CMIP5にもとづく地球温暖化による高波の将来変化のアンサンブル予測

森 信人¹・志村 智也²・Mark Hemer³・Xiaolan Wang⁴

¹正会員 博（工）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@oceanwave.jp

²正会員 博（工）京都大学特定助教 防災研究所（〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: shimura.tomoya.2v@kyoto-u.ac.jp

³博（理）CSIRO, Senior Research Scientist（GPO BOX 1538 Hobart TAS 7001, Australia）
E-mail: Mark.Hemer@csiro.au

⁴博（理）Environment and Climate Change Canada, Research Scientist (4905 Dufferin Street, Toronto, Canada)
E-mail: xiaolan.wang@canada.ca

気候変動による沿岸域への影響が懸念されており、2012年のIPCC第5次報告書（AR5）以降、波浪の将来変化予測についての成果が発表されている。しかし、平均波高についての将来予測結果が多く、年最大波や数年に一度の高波についての将来予測は少ない。本研究では、様々なアンサンブル予測結果を用いることにより、高波の将来変化を対象に放射強制力、親モデルとなるGCMおよび波浪モデル等による不確実性の評価を行った。さらに海域毎の高波の将来変化特性についても検討を行った。高波の将来変化の空間分布は平均波高の将来変化と類似するが、台風経路の将来変化が重要であることがわかった。

Key Words: wave height, climate change, ensemble experiments, GCM

1. 序 論

気候変動に伴う海象の長期変化の沿岸域への影響が懸念されている¹⁾。我が国の沿岸部における気候変動の影響の中で、偏西風と台風特性の将来変化は、日本周辺海域の高波や高潮の特性に顕著な影響を与えることが予想されている。これまで温室効果ガス排出シナリオにもとづき、気候変動に伴う波浪の長期変化予測がいくつかの研究グループで行われており^{2),3),4)}、気候変動に関する政府間パネルの第5次評価報告書⁵⁾（IPCC AR5）において、それらの結果がまとめられている。IPCC AR5では、中位であるA1Bシナリオのモデルアンサンブル結果より、平均波高の将来変化について、日本周辺の北西太平洋では減少、南半球の中高緯度では、海上風の強化に伴って、平均波高が増大するという将来予測が“likely”という表現で報告されている。しかし、アンサンブル数の不足および実験設計の不十分さによる不確実性が大きく、波浪の将来変化の信頼度は“low confidence”であるとされている。平均波高の将来予測結果に比べて、年最大波や数年に一度の高波についての将来予測結果は少ない。

IPCC AR5以降行われた高波の将来変化についての予測結果としては、Fanら⁶⁾が力学モデルにより年99%波高の将来変化、Wangら⁴⁾が統計モデルにより確率波高の将来変化を予測している。さらに志村ら⁷⁾は、力

表-1 波浪の気候計算の計算条件

Model	AGCM Resolution Member	Agency	Wave Model	Sea Ice
MRI-AGCM3.2H	0.562 x 0.562 4 member	Kyoto U	WW3 v4.18	Yes
ACCESS1.0	1.25 x 1.875 1 member	CSIRO	WW3 v.3.14	Yes
BCC-CSM1.1	2.8 x 2.8 2 member	CSIRO USGS	WW3 v.3.14 WW3 v.3.14	Yes No
CNRM-CM5	1.4 x 1.4 1 member	CSIRO	WW3 v.3.14	Yes
GFDL-CM3	2.0 x 2.5 2 member	CSIRO USGS	WW3 v.3.14 WW3 v.3.14	Yes No
HadGEM2-ES	1.25 x 1.875 1 member	CSIRO	WW3 v.3.14	Yes
INMCM4	1.5 x 2.0 2 member	CSIRO USGS	WW3 v.3.14 WW3 v.3.14	Yes No
MIROC5	1.4 x 1.4 2 member	CSIRO USGS	WW3 v.3.14 WW3 v.3.14	Yes No
MRI-CGCM3	1.125 x 1.125 1 member	CSIRO	WW3 v.3.14	Yes

学モデルを用いて全球の高波の将来変化予測を行っており、南半球の高緯度および北太平洋の中央部における波高の増大、中緯度および北大西洋の広い範囲での波高の減少を予測している。北西太平洋については、高波の将来変化は台風特性の将来変化に大きく依存し、台

風発生個数の減少や台風強度の増加とともに、台風経路の変化による複合的なものによることがわかってきた。しかし、平均波高に比べて、高波の将来変化については、不確実性の評価が不十分であり、温室効果ガスの将来変化（放射強制力）についての感度も得られていない。

そこで本研究では気候変動による高波の将来変化を対象に、放射強制力、親モデルとなる GCM および波浪モデル等による不確実性を得るため、GCM および波浪モデルを変化させたアンサンブル実験（ensemble of opportunity）により、高波の将来変化予測とその不確実性について評価する。

2. 研究手法の概要

波浪の将来変化予測については、京都大学⁷⁾（KU と表示）、CSIRO⁸⁾、USGS⁹⁾ で行われた計算結果をアンサンブルデータとして、波高に絞ってその将来変化を解析した。解析に用いた波浪の長期計算の計算条件は表-1 に示すとおりである。波浪の将来変化予測の外力としての海上風データは、気象研究所の全球大気モデル MRI-AGCM3.2H の 4 つの SST アンサンブル実験結果と、IPCC AR5 の代表的な 8 つの AO-GCM モデルの合計 12 つの GCM の結果を用いている。MRI-AGCM3.2H を用いた計算では、放射強制力として高位の RCP8.5 の条件で、大気モデルの境界条件である海面水温（SST）を 4 通り変化させた SST アンサンブル実験結果を用いた（表-1 で 4 member と表記）。詳細な SST 条件の説明は、先行研究の結果¹⁰⁾ を参照されたい。この他の GCM の結果は CMIP5 に掲載されたものであり、主に RCP8.5 の結果（表-1 で 1 member と表記）に加えて、幾つかの条件では中位の RCP4.5 シナリオの結果も用いた（表-1 で 2 member と表記）。RCP8.5 および 4.5 シナリオは代表的な温暖化シナリオであり、両者の差を比較することにより、温室効果の強弱による将来変化の応答を調べることができる。波浪の長期計算は、NOAA のスペクトル型波浪モデル WAVEWATCH III v.3.18¹¹⁾ を用いている。ソース項の組み合わせとして 2 通り、海水の考慮の有無により、表-1 に示すような組み合わせで合計 16 メンバーのアンサンブル波浪予測計算を行った。ソース項組み合わせと海水の考慮の有無は、実施機関毎に異なり、以下ではこれらの差をモデル間と表記する。

気候計算の条件として、上記の条件下で、現在気候（1979-2003 年）と温暖化条件下の将来気候（2075-2099 年）における波浪の長期積分を実施した。波高の将来変化について、平均波高、年 99 % および年 99.9 % 値、そして再現期間 R 年の確率波高（R 年確率波高）について求め、全球、海域毎の高波の将来変化について解析し

た。R 年確率波高は、年最大値およびしきい値（POT）による 2 通りの解析を行ったが、ここでは両者の差が顕著ではなかった 10 年確率波高までを解析対象とした。

以下では、シナリオ毎もしくはモデル毎そして全アンサンブルを用いた将来変化の特性について議論を行う。

3. 結果と考察

(1) 平均波高、年 99%, 年 99.9% 波高の将来変化

現在気候条件での計算結果には、バイアスが存在し、波高の計算精度は波浪モデルに起因する誤差と、外力である GCM の海上風に依存する。現在気候計算のバイアスについて、大気再解析値 JRA-55¹²⁾ と比較した。GCM の現在気候条件の海上風は最大 10% 程度のバイアスがあり、大気循環場の南北方向の位置のズレと、熱帯低気圧の最低気圧の再現性による要因による影響が見られた。波高の将来変化については、平均波高、年 99% 波高、年 99.9% 波高および再現期間 R 年の確率波高を対象に解析を行った。R 年確率波高の将来変化については別途次節で解析結果を示す。波高の将来変化は、モデルアンサンブル平均およびその標準偏差で不確実性を評価した。

まず始めに平均波高の将来変化について議論する。図-1 および図-2 に示すのは、海域毎の平均波高の将来変化である。図中の NIO, WNP, ENP, NAT, SIO, SP, SAT, GA は、それぞれ北インド洋、北西太平洋、北東太平洋、北大西洋、南インド洋、南太平洋、南大西洋および全球平均値を示す。将来の温暖化シナリオとして、RCP4.5 と 8.5 の結果を示しているが、放射強制力が高位のほうに変化量も大きく、RCP4.5 と 8.5 の変化の範囲の幅はそれぞれ $\pm 0.06\text{m}$ および $\pm 0.15\text{m}$ であり、約 2.5 倍である。現在気候もしくは再解析による全球の平均波高は約 $2.5 \sim 3\text{m}$ ¹³⁾ であるので、RCP8.5 シナリオでの平均波高の将来変化の幅は平均波高に対して約 6% であり、RCP4.5 シナリオではこの半分以下となる。将来変化特性は、海域毎により変化傾向は異なり、北半球（NIO ~ NAT）では減少、南半球（SIO ~ SAT）では増加の明確な傾向が見られる。北半球では、太平洋および大西洋の将来変化（減少）が大きく、南半球では、南太平洋および南大西洋の変化（増加）が大きい。これは、面積の大きな太平洋および大西洋が偏西風等の大規模循環場の変化の影響を受け易いためである。全球平均の将来変化量は小さく、各海域の将来変化量はこの数倍の大きさになる。これらの結果は、波高の将来変化については、対象海域全体の評価とそのダウンスケールが重要であることを示している。図-1 に示す海上風と波浪モデルに起因するモデル間のアンサンブル平均値の差については、一部の海域を除いてそれほど小さくなく、

(a) RCP4.5 シナリオ

(b) RCP8.5 シナリオ

図-1 海域毎の平均波高の将来変化：モデル毎のアンサンブル平均値（色の違いは予測モデルの違いを表す．RCP4.5 シナリオでは KU は実施していない．単位:m）

(a) RCP4.5 シナリオ

(b) RCP8.5 シナリオ

図-2 海域毎の平均波高の将来変化：モデル毎の標準偏差（色の違いは予測モデルの違いを表す．RCP4.5 シナリオでは KU は実施していない．単位:m）

トータルのアンサンブル平均値の予測結果の不確実性は低いことがわかる．一方，自然変動の大きさを示す将来変化の標準偏差（図-2）は，モデル毎のアンサンブル平均値と同じもしくは2倍近い値を示し，平均波高の将来変化の同程度以上の自然変動を持つことがわかる．図-2が示すように，自然変動の大きさはモデル毎で構造的な差があり（KUの結果が大きい），これはGCMの海上風の年々変動の再現性に依存している．標準偏差は南半球で大きく，北半球では小さい傾向が見られる．

高波を代表する指標の一つとして，年99%および99.9%波高の将来変化について解析した．図-3に示す

のは，年99%および99.9%波高の将来変化について，全モデルのアンサンブル平均値の空間分布を示したものである．年99%および99.9%波高の将来変化のアンサンブル平均値は，平均波高と類似した空間分布を持つ．波高の変化が顕著なのは北西太平洋と南氷洋であり，特に日本の東側に年99.9%波高が1mを超える減少を示す海域が広がる．南氷洋では，年99.9%波高はRCP8.5シナリオで全体的に+0.5m以上の増加傾向を示し，最大の変化で+1.5mである．放射強制力の違いは，空間分布には大きな差はなく，RCP4.5シナリオよりもRCP8.5シナリオの方が変化量が小さく，またモデル間の一致度の範囲も少ない．モデル間での将来変化の一

図-3 高波の将来変化のアンサンブル平均値の空間分布：年 99.9% 波高（図中の白点は全アンサンブルの符号が一致した点を示す，単位:m）

図-4 海域毎の高波の将来変化：アンサンブル平均値（紺色：RCP4.5 シナリオ，黄色：RCP8.5 シナリオ，単位:m）

致度は、フィリピンを除く北西太平洋，北大西洋中部および南氷洋で高い。

図-4 は，平均波高と同様に海域毎の年 99% および 99.9% 波高について，海域毎に将来変化の全モデルのアンサンブル平均値を示したものである。図からわかるように，絶対値は異なるものの，年 99% および 99.9% 波高の将来変化は，平均波高とほぼ同じ変化傾向を示す。北半球では，北西太平洋の将来変化（減少）が大きく，南半球では，南太平洋および南大西洋の変化（増加）が大きい。年 99.9% 波高の将来変化量は平均波高の 2.5 倍であり，全球平均では正の変化を示す。殆どの海域で，放射強制力の違いは将来変化の符号は変わらず，変化量の違いとしてあらわれている。但し，RCP4.5 と比較して，概ね RCP8.5 の将来変化の方が大きいものの，海域によっては放射強制力の強さと波高の将来変

化は必ずしも一致しないことがわかる。放射強制力の強さと波高の将来変化量が一致しない傾向は，平均波高の将来変化であられない特徴である。

(2) 極端波高の将来変化

極値統計解析により，再現期間 1 ～ 10 年の確率波高（極端波高）の将来変化について解析を行った。確率波高の推定には年最大値資料と POT を用いた極値解析を行った（図-5）。データの期間はそれぞれ 25 年であり，極値解析手法の違いが顕著とならない 2 ～ 10 年波高についての将来変化を求めた。

図-6 に示すのは，再現期間 2 および 10 年の確率波高の将来変化のアンサンブル平均値と標準偏差である。また参考として JRA-55 により過去の極端波高についても同様の解析を行った。図-7 に JRA-55 により推定さ

図-5 確率波高の推定結果（赤：年最大値，青線：POT，点線：信頼区間 95%）

れた過去の極端波高の空間分布も示す。図に示すように、2 および 10 年確率波高の将来変化は、平均で $\pm 1\text{m}$ および $\pm 2\text{m}$ の将来変化を示し、両者の変化量は異なるもののその空間分布は類似している。年 99.9% 波高の将来変化と類似した空間パターンを持つが、北半球高緯度での増加傾向が顕著である。南氷洋での波高増加は、海水の将来変化によるフェッチの変化の寄与が大きく現れている。北西太平洋については、極端波高の減少が顕著であるが、10 年確率波高では日本南岸での局所的な増加傾向が見られる。将来変化のモデルの標準偏差は 3m 程度あり、アンサンブル平均値と比較するとモデル間の差が大きく、予測の不確実性は大きい。特にモデル間のバラつきが大きいのは、北西太平洋と南太平洋西側である。図-7 に示す JRA-55 の結果から、不確実性の高い海域は確率波高の値が大きく台風に起因する高波の発生域である。今回用いた将来予測結果の一つ⁷⁾では、この海域の極端波高の将来変化は極端な増加傾向を示しているが、他のモデルの将来変化は概ね減少傾向を示しており、アンサンブル平均値では減少となった。再現年数を変化させて、将来変化の傾向を見た結果、5 年以上の確率波高の空間的な将来変化特性は、GCM 毎の差が大きく、特に台風経路の将来変化の影響が強く現れることがわかった。

4. 結 論

放射強制力、GCM、波浪モデルの条件を変化させたアンサンブル波浪実験を行い、高波の将来変化を求めた。年 99% および 99.9% 波高の将来変化のアンサンブル平均値は、平均波高の将来変化と類似した空間分布を持つことがわかった。年 99% および 99.9% 波高の変化が顕著なのは北西太平洋と南氷洋であり、特に日

(a) 再現期間 2 年確率波高

(b) 再現期間 10 年確率波高

図-6 極端波高の将来変化の空間分布：アンサンブル平均値と標準偏差 (RCP8.5 シナリオ, 単位:m)

本の東側に年 99.9% 波高が 1m を超える減少を示す海域が広がる。また、モデル間での将来変化の一致度は、フィリピンを除く北西太平洋、北大西洋中部および南氷洋で高い。RCP4.5 と比較して、概ね RCP8.5 の将来変化の方が大きいものの、海域によっては放射強制力の強さと波高の将来変化は必ずしも一致しないことがわかった。

再現期間 2 年および 10 年確率波高の将来変化については、平均で $\pm 1\text{m}$ および $\pm 2\text{m}$ の将来変化を示し、両者の変化量は異なるもののその空間分布は類似していることがわかった。5 年以上の確率波高の空間的な将来変化特性は、GCM 毎の差が大きく、特に台風経路の将

(b) 再現期間 10 年確率波高

図-7 JRA-55 にもとづく極端波高の空間分布 (単位:m)

来変化の影響が強く現れる北西太平洋での不確実性が高いことがわかった。

謝辞：USGS の Li Erikson 博士には温暖化予測データを提供して頂いた。ここに感謝の意を表す。本研究は、文部科学省統合的気候モデル高度化研究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) Mori, N. and Takemi, T.: Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean, *Weather and Climate Extremes*, Vol.11, pp.53-69, 2016.
- 2) Mori, N., Yasuda, T., Mase, H., Tom, T., and Oku, Y.: Projection of extreme wave climate change under global warming, *Hydrological Research Letters*, 4, 15-19, 2010.
- 3) Hemer, M.A., Y. Fan, N. Mori, A. Semedo and

- Wang, X.L.: Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble, *Nature Climate Change*, 6p., doi:10.1038/nclimate1791, 2013.
- 4) Wang, X.L., Feng, Y. and Swail, V.R.: Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations, *Geophysical Research Letters*, 41, pp. 1026-1034, 2014.
- 5) IPCC-AR5: Climate Change 2013; The Physical Science Basis, Chapter 13, Cambridge Univ. Press, pp. 1137-1216, 2013.
- 6) Fan, Y., Held, I. M., Lin, S.J., and Wang, X.L.: Ocean warming effect on surface gravity wave climate change for the end of the 21st century, *Journal of Climate*, 26, pp. 6046-6066, 2013.
- 7) Shimura, T., Mori N. and Hemer M.A.: Variability and future decreases in winter wave heights in the Western North Pacific, *Geophysical Research Letters*, 43, pp. 2716-2722, 2016.
- 8) Hemer, M. A., Katzfey, J., and Trenham, C. E.: Global dynamical projections of surface ocean wave climate for a future high greenhouse gas emission scenario, *Ocean Modelling*, 70, 221-245, 2013.
- 9) Erikson, L. H., Heggermiller, C. A., Barnard, P. L., Ruggiero, P., and van Ormondt, M.: Projected wave conditions in the Eastern North Pacific under the influence of two CMIP5 climate scenarios, *Ocean Modelling*, 96, 171-185, 2015.
- 10) Mizuta, R., Arakawa O., Ose T., Kusunoki S., Endo H., and Kitoh A.: Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical seasurface temperature changes, *SOLA*, 10, pp. 167-171, 2014.
- 11) Tolman, H.: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III, version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 2009.
- 12) Kobayashi, S., Yukinari, O. T. A., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., and Takahashi, K.: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics, *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 93(1), 5-48, 2015.
- 13) 森 信人, 志村智也, 釜堀弘隆, Arun Chawla, 安田誠宏, 間瀬 肇: JRA-55 にもとづく長期波浪推算と波候特性の解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, p.L103-L108, 2015.

(2017. 3. 16 受付)

ENSEMBLE PROJECTION OF EXTREME WAVE HEIGHT CHANGE BY CMIP5 BASED WAVE CLIMATE PROJECTIONS

Nobuhito MORI, Tomoya SHIMURA, Mark HEMER and Xiaolan WANG

Projections of wave climate change have been conducted targeting climate change impact on coastal zone since the Fifth Assessment Report (AR5) of IPCC in 2012. Although the many projections are available for mean wave climate, the projections for extreme waves are not well conducted since IPCC AR5. This study conducts multi-GCM and multi-wave-model ensemble experiments changing radiative forcing, GCMs and wave models. The uncertainty of projection is discussed and characteristics of wave climate change in different ocean basins are examined in detail. Future change of extreme wave heights shows similar spatial distribution to mean wave heights but tropical cyclone plays important role at particular areas.