

jh250020

気候変動が想定最大クラスの降雨に与える影響評価： 線状降水帯を対象として

平賀優介（東北大学）

近年、気候変動に伴う想定最大規模（L2）クラスの豪雨の発生が報告されているが、気候変動が超低頻度の豪雨へ与える影響は未だ良く理解されていない。本研究では、東北大学サイバーサイエンスセンターの「AOBA-S」を活用し、気候変動の影響を数値気象モデル WRF に自動反映する疑似温暖化モジュールを開発した。これを用いて、多様な気候予測と降雨の空間移動を組み合わせた計 480 パターンの大規模アンサンブル線状降水帯シミュレーションを実施した。解析の結果、L2 降雨の変化率はクラウドスクラペイロン（C-C 率）を大幅に上回り、最大で 21%/K に達する可能性を定量化した。特に収束の強化や積乱雲の組織化など力学的要因が雨量増加に寄与することを解明した。本成果は、気候変動が L2 クラスの極端降雨に与える影響を数値気象モデルによる手法を用いて世界で初めて定量化したものであり、Q1 学術誌への複数掲載や国内外での社会実装に向けた高い評価を得るなど、学術・社会の両面で極めて有意義な知見を提供した。

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、計算条件の設定）滝沢 寛之（副代表、数値計算の高速化）風間聡（気候変動シナリオ解析）田原亮太郎（数値気象シミュレーション）HOKSON JOSE ANGELO AROCENA（数値気象シミュレーション）MBUGUA JACQUELINE MUTHONI（数値気象シミュレーション）LIU CHANG（気候変動データ整備）池本敦哉（気候変動データ整備）

とが求められている。しかし近年、L2 降雨を上回るような豪雨が生じている。特に線状降水帯による、比較的短時間に集中する豪雨が顕著である。これは気候変動の影響（例：気温・海水面温度上昇に伴う水蒸気供給量の増加や深い対流を持続させる環境場の形成）が大きいと考えられる。本来であれば、L2 降雨を気候変動の影響を考慮した推定値とすることにより、手戻りのない対策を打つべきである。しかし、気候変動が想定最大クラスのような超低頻度豪雨にどのような影響を与えるかについては未だ良く分かっていない。そのため国土交通省の L2 降雨推定マニュアルにおいても、影響の考慮は難しいとされる。

ここで申請者らは、最近の研究により、数値気象モデル WRF を用いて、気候変動を考慮した L2 降雨推定の手法の開発に成功した。開発した手法は、気候変動が L2 降雨にどの程度の影響を及ぼすかを解明するための鍵となる。しかし、現状 WRF モデルにおいて様々な気候変動パターンを実装するためのモジュールが整備されておらず、評価で

2. 研究の目的と意義

現在各流域において想定最大規模の降雨（以下 Level 2; L2 降雨）が設定され、対策を実施するこ

きる気候変動パターンに技術的制約がある。また、不確実性を考慮した気候変動の影響評価には、多数の数値計算が必要になる。

以上より本課題では、気候変動の影響を WRF モデルの計算に自動で組み込むためのモジュールを開発する。開発したモジュールを組み込んだ WRF モデルを基に、多数の線状降水帯シミュレーションを実施する。これにより、国際的にも前例がない、気候変動が L2 降雨に与える影響の定量化に挑戦する。

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、多数の気候変動パターン（局所的な気象場の変動パターン、異なる排出シナリオなど）を反映した線状降水帯の数値計算が必要となり、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. 気候変動の影響を数値気象計算に組み込むモジュールの開発

様々な気候変動のパターン（局所的な気象場の変動パターン、異なる排出シナリオなど）を WRF の数値計算に組み込むためのモジュールを開発完了した。開発したモジュールは、気候変動予測データに基づく様々な気温や海面温度、湿度の変化を取得し、これらの変化を WRF モデルの初期境界値に自動的に反映させるものである。本モジュールを、スーパーコンピュータ AOBA SX-Aurora TSUBASA にコンパイルした WRF (v4.6.0) に内蔵することに成功した。これを基に気候変動の影響を考慮して、過去に東北地方において生じた線状降水帯のシミュレーションを実施した。結果として、気候変動の影響により、線状降水帯の雨量や空間パターンが複雑に変化することが確認され、モジュールの妥当性が示された。

5-2. 開発したモジュールによる気候変動を考慮した線状降水帯の数値計算

開発したモジュールを基に、多数の気候変動パターンを考慮した線状降水帯のシミュレーションを実施した。対象とした線状降水帯は、2022 年 8 月に東北・北陸で生じたイベントとしている（図-1）。

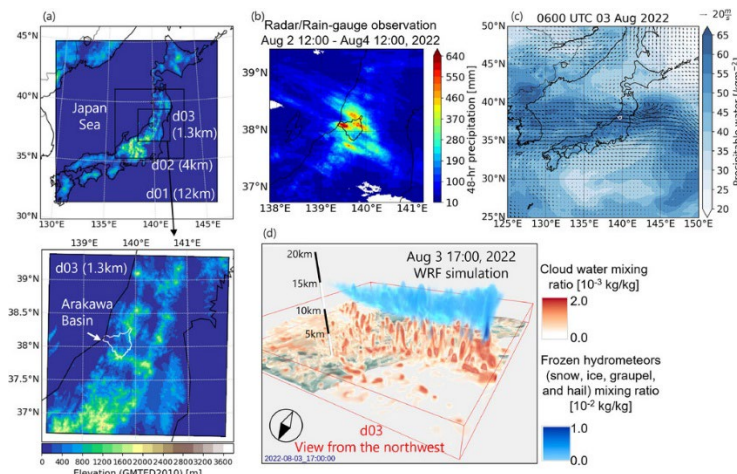


図-1 (a) WRF のモデルドメイン。最内ドメインは 1.3km の空間解像度とした。(b) 解析雨量による線状降水帯に伴う降水量。(c) 可降水量の分布。(d) WRF によりシミュレーションされた線状降水帯の 3 次元構造。

気候変動の影響として、現在気候、2050 年代、2090 年代の 3 つの気候について、4 つの GCM、2 つの排出シナリオ、2 つの温暖化パターンを考慮した、48 パターンの気候変動予測を組み込んだ線状降水帯の数値計算を完了した。図-2 に様々な気候変動予測パターンを考慮した線状降水帯による雨量の計算結果を示す。想定する気候変動パターンに応じて、降雨量・時空間分布が非常に敏感に変化している様子が分かる。特に、降水量の変化は気候変動のパターンに非線形に応答し、必ずしも雨量が増加しないことが分かる。

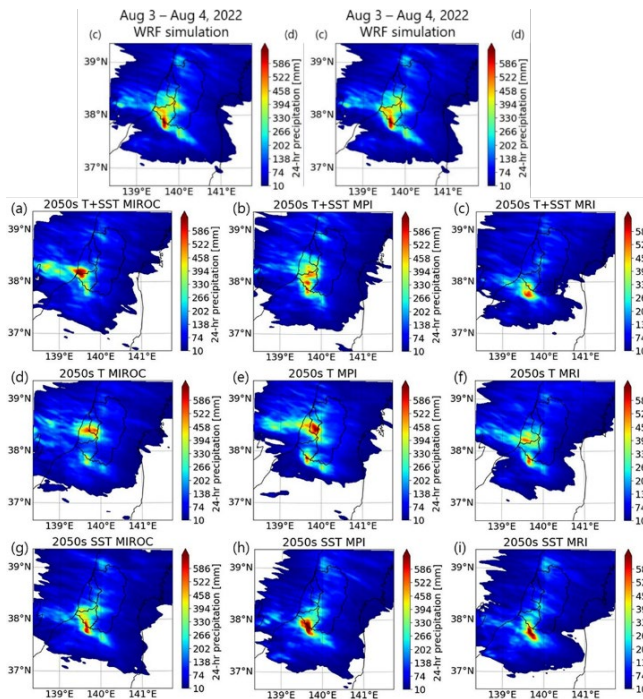


図-2 東北地方における線状降水帯の 24 時間積算降水量の計算結果。各パネルは気候変動の進行状況を想定する年代 (2050s), 変化を考慮した変数 (気温 T, 海面温度 SST), 予測に用いられた全球気候モデル (MIROC, MRI, MPI) を表す。

図-2 に示すうち、特に積算降水量が多くなったケースについて、積乱雲の組織化に着目して、要因分析を実施した。図-3 に、気候変動により積算降水量が大きく増加したケース (2050s SST MPI; 図-2h) と再現計算結果 (図-2 CTL) の雲水比と凝結物の 3 次元分布を示す。図-3 より、2050s SST MPI のケースでは、より強い対流が日本海上で持続している様子が明らかであり、それが内陸にお

いて組織化した積乱雲のより長時間の停滞につながっていた。このように、気候変動の影響は、気温や海面温度の上昇による水蒸気量増加だけでなく、対流の強化など力学的要因に及び、線状降水帯による雨量の増加に特に重要であることが示された。

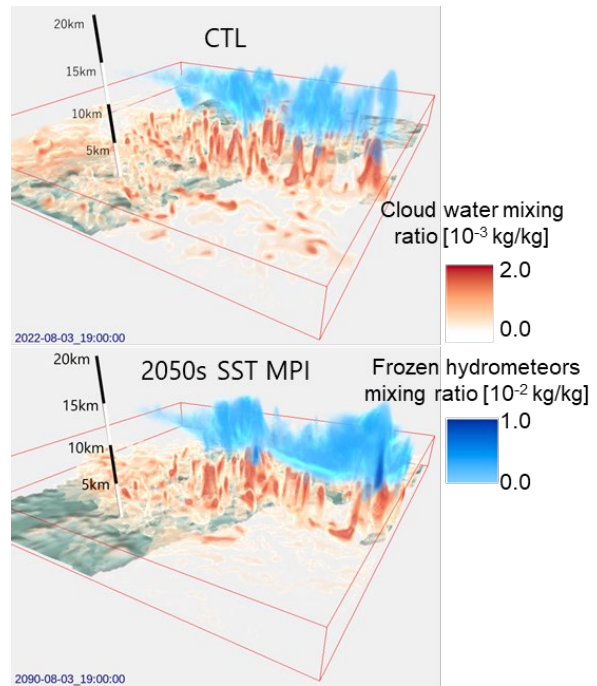


図-3 再現計算結果 (CTL) と、気候変動により積算降水量が大きく増加したケース (2050s SST MPI) の雲水混合比 (赤) と氷系凝結物 (青) の 3 次元分布

5-3. L2 降雨推定のための線状降水帯の空間移動アンサンブル計算

ここで、気候変動の考慮に加えて、線状降水帯の空間移動を実現するための数値計算を組み合わせて実施した。この空間移動の概念は、L2 降雨の推定に広く用いられるものであり、「もし過去の大雨が、より流域に直接的な影響を及ぼす位置にずれて発生していたら」という仮定に基づき、被害がさらに拡大した可能性 (潜在的なリスク) を考慮するものである。ここで、この降雨の空間移動は、「ある地域区分内で発生した気象場 (場合によっては降水帯そのもの) は、同一地域区分内の他の任意の地点でも同様に発生し得る」とする仮定に基づく。本研究では、この気象場の空間移動を、数値気象モデルを用いて実現する手法を用いてい

る。

すなわち本研究では、ある線状降水帯イベントを再現計算し、加えて大雨の空間移動と気候変動による気象場の変化の組み合わせを考慮して計算を実施することにより、対象のイベントが流域にもたらし得る最大の降水量を気候変動シナリオごとに推定している。図-4 は、対象とする線状降水帯について、大雨の空間移動を実現するシミュレーションを実施した結果である。気象場そのものの空間移動により、大気的非線形性や地形の作用を考慮して、雨域の空間移動を実現できていることが分かる。このような空間移動のシミュレーションを線状降水帯に対して実施した例は本研究が初めてであり、線状降水帯のような局所的かつ複雑なメカニズムで発生する大雨にも適用性を示したことは有意義である。

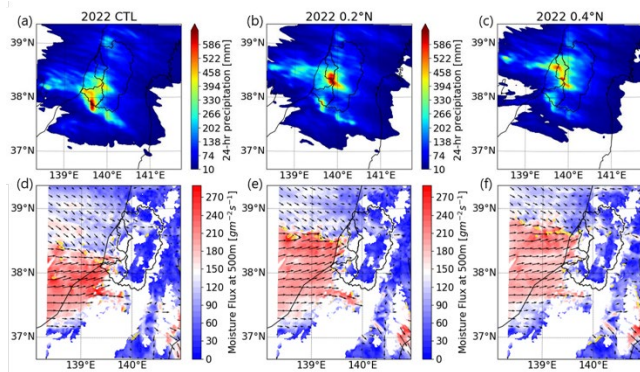


図-4 (a-c) 線状降水帯に伴う 24 時間降水量 (それぞれ、CTL 計算, 0.2 度北 (0.2° N) へ初期境界条件を移動させた計算, 0.4 度北 (0.4° N) へ初期境界条件を移動させた計算の結果). (d-f) 500m 高度の水蒸気フラックス (カラー) とその収束 (黄色が強い収束)。

ここで、気候変動の考慮と雨域の空間移動を実現するための数値計算を組み合わせ実施した。図-5 は、組み合わせ計算により得られたシナリオ分の、山形県赤川 (AKB) と新潟県荒川 (ARB) の流域平均降水量である。シナリオの総数として、48 パターンの気候変動予測と 10 パターンの空間移動のため、計 480 となっている。これにより、過去の線状降水帯を流域で生じる様々なパターン的大雨がシミュレーションできた。図-5 の荒川流域に注目すると、2090s-MIROC-T 計算 (2090 年代

MIROC6 による気温変化を想定した計算) において、極端に雨量が大きくなることがわかる。

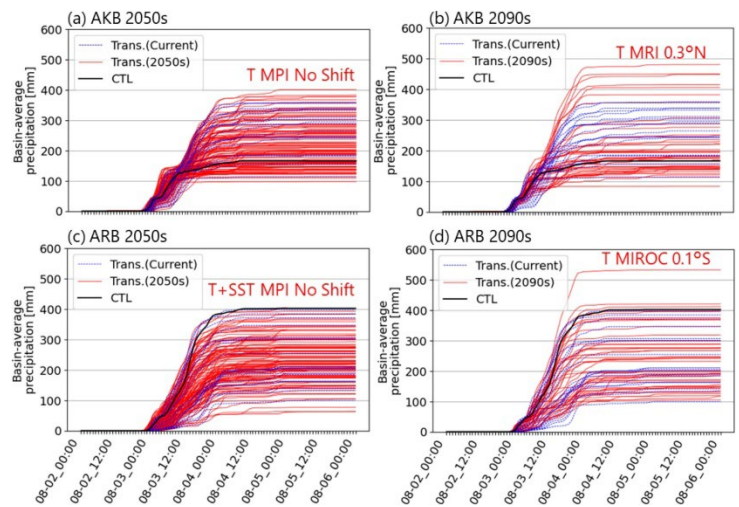


図-5 気候変動下における大雨シナリオの累積降水量 : (a-b) 赤川流域; (c-d) 荒川流域. 各パネルの赤字は、最大の累積降水量を記録したアンサンブル計算を示している。

荒川流域 (ARB) における降水量の著しい増加の要因として、持続的な水蒸気収束と大気的不安定化が挙げられる。図-6 は、2090s-MIROC-T 計算と 2090s-MIROC-T-0.1° S 計算における降水量およびそれに伴う大気環境場の比較を示したものである。図-6a および 6b によれば、2090s-MIROC-T-0.1° S 計算において、降水量増加の大部分は 8 月 3 日の後半に発生している (図 6c-f の水色の棒グラフ)。この期間における高度 500m における比湿 (q), 水蒸気フラックス収束 (MFC), CAPE, および PW (可降水量) に着目すると、流域に流入する下層の水蒸気量については、2 つの計算間で大きな差は認められない (約±3%; 図-6c)。一方で、2090s-MIROC-T-0.1° S 計算では、ARB で下層水蒸気フラックスがより強くかつ持続していることが分かる (約+50%; 図-6d)。これは、気象場が南側にシフトしたことにより、流域内で大雨を維持するのに理想的な位置に収束帯が配置されたことを示唆している。その結果、ARB では CAPE が全体として大きく持続的に増大し (+50%以上; 図-6e), 対流セルが連続的に発達しやすい環境となることが分かる。

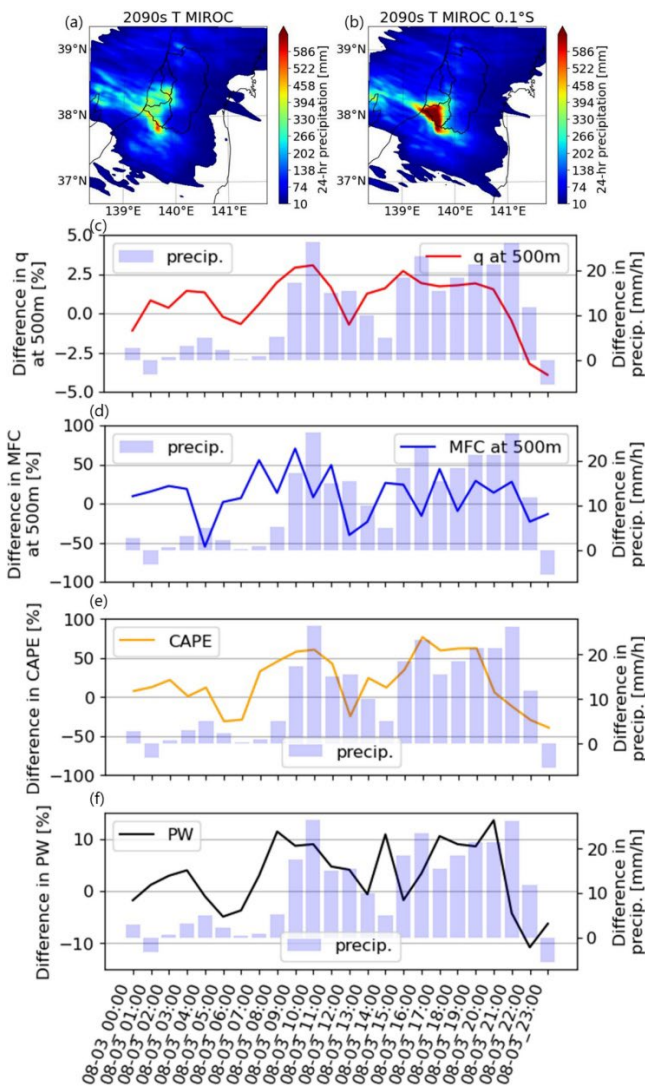


図-6 2090s-MIROC-T 計算と 2090s-MIROC-T-0.1°S 計算における 24 時間降水量の比較, および (c-f) 両計算間での ARB における 1 時間降水量と環境場の差. c-f においては諸指数の差の算出には ARB 内の最大値を用い, 降水量の差の算出には ARB 内の平均値を用いている.

5-4. 気候変動が L2 降雨に与える影響の定量化

図-5 に示した大規模アンサンブルシミュレーションを基に, 気候変動が L2 降雨に与える影響の定量化を試みた. ここでは, 影響について地表面気温と地表面露点温度に基づきスケールリングしている (図-7). 不確実性を考慮しつつ, 全体的な傾向を把握するためには, 最大値だけでなくパーセンタイル値を用いた解析が不可欠である. 本解析では, 図-5 に示すすべての計算結果を対象とし, 解析期間中の各継続時間における最内側ドメイン内の流域平均降水量の最大値および 90 パーセンタ

イル値に着目した. これら 2 つの指標は, 図-7 においてそれぞれ「最大 (maximum)」および「90 パーセンタイル (90th percentile)」として表記されている.

全体として, AKB および ARB における最大降水量と 90 パーセンタイル値は, 一部の例外を除き, 将来の温暖化に伴い増加した. 現在から 2050 年代への増加と比較して, 現在から 2090 年代への 90 パーセンタイル値の増加は, すべての継続時間においてより一貫した傾向が見られた. ARB における 24 時間および 48 時間継続時間の 2090 年代の顕著な降水量は, 前述の通り「2090s-MIROC-T-0.1°S 計算」に起因するものである.

全体として, 最大降水量の変化率は, C-C 率 (クラウドジウス・クラペイロン率) である 7%/K を大幅に上回った (図-7c, d). 地表露点温度を用いた変化率は, 温暖化による水蒸気増幅の効果を明示的に考慮しているため, 比較的低い値を示した. AKB では, 露点温度に基づく変化率はすべての継続時間において一貫して C-C 率の 2 倍 (double C-C) を超えたが, 一方で ARB では, 短時間の継続時間において C-C 率に近い値を示した (図-7d). AKB における 1 時間降水量の変化率は, 21%/K (triple C-C : C-C 率の 3 倍) を超えることが分かる. さらに, AKB の 90 パーセンタイル降水量の露点温度に基づく変化率は, 短時間 (12 時間以下) では概ね C-C 率に従ったが, 長時間では C-C 率の 2 倍を超えた (図-7f). 対照的に, ARB では異なる傾向が見られ, 継続時間 1 時間で最も大きい変化率を示した一方, 長時間 (12 時間以上) では C-C 率に達しなかった.

総じて, L2 降雨クラスの変化率は, 継続時間や流域によって大きなばらつきがあり, C-C 率の 3 倍をも上回る可能性が示された. 本研究は, 力学的な影響を明示的に含めることで, L2 降雨のような極端現象の温暖化スケールリング率を定量化し, さらに 1 日未満 (サブデイリー) の時間規模での評価を可能にした初めての研究である.

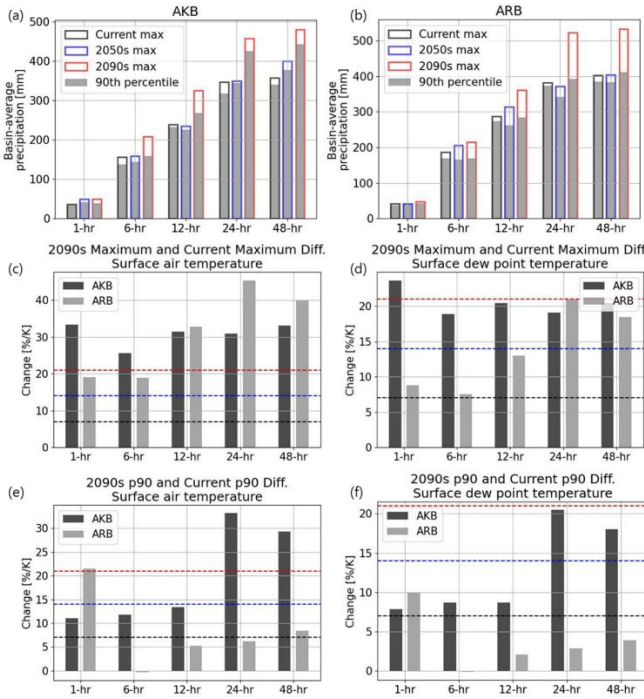


図-7 (a, b) AKB および ARB における、各継続時間および各期間の全大雨シナリオ (図-5 参照) の最大値と 90 パーセントイル値. (c, d) 現在気候から 2090 年代にかけての最大降水量増加に対する温暖化スケール率. (e, f) 地上気温および地上露点温度に基づく、現在気候から 2090 年代にかけての 90 パーセントイルの温暖化スケール率. 温暖化シグナルとしては、解析期間中のドメイン 3 内における指定領域 (北緯 38°~39°、東経 140°未満) での 1 時間領域平均地上気温および地上露点温度の最大変化量を用いた. 黒・青・赤の各破線は、それぞれクラウドス・クラウドパイロン (C-C) 率, その 2 倍 (double C-C), および 3 倍 (triple C-C) のスケール率を示す.

図-8 に、AKB における 24 時間流域平均雨量が最大となるシナリオの雨量空間分布を示す. 対象流域において、雨量が大幅に増加していることが示されている. また、雨量の変化は極めて非線形であることも確認でき、このような L2 降雨シナリオを提供できる点が本研究で用いた物理的手法の強みである.

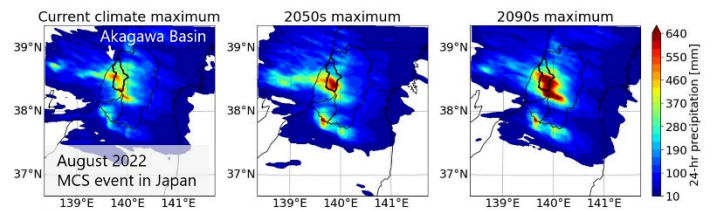


図-8 赤川流域 (AKB) において 24 時間流域平均雨量が最大となるシナリオ. 現在気候・2050 年代・2090 年代の結果を示す.

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の各項目をすべて達成し、結果として、目標としていた気候変動が L2 降雨に与える影響の定量化に成功した. 本研究は、数値気象モデルに基づく手法により、線状降水帯に伴う L2 クラスの降雨への気候変動の影響を初めて定量化したものであり、短い継続時間における評価も可能としている. 以下、設定した項目ごとの評価である:

◆項目 1 WRF モデルの高速化

スーパーコンピューター AOBA のサブシステム SX-Aurora TSUBASA (AOBA-S) に最新版の WRF (v4.6.0) 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.

◆項目 2 気候変動の影響をより精緻に数値計算に組み込むモジュールの開発

気候変動のパターンに応じて、モデルの初期境界を変更するプロセスを自動化するモジュールを開発し、WRF に内蔵することに成功した. 計画を達成している.

◆項目 3 様々な気候変動パターンを考慮した線状降水帯の数値計算

気候変動として様々なパターンを考慮し、かつ空間移動を組み合わせた大規模計算を完了した。これにより、目標としていた気候変動の影響評価が不確実性定量化とともに可能となった。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。

◆項目 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). Responses of Convective Heavy Rainfall to Atmospheric Moisture Amplification: Implications for Probable Maximum Precipitation (PMP) Estimation. *Journal of Hydrometeorology*, 26(8), 1037-1052. (IF: 3.1, Q1)

・ Hiraga, Y., Watanabe, S., Yamashita, T., & Takizawa, H. (2025). Climate change effects on probable maximum precipitation (PMP) of mesoscale convective systems: Model-based estimation and large ensemble-based frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 661, 133724. (IF: 6.7, Q1)

・ Hiraga, Y., Tahara, R., & Meza, J. (2025). A methodology to estimate Probable Maximum Precipitation (PMP) under climate change using a numerical weather model. *Journal of Hydrology*, 652, 132659. (IF: 6.7, Q1)

分野最高峰の雑誌を含む、Q1 誌へ複数の掲載に至った。世界ではインフラが老朽化し、気候変動が進行する中、L2 クラスの降雨のシナリオにどこまで気候変動の影響を考慮すべきか、知見が求められていた。これら論文は、そのような状況において、タイムリーに必要な知見を提供したものである。

得られた成果は社会的国内のメディアにも大きく取り上げられている（2025 年 7 月に日本経済新聞や Yahoo News 掲載）。本研究の成果の社会実装を狙いとして、国内外から関心が寄せられており、チリ（2025 年 6 月）、韓国（2025 年 8 月）では、

既に現地において産官学を交えた場で成果の詳細を報告している。

今後は、提案した枠組みを台風などの極端現象に適用し、気候変動の影響を一般化していく研究に挑戦する。