アンサンブルデータを用いた 台風性降雨による洪水リスクシナリオ

辻本 浩史¹・増田 有俊²・本間 基寛²・吉開 朋弘²・真中 朋久³

¹正会員 京都大学特定教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail:tsujimoto.hirofumi.3r@kyoto-u.ac.jp

²正会員 日本気象協会 防災ソリューション事業部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋 3-1-1)

³非会員 アクトウェザー (〒542-0081 大阪市中央区南船場 2-7-16)

アンサンブル予測データと簡易的な洪水規模評価手法を組み合わせ、台風による大雨洪水リスクをシナリオとして提示する手法を検討した。解析には 51 個のメンバーからなる ECMWF アンサンブルデータのうち気圧と雨の予測値を用いた。気圧データから抽出した 51 個の予想台風進路を、経路と速度を考慮したクラスター分析により 3 種類のシナリオに分類した。各台風進路による予測雨量についてはバイアス補正を行い実測値との適合度を高め、洪水リスクは洪水到達時間内の平均降雨強度によって近似的に評価した。本手法を平成 27 年 9 月関東・東北豪雨に適用した。その結果、予測シナリオの一つは実際の降雨分布と洪水規模を良好に予測できていた。また、台風 18 号の進路がわずかに西へシフトするシナリオでは多摩川における既往最大規模の洪水を予測していた。

Key Words: ensemble forecast, typhoon-related rainfall, cluster analysis, flood risk, scenario

1. はじめに

気候変動の影響により将来の北西太平洋においては過去を上回る規模の台風が発生することが予測されている(例えば, Murakami et al.¹⁾)。また、帯状の豪雨降水帯が同じ地域に長時間停滞した平成 27 年 9 月関東・東北豪雨や観測史上初めて東北地方太平洋側に上陸した平成 28 年の台風 10 号のように、過去の経験則が当てはまらないパターンやコースによって記録的な雨をもたらした甚大な被害につながる台風事例も生じている。被害軽減のために台風による大雨と洪水に関する予測情報がますます重要となっている。

予測情報を入力とした洪水予測については、これまで個別の河川やダムを対象として集中型あるいは分布型モデルを用いた様々な研究がなされてきた。特に近年ではアンサンブル数値予報から得られる予測雨量を活用する研究事例が多く、小林ら²は平成 23 年に紀伊半島に記録的な豪雨をもたらした台風 12 号を対象事例として、気象庁非静力学モデルによるアンサンブル気象予測と分布型降雨流出・洪水氾濫モデルを用いた検討を兵庫県佐用川流域で実施している。牛山ら³も同様の検討を平成 23 年 7 月新潟・福島豪雨時の阿賀野川洪水に対して行い、従来の決定論的予測よりも一定の予測精度の改善が

得られることを確かめている。同様の検討は海外においても進められており、Bao et al.⁴は複数の気象機関の数値予報結果を蓄積した THORPEX Interactive Grand Global Ensemble(TIGGE)のデータベースと分布型流出モデルを用いて中国淮河支流 Xixian 流域の予測を行い、数日前からの早期洪水警戒に有効な手法であることを示している。

また、ダム管理の観点からは猪股ら⁵が複数の台風事例を対象としてダム洪水調節操作への適用可能性に関する研究を行い、予測精度によっては現状の本則操作以上に効果的な洪水調節が可能であること、また、予測のばらつき自体も操作指標として利用できる可能性を示している。さらに長期の 1 ヶ月アンサンブル降水予報を用いた研究も主に長期のダム貯水池最適操作等を研究のターゲットとして進められている(例えば、野原ら⁶、中野ら⁷)。

このようにアンサンブル予測と流出予測をカップリングする研究は増えつつあるが、それらの多くは国内に限れば特定事例・流域を対象とした活用方法あるいは適用可能性に関する研究が中心である。平成 23 年の台風 12 号による紀伊半島豪雨や平成 27 年 9 月関東・東北豪雨等、台風による広範囲の大雨に対して 1 週間程度の予測時間をもって複数河川に起こりうる洪水リスクを俯瞰的に評価できる実用的モデルに関する研究は少ない。

近年では計算機能力やデータ通信容量の増加により、国内外の様々な機関で計算された 10 日先程度までのアンサンブル気象予測モデルの結果をリアルタイムで取得することが可能となっている。これらのデータの中から辻本ら⁹⁾はヨーロッパ中期予報センターの Atmospheric model Ensemble 15-day forecast (ECMWF-ENS) データに着目し、複数の台風進路の抽出、各進路の予測雨量の算出方法および進路のグループ化等についての検討を行った。

また、辻本ら⁹⁾は、洪水リスクを直感的に理解する気象コンテンツとして、洪水到達時間内の流域平均雨量を用いて洪水規模を簡易的に推定する手法を提案している。さらに、6 時間先までの予測雨量を組み合わせることで日本全域の洪水リスクポテンシャルを 1km メッシュでリアルタイムに評価できる IFRiP (Index of Flood Risk Potential)を開発し¹⁰⁾、特定顧客向けの防災コンテンツとして実システム上で提供中である。

本研究では ECMWF-ENS データから最大 10 日先までの台風コースと予測雨量に関するシナリオを作成して IFRiP と結合し、複数河川を含む広域な洪水リスクを早期警戒シナリオとして提示する手法を検討した。得られた手法を平成 27 年 9 月関東・東北豪雨に適用し、その有用性を検証した。

2. 解析方法

(1) アンサンブルデータ

世界の気象機関で現業用アンサンブルモデルが運用されているが、本研究では ECMWF-ENS¹¹⁾を使用した。予測時間、空間解像度およびアンサンブルメンバー数等の面で総合的に優れた仕様であるのに加え、日本気象協会が情報提供資料として利用していることから研究成果の実証実験が容易であることが採用の理由である。研究で用いた具体的なデータを表-1 に示す。また、台風の最新位置については気象庁の全般台風情報を使用した。全般台風情報には熱帯低気圧の位置情報も含まれるため、より早期からの警戒情報として利用することができる。

(2) 降雨シナリオの作成

a) 台風予測進路の抽出

ECMWF-ENS 気圧データから以下の手順で 51 メンバーの予測進路を抽出した。抽出イメージを図-1 に示す。

- ① 全般気象情報に記載された時刻と位置を基点とする。
- ② 前時刻および前々時刻の台風中心位置から移動ベクトルを計算し予測進行範囲を限定。
- ③ 移動ベクトル終点を中心とする 100km 内で気圧が最小の格子を予測台風位置とする。
- ④ ②、③を繰り返す

表-1 解析に用いた ECMWF-ENS

項目	内容
初期時刻	12UTC
メンバー数	51
最大予測時間	240hr
時間間隔	3 時間 (～144hr) 6 時間 (144hr～)
格子間隔	0.25°
要素	平均海面気圧(hPa) 雨量(mm)

図-1 台風経路の抽出方法の概念図⁹⁾

抽出事例として 2015 年 5 月 9 日 21 時における台風 6 号の位置と ECMWF-ENS データから抽出された 51 メンバーの台風予測進路を図-2 に示す。北緯 20 度付近で転向した後の 48 時間後 11 日 21 時（薄緑色）には台湾の東方海上に進み、72 時間後の 12 日 21 時（オレンジ）には予測位置が進行方向に沿って大きく広がる傾向を見せるものの、紀伊半島から東日本に接近・上陸する可能性を示している。実際の台風 6 号（黒実線）は 12 日 18 時に四国沖で温帯低気圧となり、その後東日本を進んだ。ECMWF-ENS と気象庁の台風全般情報を用いて作成された台風予測進路が、転向位置を含む経路および予測のばらつきを良好に表現していることが判る。

b) クラスタ分析による分類

台風の接近シナリオを複数作成するために、抽出された 51 メンバーの台風予測進路をクラスタ分析により複数シナリオに分類した。台風性降雨の場合には、コースとともに進行速度が総雨量に大きく影響することが特徴であり、分類する場合には単なるコースのみではなく速度も考慮した分類が重要となる。本研究では非階層的クラスタ分析手法の一つである K-means 法を応用し、

図-2 抽出された51個の台風予測進路の例

各時刻の台風中心位置の距離差（非類似度）で定義した評価関数が最小となるように台風進路を分類した。分類数についてはその数を1～4パターンとした評価関数値の変化傾向とシナリオとして選択しやすい（多すぎない）数などを考慮して本研究では3パターンとした⁸⁾。

分類結果の例として2015年台風15号の例を示す。台風15号は8月19日21時の段階で非常に強い勢力（中心気圧：940hPa，中心付近の最大風速45m/s）を保ち西に進んでいた。この時点におけるECMWF-ENSの予測結果から抽出された51個の台風予測進路をクラスター分析により3つのシナリオに分類した結果を図-3に示す。

図中の確率は3シナリオに含まれる51メンバーの割合である。3つのシナリオには台湾とフィリピン間で転向した後には先島諸島を4日後の8月23日21時頃通過するまで大きな違いは見られない。その後、沖縄付近でコースが大きく2つに別れ、シナリオ1，2は九州接近・上陸シナリオ、シナリオ3は南岸を関東沖に進む予測となっている。九州に接近・上陸するシナリオ1，2についても進行速度には違いが見られ、速度が速いシナリオ2では8月25日21時頃に九州中央付近に到達しているのに対し、遅いシナリオ1では8月26日21時頃に長崎半島に最接近する予測となっている。実際の台風15号はシナリオ1，2の経路に沿って25日6時過ぎに熊本県荒尾市付近に上陸した。シナリオに比べて上陸時刻が早い結果となっているが上陸の6日前時点における事前のシナリオ情報としては十分有効なものと思われる。

c) 雨量のバイアス補正

ECMWF-ENSに限らず全ての数値予報モデルには誤差があり、特に、大雨に関しては積雲対流のモデル化や実地形をモデル化する際の平滑化等により過少予測傾向と

図-3 2015年台風15号の台風進路シナリオ（初期時刻：2015年8月19日21時）

図-4 補正後予測雨量（左）とレーダアメダス解析雨量（右）（初期時刻：2015年8月19日21時，168時間積算雨量）

なることが多い。本研究では、気象庁のレーダアメダス解析雨量とECMWF-ENS予測雨量について両者の雨量階級値出現頻度が同程度となるように頻度バイアス補正を行った⁸⁾。バイアス補正の係数は、2013年台風18号、2014年台風11号、2014年台風12号を用いて算出した。バイアス補正係数は雨量階級によって多少の違いはあるが概ね1.5～2.0となっている。補正の効果を示す一例として、図-3に示されたシナリオ1に含まれる20個の各アンサンブルメンバーに頻度バイアス補正を行い、その結果を算術平均した値をレーダアメダス解析雨量と比較した（図-4）。

紀伊半島南東斜面での予測雨量が過少予測となっているものの、九州の西を北上する台風によって宮崎県で200mm以上、九州、中国地方西部および四国の太平洋側で100mm以上の雨が予測されており、この予測雨量分布はレーダアメダス解析雨量に示された分布形状と概ね一致している。予測事例を蓄積したうえでの定量的な評価は今後の課題であるが上陸6日前時点での大雨シナリオ情報としては十分有効なものと思われる。

図-7 2015 年台風 18 号の台風進路シナリオ（初期時刻：2015 年 9 月 7 日 21 時）

図-8 シナリオ 3 に含まれるメンバー平均の予測雨量分布図（左）とレーダーアメダス解析雨量分布図（右）（初期時刻：2015 年 9 月 7 日 21 時，96 時間積算雨量）

の分布を図-8 に示す。東海地方から関東北部にかけて 300mm～500mm の降雨域が広がっており実際の降雨分布特性と良く一致している。一例としてシナリオ 3 に含まれるメンバーの中で総雨量が最大となるメンバーを用いて洪水リスク指数を計算し、2015 年 8 月までの約 10 年間の DB と比較した履歴順位分布を図-9 に示す。鬼怒川、小貝川、利根川、那賀川など、関東平野中央部から東部の主要河川で過去 10 年間で最大規模の洪水リスクとなることが予測されている。

(2) 最大降雨・洪水シナリオ

台風が発生した 9 月 7 日 21 時点では図-7 に示すように進路が僅かに西にシフトするシナリオも考えられた。ここではそれらの中から最も予測雨量が多いアンサンブルメンバーの結果を用いて洪水リスクを検討した。最大降雨シナリオによる予測雨量分布を図-10 に示す。進路が西にシフトしたことにより関東地方では神奈川県、東京都および埼玉県に 4 日間で 500mm 以上という未曾有の大雨シナリオとなっている。このシナリオを入力として洪水リスクの分布を計算した結果を図-11 に示す。利

図-9 シナリオ 3 の最大降雨シナリオを入力とした洪水リスク指数分布図（初期時刻：2015 年 9 月 7 日 21 時）

図-10 最大降雨シナリオの 96 時間積算予測雨量分布図（初期時刻：2015 年 9 月 7 日 21 時）

図-11 多摩川最大降雨シナリオを入力とした洪水リスク指数分布図（初期時刻：2015 年 9 月 7 日 21 時）

根川、荒川、多摩川などで高い洪水リスクが予測されている。特に、中上流部で大きな洪水調節が見込めない多摩川下流部における洪水リスクシナリオは深刻なものであり、石原地点で計画高水位を超えた平成 19 年 9 月の台風 9 号による洪水を上回る結果となっている。対象事例では台風が比較的日本の近海で発生したために洪水発

生までの余裕時間は約2日であるが、越流・氾濫の可能性をも想定した早期のリスクシナリオ情報として十分に活用できると思われる。

4. 結論

本研究では、10日先までのアンサンブル予測結果を用いて複数の台風進路・速度と降雨の予測シナリオを作成し、日本全域を対象とした1kmメッシュの洪水リスクポテンシャル評価モデルとカップリングさせることで台風性降雨・洪水リスクを予測する手法を開発した。用いた洪水リスク評価手法は極めて簡易的なものであるものの、平成27年9月関東・東北豪雨に適用した結果、広範囲の洪水リスクを従来よりも早期に複数の警戒シナリオとして提示できることが確かめられた。検討した手法の一部はすでに予測情報提供業務として実運用されており、平成28年台風10号、台風16号等の事例を含めて手法の検証を続けていく予定である。また、次年度以降、台風発生時に研究成果をHP等で公開し、河川管理者のみならずメディアや共助・自助の主体となる一般市民を含めた幅広い情報受け手側の評価もフィードバックしながら「気象・水文リスク情報」のあるべき姿を追求していくことも重要である。

参考文献

- 1) Murakami, H., Wang, Y., Yoshimura, H., Mizuta, R., Sugi, M., Shindo, E., Adachi, Y., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Ose, T., and Kitou, A.: Future Changes in tropical cyclone activity predicted by the new high-resolution MRI-AGCM, *Journal of Climate*, 25, 3237–3260, 2012.
- 2) 小林健一郎, 大塚成徳, 寶 馨, 折口征二, 斉藤和雄: 中小河川流域における豪雨・洪水のアンサンブル予測, 土木学会論文集 B1(水工学), Vo.69, pp.1597–1602, 2013.
- 3) 牛山朋来, 佐山敬洋, 岩見洋一: 平成23年7月新潟・福島豪雨に伴う阿賀野川洪水のアンサンブル予測実験, 土木学会論文集 B1(水工学), Vo.72, pp.157–162, 2016.
- 4) H.-J. Bao, L.-N. Zhao, Y. He, Z.-J. Li, F. Wetterhall, H. L. Cloke, F. Pappenberger and D. Manful: Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast, *Advances in Geosciences*, 29, 61–67, 2011.
- 5) 猪股広典, 川崎将生, 後藤祐輔, 増田有俊, 荒木千博, 荒木孝之: アンサンブル予測雨量のダム洪水調節操作への適用に関する研究, 水文・水資源学会誌, 第28巻, pp.278–290, 2015.
- 6) 野原大督, 坪井亜美, 堀智晴: 長期貯水池最適操作へのアンサンブル降水予報の活用方法に関する基礎的検討, 水工学論文集, 第54巻, pp.253–258, 2010.
- 7) 中野俊夫, 松原隆之, 齊藤洋一, 是永司, 小笹将博: 天竜川流域におけるアンサンブル降雨予測の利用方法に関する基礎的検討, 水工学論文集 B1(水工学), Vol.71, pp.1339–1344, 2015.
- 8) 辻本浩史, 本間基寛, 増田有俊, 吉開朋弘, 井上実: アンサンブル予報を用いた台風性降雨シナリオに関する検討, 京都大学防災研究所年報, 第59号B, pp.367–375, 2016.
- 9) 辻本浩史, 後藤祐輔, 石井琢哉: 洪水リスクポテンシャル情報の開発と新潟・福井洪水災害への適用, 水工学論文集, 第49巻, pp.481–486, 2005.
- 10) 辻本浩史, 後藤祐輔, 竹下航, 田中創: T0514による豪雨災害時における気象情報の有効性について, 水工学論文集, 第50巻, pp.559–564, 2006.
- 11) ECMWF: ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) HP, <http://www.ecmwf.int/>, (参照2016-03-22).
- 12) 国土交通省: 関東地方の河川情報 HP, https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nihon_kawa/map_83.html, (参照2016-11-15).
- 13) 中小河川計画検討会編: 中小河川計画の手引き(案), 財団法人国土開発技術センター, P.241, 1999.

(2016.9.30 受付)

FLOOD RISK SCENARIO FOR TYPHOON-RELATED RAINFALL USING ENSEMBLE FORECAST DATASET

Hirofumi TSUJIMOTO, Aritoshi MASUDA, Motohiro HONMA,
Tomohiro YOSHIKAI and Tomohisa MANAKA

We propose new method to predict the flood risk for typhoon-related rainfall using ensemble forecast data and conceptual flood scale estimation model. 51 Extracted tracks from the pressure data were classified to three scenarios using cluster analysis in consideration of the direction as well as the speed of typhoon. To improve the agreement with observed data, we corrected the forecast precipitation in consideration of the frequency distribution. Flood risk was approximately evaluated by the average precipitation intensity within the flood concentration time. We applied this method to Kanto-Tohoku heavy rainfall by typhoon No.18 in 2015. The result shows that one of scenarios is good agreement with the observed rainfall distribution and flood risk in Kinugawa basin. Furthermore, it was found that the flood risk in Tamagawa basin would be serious class in the case that typhoon track slightly shifted to the west.