

令和4年度高性能汎用計算機高度利用事業

「富岳」成果創出加速プログラム

「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象

・大気環境予測」成果報告書

令和5年5月30日

国立大学法人東京大学大気海洋研究所

佐藤 正樹

## 目次

補助事業の名称	1
1. 補助事業の目的	1
2. 令和4年度（報告年度）の実施内容	1
2-1. 当該年度（令和4年度）の事業実施計画	1
2-2. 実施内容（成果）	2
2-2-1. テーマ1：短時間領域スケール	2
(1) 成果概要	2
(2) 実施体制	3
(3) 成果内容	3
2-2-2. テーマ2：全球スケール予測	34
(1) 成果概要	34
(2) 実施体制	35
(3) 成果内容	36
2-2-3. テーマ3：先進的大規模データ同化手法	46
(1) 成果概要	46
(2) 実施体制	60
(3) 成果内容	60
2-2-4. プロジェクトの総合的推進	60
(1) 成果概要	60
(2) 実施体制	61
(3) 成果内容	61
2-3. 活動（研究会の活動等）	67
2-4. 実施体制	68
別添1 学会等発表実績	69

## 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4年度（報告年度）の実施内容

#### 2-1. 当該年度（令和4年度）の事業実施計画

##### (1) 短時間領域スケール予測

気象庁非静力学モデル局所アンサンブル変換カルマンフィルタNHM-LETKFにおいては、台風などを対象に暴風、危険度などの災害発生確率メッシュ情報を作成する。昨年度SCALE-LETKFシステムを用いて東京オリンピック及びパラリンピック時に実施した30秒毎のフェーズドアレイ気象レーダのリアルタイム実験の結果の事後検証を行い、システムの改善に向けた高度化開発を行う。これらの実験結果から得られた情報について気象庁との意見交換を行う。都市広域の強風に関する解析では、台風時の気象アンサンブル実験結果のデータベースを対象に、都市防災上重要度の高いケースを複数選定し、市街地における強風に対して、地表近傍に着目して高解像度シミュレーションを実施する。さらに強風、突風などの極端気象に対する詳細な被害推定に関する検証を行う。（一般財団法人 気象業務支援センター、理化学研究所）

##### (2) 全球スケール予測

これまでの結果を踏まえ、開発・調整を進めた非静力学正二十面体格子大気モデルNICAMを用いてモデル台風気候特性の情報を更新するとともに、海洋結合版を用いて数10～100メンバーのアンサンブル季節予測実験を実施し予測性能の評価を行う。アンサンブル実験においてハイリスクなシナリオを選択した階層的なアンサンブル実験を実施する。これらの結果から得られた情報について気象庁との意見交換を行い知見を還元する。（東京大学、海洋研究開発機構、理化学研究所）

### (3) 先進的大規模データ同化手法

これまでに開発・最適化を進めた全球アンサンブルデータ同化システムNICAM-LETKFを用いて、温室効果気体の地表面吸収排出量を観測データを用いて逆推定する実験を実施し推定結果の評価を行う。水安定同位体比をトレーサとするデータ同化実験においては、複数の雲微物理過程スキームを用いた比較実験を実施し、雲降水過程の評価を行う。NICAM-LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA)で運用されているデータ同化システムへ開発・最適化成果を還元する。(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。プロジェクト全体の連携を密にかつ円滑に運営するため、担当責任者間の意見調整の会議を主催し、文部科学省と担当責任者間との間の連絡窓口となる。実施項目ごとの研究会の開催等の実施項目を補助管理し、参画各機関の連携・調整を推進する。本課題で得られる成果等を集約・管理し、プロジェクト終了後の利便性を図るとともに、得られた成果を通じて、気象庁「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」や「気候変動適応計画」へ貢献する。本プロジェクトを通じて、若手研究者や多様な人材の育成を図る。また、本プロジェクトで得られた成果については、シンポジウムや成果報告会等広報活動を通じて積極的に公表し、今後の展開に資する。広報活動においては、ホームページ等の広報媒体を通じて、本プロジェクトの成果を広く広報する。(東京大学)

## 2-2. 実施内容(成果)

### 2-2-1. テーマ 1: 短時間領域スケール

#### (1) 成果概要

気象庁非静力学モデル局所アンサンブル変換カルマンフィルタNHM-LETKFにおいては、台風を対象に暴風発生確率メッシュ情報を作成し、海岸付近では高い確率を示す一方、内陸では地面摩擦の影響を受け、高い確率予測は難しいことが分かった。さらに洪水危険度の災害発生確率メッシュ情報を作成し、大アンサンブルによって洪水を精度良く予測できることを示した。

これらの実験結果から得られた情報について気象庁のデータ同化、アンサンブル担当者との意見交換を行った。

昨年度SCALE-LETKFシステムを用いて東京オリンピック及びパラリンピック時に実施した30秒毎のフェーズドアレイ気象レーダのリアルタイム実験の結果の事後検証を行い、MP-PAWRの観測と整合性の高い予測結果を得た。さらにシステムの改善に向けた高度化として、雲水量を5倍とする実験を行い、将来の改善点に関する示唆を得た。

都市広域の強風に関する解析では、2019年台風第19号の気象アンサンブル実験結果のデータベースを対象に、都市防災上重要度の高いアンサンブルメンバーを複数選定し、市街地における強風に対し

て、地表近傍に着目して高解像度シミュレーションを実施した。その結果、最頻値および最大値によるメンバー選定で強風分布が異なることが分かった。さらに強風に対する詳細な被害推定に関する検証を行い、台風の実被害レベルとおおむね対応する結果が得られた。

年次計画			
内容（機関名）	令和2年度	令和3年度	令和4年度
【テーマ1】 「短時間領域スケール予測」 (気象業務支援センター、気象研究所、気象庁、理化学研究所、東京工業大学)	HPCI第二階層を利用した小規模テスト実験 富岳試行的利用によるシステム構築および実効性能評価実験	観測ビッグデータ同化を元にした大アンサンブル計算による気象要素確率情報の創出。ダウンスケールシミュレーションによる高解像度被害推定実験。以上を通じた科学的知見の創出。	危険度分布確率メッシュ情報の創出。暴風、特別警報級の大雨などの確率メッシュ情報の創出。 以上より科学的知見の創出および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: 前島康光 (理化学研究所)

- 非線形・非ガウスなど先端的データ同化や巨大アンサンブルなどに関する研究

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

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

## (3) 成果内容

①サブテーマA: 大アンサンブルとアプリケーション

①-1. 1000アンサンブル降雨を用いた降雨流出・洪水氾濫予測

1.1 はじめに

本報告では、Duc et al. [1]により計算された2020年7月の球磨川豪雨を対象とした1000メンバーからなる多数降雨アンサンブルを、降雨流出モデル、洪水氾濫モデルに入力し、球磨川洪水予測に関する検討を実施したので、これを報告する。本稿の内容は、Kobayashi et al. [2]でまとめられた内容の日本語要約である。

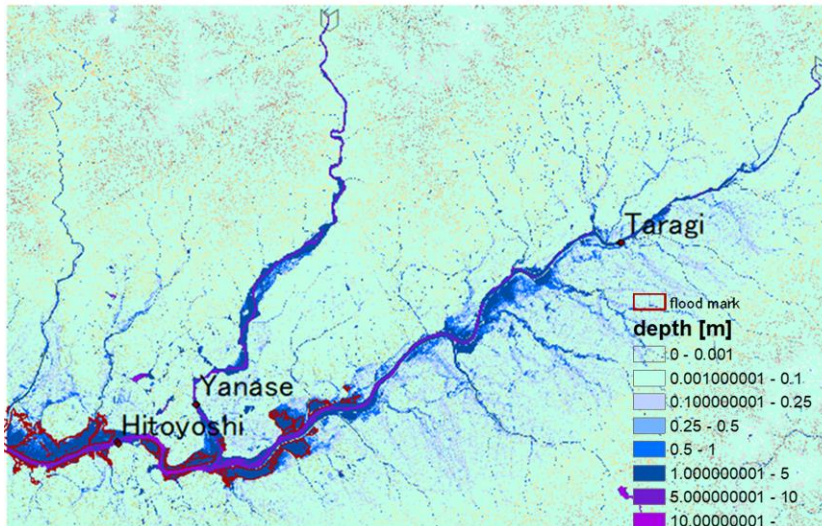
## 1.2 手法

1000アンサンブル降雨についてはDuc et al. [1]を参照されたい。降雨流出モデルには、流域平均雨量からダム流入量を算定できる貯留関数法を用いた。貯留関数法は、狭い領域の急激な流量増加を再現するのが難しい場合があるものの、比較的広範囲のダム流域であれば、事前に観測値でキャリブレーションすることにより良い精度で洪水予測をすることが可能と考えられている。流域平均雨量を入力とするため、3次元アンサンブル降雨予測のメンバー間の多様性を空間平均化により減少させる効果があり、結果として洪水予測の不確定性を軽減することを期待してこれを用いた。計算時間は1000回の計算がXeon CPU E5-2670で15秒程度である。他方、貯留関数法は、解析雨量のような観測降雨を用いても、洪水イベントごとにパラメータ再設定が必要となることが多いことも知られており、流出モデル自体の不確定性を軽減するために、カルマンフィルタによりデータ同化する短期予報計算も実施した。

また、市街地の計算は浅水流方程式により実施した。このモデルは富岳に実装されており、大規模な計算も短時間で実施することが可能である[3]。各浸水計算は5m解像度、 $5309 \times 3399 = 18,045,291$ 節点の計算で、192CPUを用いて24時間分の洪水計算が1時間程度で可能である。これを1000アンサンブル降雨に対応して1000回計算している。洪水計算は空間差分距離が気象計算に比較して小さいため、同程度のメッシュ数であれば、支配方程式の複雑性の差はあるものの、計算コストは気象計算より高いので、基本的に富岳は必要である。

## 1.3 結果

浸水計算結果の一例を図A-1に示す。図は球磨川流域の市房ダム、川辺川ダム（建設予定地）における流量及び解析雨量を入力値として再現計算を実施した結果である。図の計算浸水範囲は国土地理院により作成された痕跡洪水範囲を比較的良く再現している。この計算結果を基準に、市房ダム、川辺川ダムの1000アンサンブル降雨流出計算を実施し、図A-1の領域での1000アンサンブル浸水計算を実施した。結果として、1000アンサンブル計算は20程度のアンサンブル計算に比較して再現精度が統計的に向上すること、他方、今回の計算については100アンサンブル程度でも良い精度の予測ができる可能性が見て取れたため、これらの結果についてKobayashi et al. [2]で報告した。



図A-1 浸水計算結果例 (After Kobayashi et al. (2023))

#### 参考文献

- [1] Duc L, Kawabata T, Saito K, Oizumi T, Forecasts of the July 2020 Kyushu heavy rain using a 1000-member ensemble Kalman filter. SOLA 17:41-47. <https://doi.org/10.2151/sola.2021-007>, 2021
- [2] Kenichiro Kobayashi, Le Duc, Takuya Kawabata, Atsushi Tamura, Tsutao Oizumi, Kazuo Saito, Daisuke Nohara and Tetsuya Sumi, Ensemble rainfall-runoff and inundation simulations using 100 and 1000 member rainfalls by 4D LETKF on the Kumagawa River flooding 2020. Prog Earth Planet Sci 10, 5. <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00537-3>, 2023
- [3] Kobayashi K, Kitamura D, Ando K, Ohi N, Parallel computing for high-resolution/large-scale flood simulation using the K supercomputer. Hydrol Res Lett 9(4):61-68. <https://doi.org/10.3178/hrl.9.61>, 2016

#### ①-2. 巨大アンサンブル気象予測を活用した広域高潮リスクマネジメント

計算能力の飛躍的な向上とデータ同化手法などの統計数理の進展に支えられ、極端気象現象の確率的な予測が可能になってきた。気象庁ではメソアンサンブル予報システム(MEPS)が現業利用され、21メンバーの水平分解能5kmの予測が行われている。一方、研究レベルでは次世代スーパーコンピュータの利用により、MEPSと同等以上の水平分解能で1000を超えるメンバー数のアンサンブル予測が実施されており、その気象予測としての有用性や洪水氾濫警報への応用可能性が探求されている。不確実性を含む予測情報をどのように活用して個人に適切な行動変容を促すかがImpact-based forecasting (IBF)において重要であるため、アンサンブル予測がもたらす不確実性情報がIBF達成において極めて重要である。

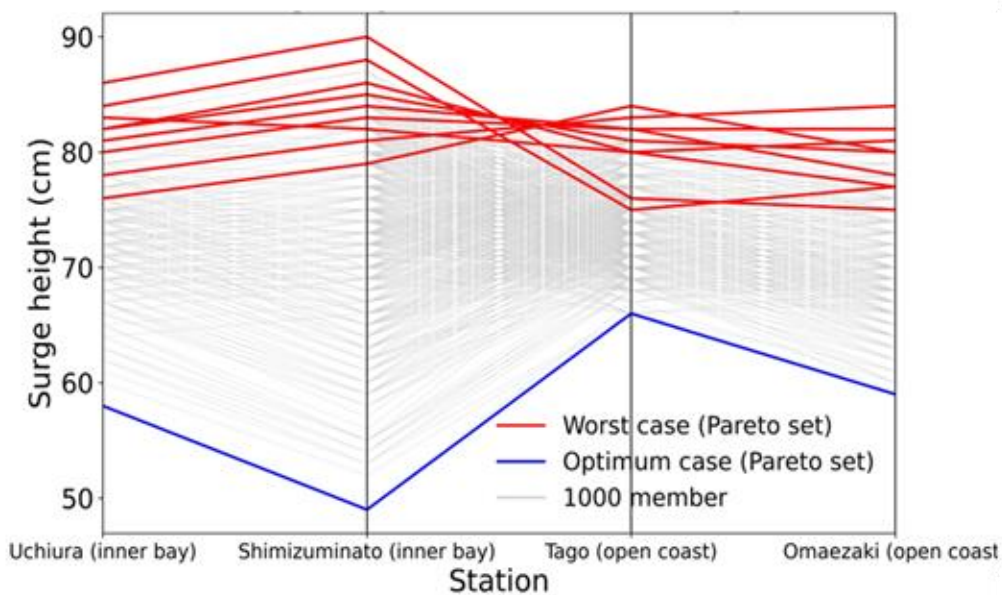
しかし、巨大アンサンブル気象予測の活用方策については、その出力データの膨大さ、複雑さもあり、十分に検討が進んでいない。自治体の境界を越えた広域避難や災害支援の検討も進む中、巨大アンサンブルで描かれる多地点かつ多数の災害シナリオの利用法について知見が求められている。本研究では、多地点における多様な水害リスクを巨大アンサンブル気象予測に基づいたシナリオ分析により解析する手法を提案する。

令和元年度東日本台風を対象事例とし、気象庁非静力学モデルを用いた1000アンサンブルによる39時間予測を行った。アンサンブル生成手法としてはEnVarを用いた。得られた1000メンバーの台風の情報を使ってStorm Surge Hazard Potential Index (SSHPI)を計算し、関東・東海地方の8地点の潮位観測地点における最大潮位を計

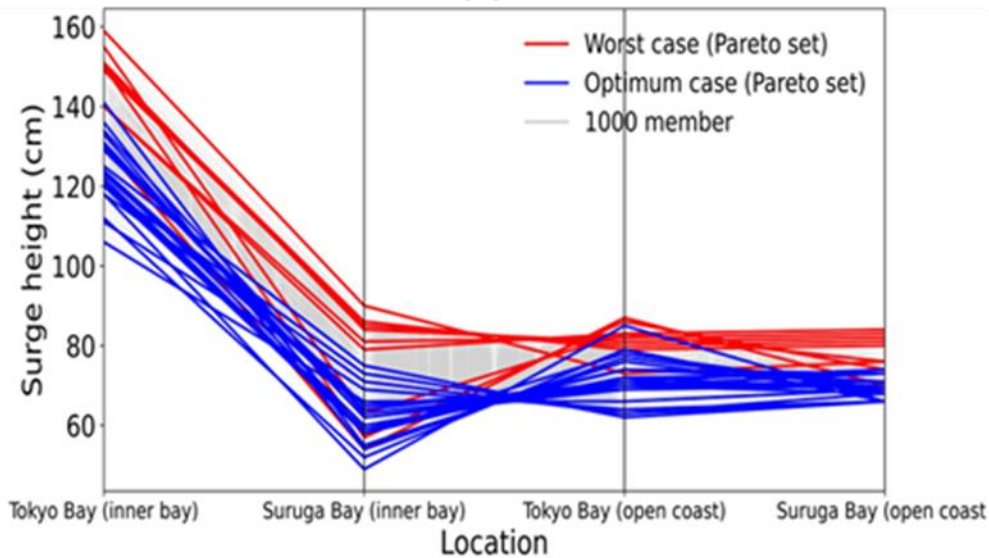
算した。

本研究では、この1000メンバーの多地点における最大潮位の計算結果から多目的最適解であるパレートフロンティアとなるメンバーを抽出することを提案する。この手法では例えば地点A, Bにおいて「地点Aにとっては甚大な被害をもたらすが、Bにとっては危険でないシナリオ」とその逆の両方を一つの最適（最悪）解の集合と見立てる。防災においては最悪シナリオが要求されることが多いが、広域的な災害において各地点にとっての最悪シナリオを単純に重ね合わせるよりも現実的な最悪シナリオの集合を得ることができる。

図A-2では4つの地域に集約して全1000メンバーの最大潮位を示した。赤線は1000メンバーの中で潮位が最大になるパレートフロンティアの集合を書いたもので、青線は潮位が最小になるパレートフロンティアを書いたものである。図A-2上のように狭い地域に限定するとそのようなことは起きていないが、図A-2下のように駿河湾・東京湾全域に跨った解析では赤線と青線は一部交差している。これはある地点にとって甚大な高潮ハザードをもたらすシナリオが、必ずしも他地点にとってもリスクの高いシナリオではないということを端的に示している。パレートフロンティアを求めることで、1000メンバーの気象予測に含まれる現実には起こりうる少数の最悪シナリオを抽出することができた。







図A-2. 1000メンバー気象アンサンブルすべての最大潮位。(上)駿河湾のみの結果。(下)駿河湾と東京湾両方の結果。

### ①-3. 大アンサンブルを用いた線状降水帯の予測精度に関する研究

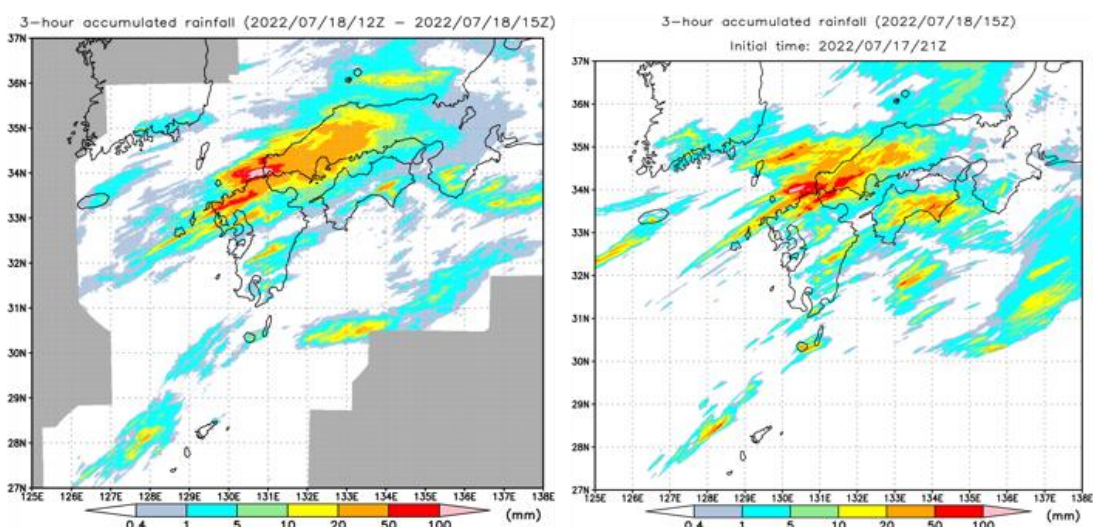
線状降水帯による豪雨は毎年のように発生し、河川の氾濫や土砂災害によって多くの災害をもたらす。2022年には7月から9月にかけて11件の線状降水帯が発生した(表A-1)。しかし、このような顕著現象は非線形性が強く予測が困難である。近年、数値予報モデルとデータ同化技術の発展によって、線状降水帯の予測精度は向上してきたが、防災の面ではより長いリードタイムを持った予測が必要不可欠である。本研究では、2022年7月18日から19日にかけて山口県や九州北部で発生した線状降水帯の予測可能性を1000メンバーアンサンブルデータ同化及び予測実験を行い調査する。

本研究では、NHMに局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)を適用したNHM-LETKFシステムを使用した。低解像度のインナーモデル15kmと高解像度のアウトターモデル5kmから構成される。アンサンブル数は1,000とし、水平局所化スケールは700kmで鉛直局所化は適用しないこととした。データ同化は3時間サイクルで、期間は2022年7月15日00UTCから7月20日00UTCとした。データ同化で得られた5km解像度の解析値と15km解像度の解析インクリメントから2km解像度の初期値を作成し、決定論的予測とアンサンブル予測実験を7月17日21UTCから24時間実施した。

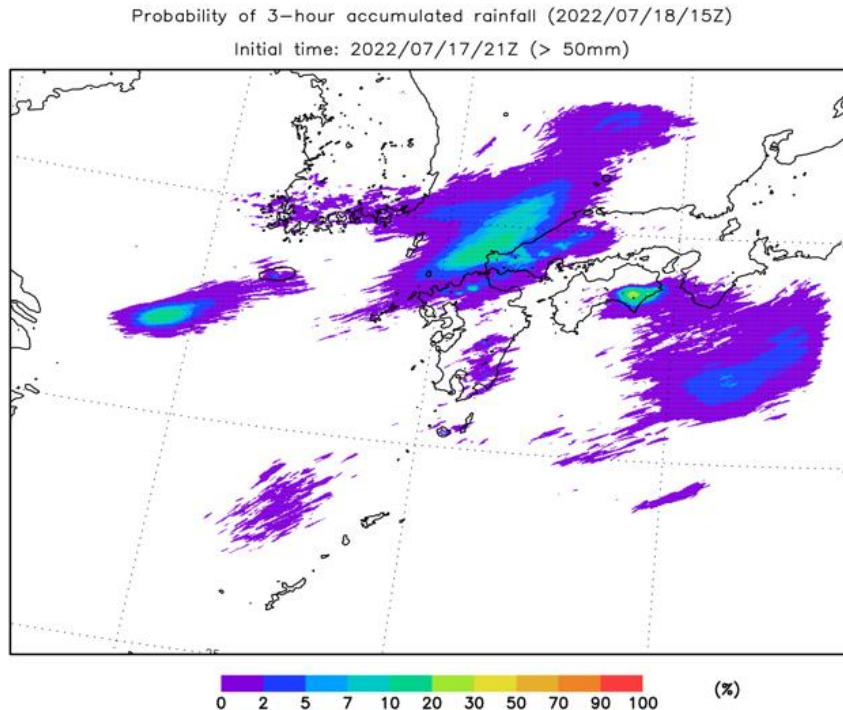
2022年7月18日夜から明け方にかけて、朝鮮半島から日本海に進む低気圧と前線に伴って山口県や九州北部で線状降水帯が発生し大雨となった(図A-3)。1000メンバーデータ同化の解析値を水平解像度2kmでの決定論的予測の結果、線状降水帯の位置及び降水量を精度よく半日以上前から予測することができた。日本海上の前線に向かって九州の西から可降水量が70km/m<sup>2</sup>を超える非常に湿潤な空気が流入していることがわかった。また、1000メンバーでのアンサンブル予測の結果(図A-4)、予報時間が比較的長いためメンバー間のばらつきが大きいものの山口県や九州北部で大雨が発生する可能性を捉えた(10%~20%)。

7月5日	四国地方	線状降水帯が発生（高知県）	呼びかけできず	
7月15日	九州南部・奄美地方	線状降水帯は発生せず	呼びかけを実施	
	九州北部地方	線状降水帯は発生せず	呼びかけを実施	
7月18日	九州北部地方	線状降水帯が発生（長崎県）	呼びかけできず	
7月18日～19日	九州南部・奄美地方	線状降水帯は発生せず	呼びかけを実施	
	九州北部地方	線状降水帯が発生（山口県、福岡県、佐賀県、大分県）	呼びかけを実施	適中
8月3日	東北地方	線状降水帯が発生（青森県、秋田県）	呼びかけできず	
	東北地方	線状降水帯が発生（山形県）	呼びかけできず	
	北陸地方	線状降水帯が発生（新潟県）	呼びかけできず	
8月4日	北陸地方	線状降水帯が発生（福井県）	呼びかけできず	
8月12日～13日	東海地方	線状降水帯は発生せず	呼びかけを実施	
	関東甲信地方	線状降水帯が発生（伊豆諸島）	呼びかけできず	
9月3日～4日	沖縄地方	線状降水帯は発生せず	呼びかけを実施	
9月5日～6日	九州北部地方	線状降水帯は発生せず	呼びかけを実施	
9月17日～19日	九州南部・奄美地方	線状降水帯が発生（宮崎県）	呼びかけを実施	適中
	九州北部地方	線状降水帯が発生（熊本県）	呼びかけを実施	適中
	四国地方	線状降水帯は発生せず	呼びかけを実施	
9月18日～19日	中国地方	線状降水帯は発生せず	呼びかけを実施	
	近畿地方	線状降水帯は発生せず	呼びかけを実施	
9月19日～20日	東海地方	線状降水帯は発生せず	呼びかけを実施	
9月23日～24日	東海地方	線状降水帯が発生（愛知県、静岡県）	呼びかけできず	

表A-1 2022年7月以降の線状降水帯の発生状況と気象庁による予測情報の発表。  
 (https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/jirei/senjokousuitai/R04jisseki.pdf  
 より引用)



図A-3 2022年7月18日15UTCの（左）解析雨量と（右）2km解像度決定論予測の前3時間積算雨量。



図A-4 水平解像度2kmでの1000メンバーアンサンブル予測による3時間積算降水量が50mmを超える確率（初期時刻：2022年7月17日21UTC、予報対象時刻：2022年7月18日12UTC～15UTC）。

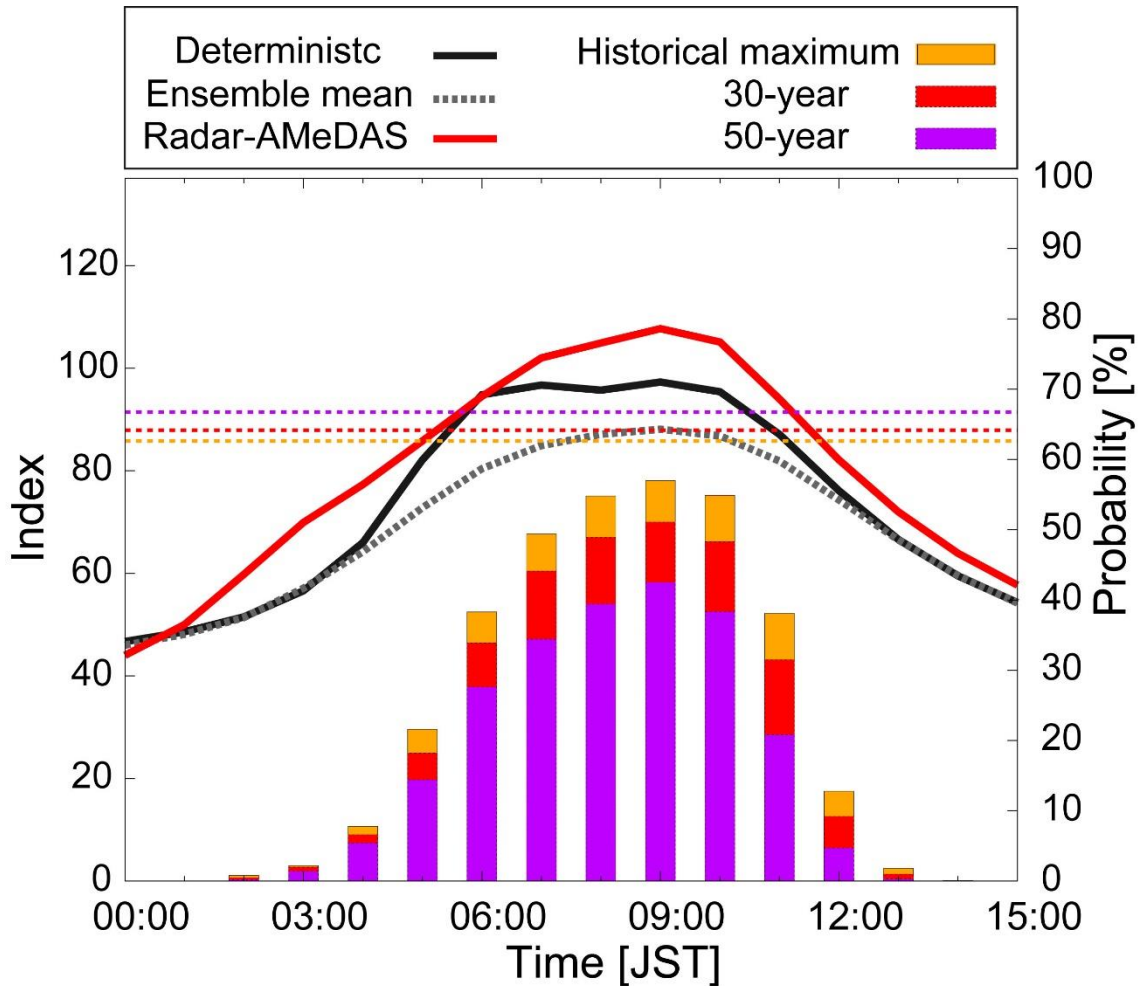
#### ①-4. アンサンブル予報を用いた洪水のImpact Based Forecasting

近年、気象予測のみならず、その気象状況が及ぼす影響まで予測することが求められている。WMOは気象状況が及ぼす影響まで予測することを” Impact based forecasting (IBF)”と定義している。日本においてはキキクルによって災害のリスクが示されており、すでにIBFは社会実施されているといえる。しかしキキクルの課題としてリードタイムが短いことがあり、リードタイムを長くすることが課題となっている。そこで本研究では大アンサンブル予報と流域雨量指数を組み合わせ、洪水の予報時間を延長と洪水のリスクを確率的に示すことを試みた。

2020年7月に球磨川で発生した洪水事例を対象に実験を行った。用いたアンサンブル予測データは (Duc et al. 2021) によって実施された1000メンバーである。洪水の予測モデルは洪水キキクルで用いられている流域雨量指数である。洪水の予報実験は6月1日0時 (JST) から7月3日18時まで解析雨量でスピナップを行い、7月3日18時から翌日15時までアンサンブル予報を行った。

図A-5に球磨川で甚大な被害が発生した球磨村渡地区での1000メンバーの流域雨量指数の結果を示す。解析雨量を用いた結果では7月4日5時に流域雨量指数の既往最大値を超過し、9時にピークに達している。土木学会調査団の報告でも同地点では4時50分から氾濫が始まった事が報告されており、解析雨量を用いることで既往最大値を超過したタイミングがほぼ再現できている事が分かった。次に1000メンバーのアンサンブル予報を用いた実験を行った。決定論的予報では6時に既往最大値を超過し、9時頃ピークに達している。1000メンバーのアンサンブル予報を用いた実験では、5時に既往最大値を超過する確率は20%であった。既往最大値、30年確率、50年確率の超過確率はそれぞれ60%、50%、40%であった。本実験では大規模なアンサンブル予報を用いることで洪水の発生確率を10時間前に示すことができた。予測精度がよかった理由として、流域雨量指数のスピナップに解析雨量を用いたこと、本実験を球磨川の本流で行ったことが考えられる。洪水の予測では先行降雨によってどの程度地面

に水が含まれているかは重要な要素である。また流域が広い場合は多少降水の位置や強度が実況と異なっても流域全体での総和がおおむね一致すれば予測精度を大きく損ねない事が考えられる。その為、本手法が規模の小さい河川に対してどの程度有効であるかを明らかにすることや、小規模河川の予測に必要なアンサンブル数を調べることは今後の課題である。



図A-5 球磨川（球磨村付近）での1000メンバーアンサンブル洪水予測結果。実線は解析雨量（赤）、決定論的予報（黒）、点線はアンサンブル平均（黒）、50年確率値（紫）、30年確率値（赤）、既往最大値（橙）の流域指数の値（縦軸）を示す。棒グラフは50年確率値（紫）、30年確率値（赤）、既往最大値（橙）の超過確率（第2縦軸）を示す。

[1] Duc, L., et al., 2021, Forecasts of the July 2020 Kyushu heavy rain using a 1000-member ensemble Kalman filter, SOLA, Vol.17.

①-5. Approximation of gradient flows in Stein variational gradient descent using surrogate models

The Stein variational gradient descent (SVGD) is a Bayesian inference technique that enables us to sample from any posterior probability density functions (pdf), and only requires their unnormalized forms. SVGD works by using gradient flows computed from a target pdf to move an

arbitrary ensemble of particles to this pdf. Thus, SVGD is inherently parallel, which is an advantage compared to sequential Markov chain Monte Carlo methods. However, calculation of these gradient flows requires the derivative of the target pdf. In parameter estimation, this is equivalent to taking derivatives of models with respect to parameters, which is usually infeasible for complicated models like hydrological models where models are used as black boxes.

In this study, we propose to approximate gradient flows using surrogate models for posterior pdfs. Due to its possibility in reproducing derivatives of any functions given their values, Gaussian processes are used in the learning process. Gaussian processes work by first generating random samples of parameters to calculate the values of the posterior pdf at these samples. However, these random samples easily miss high-density regions of the posterior pdf. Instead, we construct adaptive samples using Bayesian global optimization technique. Surrogate functions are then constructed from those adaptive samples. We illustrate this approach with parameter estimation for several hydrological models.

#### 参考文献

Duc, L., and Y. Sawada, 2022: Approximation of gradient flows in Stein variational gradient descent using surrogate models. *American Geophysical Union Fall Meeting*, Chicago, USA.

#### ①-6. Probability prediction of strong wind using high-resolution 1000-member ensemble simulations: A case study of Typhoon Hagibis (2019)

In Japan, disasters caused by strong winds frequently occur, especially during the strike of typhoons. Informative forecasts of high-impact weather events are crucial for individuals and governments to prevent and mitigate disasters and manage risk. Probability forecasts are critical information to tackle the uncertainty in weather forecasts caused by the chaotic nature of the atmosphere. Compared to rainfall forecasts, the probability forecasts of risky winds are not well developed and are less commonly used in weather forecasts. This study investigated the feasibility of producing flow-dependent probability predictions of strong winds using 1000-member ensembles, focusing on the case of typhoon Hagibis (2019). The 1000-member ensemble simulations of typhoon Hagibis (2019) are performed using the non-hydrostatic model (NHM) of the Japan Meteorological Agency (JMA) with 5- and 1-km horizontal grid spacing.

The investigation revealed that the simulated typhoon tracks are greatly affected by the lateral boundary conditions used in the simulation, which were repeatedly used for every fifty members in the previous construction of ensemble simulations (Fig. A-6a). To solve this problem of under-estimated uncertainty of typhoon forecast caused by lateral boundary conditions, we have undertaken a new 5-km ensemble whose lateral boundary conditions are the linear combination of the perturbation from the global ensemble prediction system (GEPS) of the JMA with additional random Gaussian-shape noise (Fig.

A-6b). The high-resolution 1-km ensemble simulations are conducted by using the initial and boundary conditions generated from the simulation results of the newly conducted 5-km ensemble. Compared with the 5-km ones, the 1-km ensemble simulations are able to capture finer-scale distribution of strong wind over the land, which is more consistent with the observation (Fig. A-7). In addition, the 1-km ensemble well predicts the possibility of the occurrence of strong winds. Over the inland, simulating high wind speed is still difficult even using 1-km resolution. Only a few ensemble members can capture the strong wind, resulting in low probability inland. Nevertheless, the high probability of strong wind is predicted over the coast area, which generally agrees with the observation. (Fig. A-8). Overall, the results suggest the feasibility of producing probability forecasts of winds using ensemble forecasts. It is expected that using higher resolution large-size ensemble simulations could deliver more accurate and detailed weather forecasts for high-impact strong wind events.

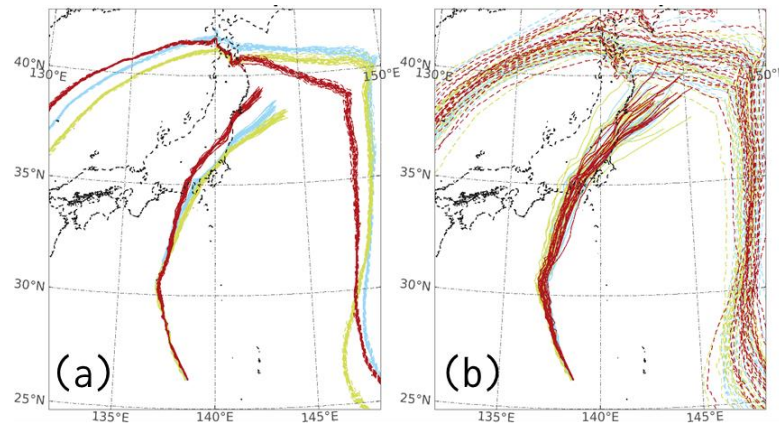


Figure A-6: Simulated tracks (solid) of typhoon Hagibis (2019) and simulated sea level pressure at 1200 UTC on Oct. 12, 2019 (dashed, 1015 hPa). (a) The ensemble repeatedly using the same boundary condition for every fifty members. Three sets are randomly chosen and depicted; members using the same BC are depicted in the same color. (b) The same as (a) but for the new-conducted ensemble.

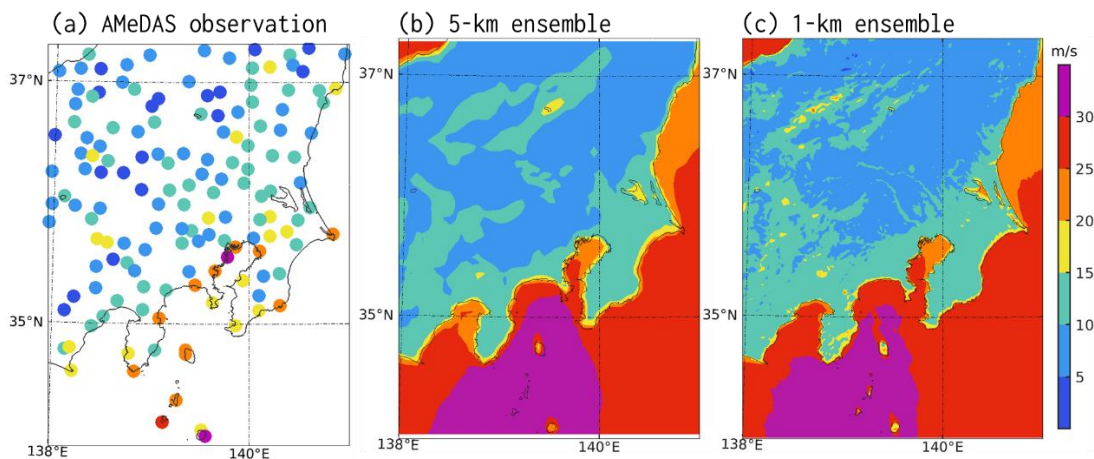


Figure A-7: (a) The maximum 10-minute-mean wind speed during the strike of typhoon Hagibis (2019) at AMeDAS observation stations and the simulated maximum near-surface wind during the computing period of the ensemble median value at each grid point for the (b) 5-km and (c) 1-km ensemble.

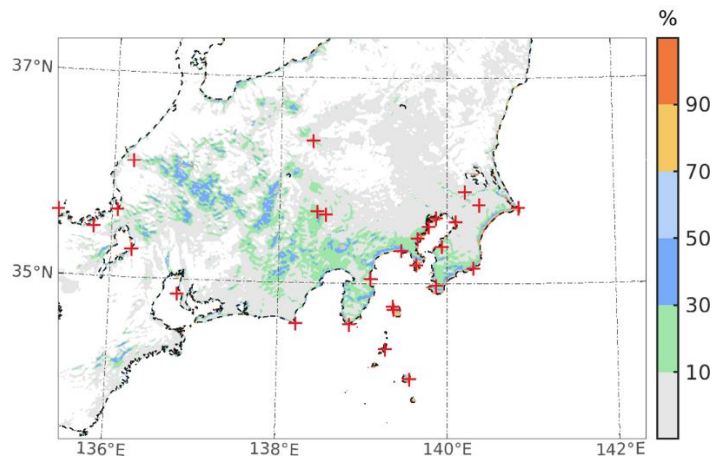


Figure A-8: The probability prediction (color shaded) of the wind speed greater than 15 m/s at 1300 UTC on Oct. 12, 2019 and the location of the AMedAS station where the wind speed over 15 m/s is observed at 1200 or 1300 UTC (red cross marker).

#### ①-7. 気象アンサンブル解析による極端気象の高解像度被害推定に関する検証

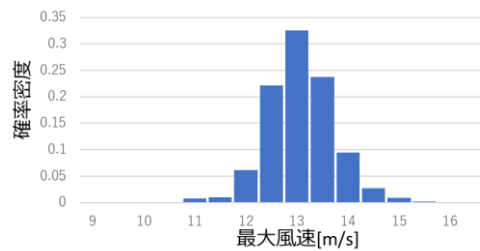
都市広域の強風事象に対して地表近傍での高解像度被害推定を実現するために、NHMに基づく気象アンサンブル解析結果に対して都市防災上重要度の高いメンバーの抽出を行ったうえで、NHMの気象条件をダウンスケーリングした境界条件に基づいて東京の市街地を対象とした強風に対する高解像度被害推定を実施した。解析結果については、2019年台風19号の東京市街地における実被害事例との比較を実施することで、強風の被害レベルに関する検証を行った。

#### 気象アンサンブルデータにおける都市LES解析用メンバーの抽出

強風による被害発生を予測するためには、気象場擾乱に基づく風速変動を再現した流入風による都市・市街地の large eddy simulation (LES) 解析の有用性が指摘されているが、気象場の構造および乱流過程には不確実性が含まれることから、市街地内部でのピーク風速・建物表面に発生する風圧の評価にあたっては、その確率的性質の吟味が必要である。気象モデルを用いた解析に比べて都市・建築空間の耐風設計の評価に必要な都市LES解析の計算負荷は高く、多数のメンバーによる大アンサンブル解析にはいまだ困難が存在する。そこで本研究では、東京都心で顕著な強風（最大瞬間風速41.5 m/s、10分平均風速16.8 m/s）を記録した2019年台風19号を対象に、気象庁非静力学モデル（NHM）の1km解像度による1000メンバーの大アンサンブルデータから、都市LESを実施するため、確率的情報が防災の観点で重要となる特徴を持つメンバーの抽出を、下記の4種類の観点に基づいて行った。

- 対象市街地において最も風速が高いケースの抽出（10メンバー）
- 対象市街地において風速の確率頻度分布で最頻となるのケースの抽出（10メンバー）
- 台風の進路が実況の台風進路に類似したケースの抽出（10メンバー）
- 全体の確率分布の形状を保持するランダムな抽出（30メンバー）

図A-9に東京管区気象台の位置において取得した台風通過時間帯の1000メンバーアンサンブルデータによる風速最大値の分布を示す。格子解像度は1kmであり、おおむね10分間平均風速相当に相当すると考えられる。平均値は12.8m/s、標準偏差は0.67m/sであった。最も風速の高い10メンバーは14.6 m/sから15.8 m/s範囲であり、最頻値は13m/sであった。図A-10に風速の最頻値（最大確率）、最大値に基づいて抽出したメンバーの典型例を示す。最頻値に基づいて抽出したメンバーはいずれも実況と同様に伊豆半島付近に上陸したものと見られ、進路に沿って伊豆半島東岸に最大風速となる領域が帯状に分布し相模湾の西側から中心に伸びている。一方、最大値に基づいて抽出したメンバーは高風速領域がより東方向に伸びる分布を持ち、伊豆半島の東岸付近から神津島、相模湾の東側から三浦半島付近へ伸び、東京湾内で風速が上昇する傾向であることが確認された。



図A-9 1km解像度・1000メンバー台風1919号アンサンブルによる東京管区気象台位置における最大風速の分布

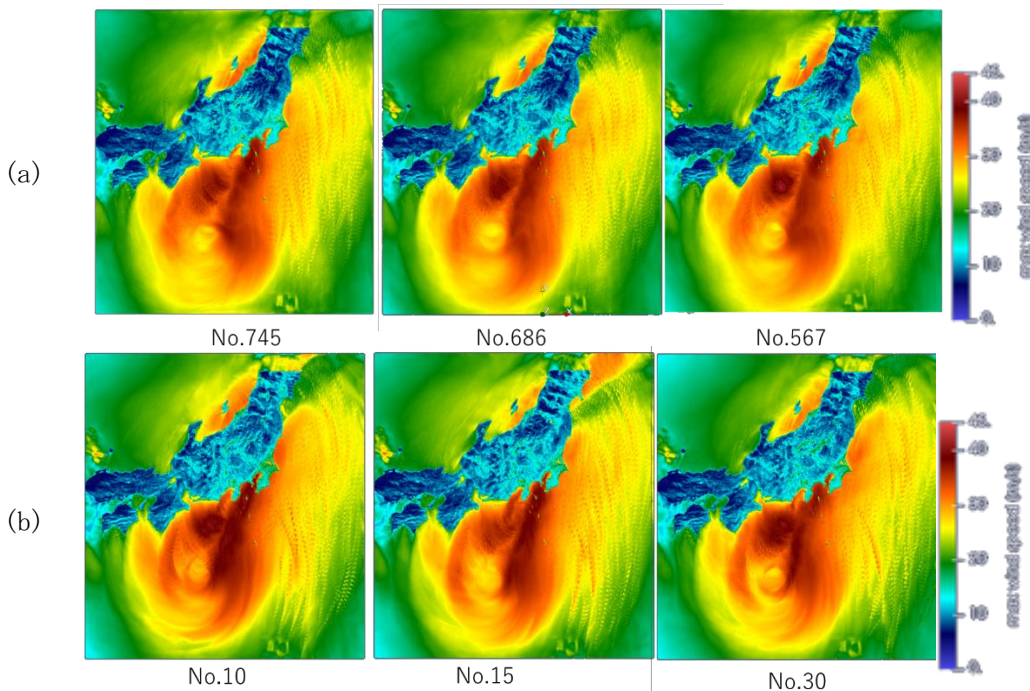


図 A-10 東京管区気象台の位置における風速に基づいたメンバーの抽出例 (色付けは各点の経験した最大風速を表す) (a)最頻値による抽出(b)最大値による抽出

①-8. 地表近傍のダウンスケールシミュレーションに基づく都市高解像度解析による強風評価・被害推定

数値気象モデルNHMをダウンスケーリングし作成した気象擾乱を含む変動風を用いて、東京大手町付近の6 km×4 km の領域 (図A-11) を対象とする都市高解像度LESによる強風解析を試みた。数値流体計算ソルバーはマルチブロック階層型直交格子を採用したCUBE (理研R-CCS) であり、格子解像度は2 m、時間刻みは $2.5 \times 10^{-4}$  s、サブグリッドスケールモデルはDynamic Smagorinsky modelである。流入変動風は北側を除く側方の3面の境界から与



えた。

図A-12は観測点を通る南北方向（近似的な主流方向）断面における速度の瞬間場を示す。地表の建物により生じた乱流構造に上空に台風に由来する大規模な強風構造・渦構造が重層し、mixingにより局所的に地表近傍に強風が輸送される様子が再現された。



図 A-11 地表モデル（大手町地区）

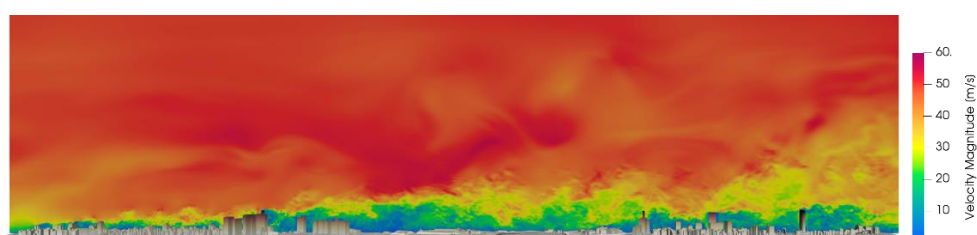


図 A-12 観測地点を通る南北鉛直断面における速度の瞬間場（21:00:45 JST, ▲は観測点）

図A-13は観測高さ（海拔56.3 m）の水平面における瞬間の速度場および観測地点周辺における流線図である。観測高さ付近では100 m程度の幅の狭い帯状の強風域が流れに沿って伸長することが明らかとなった。また、観測点の上流など開けた場所では500 m程度の吹走距離で風速の回復が見られた。図A-14は観測を行っている建物周りでの風速場および流線図である。建物側面の剥離せん断層による増速や建物周りの渦構造が再現されることが確認された。観測点（地上35m）において観測と風速風向変動が発生したが、その幅は観測より小さく、最大瞬間風速は34.0 m/sであり観測値をやや過少評価した。市街地では地表近傍でも25 m/sを超える暴風がところどころで確認された。最大瞬間風速台風19号通過後、観測点近くの皇居や麴町付近、また都内の多数地点において樹木の幹、枝の折損被害が生じており、台風の実被害レベルとおおむね対応する結果が得られた。

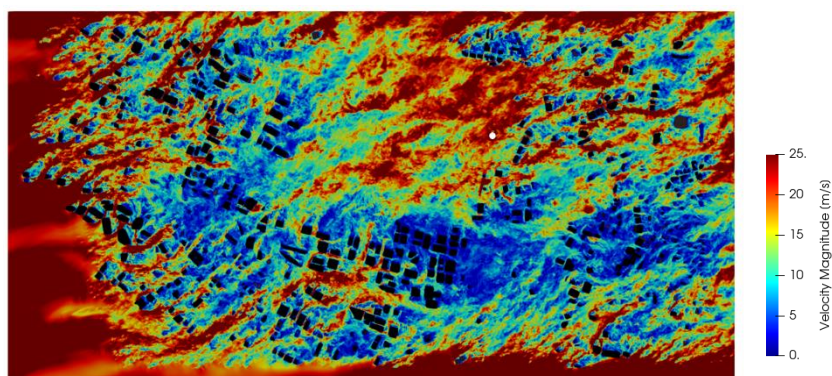


図 A-13 観測高さ(海拔 56.3 m)における瞬間の速度場（21:00:50 JST, 白い丸は観測点）

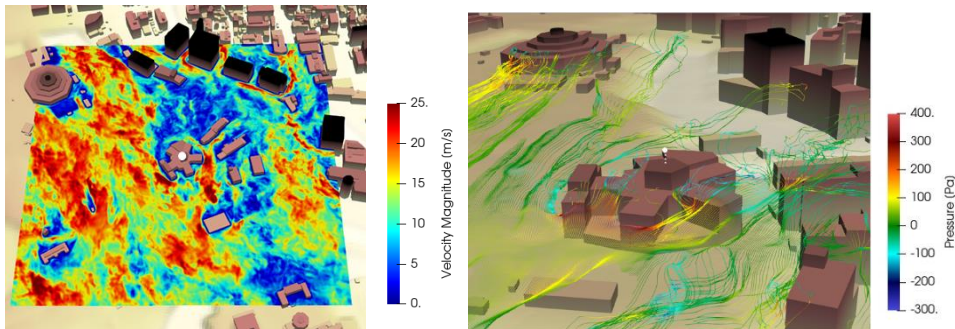


図 A-14 観測建物周辺の速度場(海拔 40 m)と流線図 (21:00:50 JST, 白い丸は観測点)

## 参考文献

Kawaguchi M, Tamura T, “LES-based generation of time sequential data of instantaneous urban wind in typhoon -comparison with observational data”, 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Online, July 2022.

川口真晴, 田村哲郎, 市街地における台風時最大瞬間風速の発生に関する物理機構, 第36回数値流体力学シンポジウム, オンライン, 2022年12月

川口真晴, 田村哲郎, 台風下の高層建築物に作用するピーク風圧のLES 解析, 2022年度日本建築学会大会(北海道) 学術講演会, オンライン, 2022年9月

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

## ②サブテーマB: 先端的データ同化と巨大アンサンブル手法

### ②-1. スーパーコンピュータ「富岳」を用いた2021年夏季リアルタイムゲリラ豪雨予測の結果解析

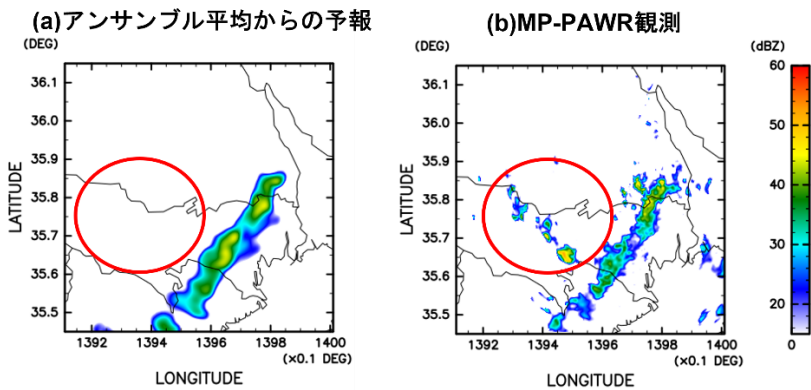
2021年7月20日から8月8日までと、8月24日から9月5日までの期間、スーパーコンピュータ「富岳」のリソース約9%を占有利用し、首都圏を対象とした30秒ごとに更新する30分後までの超高速高性能降水予報のリアルタイム実証実験を行った。現在、実証実験期間中に発生した顕著な降水事例を抽出して、パフォーマンスの評価や今後の予報システムの改善点の検証を進めている。

本実証実験では、領域気象予報システムSCALE-LETKF (Miyoshi et al. 2016, Lien et al. 2017) を2重ネスティングして計算を行った。外側領域は、5 km解像度の気象庁メソモデル(JMA-MSM)のデータに擾乱を与えて1000メンバーの初期アンサンブル、それに対応する境界値を作成し、1.5km解像度にダウンスケーリングして8時間先まで予報を行った。この結果を500m解像度にダウンスケーリングして内側領域の初期アンサンブル・境界値を作成し、埼玉大学に設置されたマルチパラメータフェーズドレイ気象レーダー(MP-PAWR)を30秒毎に同化した。そして、30秒毎の解析値を初期値とした、30分先までの予報実験を行った。今年度は、2021年8月7日1100 JST頃に30 mm h<sup>-1</sup>以上の降水を観測した局地的豪雨事例を対象に、実証実験の結果解析を行った。なお、実証実験では計算資源の都合上、30分先までの予報は10メンバーにリサンプリングして実行したが、本解析にあたって1000メンバー全てにおいて30分予報を追加実行した。

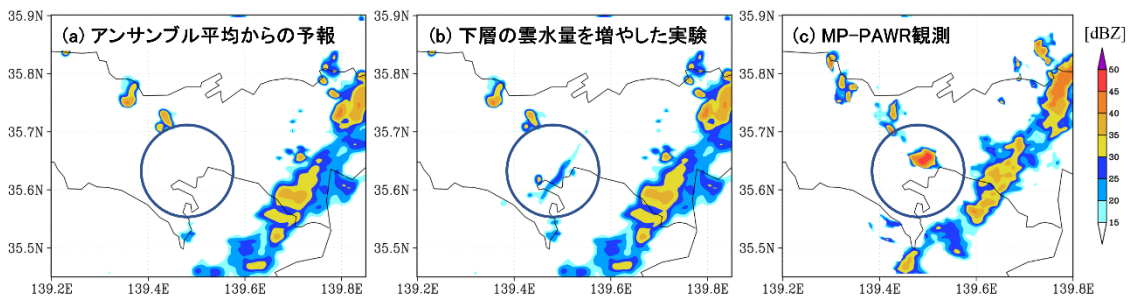
2021年8月7日1100 JSTにおける1000メンバーのアンサンブル平均の解析値を初期値とした20予報(Valid time 1120 JST)の結果を図1a、同時刻におけるMP-PAWRの観測結果を図1bに示した。カラーシェードは高度2 kmにおけるレーダー反射強度[dBZ]を示す。MP-PAWRでは、最大で45dBZ程度の降水帯が南西-北東方向に伸びており、さら

に東京都多摩地区に、孤立積乱雲によるものと考えられる降水が観測されている(図1b)。リアルタイム予報の結果では、主たる降水帯に関して、MP-PAWRの観測より3dBZ~5dBZ過大に表現されている個所がみられるものの、降水分布はMP-PAWRの観測と高い整合性を得ている(図B-1a)。しかしながら、孤立積乱雲による降水は予報することができなかった(図B-1 a, b赤丸)。

この原因として、孤立積乱雲発生域周辺の下層大気調べたところ、 $10^{-4} \text{g kg}^{-1}$ のわずかな雲水しか見られず、水蒸気から雲水への変換がほとんど進んでいないことがわかった。そこで、MP-PAWRで観測された孤立積乱雲の中心から半径25 km、高度2 km未満の領域に対して、1100JSTのアンサンブル平均の解析値における雲水量を5倍に増加させ、その値を初期値とした30分予報をする感度実験を行った(図B-2b)。その結果、MP-PAWRの観測結果に比べて強度は60%程度であるが、元々の解析値を初期値とした場合では全く発生しなかった降水が発生した。これにより、地上気象観測などを追加で同化するなどして解析値における大気下層の状態を改善することで、解析時刻には存在せず新たに発生する降水減少に対しても、予報の可能性があることが示唆される。



図B-1: 1120 JSTにおける(a)アンサンブル平均の解析値からの予報結果、(b)MP-PAWRの観測。カラーシェードは高度2 kmにおけるレーダー反射強度[dBZ]を示す。



図B-2 : 1120 JSTにおける(a)アンサンブル平均の解析値からの予報結果、(b) 大気下層の雲水量を増やした予報実験の結果、(c)MP-PAWRの観測。カラーシェードは高度2 kmにおけるレーダー反射強度[dBZ]を示す。

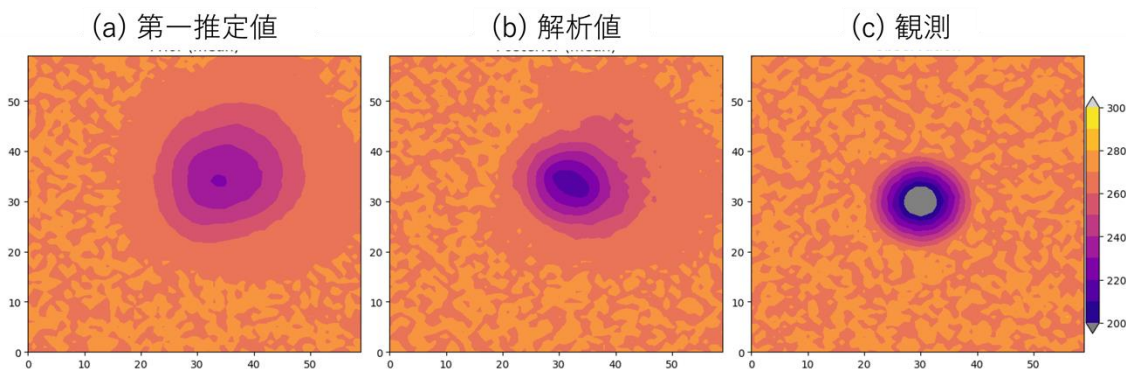
#### 参考文献

- 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.
- Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, 8, 3393-3419.

## ②-2. パーシステントホモロジーを用いたデータ同化の検討

ひまわり8号による赤外輝度温度のような気象衛星観測をデータ同化する際、一般的には観測ピクセルごとにシミュレーションと観測とを比較し、両者の差に応じた修正を行う。シミュレーションと観測とで雲の位置が異なる場合、両者の差が大きくなるため、データ同化による修正が過剰になることがある。そのため、これまでの研究では雲域において観測誤差を膨張させ、データ同化による修正を減じる手法が用いられてきた。

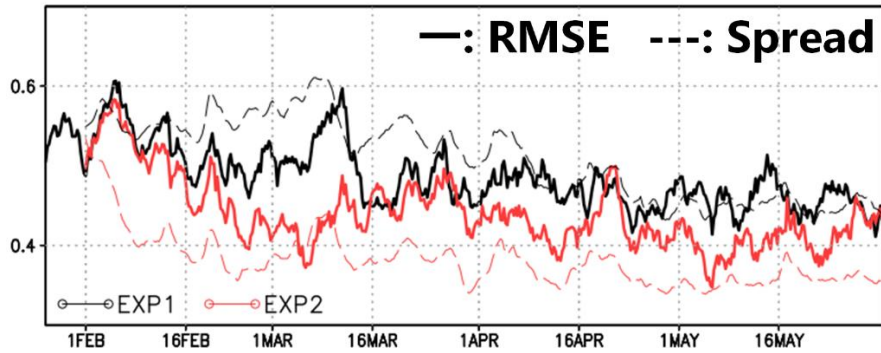
本研究では、この雲の位置ずれへの対処という課題に対応するため、観測とシミュレーションを比較する際に観測のピクセルごとではなく、両者のトポロジカルな特徴を取り出して比較することを試みた。これによって、雲の空間パターンを重視し、雲のわずかな位置ずれによる過剰な修正を避けられると期待される。トポロジカルな特徴の抽出には、パーシステントホモロジーという数学的な手法を使用した。手法の有効性を検討するため、2次元乱数として生成した晴天域に位置や半径を乱数とした疑似的な雲を埋め込むことで、非常に理想的な擬似衛星観測および第一推定値を作成した。図B-3に示すように、パーシステントホモロジーを用いたデータ同化によって、第一推定値よりも観測に近い解析値が得られた。この結果は、パーシステントホモロジーを用いた衛星観測のデータ同化が可能であることを示唆している。



図B-3: (a) 第一推定値、(b) 解析値、(c) 観測における擬似的な衛星観測量の水平2次元分布。縦軸と横軸はともに格子番号。

## ②-3. 局所粒子フィルタ手法の開発

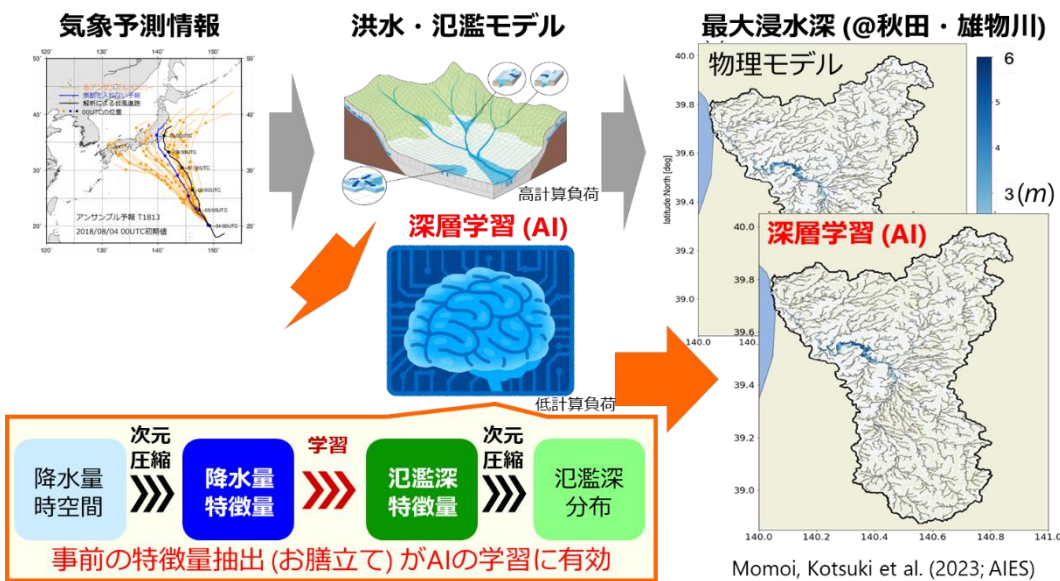
局所粒子フィルタに関する研究に取り組みSPEEDYに実装して実験を行った。予報粒子を用いたデルタ関数の集合で事前分布を表現するのではなく、予報粒子を中心としたガウス分布・カーネルの集合として事前分布を表現する混合ガウス分布・局所粒子フィルタ (LPFGM) への研究を深め、LETKFを上回る予測精度を実現した。以上の成果を欧州地球物理学会のGeoscientific Model Development誌に論文として発表した [Kotsuki et al. 2022]。また、局所粒子フィルタのリサンプリングについても検討を行い、既往研究で用いられてきた最適輸送問題ではなく、エントロピー正則・最適輸送問題を解くことで、計算高速化と力学的にバランスした事後粒子の生成を可能とした。[Oishi and Kotsuki, in revision]



図B-4 SPEEDY用いた行ったモデル第4層の気温予測RMSE（実線）とアンサンブルスプレッド（点線）。アンサンブル40の実験であり、黒線・赤線はそれぞれLETKF・LPGFMの結果を示す。Kotsuki et al. (2022)のFigure 11を改変。

②-4. 機械学習を用いた氾濫予測モデル・エミュレータの開発

深層学習を用いた洪水氾濫モデルのエミュレータ(代理モデル)開発を進めた。入力となる降水予測情報や、出力となる浸水深を事前にオートエンコーダで情報圧縮して重要な情報を抽出し、抽出した情報特徴量の間を全結合NNで学習することで、少ない訓練データで効率的なエミュレータ開発を可能にし、米国気象学会誌のAIジャーナルで論文を発表した [Momoi, Kotsuki et al. 2023]。



図B-5 深層学習による情報特徴量抽出を活用した洪水氾濫モデル・エミュレータの模式図。

②-5. SCALE-LETKF の拡張としての局所粒子フィルタの開発

粒子フィルタは背景誤差・観測誤差の確率分布の形状にガウス分布の仮定を用いず、アンサンブルカルマンフィルタに比べて非ガウス性の強い状況において効果を発揮する。空間的な局所化を行うことで、大自由度の系においても現実的なメンバー数にて粒子フィルタを利用できる。そのような局所粒子フィルタ(LPF)は局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)と同様の変換行列を用いた定式化が可能であるため、LETKF を代替または拡張

する形で LPF を見直し良く実装することができる (Potthast et al., 2018, Kotsuki et al., 2022)。このような LPF の実装を、現在まで高解像度の大量アンサンブル同化実験に用いられてきた領域気象モデル SCALE-RM を用いたデータ同化システム SCALE-LETKF の拡張として実施し、動作確認を行った。

LPF における変換行列はリサンプリングによる粒子の選択に対応するが、通常の LETKF と異なり、各格子点で計算された変換行列の値が隣接する格子点の間で大きく食い違い、解析値に空間的な不連続をもたらすことが起こりうる。そこで、変換行列の計算を粗視化した格子上で行い、周りの格子点ではそれらの値から補間する方法をとった。

乾燥傾圧不安定の理想実験を用いて LPF の動作を確認し性能を LETKF と比較した。適切なパラメータの調整のもと、平均的な解析値の真値に比した精度は LETKF には劣るが大きく下回らないことを確認した。また、メンバー数を大きくしたときの計算の所要時間は、理論的な見積もりの通り、LPF の方が顕著に小さいことを確かめた。

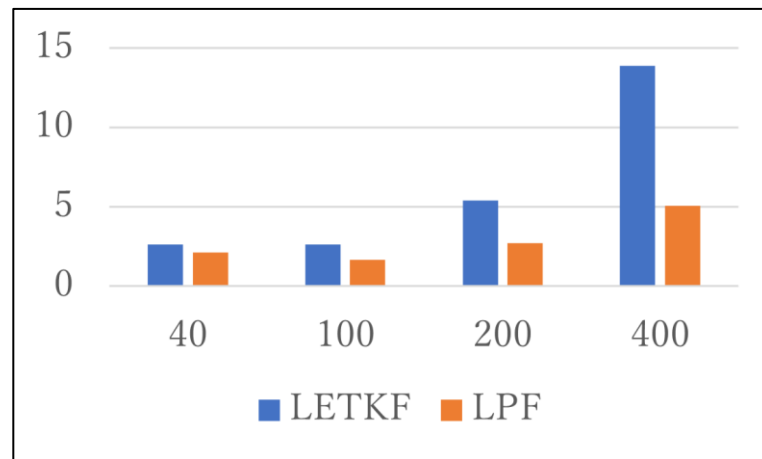


図 B-6 : メンバー数 40, 100, 200, 400 での LETKF と LPF のデータ同化一回あたりの所要時間(秒)。第一推定値には同じ傾圧不安定実験のデータを用い、観測数、メンバー当たりのノード数 (2 ノード) は共通とした。

#### 参考文献

- Kotsuki, S., Miyoshi, T., Kondo, K., and Potthast, R. (2022). A Local Particle Filter and Its Gaussian Mixture Extension Implemented with Minor Modifications to the LETKF. *Geoscientific Model Development Discussions*, 30 (June), 1-38.
- Potthast, R., Walter, A., and Rhodin, A. (2018). A Localized Adaptive Particle Filter within an Operational NWP Framework. *Monthly Weather Review*, 147(1), 345-362.

#### ②-6. Sensitivity testing for horizontal covariance localization scale with the SCALE LETKF

We continued development of the SCALE-LETKF as a regional-scale precipitation forecasting system, including the testing of model parameters in an effort to optimize performance. Sensitivity testing for horizontal covariance localization scale was performed using three case studies of severe weather from Summer 2019. Experiments consisted of refreshing a 500-m mesh with phased array weather radar (PAWR) observations every 30-seconds over a period of 3 hours, initializing 30-minute forecasts from the ensemble mean after each update. Results established a horizontal localization scale of 1-2 km

provided optimal forecast skill based on a threat score analysis. At these scales the rapid growth of convective activity leading to over-intensification in forecasts was reduced. Forecasts with the SCALE-

LETKF were compared to those performed with a simple advection model (Otsuka et al. 2019). For each test case the NWP model forecasts did not perform as well as the advection model up to 30-minute lead times, indicating that more improvement is needed to the SCALE-LETKF to be useful for short-range precipitation prediction. The sensitivity study was published in Weather and Forecasting journal in January 2023.

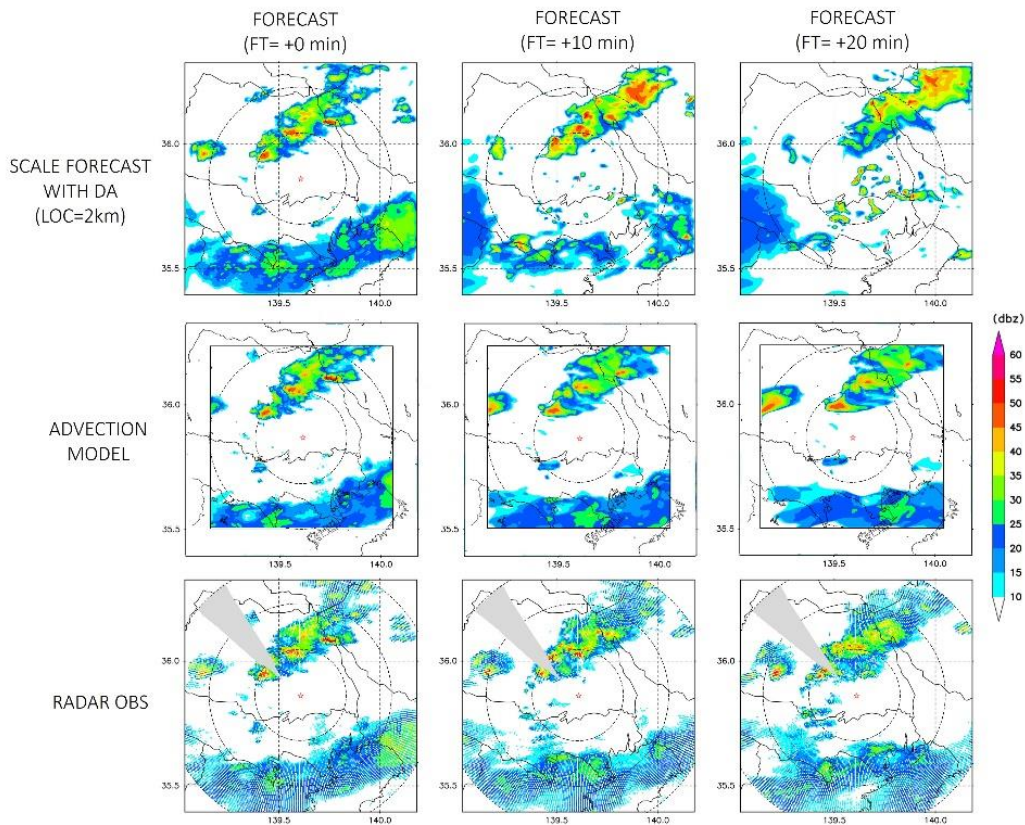
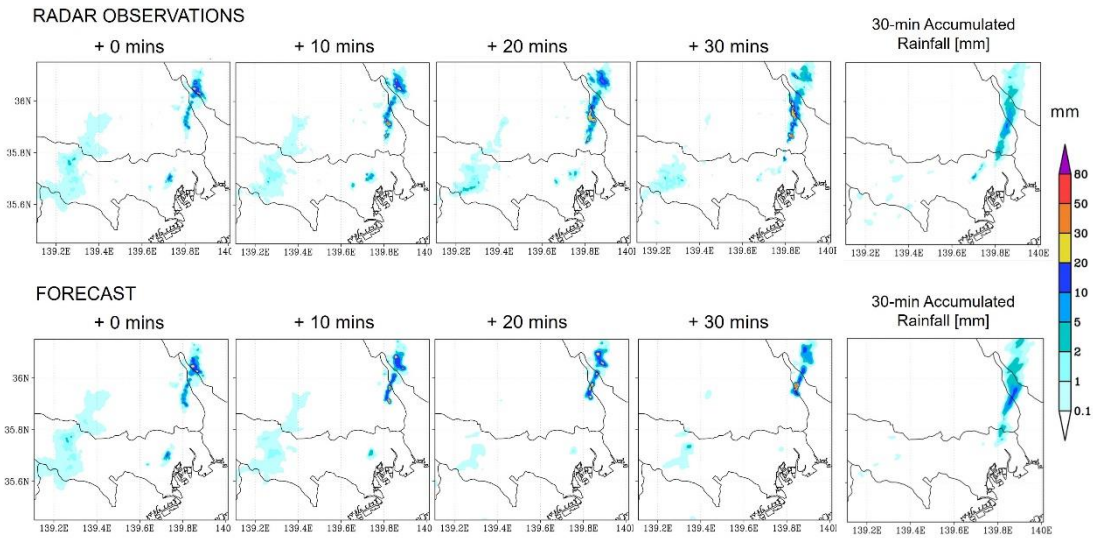


Figure B-7 SCALE forecasts of radar reflectivity (dBZ) at 3-km height initialized after 40-mins cycling for an experiment with localization scale = 2-km. Forecasts were also performed at the equivalent times with the advection model nowcasting system. The radar observations are shown on the bottom row. Black dashed circles show the 20 and 40-km radii from the MP-PAWR, which is indicated by the red-star at the center of the domain.

②-7. Analysis of ensemble forecasts for a convective squall line performed with a 1000-member real-time ensemble Kalman filter system with 30-second update.

In the summer of 2021, we performed a demonstration of the real-time SCALE-LETKF system for precipitation forecasting for Tokyo during the Olympic and Paralympic Games. The demonstration

consisted of cycling every 30 seconds with 1000 ensemble members with observations from a MP-PAWR. Extended 30-minute precipitation forecasts were initialized with 10 members after each update. As part of the post-analysis, we examined the performance of ensemble forecasts for a convective squall line and compared them to nowcasts generated from a simple advection model. The results demonstrated the benefits of the NWP system, including the ability to predict the development of new convective cells that brought heavy rainfall to areas of northern Tokyo.



☒B-8. Ensemble-mean forecasts of rain rate [mm/h] for a squall line on 29 July 2021.

②-8. High-frequency satellite microwave radiances assimilation using the NICAM-LETKF OSSE framework.

The applicability of new satellite observations in weather forecasting is traditionally assessed using observation system simulation experiments (OSSE). An OSSE framework was employed to investigate the impact of high-frequency microwave radiances on the forecast of synoptic and convective scale systems on the global scale to local scales. This OSSE framework utilizes a global NICAM-LETKF data assimilation system at 56 km horizontal resolution. A free run was conducted with the NICAM model and treated as the reference (Nature) for the OSSE experiments. In OSSE, we used the radiative transfer for TOVS (RTTOV) model as an observation operator to generate new synthetic AMSU-A microwave radiances mimicking the new future satellite. RTTOV utilized unbiased nature simulation to generate microwave radiances. Based on the mentioned model settings, we conducted five experiments without data assimilation (NoDA), with only conventional data assimilation but not satellite radiances (NoSat), 6-hourly (6H), 3-hourly (3H), and 1-hourly (1H) satellite clear-sky radiances assimilation. Each experiment constitutes 32 ensembles and is simulated for one month. The analysis is performed on the 32-ensembles mean and variances calculated globally and regionally and compared with nature.



NoSat experiment's RMSE of global average air temperature is lower than NoDA, which signifies the role of data assimilation in the air temperature analysis. Similar inferences can be noted for NoSat in the zonal wind and specific humidity analysis. Additional improvement in the air temperature analysis is revealed in the 6H experiments, where AMSU-A radiances were assimilated. In 6H, the RMSE of global average air temperature, zonal wind, and specific humidity is  $\sim 18\%$  lower than the NoSat experiment. This improvement in the analysis in a 6H experiment can be reflected in the representation of the wind structure in synoptic scale systems like Typhoons. In the case of 3H and 1H experiments, the RMSE of the global average air temperature is larger compared to 6H, but 3H and 1H improved the analysis in the one-hourly to 12-hourly scales. Significant degradation in the RMSE of global air temperature is noted in the 1H than 3H, which was found to arise from the synoptic scales. In the future, we will explore why high-frequency AMSU-A experiments can degrade synoptic scales and possible ways to improve 1H and 3H experiments.

### Evolution of global air temperature (K) RMSE

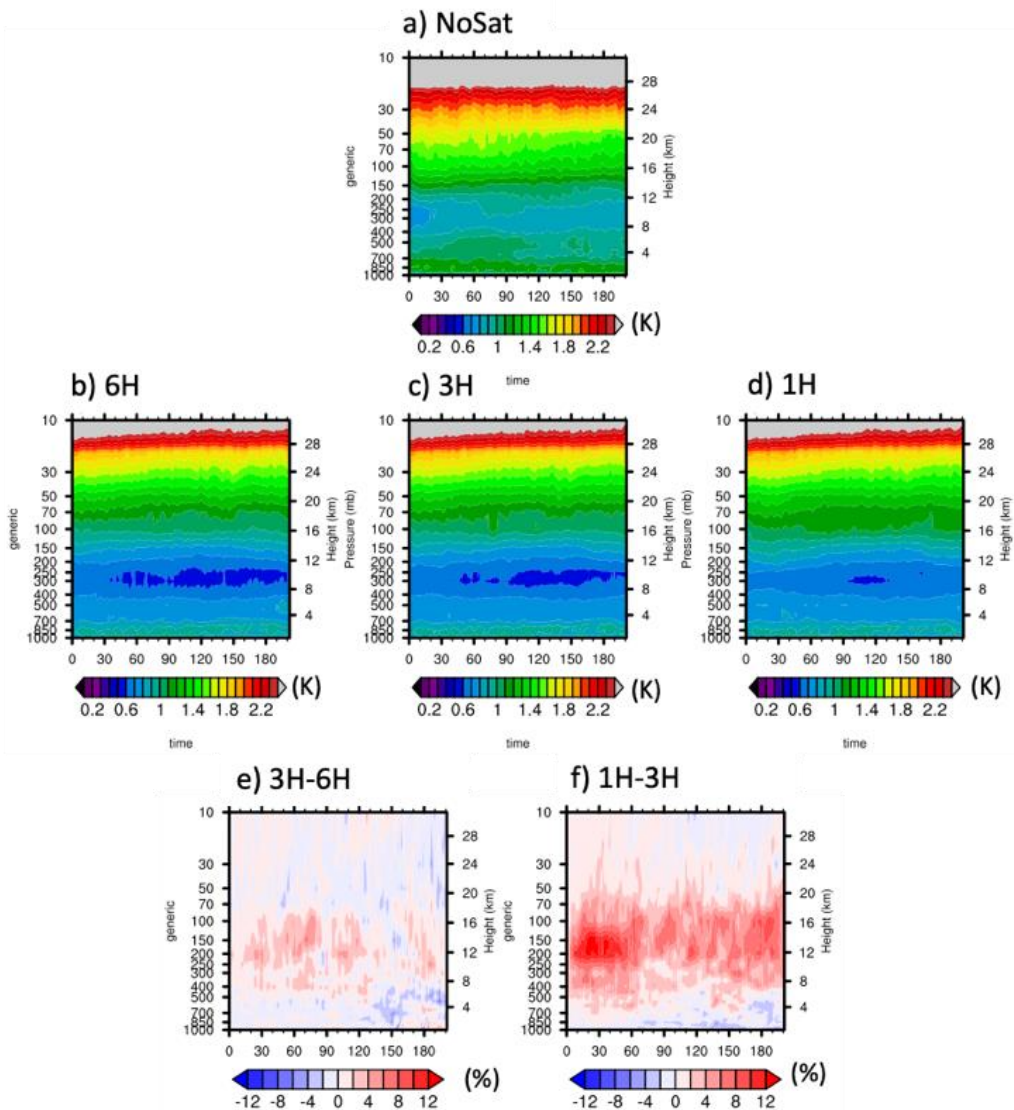


Figure 9. Global average root mean square error (RMSE) of air temperature (K) for a) NoSat, b) 6H, c)

3H, and d) 1H experiments. The third panel shows a relative difference in the RMSE between e) 3H & 6H and f) 1H & 3H. RMSE is calculated with rest to nature.

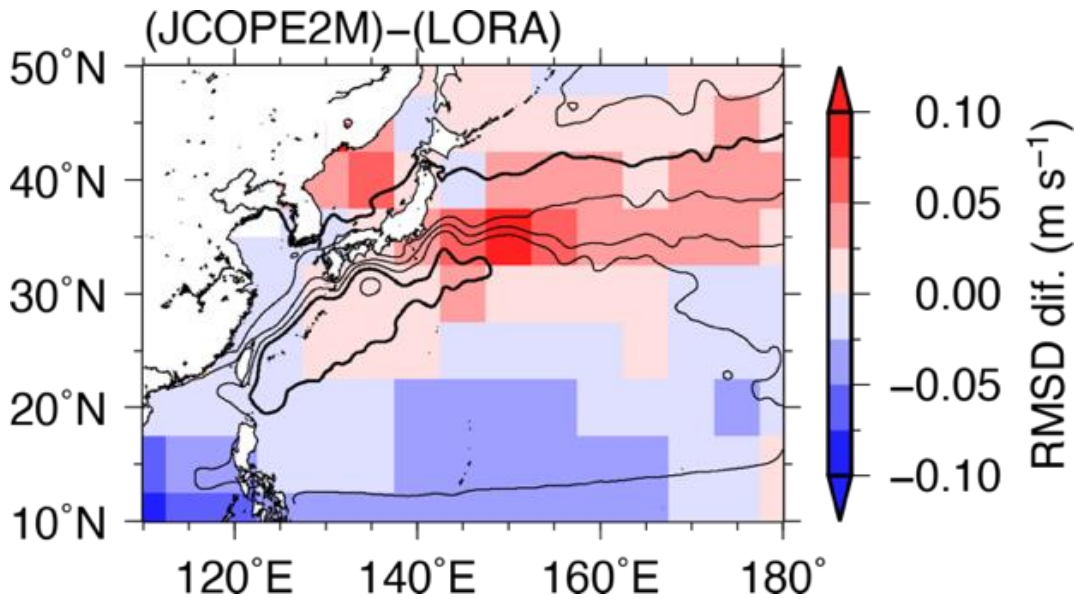
## ②-9. LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA) の精度評価

海洋シミュレーションと観測を融合して作成される海洋解析プロダクトは、研究のみならず漁業や海運業などに活用されている。気象庁はデータ同化手法として4次元変分法を用いたNPR-4DVAR (Hirose et al. 2019)、JAMSTECと水産研究・教育機構はそれぞれ3次元変分法を用いたJCOPE2M (Miyazawa et al. 2017) とFRA-ROMS II (Kuroda et al. 2017)、九州大学はカルマンフィルターを用いたDREAMS (Hirose et al. 2013) のように、北西太平洋域においてすでに4種類の高解像度の領域海洋解析プロダクトが提供されている。しかし、主要なデータ同化手法の1つであるアンサンブルカルマンフィルター (EnKF) を使用した海洋解析プロダクトは、いまだ太平洋域にない。ノルウェーのNERSC (Sakov et al. 2012) やドイツのBSH (Brüning et al. 2021) がEnKFを使用した解析プロダクトを作成しているが、時空間変動が比較的穏やかな北極海や北海・バルチック海にシステムの領域が制限されている。

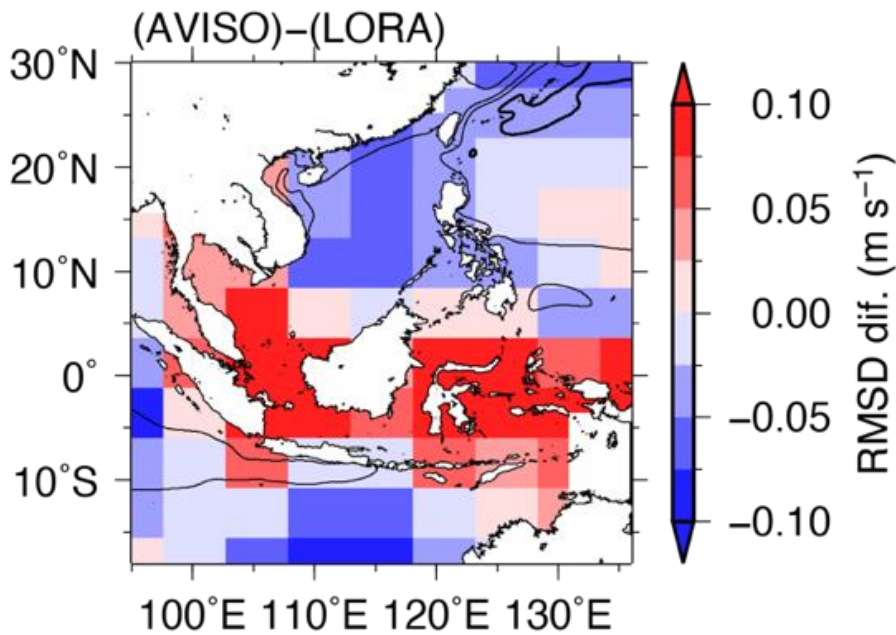
本研究に先立ち、EnKFを実装した領域海洋データ同化システムの開発を北西太平洋域や海大陸域で進めてきた (Ohishi et al. 2022a, b)。前線や中規模渦を伴い変動が激しい黒潮続流域では、シミュレーションと観測の差が大きくなりやすい。そのため、データ同化による大きな水温・塩分の修正量が密度成層の弱化を通して大きな鉛直拡散を生じさせ、海洋内部の低塩分構造の再現性を悪化させていた。このような悪化メカニズムが強流域で生じるので、EnKFを実装した海洋データ同化システムによって高い精度を持つ解析値を作成することが難しかった。そこで、Adaptive Observation Error Inflation (Minamide and Zhang 2017) を用いて動的に観測誤差を膨張させ、上記の塩分悪化メカニズムを抑えた結果、現実的な水温・塩分、循環場の再現に成功した (Ohishi et al. 2022b)。そこで、本研究では開発してきたシステムの水平解像度を渦許容 ( $0.25^\circ$ ) から渦解像 ( $0.1^\circ$ ) に高め、北西太平洋および海大陸域での高解像度のアンサンブル海洋解析プロダクトを作成する。そして、既存の海洋解析プロダクトと精度を比較する。

本研究ではsbPOM-LETKFシステム (Ohishi et al. 2022a in review) を使用する。領域海洋モデルsbPOM (Jordi and Wang 2011) を水平解像度 $0.1^\circ$ 、鉛直50層で北西太平洋域 [ $108^\circ \text{ E}-180^\circ$ ,  $12^\circ \text{ S}-50^\circ \text{ N}$ ] と海大陸域 [ $95^\circ \text{ E}-136^\circ \text{ E}$ ,  $18^\circ \text{ S}-30^\circ \text{ N}$ ] に構築した。2011年1月から2015年6月まで擾乱を与えた大気強制によって100アンサンブルメンバーのスピニングアップを行なった。その後、2015年7月から2019年12月までLETKF (Hunt et al. 2007) を用いて衛星海面水温・塩分・高度、現場水温・塩分を従来の1週間より短い1日間隔で同化した。作成した解析プロダクトの名称は、LETKF-based Ocean Research Analysis-Western North Pacific/Maritime Continent (LORA-WNP/-MC) である。データ同化手法に3次元変分法を使用している点を除きシステムの構成が類似しているJCOPE2Mと現時点で精度が最も高いと言われている海面高度の観測データセットAVISO (Ducet et al. 2000) に対して、LORA-WNP/-MCの海面の水平流の精度を比較した。その結果、中緯度域ではJCOPE2MよりLORA-WNPの精度が高く、亜熱帯域では逆の傾向にあった (図B-10)。また、漂流ブイの観測点が少ない沿岸域でAVISOよりLORA-MCの精度が高く、外洋域では逆の傾向にあった (図B-11)。他にもKEO buoyや潮位計などのデータを用いて精度評価行なったが、LORA-WNP/-MCは大気・海洋の研究に限らず漁業や海運業など様々な用途に対して十分な精

度を持つといえるような結果が得られた。本研究で作成したLORA-WNP/-MCはJAXAのWebサイトから配信する予定である。



図B-10 JCOPE2MとLORA-WNPの漂流ブイに対する海面の東西流のRoot Mean Square Deviation (RMSD) の差分。暖色はLORA-WNP、寒色はJCOPE2Mの精度が高いことを示す。等値線はLORA-WNPの海面高度の気候値。細線（太線）の間隔は0.25 m。



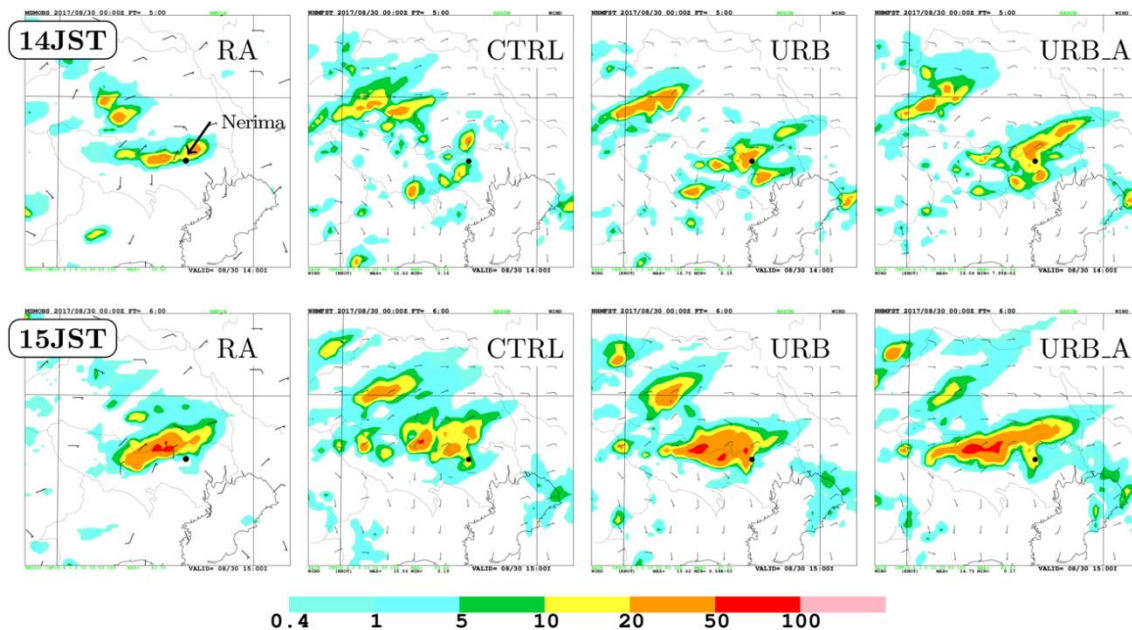
図B-11：図B-10と同様。ただし、AVISOとLORA-MCの差分。

## ②-10. データ同化における都市キャノピースキームの利用と高密度観測データの都市型豪雨への影響

人口と多くの社会機能が集中する大都市圏では豪雨が社会に与える影響が顕在化しやすいのと同時に、都市が気象場に与える影響も無視できない。そこで都市が降水現象に与える影響を調査するために、都市特有のヒートアイランド効果などの気象学的特徴をより精細に再現することが可能な単層都市キャノピースキーム(SPUC: Aoyagi

and Seino 2011) を LETKF 領域解析システム (Kunii 2014) に組み込み、現業データ同化システムでは用いられていない環境省大気汚染物質広域監視システム(通称「そらまめ君」)の高密度な地上観測データを利用する数値実験を行った。

2017年8月30日の秋雨前線南下時に関東地方に発生した短時間の(東京都練馬区付近で30日15時20分に記録的短時間大雨情報が発表された)大雨事例を予測対象として、大雨のおおよそ1日半前の29日00時(JST)からサイクル解析を開始し、30日09時(JST)を初期値とする気象予測の比較実験を行った。解析・予測の対象領域は関東甲信越地方を中心とした水平解像度2kmの200x200格子領域(鉛直50層)とし、データ同化システムは解析時間間隔3時間の51メンバーによる LETKF 解析とした。その結果、SPUCを導入して解析を行うことで、初期値における都市部での地表付近の温度場の再現性が向上すること、また、湿度データを含めた高密度観測データを同化することで地表付近の湿度場も再現性が向上することが確認できた。それらの再現精度向上は予測における下層風収束場や対流生成のタイミングや位置に関する精度向上をもたらし、結果として図B-12に見られるように強い降水の開始時刻や収束線に沿う降水分布の再現性を向上させることが分かった。以上の成果をまとめて論文発表した。

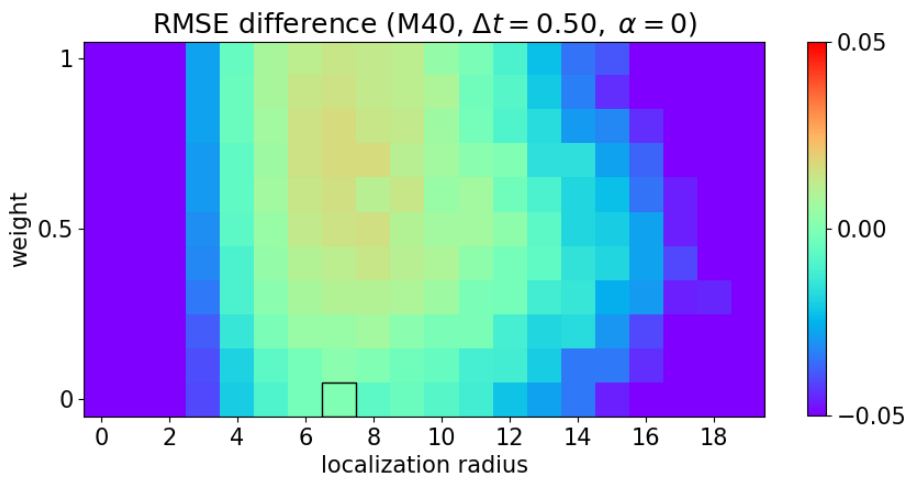


図B-12: 前1時間積算降水量[mm]の比較図. 上) 30日14時と, 下) 15時 (JST) . RAは解析雨量, CTRLは従来の LETKFシステムによる実験, URBはSPUCを導入した実験, URB\_AはURBでそらまめ君データを追加利用した実験. 各予報の初期時刻は30日09時 (JST) . RAパネルの矢羽根はアメダス観測による地上風, その他のパネルの矢羽根は対応する実験でのモデル地上風.

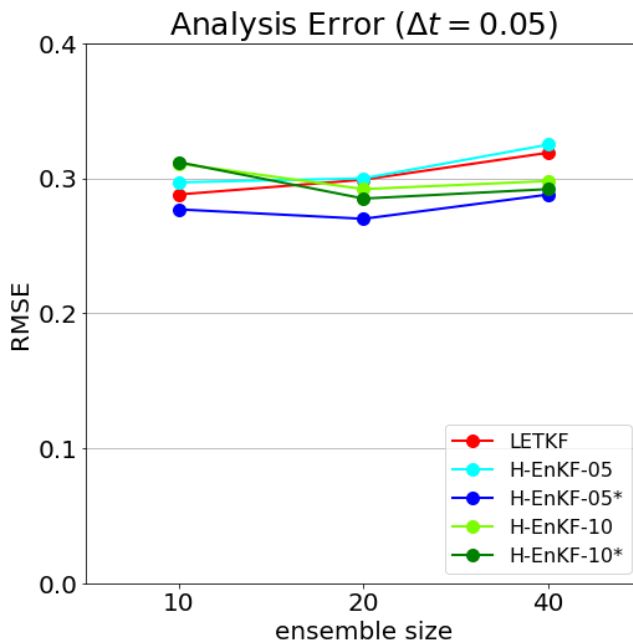
## ②-11. 非ガウス性を軽減するためのハイブリッドアンサンブルカルマンフィルタ

高次元システムの非ガウスデータ同化を目指して局所粒子フィルタの開発が進められているが、非ガウス性が高い場合のアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) の問題点を緩和してその精度を上げることも、非ガウスデータ同化の重要な課題である。そこで本研究では、データ同化における非ガウス性を軽減できるEnKFとして、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) に摂動観測法を組み込んだハイブリッドアンサンブルカルマンフィルタ (H-EnKF) を提案し、Lorenz-96モデルを用いてその有効性を明らかにした。

LETKFによる解析アンサンブルと摂動観測法によるEnKF による解析アンサンブルの重み付き平均をとり、誤差分散調整（解析誤差分散をLETKFの値にする）の有無を選択できるようにした。データ同化実験における非ガウス性の強さは、観測データの時間間隔 $\Delta t$ の調節や非線形観測演算子の導入によって制御した。実験の結果、 $\Delta t$ が大きい場合には、H-EnKFの予報アンサンブルのほうがガウス分布に近くなるため、誤差分散調整をするとLETKFより精度が向上した。また、摂動観測法の最適な重みの値は0と1の間にあった（図B-13）。非線形観測演算子を用いると、 $\Delta t$ が小さい場合にLETKFの予報アンサンブルにはアウトライヤーが発生し、アンサンブルサイズを大きいほど精度が低下したが、分散調整をしないH-EnKFはアウトライヤーの発生を効果的に抑制できることがわかった（図B-14）。いずれの実験においても、アンサンブルサイズが大きいほどH-EnKFはLETKFより高精度になった。



図B-13 LETKFの解析値の最小RMSEとH-EnKFの解析値のRMSEの差（線形観測演算子、アンサンブルサイズ:40、 $\Delta t=0.50$ 、誤差分散調整:あり）。横軸は局所化半径、縦軸は重み、横軸上の黒枠はLETKFの最小RMSEの位置。

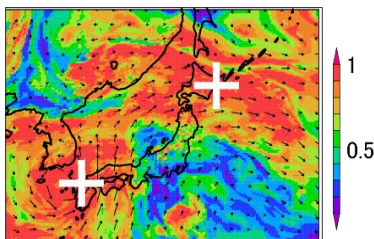


図B-14 LETKFとH-EnKFの解析値のRMSEの比較（非線形観測演算子、 $\Delta t=0.05$ ）。横軸はアンサンブルサイズ、凡例のH-EnKFに付した数字は重み（ $\times 10$ ）、\*の有/無は誤差分散調整の無/有を示す。

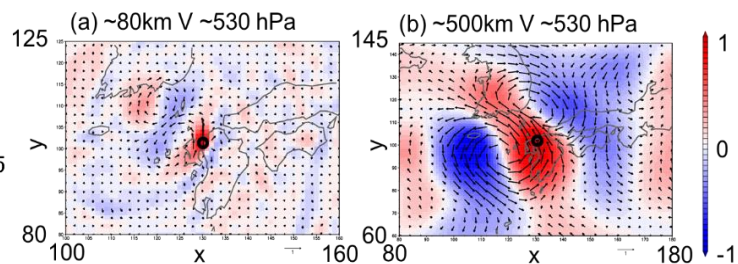
②-12. 変分法によるスケール依存同化の検討

顕著現象の発生には、局地的な場の急変から大規模な環境場まで、大気中の多様なスケールの現象が複合的に関わる。このような現象の予測の精度向上を目指し、観測データから広範囲のスケールの情報を抽出するデータ同化手法の検討を進めた。具体的には、気象庁現業メソ解析で2020年3月まで運用されていたJNoVA 4D-Var (Honda et al. 2005) による実験システムを拡張し、ハイブリッド4D-Varのアンサンブル制御変数をウェーブレット空間で構成することで、背景誤差の流れ依存性とともスケール依存性を考慮するようにしたシステムを開発して、一点観測同化実験によりその効果を調べた。

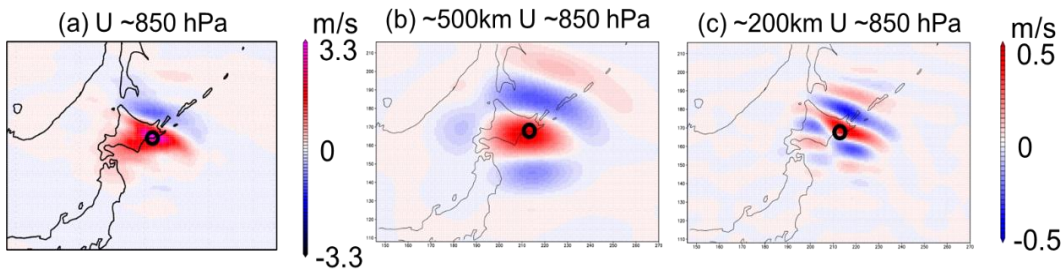
80 km程度と500 km程度のスケールでの福岡 (図B-15、左下側の十字) における南北風と周囲の風の背景誤差相関を図B-16に示す。80 km程度のスケール (図B-16a) では、西方海上を北上する台風の周りのバンド構造に沿って細長いパターンで南南西から北北東に相関がのびている。一方、500 km程度のスケール (図B-16b) では、台風全体の循環に対応する相関が顕著である。このように、各スケールでの気象場の流れを反映した背景誤差相関構造がみられた。



図B-15: 2018年7月3日06UTCの約720 hPaの偽相対湿度 (色)、風 (ベクトル)。福岡と釧路の位置を+印で示す。



図B-16: スケールごとの背景誤差相関。2018年7月3日06UTCの約530 hPa。各スケールの福岡 (○印) の南北風の水平風との水平相関 (ベクトル)。南北風水平相関を色で示す。(a)約80 kmスケール。(b)約500 kmスケール。



図B-17: 釧路 (○印) 2018年7月3日06UTCの約850 hPaに東西風の観測 (D値4 m/s、観測誤差1 m/s) を配置した一点観測同化実験による、東西風インクリメント。(a)全インクリメント。(b)約500 kmスケール成分。(c)約200 kmスケール成分。

このような背景誤差のスケール特性を組み込み、釧路 (図B-15、右上側の十字) の約850 hPaに東西風の観測値を置いた一点観測同化実験を行った。インクリメント (図B-17a) のスケールごとの成分をみると、500 km程度のスケール (図B-17b) では南西から流入して東に向かう流れ、200km程度のスケール (図B-17c) ではオホーツク海沿岸の前線に沿う北西から南東に向かう流れに対応するインクリメントがみられた。スケールごとに制御変数を

割り当てたことにより、それぞれのスケールで別の方向からの釧路の東風の強化に対応するインクリメントがもたらされた。また、小さいスケールではサンプリングエラーがより近距離で卓越するため局所化の幅をより小さくしている。このため、200 km程度のスケール（図B-17c）の方が、500 km程度のスケール（図B-17b）よりもインクリメントの範囲は狭く、観測点から遠方でのノイズが除去されている。

短期間のサイクル実験を行ったところ、ウェーブレット空間で構成した制御変数を導入したハイブリッド4D-Varでは、従来の格子空間での制御変数の場合と比較して、第一推定値の同化観測による検証、予測の対ゾンデ観測検証において改善がみられ、効果が期待される結果が得られた（図略）。

## 参考文献

Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata, and T. Tsuyuki, 2005: A pre-operational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 3465-3475.

## 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

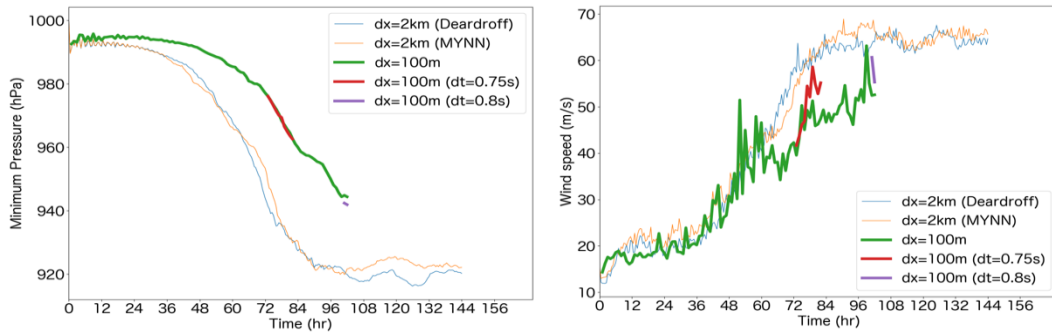
### ③-1. 台風全域・発達全期間のLES

気象庁非静力学モデル(JMA-NHM) を利用し、台風全域をカバーするような2000km×2000kmの計算領域を確保しながら、水平解像度を100mとした。水平一様な環境において、側面境界は二重周期であり理想化した計算設定である。スーパーコンピュータ「京」では、高々10時間程度の時間積分のみであったが、スーパーコンピュータ「富岳」では、積分時間を延長し、台風の発達期も含めた台風全域のLESが可能になった。昨年度は、「京」で実施した計算(Ito et al., 2017)と同一の計算設定で、台風発生前から100時間以上時間積分し、水平解像度2kmの計算結果と比較した。

本年度は発達期の計算結果が得られる利点をより活かすため、急発達台風(2019年19号)を想定した計算設定で同様のLESを実施した。この計算の初期環境場は全球再解析JRA55より抽出した温位と湿度を利用する(台風19号が記録的に発達した期間・場所、145° E-165° E、5° N-25° N、2019年10月4日0UTCから6日18UTCの間のデータを時空間平均した)。海面水温は一様に303Kとした。この環境場を設定のもと、最初に配置する初期渦の半径を50kmと150kmとした2種類の計算を実施した。なお、富岳2304ノードを利用し、4時間積分のためにほぼ一日かかっている。

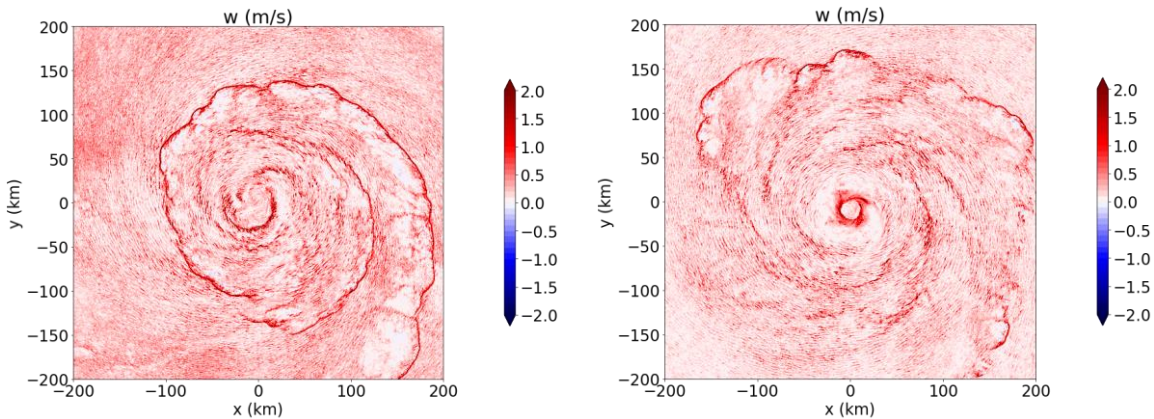
初期渦の半径を50kmとした計算では、粗い解像度(dx=2km)とほぼ同一のペースで発達する。しかし急発達を経た後、台風の強度が950hPa前後で停滞し、150時間以上積分したが、この停滞は解消されなかった。この発達の停滞はdx=2kmで乱流パラメタリゼーションとしてDeardroff(1980)を用いた場合もみられたが、120時間以降は再発達した。

初期渦の半径を150kmとしたdx=2kmの予備計算では乱流パラメタリゼーションに関わらず台風中心の気圧は920hPaに達する急発達がみられた。このケースに対し、dx=100mの発達全期間LESを実施したところ、これまで実施した数例と異なり、水平解像度2kmの結果より約1日遅れのペースで急発達する（図C-1）。またこの計算では瞬間的には高い風速が出現することがあり、これに対応して時間ステップを短くする必要性が示唆される。台風が発達途上の段階で時間ステップを短くしたところ、強度の強化や最大風速の向上がみられた。図C-2に計算開始後72時間（急発達開始時）と102時間後（急発達中）の鉛直速度の分布を示している。72時間後には、外側レインバンドが見られるものの、眼を取り囲む軸対称な壁雲は見られないが、急発達中には半径10km程度には軸対称



図C-1 再現した台風の（左）最低気圧と（右）最大風速の時間発展。水平解像度2kmの場合に乱流パラメタリゼーションを変えた2ケース、水平解像度100mの場合に時間ステップを途中で短くしたケースも示している。

な壁雲に相当する上昇流域がみられた。



図C-2 台風中心付近、高度27mの鉛直速度、（左）72時間後と（右）102時間後の分布

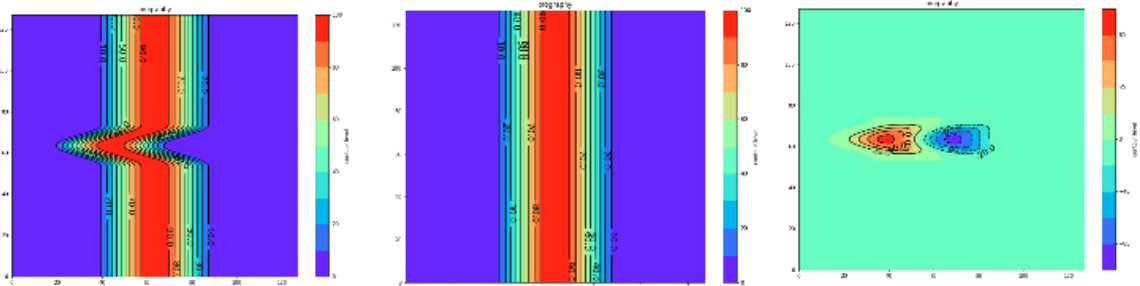
#### 参考文献

- Ito, J., T. Oizumi, and H. Niino (2017): Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones, *Sci. Rep.*, **7**, 3798.
- Deardroff, J. W. (1980): Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model, *Boundary-Layer Meteorol.*, **18**, 495-527.

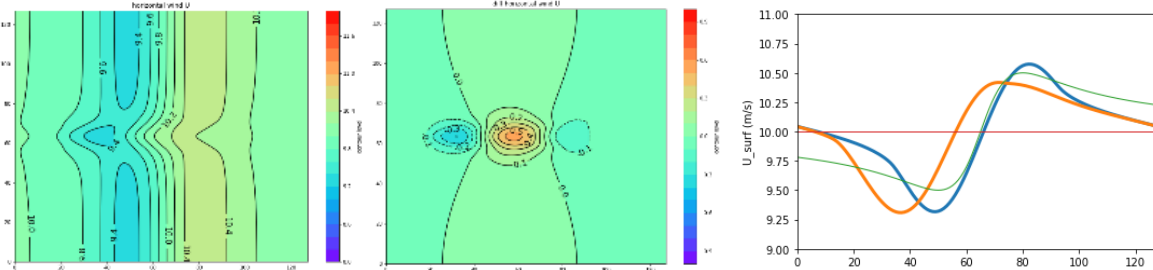


安定大気中で2次元性の良い山脈地形の法線方向に一般風があると山越え気流に伴う内部重力波が生じ山の前面で風の減速、山の後面で風速の増大があることが知られている。近年、関東地方の冬季季節風「空っ風」に関して、図C-3左に示すような風上側に凸（風下側に凹）な地形について、統計解析と数値実験による調査がいくつか発表されている。ここでは、このような地形についてのSmith (1980), Saito (1993)に基づく線形山岳波解析解について考察してみた。

図C-4に静力学線形解析解による水平風の凸部中央を通る地表風速を示す。水平風は山脈風下側の凹部地形内で増速があり、2次元ベル型地形の解析的な線形解のおろし風の増速 $NH/2(=0.5m/s)$ を超えるが、コサインベル型の2次元地形での増速を上回らない。2次元地形に比した増速域は凹部領域内に留まり、風下側に広がらない。この振舞いは Saito(1993)で示した鞍部地形に対する線形解析解での結果と整合的である。一方、風下に凹のみの地形の場合、最大風の大きさは2次元地形のそれよりも大きくなった（図略）。風上側に比べて風下側の傾斜が急な非対称地形の効果によると考えられる。



図C-3 左) 凸部を伴う地形 中) 2次元地形 右) 両者の差。



図C-4 線形解析解による地表風。左) 凹凸を伴う地形、中) 2次元地形との差。右) 凹部中央に沿った地表風速。緑) 2次元ベル型地形、青) 2次元ベルコサイン地形、橙) 凹凸地形の場合。

### 参考文献

Saito, K. (1993). A numerical study of the local downslope wind “Yamaji-kaze” in Japan Part 2: Non-linear aspect of the 3-D flow over a mountain range with a col. J. Meteor. Soc. Jpn., **71**, 247-272.  
 Smith, R. B. (1980). Linear theory of stratified hydrostatic flow past an isolated mountain. Tellus, **32**, 348-364.

### ③-3. 雷を直接計算する気象雷モデルを用いた数値実験

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。この雷を予測するために、雷を

直接計算する気象雷モデルは強力なツールである。そこで本研究では数値予報での将来的な気象雷モデルの利用を見据え、気象雷モデルの計算および、その検証を実施している。前年度は夏季雷の事例のみを対象として評価を実施したが(Sato et al. 2022)、冬季にも雷は観測される。また冬季の北陸で観測される雷はSuperboltとも呼ばれ、世界的に見ても、北陸以外ではイスラエル西岸と五大湖周辺でしか観測されない特異な雷である。これらの冬季の雷の事例でも、気象雷モデルの検証を実施する必要がある。

そこで本年度は、気象雷モデルの検証と有効性の評価を、冬季雷の事例も対象に含めて実施した。具体的には、前年度に対象とした夏季雷2事例に加えて、北陸の冬季雷を対象とした2事例と、北海道で冬季に観測された雷、さらには雷が観測されなかった降雪事例を対象とした計6事例の計算を実施した。またこれらの結果を、経験的に雷頻度を診断する手法 (MaCaul et al. 2009: MC09と表記) から診断された雷頻度と比較した。このMC09は雷を直接予報せず、数値モデルの結果から雷頻度を診断する手法であり米国を中心として広く用いられている。そのため、気象雷モデルの結果とこのMC09の結果を比較することで気象雷モデルの既存の手法に対する有効性が評価できる。

解析の結果、経験的に雷頻度を診断するMC09の方法は、夏季の雷頻度の高い事例においては、観測された雷頻度をよく再現できるものの、雷頻度の低い事例でも雷頻度の高い事例と同程度の発雷頻度となり、発雷頻度の異なる2つの夏季雷の違いを再現できないことが明らかとなった。また、MC09の手法は観測 (科研費基盤B, 20H04196で解析を実施) に比べて雷頻度を過大評価する問題があり、冬季の雷事例ではより顕著であることが明らかになった。一方、気象雷モデルは発雷頻度の異なる2つの夏季雷の発雷頻度の違いを再現するだけでなく、冬季の雷事例の雷頻度をよく再現しており、気象雷モデルが雷頻度の予測に強みがある可能性を示すことができた。

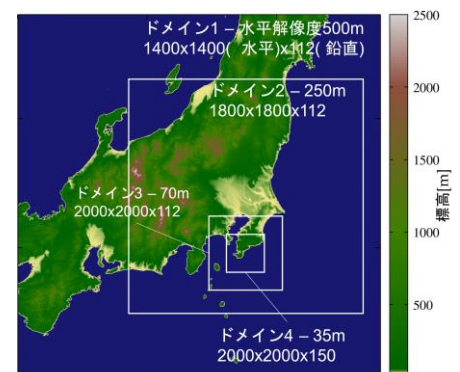
## 参考文献

- McCaul, E. W., S. J. Goodman, K. M. LaCasse, and D. J. Cecil, (2009), Forecasting lightning threat using cloud-resolving model simulations, *Wea. Forecasting*, 24, 709-729.
- Sato, Y., S. Hayashi, and A. Hashimoto, (2022), Difference in the lightning frequency between the July 2018 heavy rainfall event over central Japan and the 2017 northern Kyushu heavy rainfall event in Japan, *Atmos. Sci. Lett.*, 23(1), doi: 10.1002/asl.1067

### ③-4. フライトデータ・フライトシミュレーションによる晴天乱気流LESの検証

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

CATの現象理解を目的とした数値計算は過去に行われている (Sharman, 2012, Trier, 2016, Trier, 2020)が、自由大気中で発生するCATについては高密度な観測例が少なく、観測による計算の検証が行われた例は少な



い。さらにLarge Eddy Simulation (LES)で再現した乱気流の渦について観測を用いて検証した例はほとんどない。

本研究では、大規模気象シミュレーションを用いて当時の乱気流場を再現し、当時の乱気流に遭遇した旅客機が記録したフライトデータを用いて計算の検証を行った。フライトデータには乱気流の影響を受けた飛行機の加速度が高周波に記録されている。気象シミュレーションはスーパーコンピュータ「富岳」を用いて行い、水平35 m解像度で関東南部の乱気流場を再現した。また、再現した乱気流場に対する飛行機の応答を飛行力学に基づき推定し、結果を当日の旅客機のフライトデータと比較した。

計算対象事例は2020年12月30日 7:00-11:00 UTCに南関東の高度2-4 kmで旅客機から49件の揺れ(21件は晴天での揺れ)が報告された事例である。当日の乱気流再現のため、数値気象計算は気象庁の現業非静力学モデルasucaを用いた計算を行った。図C-5に示すように、計算領域は最も広い水平解像度500 mのドメイン1から、関東南部を詳細に解く解像度35 mのドメイン4までの4つを設定した。すべてのド

図 C-5 計算領域設定

メインで、格子スケール乱流渦を直接解くLESとした。計算資源はスーパーコンピュータ「富岳」を使用し、382ノードを用い計4週間を要した。ドメイン1(解像度500 m、図省略)の計算結果および当日の天気図・観測データ(図省略)から、ポーラーフロントでの鉛直シアの強化がCAT発生の原因であると推察した。関東上空10 kmには90 m/sで流れる極ジェットが位置し、その下部にはポーラーフロントに伴い鉛直シアの大きい領域が高度2-4 kmに位置していた。このシアの下部では大陸からの寒気移流により基本的に北西風となっているが、中部山脈を乗り越えられず分離し、再び関東で収束している。この過程で関東南岸において上空の強い南西風に対して局所的に強いシアが形成され、KH不安定を誘起するに至ったと考えられる。

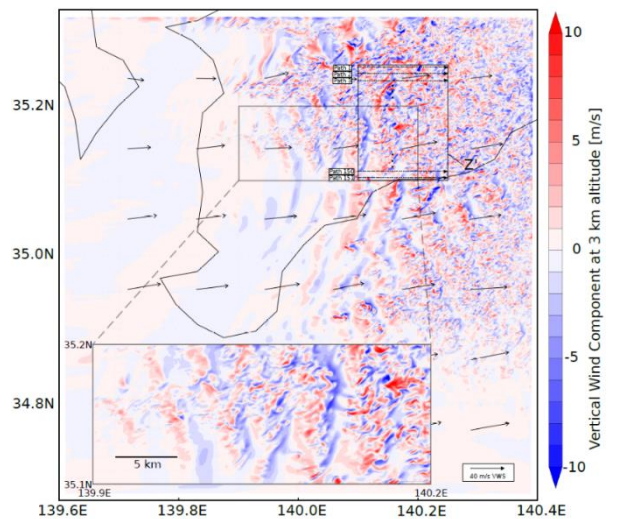


図 C-6 ドメイン 4, 12/30 10UTC 高度 3275m 水平断面における鉛直風速の様子

ドメイン4(解像度35 m)では、KH波とその碎破による細かい渦までもが再現されていた。図C-6に鉛直風速の瞬時場を示した。可視化時刻・位置は乱気流遭遇報告が集中していた12月30日 10時UTC、関東南部高度約3 kmに合わせている。鉛直風速(赤:上昇流、青:下降流)の規則的なKH波が確認できる。

図C-7に、再現した乱気流を受けて運動する仮想的な飛行機の加速度変化(左)と、当日の旅客機(B787-9)のフライトデータ(右)に記録されている加速度変化の周波数スペクトルの比較を示した。飛行機の応答は飛行機の重心に関する運動方程式に、乱気流による外力を加えて模擬した。着陸前の133 m/sで飛行するB787-9を想定し、必要な空力性能値は加藤寛一郎氏の教科書(1982)の手法から推定した。図C-6の領域Z'に用意した151のフライトパスにおいて飛行機の鉛直加速度を推算し、それらの周波数スペクトルを平均した。より小さい渦が陽に計算されているドメイン4ではより高周波領域において高い振幅を有しており、飛行機は大きなスケールの渦ではなく、碎破して細分化された渦の影響を大きく受けると確かめた(Sekioka, 1970の指摘と対応)。また、A、Bで示すピークはB787-9のピッチ方向運動の固有周波数(0.14 Hz, 運動方程式から得る固有値の1つ)に近く、ドメイン4では

飛行機の固有運動を引き起こす渦のサイズまで解像できていると分かった。一方、1 Hz付近の高周波運動はシミュレーションでは再現されていなかった。ドメイン4で再現された風速のスペクトル解析では、波長800m付近を境にスペクトルが減衰しており、1 Hzに相当する133 m波長の再現には更なる高解像計算が必要と示唆された。

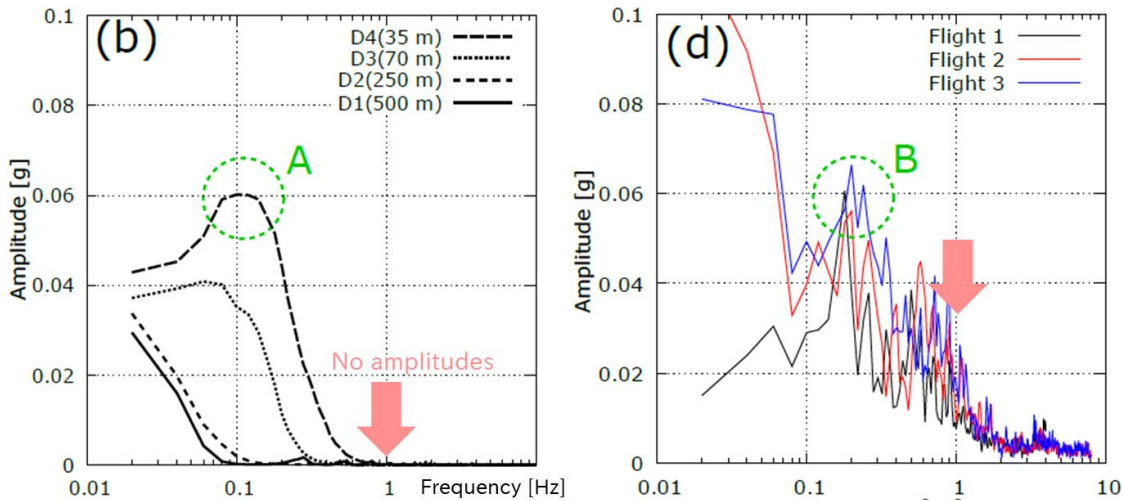


図 C-7 (左)12/30 各ドメイン(D1=ドメイン 1, D4=ドメイン 4)での 10UTC の乱気流場から推算した飛行機の揺れ, (右)当日の 3 便分のフライトデータから取り出した揺れの周波数スペクトル

#### 参考文献

- R. D. Sharman, J. D. Doyle, and M. A. Shapiro. An investigation of a commercial aircraft encounter with severe clear-air turbulence over western greenland. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(1):42 - 53, 2012.
- Stanley B. Trier and Robert D. Sharman. Mechanisms influencing cirrus banding and aviation turbulence near a convectively enhanced upper-level jet stream. *Monthly Weather Review*, 144(8):3003 - 3027, 2016.
- Stanley B. Trier, Robert D. Sharman, Domingo Munoz-Esparza, and Todd P. Lane. Environment and mechanisms of severe turbulence in a midlatitude cyclone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 77(11):3869 - 3889, 2020.
- Sekioka, M, Application of Kelvin-Helmholtz Instability to Clear Air Turbulence, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 9, 1970.
- 加藤寛一郎, 航空機力学入門, 東京大学出版会, 1982.

#### 2-2-2. テーマ2：全球スケール予測

##### (1) 成果概要

2020-2021年度の結果を踏まえ、台風、季節内変動、および海洋結合による効果について、引き続き解析を行うとともにNICAMおよびNICOCOを用いて追加実験を実施した。具体的には、2019年に房総半島に甚大な被害をもたらした台風15号を対象とした1600のアンサンブルメンバーを有する高解像度・大アンサンブル実験の結果を解析し、上陸の2週間前から台風が日本に接近する可能性が高まっていたことを示すとともに、予測可能性の鍵となる要素が、初期値の中で台風の前駆渦の表現の精度と、台風15号の経路上にあたる太平洋上空の寒冷渦の再現性であることを

明らかにした(詳細①)。また、2021年度までの結果や関連プロジェクトの結果を元に更新したNICAMを用いて2009年から2019年までの季節スケールの大規模アンサンブル実験を実施し、季節スケール予測のベースとして必要となる、モデルにおける台風気候値の情報を更新した(詳細②)。2021年度までの成果により得ていた、代表的な季節内振動であるマッデン=ジュリアン振動(MJO)の東進タイミングについて、解特性が分岐するかどうか海面水温の分布が効いているという仮説を実証する追加の大アンサンブル実験を行い、仮説が正しいことを確かめた(詳細③)。海洋渦解像かつ雲解像とされる海洋0.1度・大気3.5kmまで高解像度化したNICOCOを用いて、台風から海洋への影響を調査した。その結果、台風通過に伴って海面水温が局所的に低下する様子や、その後に水温が回復するための所要時間が黒潮の影響により左右される様子が明瞭に表現できるようになることを確認した(詳細④)。

さらに、これまでの研究により得られた知見と開発の成果を統合して、海洋結合版非静力学正二十面体格子モデルNICOCOを更新し、さらに海洋Flux調整を導入した3ヶ月台風予測実験を実施した(詳細⑤)。結果、海洋。さらに、発展的な挑戦として位置付けていた、早期警戒情報を得るための階層的なアンサンブル実験を実施し、プロトタイプの開発に成功した(詳細⑥)。

これらの結果から得られた情報について気象庁・東京海上研究所と合同での意見交換を行った。気象庁よりリクエストのあった、海洋の水平高解像度の効果についての知見共有を行った他、海洋の初期値化に関してさらに改善する可能性のある代替案が提案され、本課題終了後にも引き続き議論と調査を継続することになった。東京海上研究所からは近年の極端気象災害の頻発によって急速に底を尽きつつある保険支払いのための準備金の状況についての情報共有があった他、意見交換の結果、民間における極端気象災害の関連情報に関する需要調査の実施を行い、本課題終了後も引き続き情報交換を継続することに決まった。

## (2) 実施体制

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

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

と3つの目標を掲げて研究・開発を実施している。

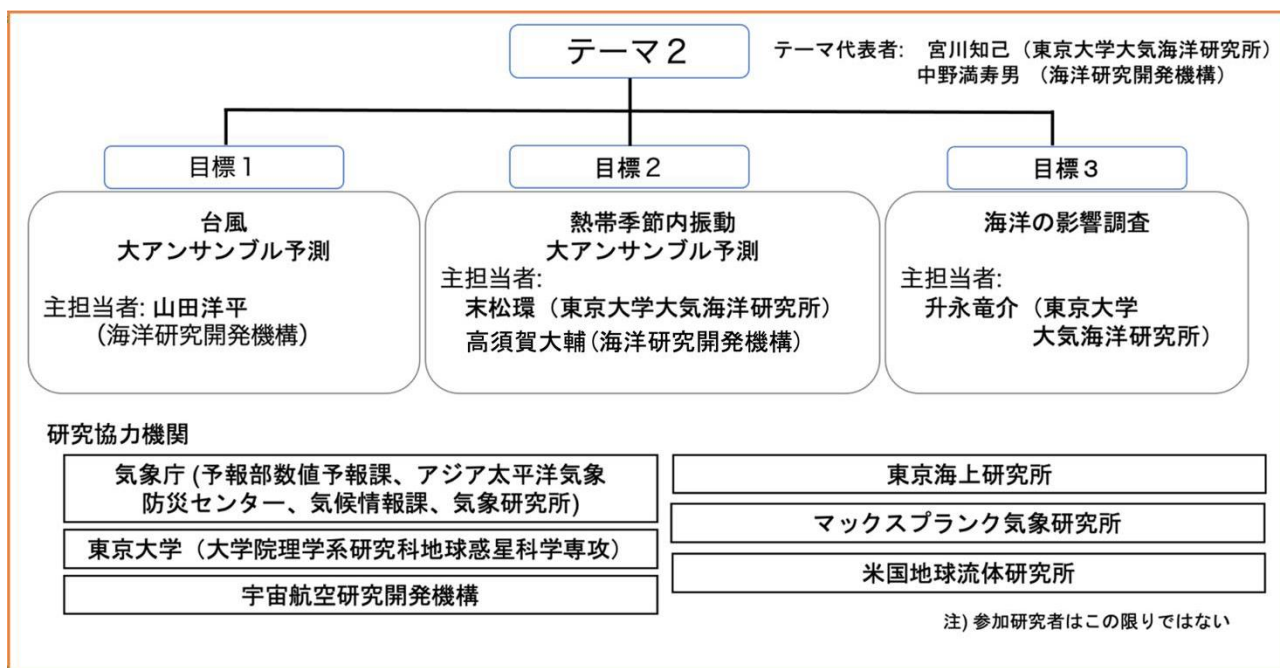


図2-1: テーマ 2 体制図

### (3) 成果内容

#### 詳細 ① 台風大アンサンブル (目標 1)

(海洋研究開発機構, 東京大学大気海洋研究所)

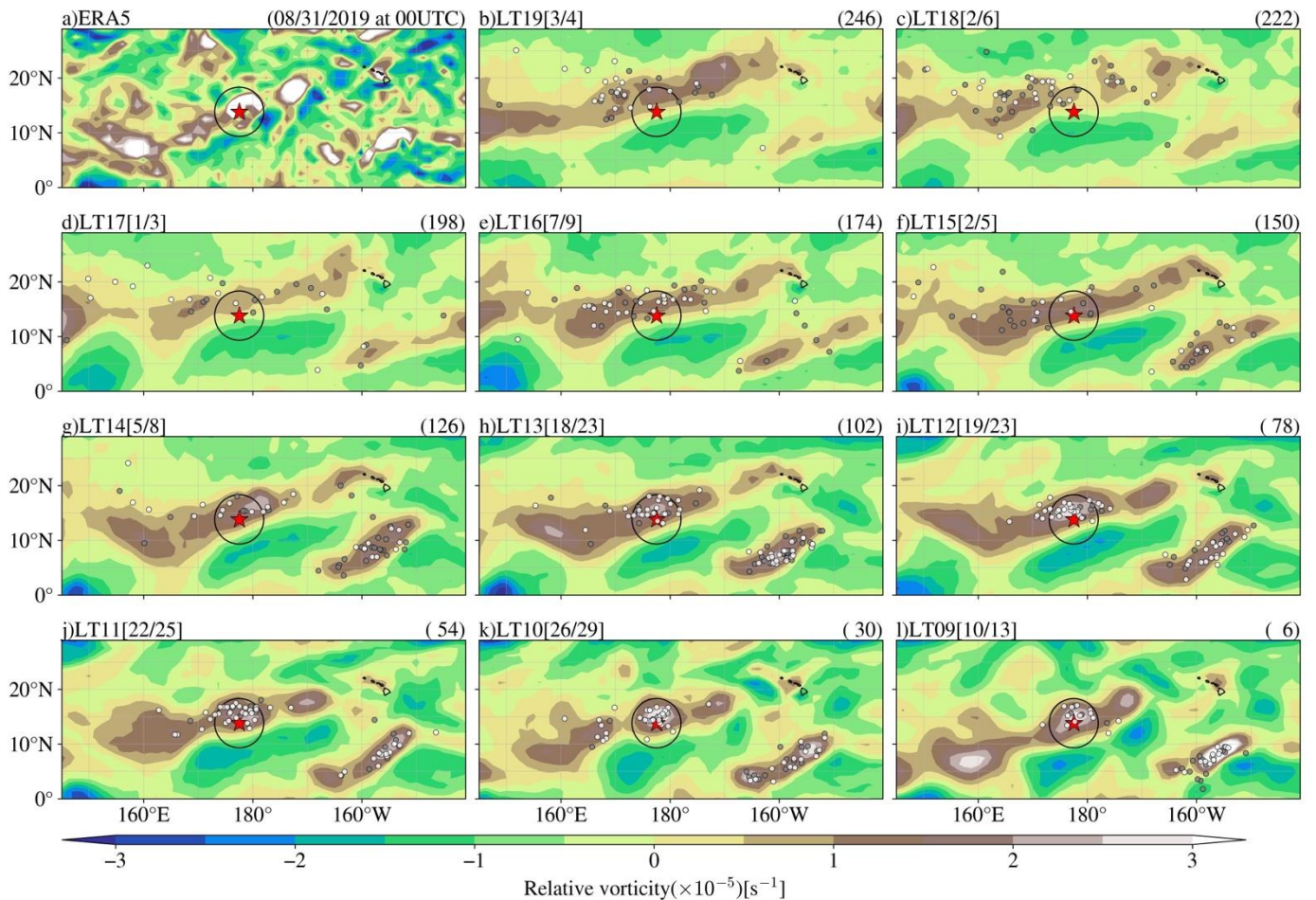
水平格子間隔14kmの全球非静力学正二十面体格子大気モデルNICAM(Satoh et al. 2014)を使用して、2019年に房総半島に甚大な被害をもたらした台風15号を対象とした1600のアンサンブルメンバーを有する高解像度・大アンサンブル実験を実施し、上陸の2週間前から台風が日本に接近する可能性が高まっていたことを示した(Yamada et al. 2023)。ここでは台風が日本に接近する可能性が高まった要因についての調査結果を報告する。

一つ目の要因として初期値の中で台風の前駆渦の表現の精度が上げられる。以下では現実の台風15号を台風と呼び、実験の中で発生した台風 15号に類似した台風を類似台風と呼ぶ。図アは台風15号発生の約4日前(8月31日)の北太平洋日付変更線付近の850hPa面の相対渦度の分布を示す。気象庁のアーリードブラック解析(Kishimoto, 2008)による台風15号の前駆渦の周りでは再解析でも相対渦度が高いことを確認できる(図D-1a)。計算開始時刻毎にアンサンブル実験の台風15号発生4日前の相対渦度の分布を比較すると、計算開始から台風15号発生までの時間(リードタイム)が長い実験では台風15号の前駆渦よりも北西側に正の渦度の領域が存在している。リードタイムが短くなるにつれ、正の渦度が大きくなり、その領域が台風15号の前駆渦と重なる様子が確認できる(図D-1b-1)。正の渦度の増大はリードタイムが短くなるにつれて類似台風の前駆渦を表現するアンサンブルメンバーが増加することを意味し、正の渦度の高い領域が台風15号の前駆渦と重なることは類似台風の位置を台風15号に近い位置でシミュレートするアンサンブルメンバーが増加したことを意味している。実際に類似台風の前駆渦を描画すると、リードタイムが短くなるにつれて台風15号の近隣(半径500km以内)に

類似台風の前駆渦が増加する様子が確認できる。これは初期値の中で台風の前駆渦の表現の精度がリードタイムが短くなるにつれて精度良く表現されるようになったためと考えられる。一方で、類似台風の前駆渦は日本に向かうものと向かわないものの2種類に分けられる。

二つ目の要因は、類似台風の経路に影響を及ぼした上空の寒冷渦の再現性に依存していた。台風15号の北西側には上空に寒冷渦が存在していた(Fudeyasu et al. 2022)。台風の北西側に寒冷渦がある場合、台風には北進する傾向があることが先行研究で報告されている(Wei et al. 2016)。日本に向かわない類似台風と日本に向かう類似台風で、寒冷渦と類似台風の分布を比較すると、日本に向かう場合は、類似台風と寒冷渦との距離が日本に向かわない場合よりも近く、類似台風は寒冷渦から北向きの指向流の影響を受けて、日本に接近する経路を取りやすくなったと考えられる。

以上のことから、台風15号の精度の高い進路予測には初期渦の精度と環境場(寒冷渦による指向流)の表現の精度が重要だったことが示唆される。



図D-1 : 2019年8月31日(上陸9日前)の房総半島台風の卵の周りの渦度の経度緯度分布。色は高度850hPa面の渦度を示す。(a)は再解析、(b-1)は上陸19日から9日前に開始した各100本のアンサンブル実験のアンサンブル平均を示す。☆印は房総半島の台風の卵の位置を示す(気象庁アーリードブラック解析)。灰色点と白点は類似台風の位置を示し、白点は日本に向かう類似台風を示す。各パネルのカギ括弧内の数字は房総半島台風の卵の周囲(半径500km以内)の(日本に向かう類似台風の数/類似台風の数)を示し、右上の括弧の数字は実験開始からの計算時間[hour]を示す。

- Kishimoto, K., 2009: Revision of JMA' s early stage Dvorak analysis and its use to analyze tropical cyclones in the early developing stage. RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review, No. 10, 12 pp., <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/techrev/text10-1.pdf>
- Fudeyasu, H., et al., 2022: Contributions of the large-scale environment to the typhoon genesis of Faxai (2019). Journal of the Meteorological Society of Japan, 100(4), 617- 630.
- Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., et al., 2014: The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: Description and development. Progress in Earth and Planetary Science, 1, 18.
- Wei, N., Li, Y., Zhang, D., Mai, Z., and Yang, S., 2016: A statistical analysis of the relationship between upper-tropospheric cold low and tropical cyclone track and intensity change over the Western North Pacific. Monthly Weather Review, 144, 1805- 1822.
- Yamada, Y., Miyakawa, T., Nakano, M., Kodama, C., Wada, A., Nasuno, T., et al. (2023). Large ensemble simulation for investigating predictability of precursor vortices of Typhoon Faxai in 2019 with a 14-km mesh global nonhydrostatic atmospheric model. Geophysical Research Letters, 50, e2022GL100565.

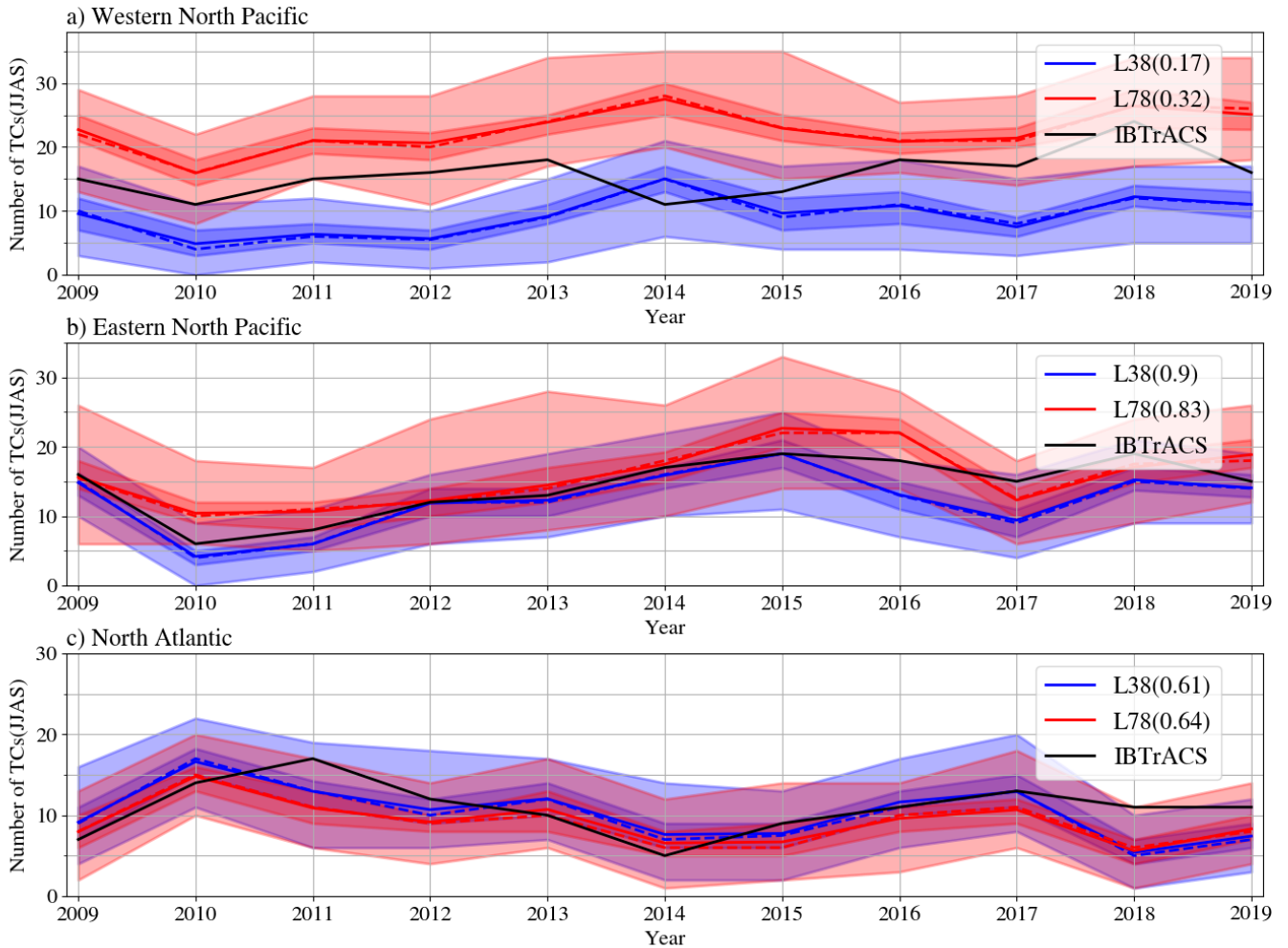
## 詳細② 台風気候場実験

(海洋研究開発機構, 東京大学大気海洋研究所)

昨年度はKodama et al. (2021)の設定で季節スケールの大規模アンサンブル実験(64メンバー)を行い、NICAMの台風気候場の調査結果を報告した。その結果、北西太平洋域の台風はベストトラックよりも過小評価だった。北西太平洋の台風の発生は季節内振動と活発さと関係があることが先行研究で報告されている(Yoshida et al. 2014)。一方、Kodama et al. (2021)の設定は季節内振動の表現に不十分さがあることが報告されている(Kikuchi et al. 2017)。Takasuka et al. (2023)は気候場の表現を維持した状態で季節内振動の表現を改善したモデル開発に成功した。ここではTakasuka et al. (2023)の知見の一部を採用して、季節スケールの大規模アンサンブル実験を実施した。ここではKodama et al. (2021)の設定に準じた設定をL38設定、Takasuka et al. (2023)の設定に一部準じた実験をL78実験と称す。

図D-2に2009年から2019年までの季節スケールの大規模アンサンブル実験で北西太平洋域(東経100度-日付変更線、北東太平洋域(日付変更線-南北アメリカ大陸)、北大西洋域(アメリカ大陸-ユーラシアおよびアフリカ大陸)の6月から9月までの台風発生数の経年変動を示す。L38設定に比べてL78設定では北西太平洋域と北東太平洋域で発生数が増加したことが確認でき、北西太平洋域での増加は顕著である(図D-2ab)。北大西洋では発生数は減少の傾向が確認できるが、観測との相関係数はわずかに増加する傾向があった(図D-2c)。北西太平洋域に注目すると、L38設定では台風発生数は過小評価であったが、L78設定の台風発生数は観測に比べて過大評価になった。一方で経年変動は観測と相関は依然として低い。これはL38設定と比較してL78設定で季節内振動の振幅が大きく表現されるようになったものの、実験開始から一月以上先の季節内振動はアンサンブルメンバー間で変動が大きいことに起因すると考えられる。





図D-2: 6月から9月までの台風発生数の経年変動。青線はL38設定、赤線はL78設定のそれぞれの結果を示し、黒線はベストトラックに基づく観測値を示す。青と赤の実線は64メンバーアンサンブル平均値、点線は中央値を示し、濃いシェードは25%値-75%値、薄いシェードは最小値-最大値を示す。判例の括弧付きの数値は観測との経年変動の相関係数を示す。

#### 参考文献

Kikuchi, K., et al., 2017: Tropical intraseasonal oscillation simulated in an AMIP-type experiment by NICAM. *Climate Dynamics*, 48, 2507-2528.

Kodama, C., et al., 2021: The Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): experimental design, model description, and impacts of model updates. *Geoscientific Model Development*, 14, 795-820.

Takasuka, D., et al., 2023: How can we improve the seamless representation of climatological statistics and weather disturbances toward reliable global K-scale climate simulations? Submitted to *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*.

Yoshida, R., Kajikawa, Y., and Ichikawa, H., 2014: Impact of boreal summer intraseasonal oscillation on environment of tropical cyclone genesis over the western North Pacific. *Scientific Online Letter on Atmosphere*, 10, 15-18.

(海洋研究開発機構, 東京大学大気海洋研究所)

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

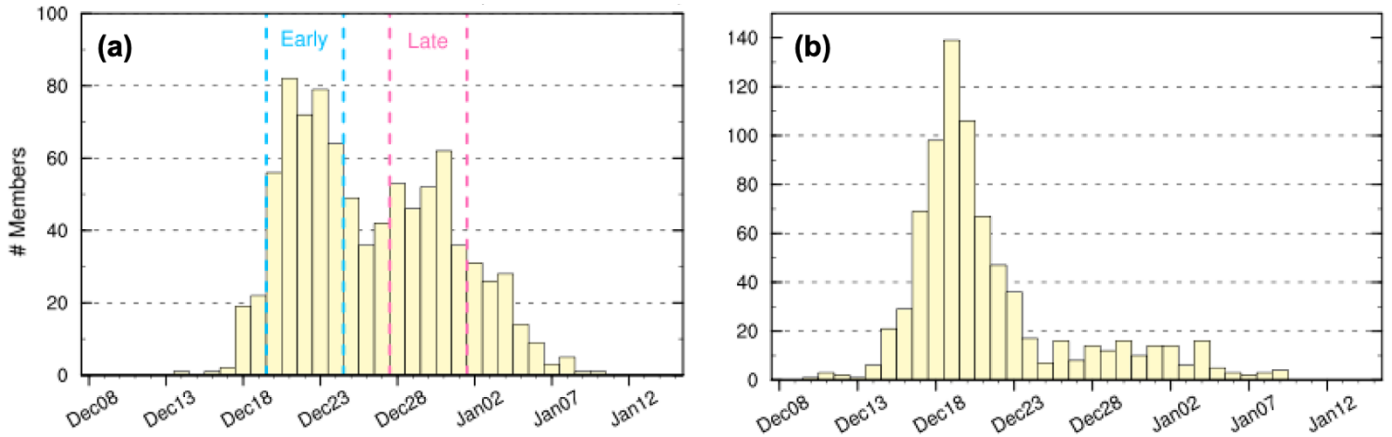
MJO の伝播の物理に関するこれまでの研究では、MJO 対流に対する大規模な力学応答に伴う水蒸気変動がその本質であるとする見方が主流であり (e.g., D. Kim et al., 2014; Adames and Wallace, 2015)、予測性能の議論の際にもその見方を援用する研究がなされてきた (e.g., H. Kim et al., 2016)。この見方に立てば、MJO を実現するプロセスは MJO スケールの大気場によって概ね一意に決まっているという解釈につながるのが自然である。

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

2021年度は、水平格子間隔14kmの全球非静力学モデルNICAM (Satoh et al. 2014) を用いて、2018年11月、12月のMJOを対象とした合計2,000メンバーの標準再現実験、および海面水温 (SST) 分布のMJOの東進タイミングの解特性への影響を調べるための2,000メンバーの感度実験を実施し、MJOの東進に寄与する熱帯-中緯度相互作用や、MJOの東進プロセスの自由度の決定に対するSSTの季節成分の重要性を明らかにした。2022年度は、特に後者の知見を補強するためにさらに追加で行った1,000メンバーのアンサンブル実験についての結果を報告する。

2018年12月のMJOに対して行った1,000メンバーの標準再現実験では、MJO対流の西太平洋への東進タイミングが2つに分岐するという解特性を得ていた (図D-3a)。これが12月のSSTによるものであるという仮説を検証するために、大気の初期条件は標準実験と同一のものとした上で、海面水温分布だけ2018年11月のMJOに対応するものに差し替える感度実験を構築した。具体的には、NEXRA (Kotsuki et al. 2019) によって生成された2018年11月23日~12月2日の各日00UTCの大気初期値 (各日100メンバー) を用いた上で、その各日に対して2018年10月25日~11月3日からスタートするSST分布を下部境界条件として与えた。各メンバーにおいて再現されたMJO対流をKikuchi et al. (2012) で定義されたMJOインデックスを用いてトラッキングし、図1aに対応す

る形で西太平洋への移動タイミングの頻度分布を比較したところ（図D-3b）、感度実験では分岐解が消滅し、伝播が速い解のみ実現することがわかった。12月のSSTは11月のSSTに比べて南北非対称性が大きく、北半球冬季への季節進行が進んでいることを考慮すると、この結果はSSTの季節成分がMJ0の東進プロセスの自由度を変化させることを明確に示すものであり、12月のMJ0の東進タイミングの予測は内在的に難しいことを意味する。



図D-3 Kikuchi et al. (2012) で定義されたMJ0インデックスの位相がPhase 7（西太平洋）に到達した日毎に分別したメンバー数の頻度分布。(a) 2018年12月のMJ0に対する標準実験、(b) 2018年11月のMJ0に対応する海面水温分布に差し替えた上で2018年12月のMJ0の再現実験を行う際に用いる大気初期値からスタートさせた感度実験。

#### 参考文献

- Adames, Á. F., and Wallace, J. M. (2015). Three-dimensional structure and evolution of the moisture field in the MJ0. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(10), 3733-3754.
- Kikuchi, K., Wang, B., & Kajikawa, Y. (2012). Bimodal representation of the tropical intraseasonal oscillation. *Climate Dynamics*, 38(9), 1989-2000.
- Kim, D., J.-S. Kug, and A. H. Sobel (2014). Propagating vs. Non-propagating Madden-Julian oscillation events. *Journal of Climate*, 27, 111-125.
- Kim, H. M., Kim, D., Vitart, F., Toma, V. E., Kug, J. S., & Webster, P. J. (2016). MJ0 propagation across the Maritime Continent in the ECMWF ensemble prediction system. *Journal of Climate*, 29(11), 3973-3988.
- Kotsuki, S., Terasaki, K., Kanemaru, K., Satoh, M., Kubota, T., & Miyoshi, T. (2019). Predictability of record-breaking rainfall in Japan in July 2018: Ensemble forecast experiments with the near-real-time global atmospheric data assimilation system NEXRA. *SOLA*, 15A-001.
- Miura, H., Suematsu, T., and Nasuno, T. (2015). An ensemble hindcast of the Madden-Julian oscillation during the CINDY2011/DYNAMO field campaign and influence of seasonal variation of sea surface temperature. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 93, 115-137.
- Miura, H., Satoh, M., Nasuno, T., Noda, A. T., and Oouchi, K. (2007). A Madden-Julian oscillation

event realistically simulated by a global cloud-resolving model. *Science*, 318(5857), 1763-1765.  
Zhang, C. (2013). Madden-Julian oscillation: Bridging weather and climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(12), 1849-1870.

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

(東京大学大気海洋研究所, 海洋研究開発機構)

大気個々の対流活動は、豪雨などの災害の要因となるが、小さい水平スケールを持つため数値モデルでその挙動を適切に表現するためには非常に高い水平解像度が必要である。一方、西岸境界流や海洋渦などの100 km程度の小さい水平スケールを持つ海面水温の構造が、移動性高低気圧や寒冷前線の活動へ影響を及ぼし得ることが近年の研究で明らかになりつつある(Parfitt and Seo 2018; Masunaga et al. 2020)。これらのことから、高水平解像度の大気海洋結合モデルの性能向上が、季節スケール予報のさらなる精度向上に重要であると考えられる。本課題では、大気モデル (NICAM) と海洋モデル (COCO) の水平解像度をそれぞれ14kmと0.25度とした設定で大気海洋結合モデル NICOCO (Miyakawa et al. 2017) の全球積分を行い、その性能評価と改良に取り組んでいる。これらは、個々の大気の対流や海洋渦を概ね表現することができる解像度である。2021年度には、大気モデルと海洋モデルの解像度をそれぞれ3.5kmと0.1度とした結合実験により、日本近辺を温帯低気圧が通過する事例において、大気・海洋の高解像度化により上昇流の分布や海洋渦の活動の表現が飛躍的に高精細になることを示した。

本年度は、2016年8月1日からの盛夏期40日間を対象とした実験において10メンバーアンサンブルの作成に成功した。結合モデルの高解像度化の意義を明らかにするために、水平解像度を低く設定した同様の実験についても実施した。なお、昨年度には冬季を対象とした同様の実験を実施し、報告している。夏季は海洋の成層が弱いために海洋は大気の影響を受けて短い時間スケールで大きく変動している。特に日本付近では、夏季には台風などの大気海洋結合プロセスが重要な役割を果たす現象も頻発するため、大気海洋結合モデルの性能を評価することはより重要である。

詳細な解析は現在進行中であるが、台風通過に伴い、海面水温が局所的に低下する様子が明瞭に表現されている (図D-4; なお、描画の便宜のために大気水平解像度を14kmとした実験について一例を示している)。一般に、黒潮は深い構造を持つために水温変動が小さいとされているが、本事例では黒潮上においても3度程度の大きな水温低下を示している。海洋モデルを0.25度とした実験においても台風の通過に伴う海面水温低下が表現されているが、下図にみられるような非常に微細な構造は、その解像度の低さのために表現されていなかった (図略)。

本プロジェクトのこれらの実験結果を解析することで、全球結合モデルにおいて水平解像度を高解像度化することの意義について明らかになることが期待される。

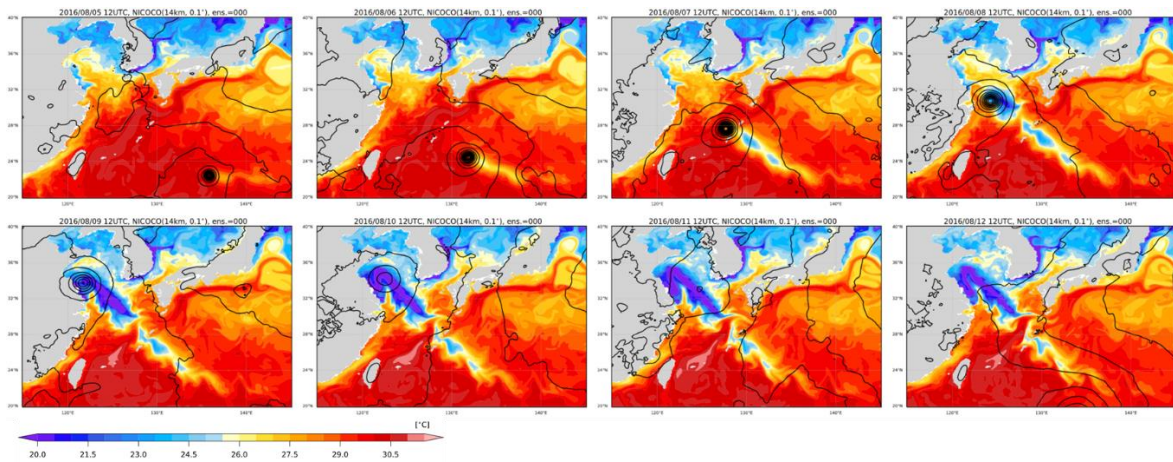


図 D-4 2010 年 NICOCO 実験（大気モデル水平解像度 14km、海洋モデル水平解像度 0.1 度）により表現された 2016 年 8 月 5 日から 12 日までの日平均海面水温（色）と海面気圧（等値線）の水平分布。

#### 参考文献

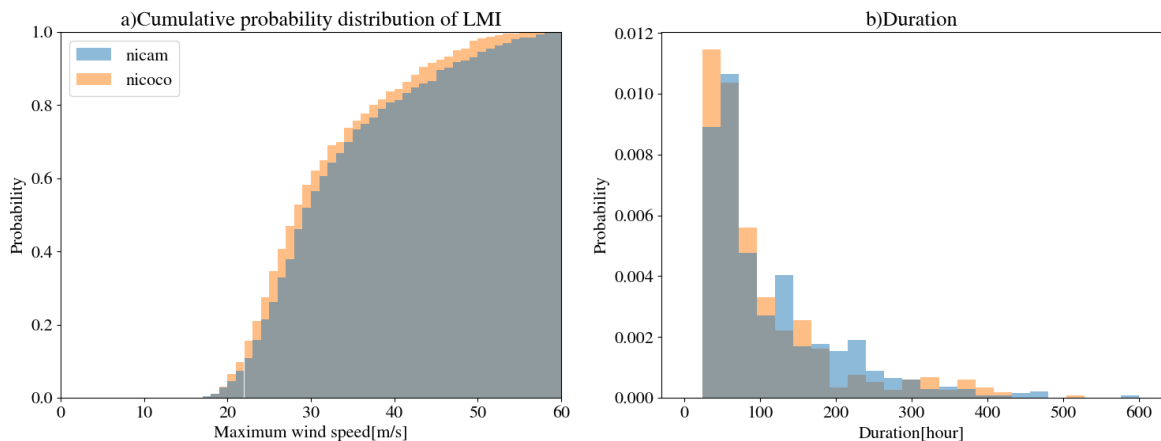
- Ma, X., and Coauthors, 2015: Distant influence of Kuroshio eddies on North Pacific weather patterns? *Sci. Rep.*, 5, 17785, <https://doi.org/10.1038/srep17785>.
- Weaver, A. J., & Hughes, T. M. C. (1996). On the incompatibility of ocean and atmosphere models. and the need for flux adjustments. *Climate Dynamics*, 12(3), 141-170.
- Masunaga, R., H. Nakamura, T. Miyasaka, K. Nishii, and Y. Tanimoto, 2015: Separation of climatological imprints of the Kuroshio Extension and Oyashio fronts on the wintertime atmospheric boundary layer: Their sensitivity to SST resolution prescribed for atmospheric reanalysis. *J. Climate*, 28, 1764-1787, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00314.1>.
- Miyakawa, T., Yashiro, H., Suzuki, T., Tatebe, H., & Satoh, M. (2017). A Madden-Julian Oscillation event remotely accelerates ocean upwelling to abruptly terminate the 1997/1998 super El Niño. *Geophysical Research Letters*, 44(18), 9489-9495.
- Parfitt, R., and H. Seo, 2018: A new framework for near-surface wind convergence over the Kuroshio Extension and Gulf Stream in wintertime: The role of atmospheric fronts. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 9909-9918, <https://doi.org/10.1029/2018GL080135>.
- Sausen, R., Barthel, K., & Hasselmann, K. (1988). Coupled ocean-atmosphere models with flux correction. *Climate Dynamics*, 2(3), 145-163
- Von Storch, J.-S. 2000: Signatures of air-sea interactions in a coupled atmosphere - ocean GCM. *Journal of Climate*, 13(19), 3361 - 3379.

#### 詳細⑤ フラックス調整を適用した3か月NICOCO実験の台風

台風は主に暖かい海洋から供給される潜熱をエネルギー源に強度の発達・維持を行う (Emanuel 2003)。台風の通過に伴い、海面水温の低下が衛星観測等により報告されている (Lloyd and Vecchi 2011)。台風による海面水温の低下は台風自身の強度の発達や維持を阻害する働きがある。海面水温を外部条件とした大気モデ

ルでは大気と海洋の相互作用を表現できず、台風の強度に不確実性を与える(Ogata et al. 2016)。本課題の中で作成した、大気海洋結合モデル(NICOCO)のドリフトを軽減するフラックス調節を取り入れた結合モデルデータセットを作成した。ここでは本データセットのうち2010年の7月から9月までを対象とした実験の出力を利用して、大気海洋相互作用が台風の統計量に与える影響を調査した結果を報告する。海洋結合ありとなしの実験はそれぞれ16メンバーのアンサンブル実験を実施している。

図D-5aは台風が生涯で経験する最大風速(生涯最大風速)の累積頻度分布を示す。海洋を結合した場合、生涯最大風速の弱化が確認できる。これは台風通過時の海面水温の低下が結合モデルで表現されたため、台風の強度の強化を抑止したと考えられる。この効果は台風の寿命に影響することが考えられる。図D-5bは台風の寿命に対する大気海洋結合の影響を示す。海洋結合がない場合は72時間をピークとする一方で、海洋結合がある場合はピークが48時間に移動した。海洋結合がある場合は台風の寿命を短くする効果があることが確認できた。台風の強度を現実的に表現できる全球高解像度大気海洋結合モデルのデータセットは世界的にも画期的なデータセットと言える。今後本データセットを詳細に解析する予定である。



図D-5: 海洋結合の台風の統計量への影響。(a)生涯最大風速の累積頻度分布を示す。(b)台風の寿命の頻度分布を示す。青色は海洋結合なし、橙色は海洋結合アリの結果を示す。ビンの幅はそれぞれ1[ms<sup>-1</sup>](a)、24[hour](b)。

#### 参考文献

- Emanuel, K., 2003: Tropical cyclones. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 31, 75-104.
- Lloyd, I., and Vecchi, G., 2011: Observational evidence for oceanic controls on hurricane intensity. Journal of Climate, 24, 1138-1153.
- Ogata, T., Mizuta, R., Adachi, Y., H. Murakami, and Ose, T., 2016: Atmosphere-ocean coupling effect on intense tropical cyclone distribution and its future change with 60km-AOGCM. Scientific Reports, 6, 29800.

## 詳細⑥ 2段階アンサンブル

(海洋研究開発機構, 東京大学大気海洋研究所)

令和元年房総半島台風を対象とした大規模アンサンブルを実施することによって上陸の2週間前から台風が日本に接近する可能性が高まることを確認した。実験開始から上陸までの時間が長いリードタイムでの…リードタイムの長い実験では、上陸する位置はアンサンブルメンバー間で大きく変動していた。上陸後の台風による被害を確率的に表現するのは困難となる。そこでここでは台風によって極端な被害が起こりそうなアンサンブルメンバー(コントロール)を選択して、コントロールの台風と近い経路を通る新たなアンサンブルメンバーを生成し、極端シナリオに注目した2段階アンサンブルを開発した。新たなアンサンブルメンバーの生成にはBreeding of Growing Mode法(BGM法; Toth and Kalnay 1993, 1997)を利用し、2019年の台風15号を対象とした。NICAM-LETKF JAXA Research Analysis(Chen et al. 2022)を利用した2019年9月1日18時開始の100メンバーアンサンブル実験を実施した。この中で関東地方を通過して、最も台風の強度が強いメンバーをコントロール(CTL)とした。CTLと近い位置に台風を検出できたメンバー(29メンバー)を2段階アンサンブルのメンバー(Member)として採用した。実験開始から6時間後のCTLとMemberの台風の中心位置のずれ(D) [km]に基づき、以下のようにMemberの予測場( $F_{MEM}$ )を修正した。

$$F_{Member}^* = F_{CTL} + \alpha(F_{CTL} - F_{Member}) \quad (D \geq 50km)$$

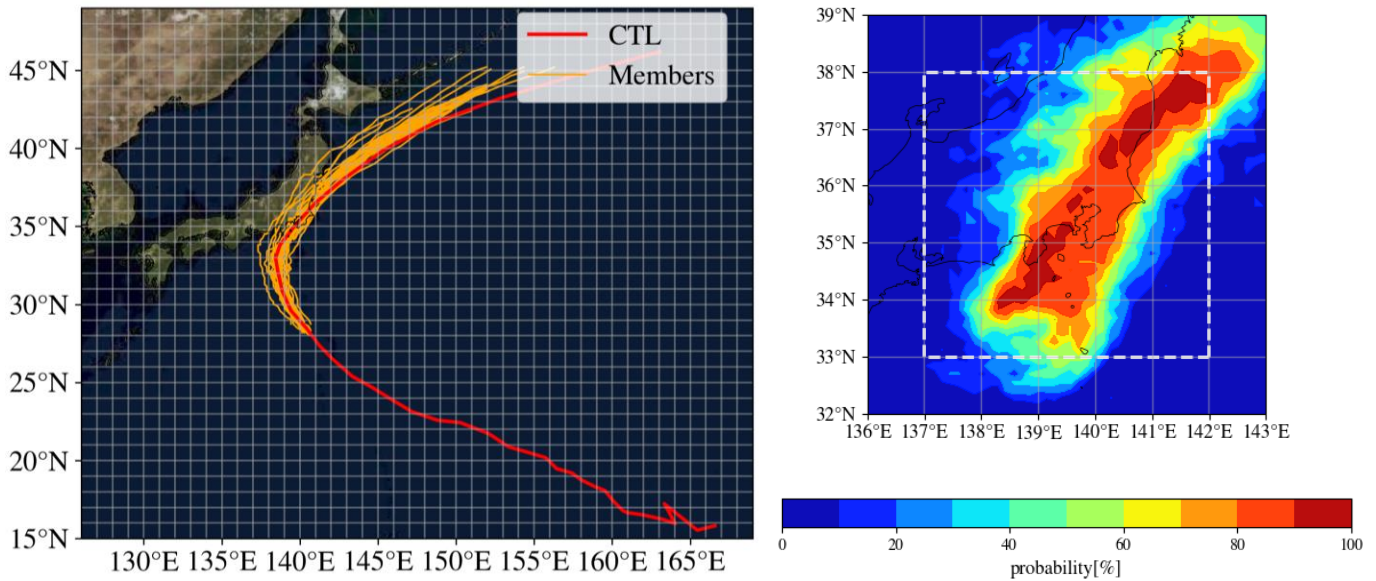
$$F_{Member}^* = F_{Member} \quad (D < 50km)$$

ここで、 $F_{CTL}$ はCTLの予測場を意味する。 $\alpha$ はリスケールファクターを示し、

$$\alpha = \frac{50}{D}$$

と定義した。修正した予測場( $F_{Member}^*$ )をMemberの初期値として実験を開始する。6時間毎に予測場の修正を行い、2019年9月8日12時まで予測場の修正を行ない、2019年9月8日12時以降は予測場を修正しない実験(フリーラン)を実施した。

フリーランのMemberの台風の経路を図D-6左に示す。EMMの台風経路はCTLの周辺に収束した様子が確認できる。この台風が通過時に時間降水量が30[mmh<sup>-1</sup>]を超える確率を図D-6右に示す。台風の中心付近では時間降水量が30[mmh<sup>-1</sup>]を超える確率が100%に達し、台風中心から離れたところでは確率が低下する様子が確認できる。



図D-6: 2段階アンサンブルの結果。左図は台風の経路を示し、赤色はCTL、橙色はMemberを意味する。右図は白破線の範囲内に台風が存在する時に、時間降水量が30[mmh<sup>-1</sup>]を超える確率を29メンバーのMemberのフリーランから算出した結果を示す。

#### 参考文献

- Chen, Y., et al., 2022: NEXRA: A weather research analysis system based on the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model with a local ensemble transform Kalman filter. PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2272193/v1>]
- Toth, Z., and Kalnay, E., 1993: Ensemble forecast at NMC: The generation of perturbations. Bulletin of the American Meteorological Society, 74, 2317-2330.
- Toth, Z., and Kalnay, E., 1997: Ensemble forecast at NCEP and the Breeding Method. Monthly Weather Review, 125, 3297-3319.

### 2-2-3. テーマ3：先進的大規模データ同化手法

#### (1) 成果概要

これまでに開発・最適化を進めた全球アンサンブルデータ同化システム NICAM-LETKF を用いて、温室効果気体の地表面吸収排出量を観測データを用いて逆推定する実験を実施し推定結果の評価を行った。推定結果は既往研究と比較して現状で十分に誤差を低減できておらず、更なる最適化を必要とする。また、NICAMを用いた逆解析システム NISMONによる二酸化炭素の地表面吸収排出量推定結果を元に、大気中二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の南北間濃度差について解析を実施し、気候シミュレーションでは半球間のCO<sub>2</sub>濃度勾配を過小評価することを明らかにした(成果①)。水安定同位体比をトレーサとするデータ同化実験においては、複数の雲微物理過程スキームを用いた比較実験を実施し、雲降水過程の評価を行った。また水安定同位体比の衛星観測データを用い、大アンサンブルデータ同化による気象場の改善について定量的評価を行い、水安定同位体比を同化することによる誤差の改善率が、アンサンブル数を増やすほど大きくなることが示された(成果②)。NICAM-LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA)で運用されているデータ同化システムへ開発・最適化成果を還元した(成果③)。また、昨年に引き続き時間を要する実験結果のポス



トプロセス処理を、シミュレーションと同時に行うシステムについての高度化を行なった（成果④）。（国立環境研究所、理化学研究所）

## （2）実施体制

令和4年度は以下の2つのサブテーマと研究推進担当者を設け、それぞれ研究・開発を実施した。また、テーマ3全体の情報交換の場として、2月に会合を開催し、研究内容についての情報交換を行った。

- サブテーマA：大気トレーサの大アンサンブル同化（成果①）（成果②）

主担当者：田上雅浩・八代尚・劉光宇（国立環境研究所）

- サブテーマB：大規模データ同化計算技術開発（成果③）（成果④）

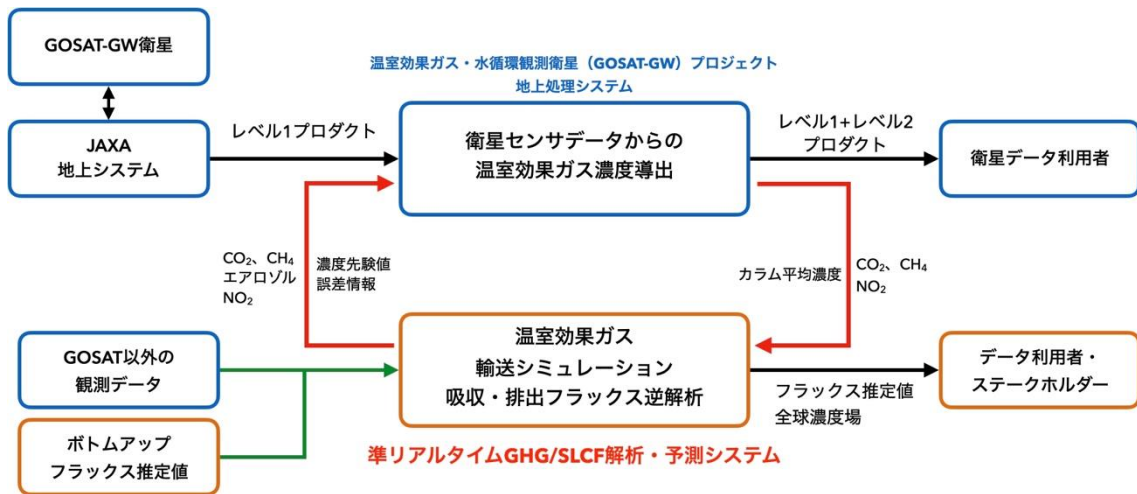
主担当者：八代尚（国立環境研究所）、寺崎康児（理化学研究所）

## （3）成果内容

### 成果① 温室効果気体逆推定システムの開発と評価（サブテーマA、国立環境研究所）

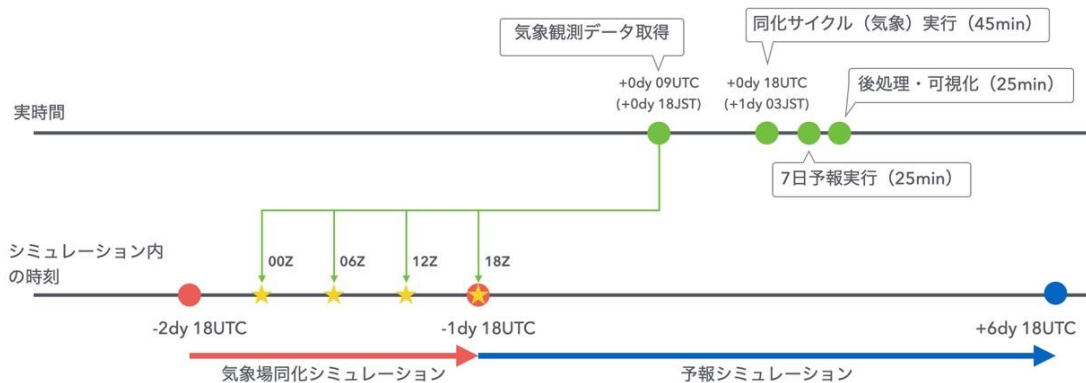
本研究では国立環境研究所が推進する温室効果ガス観測技術衛星GOSATシリーズに関するプロジェクトと連携し、気象場のデータ同化解析による温室効果ガスの輸送シミュレーションと、温室効果ガスの地表面からの吸排出量推定の両方を実現するデータ同化システムNIES-DEの開発を行った。GOSATの観測ミッションでは、衛星に搭載されたセンサによって得られた放射スペクトルデータから、リトリーバル手法を用いて温室効果ガスのカラム平均濃度を算出し、レベル2プロダクトデータとして配布を行っている。このカラム平均濃度の算出には、各観測点における大気中の温室効果ガス・エアロゾル等の鉛直濃度分布を先験値として与える必要があり、これらの先験値はシミュレーションの結果を用いている。また、得られた温室効果ガス観測データを用いて地表面からの吸排出量を算出し、その値を用いて計算された全球の温室効果ガスの三次元濃度場はレベル4プロダクトとして公開されており、自然起源及び人為起源の温室効果ガス吸排出量の評価に用いられている。このようなトップダウン推計による全球温室効果ガス収支の把握は、パリ協定によって定められた各国からの温室効果ガス排出量報告（グローバル・ストックテイク）の値を客観的に評価する手段として重要視されている。図E-1-1に、衛星観測システムと温室効果ガス・エアロゾル濃度解析・予測システムとの関係を示す。特に近年、衛星観測データの迅速な配信に対するニーズが高まってきており、2024年度に打ち上げが予定されているGOSATシリーズ3機目の衛星GOSAT-GWにおいても、センサデータ取得後数日で観測（リトリーバル）結果を配信する速報版プロダクトの作成が検討されている。速報版データの作成には、温室効果ガス・エアロゾル濃度解析・予測システム側での迅速な濃度場解析と予測も重要であり、本研究では準リアルタイムでの解析・予測を念頭に置いたシステム開発を行っ

た。GOSAT-GW衛星では新たにNO<sub>2</sub>の観測が予定されており、このシステムは将来的にはエアロゾルに大気化学種を含めたShort-lived Climate Forcer (SLCF)の解析・予測にまで拡張されることが期待される。



図E-1-1：GOSAT衛星観測とモデルシミュレーションの相補関係に関する模式図。  
図はGOSAT-GW衛星を例としている。

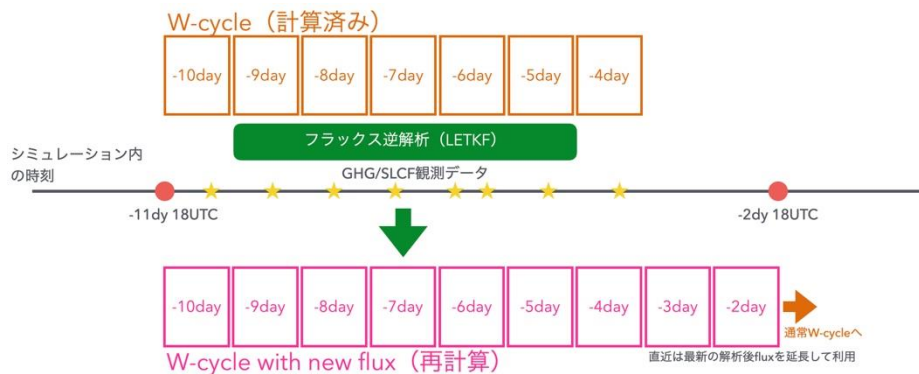
NIES-DEは2つのフェーズで構成される。一つは、気象観測データを収集し気象場解析を行うフェーズであり、これをW-cycleと呼ぶ。W-cycleの模式図を図E-1-2に示す。まず、基準日から1日前までの気象観測データを取得し、データの前処理を行う。この観測データを用いたアンサンブルデータ同化を実施し、さらにアンサンブル平均からの7日間の延長予報を行う。W-cycle 1回には6時間ウィンドウのデータ同化サイクルが4回含まれており、解析は1日ずつ進むことになる。富岳を用いた試験運用では、224kmメッシュ、32メンバーの設定で160ノード640プロセスを用いた場合、同化サイクルに45分、延長予報に25分、後処理と可視化に25分を要した。



図E-1-2：NIES-DEシステムのW-cycleパートの模式図。

次に、境界条件である温室効果ガスの地表面フラックスを解析するフェーズについて説明する。このフェーズはC-cycleと呼ぶ。C-cycleで行う解析には、W-cycle7回分の計算結果を用いる。観測データには速報的に得られた温室効果ガス観測データを用い、過去1週間の地表面フラックスの解析を行う。地表面フラックスの分散は先行研究(Kang et al., 2012)に倣い、 $5e^{-9}$  kg/m<sup>2</sup>/sより大きくなるように設定した。解析された1週間分のフラックスを元に、再度W-cycleを1週間遡って開始する。このように、入れ子状の計算を行うことで、地表面解析と輸送

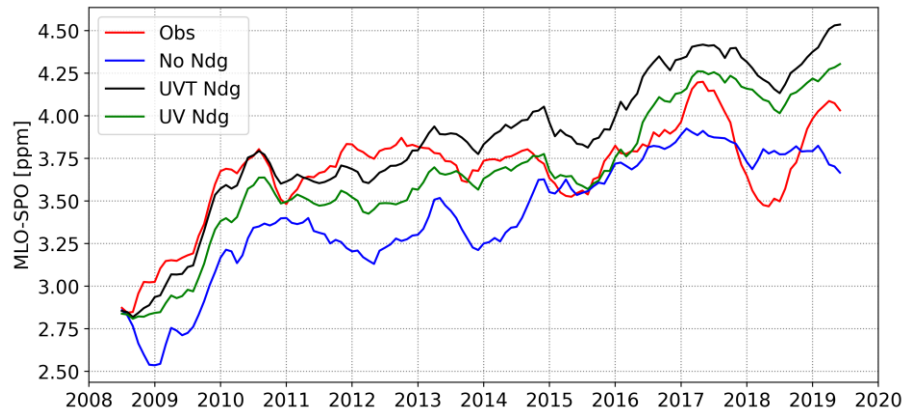
解析を順次行うことが可能になる。



図E-1-3 : NIES-DEシステムのC-cycleパートの模式図。

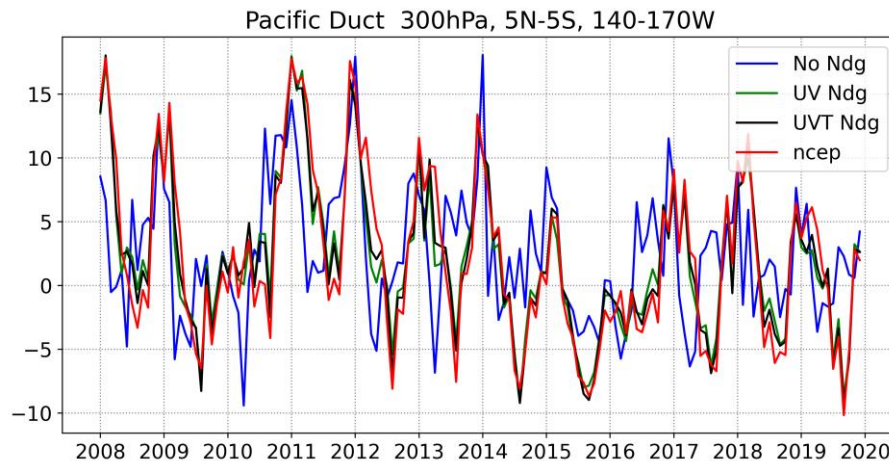
NIES-DEの大気モデルにはNICAMを用い、水物質の他にCO<sub>2</sub>、エアロゾル(鉱物ダスト、海塩、硫酸塩、炭素性粒子)を輸送トレーサーとした。データ同化システムにはLETKFを用い、観測データとしてNCEP PREPBUFRに加えて、温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)の配布するCO<sub>2</sub>観測データを用いた。開発した解析システムを用いて、モデルシミュレーション結果から作成した擬似観測データを用いた理想実験(パーフェクトモデル実験)を実施し、既往研究との結果比較を行ったが、現状の計算設定では十分な同化性能を得られていないことが判明した。今後の課題として、解析を実施する期間単位(ウィンドウ)の選定や観測誤差の大きさ、解析対象となるフラックス種別の制限等の調整を実施し、解析精度を向上する必要がある。

続いて、長期解析されたCO<sub>2</sub>フラックスセットを用いて、気象場の影響が南北半球間のCO<sub>2</sub>分布に与える影響について解析を行なった。全球大気モデルにはNICAMを用い、フラックスにはNISMOM-CO<sub>2</sub>を用いて解析された2007-2020年のデータを用いた。気象場のデータ同化には水平風(u, v)のグリッドナッジング(緩和時間1日)を用い、224kmメッシュ、鉛直78層での計算を実施した。また、この計算をコントロール実験(UV Ndg)として、比較対象として、水平風に加えて気温を緩和時間5日でナッジングしたケース(UVT Ndg)と、ナッジングを行わないケース(No Ndg)を実施した。すべてのケースにおいて利用した初期値とフラックスは同じである。2007年の気象場を用いて10年間のスピナップを行った後に、2008年1月から2020年12月までを計算期間とした。図E-1-4に、地表付近の大気CO<sub>2</sub>濃度の長期観測地点であるマウナロア山(MLO)と南極点(SPO)での観測値のトレンド成分の差を示す。この値は南北半球間の濃度差の指標として用いることができる。図より、赤線で示される観測された濃度差は、2009年から2010年にかけて増大し、その後7年間程度差を維持した後に、2017年から2020年にかけて増大→減少→増大を繰り返していることがわかる。シミュレーションの結果は概ねこの傾向を再現しているが、コントロール実験(UV Ndg)では2009年の増大と2017年の減少から2018年の回復の大きさを過小評価する傾向にあった。またUVT Ndgのケースでは、全体的なトレンドとしてUV Ndgのケースよりも半球間濃度差がじわじわと増大する傾向にあった。これは主に、北半球側の観測点の濃度の増加トレンドがコントロール実験よりも大きいことに由来していた。ナッジングを行わないケース(No Ndg)では、半球間の濃度差は全体としてより縮まる傾向にあった。



図E-1-4：観測とシミュレーションによって得られた南北半球間のCO<sub>2</sub>濃度差の時系列。値はマウナロア（MLO）と南極点（SPO）の両観測地点でのトレンドの差から計算した。

半球間の長寿命トレーサーの輸送に強く関わる気象場として、「Pacific Duct」と呼ばれる領域の変動が提唱されている（Francey and Frederiksen, 2015）。この領域は熱帯東太平洋の上部対流圏に位置しており、北半球の冬季から春にかけて、この領域を通じた南北間の気塊の交換が活発になることが示唆されている。図E-1-5に、140-170W, 5N-5S, 300hPaでの東西風を元に計算したPacific Duct係数を示す。図において、冬から春にかけての値が小さいほどDuctが閉じている、すなわち半球間輸送が抑制され濃度差が広がると考えられ、2009年から2010年にかけては、先行研究（Francey and Frederiksen, 2015）で示す通り実際にその傾向が見てとれる。2015年から2016年の期間についても、半球間濃度差の増加する時期と対応していると捉えられるが、濃度差の広がる幅とPacific Duct係数との定量的な関係までは議論できない。また、2017年から2020年にかけて見られる半球間濃度差の変動を説明できるシグナルは、Pacific Duct係数からは読み取ることができないことがわかった。ナudgingを行なった場合のPacific Duct係数は再解析データ（NCEP2）とよく一致しており、ナudgingによって風速・風向が観測に近い値に修正されていることがわかる。一方で、図E-1-4で示した通り、半球間交換の値は観測とシミュレーションとの間で相違があり、この点においても、Pacific Ductだけではない半球間交換のパスや、逆解析によって最適化されたフラックスの不確実性が起因していることが示された。気温をナudgingした場合に半球間濃度差が広がるようにみえる点については、水平方向の輸送ではなく、気温をナudgingしたことによる鉛直方向の大気安定性の違いが、長期間のシミュレーションで徐々に蓄積していくと考えられる。ナudgingを行わない場合のPacific Duct係数は、冬季の平均値としてナudgingした場合よりも高い傾向にあり、常にDuctが開いている側に寄っている＝半球間交換が強く濃度差が小さくなると解釈でき、より小さい半球間濃度差を示す傾向と整合的である。このことは、輸送場に関するモデルの持つバイアスが、長期的な温室効果ガスの半球間濃度分布に与える影響を表しており、ナudgingを行わない気候シミュレーション等での再現性を悪化させる原因となっていることを示唆するものである。



成果② 水安定同位体比データ同化実験（サブテーマA、国立環境研究所）

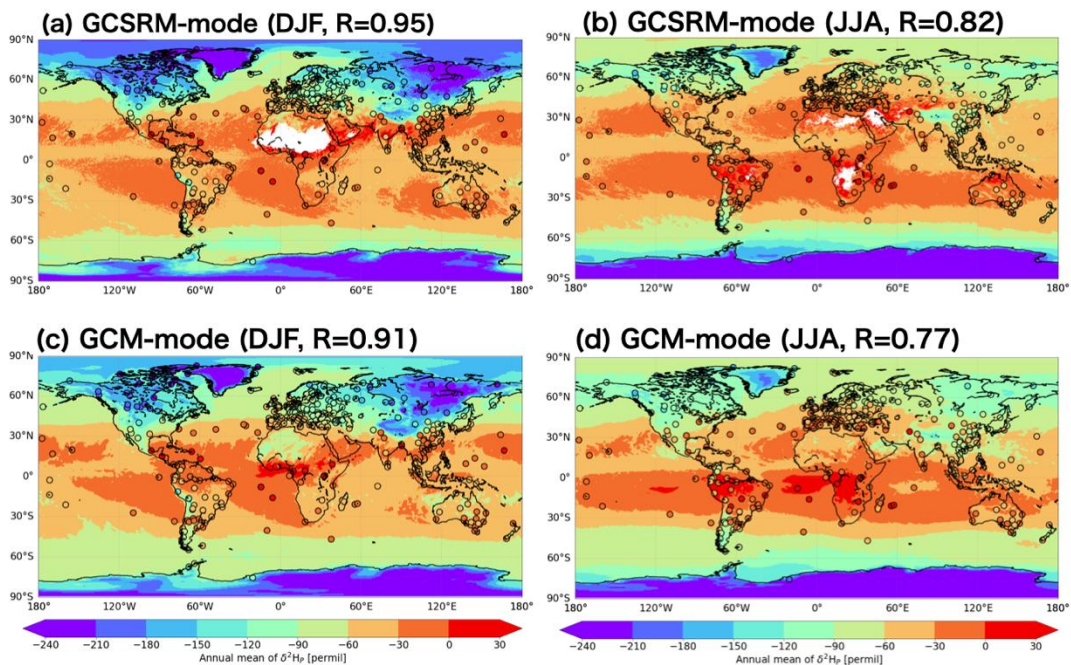
水の安定同位体 ( $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ と $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ) は、普通の水分子 ( $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ) と比較して、飽和水蒸気圧や拡散係数が小さい。これにより、水の安定同位体は液相や固相に偏りやすい、分別という性質を持つ。水の安定同位体に対する水分子の割合を水の安定同位体比と言い、その値は水蒸気が凝結するほど低くなる。その一方、異なった同位体比を持つ2つの水蒸気が混合した場合は、それぞれの水蒸気量に応じて加重平均された値となる。このため、水蒸気の同位体比を調べることで、その水蒸気は凝結の影響を大きく受けたのか、または他の水蒸気と混合したのかを区別することができる。

本研究では、このような水の安定同位体の変動を理解し、それを数値気象予報の高度化に活かすため、衛星で観測された水同位体データを用いた気象モデルにデータ同化することで、水の安定同位体が数値気象予報の改善に貢献できるのかを調査するものである。本研究の最終目標は、対流パラメタリゼーションを用いない設定 (CSRモード) でのモデルシミュレーションに基づき、実際の高密度・高頻度観測データを用いて、大アンサンブルでの水同位体データ同化実験を行うことである。昨年度までに、開発したモデルを用いたCSRモードでの気候実験を行った。その後、低水平解像度の気候実験で用いられる設定 (GCMモード) で実行できる水同位体データ同化システムの開発を行った。今年度は、まずはGCMモードで気候実験を行い、CSRモードで気候実験を行った場合のシミュレーション結果と比較した。その後、GCMモードのもと、大アンサンブルで水同位体データ同化実験を行った。CSRモードでの水同位体データ同化実験および実際の観測データを用いたデータ同化実験は今後の課題である。

気象分野では、多数の全球大気大循環モデル (GCM) に水の安定同位体が導入されており、シミュレートされた値と観測値とを比較することで、GCMの大気水循環過程が検証されている。しかしながら、水の安定同位体が導入された多くのモデルは大規模凝結スキームと対流パラメタリゼーションを用いてサブグリッドスケールの雲や降水の表現をしている。そのためGCMは特に熱帯域の降水の変動を再現するのが難しいという問題がある。その一方、領域気象モデル等では高い水平解像度で対流を陽に解像することを前提とした、詳細な雲微物理過程を用いることにより、熱帯域の降水の変動をよく再現できる。このようなCSRモードでは水の同位体比のシミュレーション性能も向上することが見込まれる。これまでは、GCMモードと全球CSRモードの両方を実行可能な全球モデルが存

在せず、両者の再現性能が気候シミュレーションの中でどの程度異なるのかは十分に理解されていなかった。そこで本研究では、全球雲システム解像モデルNICAMのGCMモードに水の安定同位体を導入し、GCMモードによる気候実験を実施し、昨年度までに実施したNICAMのCSRモードでの気候実験の結果との比較を行った。

図 E-2-1 に 2 つのモードを実行して得られた降水  $\delta^2\text{H}$  の季節平均値を示す。どちらのモードおよびどの季節も、降水同位体比は熱帯域で高く、高緯度ほど低くなる分布パターンを示した。このパターンは緯度効果と呼ばれるものである。2 つのモードとも緯度効果を示しているが、高緯度では CSRモードの方がやや低い傾向であった。シミュレーションの値と観測値との空間相関を求めたところ、CSRモードでは DJF に 0.95、JJA に 0.82、GCMモードでは DJF に 0.91、JJA に 0.77 と、CSRモードの方がともに高かった。このことから、降水同位体比をシミュレーションする能力は GCMモードの方が高いことがわかった。



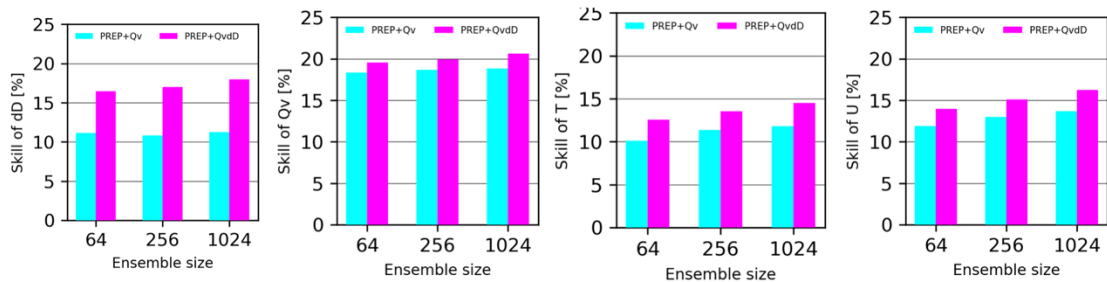
図E-2-1 : CSRモード (a, b) およびGCMモードによる気候実験の結果。DJF (a, c) およびJJA (b, d) において平均した降水  $\delta^2\text{H}$ の結果を示す。単位は‰。シェードはシミュレーションの結果であり、プロットは全球降水ネットワークによる観測値である。

続いて、開発したモデルを用いて、大アンサンブルでの水同位体データ同化実験を行った。ここでは、GCMモードで水同位体データ同化実験を実施した。CSRモードは降水同位体比のシミュレーション性能は高くなるが、計算コストが大きく増えてしまうためである。水同位体データ同化実験は、水蒸気同位体比をデータ同化できるNICAM-LETKF-WISOを用いて行った。これは、NICAM-LETKFの同化変数（気温、気圧、東西風、南北風、水蒸気量）に、水蒸気同位体比（ $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ）が加えられたものである。水蒸気同位体比をデータ同化したときの影響を評価するため理想化実験を行った。ここでは、NICAMの空間解像度はGL05（約224 km）、鉛直総数は78層とした。局所化は水平500km、鉛直 $\log_{10}(0.4)$  hPaとした。理想化実験であるため、1アンサンブルのフリーラン実験を行い、それを真値とした。大アンサンブル実験を行うために、1024アンサンブルでのフリーラン実験を1年間行い、それ

をアンサンブル実験の初期値とした。本実験では、2018/1/1から3/1までの2ヶ月間を対象とした実験を行った。疑似観測データは、実際に観測された位置情報を基に、真値のシミュレーションに観測誤差を加えて作成した。疑似観測データは、従来観測 (PREP)、衛星観測された水蒸気量 (Qv)、衛星観測された水蒸気同位体比 (dD) の3種類である。想定する衛星観測センサー (IASI) は高分解能であるため、ピーク高度に相当する約4.5km面におけるデータを2.5度x2.5度に間引いて疑似観測データを生成した。同化に使用する観測データ種とアンサンブル数 ( ) の中の数字) を変えて10実験を行った。PREP (64)、PREP+Qv (64)、PREP+QvdD (64)、PREP (256)、PREP+Qv (256)、PREP+QvdD (256)、PREP (1024)、PREP+Qv (1024)、PREP+QvdD (1024)。

従来観測データ (地点観測、ゾンデ観測など) のみを同化したPREP実験を基準に、追加で衛星観測された水蒸気量を同化 (PREP+Qv) したときのRMSEの改善率を図E-2-2に示す (水色の棒グラフ)。値は2018/2/1~3/1までの全球平均値である。従来観測では海上の観測が少ないが、衛星観測では陸や海を含めて観測できる。このため、追加で水蒸気量を同化することで、水蒸気量だけでなく、水蒸気同位体比、気温、風速のRMSEが10%以上低下した。この低下の度合いはアンサンブル数が大きくなるほど顕著であった。

これに加えて、水蒸気同位体比をさらに追加したものがPREP+QvdD実験である (ピンクの棒グラフ)。興味深いことに、水蒸気同位体比を追加で同化することで、水蒸気同位体比だけでなく、水蒸気量、気温、風速といった変数のRMSEがさらに低下した。水蒸気同位体比は、水蒸気が凝結または混合のどちらの影響が大きいかを区別できるため、このような情報をデータ同化によってモデルに教えることで、気温や風速といった変数の誤差が低減したと考えられる。



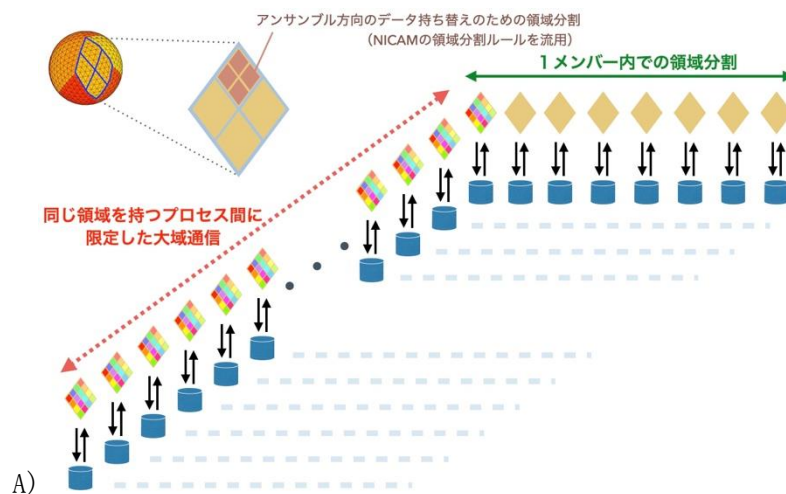
図E-2-2:PREPからのPREP+QvおよびPREP+QvdDによる全球RMSEの低減率 (Skill)。左から、高度5kmにおける水蒸気同位体比、水蒸気量、気温、風速についてである。

### 成果③ NEXRAシステムへの開発成果実装 (サブテーマB、国立環境研究所・理化学研究所)

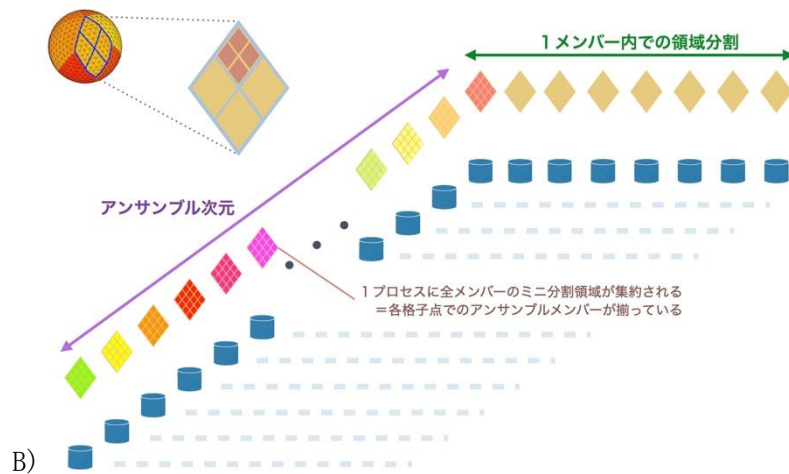
NICAM-LETKF JAXA Research Analysis (NEXRA)は、宇宙航空技術研究機構 (JAXA) が運用する気象予測システムである。本システムは大気モデルにNICAM、データ同化システムにLETKFを採用し、観測データとしてNCEP PREPBUFR、衛星放射輝度温度 (AMSU-A, MHS, ATMS)、そして衛星全球降水マップ (Global Satellite Mapping of Precipitation; GSMaP) を同化している。NEXRAでは、同化サイクルを全球112kmメッシュ解像度、100アンサンブルメンバーで実行し、その後延長予報をアンサンブル平均からダウンスケールした全球14kmメッシュで実行している。このシステムはスーパーコンピュータ「京」を用いて開発が進められ、JAXAの所有するスーパーコンピュータシステムJSS2/SORA-MA (Fujitsu FX100) へ移植されて定常運用されている。本研究では、アップデートされたJAXAのスーパーコンピュータJSS3/TOKI-SORA (Fujitsu FX1000) 上でのNEXRA運用に際し、本研究課題において過去2年にわたり実施してきた

NICAM-LETKFの富岳上での最適化及び開発成果をNEXRAシステムに還元し、性能向上を実現した。

NICAM-LETKFの富岳上での最適化において、最も重要な要素はNICAMとLETKF間のデータ受け渡しの高速化である。データの受け渡しはファイル入出力を介して行われる。ファイル入出力はメモリ上での受け渡しと比較して転送速度が遅い。メモリ上の受け渡しを実現する場合には、シミュレーションモデルとデータ同化システムの単一プログラム化や、ネットワーク通信を介したMPMD実行等を行うためのプログラム修正などを行うことになる。一方で、メモリ上での受け渡しと比較して、メモリ量の制約を受けにくく、より大きなデータを一時保存することが可能である。また、利用可能なノード数が不足している場合に、アンサンブル計算を一度に全て行うのではなく、何回かに分けて実行し、計算結果を蓄積しておく場合にも有用である。ファイル入出力でのデータ受け渡しの利点を生かすために、その短所である低転送速度を可能な限り改善することが必要となる。我々はNICAM-LETKFの最適化において、読み書きの並列化を徹底することで転送速度の最大化を実現した(Yashiro et al., 2016; 2020)。具体的には、必要とするデータを各プロセスで分割し、それらを独立に入出力する方法を採用した。ただし、シミュレーションパートが書き出す計算結果は、各メンバーが異なるMPIプロセス=ノードで実行されているため、それらのデータをLETKFパートにおいて読み込んでも、各プロセスが計算に必要とする全メンバーの同じ格子点データが収集されていない。これまでのシステムでは、マスタープロセスが共有ファイルシステムに蓄えられた全メンバーのデータを順に読み込みつつ、必要なプロセスに転送する方法を取っていた。この方法では、1プロセスのみがファイル入力を行うため、I/Oスループットを最大化することはできなかった。またこの改良版として、全プロセスが自分に必要なファイルを読みに行く方法も検討されたが、この場合はプロセスローカルではないデータへのアクセスが、全プロセスから集中するため、やはりI/O性能は低下する。本研究で採用した方式は、直前のシミュレーションパートで各プロセスが書き出したファイルを、LETKFパートにおいても最も近いプロセスが読み込むものである。また、全メンバーのデータの集約はファイルベースではなく、プロセス間通信を用いて行い、その際も全対全通信を回避し、同じ空間領域を保持しているプロセス間のみの通信に限定することで、データの移動距離を最小にすることとした。模式図を図E-3-1に示す。







図E-3-1：データ局所化、転送並列化を考慮したファイル入出力とプロセス間通信の模式図。それぞれ、ファイル入出力時と通信時のデータの状態（上, A）とLETKFパート計算時のデータの状態（下, B）を表す。

上記の最適化成果を適用したNICAM-LETKFでNEXRAシステムを入れ替え、性能計測を行った。図E-3-2にNEXRAにNICAM-LETKF最適化成果を適用する前と後での1同化サイクルの経過時間を示す。特にLETKFパートにおいて、ファイル読み書きの時間が削減され、経過時間が半分に削減されていることがわかる。この最適化されたシステムはシミュレーションを高解像度化した際に、さらに有利となる。解像度を56kmメッシュ、鉛直層を78層に増大し、アンサンブル数は半分の64メンバーに削減したケースでは、問題サイズは8倍となり経過時間も同程度増大し、ノード数を1.6倍（80ノード→128ノード）増加させても線形的には13分x8/1.6=65分程度かかることが予測されるが、実測では50分程度で完了することができており、より高速化の効果が高いことが実証された。

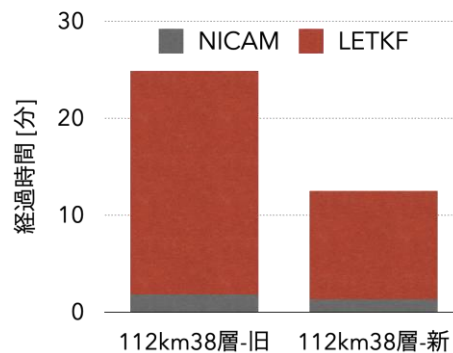


図 E-3-1：解析用データ作成のためのポストプロセス計算方法

#### 成果④ 高解像度アンサンブルデータ同化データのポストプロセス処理高度化 (サブテーマB、国立環境研究所・理化学研究所)

R3年度に引き続き、カップラーを用いたNICAM の並列・並行ポストプロセス機能の拡充を実施した。ポストプロセスにかかる時間の短縮は大規模シミュレーション実験を実施する上で、より重要度を増している。本研究の昨年度成果では、シミュレーション実行後に緯度経度格子系へ変換 (Remap) するポストプロセス操作について、カプラーを用いた並列・並行ポストプロセス機能の拡充を行なった。具体的には、図E-4-1に示す通り、汎

用カップラーJcup (Arakawa et al., 2014, 2020, 2022) を用いて、NICAM とポストプロセスプログラム CoupledIO を同時実行し、時系列出力のためのデータを多対多の MPI 通信によって転送しつつ格子変換を行い、NetCDF形式での単一ファイル出力を実施することを可能にした。NetCDF 形式を採用したことにより、ファイルの可逆・不可逆圧縮が可能になり、ストレージ利用量の削減が可能となった。

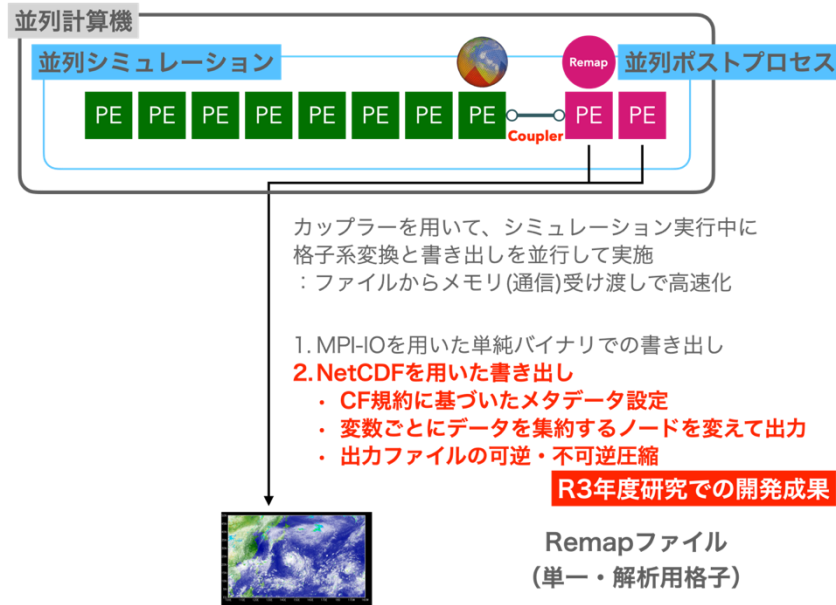


図 E-4-1：解析用データ作成のためのポストプロセス計算方法 (並列・並行ポストプロセス) の概略図 (R3年度成果報告書より抜粋)。

このNetCDFを用いた圧縮・出力では、変数ごとにRemapされた全ての格子点データを、出力を担当するノードに集約してから単一ファイルとして出力するため、1プロセスで圧縮処理とファイル出力を行うことになり、これが処理時間のボトルネックとなってしまふ。そこでR3年度の開発では、変数ごとに出力するノードを分けることで、スループットを向上させる方法を採用した。図E-4-2に概略を示す。しかしこの方法は以下のような問題点を持っている。

- 1) 処理のオーバーラップが可能なのはファイル書き出し部分のみであり、変数毎に、全プロセスが関わる水平方向のデータ集約が完了しないと、次の変数の集約に移ることができない
- 2) ファイル出力直前に担当プロセスで保持しないといけないデータサイズが水平・鉛直全格子点となるため、メモリ使用量が多い。

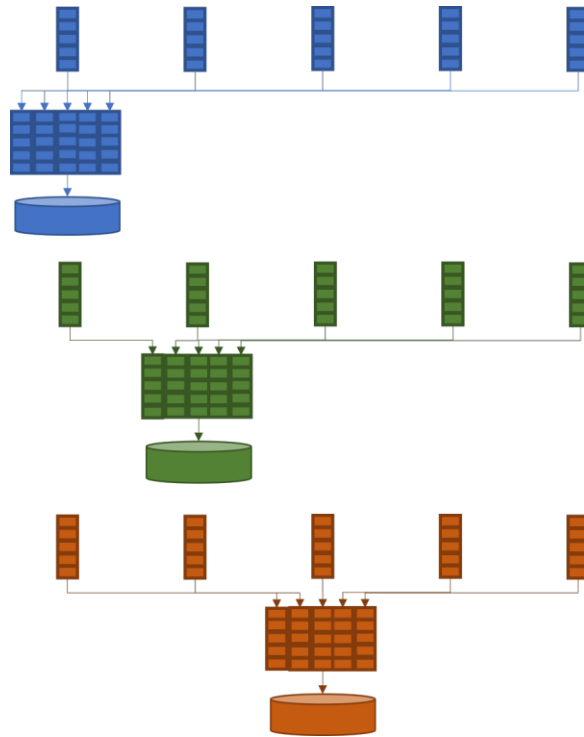


図 E-4-2 : 担当ノード切り替え方法による並列ファイル出力の模式図。

2)については、例えば3.5kmメッシュ、78層の三次元変数を同程度のメッシュサイズの緯度経度格子に4バイトで変換しようとした場合、必要なメモリサイズは $12000 \times 6000 \times 78 \times 4 = 20.9 \text{ GiByte}$ と見積られ、富岳を1ノード4プロセスで実行した場合のプロセスあたりメモリ利用可能量6GiBを大きく超えてしまう。この問題を解決するため、今年度は更なる並列I/O処理の高度化を行なった。

まず、変数集約フェーズ (Store Phase) とファイル書き出しフェーズ (Write Phase) の分離を実施した。これにより、最もボトルネックとなるファイル書き出しフェーズを並列に実行することが可能になり、最大でI/Oプロセスの数と同数のNetCDFファイルを同時に書き出すことが可能になる。実際のユースケースを考えた場合、I/Oプロセス数と出力したい変数の数 (=ファイル数) が一致することはないため、プロセス数よりも出力変数が多い場合は、再度変数集約とファイル書き出しの両フェーズを実行することになる。この2つのフェーズをまとめた単位を、本研究では便宜上「サイクル」と称する。次に、メモリが不足する問題を緩和するために、特にファイルサイズの大きい3次元変数について、鉛直方向の分割を行った。近年の全球シミュレーションで用いる鉛直層数は40層から100層程度であり、このデータを1層ずつ各プロセスが分担して保持する場合、必要メモリ量は40-100分の1まで劇的に緩和される。これら2つの改良を行った場合の、並列ファイル出力の流れを図E-4-3に示す。図の例では、10個のプロセスを用いて、鉛直5層の変数を3つ出力している。分割されたデータは15個あり、同時に10個を処理可能であるため、2サイクルで全ての変数を出力している。

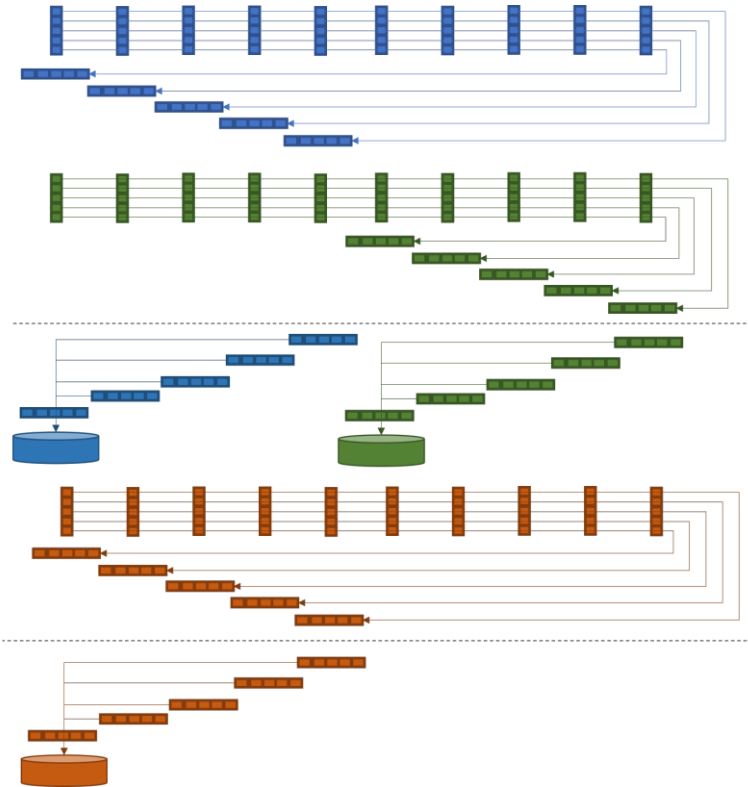


図 E-4-3：データ集約・書き出しフェーズ分離と、鉛直層分割を施した並列ファイル出力の模式図。

以上により、シミュレーションと並列に動作するI/Oプロセスでのファイル出力の更なる並列化と、省メモリ化を同時に達成することが出来た。一方で、大幅なメモリ利用量削減が行われたため、I/Oプロセスで利用可能なメモリ量にまだ余裕があるケースが考えられる。また、I/Oプロセスが鉛直層数よりも少ない場合に、1サイクルでファイル出力が完結せず、例外処理が煩雑になる。そこで、鉛直層の分割単位を1層毎に限定せず、必要に応じて複数層で分割可能にした。これにより、1つのサイクルで集約可能な変数の数が増加し、全ての変数を出力するのに必要なサイクル数を削減することが可能になる。何層までまとめて扱うかについては、最適化パラメータとしてI/Oプロセス実行時に与えられるようにした。図E-4-4に模式図を示す。この図での問題サイズは図E-4-3と同じであるが、1プロセスが最大2層のデータを保持する設定に変更した結果、5層3変数の出力を1サイクルで完了できている。

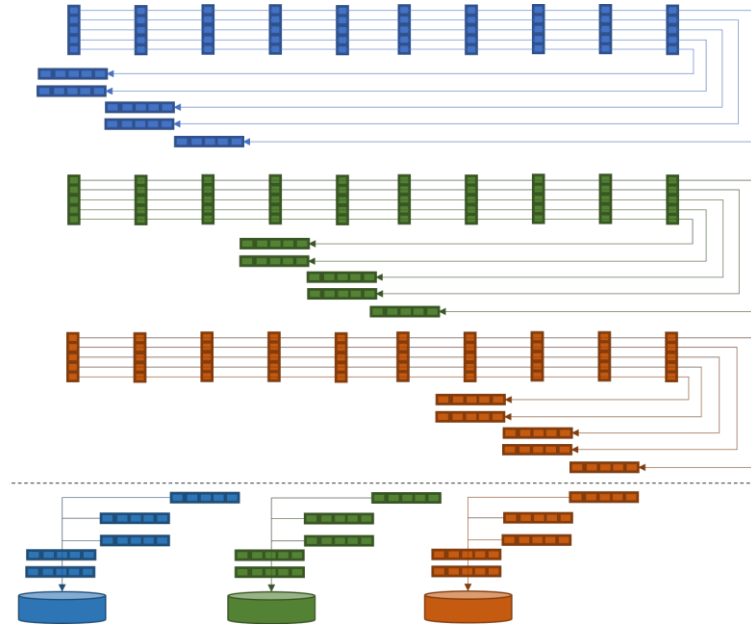


図 E-4-4 : 図 E-4-3と同じ、ただし、1 プロセスが最大2層のデータを保持する場合。

本研究での改良の効果を定量的に評価するために、スパコン上でのベンチマークテストを実施した。用いたNICAMの空間解像度は224kmメッシュ40層、remappingによって変換される緯度経度格子データの水平格子数は180x90である。出力変数の数とシミュレーション内での出力間隔については実際の実験ケースを想定し、三次元変数を16種類、3時間おき、二次元変数を26種類、30分おきに出力する設定とした。図E-4-5に10時間分のシミュレーションの中で、I/Oプロセスがデータ出力に要した総時間をまとめたものを示す。図より、横軸のI/Oプロセス数を増加させた場合に、経過時間が効果的に短縮されることがわかる。ただし、プロセス数を増やしていくと経過時間の削減は頭打ちになる。これは、サイクル数の効果的な削減がそれ以上進まないことと、プロセス数の増加では削減されない変数集約フェーズにかかる時間が経過時間の中で相対的に大きくなるためである。また、同時に1プロセスが保持する鉛直層数の違いを10層、20層、40層と変化させて計測した結果、層数が多い方が、同じI/Oプロセス数を用いた場合に高速にファイル出力を終了させることが出来ている。本研究成果により、最も計算資源を節約して高速に処理を行うパラメータを、利用する計算機と実験設定に合わせて柔軟に設定することが可能となった。

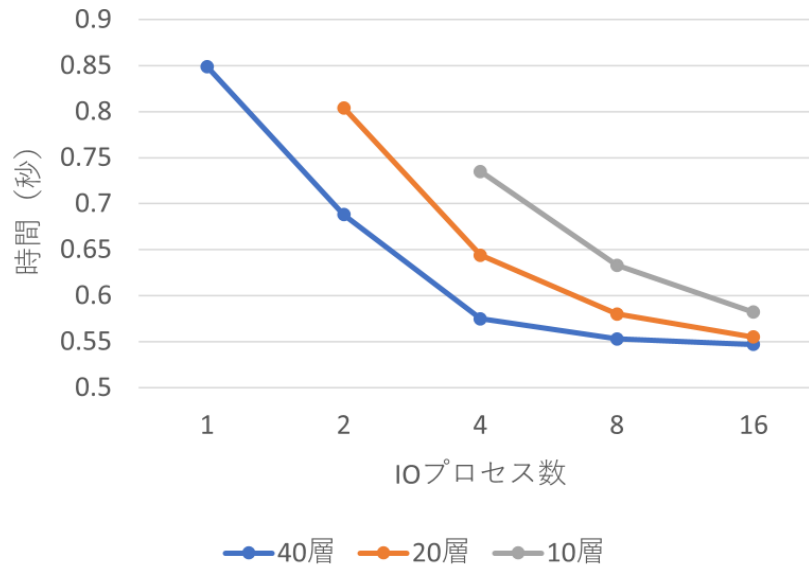


図 E-4-5 : IOプロセスの所要時間。横軸はIOプロセス数、縦軸は経過時間の総計を表し、色の違いは1プロセスが同時に保持する鉛直層数の違いを表す。

#### 2-2-4. プロジェクトの総合的推進

##### (1) 成果概要

プロジェクトの総合的推進として、プロジェクト全体の連携を密にかつ円滑に運営するため、担当責任者間の意見調整のための会議「富岳コアミーティング」を6回開催し、文部科学省と担当責任者間との間の連絡窓口を務めた。実施項目ごとの研究会の開催等の実施項目を補助管理し、参画各機関の連携・調整を推進した。

外部有識者及びオブザーバから構成される本課題の諮問委員会を 令和5年3月20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。令和5年3月28日に「富岳」成果創出加速プログラム課題205の進捗状況ヒアリングが実施され、説明資料、ヒアリングにおけるフィードバックコメント、コメントに対する本課題テーマ責任者による回答を提示した。

本課題で得られた成果等を集約・管理し、得られた成果を通じて、気象庁「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」や「気候変動適応計画」への貢献を進めた。具体的には、本課題の研究成果を気象庁「局地アンサンブル予報システム」の開発に活用を検討し、気象庁においても「富岳」の利用を拡充し、線状降水帯に資する数値予報モデルの開発を加速化している。また、気候変動適応計画に基づき環境省が推し進める気候変動適応情報プラットフォームへの領域・全球大アンサンブル実験結果の登録について検討を進めた。本プロジェクトを通じて、若手研究者や多様な人材の育成を図るために、東京大学や理化学研究所においてインターンシップやオンラインスクールを開催した。本プロジェクトで得られた成果について、令和4年9月10日に一般向けのシンポジウム「第3回シンポジウム～富岳で見える気象の未来予想図～」、令和5年3月20日に第3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。

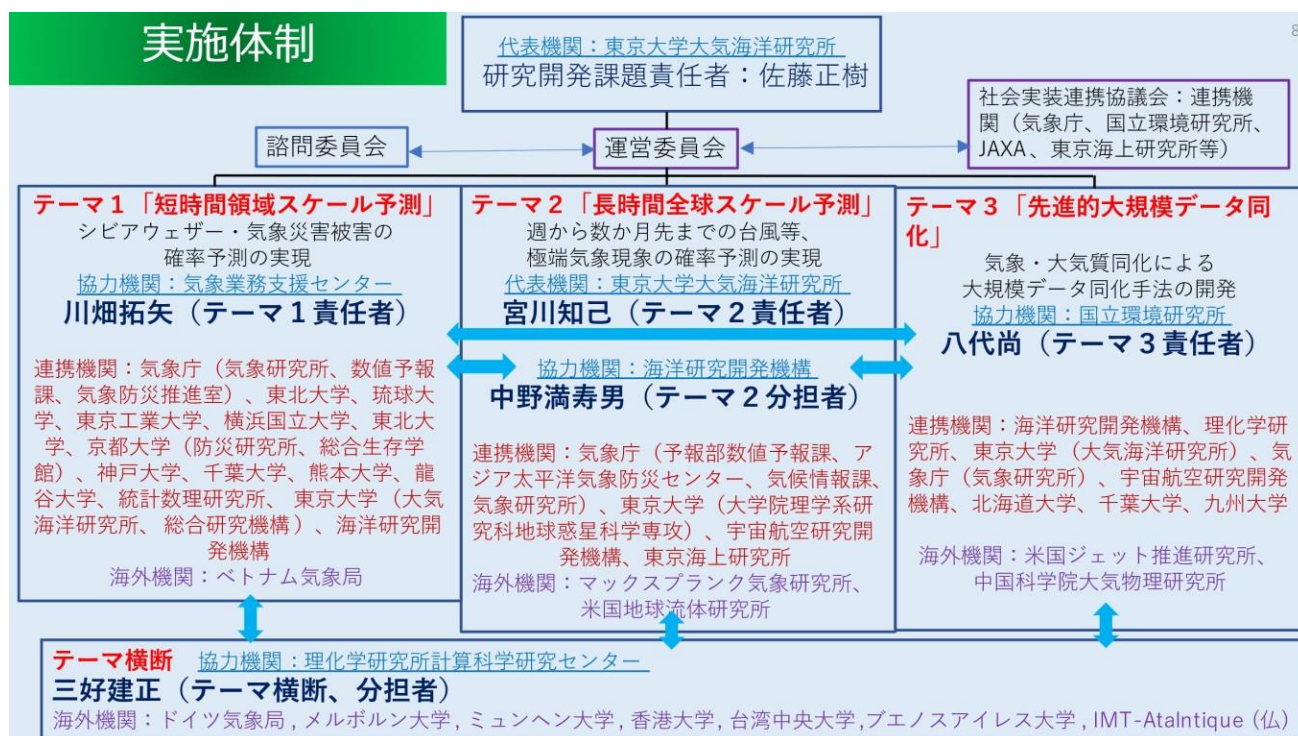


図 F-1: 実施体制

## (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

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6回開催した。

#### ①-3. 諮問委員会 令和5年3月20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。

#### 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

令和4年9月10日に第3回シンポジウム「富岳で見える気象の未来予想図」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

令和5年3月20日に第3回成果発表会を企画・開催した。事務局として、開催に関して、ホームページ、SNS、各種メーリングリスト等による広報アナウンス、参加者登録作業・登録者への連絡、オンライン配信作業、発表資料の公開等を総合的に担当した。

### ② 社会実装連携

本研究の成果の社会実装について、関係機関と協議を行った。

#### ②-1. 気象庁との意見交換、気象庁による「富岳」の利用促進（テーマ1）

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

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

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

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

#### ②-2. 気象庁（気候情報課）（テーマ2）

月～季節スケール予測についての意見交換を行った。

第3回「富岳」気象テーマ2x 気象庁研究会（令和5年1月11日開催）を実施した。

#### ②-3. 東京海上日動火災保険（テーマ2）

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

#### ②-4. JAXA との連携（テーマ3）

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

#### ②-5. 国立環境研究所（テーマ3）



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

#### ②-6. 気候変動適応計画 (テーマ3)

気候変動適応計画に基づき環境省が推し進める気候変動適応情報プラットフォームA-PLAT Pro (研究者・影響評価実施者向け)へ領域・全球大アンサンブル実験結果を提供する予定であり、データ配置を進めた。

#### ③ 人材育成への取り組み

本課題の活動において、以下の人材育成の取り組みを実施した。

③-1. NICAM 開発者会議・tutorial 令和5年1月30,31日(鹿島ハイツスポーツプラザ)、参加者15名。全球非静力学大気モデルNICAMの開発に関する議論他。

③-2. AORI インターンシップ: NICAM 講習会 令和4年8月17-18, 8-9日実施(参加者4名)  
令和5年3月6-7日実施(参加者9名)

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

講師: 佐藤正樹(教授)、宮川知己(准教授)、松岸修平(学術専門職員)他 実施場所: 東京大学大気海洋研究所

③-3. 令和4年度「理研データ同化オンラインスクール(応用編)」

令和4年8月25日~9月22日実施(毎週木曜午前: 講義, 毎週金曜・水曜午前: チュータリング)

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

講師: 三好建正, 大塚成徳(理化学研究所) 実施場所: Zoom を使用したオンライン開催

#### ④ 広報活動

④-1. Web ページ・SNS 作成及び運用

本課題の研究成果や活動等を広く広報するために、Web ページ (<https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/index.php>) を通じ、プレスリリース等の研究成果やイベント開催情報を随時更新し最新の情報を周知した。Web ページ (図 F-2) と同時に Facebook、Twitter においても、本課題 Web ページの情報に加え、スーパーコンピュータ「富岳」に関する情報等も周知した。



図 F-2: 本課題の Web ページ表紙ページ。

#### ④-2. シンポジウムの開催

本プロジェクトでの研究成果を広く一般の方々に周知するため、令和 4 年 9 月 10 日にオンラインにて第 3 回シンポジウム「富岳で見える気象の未来予想図」を開催した（図 F-3）。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-4）。

スーパーコンピュータ「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

# 2022 年度シンポジウム

## 富岳で見える気象の未来予想図

例年、梅雨期以降の6月から10月の出水期には、線状降水帯や台風の襲来により、大きな災害が引き起こされています。地球温暖化の進行に伴い、大雨や台風等の極端気象現象が増加激化する事が予想されており、今後も突然の大雨や巨大な台風の襲来に対する備えの意識を十分に高める必要があります。

我々は、大雨や台風等のより早期の予測をめざして、スーパーコンピュータ「富岳」を活用した研究に取り組みしています。本課題では、激化する極端気象現象からの防災・減災を実現するために、「富岳」を用いた大規模アンサンブルの高解像度気象予測実験を実施し、未来の天気予報技術の確立を目指します。本シンポジウムでは、「富岳」を用いた極端気象予測の研究の最先端を紹介いたします。

**2022年9月10日(土)**  
**13:30 ▶ 16:30**  
オンライン・事前申込制・参加費無料

お申込み <https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/sympo2022.php>  
詳細・お申込みは上記サイトにアクセス下さい。  
※定員になり次第締め切らせていただきます。

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

## プログラム

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

13:35-13:45 「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」課題の研究紹介  
佐藤 正樹 (課題代表) (東京大学 大気海洋研究所 教授)  
今年度は、「富岳」成果創出加速プログラムの大規模予測研究の最終年度となります。本課題では、線状降水帯の早期予測や台風等の予測精度の向上のために、「富岳」による高解像度大アンサンブルシミュレーションを行ってきました。本講演では、本課題のこれまでの取り組みと、今後の気象・大気環境予測の課題について紹介いたします。

13:45-14:00 ~テーマ1~ 「富岳」を用いた線状降水帯予測  
川畑 拓矢 (テーマ1代表) (気象庁気象研究所 / 気象業務支援センター 室長)  
線状降水帯を精度良く予測するためには、高い解像度でシミュレーションを行う必要があります。大きなスーパーコンピュータが必要ですが、精度が小さいときには精度を犠牲にすることが期待されます。このために高解像度の小さな予測を目標とするも、精度の大きさを測ることが重要です。我々は高解像度のアンサンブルシミュレーションを行って、精度の高い予測とともに精度の定量化を行いました。本講演ではこのような線状降水帯に関するいくつかの事例について紹介します。

14:00-14:20 ~テーマ1~ 「大規模アンサンブルを用いた強風発生確率予測」  
呉 品範 (気象業務支援センター研究推進部第二研究推進室 研究員)  
台風のような災害をもたらす顕著現象に対して、精度の高い予測情報を提供する事は重要です。一方、その予測には不確実性が存在し、これを定量的に評価するために、確率予測は重要な役割を果たします。我々は「富岳」を用い、令和元年日本台風を対象に、高解像度のアンサンブル予測実験を行いました。そして計算された1000通りのアンサンブルシミュレーションを用いて、関東エリアの強風発生確率を算出しました。この発表では、台風の高解像度アンサンブルシミュレーションの計算結果と強風確率予測について紹介します。

14:20-14:35 ~テーマ2~ 「今夏の気象気候の概況」  
中野清博 (海洋研究開発機構地球環境部門 研究員)  
今夏はラニーニャが継続し、全国に真夏の早さの梅雨明けになるなどの特徴が見られました。この夏の気象気候を振り返り、台風シーズン後半を展望したいと思います。

14:35-14:55 ~テーマ2~ 「富岳」を用いた極端気象の早期予測  
室川知巳 (テーマ2代表) (東京大学 大気海洋研究所 准教授)  
全球モデルを用いた遠方からの日本への影響や大規模な台風や豪雨などの予測は、大規模なシミュレーションで表現されるようになり、数週間～季節といった長期の予測計算が意味を持つようになります。とはいえ、台風などのより小さな現象の振る舞いは確率的な要素が大きくなるため、長期の計算において精度が落ちてきます。しかし、「富岳」を用いて初期段階の少しづつ異なる多数の計算を行うことにより、リスクの変動として捉えることが出来るようになります。本講演では、台風などの極端気象の「リスクの高まり」を早期に捉える取り組みを紹介します。

14:55-15:00 質疑応答  
15:00-15:10 休憩

15:10-15:45 ~テーマ3~ 「大気環境に関わるエアロゾル全球シミュレーション」  
五藤大輔 (国立環境研究所地域環境保全領域 主任研究員)  
大気汚染物質のエアロゾルは、PM2.5として大気環境だけではなく、太陽光の散乱・吸収、あるいは雲の核となることで、気候にも影響を与えます。大気環境改善と地球温暖化抑制を同時に実施できるように、大気汚染物質を効果的に削減することが国内外で議論されています。このような議論の場にも役立つ科学的知見として、「富岳」を使って得られたエアロゾル高解像度シミュレーションやエアロゾルデータに関して最新の成果を紹介いたします。

15:45-16:20 ~テーマ4~ 「富岳を用いた2021年夏季リアルタイムグリッド豪雨予測の結果解析」  
前島康光 (理化学研究所計算科学研究センター 特別研究員)  
理化学研究所では、スーパーコンピュータ「富岳」を用いて、1000通りのアンサンブルを用いて30秒毎に更新する30分先までの降水予測を10通り行うシステムを開発しました。2021年の東京オリンピック・パラリンピック期間に合わせて、首都圏を対象としたリアルタイム予測の実験を実施しました。本発表では、期間中に発生したリアルタイム豪雨を対象に、リアルタイムシステムによる予測結果の特徴と、今後の展望について紹介します。

16:20-16:30 質疑応答

図 F-3: 第 3 回シンポジウムリーフレット

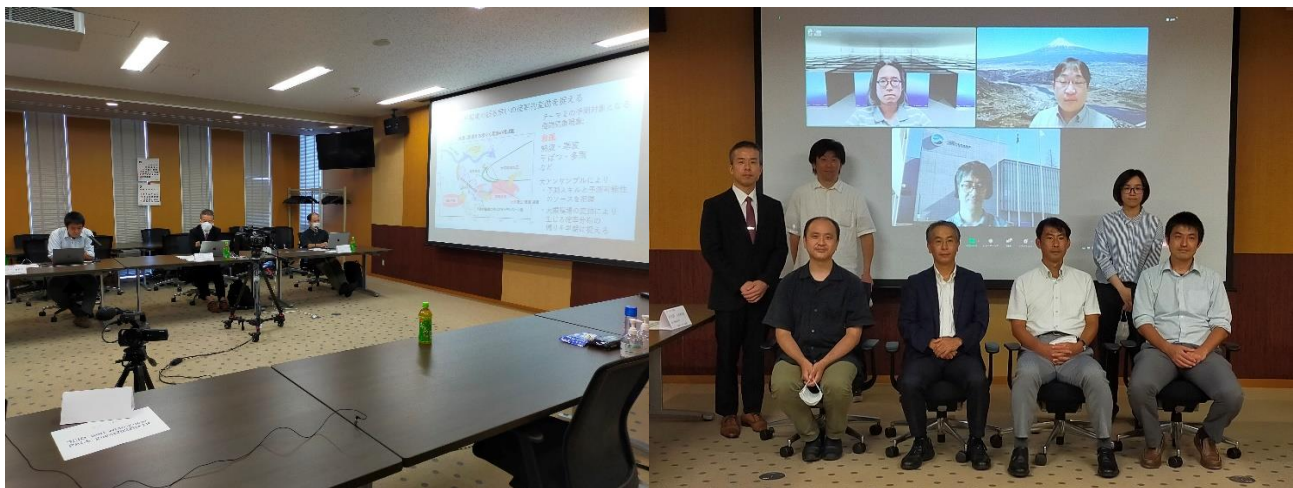


図 F-4: 第 3 回シンポジウムの会場の様子 (令和 4 年 9 月 10 日)  
(左: オンライン配信の様子、右: シンポジウム後の講演者集合写真)

④-3. 成果報告会等の開催

本プロジェクトでの研究成果を関係者間で共有すると共に専門家にも周知する為、令和5年3月20日にオンラインにて第3回成果発表会を開催した(図 F-5)。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、最終年度の成果を報告した。本課題で得られた知見および成果について、諮問委員をはじめとした関係者と共有した。

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

さらに成果発表会後、諮問委員会を開催し、最終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-6)。

スーパーコンピュータ「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 2022年度成果発表会

2023年  
3/20 [月]  
13:00~17:00

▶オンライン  
▶参加費無料  
▶事前申込制

お申込み <https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/seika2022.php>

※本成果発表会は一般の方にもご参加いただけますが、専門性の高い講演内容となります。ご理解ください。

主催 東京大学大気海洋研究所  
後援 一般財団法人高度情報科学技術研究機構  
お問合せ 東京大学大気海洋研究所 富岳気象課題事務局  
e-mail: [fugakuatmos@gmail.com](mailto:fugakuatmos@gmail.com)  
HP: <https://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/fugaku/seika2022.php>

### 第1部 成果発表会 13:00-15:45

13:00-13:05	河原卓 (文部科学省研究振興局参事官 (情報担当) 付 計算科学技術推進室長) ご挨拶
13:05-13:15	佐藤 正樹【課題代表】(東京大学 大気海洋研究所・教授) 「防災・減災に資する新時代のアンサンブル気象・大気環境予測」課題の研究紹介
13:15-13:30	川畑 拓矢【テーマ1代表】(気象研究所・室長 / 気象業務支援センター) 「テーマ1」では何を達成したのか
13:30-13:45	前島康光【テーマ1補】(理化学研究所 計算科学センター・特別研究員) 「富岳を用いた2021年夏季リアルタイムグリダ豪雨予測の結果解析」
13:45-14:00	澤田洋平【テーマ1】(東京大学 大学院工学系研究科附属総合研究機構・准教授) 「巨大アンサンブル気象予測を活用した広域高潮リスクマネジメント」
14:00-14:10	質疑応答
14:10-14:20	休憩
14:20-14:35	宮川 知己【テーマ2代表】(東京大学 大気海洋研究所・准教授) 「台風をはじめとする極端現象の季節予測に向けた取り組みの成果と将来展望」
14:35-14:50	高須賀大輔【テーマ2】(東京大学 大気海洋研究所・特任教授) 「巨大アンサンブル実験により明らかとなったMJ0の伝播タイミングの決定特性」
14:50-15:05	八代 尚【テーマ3代表】(国立環境研究所 地球システム領域・主任研究員) 「衛星観測と融合した大気環境シミュレーションの進展」
15:05-15:20	丹羽 洋介【テーマ3】(国立環境研究所 地球システム領域・主任研究員) 「NICAMを用いたCO2大気シミュレーション」
15:20-15:30	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

- ・澤田洋平 (東京大学): 「巨大アンサンブル気象予測を活用した広域高潮リスクマネジメント」
- ・小林健一郎 (神戸大学): 「球層川流域・超多数アンサンブル洪水予測 Part2: アンサンブル数の増加による予測精度の向上についての考察」
- ・兵品誠 (気象業務支援センター): 「高解像度アンサンブルシミュレーションを用いたインパクトベースの積雪予測: 令和元年東日本台風を事例とした研究」
- ・伊藤純至 (北北大学): 「2013年8月9日に北海道で発生した積状降水等のシミュレーション」
- ・寺嶋康児 (気象研究所): 「1000メンバー-NHM-LETKFを用いた積状降水の予測実験」
- ・前島康光 (理化学研究所): 「富岳を用いた2021年夏季リアルタイムグリダ豪雨予測の結果解析」
- ・南宮新 (理化学研究所): 「積状気象モデル SCALE-RM を使った LETKF の再修正による局所積状降水予測」
- ・James Taylor (理化学研究所): 「Ensemble analysis of 30-minute precipitation forecasts using the real-time SCALE LETKF numerical weather prediction system using Fugaku」
- ・高須賀大輔 (東京大学): 「巨大アンサンブル実験により明らかとなったMJ0の伝播タイミングの決定特性」
- ・丹羽洋介 (海洋研究開発機構): 「高解像度全球大気海洋気象結合モデルを用いた季節スケール予報の向上に向けた取り組み」
- ・丹羽洋介 (国立環境研究所): 「NICAMを用いたCO2大気シミュレーション」
- ・田上雅志 (気象研究所): 「NICAMを用いた大アンサンブル水気同位体データ同化実験」
- ・関谷高志 (海洋研究開発機構): 「大気組成モデルを用いたトッパダウン抽出量推定: GOSAT-GW 衛星観測との連携に向けた取り組み」

図 F-5: 第2回成果発表会リーフレット

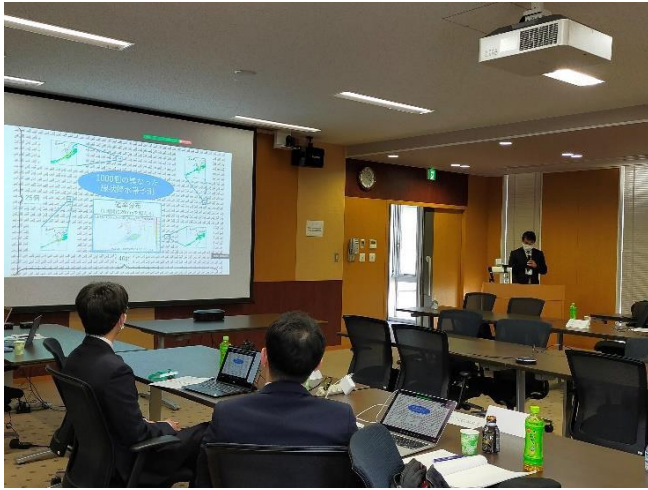


図 F-6 : 第 3 回成果発表会の様子 (令和 5 年 3 月 20 日)  
 (左 : 発表の様子、右 : 成果発表会後の講演者・事務局集合写真)

### 2 - 3 . 活動 (研究会の活動等)

- R4. 4. 4            第 1 回運営委員会 (オンライン、参加人数 : 7 人)
- R4. 6. 3            第 2 回運営委員会 (オンライン、参加人数 : 7 人)
- R4. 8. 26          第 3 回運営委員会 (オンライン、参加人数 : 7 人)
- R4. 9. 10          第 3 回シンポジウム～富岳で見える気象の未来予想図～ (オンライン、参加人数 : 約 200 人)
- R4. 10. 11        第 4 回運営委員会 (オンライン、参加人数 : 7 人)
- R4. 12. 19        第 5 回運営委員会 (オンライン、参加人数 : 7 人)
- R5. 2. 14          第 6 回運営委員会 (オンライン、参加人数 : 7 人)
- R5. 3. 20          第 3 回成果発表会・ポスター発表 (東京大学大気海洋研究所における発表とオンラインのハイブリッド開催、参加人数 : 約 200 人)
- R5. 3. 20          諮問委員会 (東京大学大気海洋研究所における対面会議とオンラインのハイブリッド開催、参加人数 : 約 11 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ェ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)

Amemiya, A., M. Shlok, T. Miyoshi, 2023: Application of recurrent neural networks to model bias correction: Idealized experiments with the Lorenz-96 model., *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, (in print)

Kotsuki, S., K. Terasaki, M. Satoh, and T. Miyoshi, 2023: Ensemble-based Data Assimilation of GPM DPR Reflectivity: Cloud Microphysics Parameter Estimation with the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM). *J. Geophys. Res.* (in print)

Momoi, M., S. Kotsuki, R. Kikuchi, S. Watanabe, M. Yamada, and S. Abe, 2023: Emulating rainfall-runoff-inundation model using deep neural network with dimensionality reduction. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2, 1-25.

Ouyang, M., S. Kotsuki, Y. Ito, and T. Tokunaga, 2022: Employment of hydraulic model and social media data for flood hazard assessment in an urban city. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 44, 101261.

Kotsuki, S., T. Miyoshi, K. Kondo, and R. Potthast, 2022: A Local Particle Filter and Its Gaussian Mixture Extension Implemented with Minor Modifications to the LETKF. *Geosci. Model Dev.*, 15, 8325-8348.

Saito, K., T. Matsunobu, and T. Oizumi, 2022: Effect of upper-air moistening by northward ageostrophic winds associated with a tropical cyclone on the PRE enhancement. *SOLA*, 18, 81-87.

Kobayashi, K., L. Duc, T. Kawabata, A. Tamura, T., Oizumi, K. Saito, D. Nohara, and T. Sumi, 2023: Ensemble rainfall-runoff and inundation simulations using 100 and 1000 member rainfalls by 4D LETKF on Kumagawa River flooding 2020. *Prog. Earth. Plan. Sci.*, (2023)10-5. doi: s40645-023-00537-3

Saito, K., T. Kawabata, H. Seko, T. Miyoshi, L. Duc, T. Oizumi, M. Kunii, G. Chen, K. Ito, J. Ito, S. Yokota, W. Mashiko, K. Kobayashi, S. Fukui, E. Tochimoto, A. Amemiya, Y. Maejima, T. Honda, H. Niino, and M. Satoh, 2023: Forecast and numerical simulation studies on meso/micro-scale high-impact weathers using high-performance computing in Japan. *Numerical Weather Prediction: East Asian Perspectives*. Springer. (in press)

Sawada, K., N. Seino, T. Kawabata, and H. Seko, 2023: Impacts of an Urban Canopy Scheme and Surface Observation Data on a Heavy Rain Event through Data Assimilation. *SOLA*, 2023, 19B, 1-8 (in press).

藤村健介, 小槻峻司, 山田真史, 塩尻大也, 渡部哲史, 2022: 降雨流出氾濫モデルのアンサンブルデータ同化安定化に関する研究. *水工学論文集*. (accepted)

Tsuyuki, T. and R. Tamura, 2022: Nonlinear Data Assimilation by Deep Learning Embedded in an Ensemble Kalman Filter. *J. Meteor. Soc. Japan*, 100, 533-553.

Wu, P.-Y. and T. Takemi, 2022: Impacts of mountain topography and background flow conditions on the predictability of thermally induced thunderstorms and the associated error growth. *J. Atmos. Sci.*, in press.

Usui, K., T. Iwasaki, T. Yamazaki, and J. Ito, 2022: Numerical Simulations and Trajectory Analyses of Local “Karakkaze” Wind: A Case That Could Have Contributed to an Aircraft Accident at Narita Airport on 23 March 2009, *SOLA*, 18, 140-146.

- Yoshimura, R., K. Suzuki, J. Ito, R. Kikuchi, A. Yakeno, and S. Obayashi, 2022: Large Eddy and Flight Simulations of a Clear Air Turbulence Event Over Tokyo on 16 December 2014, *J. Appl. Meteorol. Climate.*, 61, 503–519.
- Terasaki, K., and T. Miyoshi, 2022: A 1024-Member NICAM-LETKF Experiment for the July 2020 Heavy Rainfall Event, *SOLA 2022 Volume 18A Issue Special\_Edition Pages 8–14*, doi:10.2151/sola.18A-002
- T. Honda, A. Amemiya, S. Otsuka, G.-Y. Lien, J. Taylor, Y. Maejima, S. Nishizawa, T. Yamaura, K. Sueki, H. Tomita, S. Satoh, Y. Ishikawa, and T. Miyoshi, 2022: Development of the Real-Time 30-s-Update Big Data Assimilation System for Convective Rainfall Prediction with a Phased Array Weather Radar, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, <https://doi.org/10.1029/2021MS002823>
- T. Honda, A. Amemiya, S. Otsuka, J. Taylor, Y. Maejima, S. Nishizawa, T. Yamaura, K. Sueki, H. Tomita, and T. Miyoshi, 2022: Advantage of 30-s-Updating Numerical Weather Prediction with a Phased-Array Weather Radar Over Operational Nowcast for a Convective Precipitation System, *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2021GL096927>
- Ouyang, M., Kotsuki, S., Ito, Y., and Tokunaga, T. 2022: Employment of hydraulic model and social media data for flood hazard assessment in an urban city. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 44, 101261. doi:10.1016/j.ejrh.2022.101261
- Ohishi, S., T. Hihara, H. Aiki, J. Ishizaka, Y. Miyazawa, M. Kachi, and T. Miyoshi, 2022: An ensemble Kalman filter system with the Stony Brook Parallel Ocean Model v1.0, *Geosci. Model Dev.*, 15, 8395–8410, doi: 10.5194/gmd-15-8395-2022
- Ohishi, S., Miyoshi, T., and Kachi, M., 2022: An ensemble Kalman filter-based ocean data assimilation system improved by adaptive observation error inflation (AOEI), *Geosci. Model Dev.*, 15, 9057–9073, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-9057-2022>, 2022.
- Momoi, M., Kotsuki, S., Kikuchi, R., Watanabe, S., Yamada, M., and Abe, S., 2023: Emulating rainfall-runoff-inundation model using deep neural network with dimensionality reduction. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2, 1–25. doi:10.1175/AIES-D-22-0036.1
- Amemiya, A., Shlok, M., & Miyoshi, T., 2023: Application of recurrent neural networks to model bias correction: Idealized experiments with the Lorenz-96 model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 15, e2022MS003164. <https://doi.org/10.1029/2022MS003164>
- Jianyu LIANG, Koji TERASAKI, Takemasa MIYOSHI, 2023: A Machine Learning Approach to the Observation Operator for Satellite Radiance Data Assimilation, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2023, Volume 101, Issue 1, Pages 79–95, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-005>
- Taylor, J., T. Honda, A. Amemiya, S. Otsuka, Y. Maejima, and T. Miyoshi, 2023: Sensitivity to Localization Radii for an Ensemble Filter Numerical Weather Prediction System with 30-Second Update. *Wea. Forecasting*, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0177.1>, in press.
- Kotsuki, S., Terasaki, K., Satoh, M., & Miyoshi, T., 2023: Ensemble-based Data Assimilation of GPM DPR Reflectivity: Cloud Microphysics Parameter Estimation with the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD037447, in press
- Ohishi, S., T. Miyoshi, and M. Kachi, 2023: LORA: A local ensemble transform Kalman filter-based ocean research analysis, *Ocean Dynamics*, in press



Kenichiro Kobayashi, Le Duc, Takuya Kawabata, Atsushi Tamura, Tsutao Oizumi, Kazuo Saito, Daisuke Nohara and Tetsuya Sumi, Ensemble rainfall-runoff and inundation simulations using 100 and 1000 member rainfalls by 4D LETKF on the Kumagawa River flooding 2020, Progress in Earth and Planetary Science volume 10, Article number: 5 (2023)

井野川七虹, 小林健一郎, 1mメッシュ標高データを用いた地下空間浸水解析と避難リスクについての検討, 土木学会論文集B1(水工学) Vol. 78, No. 2, I\_415-I\_420, 2022

小林健一郎, 奥山俊博, 北田雄広, 丸山恭介, 3次元スキャナ及びカメラによる地表面標高の計測と高解像度洪水シミュレーションへの応用, 土木学会論文集B1(水工学)Vol. 78, No. 2, I\_793-I\_798, 2022

小林健一郎, 田中規夫, 丸山恭介, 田中翔, 渡部哲史, 北野利一: 令和元年東日本台風による荒川中流部洪水再現, 土木学会論文集B1(水工学) Vol. 77, No. 2, I\_181-I\_186, 2021

川畑 拓矢, 上野 玄太, 2022: 雲解像粒子フィルタを用いた積乱雲の非ガウス性に関する研究, 統計数理, 70, 133-151

#### ②-1国際会議・シンポジウム (口頭発表)

Duc, L., and Y. Sawada, 2022: Approximation of gradient flows in Stein variational gradient descent using surrogate models. American Geophysical Union Fall Meeting, Chicago, USA.

Saito, 2022: Mesoscale numerical weather prediction. Seminar on QPE quality improvement and QPF using weather radar and ARG data in "Project for strengthening capacity in weather forecasting and flood early warning system". (November 21, Hanoi)

Saito, 2022: Mesoscale meteorology on local circulation and convection initiation. Seminar on QPE quality improvement and QPF using weather radar and ARG data in "Project for strengthening capacity in weather forecasting and flood early warning system". (November 21, Hanoi)

Saito, 2022: Mesoscale ensemble prediction. Seminar on QPE quality improvement and QPF using weather radar and ARG data in "Project for strengthening capacity in weather forecasting and flood early warning system". (November 22, Hanoi)

Oizumi, T., L. Duc, K. Kobayashi, T. Kawabata, T. Ota, and K. Saito, 2022: Flood forecasting using 1000-member ensemble prediction for a severe flood event. Japan Geoscience Union 2022. (May 23, Online)

Oizumi, T., L. Duc, K. Kobayashi, T. Kawabata, T. Ota, and K. Saito, 2022: 1000-member Ensemble Flood Prediction for a Severe Flood Event. Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society 2022 Virtual 19th Annual Meeting. (Invited, May 01, Online)

Oizumi, T., L. Duc, K. Kobayashi, T. Kawabata, T. Ota, and K. Saito, 2023: An impact-based forecast for an extreme flood event using a large ensemble flood prediction system. The 9th International Conference on Flood Management. (Feb 20, Tsukuba)

Wu, P.-Y. and T. Takemi, 2022: Orographic effects on the predictability of thunderstorms and accompanying rainfall. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 19th Annual Meeting, Online, 1-5 August 2022.

Taylor, J., Amemiya, A., Honda, T., Otsuka, S., Miyoshi, T. Implications of a 30-second Update Cycle for a Convective-Scale Ensemble Radar Data Assimilation System, EGU 2022 General Assembly, Vienna, Austria (hybrid), May 2022.

Ting-Chi Wu et al., and Takemasa Miyoshi, Examining the Sensitivity of the Accuracy of EFSO to Ensemble Size, EGU 2022 General Assembly, Vienna, Austria (hybrid), May 2022.

Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation: Real-time 30-s-update Forecast Experiments Using Fugaku in Tokyo in 2021, Japan Geoscience Union Meeting 2022, Chiba (hybrid), May 2022.

Takemasa Miyoshi, Advances and applications of satellite data assimilation of clouds, precipitation, and the ocean, Japan Geoscience Union Meeting 2022, Chiba (hybrid), May 2022.

Maejima, Y. and T. Miyoshi. A Control Simulation Experiment for August 2014 Severe Rainfall Event Using a Regional Model, EGU 2022 General Assembly, Vienna, Austria (hybrid), May 2022.

Takemasa Miyoshi, Experimental platform for design and advance evaluation of frequent satellite observations to innovate weather, ocean and land surface predictions, Japan Geoscience Union Meeting 2022, Chiba (hybrid), May 2022.

Shun Ohishi, Takemasa Miyoshi, and Misako Kachi, LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA) in the Western North Pacific region, Japan Geoscience Union Meeting 2022, Chiba (hybrid), May 2022.

Taylor, J., Amemiya, A., Honda, T., Otsuka, S., Miyoshi, T. Convective-Scale Imbalance Induced by 30-Second Update Radar Data Assimilation, Japan Geoscience Union Meeting 2022, Chiba (hybrid), invited, poster

Takemasa Miyoshi, A. Amemiya, T., Honda, T., Otsuka, S., Maejima, Y., Taylor, J., Tomita, H., Nishizawa, S., Sueki, K. Yamaura, T., Ishikawa, Y., Satoh, S., Ushio, T., Koike, K., Hoshi, E.: "Big data assimilation: Real-time 30-s-update forecast experiments using Fugaku in Tokyo in 2021", ISDA2022, Fort Collins, Colorado, Keynote, June 2022.

Taylor, J., Amemiya, A., Honda, T., Otsuka, S., Miyoshi, T. Sensitivity Testing with Localization Scale for a Convective-Scale Ensemble Radar Data Assimilation System with 30-Sec Update, ISDA 2022, Fort Collins, Colorado, invited, June 2022.

Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation: Real-time 30-s-update Forecast Experiments Using Fugaku in Tokyo in 2021, AOGS2022, Online, invited, August 2022.

Shun Ohishi, Takemasa Miyoshi, and Misako Kachi, LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA) in the Western North Pacific region, AOGS2022, Online, August 2022.

Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation Real-Time 30-s-update Experiments Using Fugaku in Tokyo in 2021, WWRP Symposium, Online, invited, August 2022.

Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation Revolutionizing Numerical Weather Prediction Using Fugaku, 2nd US-Japan Workshop on Data-Driven Fluid Dynamics, Kobe, Keynote, August 2022.

Takemasa Miyoshi, RIKEN's activities on fusing AI and data assimilation in numerical weather prediction, Sea tech week 2022, Brest, France, September 2022.

Shun Ohishi, Takemasa Miyoshi, and Misako Kachi, LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA) in the Western North Pacific region, ISDA-online, Online, October 2022.

Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation: Real-time 30-s-update Torrential Rain Forecast Using Fugaku in Tokyo in 2021, The 5th ISEE Symposium Toward the Future of Space-Earth Environmental Research, Nagoya, invited, November 2022.

Taylor, J., T. Honda, A. Amemiya, S. Otsuka, T. Miyoshi 2023: Application of an incremental analysis update scheme to mitigate imbalances in a 30-second update radar data assimilation system with the LETKF. AMS 2023, Denver, CO, USA, January 2023.

Takemasa Miyoshi, PREVENIR: Japan-Argentina Cooperation Project for Heavy Rain and Urban Flood Disaster Prevention, 27th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), AMS 2023, Denver, CO, USA, January 2023.

Ito, J and R. Yoshimura: Large eddy simulation by use of mesoscale weather prediction model, JpGU Meeting, Chiba, May 2022, Invited

Takuya Kawabata and Genta Ueno, 2022: On Non-Gaussianity in Cumulonimbus Prediction using a Storm-Scale Particle Filter, Mathematics of the weather

#### ②-2国際会議・シンポジウム (ポスター発表)

Duc, L., and Y. Sawada, 2022: Robust ensemble Kalman filters with the Huber norm by majorization. American Geophysical Union Fall Meeting, Chicago, USA.

Sato, Y. S. Hayashi, T. Honda, Y. Miyamoto, A. Hashimoto, and T. Tomioka, Overview of studies with a bulk lightning model coupled with an atmospheric model, SCALE. 17th International Conference on Atmospheric Electricity, Tel Aviv, Israel, June, 2022.

Maejima, Y. and T. Miyoshi. A Control Simulation Experiment for August 2014 Severe Rainfall Event Using a Regional Model, Japan Geoscience Union Meeting 2022, Chiba (hybrid), May 2022.

Taylor, J., Amemiya, A., Honda, T., Otsuka, S., Maejima, Y., Miyoshi, T. Convective-Scale Imbalance Induced by 30-Second Update Radar Data Assimilation, ISDA 2022, Fort Collins, Colorado, invited, May 2022.

Ohishi, Shun, Takemasa Miyoshi, and Misako Kachi, LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA): Assimilating high-frequency satellite observations, Joint Workshop of the OS-Eval TT and CP-TT and SynObs Kick-Off, Tsukuba, poster, November 2022.

Takemasa Miyoshi, Shigenori Otsuka, Arata Amemiya, Jianyu Liang, Fusing AI and data assimilation with HPC in numerical weather prediction, AGU Fall meeting (AGU22), Chicago, USA, December 2022.

James Taylor, Arata Amemiya, Yasumitsu Maejima, Shigenori Otsuka and Takemasa Miyoshi, Ensemble analysis of 30-minute precipitation forecasts using the real-time SCALE LETKF numerical weather prediction system using Fugaku, The 5th R-CCS international symposium, Kobe, February 2023.

Ohishi, Shun, Takemasa Miyoshi, and Misako Kachi, LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA), The 5th R-CCS International Symposium, Kobe, February 2023.

Maejima, Y. and T. Miyoshi. A Control Simulation Experiment for August 2014 Severe Rainfall Event Using a Regional Model, The 5th R-CCS International Symposium, Kobe, February 2023.

#### ③-1国内学会・シンポジウム (口頭発表)

佐藤陽祐, 梶野瑞王, 林修吾, 気象雷モデルとオフライン化学輸送モデルを用いた雷起源のNO<sub>x</sub>に関する数値実験, JpGU2022年連合大会, 幕張, 2022年5月

本田匠, 稲津將, 静止気象衛星による観測データの流線トポロジー データ解析を用いたデータ同化へ向けて, 日本気象学会2022年度秋季大会, 札幌, 2022年10月

富岡拓海, 佐藤陽祐, 林修吾, 雷を直接考慮した気象雷モデルの予測性能について, 日本気象学会2022年度秋季大会, 札幌, 2022年10月

佐藤陽祐, 本田匠, 林修吾, 梶野瑞王, 吉川栄一, 和田龍一, 気象雷モデルの開発とその応用の概要, 大気電気学会第101回研究発表会, 調布, 2023年1月

藤田匡, 瀬古弘, 川畑拓矢, 岡本幸三, スケールを考慮した変分法による高頻度高密度データ同化手法の検討, 日本気象学会春季大会, オンライン, 2022年5月

藤田匡, 瀬古弘, 川畑拓矢, 岡本幸三, 多重スケールを扱う変分法データ同化の検討, 日本気象学会秋季大会, 札幌, 2022年10月

伊藤純至, 伊賀啓太, 新野宏, 台風全域LESでみられたロール構造の線形安定性解析, 日本流体力学会年会, 京都, 2022年9月

伊藤純至, 線状降水帯の理想化実験, 気象学会春季大会シンポジウム, 東京, 2022年5月 基調講演

③-2国内学会・シンポジウム (ポスター発表)

露木義, 2022: 摂動観測を用いた局所アンサンブル変換カルマンフィルタ. 日本気象学会2022年度秋季大会, 札幌, 2022年10月

斉藤和雄, ベトナムでの降水短時間予報に向けた開発. 日本気象学会秋季大会. 札幌, 2022年10月

斉藤和雄, 凸な山脈地形に対する線形山岳波について. 日本気象学会秋季大会. 札幌, 2022年10月

Wu, P.-Y., T. Kawabata, and L. Duc, 2022: High Wind Probability Prediction of Typhoon Hagibis Using High-resolution Large-size Ensemble. 2022 Autumn Meeting of the Meteorological Society of Japan, Hokkaido, Japan, 24-27 October 2022.

Wu, P.-Y., T. Kawabata, and L. Duc, 2023: Construction of 1000-member ensembles of typhoon Hagibis (2019) and their high wind probability predictions. 13th Data Assimilation Workshop, Kobe, Japan, 16 February 2023.

前島康光, 三好建正: 領域気象モデルを使った局地豪雨の制御シミュレーション実験, 日本気象学会2022年度春季大会, オンライン, 2022年5月

大石俊, 三好建正, 可知美佐子, 「LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA) の精度評価」、日本海洋学会2022年度秋季大会, 愛知, 2022年9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、日本計算機統計学会企画セッション「先進的な計算機環境と応用分野」、2022年度 統計関連学会連合大会, 東京, invited, 2022年9月

前島康光, 富岳を用いた2021年夏季リアルタイムゲリラ豪雨予測の結果解析, 2022年度シンポジウム 富岳で見える気象の未来予想図, オンライン, invited, 2022年9月

大石俊, 三好建正, 可知美佐子, LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA) の精度評価, 日本気象学会2022年度秋季大会, 北海道, 2022年10月

三好建正、大塚成徳、雨宮新、富田浩文、牛尾知雄、牛山朋來、小西雅也、アルゼンチンの大雨洪水防災の国際共同プロジェクト、日本気象学会2022年度秋季大会、北海道、2022年10月

前島康光、三好建正、領域気象モデルを使った局地豪雨の制御シミュレーション実験、日本気象学会2022年度秋季大会、北海道、2022年10月

Rakesh Teja KONDURU, Jianyu Liang, Koji TERASAKI, and Takemasa MIYOSHI: Estimating optimal vertical localization in assimilating AMSU-A satellite radiances at different frequencies in the NICAM-LETKF OSSE framework, MSJ Autumn, Hokkaido, October 2022.

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、2022年度武蔵野大学数理工学シンポジウム、東京、invited, 2022年11月

三好建正、「富岳」を使ったリアルタイムのゲリラ豪雨予報、第15回スーパーコンピューティング技術産業応用シンポジウム、オンライン、invited, 2022年12月

#### ④研究会等

藤田匡、瀬古弘、川畑拓矢、岡本幸三、スケールに依存する変分法データ同化の検討、非静力学モデルに関するワークショップ、つくば、2022年12月

藤田匡、瀬古弘、川畑拓矢、岡本幸三、ドップラー速度、AMV同化の検討、線状降水帯の機構解明・予測技術の向上第3回発表会、オンライン、2022年12月

藤田匡、瀬古弘、川畑拓矢、岡本幸三、スケールを考慮した高頻度高密度観測の変分法データ同化の検討、統数研・気象研勉強会、東京、2023年3月

Takemasa Miyoshi, Data assimilation research using Fugaku at RIKEN, Meteorology Colloquium, LMU, Munich, Germany, invited, May 2022.

Takemasa Miyoshi, Fusing Big Data and Big Computation in Numerical Weather Prediction, International HPC Summer School 2022, Athens, Greece, Keynote, June 2022.

Shun Ohishi, Takemasa Miyoshi, and Misako Kachi, LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA) in the Western North Pacific and Maritime Continent regions, The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2022, Tokyo, November 2022.

Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation Revolutionizing Numerical Weather Prediction Using Fugaku, University of Reading Data Assimilation Research Center and RIKEN Online Joint Seminar Series, Reading, UK, invited, November 2022.

Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation revolutionizing numerical weather prediction using Fugaku, Statistical Science Seminar, University of College London, UK, invited, November 2022.

Takemasa Miyoshi, Big Data Assimilation Revolutionizing Numerical Weather Prediction Using Fugaku, AOSC Seminar, University of Maryland, MD, USA, invited, December 2022.

Arata Amemiya, Shlok Mohta, Takemasa Miyoshi, Application of recurrent neural networks to model bias correction using data assimilation, University of Reading Data Assimilation Research Center and RIKEN Online Joint Seminar Series, Reading, UK (hybrid), December 2022.

Takemasa Miyoshi, Invited presentation, Big Data Assimilation Revolutionizing Numerical Weather Prediction Using Fugaku, DA Forum by University of Melbourne, Melbourne, Australia, invited, February 2023.

三好建正、世界初リアルタイム30秒更新ゲリラ豪雨予測実験、第11回 JCAHPCセミナー（OFP運用終了記念シンポジウム）、千葉(ハイブリッド)、2022年5月

雨宮新、三好建正、SCALE-RMへの局所粒子フィルタ(SCALE-LPF)の導入、第6回先端的データ同化と巨大アンサンブル研究会、神戸、2022年6月

大石俊、三好建正、可知美佐子、LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA) の精度評価、海洋表層関連過程に関する分野間交流ワークショップ、名古屋、2022年7月

大石俊、三好建正、可知美佐子、LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA) の精度評価、第26回海洋データ同化夏の学校、青森、2022年8月

三好建正、気象学会関西支部夏季大学「『富岳』を使った天気予報の先端研究」、オンライン、invited、2022年8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、GIR公開セミナー、東京農工大学、invited、2022年10月

雨宮新、三好建正、領域気象モデルSCALE-RMへの局所粒子フィルタの導入：続報、第7回先端的データ同化と巨大アンサンブル研究会、神戸、2022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、理研イノベーションセミナー、オンライン、invited、2022年11月

三好建正、「富岳」を使ったリアルタイムゲリラ豪雨予測、情報処理学会連続セミナー2022「その先へ情報技術が貢献できること」、オンライン、invited、2022年12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～、一般財団法人 工業所有権協力センター内部向けセミナー、オンライン、invited、2022年12月

前島康光、三好建正、「富岳」を用いた2021年夏季リアルタイムゲリラ豪雨予測の結果解析、第24回非静力学モデルに関するワークショップ、つくば、2022年12月

雨宮新、三好建正、領域気象モデルSCALE-RMを使ったLETKFの微修正による局所粒子フィルタ、第24回非静力学モデルに関するワークショップ、つくば、2022年12月

伊藤純至、毛利英明、瞬時的な地表面フラックス診断を導入したLES、第24回非静力学ワークショップに関するワークショップ、つくば、2022年12月

小原涼太、伊藤純至、佐々浩司、2020年1月8日に寒冷前線に伴って高知県で発生した竜巻のJMANHMによる再現、第24回非静力学モデルに関するワークショップ、つくば、2022年12月

小林勇毅、大石俊、三好建正、予報誤差と観測誤差の相関を考慮したアンサンブルカルマンフィルター、第14回理研・京大データ同化研究会、神戸、2023年2月

前島康光、三好建正、領域気象モデルを用いた局地豪雨の制御シミュレーション実験、第14回理研・京大データ同化研究会、神戸、2023年2月

前島康光、三好建正、領域気象モデルを用いた局地豪雨の制御シミュレーション実験、13回データ同化ワークショップ、神戸、2023年2月

雨宮新、三好建正、領域気象モデルSCALE-RMを使ったLETKFの微修正による局所粒子フィルタ、第13回データ同化ワークショップ、神戸、ポスター、2023年2月

大石俊、三好建正、可知美佐子、LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA)の精度評価、第13回データ同化ワークショップ、神戸、ポスター、2023年2月

大石俊、三好建正、可知美佐子、LETKF-based Ocean Research Analysis (LORA)の精度評価、統計数理研究所共同研究集会「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、2023年2月

雨宮新、三好建正、スーパーセル理想実験における非ガウス性と高頻度データ同化のインパクト、富岳サブテーマB研究会、オンライン、2023年2月

雨宮新、三好建正、領域気象モデルSCALE-RMを使ったLETKFの微修正による局所粒子フィルタ、富岳成果創出加速課題成果報告会、千葉(ハイブリッド)、ポスター、2023年3月

前島康光、富岳を用いた2021年夏季リアルタイムゲリラ豪雨予測の結果解析、富岳成果創出加速課題成果報告会、千葉(ハイブリッド)、ポスター、2023年3月

伊藤純至、台風全域全期間LES、都市極端気象シンポジウム・台風研究会、京都、2022年9月

#### ⑤一般向け講演会等

三好建正、『富岳』を使ったゲリラ豪雨予報、2022年度スパコンセミナー スパコンって何に使われているの?私たちの暮らしと計算の世界、神戸、2022年10月

伊藤純至：台風研究の最前線、第2回TRCスペシャル、横浜、2023年3月

川畑拓矢：線状降水帯を知る

-そのメカニズムと予測について-、第2回 スーパーコンピュータ「富岳」成果創出加速プログラム シンポジウム「富岳百景」、2022年12月

#### ⑥新聞/TV/WEB配信/雑誌等

川畑拓矢、かんさい情報ネットten. 「不可能を可能に…同じ場所に長時間大雨が降り続く「線状降水帯」 予測の現在地と課題」、読売テレビ、2022年6月28日

川畑拓矢、ウェークアップ「進歩・データで「線状降水帯」予測「富岳」で精度向上」、日本テレビ、2022年7月2日

川畑拓矢、情報ライブ ミヤネ屋「独自・線状降水帯“大気の川”影響・気象庁の「観測・予測体制」は」、日本テレビ、2022年7月5日

大泉伝、川畑拓矢 Techで遊ぼう展「2014年8月広島で発生した線状降水帯の8K可視化」、NHKプラスクロス渋谷 2023年3月2日-3月31日

前島康光、三好建正、「線状降水帯の豪雨予測精度 最新気象レーダーで改善可能」、科学新聞、2022年3月1日

三好建正、A Supercomputer for Everyone, NHK World Direct Talk, 2022年5月2日-5月3日

三好建正、日本経済新聞電子版 ゲリラ豪雨の雲に迫れ スカイツリーやスパコン活用、2022年5月28日

三好建正、ゲリラ豪雨予測 雲に迫れ、2022年5月29日

前島康光、三好建正, 線状降水帯の予測精度向上 最新レーダー配置で一理研など試算, 時事通信.com

三好建正, 三好建正, ゲリラ豪雨予測 雲に迫れ, 2022年7月21日

#### ⑦書籍

Saito, K., T. Kawabata, H. Seko, T. Miyoshi, L. Duc, T. Oizumi, M. Kunii, G. Chen, K. Ito, J. Ito, S. Yokota, W. Mashiko, K. Kobayashi, S. Fukui, E. Tochimoto, A. Amemiya, Y. Maejima, T. Honda, H. Niino, and M. Satoh, 2023: Forecast and numerical simulation studies on meso/micro-scale high-impact weathers using high-performance computing in Japan. Numerical Weather Prediction: East Asian Perspectives., Springer., in press

伊藤純至、新野宏、2019年台風17号に伴う延岡竜巻のシミュレーション、号外海洋63号「竜巻シンポジウムー藤田哲也博士生誕100年を記念してー」、4.12節、海洋出版

#### ⑧受賞等

三好建正、令和4年度科学技術分野の文部科学大臣表彰「数値天気予報を革新するビッグデータ同化の研究」

前島康光、川畑拓矢、瀬古弘、三好建正、SOLA論文賞、日本気象学会、Observing system simulation experiments of a rich phased array weather radar network covering Kyushu for the July 2020 heavy rainfall event、doi:10.2151/sola.2022-005

大石俊、理研研究奨励賞、アンサンブルカルマンフィルタに基づく海洋データ同化システムの開発

小野佳祐、日本気象学会東北支部発表賞、2013年8月9日に秋田県・岩手県で発生した線状降水帯の数値シミュレーション

竹見哲也、日本気象学会賞、多様な大気環境条件におけるメソ降水系の動態とメカニズムの解明

## (2) テーマ2：全球スケール予測

### ①論文（査読付き）

Masunaga, R., Miyakawa, T., Kawasaki, T., Yashiro, H. (2023): Flux Adjustment on Seasonal-Scale Sea Surface Temperature Drift in NICOCO, J. Meteor. Soc. Japan, Early online release, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-010>.

T. Kodama, D. Takasuka, S. Sherriff-Tadano, T. Kuroda, T. Miyakawa, A. Abe-Ouchi, and M. Satoh (2022), Climate of High-obliquity Exoterrestrial Planets with a Three-dimensional Cloud System Resolving Climate Model, The Astrophysical Journal, 940, 87. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac98ae>.

Nasuno, T., M. Nakano, H. Murakami, K. Kikuchi, Y. Yamada, 2022: Impacts of midlatitude western North Pacific sea surface temperature anomaly on the subseasonal to seasonal tropical cyclone activity: case study of boreal summer 2018, SOLA, 18, 88-95. <https://doi.org/10.2151/sola.2022-015>.

Yamada, Y., Miyakawa, T., Nakano, M., Kodama, C., Wada, A., Nasuno, T., ChenY.-C., Yamazaki, A., Yashiro, H., Satoh, M., (2023): Large ensemble simulation for investigating predictability of precursor vortices of Typhoon Faxai in 2019 with a 14-km mesh global nonhydrostatic atmospheric model. Geophys. Res. Lett., 50, e2022GL100565, <https://doi.org/10.1029/2022GL100565>.



Ishiyama, T., Satoh, M., Yamada, Y., 2022: Possible roles of the sea surface temperature warming of the Pacific Meridional Mode and the Indian Ocean warming on tropical cyclone genesis over the North Pacific for the super El Nino in 2015. *J. Meteor. Soc. Japan*, 100, 767-782, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-040>.

Y. Na, Q. Fu, L. R. Leung, C. Kodama, and R. Lu (2022): Mesoscale convective systems simulated by a high-resolution global nonhydrostatic model over the United States and China, *J. Geophys. Res.*, 127, 7, e2021JD035916, <https://doi.org/10.1029/2021JD035916>.

Nakano, M., Y.-W. Chen, M. Satoh, 2023: Analysis of the Factors that Led to Uncertainty of Track Forecast of Typhoon Krosa (2019) by 101-Member Ensemble Forecast Experiments Using NICAM, *J. Meteor. Soc. Japan.*, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-013>.

## ②論文 (査読無し)

Wu, C.-C., Miyamoto, Y., Ito, K., Tao, D., Kieper, M., Qin, N., Hlywiak, J., Huang, Y., Lai, T., Didlake, A., Pattie, L., Herndon, D., Zhang, J., Shimada, U., Yamada, Y., Kanada, S., 2022: 10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10), Topic 3. TC Structure change and mid-latitude interactions, 3.1 Structure change processes: Inner core.

Camargo, S. J., Murakami, H., Bloemendaal, N., Chand, S., Deshpand, M. S., Dominguez-Sarmiento, C., González-Alemán, J. J., Knutson, T. R., Lin, I-I., Moon, L., Patricola, C. M., Reedl, K. A., Roberts, M. J., Scoccimarro E, Yung (Francis) Tam, C., Wallace, E. J., Wu, L., Yamada, Y., Zhao, W., Zhao, H., 2022: 10th International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-10), Topic 6. Tropical Cyclone Variability beyond the Synoptic Scale, 6.3 Climate change.

D. Matsuoka, C. Kodama, Y. Yamada, and M. Nakano (2023): Dataset of tropical cyclone in a high-resolution global nonhydrostatic atmospheric simulation, Mendeley Data, V1, <https://doi.org/10.17632/xtvkvfvyer.1.v>.

Carl Schreck, Frederic Vitart, Suzana J. Camargo, Joanne Camp, James Darlow, Russell Elsberry, Jon Gottschalck, Paul Gregory, Kurt Hansen, Justyn Jackson, Matthew Janiga, Philip Klotzbach, Chia-Ying Lee, Lindsey Long, Masuo Nakano, Kazuto Takemura, Yuhei Takaya, Michael Ventrice, Zhuo Wang, 2022: Subseasonal TC Prediction, Working Report of TENTH INTERNATIONAL WORKSHOP on TROPICAL CYCLONES (IWTC-10), pp. 28.

## ③-1 国際会議・シンポジウム (招待講演)

Takasuka, D. and co-authors: Recent Progress and Challenges on Global sub-5km mesh Model Experiments from the Sub-seasonal to Climate Scales, 6th WGENE workshop on systematic errors in weather and climate models (Nov 2022), Reading, UK.

Masunaga, R.: Global ensemble simulations with a cloud-resolving atmosphere and eddy-resolving ocean coupled model, Japan Geoscience Union Meeting 2022, Chiba, Japan.

Yamada, Y., Miyakawa, T., Nakano, M., Kodama, C., Wada, A., Nasuno, T., ChenY.-C., Yamazaki,

A., Yashiro, H., Satoh, M., (2023): Large ensemble simulation for investigating predictability of precursor vortices of Typhoon Faxai in 2019 with a 14-km mesh global nonhydrostatic atmospheric model. ACM2022, Nov. 2022, (online).

Daniel Klocke and Tomoki Miyakawa (2022): Global storm and ocean-eddy resolving earth system models. Japan Geoscience Union Meeting 2022, Chiba.

Tomoki Miyakawa and co-authors (2022): Global storm and ocean-eddy resolving earth system models. 3rd PAN-GASS meeting understanding and modeling atmospheric processes, JUL 25-29, 2022 MONTEREY, CA, USA

Tomoki Miyakawa, Daniel Klocke, Florian Ziemer, Julia Duras (2022): Findings and insights from the DYAMOND project Modelling the Climate System at Ultra-High-Resolution workshop, Oct 3-7, 2022, Boulder, USA

③-2 国際会議・シンポジウム (口頭発表)

Takasuka, D., T. Suematsu, and H. Miura: What determines the timing of MJO propagation into the western Pacific?: Analysis of 14-km mesh large-member ensemble simulation by NICAM, Japan Geoscience Union Meeting 2022 (May 2022), Chiba

Takasuka, D., T. Suematsu, and H. Miura: Is the Process of MJO Propagation into the Western Pacific Deterministic?, AGU Fall Meeting 2022 (Dec 2022), Chicago, US

Nasuno, T., M. Nakano, H. Murakami, K. Kikuchi, Y. Yamada, 2022: Impacts of midlatitude western North Pacific sea surface temperature anomaly on the subseasonal to seasonal tropical cyclone activity: case study of the 2018 boreal summer, 19th Annual meeting of AOGS (virtual), 2022/08/02.

Nasuno, T., M. Nakano, H. Murakami, K. Kikuchi, Y. Yamada, 2022: Impacts of midlatitude western North Pacific sea surface temperature anomaly on the subseasonal to seasonal tropical cyclone activity: case study of the 2018 boreal summer, JpGU meeting 2022, Makuhari, Chiba, 2022/05/26.

Kodama, C., H. Yashiro, T. Suematsu, D. Takasuka, Y. Takano, Y. Yamada, R. Masunaga, S. Matsugishi, T. Arakawa, T. Seiki, M. Nakano, H. Miura, M. Satoh, T. Ohno, A. Noda, W. Roh, T. Nasuno, and T. Miyakawa, 2023/2/27-3/3: Global cloud-resolving simulations with NICAM on the supercomputer Fugaku, SIAM Conference on Computational Science and Engineering (CSE23), MS354, Amsterdam, The Netherlands (Oral).

Takanori Kodama, Daisuke Takasuka, Sam Sheriff-Tadano, Takeshi Kuroda, Tomoki Miyakawa, Ayako Abe-Ouchi, Masaki Satoh, Climate of high obliquity terrestrial planets with 3D cloud resolving model, Forming and Exploring Habitable Worlds Meeting 2022, Edinburgh, UK.

Takanori Kodama, Daisuke Takasuka, Sam Sheriff-Tadano, Takeshi Kuroda, Tomoki Miyakawa, Ayako Abe-Ouchi, Masaki Satoh, Climate of high obliquity exo-terrestrial planets with 3D cloud resolving climate model, JpGU 2022, Chiba.

### ③-3 国際会議・シンポジウム（ポスター）

Yamada, Y., Nakano, M., Miyakawa, T., Kodama, C., Yamazaki, A., Nasuno, T., Yashiro, H., Satoh, M., 2022: Season-scale large ensemble simulation with a high-resolution nonhydrostatic model, NICAM. JpGU, May, 2022, Makuhari, (Online)

Suematsu, T., C. Kodama, Y. Yamada., H. Miura, D. Takasuka, T. Miyakawa 2022: Microphysics dependency on the reproducibility of the MJO in the NICAM DYAMOND 2 experiment, 3rd PAN-GASS meeting for understanding and modeling atmospheric processes, Monterey, USA.

Tomoki Miyakawa, Daniel Klocke, Yohei Yamada, Florian Ziemann, Tamaki Suematsu, Daisuke Takasuka, Masuo Nakano, Ryusuke Masunaga, Chihiro Kodama, Hisashi Yashiro, Takao Kawasaki, Takemasa Miyoshi, Takanori Kodama and Julia Duras (2022): Global sub-5km mesh Model Intercomparison (DYAMOND2) and Highlighted Experiments on Supercomputer Fugaku, Dec 12-16, 2022 CHICAGO, IL, USA.

Ryusuke Masunaga and Tomoki Miyakawa (2023): Global coupled simulations with cloud-resolving atmosphere and eddy-resolving ocean coupled models. 2nd EarthCARE Modeling Workshop, Shuzenji, Japan.

Tomoki Miyakawa, Daniel Klocke, Florian Ziemann, Julia Duras (2023): Global sub-5 km mesh model intercomparison (DYAMOND2). 2nd EarthCARE Modeling Workshop, Shuzenji, Japan.

Yutaro Nirasawa and Tomoki Miyakawa (2023) : The fluctuation of the monsoon trough between global ensemble experiments with NICAM and NICOCO. 2nd EarthCARE Modeling Workshop, Shuzenji, Japan.

Kazuki Kondo and Tomoki Miyakawa (2023) : NICAM sensitivity to soil moisture in DYAMOND2 simulation. 2nd EarthCARE Modeling Workshop, Shuzenji, Japan.

### ④-1 国内学会・シンポジウム（招待講演）

那須野智江, 「雲と台風の気候シミュレーション」, 混相流レクチャーシリーズ47 「医療・環境分野における混相流研究の最前線」 (オンライン) 2022/06/15.

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

### ④-2 国内学会・シンポジウム（口頭発表）

高須賀大輔, 末松環, 三浦裕亮: MJOの西太平洋への伝播プロセスは決定論的か?, 日本気象学会2022年度秋季大会 (2022年10月), 札幌

中野満寿男, 松岡大祐, 山田洋平: 気象予測におけるAIの利用と AIを用いた台風の「卵」検知、第2回「富岳」成果創出加速プログラム 研究交流会 (オンライン)

小玉 貴則, ハビタブル惑星の気候, 新学術領域『星惑星形成』2022年度第研究会, 2023, 東京

小玉 貴則, 高須賀 大輔, シェリフ多田野 サム, 黒田 剛史, 宮川 知己, 阿部 彩子, 佐藤 正樹, 全球雲解像モデルを用いた高自転軸傾斜角を持った系外地球型惑星の気候, 日本惑星科学会 秋季講演会 2022, 水戸

山田 洋平, 2022: 高解像度・大アンサンブル実験を用いた熱帯低気圧発生数と発生ポテンシャルの比較. 大槌シンポジウム, 2023年3月8日, 大槌町, 口頭

#### ④-3 国内学会・シンポジウム (ポスター発表)

山田 洋平, 宮川 知己, 中野 満寿男, 小玉 知央, 高須賀 大輔, 山崎 哲, 八代尚, 那須野 智江, 杉 正人, 佐藤 正樹, 2022: 大アンサンブル実験を用いた台風発生ポテンシャルの評価. 気象学会2022年度秋季大会, 10月26日 (札幌). (オンライン)

#### ⑤研究会等

山田 洋平, 2023: 大規模アンサンブル実験を用いた台風発生ポテンシャル(GP)の評価. HotSpot2 研究集会, 2023年3月8日, 九州大学伊都キャンパス

蕪澤雄太郎・宮川知己・升永竜介・川崎高雄・八代尚, NICOCOを用いた高解像度大気海洋結合実験の現状, HotSpot2 研究集会, 2023年3月8日, 九州大学伊都キャンパス

升永 竜介, 2023: 高解像度全球大気海洋海水結合モデルを用いた季節スケール予報の向上へ向けた取り組み 「富岳」加速課題「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」成果発表会

#### ⑥新聞/TV/WEB 配信/雑誌等

山田洋平, “21世紀末に向け、降水量・暴風域が増大——地球温暖化による台風変化シミュレーション”, GIS NEXT 第81号, 2022年10月26日

山田洋平, ““激甚化”の背景にある地球温暖化と最新シミュレーションについて”, 読売テレビ (大阪) 「ウェークアップ」, 2022年9月10日

山田洋平, “年々被害拡大…台風の真相”, テレビ東京「60秒でわかるニュース」, 2022年10月19日  
真木 太一(編), 2022: 図説 日本の風 一人々の暮らしと関わる50の風一, 朝倉書店, ISBN: 978-4-254-16133-5 (小玉知央, 分担執筆)

那須野 智江, 中野 満寿男, 2022: JAMSTECコラム: 2022年夏の天候と台風の特徴,  
<https://www.jamstec.go.jp/j/pr/topics/column-20220922/>

佐藤 正樹 2023: 気象庁「線状降水帯予測精度向上に向けた技術開発・研究の成果について」

佐藤 正樹 2023: NHK NEWS WEB「大雨もたらす「線状降水帯」 海水温の差が発生に影響か 気象庁」

佐藤 正樹 2023: 日テレNEWS「線状降水帯“海面水温の前線が大きく影響”メカニズム解明と予測精度向上へ」

佐藤 正樹 2023: TBS NEWS DIG「線状降水帯の発生メカニズム解明に一步前進か 大雨もたらす積乱雲の発生に海面水温の「前線」が大きく影響」

宮川 知己, 末松 環 2023: NHK×SHIBUYA 「Techであそぼ展」 2023年2月4日(土)～3月30日(木) テーマ:

「8Kで見える！異常気象のリアル」

宮川 知己, 末松 環 2022: NHK+×SHIBUYA NHK for School 展 “Bゾーン” 2022年10月1日(土)～10月31日(月) テーマ: 「8Kで見える！異常気象のリアル」

⑦受賞等

2022年SOLA論文賞 (Tomoe Nasuno, Masuo Nakano, Hiroyuki Murakami, Kazuyoshi Kikuchi, Yohei Yamada)

(3) テーマ3 : 先進的大規模データ同化

①論文 (査読付き)

Tanoue, M., H. Yashiro, Y. Takano, K. Yoshimura, C. Kodama, M. Satoh (2023) Modelling water isotopes using a global non-hydrostatic model with explicit convection scheme : Comparison with a gridded dataset and site observations, J.

Akiyoshi, H., M. Kadowaki, Y. Yamashita, T. Nagatomo (2023): Dependence of column ozone on future ODSs and GHGs in the variability of 500-ensemble members, Sci. Rep., 13, 320. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27635-y>

Cheng, Y., Dai T., Cao J., Chen L., Goto D., Yoshida M., Nakajima T., Shi G.: Improvement of the Aerosol Forecast and Analysis Over East Asia With Joint Assimilation of Two Geostationary Satellite Observations, Geophysical Research Letter, 49(21), <https://doi.org/10.1029/2022GL099908>, (2022).

Li, X., R. Kawamura, K. Ichianagi, K. Yoshimura, Moisture sources and isotopic composition of a record-breaking heavy Meiyu-Baiu rainfall in southwestern Japan in early July 2020, Atmospheric Research, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106693>

Wang, X., K. Toride, K. Yoshimura, Historical atmospheric analysis by weather category assimilation using Gaussian transformation, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1(Hydraulic Engineering), 2022.

佐藤啓市, 池田恒平, 寺尾有希夫, 山下陽介, 町田敏暢, 谷本浩志 (2022): 将来の地球観測への期待, 地球環境, 26(1&2), 89-100

②-1 国際会議・シンポジウム (招待講演)

Yashiro., H., (2022) Computing hardware development: a case of Japanese flagship supercomputer “Fugaku” , WCRP Workshop on Future of Climate Modelling, 21-24 March, 2022

②-2 国際会議・シンポジウム (口頭発表)

Takashi Sekiya, Kazuyuki Miyazaki, Henk Eskes, Kengo Sudo, Masayuki Takigawa, Yugo Kanaya, The global COVID-19 lockdown impacts on secondary inorganic aerosols, iCACGP-IGAC Joint Conference 2022, 2022/9/11

Takashi Sekiya, Kazuyuki Miyazaki, Henk Eskes, Kengo Sudo, Masayuki Takigawa, Yugo Kanaya, A comparison of the impact of TROPOMI and OMI tropospheric NO2 on global chemical data assimilation, Sentinel-5P 5 years anniversary conference, 2022/10/10

Xiaoxing Wang, Kinya Toride, Kei Yoshimura, Reconstruction of Daily Weather in the 1810s by Diary Data Assimilation, AGU2022, PP55A-08, 2022/12/16.

Kei Yoshimura, Generation of Millennium Atmospheric Reanalysis, AGU2022, OS52C-0521, 2022/12/16.

Xiaoyang LI, Ryuichi Kawamura, Kimpei Ichianagi, Kei Yoshimura, Water Origins and Isotopic Composition of Heavy Baiu/Meiyu Rainfall: a Case Study in Southwestern Japan in Early July 2020, AGU2022, A34E-02, 2022/12/14.

Hayoung Bong, Alexandre Cauquoin, Atsushi Okazaki, Eun-Chul Chang, Martin Werner, Zhongwang Wei, Namgu Yeo, Kei Yoshimura, The University of Tokyo Inter-comparison of Water Isotope-enabled Models and Reanalysis Nudging Effects, AGU2022, PP22B-03, 2022/12/13.

### ②-3 国際会議・シンポジウム（ポスター発表）

Yashiro, H., T. Sugita, T. Saeki, Y. Someya, S. Kikuchi, T. Fujinawa, F. Kawazoe, A. Kamei, Y. Yoshida, H. Tanimoto, and T. Matsunaga (2022) Overview of GOSAT-GW TANSO-3 data processing and product distribution in NIES, IWGGMS-18, Jul. 2022, Tsukuba, Japan

Masahiro Tanoue, Hisashi Yashiro, Yuki Takano, Kei Yoshimura, Chihiro Kodama, and Masaki Satoh, Modelling water isotopes using a global non-hydrostatic model with explicit convection scheme, EGU22, EGU22-9111, 2022/5/27.

Masahiro TANOUE, Hisashi Yashiro, Yuki Takano, Kei Yoshimura, Chihiro Kodama, Masaki Satoh, Modelling water isotopes using a global non-hydrostatic model with explicit convection scheme for investigating model's bias and uncertainty, JpGU2022, AAS05-P07, 2022/5/31.

### ③-1 国内会議・シンポジウム（招待講演）

八代尚（2022）超重量級計算はこの先どうなるのか?: 気象・気候シミュレーション研究が期待するもの, PC クラスターシンポジウム, 2022年12月, 東京（招待講演）

### ③-2 国内会議・シンポジウム（口頭発表）

八代尚, 五藤大輔, 丹羽洋介, 佐藤枝美子, 中野藤之, 照井弘, 松永恒雄（2022）NIES-DE prototype: GHG/SLCF短期解析・予測システムの構築に向けて, 大気化学検討会, 2022年11月, つくば

山下陽介（2022）: 極渦の変動とその気候への影響, 第75回 気候影響・利用研究会.（オンライン, 2022. 4. 30）

山下陽介, 滝川雅之, 五藤大輔, 八代尚, 佐藤正樹, 金谷有剛, 竹谷文一, 宮川拓真（2022）: 発達した低気圧による北極域へのブラックカーボン輸送の解析, 2022年度大槌シンポジウム「多重階層結合系における対流圏大気現象の過去・現在・未来」.（特別講演, 大槌, 2022. 8. 25）

山下陽介, 秋吉英治, 井上誠（2022）: 化学気候モデルを用いた海表面温度の南半球成層圏力学場への影響の解析（大アンサンブル実験）, 第27回大気化学討論会, 03-08.（つくば, 2022. 11. 18）

山下陽介（2023）: 地球大気の化学・物質輸送・放射から惑星大気科学を展望する, 第24回惑星圏研究会, 0221-AM1.（招待講演, 仙台(オンライン参加), 2023. 2. 21）

五藤大輔（2022）大気環境に関わるエアロゾル全球シミュレーション, 2022年度シンポジウム富岳で見える気象の未来予想図, 口頭発表

五藤大輔（2023）全球・領域規模でのエアロゾルシミュレーションについて, 令和4年度化学物質環境実態調査 環境科学セミナー, 口頭発表

芳村圭、重水蒸気の衛星観測とそのデータ同化による気象場の拘束、NIFS 一般共同研究 研究会「水素同位体の挙動と機能および将来像」トリチウム研究会プログラム、2022/8/3. (invited)

関谷高志、宮崎和幸、Henk Eskes、須藤健悟、滝川雅之、金谷有剛、二次エアロゾル生成に対するCOVID-19ロックダウンの全球規模影響、日本地球惑星科学連合2022年大会、2022/5/27

#### (4) プロジェクトの総合的推進

##### ①論文 (査読付き)

Yamada, Y., Miyakawa, T., Nakano, M., Kodama, C., Wada, A., Nasuno, T., Chen, Y., Yamazaki, A., Yashiro, H., Satoh, M. (2022) Large Ensemble Simulation for Investigating Predictability of Precursor Vortices of Typhoon Faxai in 2019 With a 14-km Mesh Global Nonhydrostatic Atmospheric Model, AGU, Vol.50, 3, <https://doi.org/10.1029/2022GL100565>.

Satoh, M., Hosotani, K. (2023) Characteristics analysis of the senjo-kousuitai conditions in the Kyushu region in early July: The case of the July 2020 heavy rainfall event. SOLA, 19A, 1-8, doi:10.2151/sola.19A-001.

Kodama, T., Takasuka, D., Sherriff-Tadano, S., Kuroda, T., Miyakawa, T., Abe-Ouchi, A., Satoh, M. (2022) Climate of high obliquity exo-terrestrial planets with a three-dimensional cloud resolving climate model. Astrophysical Journal, 940, 87, DOI:10.3847/1538-4357/ac98ae.

Kodama, S., Satoh, M. (2022) Statistical analysis of remote precipitation in Japan caused by typhoons in September. J. Meteor. Soc. Japan, 100, 893-911, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-046>.

Ishiyama, T., Satoh, M., Yamada, Y. (2022) Possible roles of the sea surface temperature warming of the Pacific Meridional Mode and the Indian Ocean warming on tropical cyclone genesis over the North Pacific for the super El Niño in 2015. J. Meteor. Soc. Japan, 100, 767-782, doi:10.2151/jmsj.2022-040

Seiki, a T., Roh, W., Satoh, M. (2022) Cloud Microphysics in Global Cloud Resolving Models. Atmosphere-Ocean, <https://doi.org/10.1080/07055900.2022.2075310>

Goto, Y., Satoh, M. (2022) Statistical Analysis of “Senjo-Kousuitai” in East Asia and Characteristics of Associated Large-scale Circulations in the Baiu season. SOLA, 18A, 15-20, <https://doi.org/10.2151/sola.18A-003>

Islam, Md, Satoh, M. and Takagi, H. (2022) Tropical Cyclones Affecting Japan Central Coast and Changing Storm Surge Hazard since 1980. J. Meteor. Soc. Japan, 100, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-024>

##### ②論文 (査読なし)

佐藤正樹、佐藤芳昭、八代尚、伊藤耕介、筆保弘徳、三好建正、川畑拓矢、坪木和久、堀之内武、岡本幸三、山口宗彦、中野満寿男、和田章義、金田幸恵、辻野智紀 (2022) 今後の台風予測研究に関する展望. 天気, Vol. 69, No. 5, 285-294

### ③国際会議・シンポジウム（口頭発表）

Masaki Satoh, Shuhei Matsugishi, Woosub Roh, Yasutaka Ikuta, 2022: Global large eddy simulations and their collaboration with detailed observations based on vertical atmospheric motions. Workshop on Modelling the Climate System at Ultra-High-Resolution Resolving atmospheric storms, ocean sub-mesoscale eddies, rivers, and glaciers 3-7 October, NCAR, Boulder, Colorado. <https://www.mmm.ucar.edu/events/2022/wcrp>

Masaki Satoh and Shuhei Matsugishi, 2022: Non-monotonic Dependence of Horizontal Scale of Convective Self-aggregation on Sea Surface Temperature in Radiative Convective Equilibrium Experiments with a Global Nonhydrostatic Model. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2022 Virtual, 01-05 August 2022.

Masaki Satoh, Shuhei Matsugishi, Woosub Roh, Takayasu Ikuta, 2022: Toward the 220 m mesh global simulation with NICAM. 3rd Pan-GASS Meeting Understanding and Modeling Atmospheric Processes, Jul 25 - 29, 2022, Monterey, CA, USA.

Masaki Satoh and Shuhei Matsugishi, 2022: Sensitivity of the horizontal scale of convective self-aggregation to sea surface temperature in radiative convective equilibrium experiments using a global nonhydrostatic model. 2022 CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation, and Climate Sensitivity. 19-22 July, 2022 at the University of Washington, Seattle <https://sites.google.com/uw.edu/cfmip2022/home>

### ④国内学会・シンポジウム（口頭発表）

佐藤正樹, 2022: 気候モデルの発展の歴史. 気象学会 夏季大学, 2022年8月6日(土) オンライン開催

松岸 修平, 大野 知紀, 伊藤 純至, 佐藤 正樹, 2022: 全球対流LESシミュレーションに向けた開発と課題. 日本気象学会2022年度秋季大会, 2022年10月24-27日 北海道大学 学術交流会館 (poster).

### ⑤新聞/TV/WEB 配信/雑誌等

#### 新聞

朝日新聞DIGITAL 2022年6月12日「豪雨集中、7月上旬「警戒を」 過去5年、予測難しい線状降水帯」

日刊建設通信新聞 2022年9月1日「激甚化する 増える時間雨量100ミリ超の大雨」

産経新聞 2022年10月30日「懸念される風水害の激甚化」

読売新聞 2023年2月2日「気候モデル温暖化を解明 実測値に迫る精度に」

#### TV

日テレ: news every. 2022年5月31日「気象庁 大雨もたらす「線状降水帯」スパコン使い“新たな予測”開始へ」

テレビ朝日中居正広のキャスターな会 2022年8月20日「特集:アップデートしておきたい! 台風の最新知識」

#### 雑誌

国立科学博物館「milsl」89号 2022年9月1日「台風～地球温暖化で変化する台風～」

Discovery Magazine “Scientists’ Research Attempts to Target Typhoons: An ambitious group of Japanese scientists sees one of the country’s greatest climate threats as a massive opportunity.” 2022/10/16

週刊朝日 2023年2月17日「損害保険会社は採算割れも “激甚化、する自然災害”

#### WEB

日テレNEWS 2022年12月27日「線状降水帯 “海面水温の前線が大きく影響” メカニズム解明と予測



精度向上へ」

NHK NEWS WEB 2022年12月27日「大雨もたらす「線状降水帯」 海水温の差が発生に影響か 気象庁」

TBS NEWS DIG 2022年12月27日「線状降水帯の発生メカニズム解明に一步前進か 大雨もたらす積乱雲の発生に海面水温の「前線」が大きく影響」

データ提供

Kodama, S., Satoh, M. (2022) List of PRE (Predecessor Rain Event) cases. Meteorological Society of Japan. Dataset, J-STAGE Data. <https://doi.org/10.34474/data.jmsj.21128836>

解説記事

佐藤正樹 (2022) 「対流」をめぐる気候モデルの発展 - 真鍋淑郎志のモデルから次世代モデルへ. 岩波「科学」, Vol. 92, No. 5, 444-446.

佐藤正樹 (2022) 極端気象現象の気候変化. 学術の動向, 27, No. 1, 81-84, IPCC第6次報告 (自然科学的根拠) をめぐって - その現代的意義 -. [https://doi.org/10.5363/tits.27.1\\_81](https://doi.org/10.5363/tits.27.1_81)