MRI-AGCM3.2H アンサンブル実験を用いた 高潮の将来変化予測に関する研究

安田 誠宏¹・山本 耀介²・森 信人³・間瀬 肇⁴

¹正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail: yasuda-t@kansai-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: yamamoto.yosuke.34m@st.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: mori.nobuhito.8a@kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: mase.hajime.5c@kyoto-u.ac.jp

気候変動に伴う高潮浸水被害の特性変化が想定される中、不確実性を考慮した高潮の長期変化予測を行うことが重要となっている。本研究では、水平解像度60km全球気候モデル (MRI-AGCM3.2H, 以下GCM60) を用いたアンサンブル気候変動予測実験の出力にバイアス補正を適用し、これを用いて高潮計算を行い、気候実験条件が高潮予測結果に及ぼす影響を検討するとともに、不確実性を考慮した高潮のアンサンブル将来変化予測を行った。主な結果として、気候予測実験の初期値の相違に伴う台風経路の変化によって高潮の空間分布は変化すること、特に雲物理スキームによる影響が大きいこと、高潮将来変化量にはSST依存性がみられ、アンサンブルメンバーによって得られる結果にばらつきはあるものの、全体の傾向として高潮の上昇は東へシフトする傾向が見られたことを示した。

Key Words : storm surge, future pojection, ensemble, cloud scheme, sea surface temprature

1. 序 論

気候変動に伴う台風特性の変化について多くの研究がなされており、IPCC AR5¹⁾においては、気候システムの温暖化は疑う余地が無く、個々の熱帯低気圧の強度は増大し、熱帯低気圧最大風速及び降水量も増大する可能性がある²⁾と報告されている。台風特性の変化に伴った高潮の災害リスクが高まる中、地球温暖化シナリオ下における高潮偏差の変化を定量化し、将来予測を行うことは、沿岸部の減災において重要な課題である。近年では、気候モデルの高解像度化およびダウンスケーリング研究の推進により、高精度の気候再現実験や将来予測が行われ、その出力を用いた高潮計算が行われているものの、依然として台風イベントの予測数が不足しているため、不確実性の評価には至っていない。

日本国内における温暖化の影響及び適応策に関する影響評価研究プロジェクトでは、それらの中では比較的低解像度である GCM60 を用いたアンサンブル実験がこれまで行われているが、GCM60 では気象擾乱の再現精度は十分とはいえず、台風の再現性も不十分であるためモデルバイアスが存在し、この扱いが問題となっている。

安田ら³⁾は、水平解像度 5km 非静力学モデル (以下、RCM5) を真値と見なした、RCM5-GCM60 間のモデル間

バイアスに関する補正手法を開発し、GCM60 出力に対して補正を行った後の風速および気圧データを駆動力とした高潮計算によって、将来の高潮予測値を示している。このバイアス補正手法によって、GCM60 による出力を用いても、RCM5 による出力を用いた際と同程度に精緻な将来高潮偏差の表現が可能となった。しかし、この先行研究では、台風のサンプル数の不足により、得られる高潮偏差は対象領域における数個の強い台風の通過有無に大きく依存する傾向にあり、特に、再現年数の長い確率値については、ひとつの大きな台風によって将来高潮偏差が左右されるという課題を残した。本研究では、GCM60 を用いた雲物理スキーム、海面水温 (SST: Sea Surface Temperature)、予測計算初期値に対する多数のアンサンブル実験結果に対して、バイアス補正手法を適用し、扱う台風のケース数を増やすことによってサンプル数不足を解消し、不確実性を考慮した高潮将来予測を行うことを目的とする。また、雲物理スキーム、SST および初期値の将来高潮偏差に及ぼす影響について考察する。

2. 使用データの概要

温暖化予測の信頼性・確実性の定量化のために、設定を変えた複数のアンサンブル気候予測実験が行われてい

表-1 各アンサンブル実験条件とのケースコード

Initial condition			Kakushin (i1)		Sousei (i2)	
Cumulus scheme			Yoshimura	Kain-Fritsch	Yoshimura	Kain-Fritsch
SST	Present (1979-2003)		YS_P_i1	KF_P_i1	YS_P_i2	KF_P_i2
	Future (2075-2099)	cluster0	YS_Fc0_i1	KF_Fc0_i1	YS_Fc0_i2	KF_Fc0_i2
		cluster1	YS_Fc1_i1	KF_Fc1_i1	YS_Fc1_i2	KF_Fc1_i2
		cluster2	YS_Fc2_i1	KF_Fc2_i1	YS_Fc2_i2	KF_Fc2_i2
		cluster3	YS_Fc3_i1	KF_Fc3_i1	YS_Fc3_i2	KF_Fc3_i2

る。文部科学省 21 世紀気候変動予測革新プログラム (2007-2012) では、IPCC AR4 の SRES A1B シナリオ下での GCM60 を用いた現在及び将来気候に対するアンサンブル気候変動予測実験が行われ、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム (2012-2016) では、ほぼ同じ GCM 60 を用いて、このアンサンブル実験とは異なる大気条件を初期値とし、異なる SST を与えた気候再現実験も行われている。

革新プログラムでは、GCM60 に与える外力の SST として、現在気候には英国気象局ハドレーセンターの観測値 (HadlSST)、将来気候には SST の将来空間変化に着目し、CMIP3 に登録された全 18 モデルによる出力結果から将来 SST 変化傾向を 3 つにクラスター分析し、それぞれの平均をとったもの (cluster 1~3)、およびそれらすべての平均をとったもの (cluster 0) の合計 4 種類について、将来の SST パターンが考慮されている。創生プログラムでは、革新プログラムの大気の初期値 (以下、i1) とは異なる値 (以下、i2) を用い、CMIP5 に登録された全 28 モデルによる出力を同様にクラスター分類した SST を与えている。両実験ともに、雲物理スキームとして、Kain-Fritsch convection scheme (KF)³⁾、Yoshimura cumulus scheme (YS)⁴⁾、Arakawa-Schubert cumulus scheme (AS)⁵⁾ の 3 種類を用いた気候再現実験がなされた。Mizuta ら⁶⁾によると、YS スキームによるシミュレーション結果は、AS スキームによるそれと比べ、より現実的であるという報告がされており、本研究においても、AS スキームを用いた熱帯低気圧発生数は極端に少ないことを確認している。したがって、本研究では AS スキームによる出力を用いず、YS スキーム及び KF スキームを用いた出力結果のみについて解析を行う。用いた現在及び将来に関する GCM60 を用いたアンサンブル実験⁷⁾を、それぞれ表-1 に示すケースコードで表記する。また、RCM5 を用いた現在気候実験は、RCM5P とする。

現在気候に関する再現実験期間は 1979-2003 年、将来気候実験に関する再現実験期間は 2075-2099 年として計算がなされており、双方ともに実験期間は 25 年間である。本研究では、それぞれの気候モデルアンサンブル出力から、Murakami ら⁸⁾の方法で抽出した台風の経路データを用い、図-1 に示した九州～関東を含む領域 D2 を通過し

図-1 高潮計算の解析領域

た台風のみを対象台風として選定し、それぞれの台風の気圧、風速についてバイアス補正手法を適用した上で、高潮計算に用いた。

3. バイアス補正手法

上記の GCM60 を用いた現在気候 4 ケース、将来気候 16 ケースのアンサンブル実験による出力に対して、安田ら⁹⁾が開発した RCM5 を真値とみなしたバイアス補正手法を適用した。バイアス補正手法は、1) 台風の移動を追跡しつつ時間解像度を補間する時空間補間、2) 空間解像度の粗さから過小傾向にある風速及び気圧に対して出現確率分布を近づける補正、3) 陸上における風速低減を考慮する補正の 3 手法によって構成される。以下にそれらの補正手法の詳細を示す。

(1) 時空間補間

GCM60 アンサンブルの出力の内、台風データの気圧及び風速に対して時空間補間を行う。GCM60 のデータ出力間隔は 6 時間であるのに対して、RCM5 のデータ間隔は 30 分である。この 6 時間間隔の風速、気圧データを直接高潮モデルに入力し、高潮計算を行った場合、移動する台風情報は離散的に入るため、不十分な取り扱いとなる。そこで、GCM60 出力の 6 時間間隔データを 12 等分し、30 分間隔データとなるようにデータの線形空間補間を行い、台風の連続的な移動を再現する。手順としては、台風の移動軌跡の決定、気圧及び風速の変化量の決定、そして台風の移動の順に行った。この手法により、断続的に出現していた台風を連続的に再現すること

図-2 KF_Pi2の気圧・風速に対する正規分布型バイアス補正の前後(赤：破線，実線)，RCM5P(青・実線)の累積確率分布

が可能となり，高潮計算によって得られる高潮偏差推定値の精度向上が見込まれる。

(2) 気圧風速のバイアス補正

RCM5の出力データを真値とみなし，GCM60における風速，気圧の出現確率分布に対して，バイアス補正を適用し，RCM5による出力の出現頻度に揃えることでバイアスを軽減する。安田ら²⁾において，バイアス補正に用いる確率分布の決定にあたり，6つの手法について比較が行われた。この中で，バイアス補正の精度が最も高く，計算コストも低かった正規分布型バイアス補正を，本研究では採用する。正規分布型バイアス補正では，Pianiら⁹⁾の用いたパラメトリック型の補正に正規分布を適用する。RCM5，GCMアンサンブルそれぞれの出力から，台風接近期間の6時間毎の最低気圧と最大風速を取り出し，これらが正規分布に従うと仮定する。その後，それぞれの平均値と標準偏差がRCM5Pのそれと等しくなるように確率密度分布を揃える。以下に，用いた補正式を示す。

$$x'_{GCM} = \frac{\sigma_{RCM}}{\sigma_{GCM}}(x_{GCM} - \mu_{GCM}) - \mu_{RCM} \quad (1)$$

ここで， x'_{GCM} ：バイアス補正後のGCM出力値， σ_{RCM} ：RCM5出力の標準偏差， σ_{GCM} ：GCM出力の標準偏差， x_{GCM} ：GCM出力値， μ_{RCM} ：RCM5出力の平均値， μ_{GCM} ：GCM出力の平均値，である。補正対象領域は，先に述べた台風影響領域とする。図-2は例として，気圧および風速に対して，バイアス補正を適用した前後の累積確率分布をそれぞれ示したものである。補正前後を比較すると，バイアス補正を行うことで，GCMの風速及び気圧の確率分布が，RCMのそれに近づいていることがわかる。しかし，風速および気圧の強度が強い箇所における補正精度は低い箇所比べて低く，補正関数については改善の余地が残る。

同様の補正を，将来気候の出力に対しても用いた。こ

こで，将来気候でのバイアスは，用いる雲物理スキームの違いによって生じるモデルバイアスであると仮定し，現在気候において算出したバイアス補正値を将来気候に対しても用いた。

陸上風速に対するバイアス補正は，先行研究²⁾同様，各モデルから領域D2における陸上風速データを抽出し，GCM60の陸上風速に対して，正規分布型バイアス補正を適用した。この補正により，GCM60でも陸上の影響を考慮し，陸上風速の低減が再現できるようになった。

4. 高潮モデルおよび解析方法

高潮計算には，金ら¹⁰⁾が開発した潮汐・高潮・波浪の相互作用を考慮した双方向結合モデル SuWAT (Coupled-nested-parallelized Surge WAve Tide model) を用いる。本研究では計算コスト軽減のため波浪計算は行わず，非線形長波方程式を基礎式とした高潮計算モジュールのみを用いた。計算領域は，図-1における領域D2としたが，今回用いたモデルは同時に，ネスティングを行い，領域D3およびD4におけるより詳細な計算も行っており，本研究では，これら2つのドメインにおける計算結果を領域D2において得られた計算結果に重ねることによって，詳細な高潮分布図を作成する。

各アンサンブルで得られた補正後の風速および気圧データを直接の駆動力として，高潮計算を SuWAT によって行った。また，得られた高潮偏差の中から格子点毎に最大高潮偏差を取り出し，それを極大値資料とした極値統計解析を行った。ここで，極値分布関数には Gumbel 分布，プロットングポジション公式には Gringorten 公式を用いた。再現期間は GCM60，RCM5の実験期間である25年とした。

5. 解析結果

(1) 現在気候条件に対する検証

a) 初期値による影響評価

それぞれの気候モデルに入力する大気の初期値が、得られる高潮分布に及ぼす影響について調べた。現在気候再現実験のうち、同じ雲物理スキームを用いているが、初期値の異なるアンサンブル同士の比較を行った。多くの海域で大差はなかったものの、特定の海域において、 ± 1.0 m 程度の高潮偏差の差が現れた。そこで、得られた高潮分布と 940 hPa 以上の勢力の強い台風の経路について調べると、強い台風の通過有無と得られる高潮偏差の大小は一致し、初期値の変化によって狭い海域でみると、異なる強度および経路の台風が通過することで、長期的な高潮偏差に差が現れることがわかった。

そこで、初期値の異なるアンサンブル結果のそれぞれを独立と仮定し、スキーム毎に統合した。異なる初期値のもとで計算された各 25 年の再現計算を統合し、極値統計解析を行うことで、それぞれのスキームについて 50 年の再現計算がなされたとみなす。以下では、KF スキームを用いた計 50 年の再現計算による高潮分布を KF_P50、YS スキームを用いたものを YS_P50 と表記する。これらは、サンプル数を増やすことで、経路に関する不確実性を低減させた現在気候における高潮分布とみなされる。

b) 雲物理スキームによる影響評価

GCM60 で用いられる雲物理スキームが高潮偏差に与える影響について調べた。図-3 は、現在気候において、スキーム毎に得られた高潮分布 (KF_P50 及び YS_P50) の差をとり、それぞれのスキームによる高潮分布の差を図示したものである。図より、ほぼ全域においてマイナスの値を示しており、YS スキームを用いる方が KF スキームを用いるよりも大きな高潮偏差が得られる傾向にあることがわかった。したがって、異なる雲物理スキームを用いることで、得られる最大高潮分布も異なる傾向が示されたため、高潮の将来変化量を考慮する際には、用いるスキーム毎に個別に解析することとした。

(2) 将来気候に対する予測結果

a) 高潮の将来変化予測

将来気候再現実験 16 ケースについて、上記の解析と同様に高潮計算を行い、得られた最大高潮偏差を用いた極値統計解析によって、長期的な高潮偏差を考慮した。得られたそれぞれの将来気候に関する高潮分布に対して、将来一現在の差をとることで、異なる条件下での日本近海における高潮の将来変化量を求めた。この際、現在気候の高潮分布としては、KF_P50 及び YS_P50 を用いる。図-4 は、日本近海における高潮偏差の 25 年再現確率値

図-3 異なるスキームを用いて得られた高潮偏差の 25 年再現確率値の差 (KF スキームと YS スキームの差)

図-4 将来気候 16 アンサンブルによる将来変化のアンサンブル平均 (上図) と分散 (下図)

の将来変化量について、GCM60 を用いて得られた高潮変化量の平均及びその分散を求め、それぞれ図示したものである。図-4 上図に示した平均値についてみると、九州南部及び伊勢湾において高潮偏差は 0.10 m 程度減少傾向にあり、有明海、瀬戸内海や和歌山以東の地域において、0.15~0.30 m 程度増大傾向にある。森ら¹¹⁾は、同じ GCM を用いて、TC の発生・消滅位置は経度方向に海洋の中心 (北西太平洋の場合は東) へ移動し、緯度方向には経度方向の数割極方向にシフトする変化がみられたという結果を得ている。これを踏まえ、図-4 における高潮分布の全体としての傾向をみると、森らの台風についての結果と一致しており、高潮分布は西日本で同等程度あるいは減少する傾向にあり、東日本においては増加する傾向がみられた。これは、高潮分布が台風経路の変化に伴い、東へとシフトする傾向とみなせる。続いて、図-4 下図の分散についてみると、有明海、瀬戸内海や主な湾部における分散の値は大きく、またばらつきがみられ、予測の不確実性が高い。

上記の高潮偏差のばらつきについて、図-5 (a) に示す有明海、周防灘、安芸灘、大阪湾、伊勢湾、東京湾の 6 箇所において得られた高潮変化量について詳しく考察す

図-5 解析領域とした有明海，周防灘，安芸灘，大阪湾，伊勢湾，東京湾（(a)上図），それぞれの海域における高潮最大変化量についての箱ひげ図（(b)下図）（赤線：平均値，黒線：最大，最小値，青線：第一・三四分位線，赤±：外れ値）

る. 図-5(b)は, 先に述べた16通りの高潮変化量について, 各領域中に含まれる変化量の最大値をそれぞれ取り出し, 箱ひげ図を示したものである. この図より, これら6つの海域における高潮の最大変化量は, いずれも平均で0.15~0.45 m増大し, 有明海及び周防灘を除けば, 西日本から東日本にかけて高潮変化量が上昇する傾向が見られた. しかし, これらの海域における高潮偏差のばらつきは依然として大きく, 不確実性についての議論が残る.

b) 高潮変化の SST 依存性

高潮偏差と与える SST 変化傾向との関係について考察する。図-6 は、初期値 i2 のもと KF スキームを用いた 4 つの SST アンサンブルによる高潮の将来変化量を、それぞれの SST パターンごとに図示したものである。Murakami ら⁷⁾による将来 SST 昇温傾向の分類において、日本近海である北西太平洋では、cluster 0 と cluster 2 は類似した昇温傾向を示し、cluster 1 において小さく、cluster 3 において大きな昇温傾向を示している。図-6 においても、cluster 0 と cluster 2 の高潮変化量は類似しており、cluster 1 で小さく、cluster 3 で大きな変化量を示しており、高潮偏差の SST 依存性がみられた。

図-6 KF F i2を用いた SST 毎の高潮の将来変化

6. 結 論

本研究では、GCM60を用いて行われたSRESA1Bシナリオに則ったSST、雲物理モデル、計算初期値を変えた多数のアンサンブル実験出力に対して、バイアス補正手法を適用し、補正後の風速および気圧データを直接の駆動力とした高潮計算を行った。次いで、日本近海における将来高潮変化のアンサンブル予測を行い、実験条件の高潮分布に対する影響の評価を行った。

得られた 16 通りの高潮分布の平均を取ることで、初期値、雲物理スキーム、SST による不確実性を考慮した高潮空間分布図を作成した。全体の傾向として、日本近海における高潮分布は東へとシフトすることがわかった。

また、日本の湾毎に最大変化量を取り出したところ、どの湾でも高潮は増大傾向にあることがわかった。

謝辞: 本研究は、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムおよび科学研究費補助金による成果である。

参考文献

- 1) IPCC AR5: Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, 1535p., 2013
- 2) 安田誠宏, 片平成明, 森 信人, 間瀬 肇, 澁谷容子: 気候モデル台風のパイアス補正手法の開発と高潮の将来変化のアンサンブル予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_1507-I_1512, 2015.
- 3) Kain, J. S., and J. M. Fritsch: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, Vol.47, pp.2784-2802, 1990.
- 4) Yoshimura, H., R. Mizuta, and H. Murakami: A Spectral Cumulus Parameterization Scheme Interpolating Between Two Convective Updrafts with Semi-Lagrangian Calculation of Transport by Compensatory Subsidence. *Mon. Wea. Rev.*, Vol.143, No.2, pp.597-621, 2015.
- 5) Randall, D. A., and D. M. Pan: Implementation of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization with a prognostic closure. *Meteorological Monographs*. Vol.24, No.46, pp.137-147, 1993.
- 6) Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki and A. Kitoh: Climate Simulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.90A, pp.232-258, 2012.
- 7) Murakami, H., R. Mizuta, E. Shindo: Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60-km-mesh MRI-AGCM, *Climate Dynamics*, Volume 39, Issue 9, pp.2569-2584, 2012.
- 8) Murakami, H. and M. Sugi: Effect of Model Resolution on Tropical Cyclone Projections, *SOLA*, Vol.6, pp.73-76, 2010.
- 9) Piani, C., J.O. Haerter and E. Coppola: Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, *Theoretical and Applied Climatology*, 99, pp.187-192, 2010.
- 10) 金 洙列, 高山知司, 安田誠宏, 間瀬 肇: 高潮と波浪に及ぼす大潮汐変動の影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第 54 卷, pp.276-280, 2007.
- 11) 森 信人, 村上裕之, 志村智也, 中條壮大, 安田誠宏, 間瀬 肇: マルチアンサンブルによる気候変動に伴う熱帯低気圧特性の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1251-1255, 2012.
- 12) 文部科学省研究開発局: 影響評価のための気候モデルデータの利用, pp.4-11, 2014.
- 13) 安田誠宏, 中條壮大, 金 洙列, 森 信人, 間瀬 肇, Kevin Horsburgh: 気候変動予測実験出力を直接用いた高潮リスクの評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_1171-I_1175, 2011.
- 14) 安田誠宏, 片平成明, 森 信人, 澁谷容子, 間瀬 肇: 非静力学領域気候モデルによる気候変動予測結果を用いた日本沿岸における高潮の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_1261-I_1265, 2013.

(2016.3.16 受付)

FUTURE CHANGE PROJECTIONS OF STORM SURGE USING MRI-AGCM3.2H ENSEMBLES

Tomohiro YASUDA, Yosuke YAMAMOTO, Nobuhito MORI and Hajime MASE

High-resolution 60km-mesh atmospheric general circulation models (MRI-AGCM 3.2H) and even finer resolution models have been developed and used to investigate potential future changes in tropical cyclone activity due to the global warming. In order to consider uncertainty in projecting future climate change, multi-physics, multi-SSTs, and multi-initial conditions ensemble simulations are conducted, however, there are still unignorable bias remains in GCM simulations. In this study, we use the statistical bias correction method that we developed for these ensemble simulation output and use the ensemble data for storm surge model to project future storm surge change. This study indicates that storm surge around Japan would likely shift to the east in the future.