モデルアンサンブル予報による 2010年7月可児豪雨の予測可能性

PREDICTABILITY OF THE HEAVY RAINFALL DISASTER AT KANI CITY IN JULY 2010 BASED ON MODEL ENSEMBLE FORECASTS

吉野 純¹・飯田 潤士²・安田 孝志³
Jun YOSHINO, Junji IIDA and Takashi YASUDA

¹正会員 理博 岐阜大学助教 工学研究科環境エネルギーシステム専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 大日コンサルタント株式会社 地理空間情報部 (〒500-8384 岐阜市藪田南3-1-21)

³フェロー 工博 岐阜大学教授 工学研究科環境エネルギーシステム専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

The predictability of the heavy rainfall disaster at Kani City, Japan in July 2010 is investigated using a model ensemble approach which relies on the combination of 32 member ensembles obtained from multiple parameterizations in the mesoscale meteorological model PSU/NCAR MM5. The model is initialized using the 20-km resolution global analyses JMA GSM-GPV with and without the radar-data assimilation system developed by Yoshino et al. (2009). It is found that the multi-parameterization ensemble forecasts averaged by 32 members during 24 hours are very skillful in indicating the area of severe local storm activity, while each member deviates largely from the ensemble mean. Furthermore, the radar-assimilated ensemble forecasts enable us to more precisely predict the area of greatest rainfall potential, because the initial conditions used here realistically represent 3-dimensional distributions of cloud microphysical properties in the atmosphere.

Key Words : heavy rainfall, mesoscale meteorological model, model ensemble forecasts

1. はじめに

IPCC第4次報告書が警鐘を鳴らすように、今後、地球温暖化の進行により大気中の水蒸気量の増大の結果として、局地的な集中豪雨による災害頻度はより増加するものと懸念されている¹⁾。その影響が、近年、梅雨期になると毎年のように、突発的かつゲリラ的な豪雨による被害が各地で発生しており、2010年7月15日に岐阜県可児市で発生した豪雨でも、降り始めからの雨量が270mm(可児市役所)に達し、可児川の氾濫により市道が最大6.2m水没し、死者・行方不明者4名の惨事になった。

このような豪雨に対して、24時間程度のリードタイムを確保してピンポイントに発生箇所を予測できるならば、警報伝達や避難誘導などのソフト対策に留まらず、大型土のうや鋼矢板などによる応急的なハード対策も可能となり、効果的かつ即効性のある防災・減災対策が実現できると期待される。しかし、残念ながら現状の気象予報技術では、それを実現するだけの十分な技術レベルと実績には到達しておらず、依然として多方面からの手探りが続いている。例えば、気象庁レーダーに基づく運動学

的手法による短時間予報は²⁾、時間・空間的に高分解能な降雨予測を実現し、水工学分野においても広く活用されているが、6時間以内の予報期間が精度的に限界であり³⁾、対策に必要な十分なリードタイムを確保することが困難である。一方で、気象モデルに基づく力学的手法による短期予報は⁴⁾、より長い予報期間を確保できることが利点ではあるが、初期値やモデルの不完全性に起因するカオスの挙動により、豪雨をもたらす積乱雲構造を時間・場所と共に正確に決定論的に予測することは困難を極める⁵⁾⁶⁾。

このような力学的手法に基づいた豪雨予測を、実用レベルへと発展させるためには、気象モデルによる「アンサンブル予報」が解決策の1つになると考えられる。アンサンブル予報とは、複数の数値予報の集合(アンサンブル)を統計的に処理して最も確からしい予報を得る手法であり、初期値アンサンブル、モデルアンサンブル、境界値アンサンブル、及び、外力アンサンブルといった多種多様な集合の取り方がこれまでに提案されている⁶⁾。今日まで、1週間や1ヶ月といった中長期予報(全球モデル)に対するアンサンブル予報の運用実績はめざましいものがあるが⁷⁾⁸⁾、短期予報(領域モデル)に対する適

図-1 可児市役所における時間降水量（棒グラフ）と降り始めからの積算雨量（実線）の時系列（2010年7月15日午前9時～16日午前9時）。

用実績は国外では散見されるものの⁹⁾、メソ現象、特に豪雨などの顕著現象を対象としたアンサンブル予報については国外も含めて十分な検討がなされているとは言い難い。

そこで本研究では、モデルアンサンブル予報の一種であるマルチパラメタリゼーション法をメソスケール気象モデル PSU/NCAR MM5¹⁰⁾に対して適用することで、全32メンバーからなるアンサンブル予報を行い、2010年7月可児豪雨に関する予測可能性について検討する。また、モデルアンサンブル予報に inputs する初期値の高精度化が豪雨発生箇所の事前予測に如何なる影響を与えるかについても検討を行う。

2. 2010年7月可児豪雨について

2010年7月15日の夕方から16日未明にかけて、本州付近に停滞した梅雨前線や日本海を北東心する低気圧に向かって非常に湿った空気が流れ込んで前線活動が強まり、岐阜県中濃地方や東濃地方を中心に猛烈な大雨となった。気象庁の観測によると、24時間雨量では伽藍で233mmを、1時間雨量では多治見で83.5mmを記録し、いずれも観測史上1位を更新した。可児市役所での観測では、降り始めからの総雨量が270mmを記録し（図-1）、可児川の水位が急激に増大し、午後8時すぎには土田で氾濫した。これによって、40台を超えるトラックや乗用車が一気に押し流される惨事となり、名鉄広見線と交叉する市道のアンダーパスでは最大6.5m冠水し、死者・行方不明者4名の被害となった。岐阜県と岐阜地方気象台が土砂災害警戒情報を発表した午後6時の時点では、既に切迫した状況にあり、対応の遅れが被害の拡大を招いた¹¹⁾。

図-2は、気象庁全国合成レーダーデータによる2010年7月15日午前9時から翌午前9時の24時間積算雨量の分布を示す。可児川流域を日雨量200mm以上の領域がすっぽりと覆っており、その形状から、豪雨をもたらした降水

システムは南西－北東方向に走向を持つ停滞性のデーバリングクラウドによってもたらされたものと推測される。気象庁GPVデータやアメダス観測データより、周辺地形の影響を受けることで南よりの気流が収束し、中部山岳によって強制上昇が生じることで降水システムは強化され、この降水システムの南西端から次々と積乱雲が発生したために持続的な大雨に繋がったと推測される。

3. 数値計算の手法

本研究では、この可児豪雨を対象として、メソスケール気象モデルMM5を使用し、マルチパラメタリゼーション法に基づくアンサンブル予報を行う。ここでは、その数値計算手法の概要について解説する。

(1) メソスケール気象モデル PSU/NCAR MM5

本研究で使用する数値予報モデルMM5は、完全圧縮・非膨張系・非静力学平衡の領域メソスケール気象モデルである¹⁰⁾。物理過程（パラメタリゼーション）としては、雲微物理過程、積雲対流過程、大気境界層過程、大気放射過程、地表面過程、及び、浅い対流過程を考慮でき、それぞれ多数の計算スキームから選択可能である。計算領域としては、図-3に示すように、岐阜県を中心とした18km（領域1）、6km（領域2）、及び、2kmメッシュ（領域3）の計3領域からなる2-wayネスティング格子を設定する。

(2) マルチパラメタリゼーション法

パラメタリゼーションとは、モデル格子間隔規模以下の現象の効果を分解可能な現象から推定し、モデル格子

図-2 気象庁全国合成レーダーによる24時間積算雨量の分布（2010年7月15日午前9時～16日午前9時）。

図-3 メソスケール気象モデルPSU/NCAR MM5の計算領域

で与えられる変数に反映させるためのものであり、MM5には多種多様な計算スキームが実装されている。一般的に、各種のパラメタリゼーションには、過去の観測等に基づく値がパラメータとして導入されている。これらの値は、多くの事例で最適値であったとしても、数値積分毎に常に最適値であるとは限らず、この差が数値予報にランダムな誤差を引き起こす可能性がある。特に、非線形効果の大きな豪雨発生時には、これらパラメータに対する鋭敏な依存性がある。このような誤差を統計的に処理するためには、複数の数値予報モデルの集合を使ったアンサンブル予報、すなわち、「モデルアンサンブル予報」が解決の糸口になる可能性がある。これによって、個々の決定論的予報にひそむノイズ（ランダム誤差）を、多数のモデルの平均を取ることで取り除き、有意なシグナルのみを抽出できるようになる。アンサンブル平均予報の精度は、個々の決定論的予報の平均精度を上回ることが理論的に知られており、アンサンブルメンバー数を増やすことで予報誤差をより軽減できることも実証されている⁶⁾。

モデルアンサンブル予報にも複数の種類があるが、本研究では、「マルチパラメタリゼーション法」を採用する。これは、1つもしくは複数の物理過程において異なる計算スキームを適用した数値予報モデルの集合を使う方法であり、基礎となる数値予報モデルは1つで済むことから、本研究のようにMM5を用いてアンサンブル予報を行う際に最適であると言える。アンサンブルメンバーの構成方法について定石はなく、モデル摂動を経験的かつ試行錯誤的に決定する必要がある⁶⁾。

(3) 数値計算の設定条件

本研究では、MM5によるマルチパラメタリゼーション法に基づき、全32メンバーからなるモデルアンサンブル予報を実施する。積雲対流過程（領域1のみ）に対しては4種類のスキーム（①Anthes-Kuo, ②Grell, ③Betts-Miller, ④Kain-Fritsch）、大気境界層過程（全領域）に対しては2種類のスキーム（①Burk-Thompson, ②Eta）、大気放

射過程（全領域）に対しては2種類のスキーム（①Cloud, ②CCM2）、浅い対流過程（全領域）には1種類のスキームの入り切り（①on, ②off）を組み合わせることにより全32アンサンブルメンバーを構成している。特に、領域1における積雲対流過程は、豪雨現象に直接的に影響する物理過程であることから、これに起因するランダム誤差の不安定成長は、領域3における豪雨予測にまで大きく影響するものと推測される。豪雨に直接的には関係しないその他の物理過程によっても、ホワイトノイズ状の微小なランダム誤差が強い非線形効果によって成長し、豪雨予測の結果に少なからず影響するものと考えられる。尚、雲微物理過程についても複数のスキームが存在するが、非現実的な素過程を含むものがあつたり、計算効率の低いものがあつたりと、精度面や実用面においてアンサンブル予報に不向きなスキームが大半である。本研究では、十分に詳細な素過程を考慮でき、尚かつ、多量の予報に堪えられるだけの高い効率性を有する唯一のスキーム「Schultzスキーム」を全領域に固定して適用している¹²⁾。これら全32メンバーは、モデルの予報期間（1メンバーあたり計48時間予報）、計算機規模（計40コアOpteron280 2.4GHz）、CPU時間（1メンバー・1コアあたり約6時間）などを勘案して設計されており、現業予報システムとして運用可能な最大限のメンバー数となっている。各国の現業予報で採用されているアンサンブル予報のメンバー数と比べても遜色はない。

MM5に入力する初期値・境界値には、気象庁GSM-GPV日本領域（20kmメッシュ）を使用し、初期時刻2010年7月14日午後9時（日本時間）から48時間予報をそれぞれ実施した。ただし、1) 気象庁GSM-GPVをそのまま内挿して初期値とする予報（以降、同化なし）と、2) 気象庁GSM-GPVに対してレーダーデータ同化を適用して初期値とする予報（以降、同化あり）の2種類を実施する。前者については、初期時刻に雲微物理量はゼロ設定としているが、一方で、後者については、初期時刻に領域1に対して気象庁全国合成レーダーデータを同化することで雲微物理量の3次元初期分布をより高精度に与えることができる。このレーダーデータ同化は、位置誤差修正法に基づき、「テンプレートマッチング法」と「CIP移流スキーム」の組み合わせによって構成され、より高精度な降水量予測を実現している¹³⁾。これら異なる初期値を入力することで、それぞれにモデルアンサンブル予報を実施し、初期値高精度化が豪雨予測に与える影響についても考察する。

4. 結果と考察

(1) モデルアンサンブル予報による豪雨の予測可能性

まず、同化なしのモデルアンサンブル予報の結果から、可児豪雨の発生に関する予測可能性について検討する。

図-4は、全32メンバーの各々の24時間積算雨量（2010年7月15日午前9時～16日午前9時）の分布を示す。多数のアンサンブルメンバーから構成されるにも拘わらず、メンバー間で一致した分布を示すことは一切なく、豪雨時には極めて強い非線形による不安定成長が卓越していたと推測される。大気境界層過程や大気放射過程といった降雨現象に直接関係しないパラメタリゼーションの選択の違いによって、予測結果に大きな差異が生じている点からも、場は極めて不安定でランダム誤差が増大しやすい環境にあったと考えられる。メンバーの中で、レーダー観測（図-2）と完全に一致しているものではなく、更に、可児市において豪雨となっているものも限られている。ただ、領域3内で豪雨が全く発生していないメンバーは1つもなく、また、可児市の近隣の異なる地域で豪雨となるメンバーが多数を占めることから、アンサンブル予測の誤差の大部分は豪雨域の位置誤差として表れていると考えられる。これらの結果から、仮に完全な初期値が存在したとしても、気象モデルの不確実性に起因する誤差の非線形による不安定成長の効果も決して無視できず、やはりゲリラ的な豪雨の決定論的な予測は不可能であると言える。

しかし、このような全32メンバーの24時間積算雨量に対してアンサンブル平均とスプレッドを評価することで、図-5のような結果が得られる。ここで、アンサ

ンブル平均とは、アンサンブル予測の結果として統計的に最も実現する可能性の高いランダム誤差を取り除いた推定値と見なすことができ、スプレッドとは、決定論的予測のばらつきの大きさ（標準偏差）、つまり、決定論的予測の変動幅の程度と見なすことができ、アンサンブル平均が大きくスプレッドが小さいほど統計的信頼度が高いと言える。アンサンブル平均の分布が示すように、全体的に平滑化され絶対値としては大きく減じられてしまっているが、可児市を含む地域一帯に明瞭な値のピークが出現している点が特徴的である。奥三河地方にもピークが出現しており、必ずしもアンサンブル平均の高い地域で豪雨が発生するとは言えないが、本研究のモデルアンサンブル予測により、可児豪雨の発生箇所を24時間前にある程度予測可能であったものと窺える。また、スプレッドの分布が示すように、アンサンブル平均の大きな地域では、スプレッドも大きくなる傾向にあり、個々の決定論的予測の信頼性は低いと考えられる。しかしながら、可児市付近では、アンサンブル平均が大きいにも拘わらず、アンサンブル平均の大きな他の地域と比べて相対的にスプレッドが小さくなる傾向にあることから、他の地域に比べて豪雨発生の可能性は一貫して高く、その信頼度も高かったと言える。このことは、可児市付近では、周辺地形の影響を受けて降水システムが定在的に強化

図-4 全32アンサンブルメンバー（同化なし）の各々の24時間積算雨量の分布（図上の数字は、左から順に積雲対流過程、大気境界層過程、放射過程、および、浅い対流過程のそれぞれの種類を示す）。星印は可児市役所の位置を示す。

図-5 全32アンサンブルメンバー（同化なし）の日積算雨量の(a)アンサンブル平均値と(b)スプレッド（2010年7月15日午前9時～16日午前9時）．星印は可児市役所の位置を示す．

図-6 全32アンサンブルメンバー（同化あり）の日積算雨量の(a)アンサンブル平均値と(b)スプレッド（2010年7月15日午前9時～16日午前9時）．星印は可児市役所の位置を示す．

されやすい環境にあったことを示唆する結果である。

以上の結果より，気象モデルによりゲリラ的な豪雨の決定論的に予報することは極めて困難であるものの，本研究で提案するマルチパラメタリゼーション法の採用により，豪雨発生箇所を24時間前にある程度の確度の下で予測できる可能性が明らかとなった。

(2) 初期値高精度化による豪雨予測への影響

次に，同化なしと同化ありのモデルアンサンブル予報

の結果の比較から，初期値高精度化による豪雨予測に及ぼす影響について考察する。

図-6は，同化ありのモデルアンサンブル予報による全32メンバーの24時間積算雨量に対するアンサンブル平均とスプレッドの分布を示す．同化なしの結果（図-5）と比較して，同様に強い非線形効果が卓越していたことが分かるが，アンサンブル平均のピークは，可児市を中心としてより絞られて出現していることが見て取れる．このことは，MM5の初期値高精度化により，より高精度

な豪雨発生箇所の事前絞り込みが可能であることを意味している。スプレッドについても、同化なしの結果(図-5)と比較して、全体的に小さな値を示しており、全体的に決定論的予報の信頼性は向上していると見なすことができる。アンサンブル平均のピークは可見市付近のみならず奥三河地方にも存在しているが、可見市付近では周囲に比べてスプレッドが比較的小さく、地形の影響を受けやすいためか、周囲に比べて一貫して豪雨発生の可能性が高い状態にあったと見なせる。MM5の初期値に対してレーダーデータ同化を適用し、高精度な雲微物理量の3次元分布を与えることで、予報中の降雨域の系統的な位置誤差を軽減できたために、豪雨予測の高精度化に繋がったと考えられる^{4), 13)}。つまり、アンサンブル予報による豪雨予測の更なる高精度化のためには、単にモデルの持つ不確実性のみならず、初期値の持つ不確実性をも考慮して、更なる初期値高精度化や初期値アンサンブルをも組み合わせる必要があると言えるだろう。

以上の結果より、レーダーデータ同化に基づく初期値高精度化によって、モデルアンサンブル予報による豪雨発生箇所の予測可能性は一段と向上することが明らかとなった。

5. 結語

本研究では、メソスケール気象モデルMM5を用いたモデルアンサンブル予報により、2010年7月に発生した可見豪雨の予測可能性について検討した。モデルアンサンブル予報の際には、MM5において選択可能な種々の物理過程の計算スキームを組み合わせることで全32メンバーからなる48時間予報を実施し(マルチパラメタリゼーション法)、それらの24時間積算雨量に対するアンサンブル平均やスプレッドを評価することにより、可見豪雨における豪雨発生箇所との対比を行った。

その結果、24時間積算雨量であってもアンサンブルメンバー間のばらつきはかなり大きく、豪雨をもたらしたシステムには強い非線形効果が卓越しており、個々の決定論的予報に対する信頼性は高くないことが明らかとなった。一方で、全32メンバーのアンサンブル平均をとることによって、個々のメンバー間の予報誤差が打ち消し合うことで、可見市近傍における豪雨発生箇所を24時間前にある程度の精度で予測することが可能となり、本手法の有用性を実証できた。更に、モデルアンサンブル予報に用いられる初期値に対してレーダーデータ同化を適用することで、より高精度な豪雨発生箇所の事前絞り込みが可能になることも明らかとなった。モデルアンサンブル予報の際には、単にモデルの不確実性を考慮するのみならず、用いる初期値の不確実性をも考慮してゆく必要性があると結論付けられた。

本研究によるモデルアンサンブル予報とレーダーデー

タ同化の組み合わせたシステムを運用することにより、24時間前に高精度な豪雨発生箇所の予測が実現されるならば、特に、降雨から災害発生までの時間が短い中小河川の洪水氾濫、低平地の内水氾濫、がけ崩れに対するリアルタイムリスクマップの作成が可能となり、豪雨発生前の防災・減災のための効果的な応急対策が可能になると期待される。本手法による更なる事例検証の積み重ねが望まれる。

謝辞：本研究は、国土交通省建設技術開発費補助金による成果の一部であることを、ここに付記する。

参考文献

- 1) Kimoto, M., Yasutomi, N., Yokoyama, C. and Emori, S.: Projected changes in precipitation characteristics around Japan under the global warming, *SOLA*, Vol. 1, pp. 85-88, 2005.
- 2) 椎葉充晴, 高埴琢馬, 中北英一: 移流モデルによる短時間降雨予測の検討, *水工学論文集*, Vol. 28, pp. 423-428, 1984.
- 3) 和田一範, 川崎将生, 富澤洋介: 河川の高水管理における予測降雨情報の適用性に関する考察, *水文・水資源学会誌*, Vol. 18, pp. 703-709, 2005.
- 4) 吉野純, 野村俊夫, 片山純, 木下佳則, 安田孝志: メソ気象モデルMM5によるピンポイント24時間降水量予測の精度について, *水工学論文集*, Vol. 52, pp. 325-330, 2008.
- 5) Lorenz, E. N.: Deterministic nonperiodic flow, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 20, pp. 130-141, 1963.
- 6) 気象庁予報部: アンサンブル技術の短期・長期予報への利用, 2006.
- 7) 萬納寺信崇, 前田修平: 1ヶ月予報のための数値予報モデル, 平成13年度季節予報研修テキスト, pp. 35-47, 2001.
- 8) Mylne, K. R., Evans, R. E. and Clark, R. T.: Multi-model and multi-analysis ensembles in quasi-operational medium-range forecasting, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 128, pp. 361-384, 2002.
- 9) Du, J. and Tracton, M. S.: Implementation of a real-time short-range ensemble forecasting system at NCEP: an update, *Proceedings on 9th Conference on Mesoscale Processes*, Vol. 9, pp. 355-356, 2001.
- 10) Dudhia, J.: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Monthly Weather Review*, Vol. 121, pp. 1493-1513, 1993.
- 11) 岐阜地方気象台: 平成22年7月11日~16日の梅雨前線による大雨に関する岐阜県気象速報, 2010.
- 12) Grell, G. A., Dudhia, J., and Stauffer, D. R.: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Tech. Note NCAR/TN-3981STR, 1994.
- 13) 吉野純, 野村俊夫, 安田孝志: 降水量予測の精度向上のための位置誤差修正法に基づくレーダーデータ同化システムの開発, *水工学論文集*, Vol. 53, pp. 379-384, 2009.

(2010. 9. 30受付)