

jh240013

## 線状降水帯の気象場変化に対する応答の解明： WRF アンサンブル計算を用いて

平賀優介（東北大学）

### 概要

本研究では、線状降水帯を精緻に再現する計算条件を解明すること、また線状降水帯の水蒸気場の変化に対する応答を定量化し、想定最大クラスの降雨の推定手法を検討することを目的とした。まず、東北大学サイバーサイエンスセンターの計算負荷分散の最適化技術を活用し、数値気象モデル WRF を SX-Aurora TSUBASA に実装することに成功した。これにより、並列かつ高速で WRF の実行が可能になった。次に 2022 年 8 月の線状降水帯を対象に、物理パラメータを組み合わせた多数のシミュレーションを実施した。その結果、Goddard 雲微物理スキームが下層の水蒸気収束、線状降水帯の組織化、降雨量の観点で、対象の線状降水帯を良く再現した。また、水蒸気流入の経路や量を様々に変化させ計算を実施し、線状降水帯の降雨の応答を定量化した。得られた知見を活用し、線状降水帯に伴う想定最大クラスの降雨シナリオの推定手法を提案することに成功した。得られた知見は、今後の数値予報や治水計画における降雨シナリオの推定において重要となる。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東北大学 サイバーサイエンスセンター

#### (2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

#### (3) 参加研究者一覧と役割分担

平賀優介（代表、気象計算と計算の高速化）  
滝沢 寛之（副代表、計算の高速化）  
風間 聡（気候変動評価）、柳原 駿太（気候変動解析）、  
池本敦哉（気候変動解析）、田原亮太郎（気象計算）、  
只木想太（気象計算）、LIU CHANG（モデル妥当性評価）、  
Jacqueline Muthoni Mbugua（気象計算）、  
HOKSON JOSE ANGELO AROCENA（気象計算）

### 2. 研究の目的と意義

令和 4 年 8 月山形・新潟豪雨、令和 5 年 7

月九州豪雨、令和 6 年 7 月東北豪雨など、近年毎年のように線状降水帯が発生し、記録的な被害につながっている。更に将来の気候変動により、豪雨の強度や頻度が更に増加する傾向が想定されている (IPCC, 2022)。そのため、線状降水帯の発生・発達・維持機構を解明し、予測精度を向上させることが急務である。線状降水帯の正確な予測は急務であるものの、発生メカニズムは未解明な点が多く、未だ正確な発生予測が難しい (令和 6 年度の気象庁実績では 81 回のうち 8 回 (約 10%) のみの中)。これは過去の発生事例に限られ、気象場の変化に対する線状降水帯の応答について一般的な知見を得ることが困難であること、また線状降水帯の数値計算に関する知見が十分ではなく再現計算の要件が不明であることなどが要因である。一般に、線状降水帯のようなメソ  $\alpha$  スケールの対流系を精度良く数値シミュレーションするのは非常

にチャレンジングであり、予測精度の向上を妨げる大きな原因となっている。特に東北・北陸地方においては、過去の線状降水帯の予測が的中しておらず、線状降水帯の精緻な数値計算に要する条件の解明は重要な課題である。

申請者らは気象モデル WRF を用いたメソスケール豪雨の計算に精通しており、線状降水帯の精緻な数値計算につながる研究の見通しがあるが、主に膨大な数値計算コストや線状降水帯の計算を実施するモジュールの整備不足などの技術的制限から、研究の実施に至っていない。そこで本課題では、WRF モデルによる豪雨シミュレーションの高速化と、様々な気象環境場の変化を数値計算に組み込むモジュールの開発を目的とする。高速化した WRF モデルと開発したモジュールを基に、特に物理パラメータに着目して様々な条件で数値気象シミュレーションを実施し、精緻に線状降水帯を再現するパラメータを解明する。

また、再現計算において、水蒸気流入の経路・量・空間分布を様々に変化させることで、線状降水帯の発生・発達・維持につながる気象場の解明に挑戦する。特に近年では、大気の川と呼ばれる大規模な水蒸気流入が線状降水帯のメカニズムの解明の鍵と報告されているものの (Zhao et al., 2021), 未だ知見の一般化には至っていない。本課題では大規模な計算を通じて、気象場の変化に対する降雨の応答をまとめ、水蒸気流入の経路・量・空間分布が線状降水帯に与える影響の定量化に挑戦する。日本のような前線と低気圧、水蒸気流入が複雑に絡み合い大規模な降水をもたらす事例は世界でも珍しく、様々な気象場の変化に対する降雨の応答を理論的に説明できれば、メソ気象学の最重要課題の 1 つであるメソスケール豪雨の発生条件の解明を前進させることにつながる。

### 3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本課題では、多数の物理パラメータの組み合わせや異なる初期・境界条件を使用するため、大規模な数値計算となる。また、一般に線状降水帯の数値計算には細かい空間解像度が必要になることが知られているため、計算コストが非常に大きい。このような大規模かつ負荷が高い計算は、代表者が利用可能な通常の計算機環境では実現が不可能であったため、大規模計算機システムの利用が不可欠であった。

更に計算資源を有効活用し数多くの豪雨シミュレーションを並列で実施するためには、計算科学の技術が重要となる。代表者らは、既に東北大学サイバーサイエンスセンターと協働して WRF モデルの高速化に関する重要な知見を得ており、共同研究により更に高速化を大きく進展させることが期待できた。

また、東北大学サイバーサイエンスセンターの計算負荷分散の自動最適化技術と水工学の数値計算技術を合わせることに本課題の学際性があると考えた。以上により、本課題を公募型共同研究として実施した。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要 該当なし

### 5. 今年度の研究成果の詳細

#### 5-1. 数値気象モデル WRF の高速化

本研究では、数値気象モデルとして Weather Research and Forecasting model (以下 WRF) を使用した。WRF は、米国大気研究センター (NCAR)、米国環境予測センター、米国海洋大気庁、米国空軍気象局などにより開発された完全圧縮の非静力学モデルである。基礎方程式は、運動方程式、連続の式、状態方程式、熱の保存式、水蒸気、雲水、雨水、雪、氷、雹などの混合比の保存式からなる。本研究は、WRF-ARW version 4.1.2 を使用し

た。

スーパーコンピューターAOBA のサブシステム SX-Aurora TSUBASA (AOBA-S) に WRF をコンパイルすることに成功し、ベクトルエンジン上で WRF を実行可能とした。これにより、並列かつ高速で WRF の実行が可能になった。

## 5-2. 2022 年 8 月の線状降水帯

本研究では、2022 年 8 月に東北地方西部・新潟県において発生した前線による線状降水帯を代表的なイベントとして対象とした。2022 年 8 月 3 日昼から 4 日にかけて新潟県と山形県において線状降水帯が確認され、最上川流域上流や越後荒川流域の複数雨量観測所において観測史上 1 位の降水量を更新した (24 時間雨量: 深沢雨量観測所 409mm, 椿雨量観測所 474mm, 米沢雨量観測所 262mm)。その結果、最上川上流および中流の複数地点において越水・溢水が発生し、被害を及ぼしている。

2022 年 8 月豪雨の発生当時、大気下層において強い水蒸気フラックスが山形県・新潟県付近に流入しており、強い収束が確認されている。その後前線は停滞し、前線上には小低気圧が解析されている。大気下層の水蒸気の流入と収束は、同地域における線状降水帯の発生時の典型的な気象場であり、強い収束帯から上昇流が生じ、積乱雲が組織化して線状降水帯が生じる。また、このような収束帯の形成は、前線上の小低気圧との関連が報告されており、2022 年 8 月豪雨時の気象場は線状降水帯の発達・維持に好条件であったといえる。

このような気象場から発生する線状降水帯は、北日本の日本海側で生じる典型的な豪雨パターンであると言えるため、手法の開発において対象とするイベントとして適している。

## 5-3. 線状降水帯再現計算のための計算条件

本研究では、ベクトルエンジン上に実装した WRF において、様々な物理パラメータの組み合わせ計算を実施し、対象とする線状降水帯を再現するために重要となる条件を調べた。図 1 に WRF の計算領域、表 1 に計算条件を示す。

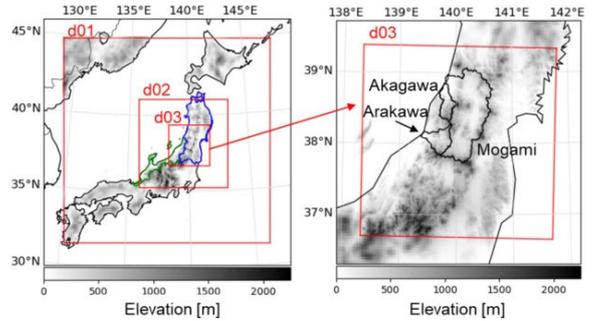


図 1 WRF の計算領域

表 1 WRF の計算条件

	d01	d02	d03
タイムステップ(sec)	100	33	11
格子数(東西×南北, 鉛直)	127×127, 45層	163×163, 45層	226×226, 45層
解像度(水平)	12km	4km	1.3km
モデル高度	最上層高度: 50hPa		

本研究は、広範囲から狭い領域までの計算を行うために、ネスティングを用い 3 つの計算領域を設定した。3 つの計算領域は、総観規模の大気現象を把握するための日本本土を囲む第 1 領域 (d01, 格子解像度: 12km), 東日本を囲む第 2 領域 (d02, 格子解像度: 4km), 東北地方南西部・新潟県を含む第 3 領域 (d03, 格子解像度: 1.3km) の 3 つである。ネスティングを用いることにより、外側から内側の領域に行くにつれて高い解像度を設定し、外側の領域において計算負荷を軽減させつつ、線状降水帯の再現を行う内側の領域において高解像度の数値計算が可能になる。本研究は、外側の領域から内側の領域に計算結果を反映させつつ、内側の計算結果を外側の計算領域にフィードバックさせる 2-way ネスティングを採用した。また、計算は 48 時間のスピニング期間を含めた 7 月 31 日 0 時 UTC から 8 月 6 日 0 時 UTC まで行われ、8 月 2 日 00 時 UTC 以降を解析期間とした。

WRF の計算に用いる物理過程スキームについては、雲微物理パラメータ 17 種、境界層パラメータ 8 種の組み合わせ計算 (17×8: 136 パターン) を実施し、降雨を精度よく再現するパラメータを調べた。ここで、第 1 領域は格子間隔が広く積雲対流を陽に計算出来ないため、積雲パラメタリゼーションとして Kain-Fritsch (new Eta) scheme を使用した。WRF の初期境界値は NCEP GFS FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids (FNL) を使用した。FNL は空間解像度が 0.25 度、時間間隔が 6 時間の全球気候再解析データである。再解析データとは、数値予報モデルを用いて過去の気象環境を再現した格子点気象データであり、観測データを用いたデータ同化により観測値を空間的・時間的に補間した準観測データである。地形データは全球標高モデル GMTED2010 (空間解像度 30 arc-sec) より得た。

異なる物理パラメータの組み合わせを用いた各シミュレーションの計算条件として、8 個のベクトルエンジン (ベクトルエンジン内は 2 コア並列実行) を使用し、64 プロセス×2 コア並列で WRF を実行した。この計算設定を得るために、事前にベクトルエンジン数・ベクトルエンジン内のコア数・プロセス数を変化させて計算速度とコストの感度実験を実施し、現実的なコストで速く計算を実行できる設定を選択した。

#### 5-4. 線状降水帯の再現計算結果

図 2 は、気象庁レーダアメダス解析雨量と WRF による 8 月 2 日 12 時から 4 日 12 時 UTC の 48 時間累積降水量の計算結果である。WRF の計算結果は、異なる雲微物理スキームを用いた際の結果を示している。

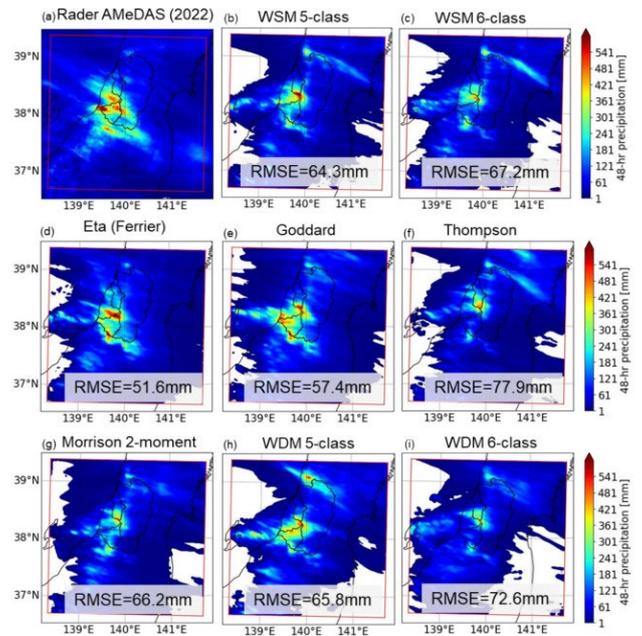


図 2 (a)気象庁解析雨量 (b-i)異なる雲微物理スキームを用いた際の WRF による線状降水帯の計算結果。RMSE は d03 の 48 時間累積降水量の空間分布に対する値 (解析雨量と WRF の計算結果の比較)。

図 2 から、雲微物理スキームとして Goddard スキームを用いた時、越後荒川流域と赤川南部にかかる強い降水帯を再現できていることがわかる。図 3-3 は、Goddard スキームを用いた際の雲水混合比と氷系凝結物の混合比の 3 次元分布を示す。図より、積乱雲が連なる線状降水帯の構造がシミュレーションできていることが分かる。

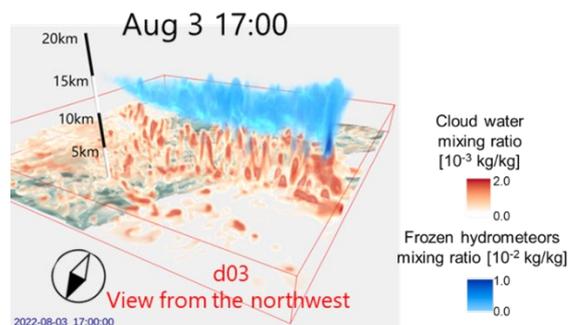


図 3 雲微物理スキームとして Goddard スキームを用いた際の線状降水帯のシミュレーション結果。  
赤：雲水混合比、青：氷系凝結物の混合比。

一方、図 2 より、雲微物理スキームによっては対象の線状降水帯を全く再現できないことが分かる。ここで、雲微物理スキームによる降雨の再現性の違いについて、豪雨を引き起こしたメカニズムに着目して、原因を調べた。結果として、大気下層（地表面 500m）の水蒸気フラックスの収束の再現性が、豪雨の再現性に直結していることが分かった。図 4 は、豪雨の再現性が最も高かった 3 メンバーの計算結果（上行; top members）と最も低かった 3 メンバーの計算結果（下行; bottom members）である。ここでは、地表面 500m の水蒸気フラックスの発散をカラーバーで示している。図 4 より、top members は、日本海において連なる水蒸気フラックスの収束を再現していることが分かる。逆に bottom members はこのような収束を表現できていない。この結果から、Goddard 雲微物理スキームは、同様に北日本の日本海側で生じる水蒸気フラックスの収束による線状降水帯の計算に適している可能性が示唆された。

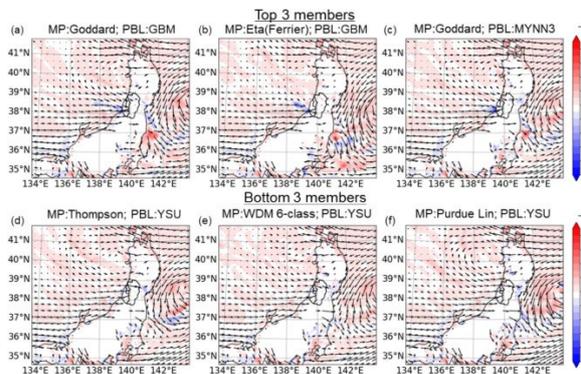


図 4 豪雨の再現性が最も高かった 3 メンバーの計算結果（上行; top members）と最も低かった 3 メンバーの計算結果（下行; bottom members）。d02 の結果を示す。カラーバーは地表面 500m の水蒸気フラックスの発散を示す。

実際に、Goddard 雲微物理スキームを用いて 2020 年の山形豪雨、2023 年の秋田豪雨の再現計算を試みたところ、精度よく計算され

た。本解析結果から、東北地方西部で生じる豪雨を精度よく計算する WRF の計算設定、パラメータを発見できたといえる。得られた結果は、メカニズム調査のための同地域における豪雨の再現計算や、線状降水帯の降水量予測に活用できる重要な知見である。

また、WRF の計算において使用する地形データの空間解像度の違いに対する降雨の応答についても調べた。その結果、地形の解像度を 1.3km, 1km, 500m と高解像度化したときに、降雨の再現性は必ずしも良くなるわけではないことが示された。

以降の数値計算は、2022 年の線状降水帯が最も精度よくシミュレーションされた物理パラメータ設定を用いて実施した。

#### 5-5. 水蒸気流入の経路が線状降水帯に与える影響

ここでは、2022 年 8 月の線状降水帯を引き起こした水蒸気フラックスの経路に対する、降雨の応答を調べた。本解析には、数値気象モデルを用いて、このような水蒸気フラックス経路の空間移動を実現する手法を用いた (Hiraga et al., 2023)。この手法は、数値気象モデルに入力する初期境界条件を所定の方向に空間的に移動させることにより、モデル内の気象場を移動させるものである。異なる方向と距離の空間移動（北に  $2.0^\circ$  ～ 南に  $2.0^\circ$  の範囲で  $0.01^\circ$  間隔）を実施した各シミュレーションのため、8 個のベクトルエンジン（ベクトルエンジン内は 2 コア並列実行）を使用し、64 プロセス×2 コア並列で WRF を実行した。図 5 に、2022 年の線状降水帯の計算において、初期境界条件における水蒸気フラックスを北に  $0.2^\circ$  と  $0.4^\circ$  移動させた際の計算結果を示す。図 5 から、降雨帯は初期境界条件の移動に応答して、北に移動していることが分かる。

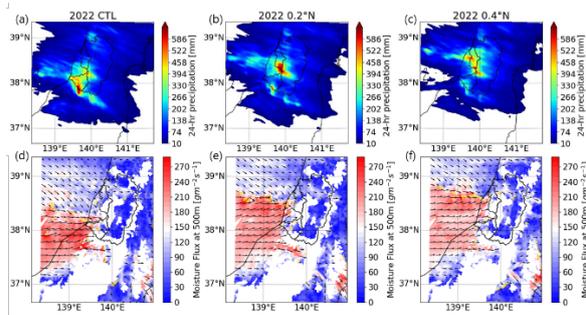


図 5 2022 年線状降水帯の再現計算における (a)24 時間積算降水量と(d)水蒸気フラックスの収束, (b,d)初期境界条件を 0.2° 北にずらした際の計算結果, (c,f) 初期境界条件を 0.4° 北にずらした際の計算結果.

更に, 水蒸気フラックスが北に流入する際, 降雨の大きさや空間パターンが大きく変化していることが分かる. これは, ローカルな地形や局所的な気象場の影響であると考えられる. このような空間移動を多数のパターンで実施し, 降雨の応答を定量化した(図 6).

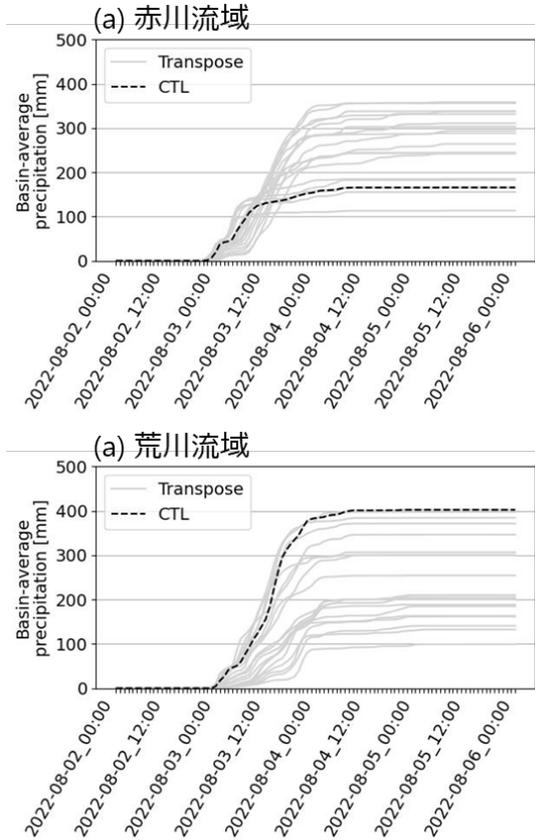


図 6 初期境界条件の水蒸気フラックスを空間移動させた場合の流域平均降水量 (a)赤川流域 (b)荒川

本計算から, 流域にとって降雨が最大となるような水蒸気の流入パターンが明らかとなった. またそれに伴い, 物理的に降雨が最大となるシナリオ (最悪シナリオ) が得られた. これは流域の治水計画に重要な情報であり, 今後推定されたシナリオを, 現在実務上で用いられる値と比較することによって, 現状のシナリオの妥当性の評価などが実施できる.

### 5-6. 水蒸気流入量が線状降水帯に与える影響

ここでは, 2022 年 8 月の線状降水帯を引き起こした水蒸気の流入に着目し, その量を増加させたときの降雨の応答を調べた. 具体的には, WRF の初期境界条件の相対湿度を最大化 (100%) させたときに, 降雨がどれだけ変化するのか, 増加し得るのか, という応答に着目した. この相対湿度を最大化させる手法は, 数値気象モデルを用いた降雨の最悪シナリオの推定に最も良く用いられる手法であるが, 線状降水帯のようなメソ対流系に対する有効性は未解明である. そのため本研究では, 初めてメソ対流系に対して当該手法の有効性を探る目的もモチベーションの 1 として掲げている.

図 7 に, 2022 年の線状降水帯の計算において, 初期境界条件における相対湿度を全グリッドにおいて 100%とした場合の計算結果を示す. 本計算結果から, 相対湿度の最大化は, 対象とした線状降水帯の降雨量を増加させない, むしろ大幅に減少させてしまうことが分かった. この要因を調査したところ, 相対湿度を最大化することにより, 大気の熱力学傾度を平滑化してしまうことが主要因であることが分かった. 図 8 に示すように, 相対湿度を最大化することにより, 水蒸気の供給量は増加するものの, 相当温位

の鉛直傾度が大きく減少し、その結果として対流不安定性が大きく減少していることが分かる。

このように、相対湿度最大化手法がメソ対流系に対して有効でないという報告がなされたのは、本研究が初めてである。今後は、どのような水蒸気供給量の増加を条件として、降雨が増加するのか、更なる研究が必要となる。

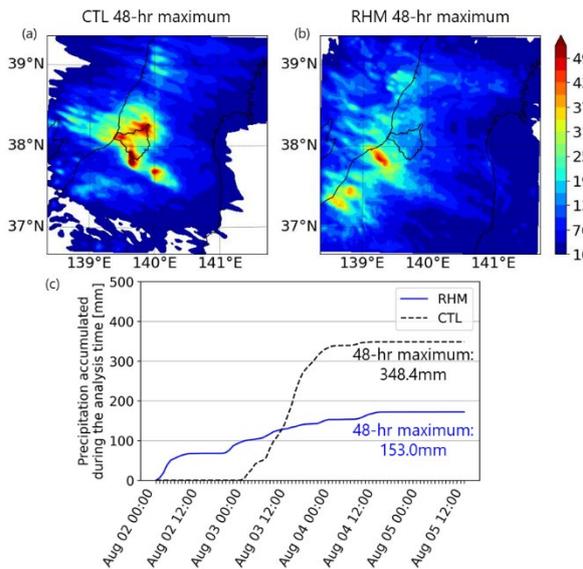


図 7 (a) WRF による線状降水帯の再現計算結果 (CTL), (b) 初期境界条件の相対湿度を 100%としたときの計算結果(RHM), (c) a,b の際の越後荒川流域平均降水量

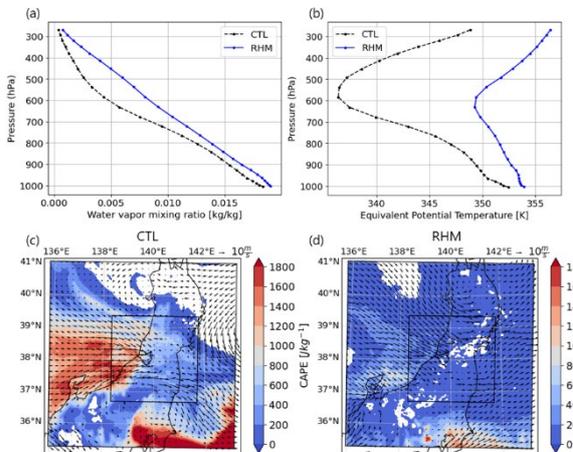


図 8 再現計算(CTL)と相対湿度を 100%としたとき (RHM)の(a)水蒸気混合比の領域平均鉛直プロファイル, (b)相当温位の領域平均鉛直プロファイル,

(c,d)CTL と RHM の CAPE の空間分布

## 6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

申請時に設定した計画とそれに対する達成度を以下にまとめる：

### (1) WRF モデルの高速化

スーパーコンピュータ-AOBA のサブシステム SX-Aurora TSUBASA (AOBA-S) に WRF をコンパイルすることに成功し、ベクトルエンジン上で WRF を実行可能とした。これにより、並列かつ高速で WRF の実行が可能になった。

また、ベクトルエンジン数・ベクトルエンジン内のコア数・プロセス数を変化させて WRF の計算速度とコストの感度実験を実施し、現実的なコストで速く計算を実行できる設定を選択した。その結果、申請時に目標としていた計算量を達成することができた。

以上より、研究の円滑な進行に十分耐えうる WRF を計算環境上に構築できたため、計画を達成したといえる。

### (2) 物理パラメータや空間解像度が線状降水帯の再現性に与える影響評価

雲微物理パラメータ 17 種、境界層パラメータ 8 種の組み合わせ計算 (17×8: 136 パターン) を実施し、降雨を精度よく再現するパラメータを調べた。その結果、雲微物理スキームとして Goddard スキームを用いた時、線状降水帯の組織化構造と強い降水帯を再現できることがわかった。その要因として、下層の水蒸気フラックス収束の再現性が大きいことが分かった。計画していた計算を達成し、東北地方西部で生じる豪雨を精度よく計算する WRF の計算設定、パラメータを発見できたため、計画を達成したといえる。

### (3) 気象場の変化による線状降水帯の応答の解析

水蒸気フラックスの流入経路を空間移動

させた計算を多数のパターンで実施し、それに対する降雨の応答を定量化した。また、相対湿度の増加に対する降雨の応答を定量化し、相対湿度最大化手法がメソ対流系に対して有効でないという発見に至った。得られた知見は、想定最大クラスの降雨の物理的な推定において国際的に重要となる。計画していた計算を達成し、その要因分析などにおいては想定以上に解析が進んだため、計画を達成したといえる。

#### (4) 研究成果のとりまとめ

得られた成果をまとめて、以下のように査読付き論文に発表した。

・ Hiraga, Y., & Tahara, R. (2025). Sensitivity of localized heavy rainfall in Northern Japan to WRF physics parameterization schemes. *Atmospheric Research*, 314, 107802. (IF: 4.5, Q1)

・ Tahara, R., Hiraga, Y., & Kazama, S. (2025). Climate change effects on the localized heavy rainfall event in northern Japan in 2022: Uncertainties in a pseudo-global warming approach. *Atmospheric Research*, 314, 107780. (IF: 4.5, Q1)

・ Hiraga, Y., & Tahara, R. (2025). Responses of Convective Heavy Rainfall to Atmospheric Moisture Amplification: Implications for Probable Maximum Precipitation Estimation. *Authorea Preprints*. (Journal of Hydrometeorology IF:3.1, Q1 査読中)

国際誌での論文出版に至ったため、計画達成したといえる。

今後は、R6 年度に得られた成果を基に、気候変動の影響を陽的に考慮した計算に取り組む。それにより、気候変動下における線状降水帯に伴う最悪クラスの降雨シナリオを推定する手法を開発する。そのために、WRF の更なる高速化・効率化と、疑似温暖化手法の実装に取り組む。