。

参考文献

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.

Yashiro, H., K. Terasaki, Y. Kawai, S. Kudo, T. Miyoshi, T. Imamura, K. Minami, H. Inoue, T. Nishiki, T. Saji, M. Satoh, and H. Tomita, 2020: A 1024-member ensemble data assimilation with 3.5-km mesh global weather simulations. SC '20: Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 1, 1-10. doi:10.5555/3433701.3433703

③ 温室効果ガス濃度シミュレーションにおける気象場同化方法の検討(サブテーマ B、国立環境研究所)

温室効果ガスやエアロゾル等の大気トレーサ濃度のデータ同化では、観測された濃度または陸面や海面からの放出・吸収(フラックス)量を修正し、現実に観測される濃度場の予測再現性の向上を目指すと共に、人為起源および自然起源のフラックス量を定量的に見積もることを目的としている。このとき、トレーサ濃度の再現性は大気の状態、とりわけ水平・鉛直の輸送がどれだけ現実に近く再現されているかに大きく左右される。計算量の制約から、これまでのトレーサデータ同化実験の多くでは大気の輸送場を現実に近づけるためのデータ同化手法として、格子点毎に風速・気温等をニュートン法で大気再解析データに向かって緩和する「ナッジング」という手法が用いられてきた。ナッジングは表現したい流れ場に対して、再解析データの空間解像度が十分に高く、よく現

実の大気場を表現している場合にたいへん有効であり、少ない計算量の増加でトレーサ輸送の再現性を大きく改善する。しかし、再解析データよりも高い空間解像度でのシミュレーションを行おうとした場合、ナudgingはモデルが表現しようとするより細かい輸送場を粗い参照値でスムージングすることになり、上昇・下降流域や雲・降水が存在する・しない領域の境界コントラストを弱め、また地表面近くでの最大風速を弱めることになる。これらはトレーサの輸送をより拡散的にすると考えられるため、大気再解析データを通してではなく、再解析データの作成に用いられるデータ同化手法と同等の精度をもったデータ同化を用いて大気場を作成することが望ましい (Miyazaki et al., 2009)。本研究では10kmメッシュオーダーの高解像度温室効果ガスデータ同化の実現を目指し、気象場と温室効果ガス濃度の両方をアンサンブルデータ同化によって修正しながら計算するシステムの開発検証を進めた。今年度はまずHPCI第2階層を用いて、温室効果ガスを同化解析しないトレーサとして扱い、低解像度のアンサンブルデータ同化によって濃度の再現性がどのように変化するかについて、実験と解析を行った。

図E-4に2018年1月の波照間島(北緯24.1度、東経123.8度)におけるシミュレーションの比較結果を示す。水平解像度は224km(GL05)、鉛直78層で、それぞれ気象場を何も拘束しない場合(Free, 黒点線)、ナudgingによる同化(Nudging, 黒破線)、LETKFによる同化のアンサンブル平均値(色実線)を表す。ナudgingによる同化ではERA5再解析値を緩和時定数1日(気温は5日)として用い、LETKFによる同化では6時間の同化ウィンドウで観測データにはNCEP PREPBUFRを用いた。二酸化炭素(CO₂)の地表面フラックスには、Niwa et al. (2017)と同様の人為起源、森林火災、陸上生態系、海面のフラックスデータベースを組み合わせ用いた。上の図は水平風速であり、ナudgingとLETKFによる同化の両方が、ほぼ似たような風速の時系列に収束しているのがわかる。一方で、下の図に示すCO₂濃度ではナudgingとLETKFの結果に差異が現れると同時に、メンバー数を32から1024メンバーまで6段階に変えて行った結果にも差異が現れる結果となった。特にシミュレーションが2週間以上経過すると、黒太線で示す観測結果(Mukai et al., 2014)との乖離が大きくなる。水色のシェードは1024メンバーの結果における全メンバーの計算結果の範囲を示す。シミュレーション後半では観測結果がシェードの範囲からも逸脱しており、異なるメンバー数の結果同士もシェードが重ならなくなる。これらの結果からは、LETKFのメンバー数増加によるシミュレーション結果の明らかな向上は見られなかった。また、LETKFの結果はナudgingによる結果やフリーランに比べて、CO₂濃度が1日スケールよりも細かい変動を示す。これは6時間毎の解析によって修正された風場の影響を受けたものであると考えられる。本実験結果から、長期計算やメンバー数増加による結果の違いが、より明瞭に現れることが期待されるCO₂フラックス量の推定を行い、結果を詳細に検証する必要性が示された。

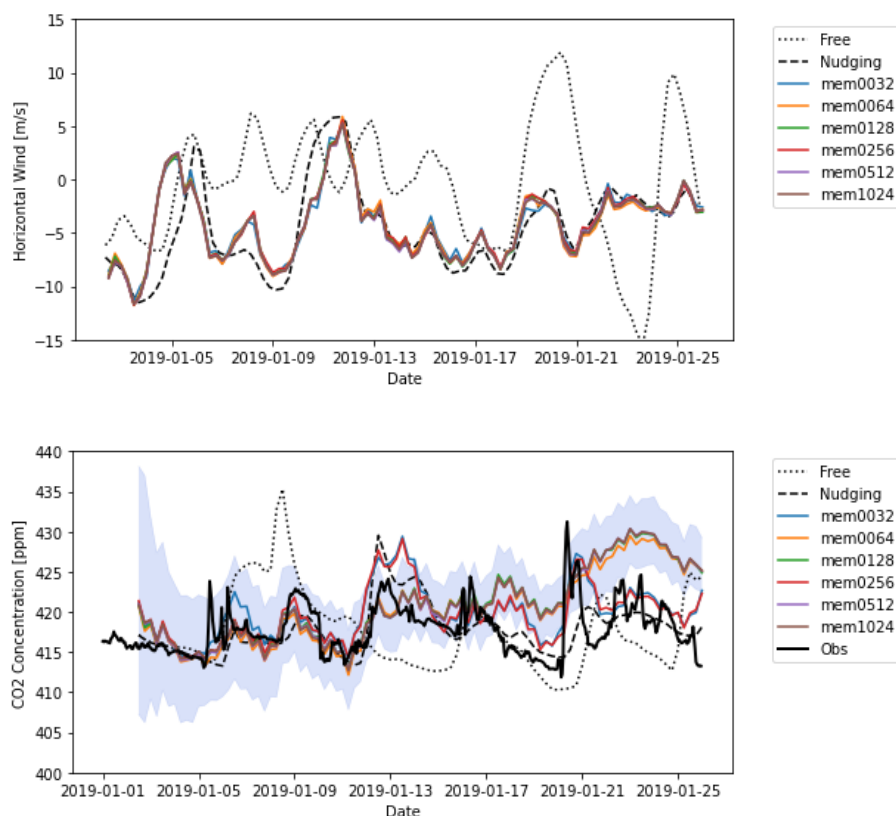


図 E-4 : 波照間島(北緯 24.1 度、東経 123.8 度)におけるシミュレーション結果。それぞれ何も拘束しない場合 (黒点線)、ナッジングによる同化の場合 (黒破線)、LETKF による同化の場合 (色実線、アンサンブル平均値) での風速 (上) と CO₂ 濃度 (下) の結果を示す。CO₂ 濃度については、NIES による 1 時間毎の観測値 (黒太線) と LETKF1024 メンバーの結果における全メンバーの計算結果の範囲 (水色シェード) も併せて示す。

参考文献

- Miyazaki, K. (2009), Performance of a local ensemble transform Kalman filter for the analysis of atmospheric circulation and distribution of long-lived tracers under idealized conditions, *J. Geophys. Res.*, 114, D19304, doi:10.1029/2009JD011892.
- Niwa, Y., Tomita, H., Satoh, M., Imasu, R., Sawa, Y., Tsuboi, K., Matsueda, H., Machida, T., Sasakawa, M., Belan, B., and Saigusa, N.: A 4D-Var inversion system based on the icosahedral grid model (NICAM-TM 4D-Var v1.0) - Part 1: Offline forward and adjoint transport models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 1157-1174, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1157-2017>, 2017.
- Mukai et al. (2014), Continuous observational data of atmospheric CO₂ mixing ratios on Hateruma Island, Ver.1.2, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, DOI:10.17595/20160901.001.

④ 水安定同位体比のデータ同化に向けた開発（サブテーマC、国立環境研究所）

水の安定同位体は、普通の水分子 (H_2^{16}O) と比較して蒸発しにくく、凝結しやすいため、普通の水分子と水同位体の変動量が異なる。また、蒸発や凝結といった相変化、他の水との混合は H_2^{16}O に対する水同位体の変化率が異なるため、水同位体比を用いることで水循環プロセスの内訳を推定し、モデルシミュレーション内でのプロセス再現性の改善に繋げることができる。また、水同位体比の地上観測・衛星観測のデータを同化することで、雲・降水予測の再現性向上が期待できる。今年度は、水同位体を全球雲解像モデル NICAM (Sato et al., 2014) に導入し isoNICAM を開発した。モデルによる算定値と観測値とを比較し、モデルの水循環を検証する。

モデルへの水同位体の導入は、まず予報変数の水と並行に循環するようにトレーサーとして予報変数に組み込んだ。水同位体は H_2^{16}O と異なる挙動（分別）を示すため、水の相変化を取り扱う物理過程では、水物質の種類や相変化、および他の水との混合に注意し、Blossy et al. (2010) や Bolot (2013) を参考に水同位体過程を導入した。本研究では、高い空間解像度で水同位体の再現実験が行えるように、雲微物理過程の1つである NSW6-Roh スキーム (Roh et al., 2017) に水同位体過程を導入した。開発した isoNICAM を用いて、空間解像度は GL09 (約 14km)、鉛直 78 層に設定し、7 年間の積分実験 (1979 年～1985 年) を行った。はじめの 2 年はスピナップとして、後半 5 年間分の平均値を気候値とした。

図 E-5 にシミュレートされた降水中の酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_p$) の全球分布と Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) (<https://www.iaea.org/services/networks/gnip>) によって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 0.91 であった。

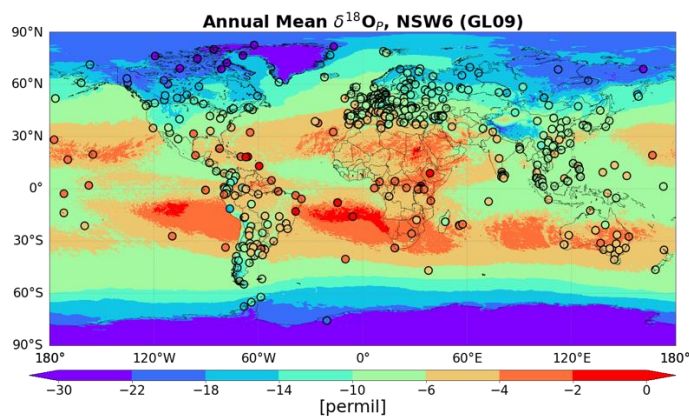


図 E-5：降水 $\delta^{18}\text{O}$ の全球分布。シェードはモデル気候値、プロットは観測による気候値。

気温や降水量といった気象要素と降水同位体比との関係を調べた。図 E-6 (左) は緯度 30 度以上の地点を対象に、月ごとの気温と降水同位体比との関係を示したものである。気温が下がるほど同位体比が低くなる明瞭な正の相関関係（温度効果）が見られ、モデルと観測の傾きはよく一致し

ていた。図 E-6 (右) は、インド洋・太平洋域における緯度 20 度以下の観測地点を対象に降水量との関係を調べたものである。モデルも観測も、降水量が多くなるほど、降水同位体比が低下する降水量効果が認められた。ただし、降水量効果はモデルのほうが大きく、特に降水量が少ないときの降水量効果が大きかった。また、モデルの降水量の頻度分布のピークは観測よりも大きく(図なし)、モデルの降水量が多く、低い同位体比のサンプルが多かったために降水量効果が大きくなった可能性が考えられた。

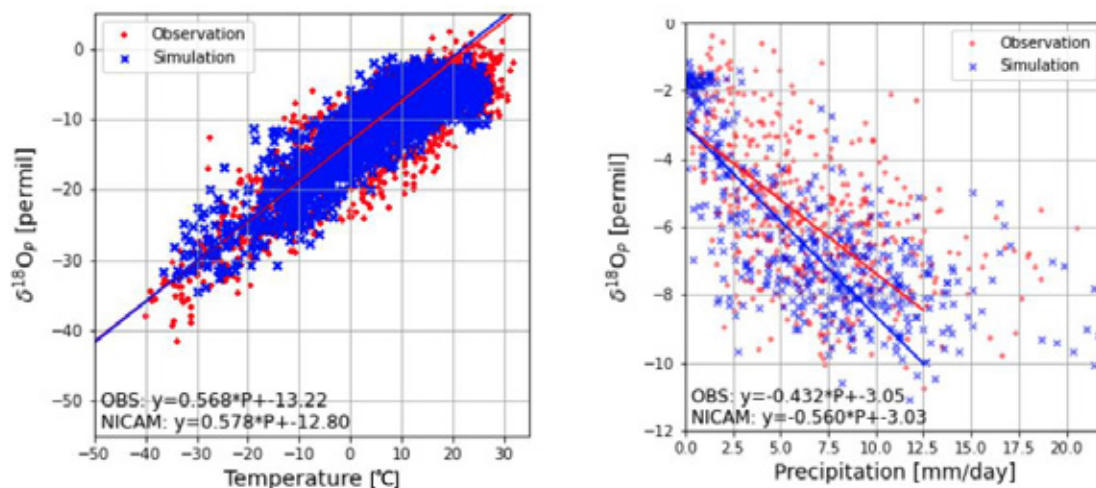


図 E-6 : 降水同位体比と気温 (左) および降水量 (右) との関係。

参考文献

- Blossey, P. N., Kuang, Z. & Romps, D. M. Isotopic composition of water in the tropical tropopause layer in cloud-resolving simulations of an idealized tropical circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115, doi:10.1029/2010jd014554 (2010).
- Bolot, M., Legras, B. & Moyer, E. J. Modelling and interpreting the isotopic composition of water vapour in convective updrafts. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 7903–7935, doi:10.5194/acp-13-7903-2013 (2013).
- Roh, W., Satoh, M. & Nasuno, T. Improvement of a Cloud Microphysics Scheme for a Global Nonhydrostatic Model Using TRMM and a Satellite Simulator. *Journal of the Atmospheric Sciences* 74, 167–184, doi:10.1175/jas-d-16-0027.1 (2017).
- Satoh, M. et al. The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development. *Progress in Earth and Planetary Science* 1, doi:10.1186/s40645-014-0018-1 (2014).

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、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2021年3月16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。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。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。

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、重点計画で開発目標となっている線状降水帯による大雨発生確率情報の創出、および危険度分布の高度化へ貢献するために、令和2年7月豪雨で発生した線状降水帯に対して、NHM-LETKFによる1000メンバーアンサンブル計算を用いて、50mm/3h以上の大雨に対する確率分布および流域雨量指数が既往最大となる確率を、氾濫発生12時間前から計算を開始し、実際に発生した氾濫を良い精度で予測できた。また、適応計画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、2020年9月26日に一般向けのシンポジウム「第1回シンポジウム～豪雨・台風の高精度な予測をめざして～」、2021年3月16日に第一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。

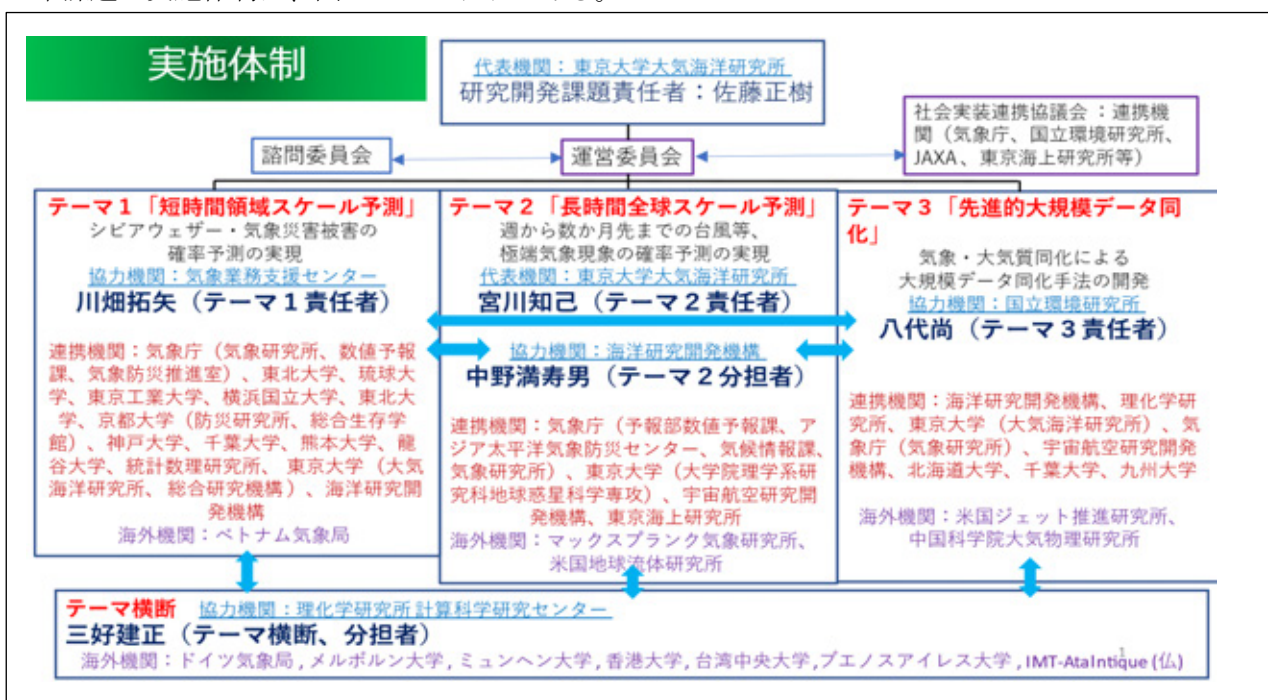


図 F-1: 実施体制

(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。

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(数値予報課、気象リスク対策課)(テーマ1)

令和2年7月豪雨の球磨川氾濫事例についての意見交換を行った。

計画: 特別警報級の大雨確率

現状: 積算降水量150mmに対して60%の確率を12時間前に予測できた。

計画: 危険度分布の確率メッシュ情報

現状: 洪水害危険度の確率メッシュ情報を作成したところ、警報基準を超過する確率が90%以上であった。

計画: 2030年に運用見込みのアンサンブルシステムと「富岳」におけるシステムとの比較

現状：解像度 2km、100 メンバーシステムでは、決定論的および確率論的予測の精度が、1000 メンバーシステムに及ばない。これは 100 メンバーシステムの解析精度が悪かったため。

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。

②—3. 東京海上日動火災保険（テーマ 2）

1 週間程度先の極端気象現象の予報精度向上に期待。

保険会社側の課題：大規模な災害時に被災者にスピーディに保険金額の査定結果を伝えて早期の復興の足がかりに。人員配置の事前準備、効率化による査定コストの低減化。予測側から提供可能な内容、保険会社側の需要、効果的な提供方法を今後検討。

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 システムは、NEXRA をアップデートする形で移植が進められている。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。

②—5. 国立環境研究所（テーマ 3）

温室効果ガス観測衛星 GOSAT プロジェクト・地上・航空機観測網と連携し、高精度炭素収支解析システム構築に向けた開発を進めた。

②—6. 気候変動適応計画（テーマ 3）

適応計画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. 理研データ同化オンラインスクール

講師：三好建正（チームリーダー）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）、宮川知己（准教授）、升永竜介（特任研究員）

2021 年 3 月 2-5 日、参加者 20 名。

実施場所：東京大学大気海洋研究所、およびオンライン

③—3. AORI インターンシップ：NICAM 講習会

2021 年 3 月 30-31 日実施

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）、他

実施場所：東京大学大気海洋研究所

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、令和2年4月にWebページ (<https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/index.html>) を作成し、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。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。

④-1. 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2年9月26日にオンラインにて第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)。

The poster features a blue and white background with a cloud pattern. At the top, there is a paragraph of introductory text. Below this is a 'プログラム' (Program) section with a list of speakers and their topics, including names like 佐藤 正樹, 川端 拓矢, 中野 満寿男, and 雨宮 新. To the right, a vertical banner reads '第1回シンポジウム「富岳」成業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」 豪雨・台風の高精度な予測を目指して'. At the bottom, it states the date '2020年9月26日(土) 13:30~16:30' and 'オンライン開催'. There are also buttons for '参加無料' (Free participation), '事前申込制' (Advance reservation), and a QR code. Contact information for the organizing institution is provided at the very bottom.

図F-2: 第1回シンポジウムリーフレット

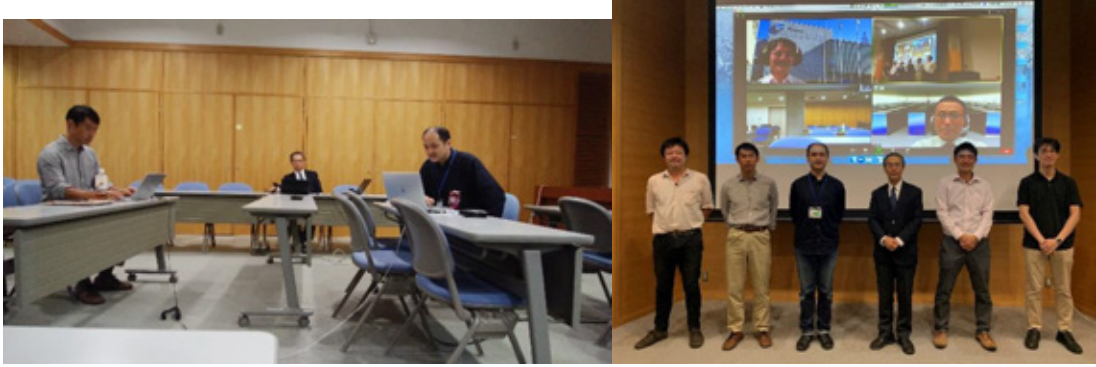


図 F-3：第 1 回シンポジウムの会場の様子（令和 2 年 9 月 26 日）
（左：オンライン配信の様子、右：シンポジウム後の講演者・事務局集合写真）

④-2. 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。

さらに成果発表会后、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）。

「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
第1回成果発表会

昨年(令和2年7月豪雨)では、九州・中部地方を中心に多数の深刻な豪雨が発生し、広範囲被害をもたらしました。近年、毎年のように、集中豪雨や台風が襲来し、河川の氾濫・洪水・暴風雨による被害災害が頻発しています。本課題では、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気象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。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報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ます。本成果発表会では、本課題の進捗の成果を報告します。

2021年3月16日(火) 13:00-17:00
 参加無料・オンライン開催・事前申込み制

お申込み <https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/seika.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
 志願合せ 東京大学 大気海洋研究所「富岳課題事務局」 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>

第1部 成果発表会 13:00-15:45

13:00-13:05 開会 中野(文部科学省研究開発局高専委員会(情報技術)付 計測科学技術推進官室)ご挨拶
 13:05-13:25 開幕 正副【副題代巻】(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アンサンブル気象・大気環境予測、情報科学研究紹介』
 テーマ1 13:25-13:35 河端 拓哉【テーマ1代巻】(気象研究所・室長 / 気象業務支援センター) 『アンサンブル気象予測の進展』
 13:35-13:50 小林 誠一郎(神戸大学 観測気象研究センター・准教授) 『富岳による次世代型数値天気予報予報』
 テーマ2 13:50-14:00 高野 健正【テーマ2代巻】(福山大学研究センター 計測科学センター・チームリーダー) 『ゲマツ数値予報のアナリティクス』
 14:00-14:10 中嶋 健史(徳島大学研究センター・研究員) 『気象予報精度 5km・1024メソッドのNICAM-LETOF 高精度化と2層7月豪雨の予測実験』
 14:10-14:20 休憩
 テーマ3 14:20-14:35 宮川 知也【テーマ3代巻】(東京大学 大気海洋研究所・准教授) 『「気象サービス」の進化と展望』
 14:35-14:50 山岸 洋平(海洋研究開発機構 地球環境部門・特任研究員) 『高解像度数値予報モデル NICAM を用いた2019年台風15号1000hPa等圧面予測』
 テーマ4 14:50-15:15 八木 直【テーマ4代巻】(国立環境研究所 地球環境研究センター・主任研究員) 『大気環境データ同化技術研究の大気環境予測の進展』 『富岳を用いた3.5kmメソッド・1024アンサンブルデータ同化実験』(MIMR-50・HARA等共同発表)
 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

- ・Takahashi (徳島大学研究員) 『Defining the localization scale for a convection-scale ensemble radar data assimilation system』
- ・高野 健正(東京大学研究員) 『2020年豪雨のGaussian-PKCS 数値予報実験による3D数値予報モデルの検証』
- ・河端 拓哉(気象研究所) 『「富岳データバンク」の構築と気象予測予報の高度化』
- ・高野 健正(徳島大学研究員) 『高解像度数値予報 5km・1024メソッドのNICAM-LETOF 高精度化と2層7月豪雨の予測実験』
- ・中嶋 健史(徳島大学) 『高解像度数値予報モデルの高精度化と2層7月豪雨の予測実験』
- ・高野 健正(気象研究所) 『「富岳データバンク」の構築と気象予測予報の高度化』
- ・河端 拓哉(気象研究所) 『「2020年豪雨」のGaussian-PKCS 数値予報実験による3D数値予報モデルの検証』
- ・山岸 洋平(海洋研究開発機構) 『高解像度数値予報モデル NICAM を用いた2019年台風15号1000hPa等圧面予測』
- ・八木 直(国立環境研究所) 『2020年豪雨のGaussian-PKCS 数値予報実験による3D数値予報モデルの検証』
- ・河端 拓哉(気象研究所) 『「富岳データバンク」の構築と気象予測予報の高度化』

図 F-4: 第1回成果発表会リーフレット



図 F-5: 第1回成果発表会の様子(令和3年3月16日)
 (左: オンライン配信の様子、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)

- R2. 5.25 第1回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
 R2. 7.20 第2回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
 R2. 9.26 第1回シンポジウム（オンライン、参加人数：約200人）
 「豪雨・台風の高度な予測をめざして」
 R2. 9.29 第3回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
 R2. 11.24 第4回運営委員会（オンライン、参加人数：6人）
 R3. 1. 8 第5回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
 R3. 1.29 第6回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
 R3. 3.12 第7回運営委員会（オンライン、参加人数：7人）
 R3. 3.16 第1回成果発表会・ポスター発表（オンライン、参加人数：約200人）
 R3. 3.16 諮問委員会（オンライン、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
(2) 全球スケール予測	国立大学法人東京大学 国立研究開発法人海洋研究開発機構 理化学研究所 計算科学研究センター	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 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 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
(3) 先進的大規模データ同化手法	国立研究開発法人国立環境研究所 理化学研究所 計算科学研究センター	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 三好建正:チームリーダー（協

	ンター	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
(4) プロジェクトの総合的推進	国立大学法人東京大学	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

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)

- Hotta, D., and Y. Ota, 2021: Why does EnKF suffer from analysis overconfidence? - An insight into exploiting the ever-increasing volume of observations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 147, 1258-1277.
- Duc, L, K. Saito, and D. Hotta, 2020a: An explanation for the diagonally predominant property of the positive symmetric ensemble transform matrix. *J. Meteor. Soc. Japan*, 98, 455-462.
- Duc, L, K. Saito, and D. Hotta, 2020b: Analysis and design of covariance inflation methods using inflation functions. Part 1: Theoretical framework. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 3638-3660.
- Duc, L., T. Kawabata, K. Saito, and T. Oizumi, 2021a: Forecasts of the July 2020 Kyushu heavy rain using a 1000-member ensemble Kalman filter. *SOLA*, 17, 41-47.
- Duc, L., K. Saito and D. Hotta, 2021b: Analysis and design of covariance inflation methods using inflation functions. Part 2: Adaptive inflation *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi: 10.1002/qj.4029. (in press)
- Saito, K., and T. Matsunobu, 2020: Northward ageostrophic winds associated with a tropical cyclone. Part 2: Moisture transport and its impact on PRE. *SOLA*, 16, 198-205.
- Saito, K., L. Duc, T. Matunobu and T. Kurihana, 2021: Perturbations by the ensemble transform. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrological Applications*, 4. (in press)
- Oizumi, T., K. Saito, L. Duc, and J. Ito, 2020: Ultra-high-resolution numerical weather prediction with a large domain using the K computer: Part 2 Case of the Hiroshima heavy rainfall event on August 2014 and size dependency of simulated convection cores on model resolutions. *J. Meteor. Soc. Japan*, 98, 1163-1182.
- Ito, J., H. Niino, and K. Yoshino, 2020: Large Eddy Simulation on Horizontal Convective Rolls that Caused an Aircraft Accident during its Landing at Narita Airport, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL086999.
- Ito, J., H. Tsuguchi, S. Hayashi, and H. Niino, 2021: Idealized high-resolution simulations of a back-building convective system that causes torrential rain, *J. Atmos. Sci.*, 78, 117-132.
- Ito, K. and H. Ichikawa, 2021: Warm ocean accelerating tropical cyclone Hagibis (2019) through interaction with a mid-latitude westerly jet, *SOLA*, 17A, 1-6.
- Yokota, S., and H. Seko, 2021: Ensemble - based Singular Value Decomposition Analysis to Clarify the Causes of Heavy Rainfall. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi: 10.1002/qj.4020 (in press)

- Yashiro, H., K. Terasaki, Y. Kawai, S. Kudo, T. Miyoshi, T. Imamura, K. Minami, H. Inoue, T. Nishiki, T. Saji, M. Satoh, and H. Tomita, 2020: A 1024-Member Ensemble Data Assimilation with 3.5-Km Mesh Global Weather Simulations, in SC20: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC), Atlanta, GA, US, 2020 pp. 1-10.
- Tandeo, P., P. Ailliot, M. Bocquet, A. Carrassi, T. Miyoshi, M. Pulido, and Y. Zhen, 2020: A Review of Innovation-Based Methods to Jointly Estimate Model and Observation Error Covariance Matrices in Ensemble Data Assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, 148, 3973-3994.
- Kotsuki, S., Pensoneault, A., Okazaki, A. and Miyoshi, T., 2020: Weight Structure of the Local Ensemble Transform Kalman Filter: A Case with an Intermediate AGCM. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146, 3399-3415.
- 小槻峻司, 桃井裕広, 菊地亮太, 渡部哲史, 山田真史, 阿部紫織, 綿貫翔, 2020: 回帰学習器のアンサンブル学習による降雨洪水氾濫モデル・エミュレータ, *水工学論文集*, 76, 367-372.
- 河合英徳, 田村哲郎, 2020: 不均一な粗度条件を持つ都市キャノピーの上空に形成される組織構造がピーク風速の発生に及ぼす影響, *風工学研究論文集*, 26, J25.

① 論文 (査読なし)

- 斉藤和雄, 松信匠, 2021: 台風に伴う北向き非地衡風と PRE 降水へのインパクト. 台風研究会 台風災害の実態解明と台風防災・減災に資する方策, 京都大学防災研究所, 74-77.
- 瀬古弘, 斉藤和雄, 国井勝, 経田正幸, 2020: メソアンサンブルによる竜巻予測の可能性, *気象研究ノート*, 243, 271-274.
- 栃本英伍, メソ β スケール渦に伴う海上の竜巻, *気象研究ノート*, 243, 185-192.

② 国際会議・シンポジウム

③-1. 口頭発表

- Ito, J., H. Tsuguti, S. Hayashi, and H. Niino, 2020: Idealized numerical experiments for a back-building convective system, International Workshop Convection-Permitting Modeling for climate Research Current and Future Challenges. (September 2, online, Invited)
- Hirano, S., K. Ito, H. Yamada, 2021: Deep Hub Clouds in the Eye of Tropical Cyclone Trami (2018), AMS 101st Annual meeting. (January, online)
- Miyoshi, T., 2020: Weather Predictability and Data Assimilation: Perspectives Toward Prediction and Control in Agriculture. LSSE2020. (April 24, online)
- Miyoshi, T., T. Honda, S. Otsuka, A. Amemiya, Y. Maejima, Y. Ishikawa, H. Seko, Y. Yoshizaki, N. Ueda, H. Tomita, Y. Ishikawa, S. Satoh, T. Ushio, K. Koike, and Y. Nakada, 2020: Big Data Assimilation: Real-time Workflow for 30-second-update Forecasting and Perspectives toward DA-AI Integration, EGU2020. (May 8, online)
- Miyoshi, T., T. Honda, S. Otsuka, A. Amemiya, Y. Maejima, Y. Ishikawa, H. Seko, Y. Yoshizaki, N. Ueda, H. Tomita, Y. Ishikawa, S. Satoh, T. Ushio, K. Koike, and Y. Nakada,

2020: Big Data Assimilation: Real-time Workflow for 30-second-update Forecasting and Perspectives toward DA-AI Integration, JpGU-AGU Joint Meeting 2020. (July 12, online)

Kotsuki S., A. Pensoneault, A. Okazaki, and T. Miyoshi, 2020: Weight Structure of the Local Ensemble Transform Kalman Filter: A Case with an Intermediate AGCM. JpGU-AGU Joint Meeting 2020. (July 13, online, invited)

Miyoshi, T., 2020: Real-time Demonstration of Big Data Assimilation in Numerical Weather Prediction, The 197th R-CCS Café. (September 7, online)

Miyoshi, T., 2020: Big Data, Big Computation, and Machine Learning in Numerical Weather Prediction, Workshop on Data Assimilation and Uncertainty Quantification at the exascale. (September 24, online, invited)

Miyoshi, T., 2020: Big Data, Big Computation, and Machine Learning in Numerical Weather Prediction, Virtual Event: ECMWF-ESA Workshop on Machine Learning for Earth System Observation and Prediction. (October 6, online, invited)

Terasaki, T., and T. Miyoshi, 2020: Including the horizontal observation error correlation in the assimilation of AMSU-A data, ECMWF/EUMETSAT NWP SAF Workshop on the treatment of random and systematic errors in satellite data assimilation for NWP. (November 4, online)

Maejima, Y., 2020: Impacts of dense surface observations on predicting a torrential rainfall event on September 9 and 10, 2015 in Ibaraki and Tochigi prefectures., The 202nd R-CCS Café. (November 13, online)

Terasaki, K., and T. Miyoshi, 2020: Including the horizontal observation error correlation in the assimilation of AMSU-A data, Data assimilation seminar. (November 20, online)

Miyoshi, T., 2020: Predicting Sudden Local Storms by 30-second-update NWP Using Phased Array Weather Radar, KU-ITB Biweekly Webinar Series. (November 27, Online, invited)

Miyoshi, T., 2020: RIKEN Enhancing Precipitation Prediction Algorithm by Data Assimilation of GPM Observations, The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2020. (December 21, online)

Miyoshi, T., T. Honda, A. Amemiya, S. Otsuka, Y. Maejima, J. Taylor, H. Tomita, S. Nishizawa, K. Sueki, T. Yamaura, Y. Ishikawa, S. Satoh, T. Ushio, K. Koike, E. Hoshi, and K. Nakajima, 2021: Big Data Assimilation: Real-Time Demonstration Experiment of 30-s-Update Forecasting in Tokyo in August 2020, American Meteorological Society 101st Annual meeting. (January 12, Online, invited)

Miyoshi, T., 2021: Innovating “Big Data Assimilation” technology for revolutionizing very-short-range severe weather prediction, CREST International Symposium on Big Data Application. (January 23, Online)

Miyoshi, T., 2021: Fugaku’s Illuminating a Path to the Future of Numerical Weather Prediction, Session11 Distinguished Achievements in AI, Big Data and Simulations supporting Society5.0, The 3rd R-CCS International Symposium. (February 16, Online)

Miyoshi, T., 2021: Big Data, Big Computation, and Machine Learning in Numerical Weather

Prediction, AI Chair OceaniX Webinars, IMT-Atlantique & RIKEN Online Joint Seminar Series (Jointly with Data Assimilation Seminar Series). (February 17, online, invited)

Miyoshi, T., 2021: Big data assimilation and AI: Creating new development in real-time weather prediction, ERCIM-JST Joint Symposium on Big Data and Artificial Intelligence. (February 18, Online)

Miyoshi, T., 2021: Fusing Big Data and Big Computation in Numerical Weather Prediction, Climate Research with HPC Forum, SupercomputingAsia 2021. (March 4, online, invited)

③-2. ポスター発表

Saito, K., and T. Matsunobu, 2020: Ageostrophic winds associated with a tropical cyclone and northward moisture fluxes. AAS06-17, Japan Geoscience Union Meeting 2020 (JPGU-AGU Joint Meeting 2020). (July 12-16, online)

Oizumi, T., K. Saito, L. Duc, and J. Ito, 2020: Ultra-high resolution numerical weather simulation and dependency of simulated convective cells on model resolutions. AAS01-P01, Japan Geoscience Union Meeting 2020 (JPGU-AGU Joint Meeting 2020). (July 12-16, online)

Oizumi, T., K. Saito, L. Duc, and J. Ito, 2020: Ultra-high resolution numerical weather simulation on the heavy rainfall event over the western Japan 2018. AOS25-10, Japan Geoscience Union Meeting 2020 (JPGU-AGU Joint Meeting 2020). (July 12-16, online)

Kondo, K., and T. Miyoshi, 2020: Non-Gaussian statistics in global atmospheric dynamics with a 10240-member ensemble Kalman filter experiment using an intermediate AGCM. MGI33-P03, Japan Geoscience Union Meeting 2020 (JPGU-AGU Joint Meeting 2020). (July 12-16, online)

Kotsuki, S., Terasaki, K., Satoh, M. and Miyoshi, T.: Ensemble-Based Data Assimilation of GPM/DPR Reflectivity into the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM. Japan Geoscience Union Meeting 2020 (JPGU-AGU Joint Meeting 2020). (July 12-16, online)

Ohishi, S., T. Hihara, H. Aiki, J. Ishizaka, Y. Miyazawa, M. Kachi, and T. Miyoshi, 2020: Development of an ensemble Kalman filter-based regional ocean data assimilation system. Japan Geoscience Union Meeting 2020 (JpGU-AGU Joint Meeting 2020). (July 12-16, online)

Ohishi, S., T. Hihara, H. Aiki, J. Ishizaka, Y. Miyazawa, M. Kachi, and T. Miyoshi, 2021: Development of an ensemble Kalman filter-based regional ocean data assimilation system, The 3rd R-CCS International Symposium. (February 15-16, online)

Tochimoto, E., S. Yokota., H. Niino, W. Yanase, 2020: Formation Process of a Tornado that Formed in a Quasi Linear Convective System Over Kanto Plain, Japan, Japan Geoscience Union Meeting 2020 (JPGU-AGU Joint meeting 2020). (July 12-16, online)

Okamoto, K. and M. Hayashi, 2020: Examination of observation and model error for all-sky infrared radiance assimilation, ECMWF/EUMETSAT NWP SAF Workshop on the treatment of random and systematic errors in satellite data assimilation for NWP. (November 2 - 5,

online)

Takatama, K., T. Miyoshi, 2020: Simulation of fog in Tokyo Bay: the role of atmosphere-ocean-river interaction, Japan, Japan Geoscience Union Meeting 2020 (JPGU-AGU Joint meeting 2020). (July 12-16, online)

Terasaki, K., and T. Miyoshi, 2020: Accounting for the horizontal observation error correlation of satellite radiances in data assimilation, JpGU. (July 12, online)

Honda, T., Y. Sato, and T. Miyoshi, 2020: Exploring the potential of assimilating lightning flash observations with an ensemble Kalman filter, JpGU-AGU Joint Meeting 2020. (July 12, online)

Amemiya, A., S. Mohta and T. Miyoshi, 2020: Application of the Long-Short Term Memory neural networks to model bias correction: idealized experiments with the Lorenz-96 model. ECMWF-ESA Workshop on Machine Learning for Earth System Observation and Prediction. (October 5, online)

Liang, J., K. Terasaki and T. Miyoshi, 2021: A purely data-driven approach to satellite simulator in numerical weather prediction, The 3rd R-CCS International Symposium. (February 15, online)

Terasaki, K., and T. Miyoshi, 2021: A 1024-Member Data Assimilation and Forecast Experiment with NICAM-LETKF Using Fugaku: A Heavy Rainfall Event in Kyushu in July 2020, The 3rd R-CCS international symposium. (February 15, online)

Maejima, Y., T. Ushio and T. Miyoshi, 2021: Toward assimilation of dense and frequent 3-D lightning location data for severe thunderstorm forecast, The 3rd R-CCS International Symposium. (February 15, online)

Taylor, J., T. Honda, A. Amemiya and T. Miyoshi, 2021: Optimizing the localization scale for a convective-scale ensemble radar data assimilation system, The 3rd R-CCS International Symposium. (February 15, online)

Amemiya, A., S. Mohta, and T. Miyoshi, 2021: Application of the Long-Short Term Memory neural networks to model bias correction: idealized experiments with the Lorenz-96 model, The 3rd R-CCS International Symposium. (February 15, online)

Duc L., and K. Kobayashi, 2020: The ensemble Kalman inversion and its application into estimating parameters of a distributed rainfall-runoff model. AAS01-P05, Japan Geoscience Union Meeting 2020 (JPGU-AGU Joint Meeting 2020), (July 12-16, online)

③ 国内学会・シンポジウム

④-1. 口頭発表

佐藤陽祐, 林修吾, 橋本明弘, 雷を直接扱った数値モデルの現実事例への拡張, 2020年日本気象学会秋季大会, SP03-04+, オンライン, 2020年10月

斉藤和雄, 松信匠, 台風に伴う北向き水蒸気フラックスのPREへのインパクト. 日本気象学会秋季大会, PR-47, オンライン, 2020年10月

松信匠, 齊藤和雄, 台風に伴う北向き非地衡風による鉛直流. 日本気象学会秋季大会, DY-06, オンライン, 2020年10月

藤田匡, 瀬古弘, 川畑拓矢, 岡本幸三, 澤田謙, 堀田大介, 幾田泰醇, 変分法によるドップラー速度のデータ同化: ウェーブレット空間での制御変数の検討, 日本気象学会秋季大会, オンライン, 2020年10月

大石俊, 日原勉, 相木秀則, 石坂丞二, 宮澤泰正, 可知美佐子, 三好建正, 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力学的非平衡の改善, 日本海洋学会 2020年度秋季大会, オンライン, 2020年11月

大石俊, 日原勉, 相木秀則, 石坂丞二, 宮澤泰正, 可知美佐子, 三好建正, 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力学的非平衡の改善, 第11回データ同化ワークショップ, オンライン, 2021年2月

城間貴大, 伊藤耕介: 高解像度大気海洋結合モデルによる 2017年九州北部豪雨の予測精度評価, 日本気象学会沖縄支部研究発表会, オンライン, 2021年2月

平野創一郎, 伊藤耕介, 山田広幸: 2018年台風第24号の眼の領域における深い対流雲の出現, NHMワークショップ, オンライン, 2020年11月

伊藤耕介, 市川花: 海面水温偏差が中緯度偏西風ジェットとの相互作用を通じて台風Hagibis(2019)の移動速度に及ぼした影響, 日本気象学会秋季大会, オンライン, 2020年10月

雨宮新, 本田匠, 三好建正, 2020年夏のリアルタイム実証実験における埼玉 MP-PAWR30秒同化システム開発, 第22回非静力学モデルに関するワークショップ, オンライン, 2020年11月

高玉孝平, 三好建正, 東京湾の霧予報に向けた予備実験 ~大気海洋河川相互作用の役割~, 日本気象学会秋季大会, オンライン, 2020年10月

新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎, 熱放射・LES 連成解析手法の適用と検証 壁関数による対流熱伝達モデルの検証, 2020年度日本建築学会大会大会 (関東), 2020年9月

河合英徳, 田村哲郎, 不均一な粗度条件をもつ都市キャノピーがピーク風速の発生に及ぼす影響, 2020年度日本建築学会大会大会 (関東), 2020年9月

川口真晴, 田村哲郎, 2018年台風21号時の大阪市中心部を再現したピーク風圧に関する解析, 2020年度日本建築学会大会大会 (関東), 2020年9月

河合英徳, 田村哲郎, 曹勇, 粗度ブロック群上のピーク風速を発生させる乱流構造の抽出, 第34回数値流体力学シンポジウム, オンライン, 2020年12月

川口真晴, 田村哲郎, 益子渉, 気象擾乱構造を再現したLESによる顕著な台風時の実都市の強風評価, 第34回数値流体力学シンポジウム, オンライン, 2020年12月

伊藤純至, 津口裕茂, 林修吾, 新野宏: 線状降水帯の高解像度理想実験, 日本気象学会東北支部研究会 (仙台管区气象台, 仙台, 2020/12/07)

伊藤純至: 高解像度気象モデルが再現する海上風, 日本海洋学会秋季大会 (オンライン, 2020/11/27)

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, JST 未来社会創造事業ワークショップ 数理科学がドライブする未来, オンライン (invited), 2020年6月

雨宮新, 局地的豪雨のリアルタイム実証実験, 「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量アンサンブル気象・大気環境予測」第1回シンポジウム~豪雨・台風の高精度な予

測をめざして～, オンライン, 2020年9月

三好建正, ゲリラ豪雨予測のリアルタイム実証実験, 第9回 JCAHPC セミナー (第4回 OFP 利活用報告会)「人類と地球を護るスーパーコンピューティング」, オンライン, 2020年10月

雨宮新, Shlok Mohta, 三好建正, 機械学習を用いたモデルバイアス補正: Lorenz96 モデル実験 (続報), 日本気象学会 2020 年度秋季大会, オンライン, 2020年10月

寺崎康児, 三好建正, 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, 第22回非静力学モデルに関するワークショップ, 2020年11月

雨宮新, 本田匠, 三好建正, 2020年夏のリアルタイム実証実験における埼玉 MP-PAWR30 秒同化システム開発, 第22回非静力学モデルに関するワークショップ, オンライン, 2020年11月

三好建正, 本田匠, 雨宮新, 大塚成徳, 前島康光, James Taylor, 富田浩文, 西澤誠也, 末木賢太, 山浦剛, 石川裕, 佐藤晋介, 牛尾知雄, 小池佳奈, 星絵里香, 中島研吾, 30 秒ごとに更新するゲリラ豪雨予報-首都圏でのリアルタイム実証実験-, 第22回非静力学モデルに関するワークショップ, オンライン, 2020年11月

三好建正, ビッグデータとスーパーコンピュータによる豪雨予測 -世界最先端「ビッグデータ同化」の気象予測研究-, 第25回日本難病看護学会 第8回日本難病医療ネットワーク学会合同学術集会, オンライン (invited), 2020年11月

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, JST/CRDS セミナー『数学と科学, 工学の協働に関する連続セミナー』第13回「シミュレーションとデータ科学」, オンライン, (invited), 2021年1月

三好建正, データ同化と気象予測の展望, JST 未来社会創造事業ワークショップ, 「次世代情報社会の実現」領域 R03 重点公募テーマ検討ワークショップ, オンライン(invited), 2021年2月

寺崎康児, 三好建正, 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月豪雨実験, 第54回メソ気象研究会, オンライン, (invited), 2021年3月

Jianyu (Richard) Liang: A Machine Learning Approach To The Observation Operator For Satellite Radiance Data Assimilation, 金星大気の観測・シミュレーション・データ同化に関する研究会, オンライン, 2021年3月

寺崎康児, 三好建正, 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 令和2年度成果発表会, オンライン, 2021年3月

三好建正, ゲリラ豪雨予測のリアルタイム実験, 「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 第1回成果発表会, オンライン, 2021年3月

川畑 拓矢, 大アンサンブルが予測する豪雨・洪水, 「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」第1回シンポジウム, オンライン, 2020年9月

川畑 拓矢, Le Duc, 令和2年7月豪雨における線状降水帯の確率予測, 日本気象学会 2020 年度秋季大会, オンライン, 2020年10月

④-2. ポスター発表

平野創一朗, 伊藤耕介, 山田広幸: 2018年台風第24号の眼の領域における深い対流雲の出現, 日本気象学会秋季大会, オンライン, 2020年10月

田村亮佑, 露木義: 深層学習とアンサンブルカルマンフィルタの組み合わせによるデータ同化の研究, 日本気象学会秋季大会, オンライン, 2020年10月

露木義, 田村亮佑: アンサンブルカルマンフィルタと組み合わせた深層学習によるデータ同化(第2報), 日本気象学会秋季大会, オンライン, 2020年10月

伊藤純至, 林修吾: 肱川あらしのアンサンブル予報, 日本気象学会秋季大会(オンライン, 2020/07/14)ポスター

三好建正, ゲリラ豪雨予測のリアルタイム実証実験, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)第12回シンポジウム, 2020年7月

前島康光, 三好建正, EFSOを用いた稠密地上観測データ同化のインパクト評価, 日本気象学会2020年度秋季大会, オンライン, 2020年10月

寺崎康児, 三好建正, 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 令和2年度成果発表会, オンライン, 2021年3月

前島康光, 牛尾知雄, 三好建正, 雷観測データBOLTの同化に向けた観測演算子の設計調査, 「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 令和2年度成果発表会, オンライン, 2021年3月

雨宮新, 本田匠, 大塚成徳, Guo-Yuan Lien, James Taylor, 前島康光, 西澤誠也, 山浦剛, 末木健太, 富田浩文, 佐藤晋介, 石川裕, 三好建正, 2020年夏季のOakforest-PACS部分占有利用による30秒更新30分降水予報のリアルタイム実験, 「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 令和2年度成果発表会, オンライン, 2021年3月

James Taylor, Optimizing the localization scale for a convective-scale ensemble radar data assimilation system, 「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 令和2年度成果発表会, オンライン, 2021年3月

⑤ 研究会等

小林健一郎, 田村篤志, 穴瀬博子, 角哲也, 野原大督, Le Duc, 大泉伝, 川畑拓矢, 富岳による球磨川洪水予測, 第54回メソ気象研究会, オンライン, 2021年3月.

大泉 伝, Le Duc, 小林健一郎, 川畑拓矢, 太田琢磨, 斉藤和雄, 1000メンバーアンサンブル予報を用いた洪水危険度予測, 第54回メソ気象研究会, オンライン, 2021年3月.

小槻峻司, 寺崎康児, 佐藤正樹, 三好建正: GPM DPR データ同化によるNICAM雲微物理パラメータ推定, GPM・衛星シミュレータ合同研究集会, Mar. 15-16, オンライン, 2021年3月.

大石俊, 日原勉, 相木秀則, 石坂丞二, 宮澤泰正, 可知美佐子, 三好建正, 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, 第24回海洋データ同化夏の学校, オンライン, 2020年8月

大石俊, 日原勉, 相木秀則, 石坂丞二, 宮澤泰正, 可知美佐子, 三好建正, アンサンブルカルマンフ

イルタを用いた海洋データ同化システムの力学的非平衡の改善，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，2020年12月

伊藤耕介，市川花：海面水温偏差が中緯度偏西風ジェットとの相互作用を通じて台風Hagibis(2019)の移動速度に及ぼした影響，台風研究会，オンライン，2020年9月

平野創一朗，伊藤耕介，山田広幸：2018年台風第24号の眼の領域における深い対流雲の出現，台風研究会，オンライン，2020年9月

斉藤和雄，松信匠，台風に伴う北向き非地衡風のPREへのインパクト．台風研究会，オンライン，2020年9月

斉藤和雄，松信匠，台風に伴う北向き非地衡風のPREへのインパクト．--上層加湿に伴う降水強化と2次循環による鉛直流--．第22回非静力学モデルに関するワークショップ，オンライン，2020年11月

斉藤和雄，台風に伴う北向き非地衡風とPRE降水へのインパクト，第一回先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーションに関する研究会，オンライン，2020年9月

伊藤耕介，海面水温偏差が中緯度偏西風ジェットとの相互作用を通じて台風Hagibis(2019)の移動速度に及ぼした影響，第一回先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーションに関する研究会，オンライン，2020年9月

幾田泰醇，令和2年7月豪雨予測と雲降水過程，第一回先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーションに関する研究会，オンライン，2020年9月

川畑拓矢，令和2年7月豪雨における線状降水帯の確率予測，第一回大アンサンブルとアプリケーションに関する研究会，オンライン，2020年9月

大泉伝，NHMと指数モデルの実装，第一回大アンサンブルとアプリケーションに関する研究会，オンライン，2020年9月

伊藤純至，2019年台風17号に伴う竜巻のシミュレーションの解析，第一回先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーションに関する研究会，オンライン，2020年9月

本田匠，SCALE-LETKFによる30秒更新30分予報のリアルタイム実験，第一回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会，オンライン，2020年9月

寺崎康児，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月豪雨実験，第一回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会，オンライン，2020年9月

澤田謙，変分法同化システムへの過飽和制約の導入，第一回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会，オンライン，2020年9月

澤田謙，変分法同化システムへの過飽和制約の導入，第22回非静力学モデルに関するワークショップ，オンライン，2020年11月

幾田泰醇，マルチ物理アンサンブルデータ同化と降水予測，第一回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会，オンライン，2020年9月

藤田匡，変分法によるドップラー速度同化の高度化に向けた検討，第一回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会，オンライン，2020年9月

藤田匡，メソモデルへの観測誤差相関の導入とそのインパクト--変分法によるレーダーデータ同化高度化の検討--，統計数理研究所・気象研究所データ同化勉強会，オンライン，2020年9月

- 小槻峻司, A Local Particle Filter and Its Gaussian Mixture Extension: Experiments with an Intermediate AGCM, 第一回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会, オンライン, 2020年9月
- 露木義, 深層学習でアンサンブルデータ同化ができるか?, 第一回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会, オンライン, 2020年9月
- 宮田 龍太, ディープラーニングで衛星画像からいかに台風情報を引き出すか, 第二回大アンサンブルとアプリケーションに関する研究会, オンライン, 2021年2月
- 藤見 俊夫, 不確実性下の意思決定モデルの紹介, 第二回大アンサンブルとアプリケーションに関する研究会, オンライン, 2021年2月
- 大泉 伝, 1000メンバーアンサンブル予報結果を用いた洪水危険度の予測実験, 第二回大アンサンブルとアプリケーションに関する研究会, オンライン, 2021年2月
- Josko Troselj, Hydrometeorological Real-Time Forecasting of Flash Floods in the Chugoku Region of Japan, 第二回大アンサンブルとアプリケーションに関する研究会, オンライン, 2021年2月
- 寺崎 康児, 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月豪雨実験, 第二回大アンサンブルとアプリケーションに関する研究会, オンライン, 2021年2月
- Le Duc, Ensemble sensitivity analysis of the July 2020 Kyushu heavy rain using 1000 ensemble members. Part 1: Linear analysis, 第二回大アンサンブルとアプリケーションに関する研究会, オンライン, 2021年2月
- 幾田 泰孝, アジョイントモデルを用いた線状降水帯に対する予測感度解析, 第二回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会, オンライン, 2021年3月
- 雨宮 新, 1000メンバーの18km解像度 SCALE-LETKF を用いたアンサンブルサイズ依存性調査, 第二回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会, オンライン, 2021年3月
- 露木 義, アンサンブルカルマンフィルタと組み合わせた深層学習によるデータ同化, 第二回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会, オンライン, 2021年3月
- 近藤 圭一, 背景誤差の非ガウス性定量化による非ガウスデータ同化手法, 第二回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会, オンライン, 2021年3月
- 小槻 峻司, 局所変換粒子フィルタの安定化, 第二回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会, オンライン, 2021年3月
- Le Duc, The ensemble Kalman inversion and its application into estimating parameters of a distributed rainfall-runoff model, 第二回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会, オンライン, 2021年3月
- 西澤誠也, モデル開発と次世代シミュレーションにむけた取り組み, 第二回先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーションに関する研究会, オンライン, 2021年3月
- 河合佑太, 全球大気 LES に向けた力学コアの必要精度に関する研究, 第二回先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーションに関する研究会, オンライン, 2021年3月
- 斎藤和雄, 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, 第二回先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーションに関する研究会, オンライン, 2021年3月

幾田泰醇, 雲降水予測とレーダー観測との比較, 第二回先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーションに関する研究会, オンライン, 2021年3月

川口真晴, 気象擾乱構造を再現したLESによる顕著な台風時の実都市の強風評価, 第二回先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーションに関する研究会, オンライン, 2021年3月

伊藤純至, 三陸の冬季強風の高解像度シミュレーション, 第二回先端的数値モデリングと超高解像度シミュレーションに関する研究会, オンライン, 2021年3月

近藤圭一, 三好建正: 非ガウス分布の定量的評価による非ガウスデータ同化, 第22回非静力学モデルに関するワークショップ, オンライン, 2020年11月

近藤圭一, 三好建正: 背景誤差の非ガウス性定量化による非ガウスデータ同化手法, 第二回先端的データ同化と巨大アンサンブル手法に関する研究会, オンライン, 2021年3月

三好建正, IMT-Atlantique & RIKEN Online Joint Seminar Series (Jointly with Data Assimilation Seminar Series), オンライン, 2021年2月17日

三好建正, データ同化セミナー, オンライン, 2020年5月1日

三好建正, データ同化セミナー, オンライン, 2020年6月10日

三好建正, データ同化セミナー, オンライン, 2020年7月20日

三好建正, 理研データ同化オンラインスクール(基礎編), オンライン, 2020年9月2日-30日

三好建正, データ同化セミナー, オンライン, 2020年9月11日

三好建正, データ同化セミナー, オンライン, 2020年10月1日

三好建正, データ同化セミナー, オンライン, 2020年11月20日

三好建正, RIKEN-U of Tokyo Joint Seminar on Data-driven Approaches to Model Emulation, オンライン, 2020年12月8日

三好建正, 第12回理研・京大データ同化研究会, オンライン, 2021年2月10日

三好建正, IMT-Atlantique & RIKEN Online Joint Seminar Series (Jointly with Data Assimilation Seminar Series), オンライン, 2021年2月17日

三好建正, IMT-Atlantique & RIKEN Online Joint Seminar Series (Jointly with Data Assimilation Seminar Series), オンライン, 2021年3月3日

三好建正, IMT-Atlantique & RIKEN Online Joint Seminar Series (Jointly with Data Assimilation Seminar Series), オンライン, 2021年3月18日

三好建正, IMT-Atlantique & RIKEN Online Joint Seminar Series (Jointly with Data Assimilation Seminar Series), オンライン, 2021年3月31日

⑥ 一般向け講演会等

小林健一郎, 富岳による次世代型球磨川洪水予測, 「富岳」成果創出加速プログラム令和2年度成果発表会, オンライン, 2021年3月

斉藤和雄, 台風に伴う北向き非地衡風と遠隔降水へのインパクト. 気象予報士会千葉支部第66回例会, オンライン, 2021年2月

斉藤和雄, 松信匠, 台風に伴う北向き非地衡による遠隔降水の強化. 「富岳」成果創出加速プログラム令和2年度成果発表会, オンラインポスター, 2021年3月

佐藤陽祐, 気象雷モデルの開発と予測可能性～地上雷放電観測との比較から. 「富岳」成果創出加速プログラム令和2年度成果発表会, オンラインポスター, 2021年3月

大泉伝, 1000メンバーアンサンブル予報を用いた洪水危険度予測. 「富岳」成果創出加速プログラム令和2年度成果発表会, オンラインポスター, 2021年3月

雨宮新, 本田匠, 大塚成徳, Guo-Yuan Lien, James Taylor, 前島康光, 西澤誠也, 山浦剛, 末木健太, 富田浩文, 佐藤晋介, 石川裕, 三好建正, 2020年夏季のOakforest-PACS部分占有利用による30秒更新30分降水予報のリアルタイム実験. 「富岳」成果創出加速プログラム令和2年度成果発表会, オンラインポスター, 2021年3月

大泉伝, 高解像度数値気象モデルは豪雨を予測できるのか? ～2013年伊豆大島、2014年広島での豪雨事例を対象に～. キャスターネットワーク勉強会, オンライン, 2021年3月

川畑拓矢, 令和2年7月豪雨における球磨川氾濫事例に対する線状降水帯確率予測, キャスターネットワーク勉強会, オンライン, 2021年3月

⑦ 新聞/TV/WEB 配信/雑誌等

太田琢磨, 洪水災害を予測する, 日経サイエンス, 2020年10月号

川畑拓矢, スパコン「富岳」高い確率で「線状降水帯」予測 気象庁が解析, NHK, 2020年11月3日

川畑拓矢, 線状降水帯 半日前に予測…気象研 10年後メドに実用化, 読売新聞, 2020年11月3日

幾田泰醇, 川畑拓矢, 水蒸気観測やスパコンで向上 豪雨予測精度一気象研, 時事通信, 2020年11月2日

川畑拓矢, 集中豪雨、数日前に高精度予測 災害リスク予報発信へ, 日経産業新聞, 2021年2月19日

三好建正, データ同化30秒ごとに豪雨予測, 日刊工業新聞18面, 2020年5月18日

三好建正, 人工衛星データ使った世界の降水予報, 理研ら研究チームが公開 「富岳」も活用へ, ITメディアニュース等 (WEB), 2020年8月24日

三好建正, グリラ豪雨予測実証 理研 データの即時処理で, 電気新聞朝刊2面, 2020年8月25日

三好建正, グリラ豪雨予報 30秒ごとに更新 理研などシステム, 日刊工業新聞朝刊27面, 2020年8月26日

三好建正, 30分後の局地大雨予測 理研など新システム 雨雲30秒ごと解析, 読売新聞夕刊1面, 2020年8月27日

三好建正, 理化学研究所, 5日後までの天気を新システムが予測, 日本経済新聞朝刊9面, 2020年8月31日

三好建正, 日本海側を中心に「危険な暑さ」, テレビ朝日 スーパーJチャンネル, 2020年8月25日

三好建正, 世界初! 30分先のグリラ雷雨予測アプリ, テレビ朝日 グッド!モーニング, 2020年8月26日

三好建正, <コロナ第2波への備え ～新たな日常を生きる> 世界初! グリラ雷雨アプリ スパコン

で30分先の雨的中, TBS あさチャン!, 2020年8月27日
三好建正, 列島各地でゲリラ豪雨, フジテレビ めざましテレビ, 2020年8月28日
三好建正, 理研など新システム開発 30分後のゲリラ豪雨予測, フジテレビ めざましテレビ,
2020年8月28日
三好建正, 30秒ごとに30分後までのゲリラ豪雨を予測 理研の三好建正氏らの共同研究グループ
が超高速降水予報の実証実験, [@IT]等 (WEB), 2020年8月27日

⑧ 受賞等

澤田洋平、科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞、シミュレーションと観測データの統合
による水災害予測研究、2020年4月

三好建正, 令和二年度防災功労者内閣総理大臣表彰、2020年9月4日

大石俊, 日本海洋学会奨励論文賞, Frontolysis by surface heat flux in the eastern Japan Sea:
importance of mixed layer depth, 2020年11月28日

(2) テーマ2 : 全球スケール予測

① 論文 (査読付き)

Masunaga, R., Nakamura, H., Taguchi, B. and Miyasaka, T. (2020) Processes shaping the
frontal-scale time-mean surface wind convergence patterns around the Gulf Stream and
Agulhas Return Current in winter. *J. Climate*, 33, 9083-9101.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0948.1>.

Nakamura, Y., T. Miyakawa, M. Satoh (2020) The role of Typhoon Kilo (T1517) in the Kanto-
Tohoku heavy rainfall event in Japan in September 2015. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 98,
915-926. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-046>.

Matsugishi, S., Miura, H., Nasuno, T., and Satoh, M. (2020) Impact of latent heat flux
modifications on the reproduction of a Madden-Julian oscillation event during the 2015
Pre-YMC campaign using a global cloud-system-resolving model. *SOLA*, 16A, 12-18,
<https://doi.org/10.2151/sola.16A-003>.

Yuta Kawai and Hirofumi Tomita: Numerical Accuracy of Advection Scheme necessary for Large-
Eddy Simulation of Planetary Boundary Layer Turbulence, submitted to *Monthly Weather
Review* (2020/11/02).

Shibuya, R., Nakano, M., Kodama, C., Nasuno, T., Kikuchi, K., Satoh, M., Miura, H.,
Miyakawa, T. (2020) Prediction skill of the Boreal Summer Intra-Seasonal Oscillation
in global non-hydrostatic atmospheric model simulations with explicit. *J. Meteorol.
Soc. Japan.*, accepted.

② 論文 (査読なし)・解説記事等

Satoh, M., Yamada, Y., Sugi, M., Kodama, C., Noda, A. T., 2019: Tropical cyclone studies
with the global non-hydrostatic model NICAM. *Gekkan Kaiyo*, 62 Extra Edition, July 2019

(in Japanese).

佐藤正樹, 山田洋平, 杉正人, 小玉知央, 野田暁, 2019: 全球非静力学モデル NICAM による台風研究. 月刊海洋 2019 年 7 月号・号外.

山田洋平, 2020: エルニーニョ翌年の台風の活動度に注目したアンサンブルシミュレーション. 月刊海洋, 52, 14-20.

③国際会議・シンポジウム

③-1. 招待講演

Nakano, M., F. Vitart, K. Kikuchi, 2020: Impact of the boreal summer intraseasonal oscillation on typhoon tracks in the western north Pacific, JpGU-AGU Joint meeting 2020.

Yamada, Y., 2020: 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. PRIMAVERA General Assembly GA5, 27-29, April, online.

③-2. 口頭発表

Nakano, M., Y-W Chen, M. Satoh, 2020: 100-member ensemble forecast by NICAM to examine forecast bust case Typhoon Krosa (2019) , JpGU-AGU Joint meeting 2020.

Nasuno, T., M. Nakano, H. Murakami, K. Kikuchi, 2020: Responses of the subseasonal to seasonal atmospheric variability to the recent Pacific SST anomaly, JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (online), 2020/07/12-16.

Nasuno, T., M. Nakano, H. Murakami, K. Kikuchi, 2020: Responses of the subseasonal to seasonal atmospheric variability to the recent Pacific SST anomaly, AGU Fall Meeting 2020 (online), 2020/12/1-17.

Suematsu, T., Yanase, T., Miura, H., Satoh, M., 2020: A consecutive development of MJO events in the 2018-2019 winter season reproduced by a three-month SST-forced experiment with NICAM, American Geophysical Union Fall meeting 2020, 1-17 December 2020, online.

Suematsu, T., Kodama, C., Yashiro, H., Yanase, T., Miura, H., Miyakawa, T., Satoh, M., 2020: Dependence of the reproducibility of the MJO convection on differences in the surface flux conditions in NICAM, JpGU, 12-16 July 2020, online.

Kodama, S., Satoh, M., 2020: Water vapor transport associated with remote precipitation caused by typhoon in autumn season, JpGU, 12-16 July 2020, online.

③-3. ポスター発表

Takasuka, D., and M. Satoh, 2020: Diversity of Initiation Regions of the MJO Associated with the Mutual Relationship Between the Intraseasonal and Low-frequency Variability, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, poster, online, July 2020.

Takasuka, D., and M. Satoh, 2020: Can Mixed Rossby-gravity Waves Make Building Blocks of MJO Convection in the Indian Ocean? AGU 2020 Fall Meeting, poster, online, Dec. 2020.

Miyakawa, T., Fugaku project global scale prediction team, 2020: "From K to Fugaku: activities toward extended-range prediction using NICAM/NICOCO", JpGU 2020 iPoster session, AAS01-09.

④ 国内学会・シンポジウム

④-1. 口頭発表

佐藤正樹, 2020: 全球非静力学モデル NICAM による気象・気候予測研究. 日本気象学会春季大会、紙上開催. 2020 年 5 月.

高須賀大輔, 佐藤正樹, 2020: 季節内-経年変動の相互関係から見た MJO 発生領域の変調, 日本気象学会 2020 年度春季大会、紙上開催, 口頭, 東京, 2020 年 5 月.

児玉真一, 佐藤正樹, 2020: 秋季の台風による遠隔降水に伴う水蒸気輸送, 日本気象学会春季大会、紙上開催. 2020 年 5 月.

池端耕輔, 佐藤正樹, 2020: 台風発生数と弱い熱帯低気圧の生存率. 日本気象学会 2020 年度秋季大会, オンライン, 2020 年 10 月 25-31 日.

那須野智江, 中野満寿男, 村上裕之, 菊地一佳, 2020: 海面水温偏差に対する季節内から季節スケールの大気場の応答: 2018 年夏季台風シーズン感度実験, 日本気象学会 2020 年秋季大会 (オンライン), 2019/10/25-31.

後藤優太, 佐藤正樹, 「日本周辺の線状降水帯の統計解析」, 日本気象学会 2020 年度秋季大会 (オンライン, 2020.10), オンデマンド講演.

池端耕輔, 佐藤正樹, 2020: 台風発生数と弱い熱帯低気圧の生存率. 2020 年度台風研究会「台風災害の実態解明と台風防災・減災に資する方策」, オンライン, 2020/9/17-18.

⑤ 研究会等

Miyakawa, T. and Fugaku project global scale prediction team, 2020: Global scale forecast project running on the new supercomputer Fugaku, 2020 virtual MJO Taskforce face-to-face meeting, Aug 13, 2020.

宮川知己, 山田洋平, 澁谷亮輔, 中野満寿男, 八代尚, 2020: “全球季節予測” (台風をはじめとする極端気象の 2 週間~3 ヶ月予測), 富岳テーマ 2—東京海上研究所 情報交換会, 2020 年 8 月 6 日.

山田洋平, 2020: 台風 Faxai (2019) を対象とした 100 メンバーアンサンブルシミュレーション, 台風診断ミーティング 2020, 2020 年 8 月 31 日 (月), online.

山田洋平, 中野満寿男, 2020: 2019 年台風 15 号を対象としたアンサンブルシミュレーション, 台風研究会「台風災害の実態解明と台風防災・減災に資する方策」, 2020 年 9 月 17 日 (木)・18 日 (金), online.

後藤優太, 佐藤正樹, 「東アジア域の線状降水帯の統計解析」, 大槌シンポジウム (オンライン, 2020.12).

小玉知央, 2020: 全球雲解像気候シミュレーションに向けて, 第 1 回雲解像気候学ワークショップ, オンライン (口頭), 2020/12/23.

小玉知央, 2020: 全球雲解像気候シミュレーションに向けて, NICAM 開発者会議, オンライン, 2020/11/30 (口頭).

児玉真一, 佐藤正樹, 2020: 秋季の台風による日本の遠隔降水の統計解析, 大槌シンポジウム(オンライン, 2020.12.14).

⑥ 一般向け講演会等

中野満寿男, 2020: コラム「今夏の天気概況・集中豪雨や台風の動向を振り返る」, 第1回シンポジウム ~豪雨・台風の高精度な予測をめざして~, 2020年9月26日, オンライン開催.

(3) テーマ3: 先進的大規模データ同化手法

① 論文(査読付き)

Kodama, C., Ohno, T., Seiki, T., Yashiro, H., Noda, A. T., Nakano, M., et al. (2020). The Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): experimental design, model description, and impacts of model updates. *Geoscientific Model Development*, 14(2), 795-820. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-795-2021>

Yamashita, Y., Takigawa, M., Goto, D., Yashiro, H., Satoh, M., Kanaya, Y., et al. (2020). Effect of Model Resolution on Black Carbon Transport from Siberia to the Arctic Associated with the Well-Developed Low-Pressure Systems in September. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2021-014. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-014>

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>

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>

Goto, D., Sato, Y., Yashiro, H., Suzuki, K., Oikawa, E., Kudo, R., et al. (2020). Global aerosol simulations using NICAM.16 on a 14km grid spacing for a climate study: improved and remaining issues relative to a lower-resolution model. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3731-3768. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3731-2020>

Miyamoto, Y., Sato, Y., Nishizawa, S., Yashiro, H., Seiki, T., & Noda, A. T. (2020). An Energy Balance Model for Low-Level Clouds Based on a Simulation Resolving Mesoscale Motions. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2020-051.

<https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-051>

Kunkel, J., Jumah, N., Novikova, A., Ludwig, T., Yashiro, H., Maruyama, N., et al. (2020). Software for Exascale Computing - SPPEXA 2016-2019. Lecture Notes in Computational Science and Engineering, 61-102. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47956-5_5

Miyoshi, T., Kotsuki, S., Terasaki, K., Otsuka, S., Lien, G.-Y., Yashiro, H., et al. (2020). Satellite Precipitation Measurement, Volume 2. Advances in Global Change Research, 983-991. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35798-6_25

Goto D., Morino Y., Ohara T., Sekiyama T.T., Uchida J., Nakajima T. (2020) Application of linear minimum variance estimation to the multi-model ensemble of atmospheric radioactive Cs-137 with observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 3589-3607, doi:10.5194/acp-20-3589-2020.

② 論文（査読なし）・解説記事等

八代尚(2021): より正確な気象予測を可能にする史上最大規模の計算を「富岳」で実現, HPCIマガジン「富岳百景」, Vol. 2, <https://fugaku100kei.jp/>

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, 2021, 77巻, 2号, p.54-58, <https://doi.org/10.2115/fiber.77.P-54>

③ 国際会議・シンポジウム

③-1 招待講演

Yashiro, H., 2021: World's Largest Ensemble Weather Data Assimilation on Fugaku, The 3rd R-CCS International Symposium, Online, 15-16 Feb. 2021 (Oral, Invited)

③-2 口頭発表

Hisashi Yashiro, Yuta Kawai, Koji Terasaki, Shuhei Kudo, Takemasa Miyoshi, Toshiyuki Imamura, Kazuo Minami, Masuo Nakano, Chihiro Kodama, Satoh Masaki and Hirofumi Tomita, 2020: Challenges of high-resolution large-ensemble data assimilation on supercomputer Fugaku, AGU Fall meeting, Online, 1-17 Dec. 2020

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. The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Everywhere we are, 16-19 November, 2020

Goto D., Morino, Y., Ohara, T., Sekiyama, T. T., Uchida, J., Nakajima, T. (2020) Multi-model ensemble simulation constrained by measurement datasets of atmospheric radioactive cesium released from the Fukushima accident, SNA+MC2020, Japan (only proceeding), May 2020

Yamashita, Y., M. Takigawa, D. Goto, H. Yashiro, M. Satoh, Y. Kanaya, F. Taketani, and

T. Miyakawa (2020): The NICAM-SPRINTARS simulations of the transport and wetdeposition of the black carbon emitted from a Siberian forest fire in September 2016, Japan Geoscience Union (JpGU)-American Geophysical Union (AGU) Joint Meeting 2020, AAS07.

③-3 ポスター発表

M. Tanoue, K. Yoshimura, and H. Yashiro (2020) Validation of isotope-incorporated The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model. AGU Fall meeting, Online everywhere, USA, 1-19 December, 2020

④ 国内学会・シンポジウム

④-1 招待講演

八代尚(2020): 気象・気候の研究分野から語る富岳のシステム—アプリケーションコデザイン, 第3回 HPCI コンソーシアムシンポジウム, オンライン, 2020年10月28日.

④-2 口頭発表

八代尚, 寺崎康児, 中野満寿男, 小玉知央, 河合佑太, 富田浩文(2020): スーパーコンピュータ「富岳」開発における気象・気候分野のアプリケーションコデザイン, 日本気象学会2020年度春季大会, 紙上開催, 2020年5月

④-3 ポスター発表

八代尚(2020): スーパーコンピュータ「富岳」を用いた大アンサンブル・高解像度大気環境シミュレーション研究, 大気化学討論会, オンライン, 2020年11月11-13日 (Poster)

田上雅浩・芳村圭・八代尚. 雲解像・水同位体データ同化システムを目指した水同位体 NICAM の改良とその検証. 日本気象学会2020年度秋季大会, オンライン, 2020年10月

⑤ 研究会等

八代尚(2021): 大規模データ同化技術と大気環境予測の進展, 「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」第1回成果発表会, オンライン, 2021年3月16日 (Oral)

八代尚(2021): 富岳を用いた3.5kmメッシュ・1024アンサンブルデータ同化実験, 「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」第1回成果発表会, オンライン, 2021年3月16日 (Oral)

八代尚(2021): NICAM 開発全体の現状と将来像, 令和2年度 GCM 検討会, オンライン, 2021年2月22日 (Oral)

八代尚(2020): NICAM.20 概要, NICAM developers meeting (NDM.20), オンライン, 2020年11月30-12月2日 (Oral)

丹羽洋介(2020): NICAM-TM を用いた温室効果ガス研究について, NICAM developers meeting (NDM.20), オンライン, 2020年11月30-12月2日 (Oral)

田上雅浩(2020): NICAM における水同位体過程の導入とその現状について, NICAM developers meeting (NDM.20), オンライン, 2020年11月30-12月2日 (Oral)

⑥ 新聞/TV/WEB 配信/雑誌など

八代尚：-富岳小嘶-スーパーコンピュータ「富岳」の開発から始動まで，Youtube RIKEN Channel，2021年3月9日，出演

山下陽介：温帯低気圧による北極域へのブラックカーボン輸送～発達した温帯低気圧と前線システムによる上昇流が輸送を促進～，国立環境研究所地球環境研究センターニュース，2021年2月号，Vol. 31，No. 12

八代尚，寺崎康児，河合佑太，三好建正，佐藤正樹，富田浩文：プレスリリース「スーパーコンピュータ「富岳」を利用した史上最大規模の気象計算を実現」（国立環境研究所，理化学研究所，東京大学大気海洋研究所），2020年11月20日

- 日本経済新聞電子版：国立環境研・理研・富士通、スーパーコンピュータ「富岳」を利用した史上最大規模の気象計算を実現，2020年11月20日
- 朝日新聞：国立環境研・理研・富士通・メトロ・東大、スーパーコンピュータ「富岳」を利用した史上最大規模の気象計算を実現，2020年11月20日
- 電波新聞：史上最大規模の気象計算を実現 理研、富士通などがスパコン「富岳」を利用，2020年11月23日
- 日刊工業新聞：スパコン「富岳」が拓いた“未来の気象予報”への道，2020年11月24日
- PC watchニュース：富岳を利用して世界の気象機関の500倍となる大規模気象計算を実現，2020年11月20日
- ZDNet Japan：国立環境研究所ら、スパコン「富岳」で最大規模の気象計算を実現，2020年11月26日
- Exciteニュース：富士通・理研ら、スーパーコンピュータ「富岳」を利用した史上最大規模の気象計算を実現，2020年11月20日
- Japan Corporate News Network：Japanese Research Group Performs Largest Ever Meteorological Calculation on Supercomputer Fugaku, November 24, 2020

八代尚：[クローズアップ科学] 富岳はなぜコロナ危機で成果を上げられるのか，2020年11月22日，産経新聞取材対応

八代尚：計算で挑む環境研究-シミュレーションが広げる可能性 (7) より速く、より多く、より長く、より複雑に-シミュレーションを支える技術-，国立環境研究所地球環境研究センターニュース，2020年10月号，Vol. 31，No. 7

(4) プロジェクトの総合的推進

① 論文（査読なし）・解説記事等

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>.

② 国際会議・シンポジウム

Satoh, M., Roh, W., 2020: Robustness and uncertainties of global cloud-resolving models:

Evaluations and improvements of clouds with a seamless approach. International Workshop on Convection-Permitting Modeling for Climate Research Current and Future Challenges. 2-4 September, 2020. https://www.pco-prime.com/togo2020_ws/index.html [invited]

Satoh, M., Roh, W., 2020: Robustness and uncertainties of global cloud-resolving models: Evaluations and improvements of clouds with a seamless approach. IBS Conference on High-Resolution Earth System Modeling October 12-14, 2020 Live Session; Hotel Nongshim, Busan City, Korea <https://ibs-conference.org/2020/hesm/> [invited]

Satoh, M., Roh, W., 2020: Robustness and uncertainties of global cloud-resolving models: Evaluations and improvements of clouds with a seamless approach. AGU Fall Meeting, 1-17 December 2020 Live Session; <https://www.agu.org/fall-meeting>

③ 国内学会・シンポジウム

佐藤正樹, 2020: 全球非静力学モデル NICAM による気象・気候予測研究. 日本気象学会春季大会、紙上開催. 2020.

④ 研究会等

NICAM 開発者会議. オンライン. 2020 年 11 月 30 日~12 月 2 日.

⑤ 一般向け講演会、アウトリーチ等

佐藤正樹, 川畑拓矢, スーパーコンピュータ推進議員連盟総会, 2020 年 12 月 1 日。

佐藤正樹「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〉」, スーパーコンピュータ「富岳」共用開始記念イベント「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、オンライン開催。

⑥ 新聞/TV/WEB 配信/雑誌など

佐藤正樹, 東京大学大気海洋研究所ニューズレター「Ocean Breeze」, 2020 年 12 月 28 日

2020 年 7 月 9 日 佐藤正樹: NHK 報道局取材。

2020 年 11 月 2 日 佐藤正樹: 読売新聞取材。

2021 年 3 月 25 日 佐藤正樹: テレビ朝日取材。

⑦ 受賞等

Stevens, B., Satoh, M., Auger, L., Biercamp, J., Bretherton, C., Chen, X., Duben, P., Judt,

F., Khairoutdinov, M., Klocke, D., Kodama, C., Kornblueh, L., Lin, S.-L., Putman,

W., Shibuya, R., Neumann, P., Rober, N., Vannier, B., Vidale, P.-L., Wedi, N., Zhou, L.,

PEPS Most downloaded Paper Award 2020 <1位>, 2020 年 6 月 11 日

Matsuoka, D., Nakano, M., Sugiyama, D., Uchida, S., PEPS Most downloaded Paper Award 2020

<2位>, 2020 年 6 月 11 日