

第9回気象庁数値モデル研究会・第44回メソ気象研究会・ 第2回観測システム予測可能性研究連絡会

—アンサンブル予報の発展と展望—

コンビーナー：佐藤芳昭*1・加藤輝之*2・榎本 剛*3・永戸久喜*4

1. はじめに

気象庁では現在、アンサンブル予報を週間天気予報から季節予報において現業利用している。これらのアンサンブル予測資料の活用を目指す試みは、気象庁以外でも進められているが、そのような試みは限定的である。一方、これまで決定論的手法に頼ってきたメソ気象の予測についても、アンサンブル予測技術を活用した予測可能性の向上に向けた取り組みが進められている。しかしながら、そのための技術開発の方向性や予測結果の活用方法については、さらなる検討が必要な状況である。このため、アンサンブル予測技術のメソ気象予測等の短期予報への適用にあたり、現業数値予報システムの運用と予測精度向上に向けた技術開発を進めている気象庁、メソ気象や顕著現象に知見のあるメソ気象研究連絡会、及びアンサンブル予測技術に知見のある観測システム予測可能性研究連絡会が共同で、本研究会を開催することとした。

研究会開催の目的の1つとして、気象庁におけるアンサンブル予報システム (EPS: Ensemble Prediction System) 開発の方向性と課題を研究者やユーザーと共有することが挙げられる。気象庁では、EPSの総合的な精度向上を目指して、基となる数値予報モデルとアンサンブル予測技術の肝である摂動作成手法の継続的な開発と改良に取り組んでいる (気象庁予報

部 2016)。その中で、中期予報 (~10日) から延長予報 (~30日) を同一のシステムで支援することによる予測の一貫性の確保と効率的な開発の推進を目指し、3つのEPS (台風EPS, 週間EPS, 1か月EPS) の統合に向けた開発を進めている。更に、メソ気象予測に対するアンサンブル予測技術の適用による1日程度先までの顕著現象発生可能性の把握を目指し、水平格子間隔5kmの領域モデルであるメソモデル (MSM: Meso-Scale Model) を基にしたメソEPS (MEPS: Meso-scale Ensemble Prediction System) の開発も行っている。更に、EPSの開発・利用に関する連携に向けた議論を行うことも本研究会の重要な目的である。開発者と研究者・ユーザーとの連携によって、顕著現象・予測可能性研究に関する知見の開発への取り込みによる予測精度向上やEPSによる予測情報の利用検討・拡大に繋がることが期待される。

このような趣旨のもと、研究会は2016年度春季大会前日の2016年5月17日 (火) に気象庁講堂で開催され、150名を超える多くの方々に参加して頂いた。研究会では、気象庁で現業運用中の週間EPS、及び次期スーパーコンピュータシステムでの運用開始を目指しているMEPSについての開発状況・課題・今後の開発計画等の紹介に加えて、全球・領域それぞれのアンサンブル予測技術開発及び利活用に関連する研究活動を行っている大学・研究機関の研究者の皆様にご講演を依頼し、話題提供をして頂いた。各講演後には活発な質疑応答が行われ、総合討論では、EPSの開発推進や利用拡大のための連携に関連して、ツールやデータの共有に関する必要性や課題についての議論があった。

*1 Yoshiaki SATO, 気象庁気候情報課。

*2 Teruyuki KATO, 気象研究所。

*3 Takeshi ENOMOTO, 京都大学防災研究所/JAM-STECA PL.

*4 (連絡責任著者) Hisaki EITO, 気象庁数値予報課。
heito@met.kishou.go.jp

© 2016 日本気象学会

2. 気象庁週間アンサンブル予報システムの現状と展望

太田洋一郎（気象庁数値予報課）

EPSは有限個の予測（メンバー）によって確率密度関数を近似的に予測する。このため、EPSでは解析値や予報モデルの精度に加えて、どのようにメンバーを構成するかが重要となる。気象庁では1か月までの確率的な予測のため、全球を対象とした3つのEPS（台風・週間・1か月EPS）をそれぞれの用途に合わせて現業運用している。このうち台風及び週間EPSでは初期摂動として特異ベクトル（SV）を用い、境界値摂動は用いていない。

SVによる初期摂動は予測における成長が速い一方で、解析値の不確実性を十分に捉えているとはいえないことなどから、現在の週間EPSでは予測初期の確率予測精度に課題がある。そこで、アンサンブル・カルマンフィルタの一種である局所アンサンブル変換カルマンフィルタ（LETKF）による摂動を初期摂動として用い、解析値の不確実性の表現の向上を試みた。その結果、短時間予測（72時間予報程度まで）における確率予測精度を向上させることができた一方で、中・高緯度を中心に摂動の成長率が十分ではなく、中期予報（96時間予報以降）の予測精度は悪化した。これを受けて、摂動成長を補う短期的な解決策として、LETKFとSVの摂動を組み合わせた初期摂動を用いたアンサンブル予報を試みた。これにより、SVやLETKFを単独で用いた場合と比べて熱帯や予測初期を中心に予測精度が向上した。

次に、境界値摂動の開発として、海面水温（SST）への摂動の導入を試みた。現在の週間EPSではSSTは全メンバーに対して気候値偏差を初期に与えて予報時間中は固定として与えている。この初期偏差固定のSSTの予測の不確実性を表現する摂動として、過去のSST解析値からSSTの予測誤差をサンプルする摂動を導入した。SST摂動のみを導入したEPS実験により、SSTの予測の不確実性に伴う大気予測の不確実性をSST摂動の導入により表現できることを確認した。週間EPS相当の予測実験では、熱帯や夏半球の下層を中心にスプレッドが増加し、スプレッド・スキルの関係が改善された。また、1か月EPS相当の実験から、夏季の日本付近の地上気温予測でスプレッドが足りていない状態を緩和できることを確認した。

最後に、これらの開発成果を導入し、台風・週間・

1か月EPSの3つの現業EPSを統合した「全球EPS」の開発計画について紹介した。今後のEPSの開発では、EPSの総合的な精度向上に向けて、予報モデルやデータ同等の各システムの開発者・研究者との密接な連携とともに、ユーザーからのフィードバックが重要になると強調した。

3. アンサンブル予報データを用いた成層圏極渦変動の予測可能性研究

野口峻佑（京都大学防災研究所/
現所属 気象研究所）

本講演では、アンサンブル予報を用いた研究の例として、2009年1月下旬に生じた成層圏突然昇温（SSW）の予測可能性の調査結果について紹介した。

対象としたのは、成層圏極渦の分裂という流れ場の急激な変動を伴う、過去最大規模のSSW事例であった。1週間毎に予報がなされる気象庁現業1か月アンサンブル予報では、このときの予測可能性の変動を断片的にしか捕捉できなかった。そこで、気象研究所大気大循環モデルを用いて、開始日を1日毎にとったアンサンブル再予報実験を実施することで、このSSWの予測特性を正確に把握し、さらに、その生起に重要であった物理過程の特定を試みた。

予報実験結果の解析から、まず、このSSWに伴う東西風の逆転は、その6日前以降に開始した予報でのみ、再現可能であることがわかった。東西風の逆転日の7日前以前を開始日とした予報ではアンサンブルスプレッドが急激に増大したが、6日前以降を開始日とする予報では予報期間を通じてほとんど増大しなかった。また、7日前・8日前を開始日とする予報では、それ以前を開始日とする予報と比べ、より急速にスプレッドが増大していた。

そこで次に、SSW生起に重要な役割を果たした過程を特定するため、このスプレッドが急速に増大した予報に着目した解析を行った。これらのアンサンブル予報から、極渦分裂および東西風の逆転を予測したメンバー（成功集団）と分裂が生じずに西風の再強化を予測したメンバー（失敗集団）とを抽出し、それらの合成図の比較を行った。その結果、成功集団では、極渦分裂の前後で対流圏から上方伝播してきた惑星規模波が成層圏で吸収され、その後も上方伝播が持続するのに対し、失敗集団では、惑星規模波が成層圏で反射され、対流圏へと下方伝播することがわかった。

さらに、各集団での惑星規模波束の3次元伝播を解

析し、両集団間の差異の成長過程を吟味した。その結果、両集団の決定的な違いとして、極渦分裂の直前に、失敗集団は成功集団に比べ、ヨーロッパ域の上部成層圏における東西風の減速が有意に弱く、その後対流圏から上方伝播してくる波束が反射しやすい構造となっていたことがわかった。これにより、失敗集団では、波束が反射されてシベリア域で局所的に下方伝播しており、それに伴い対流圏北太平洋西部で高気圧性偏差が新たに形成されていた。それに付随し、西半球における惑星規模波の位相が高度とともに東傾し、惑星規模波の下方伝播が顕著となっていた。その一方で、成功集団では、対流圏においてヨーロッパ域の高気圧性偏差とユーラシア大陸中央部の低気圧性偏差が持続しており、それに伴い東半球における惑星規模波の位相が西傾し、波の上方伝播も持続していた。

4. 北極海のラジオゾンデ観測データが冬の中緯度で生じる寒波の予報精度に与える影響

佐藤和敏 (極地研究所)

近年、北極海で気温上昇が顕著である一方、中緯度では記録的低温が頻発している。日本を含む中緯度では、低温や大雪により甚大な被害が生じており、寒波の正確な予報が必要とされている。観測点の少ない北極圏では、予報モデルに用いる初期値の不確定性が大きく、冬期は北半球全域の予報に影響していると考えられている。しかし、これまでの研究では、夏の観測データが大气循環の予報精度の向上に重要であると指摘しているが (Inoue *et al.* 2015; Yamazaki *et al.* 2015)、冬の観測データの影響を明らかにしていない。

そこで本研究では、海洋研究開発機構が地球シミュレータ用に開発した大気大循環モデル (Ohfuchi *et al.* 2004) 及びアンサンブルデータ同化システムである LETKF (Miyoshi and Yamane 2007; Enomoto *et al.* 2013) を用いて、北極圏に常設されている観測所や海面上の船上で取得されたラジオゾンデ観測が北半球全域の予報精度に与える影響を調べた。具体的には、観測所 (通常観測 2 回と追加観測 2 回) やノルウェーの砕氷船ランス号 (N-ICE2015 プロジェクト: 追加観測 2 回) で 2015 年の冬期に実施された追加観測を含んだ再解析データと取り除いた再解析データを作成し、それぞれを初期値として 63 メンバーの予報実験を行い、その差を調べた。観測データの影響を調べるため、特別観測が実施された 2015 年 2 月に日本や北東アメリカで生じた記録的な低温や大雪の事例に着

目した。これらの事例では、上空の偏西風が南へ蛇行し、北極圏の寒気が中緯度へ南下していた。

北極での追加観測データを含んだ予報実験は、偏西風の蛇行を精度よく再現しており、日本や北東アメリカでの低温を予報できていた。一方、北極で実施された追加観測を取り除いた予報実験では、上空のトラフやリッジの再現性が悪くなったことが地上の大气循環 (低気圧の発達や高気圧の位置) の予報精度に影響し、中緯度への寒気の南下を十分に予報できていなかった。これらの結果や等温位面の渦位を追跡した解析から、観測データが乏しくなる高緯度で不確定性が大きくなり、その影響が中緯度に及ぶことで、中緯度の現象の予報精度を悪化させていることがわかった。

5. アンサンブル予報データベースを用いた予測可能性研究

松枝未遠 (筑波大学計算科学研究センター/
オックスフォード大学物理学部)

本講演では、時間スケールの異なる 2 つのアンサンブル予報データセットとそれらを使った予測可能性研究について紹介した。1 つ目は、1-2 週間先までを対象とした TIGGE (The International Grand Global Ensemble) データで、世界各国の 10 の数値予報機関 (BoM, CMA, CMC, CPTEC, ECMWF, JMA, KMA, Météo France, NCEP, UKMO) が大気モデルによって行っている現業全球アンサンブル予報データからなる。TIGGE データは、研究および教育目的に限り利用可能で、ECMWF と CMA がそれぞれ運用するデータポータルにて、予報初期日から 2 日遅れで取得できる。TIGGE データは、1-2 週間先の顕著現象の予測精度向上を目指す THORPEX プロジェクトのもと 2005 年から 2014 年まで運用されてきたが、多くの研究がその有用性を示してきたことを踏まえ、さらに 5 年間継続されることとなった。TIGGE データを利用した研究には、予報精度の比較、グランドアンサンブルの構築と性能評価、顕著現象等の予測 (台風とその温帯低気圧化、温帯低気圧、マッデン・ジュリアン振動 (MJO)、偏西風、ロスビー波、ブロッキング、天候レジーム、熱波等)、洪水予報、準リアルタイム予報プロダクト (TIGGE Museum: <http://gpvjma.ccs.hpcc.jp/TIGGE/>) などがある (詳細は、<https://software.ecmwf.int/wiki/display/TIGGE/Research+articles> を参照)。

2 つ目のデータセットは、THORPEX 後継プロ

プロジェクトの1つであるS2S (Sub-seasonal to seasonal) プロジェクトのもと公開されているアンサンブル予報データ (S2S データ) である。S2S データは、1-2ヶ月先の大気・海洋・陸面を対象に、2015年1月から提供されている。TIGGE データ同様、ECMWF と CMA がデータポータルを運用しており、予報初期日から21日遅れで研究および教育目的に限り取得できる。2016年6月現在、9の機関 (BoM, CMA, ECMWF, HMCR, ISAC-CNR, JMA, Météo France, NCEP, UKMO) が、大気海洋結合モデルによる全球アンサンブル予報データを提供している (ただし、HMCR と JMA は大気モデルを使用しているので解析時には注意が必要)。TIGGE データと異なり、予報が毎日行われていないため、予報データを比較する際には注意が必要となるが、過去数十年分の再予報 (reforecast) データがすでに利用可能なため、TIGGE データの提供開始直後のようにデータの蓄積を待つことなく、今すぐ解析を開始できるメリットがある。S2S プロジェクトでは、熱帯と中緯度の相互作用やテレコネクション、MJO, モンスーン, アフリカ, 極端現象などに主な焦点を当て、1-2ヶ月先の予報精度の向上を目指している。今後、上記のテーマのみならず様々な研究に利用されることが想定される。なお、松枝が運用する S2S Museum (<http://gpvjma.ccs.hpcc.jp/S2S/>) にも S2S データによる各種予報プロダクトを順次追加する予定である (現時点では、北極振動 (AO) /南極振動 (AAO), 北大西洋振動 (NAO), 太平洋・北米 (PNA) パターン, MJO と成層圏突然昇温, 海面水温, 海水等のプロダクトが閲覧可能)。

THORPEX プロジェクトは終了したが、これらのアンサンブル予報データを利用することで、TIGGE/S2S プロジェクトのみならず、残り2つの THORPEX 後継プロジェクト (Polar Prediction Project, High Impact Weather (HIWeather) project) にも貢献することができるので、興味のある方は是非挑戦してみたい。なお、TIGGE/S2S データの詳細については、講演資料あるいは、TIGGE/S2S Museum を参照されたい。

6. 気象庁メソアンサンブル予報システムの開発

小野耕介 (気象庁数値予報課)

気象庁では、メソスケールの気象現象による数時間から1日程度先の顕著現象の予測を目的に水平格子間

隔5kmのMSMを運用し、防災気象情報や飛行場予報の作成支援を行っている。一方で、メソスケールの現象は時空間スケールが小さく、その予測精度が初期値に含まれる誤差に敏感なため、単一の(決定論)予報によって1日程度先まで正確な予測を行うことが困難な場合がある。このため気象庁では、MSMによる決定論予報に対し不確実性に関わる情報を付加するため、MEPSの開発を進めており、その部内試験運用を2015年3月より開始した。

MEPSでは、MSMと同等の分解能によってメソスケールの気象現象の不確実性の予測を行うことを目的とし、MSMと同じ設定でアンサンブル予報を行っている。このため、摂動を与えないコントロールランはMSMそのものである。一方で、アンサンブル予報に多くの計算機資源を要するため、メンバー数はMSMを含め11である。初期摂動作成手法には、少数メンバーで予測誤差を捉えるため、特異ベクトル法を採用している。また、領域モデルでは側面境界値の不確実性を考慮することが予報時間の経過とともに重要となる。このため、側面境界摂動を週間アンサンブル予報の予測結果から作成している (以上の詳細は小野(2016)を参照)。

アンサンブル予報の出力には、各メンバーの予測から信頼度・確率情報など様々な情報が含まれ、限られた予報作業時間の中で有効に利用し得る情報をあらかじめ検討しておくことが肝要である。これまで、試験運用で蓄積された事例から各メンバーの降水予測結果を中心に、予報作業担当者及び開発者で分析を行い、MSMより実況に近い予測をしたメンバーがある場合、それをリアルタイムの実況監視からどのように抽出・利用するか等の検討が行われている。また検討の中で、予測初期でMSMより実況に近いメンバーについて、その優位性が保たれる時間が短い、実況と近くてもそれに至るプロセスが異なる等の課題も見つかっている。一方、アンサンブル平均予報を気温等のガイダンスの入力とすることで現行ガイダンスより精度が向上することも確認されている。信頼度・確率情報等の利用については、現行の決定論予測に基づく短期予報作業と馴染みが薄いこともあり、まだ十分な検討は行われていない。

今後気象庁では、現在の気象庁非静力学モデルをベースとしたMSMから、現業非静力学モデルとして新たに開発されたasuca (気象庁予報部 2014) をベースにしたシステムに変更する予定である。このた

め、MEPSも asuca をベースにしたシステムに移行するとともに、摂動作成手法を中心としたその他の精度向上のための開発を継続して進める予定である。また MEPS の本運用に向けて、引き続き各メンバーの予測特性の調査と利用可能性の検討を進めるとともに、信頼度・確率情報の利用可能性の検討等も行っていく予定である。

7. メソアンサンプル予報を利用した顕著現象の解析

國井 勝・横田 祥 (気象研究所)

アンサンプル予報では、初期値や数値モデルに含まれる誤差を反映した複数のメンバーで予報を行うことにより、予報誤差情報を陽に見積もることができる。これをデータ同化手法と組み合わせることにより、流れ依存の予報誤差情報をデータ同化で考慮できることに加え、解析誤差を反映した初期アンサンプル摂動の作成が可能となる。この特性は、顕著現象の解析および予報に有効であると考えられる。ここでは、LETKF (Hunt *et al.* 2007) に基づくメソアンサンプルデータ同化手法を大雨や竜巻といった顕著事例に適用することで、数値モデルの初期値の改善を通じた予測精度の向上、およびアンサンプル予報に基づく確率予測や感度解析の結果について議論を行った。

まず、平成27年9月関東・東北豪雨の事例に対し、同年7月から正式運用されたひまわり8号の観測データのインパクトについてデータ同化の観点から調査した。当時の現業メソ解析で利用されていたひまわり7号の大気追跡風を用いた場合、大雨が観測よりも西側で予測されることが多かったが、ひまわり8号の高頻度観測から得られた高頻度大気追跡風を用いることで、観測に近い位置で大雨が再現されることがわかった。これは主に、高頻度観測データの利用や大気追跡風のアルゴリズムの改良に伴う大気追跡風自体の精度向上、および大気下層における観測データ数の増加による初期値の精度改善に伴うものであると考えられる。実際、ひまわり8号の高頻度大気追跡風を用いることで、大雨発生時の関東南部で見られた南東および南からの暖湿気の流入がより正確に予測できていた。また、同事例における全101メンバーによるアンサンプル予報では、9月10日9時における前24時間積算降水量300 mm を閾値とした場合、30時間前からの予報でも比較的高確率で大雨発生の可能性を捕捉できていた。長時間積算雨量の発生確率予測は、大雨に伴う土

砂災害や浸水、河川の氾濫等の災害対策に直接的に寄与するものと考えられるため、さらなる精度の向上について、情報提供のあり方も含め今後の研究課題としたい。

また、2012年5月6日のつくば竜巻の事例に対し、気象研究所の二重偏波ドップラー気象レーダーや稠密な地上観測等のデータを同化して、全33メンバーによる水平解像度350 m のアンサンプル予報を行ったところ、ほとんどのメンバーで実際の竜巻による被害域近くに下層渦が予測された。この下層渦はメンバー毎に強さが異なっていたため、下層渦の強さ(地上0.8 km の最大鉛直渦度を用いて定義)と関係する物理量をアンサンプル予報に基づく感度解析 (Torn and Hakim 2008) により調査した。すると、下層渦発生約1時間前の下層の水蒸気量がストーム後方で大きく、下層の収束がストーム前方で大きいほど、下層渦が強まることが分かった(詳細は Yokota *et al.* 2016)。但し、この渦は下層のメソサイクロンと考えられ、竜巻そのものの発生機構を理解するためにはさらに高解像度で調査する必要がある。そこで、本実験を更にダウンスケールした水平解像度50 m のアンサンプル予報を行ったところ、メンバーによっては、竜巻の特徴を有する、鉛直渦度が 1 s^{-1} を超える水平スケールの小さい渦が地上に予測された。今後はこの実験結果を用いて、下層のメソサイクロンと竜巻の関係や、それらの予測可能性を調査する予定である。

本講演では、メソアンサンプル予報を顕著現象の解析に適用した2例について議論した。今後もメソアンサンプル予報による短時間予測情報の高度化を目指し、研究を進めていきたい。

8. 再生可能エネルギー発電出力量予測のためのメソアンサンプル予報

野原大輔 (電力中央研究所)

2012年に再生可能エネルギー固定価格買取制度 (FIT) が導入されて以降、太陽光発電や風力発電の設備量が急増している。これらの再生可能エネルギーは、天候の変化により発電出力が不安定となる性質を持つ。大量の貯蔵が難しい電力は、常に発電と需要をバランスさせる必要があるため、再生可能エネルギーによる発電出力量に直接関係する日射量や風速などを高い精度で予測することが求められている。一方、予測が外れた場合にも需要を満たせるよう、常に火力発電などの制御可能な電源に余裕を持たせた準備(予備

力)が必要となる。この予備力は、火力発電の不経済運転を生じさせることになるが、確率的な気象予測を活用することで、必要最小限に抑えることが期待できる。

このような背景の下、領域気象モデルWRF (Weather Research and Forecasting) を用いて、気象庁週間アンサンブル予報を初期値・境界値としたメソアンサンブル予測手法を開発した(野原ほか2015)。メソアンサンブル予測は、水平解像度15 km、予測値の出力間隔30分、コントロールを含む11個のアンサンブルメンバーで75時間先まで予測する。気象庁週間アンサンブル予報は27メンバーから構成されるが、本手法では、24時間予報値の日本域の地上気圧分布をクラスター分析に基づき分類し、スプレッドが広がるようなメンバーを選択するよう工夫している。本メソアンサンブル予測では、週間アンサンブル予報により得られた温帯低気圧の移動経路やその発達過程を高解像度で精度よく再現するとともに、週間アンサンブル予報では解像されていない細かいスケールの日射量や風速分布の予測を可能にした。

太陽光発電出力予測に利用する日射量予測は、雲の生成や移動といった大気的非線形応答による予測誤差が増大しやすい性質を持つ。メソアンサンブル予測を用いることで、予測した総観場の違いによる日射量予測の不確実性を推定することが可能となった。風力発電では、低気圧や前線の通過の際などに発生する発電出力量の急変化(ランプ現象)が問題となっている。ランプ現象への対応のため、風速の変化の振幅、変化時刻、変化速度などの予測の高精度化が必要とされるが、メソアンサンブル予測を活用することで、ランプ現象の見逃しリスクの低減や、それらの予測の不確実性の評価が可能となった。一方、アンサンブルメンバー全てがランプ現象を見逃す事例も確認されており、まれに発生する現象の予測見逃しを低減させるための手法改良が、今後の課題である。

9. WRF-LETKF を用いたアンサンブル洪水予測の開発、鬼怒川事例への適用

牛山朋来(土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター)

洪水予測を行う上で、数値予報による降水量を利用できれば、水防対策や早期避難を行う上で有効である。しかし、数値予報による予報降水量は精度が不十分であるため、現状では降水短時間予報による3時間

先までの予報が洪水予測に利用されている。そこで、数値予報によるリードタイム数時間以上の予報降水量について、洪水予測への有効性を調べるため、2015年鬼怒川洪水を対象にした予測実験を行った。用いた予報は、WRF-LETKFによる領域アンサンブル予報と、MSMによる決定論的予報である。

WRF-LETKFの実験設定について、計算領域と解像度は、外側領域15 km 解像度と内側領域3 km 解像度の2重ネスティングとした。外側・内側の両領域について、LETKFによるデータ同化とアンサンブル摂動生成を行い、降水ピーク発生の12・18・24・30時間前におけるアンサンブル初期値を作成した。境界条件は気象庁全球モデル(GSM: Global Spectral Model)を用い、アンサンブルメンバー数は21とした。それぞれの初期時刻から、降水終了時まで領域アンサンブル予報を行った。得られた予報降水量を、分布型水文流出モデルである降雨流出氾濫(RRI)モデルに入力し、河川流量を計算した。なお、鬼怒川上流部には4つのダムがあるため、ダム直下における流量は、ダムからの放流量を与えた。

鬼怒川中流域の石井地点におけるアンサンブル流量予測結果は、リードタイムが短くなるにつれて予測精度が向上した。アンサンブルメディアンや25~75パーセンタイル値は、全リードタイムにおいて過小評価したものの、12時間予報では観測に基づく流量に近づいた。また、30、18、12時間予報については、少なくともいくつかのアンサンブルメンバーが観測に基づくピーク流量を予測した。一方、MSMを用いた流量予測は、リードタイムが短くなってもばらつきが大きかった。

また、上流部の4つのダム集水域についても予測可能性を検証した結果、同様にリードタイムが短くなるにつれて予測精度が向上した。また、北側の2つのダム流域については、アンサンブル予報流量の最大値が観測に一致したのに対して、西側の2つのダム流域ではアンサンブルメディアンが観測に一致した。

今回の実験では、領域アンサンブル予報は洪水予測に対してある程度有効であることが示された。今後も多くの事例に対して検証を重ねたい。

謝辞

今回の合同研究会を開催するに当たって、会場の準備・運営をしていただいた気象庁企画課・数値予報課ならびに気象学会員の有志のみなさまに感謝します。

略語一覧

BoM : Bureau of Meteorology オーストラリア気象局
 CMA : China Meteorological Administration 中国気象局
 CMC : Canadian Meteorological Center カナダ気象センター
 CPTEC : Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos ブラジル天気予報気候研究センター
 ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 欧州中期予報センター
 HMCR : Hydrometeorological Center of Russia ロシア水文気象センター
 ISAC-CNR : Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima- Consiglio Nazionale delle Ricerche イタリア学術会議大気科学気候研究所
 JMA : Japan Meteorological Agency 気象庁
 KMA : Korea Meteorological Administration 韓国気象庁
 NCEP : National Centers for Environmental Prediction 米国環境予測センター
 UKMO : United Kingdom Met Office 英国気象局

参考文献

- Enomoto, T., T. Miyoshi, Q. Moteki, J. Inoue, M. Hattori, A. Kuwano-Yoshida, N. Komori and S. Yamane, 2013: Observing-system research and ensemble data assimilation at JAMSTEC. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)* (S. K. Park and L. Xu, ed.), Springer, 509-526.
- 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.
- Inoue, J., A. Yamazaki, J. Ono, K. Dethloff, M. Maturilli, R. Neuber, P. Edwards and H. Yamaguchi, 2015: Additional Arctic observations improve weather and sea-ice forecasts for the Northern Sea Route. *Sci. Rep.*, **5**, 16868, doi:10.1038/srep16868.
- 気象庁予報部, 2014: 次世代非静力学モデル asuca. 数値予報課報告・別冊, (60), 149pp. http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/60/No60_all.pdf (2016.7.21閲覧).
- 気象庁予報部, 2016: 確率的な気象予測のためのアンサンブル予報の課題と展望. 数値予報課報告・別冊, (62), 124pp. http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/62/No62_all.pdf (2016.7.21閲覧).
- Miyoshi, T. and S. Yamane, 2007, Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3841-3861.
- 野原大輔, 田村英寿, 平口博丸, 2015: 確率気象予測のための領域アンサンブル予測手法の開発. 電力中央研究所報告, V14013.
- Ohfuchi, W., H. Nakamura, M. K. Yoshioka, T. Enomoto, K. Takaya, X. Peng, S. Yamane, T. Nishimura, Y. Kurihara and K. Ninomiya, 2004: 10-km mesh meso-scale resolving simulations of the global atmosphere on the Earth Simulator: Preliminary outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, **1**, 8-34.
- 小野耕介, 2016: メソアンサンブル予報システムの開発状況. 数値予報課報告・別冊, (62), 気象庁予報部, 100-113. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpreport/62/chapter4.pdf> (2016.7.21閲覧).
- Torn, R. D. and G. J. Hakim, 2008: Ensemble-based sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 663-677.
- Yamazaki, A., J. Inoue, K. Dethloff, M. Maturilli and G. König-Langlo, 2015: Impact of radiosonde observations on forecasting summertime Arctic cyclone formation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 3249-3273.
- Yokota, S., H. Seko, M. Kunii, H. Yamauchi and H. Niino, 2016: The tornadic supercell on the Kanto Plain on 6 May 2012: Polarimetric radar and surface data assimilation with EnKF and ensemble-based sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3133-3157, doi:10.1175/MWR-D-15-0365.1.