全球の統計的波高推定手法の開発と 将来変化予測への応用

森 信人¹・岸本理紗子²・志村智也³・安田誠宏⁴・間瀬 肇⁵

¹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@oceanwave.jp

²学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8530京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail:kisimoto.risako.65z@st.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学特別研究員 防災研究所 (〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄)

⁴正会員 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011京都府宇治市五ヶ庄)

⁵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)

JRA-55を基本データとし、力学的波浪モデルと比べて短時間で数多くの気候変動に関するアンサンブル予測に適用できる波高の統計的予測モデルを開発した。得られた予測モデルを幾つかの温室効果ガスの将来濃度シナリオにもとづいた気候変動予測結果に適用し、平均波高および極大波高の将来変化予測を行った。主な将来変化としては、平均波高に対して北太平洋北部で波高の増加、北大西洋全域と北緯・南緯30°付近、および太平洋赤道域の東部で大きな減少が見られ、極大波高は、概ね平均波高と同様の变化の分布を示した。極大波高が平均波高と異なる特徴を示した海域は、主に熱帯低気圧が通過する頻度が高い海域であり、その将来変化傾向は、温室効果ガスの将来濃度シナリオによって多様な傾向を示した。

Key Words : *climate change, wave climate, wave projection, statistical model, emission scenario*

1. はじめに

温室効果ガスによる気候変動が人間生活に与える影響が徐々に懸念されており、我が国においても様々なセクターに対する影響評価と適応策の検討が行われつつある。気候変動の影響は沿岸環境にも大きくおよび、想定される沿岸域への気候変動の直接的な影響としては、海面上昇、高潮および波浪の変化があるが、波浪は他の要素と比較して予測評価研究が進んでおらず、現在の気候モデルでは直接予測されていない。しかし、大気循環場等の広域の気候変化は、波浪に影響を与えることが予想される¹⁾。海面上昇、高潮および波浪といった沿岸外力の将来変化は、沿岸域における海浜変形、構造物の設計条件、生態系等、広い分野と深く関連するため、定量的な将来予測が必要とされている²⁾。

上記のように、沿岸外力の長期的な将来変化予測は重大な課題であり、波浪については気候モデルの計算結果を踏まえてその将来変化を予測する必要がある。全球を対象とする波高の将来変化予測については、2010年以降、平均波高について幾つかの予測が行われているが、アンサンブル数が少なく、不確実性の評価まで至っていない。

また、極大波高については、取り扱いの難しさから確度の高い将来予測はほとんど行われていない。さらにIPCC第5次評価報告書 (IPCC AR5) 以降、気候モデルによる将来変化の予測数が飛躍的に増え、予測の不確実性評価が可能となりつつあるものの、一方で影響評価の計算負荷も大幅に増えている。

一般に、波浪の予測・推算には、力学的手法が用いられる³⁾。力学的手法を用いた波浪の将来変化予測では、気候モデルから予測された海上風と海水のデータを外力・境界条件に、スペクトル型波浪モデルを用いて長期積分が行われる⁴⁾。支配方程式に従って計算を行うため、得られたスペクトル情報にもとづき、波高、周期、波向き等の波浪についての様々な情報を出力できるが、計算負荷が高く、数十年に渡る将来変化を予測するには、時間がかかることが欠点である。一方で、波浪の将来変化を統計的手法によって予測する研究も試みられている^{5,6)}。統計的手法では、過去の気象変数と波浪変数の統計的関係を事前に求め、気候モデルから出力された気象データをその関係に適用して波浪場の推定を行う。将来の波浪を計算する際は、その関係が将来においても保持されるという仮定の下で、将来の気象データを使って波浪場の

推定を行う。統計的手法では、計算時間を大幅に短縮することが可能であり、多くの気候変動予測結果に適用することができる。しかし、統計的手法では、気象変数と波浪変数の統計的関係にもとづくため、その精度やベンチマークとなる過去データの推算精度に波浪の推定精度が依存する。特に、風浪についてのフェッチやうねりの影響予測の精度が問題となる。

これらの現状から、波浪の将来変化を求めるための統計モデルを作成し、多くの気候の将来変化予測シナリオを対象に、波浪の予測計算を統計的にを行い、不確実性の評価を行うことが必要とされている。したがって、本研究では、まず短時間で多くのアンサンブルに適用可能な波浪の統計モデルを開発する。ついで、第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)における幾つかの温室効果ガスの将来濃度シナリオ条件下の気候変動予測結果に適用し、月平均波高および極大波高の将来変化予測を行う。

2. 波浪の統計的予測手法の開発と精度検証

(1) 計算方法

波浪の統計的な将来変化予測を行うため、予測手法の開発を行った。統計モデル構築のために用いた基本データは、JRA-55長期再解析値⁷⁾の海上10m高度風速(U_{10})、海面更正気圧(SLP)、およびJRA-55で出力された風と海水のデータを外力に、波浪スペクトルモデルWAVEWATCHIII v4.18⁸⁾を用いて計算された波浪解析値⁹⁾(以下、JRA-55+Wave再解析と表記)の波高(H_S)である。波高データは緯度経度格子 $0.5625^\circ \times 0.5625^\circ$ の解像度で、1時間毎の出力を用いた。風速と海面更正気圧データの空間解像度はそれぞれ約60kmと $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ であり、6時間毎(0, 6, 12, 18UTC)の出力を用いた。さらに SLP の勾配は、中心差分で求めた。

統計モデルの構築は、まず、JRA-55+Wave再解析から解析期間前半の1958~1987年(30年間)の6時間毎の波高、月平均波高、年99%値および99.9%値等(極大波高と定義)のデータを格子点毎に取り出す。また、海上風速、海面気圧のデータも同様に取出す。海上風速の2乗(U_{10}^2 、以下 U_{10}^2 と略記)、海面気圧(SLP)、海面気圧の勾配(ΔSLP 、以下 ΔSLP と略記)のうち1つから3つを組み合わせる説明変数とした。波高と説明変数の間に以下の線形関係を考え、格子点毎に波高の予測値($\hat{H}_S$)と再解析値(H_S)の差の2乗和が最小になるように定数(a)および係数(b_i)を決定した。

$$\hat{H}_S = a + \sum_{i=1}^k b_i x_i \quad (1)$$

ここで、 k は説明変数の数、 x_i は説明変数を表している。得られた統計モデルを用いて、再解析の解析期間後半(1988~2012年)の説明変数の値から6時間毎の波高、

月平均波高、極大波高を予測し、精度検証を行った。大気再解析データの説明変数 U_{10}^2 、 SLP および ΔSLP の組み合わせを変えて、合計7パターンの結果を比較検討し、格子点毎の線形回帰モデルの最適な予測手法を選択した。

(2) 検証結果

JRA-55+Wave再解析の前半30年間のデータから得られた統計モデルを用いて、後半25年間の解析値を対象に精度の検証を行った。以下では、推定精度の特性についての考察を行う。

a) 月平均波高の推定特性

推定された月平均波高とJRA-55+Wave再解析の解析値との相関係数を、図-1に示した9つの海域毎に平均した結果を表-1に示す。全球平均の相関については、0.8以上の高い相関が得られ、3つの説明変数を全て用いたモデルが最も相関が良かった。一方、 SLP のみを説明変数としたモデルは、ほぼ無相関となった。

海域毎に見ると、すべてのモデルで北インド洋の相関が最も高くなるのがわかる。一方、赤道域はどのモデルを用いても相関は最も低くなっており、それに次いで北太平洋も低くなっている。後で詳細に解析するが、これらの海域ではうねりが卓越しており、このため格子点毎に定義した統計的関係では精度が低下している。全ての海域で、最も相関係数が大きいのは説明変数を3つ全てとしたモデルであった。南極海では比較的誤差が大きいが、これは海氷の季節変動が激しく、季節によりフェッチが変化するためと考えられる。物理モデルでは海氷の変動の情報も考慮して計算を行っているため、海氷の季節変動を考慮しない統計モデルでは再現が難しく、大きな差が生じることがわかった。

紙面の制約上図示しないが、平均波高推定誤差の空間分布より、推定誤差は、赤道域や北緯20°近辺、南緯30°近辺の中緯度において、大陸の西側で誤差の大きな海域が帯状に現れることがわかった。本研究では、格子点毎の波高と風の関係に注目してモデリングを行っているため、偏西風や貿易風の吹く海域では、年間を通じて風が強く、風波が支配的であり、このため相関が良いと考えられる。逆に、赤道域のように風が弱くなく、うねりが卓越する海域では相関が低い。しかし、赤道域では平均波高が小さいために、絶対的な誤差は小さい。また、風が強い海域でも、その場で生成される風波よりもうねりの影響が卓越する南北アメリカ大陸等の大陸の西側では相関が低くなる。北大西洋では、平均波高が大きいため、相関係数が大きいにも関わらず誤差は大きい。

b) 極大波高の推定特性

表-2に示すように、極大波高の推定では、風波が飽和し、吹送距離が無限であるという仮定(局所平衡)が厳しいため、波高のばらつきが大きくなり、相関が悪くな

った。説明変数の組み合わせについては、 U_{10}^2 のみを説明変数とするモデルで最も相関が良かった。平均波高と同様に、極大波高についても風の強い海域では相関が良く、赤道域のような風の弱い海域では相関が悪くなった。風の強い海域でも、風の強さよりうねりの影響が卓越する、南北アメリカ大陸やオーストラリア大陸、アフリカ大陸の西側では相関が悪い。誤差の空間分布によれば、日本の南側や北太平洋中央、北大西洋の北東部、南極海で比較的大きな誤差を示す。このうち、日本の南側や北太平洋中央、北大西洋の北東部では、極大波高が他の海域と比較して高いため、相関が良いにも関わらず誤差は大きくなる。南極海については、極大波高はそれほど大きくなく誤差も非常に大きいため、どのモデルでも波高予測の信頼性は比較的低い。

説明変数を変えたモデル毎の特徴に注目すると、月平均波高の場合と異なり、 U_{10}^2 のみを説明変数とするモデルが最も相関が良く、誤差も少ない。SLPに関する説明変数のみのモデルでは、特に北インド洋や赤道域での相関が悪い。これは、極大波の生成条件では、局所平衡が成り立つ風波が支配的なためである。 U_{10}^2 が説明変数に加わると全体的に相関が良くなるが、南太平洋ではあまり改善が見られない。 U_{10}^2 とSLP、 U_{10}^2 と ΔSLP の2つのモデルでは、結果にほとんど差はなく、わずかに後者のほうが相関が良い。これは、風に直接的に影響を与えるのがSLPではなく勾配であるからだと考えられる。

c) 回帰係数の分布

説明変数が波高の予測に与える影響を調べるために、平均波高推定における線形回帰式の係数について検証を行った。 U_{10}^2 のみを説明変数にした場合の係数の分布を図-1に示す。広い海域で $0.02 \sim 0.03[\text{s}^2/\text{m}]$ の値となることがわかる。これは、以下に示すフェッチが無限の場合のJONSWAPの条件0.0203に近い値である。

$$H_s = \frac{0.0094 \left(\frac{\omega_p}{2\pi g} U_{10} \right)^{-5/3}}{g} U_{10}^2 \cong 0.0203 U_{10}^2 \quad (2)$$

係数がこの範囲の値をとる海域では誤差が小さい。一方、北太平洋北部、北大西洋およびインドの西側等では、西部から東部に向けて係数が増加し、0.03を超える。この変化に伴って、誤差も微増している。これはこの海域で偏西風が東向きに吹き、風下となる東部ではフェッチが大きくなるためと考えられる。南半球の南部では、同様に偏西風が吹くが、北半球と比較すると、大陸に風が遮られることが少ないため係数の変動があまり生じず、誤差が小さい。また、係数が著しく小さい赤道付近、オーストラリア大陸西側、南アメリカ大陸西側、アフリカ大陸西側の海域では、波高が小さいため、誤差が大きい。

d) 月毎の相関係数の分布

上記の結果を踏まえ、最も相関の良かった、3つの説明変数全てを用いたモデルについて、詳細な傾向を調べ

表-1 推定された月平均波高とJRA-55との相関係数（太字は最も相関係数が高いモデル）

海域	統計モデルの説明変数						
	U_{10}^2	SLP	ΔSLP	U_{10}^2, SLP	$U_{10}^2, \Delta SLP$	SLP, ΔSLP	$U_{10}^2, SLP, \Delta SLP$
北インド洋	0.91	0.68	0.83	0.96	0.93	0.90	0.96
北西太平洋	0.90	0.36	0.81	0.91	0.91	0.84	0.92
北東太平洋	0.79	0.49	0.71	0.81	0.83	0.76	0.84
北大西洋	0.87	0.39	0.80	0.88	0.89	0.81	0.89
南インド洋	0.81	0.43	0.73	0.87	0.85	0.81	0.88
南太平洋	0.82	0.36	0.76	0.83	0.83	0.77	0.84
南大西洋	0.84	0.41	0.76	0.87	0.85	0.81	0.88
赤道域	0.67	0.32	0.56	0.72	0.70	0.63	0.75
南極海	0.83	0.30	0.78	0.84	0.83	0.80	0.85
全球	0.81	0.39	0.73	0.84	0.83	0.77	0.85

表-2 推定された99%極大波高のとJRA-55との相関係数（太字は最も相関係数が高いモデル）

海域	統計モデルの説明変数						
	U_{10}^2	SLP	ΔSLP	U_{10}^2, SLP	$U_{10}^2, \Delta SLP$	SLP, ΔSLP	$U_{10}^2, SLP, \Delta SLP$
北インド洋	0.78	0.07	0.33	0.76	0.77	0.32	0.76
北西太平洋	0.77	0.01	0.62	0.76	0.77	0.59	0.76
北東太平洋	0.66	0.07	0.53	0.65	0.66	0.49	0.64
北大西洋	0.74	0.04	0.52	0.70	0.72	0.48	0.69
南インド洋	0.65	0.07	0.51	0.64	0.65	0.49	0.64
南太平洋	0.62	0.08	0.54	0.61	0.62	0.53	0.61
南大西洋	0.61	-0.02	0.50	0.59	0.59	0.48	0.58
赤道域	0.46	0.04	0.27	0.44	0.45	0.26	0.44
南極海	0.46	0.08	0.42	0.44	0.48	0.41	0.46
全球	0.60	0.05	0.47	0.58	0.60	0.45	0.58

図-1 平均波高の推定式における U_{10}^2 の係数の分布 [s^2/m]
(説明変数: U_{10}^2 のみの場合)

るため、月毎に算出した海域別の相関係数を表-3に示す。まず、太平洋では2月や3月、南大西洋では1月から3月にかけて、北大西洋では2月と12月、北インド洋では3月と4月に相関係数が小さくなっている。誤差の空間分布を見ると、特に大陸の西側で相関係数は小さくなっている。オーストラリア大陸の西側では1月から3月、赤道域では7月から9月、南極海では9月から10月にかけて相関係数が高くなる。一般的に、夏より冬のほうが風が強いため、風の影響が卓越し、南太平洋や南大西洋、南極海では冬季に相関が良くなり、夏季に相関が低くなる。

紙面の制約上示していないが、 U_{10}^2 のみを説明変数にしたモデルにおいても同様の季節変動の傾向が見られた。説明変数が3つのモデルでは、 U_{10}^2 のみを説明変数にしたモデルより全体的に相関が良くなり、誤差も減少した。また、 U_{10}^2 のみのモデルで顕著であった、2月の北東太平洋や、9月、11月の南アフリカの西での極端な負の相関は、説明変数を3つにすることで軽減された。

3. 将来変化の予測計算

(1) 気候変動予測モデルの概要

上記で得られた統計モデルを全球気候変動予測の結果に適用し、波高の将来変化予測に適用した。波高変化予測に用いる統計モデルは、前章で精度検証を行った結果を踏まえ、 U_{10}^2 のみを説明変数とするモデル、 U_{10}^2 と ΔSLP を用いたモデル、 U_{10}^2 、 SLP 、 ΔSLP の3つの説明変数を全て用いたモデルの3つとした。将来気候の予測結果は、気象庁気象研究所高解像度全球大気モデル

(MRI-AGCM3.2H) による気候変動予測実験の結果¹⁰⁾を用いた。空間解像度は約60km (TL319) である。この予測では、現在気候を1979～2004年、将来気候を2075～2100年 (共に26年間) としてタイムスライス実験を行っている。MRI-AGCM3.2Hは海面水温 (Sea Surface Temperature, 以下SSTと略記) を外力とし、大気の時間積分を行うAtmosphere Global Climate Model (AGCM) である。将来の温暖化シナリオは、IPCC第5次評価報告書 (AR5) で用いられている、大気中の温室効果ガスによる放射強制力の変化を示す代表的濃度経路 (RCP) シナリオ中の、RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5の4通りである。RCPシナリオ毎にAR5で用いられたCMIP5モデルのアンサンブル平均SSTを与えて予測実験が行われている。これに加えて現在気候のデータも用いて波浪の解析を行った。

統計モデルは緯度経度格子 $0.5625^\circ \times 0.5625^\circ$ の解像度であるのに対し、MRI-AGCM3.2Hの解像度は約60kmである。したがってMRI-AGCM3.2Hのデータを緯度経度格子 $0.5625^\circ \times 0.5625^\circ$ に線形内挿し、解析を行った。ただし、MRI-AGCM3.2Hの気圧勾配の算出の際は、統計モデルの気圧勾配と同じく、緯度経度格子 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ で算出し、その値を緯度経度格子 $0.5625^\circ \times 0.5625^\circ$ に線形内挿した。

(2) 現在気候での検証

JRA-55+Wave再解析値を真値と考え、気候モデルの現在気候再現実験の精度の確認を行った。まず、JRA-55とMRI-AGCM3.2Hのモデルの差を検証するために、MRI-AGCM3.2Hの現在気候の説明変数 (U_{10}^2 , SLP , ΔSLP) の精度について解析した。その結果、 U_{10}^2 の精度は、全体で約10%、赤道域や陸との境界、南アメリカ大陸の南端付近で約20%の誤差を持つことが分かった。大陸近傍では、海上風の振る舞いが複雑なため、精度が悪い。一方、 SLP の誤差は最大でも約0.2%であり、解析値に非常に近い。 ΔSLP は広い範囲で約10%、 SLP で比較的精度の悪い赤道域や陸との境界で約20%の誤差を示した。

次に、MRI-AGCM3.2Hのタイムスライス実験結果をもとに統計モデルを用いて計算した現在気候の波高の推定値と、JRA-55+Wave再解析値の比較を行った。どの統

表-3 月平均波高の海域別の相関係数

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
北インド洋	0.85	0.83	0.70	0.75	0.87	0.89	0.85	0.81	0.85	0.82	0.85	0.83
北西太平洋	0.87	0.84	0.83	0.85	0.86	0.85	0.84	0.88	0.86	0.86	0.86	0.83
北東太平洋	0.73	0.68	0.69	0.75	0.76	0.74	0.77	0.80	0.77	0.75	0.70	0.76
北大西洋	0.84	0.81	0.82	0.84	0.87	0.84	0.84	0.85	0.82	0.81	0.82	0.79
南インド洋	0.82	0.83	0.83	0.76	0.73	0.79	0.77	0.78	0.77	0.76	0.76	0.79
南太平洋	0.75	0.75	0.74	0.78	0.73	0.76	0.76	0.78	0.79	0.73	0.76	0.76
南大西洋	0.77	0.74	0.78	0.80	0.81	0.80	0.81	0.80	0.83	0.78	0.83	0.80
赤道域	0.63	0.59	0.51	0.53	0.58	0.65	0.71	0.64	0.68	0.64	0.56	0.61
南極海	0.80	0.84	0.81	0.81	0.82	0.78	0.80	0.81	0.83	0.84	0.74	0.75
全球	0.77	0.76	0.74	0.76	0.76	0.77	0.78	0.79	0.79	0.76	0.75	0.75

計モデルによる結果も大部分の海域でJRA-55+Wave再解析との差は $-0.1 \sim 0.2\text{m}$ で $\pm 10\%$ 程度に収まった。陸との境界では大きな差が生じたが、説明変数の精度の直接的な影響が支配的である。また、北大西洋や南アメリカ大陸南部周辺で $0.3 \sim 0.4\text{m}$ の大きな差が生じた。これはこの海域における波高の値が大きいためであり、誤差は $10 \sim 15\%$ に収まっている。一方、南極海や北極海の差は大きく、統計モデルでは海氷の季節変動を予測の要素に入れてないことが主要因であると考えられる。

以上より、統計モデルからの推定波高の現在気候での精度は約 10% であることがわかった。また、南極海や北極海、陸近傍では特に精度が悪い。北大西洋や南アメリカ大陸南部周辺、赤道域でも精度が悪いことがわかった。

(3) 将来気候予測

最後に、統計モデルを全球大気気象モデルの将来気候予測結果に応用し、波高の将来変化予測を行った。以下では、得られた予測結果について、月平均波高と極大波高に分けて考察する。

a) 月平均波高

U_{10}^2 のみを説明変数とするモデルを用いた場合の、現在気候の波高に対する平均波高の将来変化量の割合を、シナリオ毎に図-2に示す。図中の点は、精度検証において相関係数が 0.8 を超えた場所を表す。

海域毎の将来変化特性は以下のとおりである。すべての統計モデルおよび将来シナリオの結果に共通して、北太平洋北部で波高の大きな増大、北大西洋全域と北緯・南緯 30° 付近、および太平洋赤道域の東部で大きな減少が見られる。南北太平洋、南インド洋のそれぞれの中緯度と、北西太平洋、北大西洋、北インド洋ではシナリオが高位になるにしたがって波高減少の傾向が増大する。

ついで、北太平洋北部では波高上昇の程度が、シナリオが高位になるにしたがって減っている。また南極海の将来変化は、RCP2.6では大部分で減少傾向を示しているが、RCP4.5になると一部で増加傾向が現れ、RCP6.0, 8.5と放射強制力が増大するとさらに増加する。また、北太平洋北部、ヨーロッパの西側、オーストラリア大陸東側では、特に冬季の波高変化が夏季の波高変化より卓越し、年間平均波高に影響を与えている。

b) 極大波高

極大波高の将来変化については、 U_{10}^2 , SLP , ΔSLP の3つを説明変数とするモデルを用いた場合の現在気候の波高に対するシナリオ毎の将来変化量を緯度方向に平均した結果を図-3に示す。図の(b)~(d)は、全球の海域を経度毎に3分割して緯度方向に平均した結果である。

多くの海域で、月平均波高と同様の変化傾向を示している。すべての結果において一貫して、北太平洋北部とヨーロッパの西側では増加、南北太平洋、北大西洋、

図-2 MRI-AGCM3.2H1にもとづく平均波高の将来変化率
(説明変数: U_{10}^2)

南北インド洋のそれぞれの中央部では減少する。一方、熱帯低気圧通過領域においては月平均波高とは異なる変化をしている。日本近海や南インド洋のマダガスカル島の東側では、シナリオが高位になるとともに波高は増加から減少に転じる。北アメリカ大陸の西側では増加傾向を示す領域が現れる。オーストラリア大陸の東側では極大波高が減少する領域が月平均波高より広がり、RCP2.6シナリオでは南北に細く伸びる増加領域が現れる。

6. 結論

本研究では、気候モデルによる将来変化予測結果を対象に、低計算負荷で波高を推定する統計的手法を開発し、全球の波高推定、精度の検証およびこれを用いた将来変化予測を行った。JRA-55を基本データとして開発した統計モデルは、 U_{10}^2 , SLP および ΔSLP を説明変数とするモデルであり、組み合わせを変えて7つの統計モデルを構築し、精度検証を行った。

図-3 経度毎に平均した99%極大波高の将来変化[m]
(説明変数: U_{10}^2 , SLP, ∇ SLP) (a) は全球, (b) は西経90°から東経20°, (c) は東経20°から120°, (d) は東経120°から西経90°の経度毎の平均値

得られたモデルを, 気象研究所全球大気モデルMRI-AGCM3.2Hの気候変動予測実験結果に適用し, RCPシナリオ毎に今世紀末を対象に波高の将来変化予測を行った。平均波高の将来変化は, 北太平洋北部で波高の大きな増大, 北大西洋全域と北緯・南緯30°付近, 太平洋赤道域の東部で大きな減少が見られた。極大波高は, 概ね平均波高と同様の変化の分布を示した。極大波高が平均波高と異なる特徴を示したのは, 主に熱帯低気圧が通過する海域であり, その変化は温室効果ガスの将来濃度シナリオがシビアになるにしたがって顕著な変化を示した。

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: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 13, Cambridge Univ. Press, pp.1139-1216, 2007.
- 2) Suh, K. D., Kim, S. W., Mori, N., and Mase, H.: Effect of climate change on performance-based design of caisson breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.138, No.3, pp.215-225, 2011.
- 3) Chawla, A., Spindler, D. M., and Tolman, H. L.: Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Modelling*, Vol.70, pp.189-206, 2013.
- 4) 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*, Vol.70, pp.221-245, 2013.
- 5) Wang, X. L., & Swail, V. R.: Climate change signal and uncertainty in projections of ocean wave heights. *Climate Dynamics*, Vol. 26, No.2-3, pp.109-126, 2006.
- 6) Wang, X. L., Feng, Y., and Swail, V. R.: Changes in global ocean wave heights as projected using multi-model CMIP5 simulations, *Geophysical Research Letters*, Vol.41, No.3, pp.1026-1034, 2014.
- 7) Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K., and Takahashi, K.: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. 気象集誌. 第2輯, No.93, Vol.1, pp.5-48, 2015.
- 8) Tolman, H. L.: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 316, 2014.
- 9) 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, 2015. (投稿中)
- 10) Murakami, H., Mizuta, R., and Shindo, E.: Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60-km-mesh MRI-AGCM, *Climate dynamics*, Vol. 39, No.9-10, pp.2569-2584, 2014.

(2015.3.18 受付)

STATISTICAL MODELING OF GLOBAL WAVE HEIGHT AND ITS APPLICATION TO CLIMATE CHANGE PROJECTION

Nobuhito MORI, Risako KISHIMOTO, Tomoya SHIMURA,
Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

A statistical model of global wave height analysis was developed based on the JRA-55 reanalysis data and applied to future projections of wave climate change under several future scenarios. Mean and extreme wave heights were estimated globally using the statistical wave model. The estimated mean wave heights in future climates show increase in the Northwestern Pacific and decrease in the Northeastern Pacific, middle latitude and around the equator. The estimated extreme wave heights in future climates shows different trends from mean one depending on the future greenhouse gas emission scenarios.