

河川砂防技術研究開発

【成果概要】

①研究代表者	氏 名（ふりがな）		所 属	役 職			
	山口 弘誠 (やまぐちこうせい)		京都大学防災研究所	准教授			
②技術研究 開発テーマ	名称	アンサンブル気象予測情報の時間変化に着目した洪水管理への 利用手法の開発					
③研究経費（単位：万円） ※端数切り捨て。	令和 元年度	令和 2 年度		総 合 計			
	307万円	185万円		493万円			
④研究者氏名（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）							
氏 名		所属機関・役職（※令和3年3月31日現在）					
中北 英一		京都大学防災研究所・教授					
⑤研究の目的・目標（様式地河-1、地河-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）							
アンサンブル気象予測情報という確率情報（不確かな情報）を実用的に有効となる決定情報（確かな情報）に翻訳することを意識し、最悪ケースとして想定される降雨量の予測や、いつまで雨が降り続くのかといった情報を創出することを目的とした。具体的には、降水の起源であり、また、降水のポテンシャル量でもある水蒸気に着目し、3時間（もしくは6時間）ごとに更新される水蒸気予測のアンサンブル的な時間変化（更新履歴）と実際の降雨量の対応付けを試みた。検討項目は下記である。 <u>水蒸気アンサンブル予測の更新履歴情報の作成による豪雨の前兆解析</u> 時間・空間スケールの異なる3つの線状降水帯事例（平成29年7月九州北部豪雨、平成30年西日本豪雨、令和2年球磨川豪雨）を対象としたアンサンブル気象予測を用いて、予測の初期値が更新される度に水蒸気予測のばらつきがどのような変化をするのかを Growing Forecast Uncertainty (GFU) と定義し、さらに GFU が豪雨の前兆と関連があることを明らかにすることを目的とした。 <u>予測の外れやすさ解析による最悪ケースとして想定される降雨量の予測</u> GFU を用いて、“予測が外れる”ことを予測する手法開発を目的とした。さらに、GFU を定量化し、予測の外れ度合いとの関連性を明らかにすることで、最悪ケースとして想定される降雨量の予測手法を提案することを目的とした。 <u>豪雨の降り終わりに関する時系列解析</u> 実際に時間が進んでいく状況を想定したタイムライン解析を行い、GFU がどのように変動し、豪雨の降り終わりの前兆を捉えることを目的とした。							

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

水蒸気アンサンブル予測の更新履歴情報の作成による豪雨の前兆解析

まず、本研究の最も独創的な点であるアンサンブル情報の更新履歴の解析手法について説明する。

気象予測は時間が進むにつれてモデルに入力する解析値が最新のものになり、予報も新しいものに更新されていく。一般的に、初期値が更新されると予測精度が良くなっていくと考えられるため、アンサンブル平均はより現実の値（解析値）に近づき、アンサンブルのばらつきはより小さくなると考えられる。

・パターン1「アンサンブル平均が解析値に近づかない」

この場合の模式図を図1に示す。ここで時刻 $t+2\Delta t$ に着目すると、最新の予測のアンサンブル平均（茶色の十字印）は、過去の予測（黒の十字印）と比べて現実の値に近づかない（もしくは離れている）これは、モデルの不完全性や、初期値の誤差による系統誤差によるものであると考えられる。

・パターン2「ばらつきが小さくならない」

この場合の模式図を図2に示す。予測のばらつきに着目すると、時刻 $t+2\Delta t$ から $t+3\Delta t$ にかけて、最新のアンサンブル予測のばらつき（緑色の輪の広がり）が、過去のアンサンブル予測のばらつき（黒色の輪の広がり）に比べて小さくならない（もしくは大きくなる）。小さな差のカオス的成長によるものである。アンサンブルのばらつきを予測精度の改善に利用する既往研究はあるが、本研究は初期値の更新によるばらつきの時間変化の仕方を利用するという点で一線を画している。

以上、予測困難な現象に対するアンサンブル予測ではパターン1、パターン2の特徴のうちどちらか一方か、もしくは両方の特徴が表れると仮説として考える。そして、アンサンブル予測においてこれらの特徴が表れたとき、将来予測困難な現象が起こるということを予知できると考える。

次いで、平成29年九州北部豪雨を対象として、メソ気象モデル CReSS を用いて、初期値に摂動を与えたアンサンブル予測計算を実施した。空間解像度は1km、メンバー数は33個とした。予測初期時刻を豪雨発生の12時間前から3時間ごとに進めながら予測実験を行った。計6つの初期時刻×33メンバー=198本の計算を行った。大気の初期値・境界値には気象庁MSMを、海面水温には気象庁NEAR-GOOSをそれぞれ用いた。初期アンサンブル摂動はBGM法を用いた。アンサンブル予測結果として、朝倉市周辺での高度750mの水蒸気混合比の全メンバーの時間変化を図3に示す。初期値が更新されると豪雨の時間帯であった12～21時においてばらつきが大きくなっていることがわかる。

まずパターン1から解析するため、アンサンブル平均の現実の場からのずれを求めた。ここでは、3時間ごとのMSMの客観解析値（MANAL）をCReSSの空間解像度に補間した水蒸気混合比の値（以降、解析値と呼ぶ）を現実の値とした。アンサンブル予測平均の解析値からのずれを図4に示す。12:00～21:00の6時から12時初期値の予測において、九州北部地域で過小予測である。一方、水蒸気の上流側（九州の西側）では新しい予測はより解析値に近い傾向にある。ここから、上流の水蒸気量の予測はアンサンブル平均的に良いが、朝倉まで水蒸気が流入するという予測が困難であることが推測される。これが、朝倉市周辺のみにパターン1が表れた原因であると考えられる。

次いで、パターン2を解析する。ばらつきの指標として単純に予測の最大幅を表す“アンサン

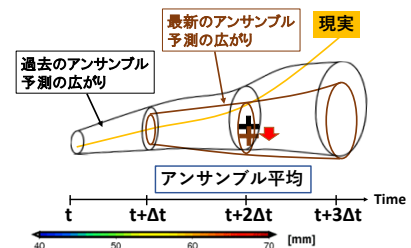


図1 予測困難な現象に対する、アンサンブル平均に現れる特徴（パターン1）。

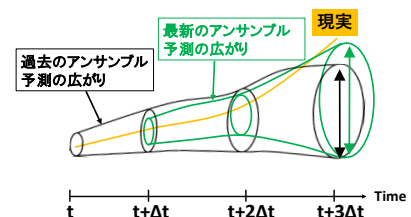


図2 予測困難な現象に対する、アンサンブルのばらつきに現れる特徴（パターン2）。

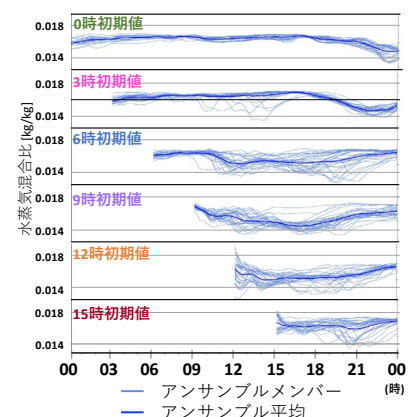


図3 全アンサンブルメンバーの水蒸気量（混合比）の時間推移

ブル最大－アンサンブル最小”を用いた。これは極端な値を予測するメンバーの情報も取り入れるためである。また、予測の絶対値が大きいほどばらつきも大きくなると考えられるが、正規化して解析したところ大きな差がなかったため、ここでは正規化は行っていない。ばらつきの空間分布の時間変化を図5に示す。実際の豪雨が始まる時間である12:00の分布図には、6時初期値も9時初期値も、水蒸気の上流側にばらつきの大きい領域がみられる。それが、15:00、18:00と時間が進むにつれて小さくなってきている。水蒸気流入が終わりに向かっていることと対応していると考えられる。実際に朝倉の雨が弱まる21:00にはどの初期値の予測にも、水蒸気の上流側にばらつきが大きい領域が無くなっている。以上のように、上流のばらつきの大きい領域の広がり方と実際の降雨の時間には関係がみられた。

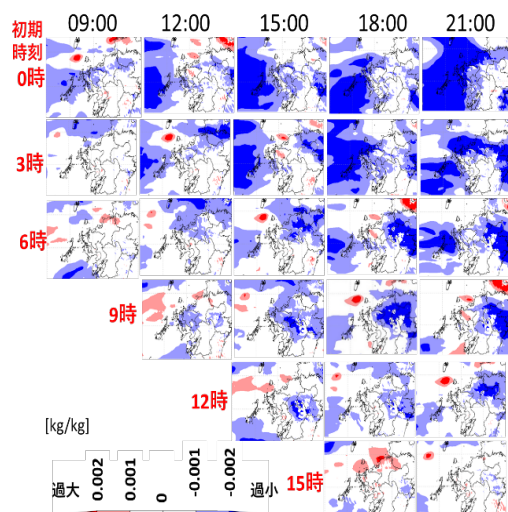


図4 水蒸気混合比予測の解析値からの差の空間分布

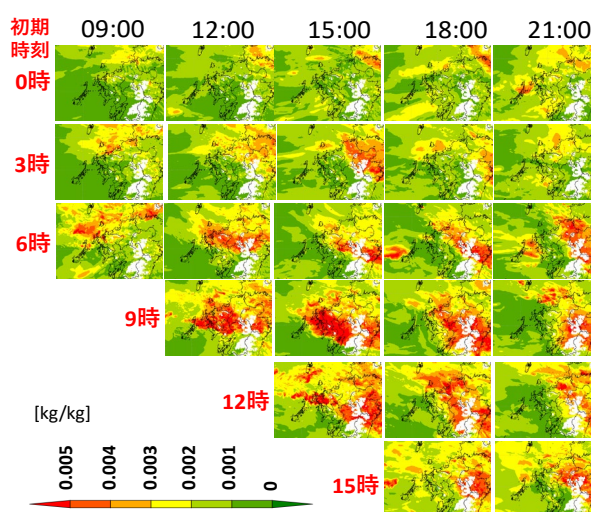


図5 水蒸気混合比予測のばらつきの空間分布

本事例におけるパターン1とパターン2の特徴の表れ方の違いに言及する。これまでの解析から、パターン2のほうが特徴が表れやすいといえる。このことは、パターン2はパターン1と比較し、3時初期値の予測から特徴が表れてきたこと、朝倉市周辺だけでなく上流側にも見られること、長時間継続しているということから言える。パターン2のほうが表れやすい理由は、パターン1の特徴が表れるためにはメンバー全体の予測が悪くなる必要があるが、ばらつきは一部のメンバーが異なる値を示すだけで変化するためである。特に“アンサンブル最大－アンサンブル最小”をばらつきの指標として用いたため、少数のメンバーのばらつきにもよく反応していたと考えられる。なお、アンサンブルスプレッドとして、“75パーセンタイル値－25パーセンタイル値”も調べてみたが、それほど大きな差は見られなかった。いずれにしても、豪雨の前兆として、アンサンブル予測情報のパターン1とパターン2の特徴を本事例において明確に捉えることに成功した。

予測の外れやすさ解析による最悪ケースとして想定される降雨量の予測

ここでは仮説を立てた特徴パターン1の、定量予測への適用を検討する。具体的には、パターン2で見られた“アンサンブルのばらつきが小さくならない”度合いと降雨強度に相関関係があると考えた。また、朝倉から約130km離れた上流側領域の水蒸気が10m/s（本事例において高度750mにおける平均的な風速値）で朝倉まで流入するとして、3時間30分かかると見積もった。それぞれの時刻におけるパターン2の特徴の度合いと、その3時間30分後の降雨強度の散布図を図6に示す。パターン2の特徴の度合いが大きいほど、朝倉周辺での降雨強度が強いと解釈することができる。予測困難な現象に対するアンサンブル予測の特徴から、豪雨の定量的予測ができる可能性があると考えられる。実際に利用するにあたっては、適切な上流の場所を選ぶことが課題である。最後に、パターン1およびパターン2と、モデル予測の過小予測の度合いとの関係を調べた。図7には、パターン2の度合いを横軸にとり、縦軸にはモデル予測がどの程度過小予測であったかの関係を整理し、加えてパターン1の度合いを色つきで付加している。まず黒点線の丸枠で囲っているように、パターン2によって過小予測の度合いをある程度見積

もることが可能であり、これによって最悪ケースとしてどの程度の降水が起こりうるかというリスク情報を創出できる。さらに、パターン1の色の分布を見ると、パターン1の度合いが大きいほど実際に過小予測であったことが見て取れる。すなわち、最悪ケースだけでなく、そのうちどの程度の過小予測が起こり得るのかという情報も出すことが可能である。これは通常のアンサンブル予測では出すことのできない新たな防災リスク情報として洪水管理に利用できると考える。

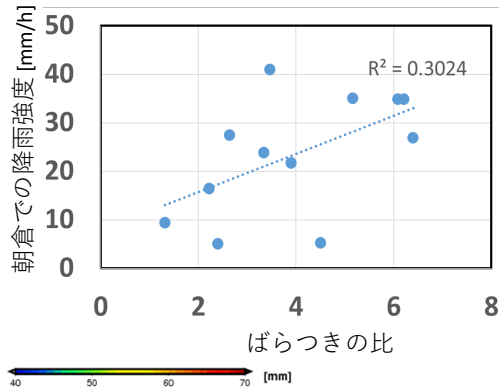


図6 ばらつきの大きさの比と降雨強度の関係

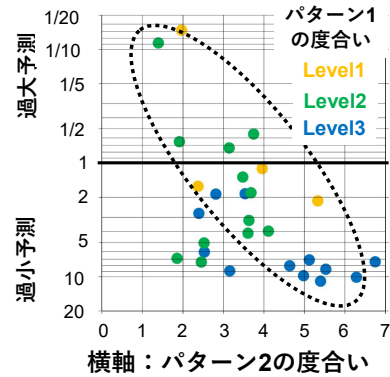


図7 予測の外れ方とアンサンブル更新履歴の度合いの関係

さらに、気象庁の現業メソアンサンブル予測情報 (MEPS) を用いても上述してきた考えが成り立つのかを検証した。平成29年7月九州北部豪雨、平成30年西日本豪雨、令和2年球磨川豪雨の3事例を対象とした。予測が更新されるとばらつきが大きくなる度合いを改めてGFU (Growing Forecast Uncertainty)と定義した。最新の予測(1st)とその一つ前に更新された予測(2nd)を用いて、 $GFU = sprd_{1st} - sprd_{2nd}$ ($sprd$ はアンサンブル最大値－アンサンブル最小値.)と定義した。事例によって細かく調整すればより精度は高まるものの、ここでは複数事例を同じ指標で見渡しても共通で成り立つことを解析するため、あえてシンプルな指標とした。結果を表1に示す。上述までに解析してきた九州北部豪雨事例においてパフォーマンスが低くなった一方で、球磨川豪雨事例では極めてうまくGFUが予測の外れ度合いの挙動を予測することができた。これは、MEPSの空間解像度 (5km) および初期値の更新頻度 (6時間毎) が上述までのCReSSを用いた独自計算 (それぞれ1kmと3時間毎) よりも粗いことに起因していると考えられる。MEPSを用いた適用範囲がある程度空間スケールの大きな線状降水帯に限られることを明らかにしたと共に、MEPSの空間解像度・更新頻度が将来向上することでその制限が外れることを期待する。

表1 線状降水帯豪雨3事例におけるGFUを用いた予測可能性のまとめ

	平成29年7月九州 北部豪雨	令和2年球磨川豪雨	平成30年7月豪雨
GFU増大理由	前線位置や前線に集まる水蒸気量の不確実性に対応		
GFUを用いた 予測可能性	・過小予測に対応した GFUが見られたり見 られなかったりした ・見逃しの可能性	・GFUを用いた予測が 外れるリスク情報が使 える可能性が特に高い	・GFUが過小だけでなく 過大予測にも対応 ・GFUだけではどちらに 外れるかわからない
予測可能性の 特徴の理由の 考察	前線よりも小さいス ケールの現象が降水 予測に大きな影響を 与えているため、降水の 予測不確実性をとらえ きれなかった	前線本体に付随する豪 雨のため、前線の予測 が比較的降水予測に つながる事例であった	広く水蒸気が入る場 であり、前線や水蒸 気の予測が不確実な場 が線状降水帯通過前後 も継続していたため

豪雨の降り終わりに関する時系列解析

GFU指標をリアルタイムに運用したときのことを想定し、タイムライン的にどのような変化をするのかを解析する。これまでと同様に、予測を上回る豪雨がもたらされるという特徴を見るだけではなく、降り終わりについてもGFUが予測できるかどうかについて解析した。

まず、リアルタイム運用を考える際、GFUを算出する上流エリアの選定方法を考える必要がある。これまでは主観的に風向・風速から、対象エリアに対して上流側を決めていたが、ここで予測感度解析手法（Enomoto et al. 2015）を用いた。予測感度解析手法とは、予測対象とする時間、場所によく成長する初期摂動を、既に計算されたアンサンブル予測を用いて求める解析のことである。球磨川豪雨事例における上流エリアの選定結果を図8に示す。性の摂動である赤色のエリアを上流側に設定した。なお、黒色四角がこれまで主観的に選択していた領域であるが、決しておかしな選択ではなかったこともわかった。

さて、球磨川豪雨事例にリアルタイムにGFU解析を運用した結果を図9に示す。図示はしていないが、球磨川豪雨発生時間帯が7/3の21時～7/4の7時頃であったのに対して、MEPSの降水予測は9時間前予測から線状降水帯が球磨川流域周辺で形成することを予測し始めていた。これに対し、GFU解析では27時間前予測からGFUが正值のシグナルを取り始め、その後6時間ごとにMEPSが更新されてもその正值が継続していたことがわかり、予測情報の安定性についても信頼度が高いことが言える。図10には、6時間ごとに更新されるGFUの最新値をつなぎ合わせた結果をXRAIN、 α 値と合わせて示す。豪雨発生時間帯は7/3の21時～7/4の7時頃であったが、7/4の3時以降はMEPSの降水予測も豪雨を的確に予測していた（すなわち、 α 値が小さい）。ここでGFUをみるとやはり7/4の3時以降は α 値が負値となっており、これは豪雨がこれ以上続かないこと、すなわち豪雨の降り終わりを的確に予測していたことがわかった。

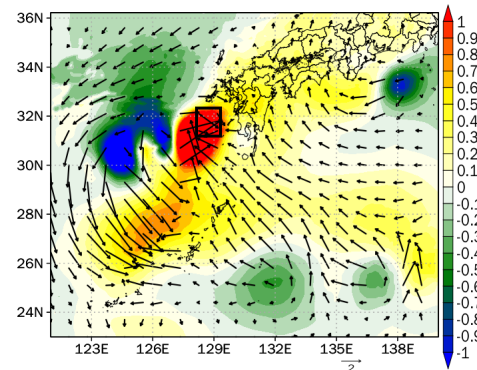


図8 球磨川にて3時間後に水蒸気が多くなるような初期摂動（ベクトル：水平風[m/s]、カラー水蒸気混合比[g/kg]）。四角がこれまで風向・風速から主観的に選択した領

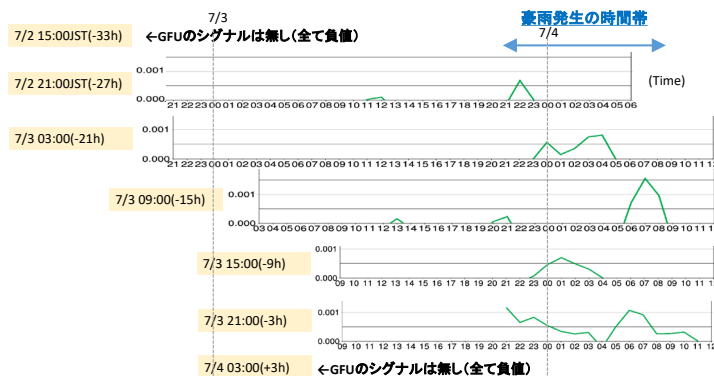


図9 MEPSの更新毎のGFUの変化

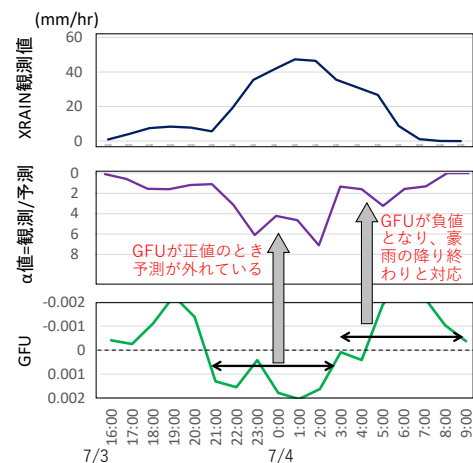


図10 更新時間間隔ごとに最新のGFUをつなぎ合わせたものとXRAIN、 α 値の比較

GFUという新たなリスク指標を提示することができ、気象庁の現業メソアンサンブルMEPSを用いても、比較的スケールの大きな線状降水帯に対して、「予測が外れるリスクがある」という心構えの情報を1日～半日程度前から出すことができることを示した。加えて、予測が当たる際にはGFUによるシグナルがきちんと消滅することも示した。河川管理においては、通常アンサンブル降水予測の最大値すら超えるような極端豪雨に対して、本研究で提案するGFUを用いることで、非常事態体制に入るための“いち早いリスク情報”となりうると考え、今後、実利用へと展開していくことを期待する。

⑦研究成果の発表状況・予定

(本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。)

・フル査読付論文

- 1) 山口弘誠, 黒田奈那, 中北英一, 2019: 線状降水帯豪雨予測に向けた水蒸気のアサンブル予測情報の更新履歴解析, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, **75**, I_1153-I_1158.
- 2) 【投稿予定、日本語版を執筆済みで現在英文に翻訳中】Yamaguchi, K., N. Kuroda, E. Nakakita: Growing Forecast Uncertainty (GFU) using update-history of meso-scale ensemble forecast, *Weather and Forecasting, American Meteorological Society*.

・紀要

- 1) 山口弘誠, 黒田奈那, 中北英一, 2019: 線状降水帯豪雨予測に向けた水蒸気のアサンブル予測情報の更新履歴解析, *京都大学防災研究所年報*, **62B**, 533-544.

・講演

- 1) 基調講演:「リアルタイム豪雨監視と気候変動下における豪雨の将来変化」, 2019 年度水資源・環境学会, 長岡京市中央生涯学習センター, 京都府長岡京市, 2019 年 6 月 8 日.
- 2) 招待講演:「ゲリラ豪雨のタマゴ早期探知と危険性予測」, 東京大学社会講座未来型の都市浸水リスク管理・制御システムキックオフシンポジウム, 東京大学山上会館, 2019 年 6 月 21 日.
- 3) 招待講演:「ゲリラ豪雨と線状降水帯の予兆を探る」, 京都大学第 19 回市民防災講座ー災害リスクを考えるー「豪雨・土砂災害に備える」, シェラトンホテル広島, 広島市, 2019 年 7 月 25 日.
- 4) 招待講演:“Ensemble rainfall forecast and data assimilation of polarimetric radar”, International conference on weather forecast and hydrological applications of radar 2019, Sheraton Seoul D Cube City Hotel, Korea, Nov 13-15, 2019.
- 5) 招待講演:「ダム操作の高度化へ向けたアサンブル予測情報の活用方法」, 京都大学防災研究所特定研究集会「降雨予測情報を用いたダムの多面的な操作の高度化」, 2021 年 1 月 22 日.
- 6) 話題提供:「アサンブル予測の更新に伴う不確実性の増幅を考慮したリアルタイム線状降水帯予測」, 第 7 回レーダ雨量計技術応用研究委員会, 近畿地方整備局, 2021 年 3 月 5 日.

・学会

- 1) 黒田奈那, 山口弘誠, 中北英一:線状降水帯豪雨予測に向けた水蒸気のアサンブル予測情報の更新履歴解析, 2019 年度土木学会関西支部講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 2019 年 5 月 25 日.
- 2) 黒田奈那, 山口弘誠, 中北英一:線状降水帯豪雨予測に向けた水蒸気のアサンブル予測情報の更新履歴解析, 令和元年度土木学会全国大会, 香川大学, 香川県高松市, 2019 年 9 月 3-5 日.
- 3) 黒田奈那, 山口弘誠, 中北英一:線状降水帯豪雨予測に向けた水蒸気のアサンブル予測情報の更新履歴解析, 2019 年度水文・水資源学会研究集会, 千葉工業大学, 2019 年 9 月 11-13 日.
- 4) Yamaguchi, K., N. Kuroda, E. Nakakita: Forecast of miss-forecast using update history of ensemble rainfall prediction, The NCDP-DPRI workshop 2019, Taiwan, Nov 25-26, 2019.
- 5) Kuroda, N., K. Yamaguchi, E. Nakakita: A New Ensemble Simulation Analysis Considering Water Vapor Update History for Line-Shaped Rainband Heavy Rainfall Forecasting, 100th American Meteorological Society Annual Meeting, Boston, USA, January 12-16, 2020.
- 6) 黒田奈那, 山口弘誠, 中北英一: アサンブル予測の更新に伴う不確実性の増幅を考慮したリアルタイム線状降水帯予測, 令和 2 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, 京都大学宇治キャンパス, 2021 年 2 月 22, 24 日.
- 7) 山口弘誠, 黒田奈那, 中北英一, 榎本剛, 越智数夫, 國井勝, 2021: アサンブル予測の更新履歴解析による「予測が外れること」の確かな予測, 日本気象学会 2021 年度春季大会専門分科会.

⑧ 研究成果の社会への情報発信

- 1) 新聞記事(研究紹介): 「高精度予測の実現へ」, 日本下水道新聞, 2019年7月10日.
- 2) 新聞記事(研究紹介): 「豪雨・土石流 最新の知見 大規模災害に備えて急務」, 中国新聞, 2019年7月26日.
- 3) 新聞記事(研究紹介): 「線状降水帯 兆候つかめ」, 読売新聞, 2020年7月3日.
- 4) テレビ出演(研究紹介): 関西情報ネット ten., 「線状降水帯予測の最前線」, 読売テレビ, 2020年7月8日.
- 5) 新聞記事(コメント掲載): 「経験通用しない災害へ備えを」, 京都新聞など, 2020年7月9日.

⑨表彰、受賞歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

優秀発表賞: 黒田奈那, 山口弘誠, 中北英一, 2021: アンサンブル予測の更新に伴う不確実性の増幅を考慮したリアルタイム線状降水帯予測, 2020年度京都大学防災研究所研究発表講演会, 2021年2月22, 24日.

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

2年間の研究を通じて、どの程度の過小予測が起こり得るのかというリスク情報(最悪シナリオ)として、通常の降水予測よりも早期に情報提供できることを明らかにしてきた。これは社会が一般的に苦手とする“不確実な情報”ではなく、「予測が外れるという“確かな”予測」であると解釈しており、アンサンブル予測に対する価値観を変革してきたと考える。

現在、近畿地方整備局の水災害予報センターおよび淀川ダム統合管理事務所とのタイトな連携によって、本研究成果を実用するための検討業務を進めていただいている。

今後の主な課題は次の2点である。1つ目は、水蒸気量のアンサンブル予測情報のみを利用してきたが、他の変数も用いることでより精度向上を狙えるのではないかという点である。2つ目は、線状降水帯以外の他の事例に適用可能であるのかを検証する必要があるという点である。いずれも現象との依存関係が大きいと考えられるため、台風・前線・線状降水帯・ゲリラ豪雨といった空間スケールに分類して対応することが望まれる。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

近年の豪雨災害を受けて、既存ダムの洪水調節機能強化に向けた検討会議が令和元年11月26日に内閣総理大臣決裁を受けていて、大きな項目の一つとして、「気象予測と配信される降雨予測等を利用した河川水位予測精度向上の実施」が謳われている。本課題で協力いただいている近畿地方整備局の淀川ダム統合管理事務所におけるダム操作においては、予測雨量には変動があり、予想を超えたダム流入量に対応するために、“実績雨量÷予想雨量”を α 値として、現行 $\alpha=2$ としてダム操作が行われている。本研究で構築した最悪ケース手法では、まさにこの α 値をリアルタイムに推定できる手法となっており、今後様々な事例に適用し検証できれば、実務利用可能であると強く考えている。

また、水災害管理のための非常事態体制の人員確保を考えると、災害の遅くとも6時間前には確かな災害予測情報が必要ということをヒアリングからうかがっている。本研究で示したように球磨川豪雨事例では27時間前から予測が外れるということを示しており、心構えの情報としては十分なリードタイムがあると考えており、実務利用を期待したい。