アンサンブルシミュレーションと 擬似温暖化手法による 特定の気象イベントの将来変化の推定

EVALUATION OF FUTURE VARIATIONS OF A PARTICULAR WEATHER EVENT BY ENSEMBLE-PSEUDO GLOBAL WARMING SIMULATION

谷口 健司¹
Kenji TANIGUCHI

¹正会員 博（工） 金沢大学理工研究域 環境デザイン学系 准教授（〒920-1192 金沢市角間町）

In a flood-control planning in Japan, a high-water level is estimated from selected target rainfall events. To draw up adaptive flood control measures for future climate change, information about possible maximum rainfall are indispensable. Climatological or statistical information about precipitation are not enough for that purpose. In this study, a method to evaluate future variations of a particular extreme weather event is developed by combining ensemble simulation and pseudo global warming method. Perturbations for ensemble members are generated from simulation results by Lagged Average Forecasting method. The perturbations are scaled up/down and added to the original conditions, and ensemble members are prepared. Ensemble technique enables to examine whether differences between the present and future simulations are caused by global warming or chaotic behaviors from perturbation. Probability density curves from ensemble results give clearer view of future variations of a weather event.

Key Words : *climate change, numerical simulation, pseudo global warming method, ensemble simulation, tropical cyclone*

1. はじめに

我が国の治水計画は対象降水の選定、流出解析、基本高水の決定、計画高水流量の決定、という流れで整備目標が決定される¹⁾。対象降水の選定においては流域の重要度等に応じて確率年が決定され、それに応じた過去の気象事例が選定されるが、必要に応じて降水量等の引き伸ばしが行われる。地球温暖化に関する研究が進展する中、将来における大雨の頻度増加やスーパー台風と呼ばれる従来の階級区分を上回る強さを持つ台風の発生等が指摘されており²⁾、こうした気候変化下においては、過去の降水観測データから算出される確率降雨による治水計画では不十分となる可能性がある。

国土交通省は平成27年1月に「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」において、大規模水害への対応等に関する取りまとめを公表したが、最大クラス洪水の評価手法については明示されていない。一方、国交省による「想定最大外力（洪水、内水）の設定に係る技術

検討会」では既往最大の降雨量と年超過確率1/1,000程度の降雨量を基に計画することが提案されている³⁾。しかし、気候変化下における極端事象が年超過確率1/1,000程度の降雨量を上回り、想定以上の外力が発生する可能性もあり、そうした可能性を加味した治水計画の策定のためには、温暖化予測結果を有効に活用した計画論の構築が不可欠と考えられる。

一方、地球温暖化に関する影響評価研究により、平均的な気候場の変化や豪雨の発生頻度等の変化に関する知見は蓄積されてきたが、こうした情報は上述の治水計画策定手法に直接活用することは難しく、特定の気象イベントに基づく将来における極端な気象イベント時の降水情報が不可欠である。

本研究では温暖化予測結果を活用した特定の気象イベントの将来変化の可能性を評価する手法の構築を目的とし、2013年に発生した台風18号（T1318）を例に、数値気象モデルを用いて、アンサンブルシミュレーションと擬似温暖化手法を組み合わせた実験を行う。

2. 研究方法

(1) モデル及びデータ

本研究ではシミュレーションを実施する数値気象モデルとして、米国大気研究所を中心に開発が進められている非静力領域気象モデルであるWeather Research and Forecasting (WRF) ⁴⁾モデルを用いる。

WRFを用いた再現シミュレーションの初期値、境界条件には気象庁長期再解析データ (JRA55) ⁵⁾及びNOAA 1/4 degree SSTデータ⁶⁾を用いる。後述する擬似温暖化データの作成には気象庁気象研究所が開発したMRI-CGCM3、及び東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構が開発したMIROC5、MIROC-ESMによる3つの温暖化予測結果を用いる。なお、本研究では将来気候として、産業革命前と比較して今世紀末の放射強制力が8.5W/m²上昇するRCP8.5シナリオによる温暖化予測結果を用いる。

(2) 擬似温暖化データの作成

本研究では擬似温暖化手法⁷⁾により作成した大気場を初期値・境界条件とした気象シミュレーションを行い、特定の気象イベントの将来気候における変化の可能性について検討する。擬似温暖化データは、全球気候モデルによる現在気候と将来気候の間での変化量を、現在気候を精度よく再現したデータにアノマリとして加えて作成する⁷⁾。アノマリは2090～2100年の各月平均値と1990～2000年の各月平均値の差として作成する。アノマリを加えて更新する変数は海面校正気圧、気温、地表面温度、比湿、風速、ジオポテンシャル高度、海面水温である。なお、MRI-CGCM3、MIROC5及びMIROC-ESMの初期時刻 (2013年9月13日00UTC) における地上2m気温のアノマリの対象領域 (後述するシミュレーションの親領域) での平均値はそれぞれ3.9K、4.4 K、5.8Kである。

(3) アンサンブルシミュレーションの実施

本研究では将来気候における気象現象を評価するため、上述の擬似温暖化手法により作成した大気場を初期値・境界条件とした気象シミュレーションを行う。擬似温暖化手法は数値気象モデルによる力学的ダウンスケーリングと合わせて用いられ、10～数十年程度の期間を対象として、詳細な将来の気候情報の作成に用いられてきたが、特定の気象イベントを対象とした研究にも用いられている⁸⁾。しかし、特定の気象イベントに関して現在及び将来気候について単一のシミュレーションを行うのみでは、両者の違いが温暖化の影響によるものか、両者の初期値におけるわずかな差に基づくカオス的な挙動によるものかの評価が困難である。Taniguchi and Sho (2015)⁹⁾は2000年東海豪雨を対象として、ラグ平均予報法¹⁰⁾によるアンサンブルシミュレーションと擬似温暖化手法を組み合わせ

図-1 アンサンブルメンバー作成のイメージ。

表-1 摂動作成のためのラグ平均予報法を用いたシミュレーションの概要

作成する状態	開始時刻	摂動作成時刻	終了時刻
X_1	9月13日00UTC	9月14日00UTC	9月16日12UTC
X_2	9月13日06UTC		
X_3	9月13日12UTC		

せて現在及び将来気候について複数のシミュレーションを行い、両者の差がアンサンブル間の摂動に伴うものか、温暖化の影響であるかについて評価した。

ラグ平均予報法は開始時刻をずらした複数のシミュレーションを行う簡易なアンサンブル手法であるが、多くのアンサンブルメンバーによるシミュレーションを実行する場合には、シミュレーション時間に隔たりができてしまい、再現精度に差が生じたり、シミュレーション時間が余分に長くなってしまふ。アンサンブルシミュレーションにおける初期摂動の作成方法のひとつであるセルフブリーディング法では、コントロールランと摂動を与えたランの差を初期摂動として活用する¹¹⁾。

本研究ではこの手法を応用し、ラグ平均予報法により小数のアンサンブルランを実行し、そのメンバー間での差を基に摂動を発生させ、新たなアンサンブルメンバーを作成することとした。まず、3つの異なる時刻からWRFによるシミュレーションを開始し、ある時刻で中断し、各シミュレーションから状態 X_1 , X_2 , X_3 を得る。次に、 X_2 と X_1 の差による摂動 ΔX_2 , X_3 と X_1 の差による摂動 ΔX_3 を作成する。これらから、任意の状態 X_n を以下のように作成する (図-1)。

$$X_n = X_1 + \alpha \Delta X_2 + \beta \Delta X_3 \cdots (1)$$

ここで、 α 及び β は ΔX_2 と ΔX_3 のスケールファクターとする。 α , β を変化させることで、 X_1 , ΔX_2 , ΔX_3 が

表-2 アンサンブルメンバー作成時の摂動の
スケールファクター α , β の組み合わせ

(α, β)	(α, β)	(α, β)	(α, β)
$(-1/3, 1/3)$	$(0, 2/3)$	$(1/3, 2/3)$	$(2/3, 1/3)$
$(-1/3, 2/3)$	$(1/3, -1/3)$	$(1/3, 1)$	$(2/3, 2/3)$
$(-1/3, 1)$	$(1/3, 0)$	$(2/3, -1/3)$	$(1, -1/3)$
$(0, 1/3)$	$(1/3, 1/3)$	$(2/3, 0)$	$(1, 1/3)$

図-2 WRFによるシミュレーション領域. 緑が親領域, 橙色が子領域を現す.

表-3 WRFにおける各種設定等

モデルバージョン	3.5.1
空間解像度	30km(親領域), 10km(子領域)
積分間隔	120秒(親領域), 40秒(子領域)
雲微物理スキーム	New Thompson scheme
積雲対流スキーム	Grell-Freitas scheme
放射スキーム	CAM scheme
地表面スキーム	Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino
陸面モデル	Noah Land Surface Model
境界層	Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino 2.5
データ同化	スペクトルナッジング (親領域のみ)

ら様々な状態 X_m が作成ができる. 本研究では, ラグ平均予報法により表-1に示す3つのアンサンブルランを実施した後, 同じく表-1に示した摂動作成時刻において, 式(1)により新たなアンサンブルメンバーを作成したのち, シミュレーションを再開する. ここでは, $1/3$ を単位として (α, β) を表-2のように変化させ, $X_1 \sim X_3$ の周辺に新たに16個のアンサンブルメンバーを作成し, $X_1 \sim X_3$ と合わせて, 計19個のアンサンブルシミュレーションを実施する. なお, JRA55を初期値・境界条件とした再現実験のアンサンブルをCTL-Ens, MRI-CGCM3, MIROC5及びMIROC-ESMから作成したアノマリを与えた擬似温暖化結果によるものをMRI-Ens, MIROC-Ens, ESM-Ensと標記する.

シミュレーションは2段階ネスティングを適用して行うこととし, 親領域はユーラシア東部から太平洋西部を含む領域, 子領域は本州全域及び九州地方を含む領域とする(図-2). 各領域の空間解像度は30km, 10kmとす

図-3 2013年9月13日00UTC~9月16日12UTCまでの総降水量分布 (mm). (上段) レーダアメダス解析雨量, (下段) CTL-Ensのうち9月13日00UTCから開始したシミュレーションの結果.

る. また, WRFにおける各種設定を表-3に示す.

3. 再現シミュレーションの結果

図-3は, CTL-Ensのうち, ラグ平均予報法による3つのシミュレーションのひとつである2013年9月13日00UTCから開始したものと, レーダアメダス解析雨量(RAP)による9月13日00UTCから9月16日12UTCまでの総降水量である. RAPにおいて紀伊半島から日本海側及び静岡県から神奈川県周辺に広がる雨域については, シミュレーション結果においても再現されている. 総降水量については地域ごとに差が見られるが, 紀伊半島及び静岡県における大雨は再現されている. 一方, 関東北部及び東北地方では降水が過大となっている.

図-4aは気象庁によるT1318の経路と, CTL-Ensの各メンバーにおける3時間毎の最低気圧を与えた格子点から推定した経路を示したものである. 海上から愛知県沖にいたる経路では比較的類似した経路をたどっているが, 上陸後の経路についてはメンバー間でのばらつきが大きく, 実際に比べてやや東よりの経路をたどっている.

総降水量, 台風の経路とともに観測結果との差がみられるが, 概ねT1318の特徴は捉えているものと考えられる.

4. 将来気候における台風特性の変化

(1) 台風経路及び中心気圧

各擬似温暖化結果に基づくアンサンブルシミュレーションの結果を図-4b~dに示す. いずれの結果においても三重県沖から関東地方沿岸あたりで経路がとぎれている. これは, 3つの将来気候における台風の移動速度が実際の結果及びCTL-Ensに比べて小さかったためである. MRI-Ens及びMIROC-ESMでは実際に近い経路をたどっているが, MIROC-Ensについては経路が西側に寄ってお

図-4 各アンサンブルシミュレーションにおける3時間ごとの最低気圧から推定した台風経路（緑）と気象庁によるT1318の経路（赤），及びシミュレーション期間を9月18日18UTCまで延長したラグ平均予報法による3つのケースでの経路（青）．ベクトルは擬似温暖化データ作成の際に与えた500hPa面での風の偏差．

り，経路ごとのばらつきもやや大きい．一方，ラグ平均予報法による3つのケースについて計算期間を9月18日18UTCまで延長した結果，将来気候ではやや東進した後西進する様子がみられた．また，これら3つのケースの平均中心気圧（図-5）をみると，将来気候では9月16日12UTC頃から中心気圧が高くなり，台風の勢力が弱まったのち西進していることがわかる．

擬似温暖化データ作成の際に与えた500hPa面の風のアンノマリ（図-4b～d）をみると，いずれの将来気候においても西向きの偏差がみられ，一般流の変化により台風の経路変化や移動速度の低下が生じたものと考えられる．

(2) 総降水量分布

図-6はWRFによる子領域における各将来気候アンサンブルとCTL-Ensの平均総降水量の差である．図-4に示したように3つの将来気候アンサンブルにおいては台風の進行が遅かったため，2013年9月16日12UTCまでの総降水量は，特に関東北部から東北地方にかけて顕著な減少がみられる．また，シミュレーション期間を延長した場合にも，台風が弱まり西進したため同地域での降水減少が見られた（図は略）．MRI-Ensにおいては海洋上及び東海地方の周辺で増加している一方，関西から北陸地方で減少している．MIROC-Ensについては他の2つの将来気候アンサンブルに比べて経路がやや西よりのなったためか，経路の西側領域で顕著な降水増加がみられる．

図-5 各アンサンブルシミュレーションにおけるラグ平均予報法による3つのケースの平均中心気圧．将来気候についてはシミュレーション期間を9月18日18UTCまで延長した結果．

図-6 各将来気候アンサンブルシミュレーションにおける総降水量の平均値とCTL-Ensとの差（mm）．赤色が将来気候において増加，青色が減少を表す．

一方，四国・関西以北については顕著な減少がみられる．ESM-Ensでは，MRI-Ensと同様，海洋上から東海地方で増加しており，増加量もMRI-Ensよりやや大きい．四国沖でやや減少しているが，これは降水域の移動に伴うものと考えられる．

(3) 最大総降水量及び最大時間降水量

図-7は各シミュレーションにおける陸域での総降水量の最大値及び時間降水量の最大値を抽出しプロットしたものである．各アンサンブルについては平均値も示した．

MRI-Ensは最大総降水量，最大時間降水量ともに平均値はCTL-Ensに比べてやや大きくなっているが，両アンサンブルにおいて多くのメンバーで分布範囲が重複して

図-7 各アンサンブルシミュレーションにおける陸域での最大総降水量と最大時間降水量の散布図。各メンバーによる結果と平均値を示す。

いる。一方、MIROC-EnsではCTL-Ensに比べて最大総降水量、最大時間降水量ともに小さくなっている。ただし、MIROC-Ensについては図-4にみたように台風経路が大きく変化しているため、比較には注意が必要である。ESM-Ensでは最大総降水量、最大時間降水量の平均値ともに顕著な増加がみられる。また、各最小値がCTL-Ensの最大値付近に分布している。

図-8は陸域での最大総降水量別の発生頻度と、それが正規分布に従うと仮定して求めた確率密度分布である。図-7の結果から想定されるようにMRI-EnsとCTL-Ensの確率分布の差は小さい。MIROC-Ensではやや小さい方に分布がシフトしている。ESM-Ensは分布曲線のCTL-Ensからのずれが大きく、重複する範囲も小さい。重複部分はアンサンブルメンバー間の摂動によりいずれの気候下においても生じ得るが、重複していない範囲については温暖化の影響によるものと捉えることができる。ESM-Ensについていえば、現在気候で生じ得ない程度の大雨が将来気候においては起こり得ることを示唆している。

図-9は最大時間降水量別の発生頻度と、それが正規分布に従うと仮定して求めた確率密度分布である。MRI-Ensの分布曲線の形状はCTL-Ensに類似しているが、やや大きくなる傾向がある。MIROC-Ensではメンバー間での最大時間降水量のばらつきが大きいいため、分布範囲もCTL-Ensに比べてやや広がっているが、ピークの出現はCTL-Ensと同程度の位置にみられる。ESM-Ensについてもメンバー間での最大時間降水量のばらつきが大きいいため分布範囲も広がっている。また、CTL-Ensから大

図-8 各アンサンブルシミュレーションの陸域での最大総降水量の確率密度分布と発生頻度。

図-9 各アンサンブルシミュレーションの陸域での最大時間降水量の確率密度分布と発生頻度。

きくずれており、重複も少ない。ESM-Ensで予測されるような気候となった場合には、温暖化の影響で台風特性が極端に変化し得ることを示唆している。

(4) 最大風速の分布

台風に伴う強い風は高波や高潮の原因ともなり、沿岸域の低平地では浸水被害の原因となり得るものである。図-10はCTL-Ensのメンバー間で平均した最大風速の分布及び、それらの各将来気候アンサンブルにおける値との差を示したものである。最大風速の差については図-4に示した経路も合わせて示してある。

CTL-Ensでは台風の経路に沿って風の強い領域が広がっている。MRI-Ens及びMIROC-Ensについては台風の移動速度が遅いことや、経路の違いのために東北地方の沿岸域で最大風速が小さくなっているが、各将来気候の経路の周辺で風が強まっている。ESM-Ensにおいても、経路上で最大風速が強くなっており、将来気候においては台風に伴う風が強まる可能性は高いと考えられる。

5. まとめ

本研究では2013年に発生した台風18号を例として、擬似温暖化手法と数値気象モデルによるアンサンブルシミュレーションを組み合わせることにより、特定の気象イベントの将来気候における変化を検討した。

図-10 a) CTL-Ensの期間最大風速のメンバー間の平均値の分布, b) ~d) その各将来気候アンサンブルの平均値とCTL-Ensとの差. 赤色が将来気候において増加, 青色が減少を表す. 単位はいずれもm/s.

将来において太平洋上でT1318と類似した台風が発生した際の降水分布の変化は、擬似温暖化結果の間でばらつきがあり、これは経路にも大きく依存している。本手法を活用し、実際に発生した気象イベントと類似の気象場が将来気候において形成された場合に特定の流域での洪水流出の変化を検討する際には、降水分布が元のイベントと大きく異なる結果等については検討対象から除外する必要も生じ得ると考えられる。

また、アンサンブルシミュレーションから求められる確率密度分布により、将来気候に関するシミュレーションにおいて生じた変化が温暖化に起因するものか、摂動により現在気候においても生じ得るものかを推定できるとともに、将来気候において発生確率が高い降水量等を推定することが可能であり、治水計画や温暖化適応策策定に有用な情報としての活用が期待される。本研究では3つの擬似温暖化結果の間で傾向に大きな差がみられたが、多くの温暖化予測モデルや複数の温暖化シナリオによる結果を活用することにより、不確実性を考慮しつつ、発生し得る結果を幅広く評価することが可能となる。本研究では確率密度分布を求める際に正規分布を仮定したが、個別の適用においては最適な分布関数の検討も不可欠と考えられる。

本研究では降水及び風速の変化について示したが、それらを入力データとした流出解析や波浪推算を実施することにより、将来において類似の気象現象が生じた際の河川流量の変化の可能性や、高波及び高潮の評価が可能となる。今後、そうした展開と計画論への応用の方法について検討する必要がある。

謝辞： 利用したデータセットは気象庁55年長期再解析(JRA-55) プロジェクトにより作成されたものであり、国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」：データ統合・解析システム(DIAS)の枠組みの下で収集・提供されたものである。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：国土交通省河川砂防技術基準同解説 計画編，技報堂出版，2008.
- 2) 気象庁：気候変動に関する政府間パネル 第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約，2015.
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課河川計画課河川計画調整室，下水道部流域管理官：想定最大外力（洪水，内水）の設定について，河川，No.828，pp.10-13，2015.
- 4) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 2008.
- 5) Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Morioka, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. J. Meteor. Soc. Japan, Vol.93, pp.5-48, doi:10.2151/jmsj.2015-001, 2015.
- 6) Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey and M. G. Schlax: Daily High-resolution Blended Analyses for sea surface temperature. J. Climate, 20, pp. 5473-5496, 2007.
- 7) 佐藤智徳：擬似温暖化実験，天気，2010.
- 8) Hill, K. A. and Lackmann G. M.: The impact of future climate change on TC intensity and structure: A downscaling approach, J. Clim., Vol. 24, pp.4644-4661, 2011.
- 9) Taniguchi K. and Sho K.: Application of the pseudo global warming dynamic downscaling method to the Tokai Heavy Rain in 2000, J. Meteor. Soc. Japan, Vol.93, pp.551-570, 2015.
- 10) Hoffman R. N. and E. Kalnay: Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting, Tellus A, Vol. 35, pp.110-118, 1983.
- 11) 気象庁予報部：アンサンブル技術の短期・中期予報への利用～激しい気象現象の予測向上を目指して～，気象業務支援センター，2006.