地球温暖化予測に基づく全球の海上風・波浪の将来変化予測

Projection of Global Winds and Waves under Global Warming Scenario

森 信人¹・岩嶋亮太²・安田誠宏³・間瀬 肇⁴・Tracey H. Tom⁵

Nobuhito MORI, Ryota IWASHIMA, Tomohiro YASUDA, Hajime MASE and Tracey H. TOM

This study predicts future ocean wave climate in comparison with present wave climate based on the high resolution atmospheric general circulation model and global wave model. The annual average and extreme of sea surface winds and waves are analyzed in detail. There are clear regional dependence of annual average and extreme values from present to future climate. The wind speeds and wave heights of future climate are increased in middle latitudes and the Antarctic Ocean, and these are decreased in the equator. The annual averaged winds and waves are decreased off coast of Japan but their maxima are increased than those of present climate.

1. 序論

温室効果ガスによる地球気候変動の影響は、様々な形で今後の人間活動へ大きな影響を与えることが予想され、そのインパクトアセスメント、緩和および適応策が必要とされている。1870年～2004年における海面上昇は、 $1.7 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm/yr}$ であり (IPCC, 2007)、ここ10年で増加傾向が見られる (Church and White, 2006)。しかしながら、海面上昇は静的な沿岸環境の長期変化であり、沿岸域の防災や海浜変形などには、動的な変化である波浪の予測が重要となる。都市機能が沿岸部に集中しているアジア・太平洋域では、脆弱な地域が分布し、特に東南アジアに広がるメガデルタ地域では、気候変動による波浪や高潮の特性変化の沿岸部へのインパクトは大きい。また総延長3万km以上の海岸線を持つ我が国では、台風や冬期の季節風の影響を強く受けるため、風速や波高の長期変化を予測することは重要な意味を持つ。

過去の波候変化については、ここ40年間で北大西洋の年間最大波高は 5 cm/yr の増加傾向があると報告されている (Wang and Swail, 2002)。一方で大西洋を対象とした長期波浪推算結果は、カナダ東海岸およびアイルランド北西における増加傾向とスカンジナビア沖および北海における弱減少の2つの異なる傾向を示している (Wang and Swail, 2002) このように、長期的な過去の波候は変化傾向が海域に依存することを示しており、気候変動による長期的な将来予測はさらに評価が難しい。

本研究では、超高解像度全球気候モデルを用いた温暖化予測実験結果をもとに、現在から今世紀末の全球における風速場および波浪場の将来変化予測を行う。特に、現

在、近未来、将来気候における海上10m風速 U_{10} と有義波高 H_s の予測結果を比較し、風速と波高の平均場の変化およびその極端化についての評価を行う。

2. 解析の概要

(1) GCMモデルおよび海上風の概要

温暖化実験における気候変動予測では、モデル解像度の問題により台風の極端化など熱帯低気圧の評価が難しい。野中ら (2008) は、将来の台風経路が北東に移動するとの仮定の下で、確率台風モデルを用いて将来の極大波高を求めている。しかし、常時および極大波浪に影響を与える気候変化は複雑であり、出来るだけ物理的に矛盾無く評価を行う必要がある。そこで、温暖化シナリオ下における海上風の将来変化評価には、気象研究所・気象庁開発の20km格子超高解像度全球気候モデル GCM (モデル解像度 T959L60; Kakushin, 2007) を用いたA1Bシナリオに基づく温暖化数値実験結果を使用した。このGCMは、熱帯低気圧等の極端現象の予測をターゲットに、IPCC AR4における大気海洋結合モデル比較実験 (CMIP3) の海面水温を与え、現在気候 (1979～2003年)、近未来気候 (2015～2039年)、将来気候 (2075～2099年) の各25年、3期間を対象にタイムスライス温暖化予測実験を行ったものである。2009年秋から改良型GCMを用いて新実験が行われる予定であるが、ここでは2007年～2008年に行われた前期実験結果を用いた。

海上風解析では、3期間における平均風速および最大風速を対象とする。なお日本近海における台風の変化については別の論文でとりまとめており、ここでは海上風のみを解析対象とする (安田ら, 2009)。

(2) 波浪解析

波浪については、GCMの U_{10} を外力としてSWAN (Booijら, 1999) を用いて予測計算を行った (以下、WGCM)。アフリカ大陸先端部を計算域両端とし、計算の都合上、北

1 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所
2 学生会員 京都大学大学院工学研究科
3 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所
4 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
5 正会員 (株)サーフレッジンド

図-1 U_{10} の確率密度分布 (ハワイ南沖 51002 ブイ; 実線: GCM, 点線: ブイ)

極海は計算領域外として水平解像度1.25度 (289×126), 時間ステップ30分で全球の波浪スペクトル変形について3期間合計約67年間に渡る時間積分を実施した。

3. 現在気候・波候の再現精度

GCMによる現在気候の再現性を評価するため, 洋上ブイによる観測結果との比較を行った。観測値はNOAAによる太平洋・大西洋における洋上ブイ (6点) による観測結果を用い, GCM現在気候の結果と比較した。紙面の制約上省略するが, 北太平洋を対象としたNCEP/NCAR解析値の U_{10} およびこれを利用した長期波浪解析結果と比較し, 分布パターンについて検証した。

(1) 海上風

まず U_{10} の再現性について検証を行った。6つの観測地点は, NOAAの中でも20年を目安とした長い観測期間を持つ地点を選択した。検証は, 統計量の再現性, 常時と極値について分布形状の再現性について比較を行った。ここでは, ページの都合上, ハワイ南沖の確率密度分布と統計量の比較のみを掲載する。図-1はハワイ南沖ブイ (51002) における U_{10} の確率密度分布である。GCMの現在気候の結果は, 分布形状およびピーク位置ともに観測データとよく一致している。極値については, 超過確率分布の比較から, ハリケーン発生地域に属するアメリカ東海岸の観測点においてややGCMが過大, ハワイ近海では高風速域の再現性が悪いという結果を得た。

表-1は, 各地点におけるGCMおよび観測値の U_{10} の平均値および標準偏差の比を示したものである。表からわかるように, 全ての地点において平均値はGCMがやや過大な傾向を示すが, そのバイアスは約7%と小さい。一方, 標準偏差の比は特に傾向はなく, その比は ± 0.1 以内に納まっており, 全地点の平均では0.5%ほど過小であるが妥当な結果である。

図-2 H_s の確率密度分布 (ハワイ南沖 51002 ブイ)

表-1 各地点の現在気候計算値/観測値の平均値および標準偏差の比 (A: 大西洋, P: 太平洋)

#	U_{10} : GCM/OBS		H_s : WGCM/OBS	
	Mean	Std.	Mean	Std.
41010 (A)	1.069	1.071	(2.004)	(0.679)
44004 (A)	1.034	0.997	1.429	0.958
44011 (A)	1.127	0.879	1.446	0.906
46001 (P)	1.126	0.808	0.967	1.090
51002 (P)	1.076	0.969	0.901	0.889
51003 (P)	1.010	1.073	0.794	0.982
全地点平均	1.074	0.995	1.111	0.965

(2) 波高

海上風速と同様に, WGCMの現在気候計算結果を観測結果と比較し検証を行った。観測データは, 海上風と同じブイのデータを用いた。図-2はハワイ南沖における H_s の確率密度分布の比較結果である。両者の分布形状は類似しているものの, WGCMの分布のピークは0.2mほど小さく, 全体的にも過小である。極値については, 超過確率分布の比較から, U_{10} 同様に高波高の再現性がやや悪いとの結果が得られた。

統計量について見ると, 観測値と比較して, WGCMの結果は, フロリダ沖 (41010) で大きく異なり, その近傍の他の2つの観測値も大きなバイアスを示した (表-1)。これは, 波浪モデルのフロリダ付近における境界条件設定の問題であり, 41010のデータを除くと, 平均値で10%, 標準偏差で4.5%のバイアスであった。観測値と比べると, WGCMは太平洋上の観測点で平均が0.1~0.5m程度過小である。これらの結果を踏まえ, 以下ではフロリダ付近については解析から除外し, これ以外の地域について解析を行う。

4. 現在気候と将来気候における気候・波候の変化

(1) 海上風の将来変化

図-3 (a) は現在気候における格子点毎の期間平均風速 $\bar{U}_{10}$, 図-3 (b) は $\bar{U}_{10}$ の現在気候から将来気候への変化率を示したものである。現在気候の $\bar{U}_{10}$ は, 太平洋中心部では6m/s, 南氷洋では11m/s, 太平洋北部では8~9m/s, 赤道近辺では0~6m/s程度と解析値や観測値と類似した分布を示している。一方, 将来気候の現在気候からの変化率は $\bar{U}_{10}$ の大きさに依存せず, 領域に依存した増減を示している。平均風速の速い南氷洋では約5%の増加傾向が見られ, これは約0.5m/sの増加に相当する。一方, 赤道域では最大10%の顕著な減少(約0.6m/s), 北太平洋, 北大西洋では緯度方向に依存した分布が見られ, 中緯度帯では最大5%(約0.6m/s)程度の減少傾向が見られる。特に日本近海に着目すると約4%(約0.4m/s)の減少領域であることがわかる。この結果は, 海上風の将来変化の緯度依存を示しており, 風速の将来変化を単純に全球平均で取り扱うことが困難であることを示唆している。図は省略するが, 図-3を経度方向に平均化すると, 将来気候は赤道付近で明確な減少傾向, 南氷洋で増加傾向が見られる。中緯度域は評価が難しいが, 全体的に極域にピークが移動する傾向が見られた。

上記の平均風速の将来変化予測結果を踏まえ, 暴風時

図-3 期間平均風速 $\bar{U}_{10}$ の空間分布

を対象にその将来変化について考察する。ここでは, 簡単に代表極大風速として各期間における期間トップ10風速(もしくは波高)の平均値を取り, これと期間平均値の比を Extreme Index (EI) として定義する。以下では, U_{10} のEIを EI_{U10} , H_s のEIを EI_{Hs} と定義し, 極端現象の将来変化予測を行う。

図-4は現在気候と将来気候における U_{10} の EI_{U10} を示したものである。赤道近辺, 南氷洋では恒常的に高風速が維持されるため, U_{10} の極値と平均値が近く, EI_{U10} は1~3程度の比較的小さい値を持つ。一方, 熱帯低気圧発生地域では EI_{U10} は大きく, 現在気候と将来気候で比較するとその値も大きくなり, また分布も著しく広がる傾向がある。同じ中緯度でも, マダガスカル近海, オーストラリア東沖に比べて, 日本近海, アメリカ東海岸の増加はより顕著である。これは, サイクロンに比べて台風やハリケーンが強くなることを示している。

上記の検討により, $\bar{U}_{10}$ および EI_{U10} が領域に依存していることがわかった。領域毎の将来変化をより明瞭にするため, 両者の平均値を海域毎に計算した。図-5はその結果であり, $\bar{U}_{10}$ に関しては, 全体としてはほぼ横ばいであるが, 細かくみると, 南氷洋で若干の増加, 北太平洋および日本近海では若干の減少傾向を示している。一方, EI_{U10} は, 日本近海とこれを含む北太平洋で顕著な増加傾向を示している。他の海域では, 若干の増加傾向を示す

図-4 U_{10} の極端化指数 EI_{U10} の将来変化

図-5 領域平均した U_{10} の将来変化 (Global: 全球, Antarctic: 南極海, NP: 北太平洋, NA: 北大西洋, Indian: インド洋, JP: 日本近海)

領域もあるものの、大きな変化は見られない。

(2) 波高の将来変化

図-6 (a) は、現在気候における計算格子点毎の期間平均有義波高 $\bar{H}_s$ 、図-6 (b) は、 $\bar{H}_s$ の現在気候から将来気候への変化率を示したものである。 U_{10} 同様に、現在気候の $\bar{H}_s$ は極地方で大きく、南氷洋と北大西洋北部で4m前後、北太平洋北部で3m、その他の地域は概ね0～2mである。現在気候から将来気候の $\bar{H}_s$ の変化率については、南氷洋で約5～8%の増加、大西洋および東太平洋の赤道域で約5%の増加、西太平洋およびインド洋赤道域で5～10%の減少、中緯度域で5～10%の減少傾向が見られる。これは、 $\bar{H}_s$ で見ると、約±0.3mの増減を意味し、南氷洋では0.2～0.3mの増加、北太平洋では0～0.1mの減少となる。特に日本近海では、将来気候における平均波高の0.15～0.2mの減少が予想され、温暖化による影響は地域毎のバラツキが大きく、また常に増加する傾向は見られないことがわかる。

図-6 期間平均有義波高 $\bar{H}_s$ の空間分布

先に行った EI_{U10} による U_{10} の将来の極端化についての検討結果を踏まえ、 H_s についても同様の評価を行った。図-7はその結果であり、 EI_{H_s} は EI_{U10} よりも領域毎の増減が大きく、特に熱帯低気圧発生地域で大きな値を持つことがわかる。台風、サイクロン発生地域では将来気候において大きな値を持つ EI_{H_s} の領域の拡大及び EI_{H_s} 値の増加が見られる。風速の結果と同じく、南氷洋では、平常時の波高が大きいために EI_{H_s} の値は3前後と北半球の同緯度地域に比べると小さい値となった。これらの傾向は EI_{U10} よりも顕著であるが、風波の波高が風速の2乗に比例することを考えると、5%の風速変化は波高には2乗で影響を与えるため妥当な結果であると言える。

最後に、海域毎の平均波高と EI_{H_s} の将来変化について解析を行った。図-8はその結果であり、海域平均した現在気候の $\bar{H}_s$ は、南氷洋が3.2mと平均的に大きな値を示し、他の区域についてはおおよそ1.5～2.5mである。将来の変化傾向としては、南氷洋で若干の増加、全体的にはほぼ横ばいであるが、北太平洋と日本近海で減少傾向が見られる。一方、極端化指数 EI_{H_s} の海域毎の平均値は、北太平洋と日本近海で顕著な増加が見られた。特に日本近海では EI_{H_s} は約1.0増加し、風速同様に、波高についても顕著な極端化が予想される。一方、他の海域では、若干の変化が見られるもののほぼ横ばいの傾向である。

図-7 H_s の極端化指数 EI_{H_s} の将来変化

5. 結論

気象研・気象庁超高解像度全球気候モデルを用いた温暖化予測実験結果をもとに、A1Bシナリオ下における今世紀末の海上10m風速 U_{10} と有義波高 H_s の全球における変化の予測について解析を行った。

これらの結果、温暖化シナリオ下における将来の風速・波浪変化は、地域影響が大きく、平均値は極地で増加、赤道近辺および中緯度域では減少する。一方、極大値はこれと逆の傾向があり、特に熱帯低気圧発生地域で高風速・高波高域が拡大することがわかった。特に日本周辺は両者の影響を受け、平均値の減少と最大値の増加傾向が見られ、その結果気候極端化が顕著となる。上記以外の検討結果からも様々な影響が見られ、今後100年間の海面近傍の力学変化は沿岸環境・防災両面において有意な影響を持つことを明らかにした。

謝辞：本研究は、文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラム、科学研究費補助金および関西エネルギー財団のサポートによる成果である。ここに感謝の意を表す。

図-8 領域平均した $\bar{H}_s$ の将来変化 (Global：全球，Antarctic：南極海，NP：北太平洋，NA：北大西洋，Indian：インド洋，JP：日本近海)

参考文献

- 野中浩一・山口正隆・畑田佳男 (2008)：球温暖化シナリオに伴う北西太平洋での波高極値の変化，海岸工学論文集，第55巻，pp.1321-1325。
- 安田誠宏・安藤 圭・森 信人・間瀬 肇 (2009)：地球温暖化予測に基づく将来台風変化予測とその確率モデリング，海岸工学論文集，第56巻，印刷中。
- Booij, N., R. Ris and L. Holthuijsen (1999)：A third-generation wave model for coastal regions. I- Model description and validation, Journal of Geophysical Research, Vol.104, C4, pp.7649-66.
- Church, J. and N. White (2006)：A 20th century acceleration in global sea-level rise, Geophysical Research Letters, Vol.33, No.1, L01602.
- IPCC (2007)：IPCC fourth assessment report (AR4), <http://www.ipcc.ch/>, 2009/4/1.
- Kakushin (2007)：Innovative program of climate change projection for the 21st century, Japan, <http://www.kakushin21.jp/>, 2009/4/1.
- Wang, X. and V. Swail (2002)：Trends of Atlantic wave extremes as simulated in a 40-yr wave hindcast using kinematically reanalyzed wind fields, Journal of Climate, Vol.15, No.9, pp.1020-1035.