

地球温暖化に伴う極大波高の将来変化予測

Projection of Extreme Waves under a Global Warming Scenario

森 信人¹・志村智也²・安田誠宏³・間瀬 肇⁴

Nobuhito MORI, Tomoya SHIMURA, Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

The influence of global climate change due to green house effects on the earth environment will require impact assessment, mitigation and adaptation strategies for the future of our society. This study projects future extreme ocean wave climate in comparison with present wave climate based on the atmospheric general circulation model and global wave model. The extreme sea surface winds and waves are analyzed based on extreme value methods in detail. There is a clear regional dependence of extreme winds and wave heights changes from present to future climates. The extreme wave heights of future climate will be increased significantly in tropical cyclone areas.

1. 序 論

現在、観測から気候の温暖化が明らかになり、人間活動への大きな影響が懸念されている。1961～2003年に海洋の表面から700m深度では、水温が0.1℃上昇し、海面はその期間で、 1.8 ± 0.5 mm/year上昇した (IPCC, 2007)。広く研究されている海面上昇と並んで、海岸構造物や海浜変形の主要な外力は波浪であり、温暖化の影響による波浪の長期変化を予測することは重要である。現在各国で、気候変動シナリオ下における将来の波浪の予測が、統計的 (Wang and Swail, 2006)、または力学的 (Moriら, 2010) に行われている。森ら (2009) は、将来の平均波浪場の変化を定量的に評価し、その変化量は地域差が大きいことを示した。しかし、工学的に重要な極値については未解明である。

本研究では、温暖化シナリオ下における波浪や、その外力となる海上風の変化を力学的に予測し、特に極値の将来変化特性を定量的に把握する。まず、現在気候について観測値および再解析値と比較し、モデルの再現精度を評価する。ついで、今世紀末の将来気候について50年確率値を求め、将来の極端な波浪の変化を予測する。

2. 解析するデータの概要

本研究は、気象庁・気象研究所による超高解像度全球気候モデル (20kmメッシュ,GCMと略記) の温暖化予測結果 (Kitoh et al., 2009) に基づく海上風のデータを基にする。この温暖化予測実験は、現在気候 (1979～2003年)、A1Bシナリオ条件下の近未来気候 (2015～2039年) および将来気候 (2075～2099年) の3期間について計算

が行われている。GCMの海上風 U_{10} を外力として、波浪推算モデル (SWAN) を用いて、3期間における全球的波浪計算 (以下、WGCM) を行った (Moriら, 2010)。

本研究では、解析対象を現在気候と将来気候の海上風速 U_{10} および有義波高 H_s にしぼり、現在気候と将来気候を比べることにより、 U_{10} と H_s の将来変化を予測する。ここでは、 U_{10} には、緯度経度格子 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ の解像度に粗視化されたグリッド値の6時間間隔の出力値を使い、有義波高 H_s は、1時間間隔の $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ 緯度経度格子のデータのみを解析対象とする。

3. モデルの現在気候・波候の再現精度

GCMおよびWGCMによる現在気候の再現精度を評価するため、洋上パイによる長期観測結果との比較を行った。観測値には、長期観測されているNOAAによる太平洋における7地点による観測結果と気象庁による日本近海の2地点の観測結果を用いた。観測値にはいくつかの前処理を施した。第1に異常値の除去。第2に風速値の10m高度相当の値への変換を行った。加えて、GCMとWGCMが格子内の平均値として出力されることを踏まえ、観測値への3時間の移動平均操作を行った。また、GCMとWGCMについては、メッシュ値を観測値の位置に線形補間して比較検証をした。一方、再現精度の相対的な評価としてECMWFのERA-40についても比較を行った。Quantile値を用いて、Quantile-Quantile (Q-Q) plotで比較した。ここでは、例として四国南沖パイ (21004) の有義波高 H_s の比較結果のみ図-1に掲載する。

海上風速の全体的な傾向として、GCMは低風速域で観測値よりも過大で、極値域に向かうにつれて過小となった。1～95%値は観測値とよく一致しており、GCMの現在気候において海上風の平均的な性質は捉えられている。また、ERA-40と比べると、GCMの再現精度が相対的に高いという結果が得られた。これは、元々のGCM

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

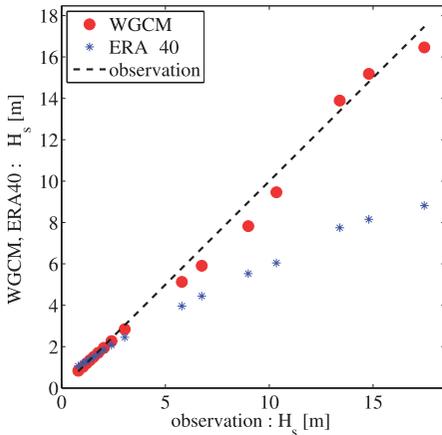


図-1 H_s のQ-Q plot (四国南沖21004)

の計算時の水平解像度が約20kmと高く、熱帯低気圧の表現が良いためと考えられる。ERA-40に対する相対的な精度の高さは、有義波高 H_s についても同様であった。ここで、Quantile値における観測値からの誤差を次の二つの指標でまとめる。6～95%値の基準化rms誤差を nrms_{95} 、96～100%値の基準化rms誤差を nrms_{100} として、すべての地点での誤差をまとめたのが表-1である。 U_{10} については、#21004の nrms_{95} 以外では、 nrms_{100} も含めて、GCMの方がERA-40より値が小さく、再現性が良い。GCMの nrms_{95} は、約3.5～10%であった。 nrms_{100} は約3～16.5%である。有義波高 H_s の nrms_{95} は北太平洋の北および西側の5地点(21004, 22001, 46001, 46003, 46035)で再現性がERA-40より良好であり、約3.5～20.5%である。一方、 nrms_{100} はすべての地点でERA-40より値が低く、約3.5～15.5%である。

GCMおよびWGCMの現在気候の U_{10} と H_s については、各地点で再解析値ERA-40と同等以上の再現精度であり、特に極値の再現に高い信頼が置けることがわかった。

表-1 Quantile値における基準化rms誤差：()はERA-40の結果

Buoy#	U_{10} [%]		H_s [%]	
	nrms_{95}	nrms_{100}	nrms_{95}	nrms_{100}
21004	9.8 (7.0)	9.8 (23.3)	3.7 (14.0)	8.9 (37.1)
22001	8.1 (9.9)	16.6 (25.3)	9.0 (12.7)	12.7 (27.5)
46001	7.0 (10.2)	3.6 (17.0)	5.7 (9.8)	3.5 (21.0)
46003	6.1 (7.0)	3.2 (12.9)	3.8 (8.1)	3.8 (13.3)
46006	7.0 (12.9)	11.0 (16.5)	20.7 (11.7)	9.7 (21.3)
46035	3.6 (11.9)	4.1 (10.0)	12.2 (12.7)	10.9 (17.7)
51001	5.2 (12.8)	6.2 (10.9)	18.1 (6.8)	15.3 (25.0)
51002	4.9 (16.3)	6.5 (13.9)	13.1 (10.3)	9.9 (22.4)
51004	3.6 (13.3)	6.8 (13.5)	16.8 (6.1)	5.9 (20.1)

4. 極値の評価

(1) 解析方法

極値の将来変化は、現在気候(1979～2003年)と将来気候(2075～2099年)における海上風速 U_{10} と有義波高 H_s の極値資料(25年分)に極値分布の当てはめを行い、50年確率値を算出し、比較を行う。分布関数の推定を行う際、その極値資料が期間を通して同じ分布に従うと仮定しなければならない。そこで、期間内の傾向変動の有無をMann-Kendall検定を用いて行った。その結果、広範囲において、傾向変動はないという帰無仮説は棄却されず、特定の海域に棄却域が集中しなかったため、定常性は保証されたとし、全範囲で極値資料に分布関数の当てはめを行った。

極値資料として年最大値資料を用いる手法が一般的であるが、本研究で取得できる年最大値資料は25年分であり、極値資料として十分な量ではない。そこで、ある閾値より大きいデータを取り出して解析するPOT (Peak Over Threshold) 解析を採用する。ある閾値を超えるデータを取り出し、その閾値超過データの時間的に連続な部分を1連の高波もしくは強風現象と考える。ピーク同士が48時間以内の場合、同じイベント内の現象とした。閾値は、閾値を超えるデータ数が、全データ数の1～5%となるように場所毎に設定し、それぞれの閾値で解析を行った。

極値分布関数には一般化パレート分布を用いた(高橋, 2009)。極値資料に最適な分布関数のパラメータの決定方法として最尤法を採用し、特に、風速に関しては風速の2乗値に当てはめを行った。これは、POT法における一般化パレート分布の適用性が単純な風速値よりも高いということと、工学において風速の2乗値の方が重要であることによる(Caires and Sterl, 2005)。50年確率値の標準誤差については、デルタ法によって求めた。一般化パレート分布における閾値を超えるデータ数は、海上風速 U_{10} では閾値2%、有義波高 H_s では閾値3%が妥当であった。

上記の一般化パレート分布による手法に加え、一般的な波浪の極値解析(合田, 2008)をもとに、ワイブル分布(形状母数 $k=0.75, 1.0, 1.4, 2.0$)と極値I型分布、極値II型分布(形状母数 $k=2.5, 3.3, 5, 10$)の中から、最小二乗法により最適分布関数を選択する手法によっても50年確率値を求めた。二つの手法の差異から予測結果の不確実性を考察し、以下では一般化パレート分布を当てはめる手法をAとし、ワイブル分布・極値I型分布・極値II型分布の中から最適関数を選択する手法をBとする。

(2) 全球における極値の将来変化

全球を対象とした手法Aによる50年確率風速を図-2、50年確率波高を図-3に示す。50年確率風速と50年確率波高ともに将来気候での増加傾向が明確な海域は、日本南、南東沖と北大西洋中緯度西側とメキシコ西沖、マダガスカル東沖の熱帯低気圧のストームトラックに相当する海域である。また、日本南沖とマダガスカル東沖の増加海域のすぐ低緯度側で減少傾向がある。これは、熱帯低気圧の発生域・通過域の拡張・移動および強化によるものと考えられる。増加域において、手法Bに比べ、手法Aの一般化パレート分布を分布関数として用いた方が、大きな50年確率値が得られた。得られた変化の定量的な評価と有意性の議論は日本近海について細かく行う。

(3) 日本近海における極値の将来変化

日本近海における手法Aで求めた50年確率風速と50年確率波高を図-4と図-5に示す。極値の分布パターンとしては、海上風速と波高ともに現在気候で日本南西沖と東北沖で大きな値を示し、これが将来気候になると日本南西沖では極値が増加する。海上風については日本の東、東北沖でも極値が顕著に大きくなる傾向がみられる。さらに、日本南東沖とフィリピン北東沖に強風、高波発生域が拡張する。しかし、フィリピン東沖では50年確率値が減少するため、フィリピン北東沖と東沖の境目で極値の空間変化が大きくなる。

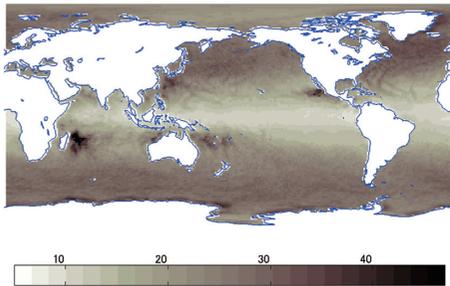
上記の結果は、極値の大きさ、変化の大きさについて

推定手法によりばらつきがあり、定量的な評価は難しい。そこで、統計的な安定性を得るために領域毎にアンサンブルした解析を行う。ここでは波高を中心に説明する。まず領域を定め、その範囲内では同じ分布関数に従って現象が発生していると仮定する。領域設定方法は、期間99%値の分布等から同じ高波発生機構を持っていると推測できる範囲として解析区分を決めた(図-6)。ついで、各領域内を対象に、POT法に従ってある閾値を超える高波を抽出する。こうして得られたデータは、一度の気象擾乱で領域内に発生する最も大きな高波であり、かつそれぞれが独立な資料となる。ここで、この極値資料の取得年数に相当する年数は、期間内25年の高波の総数(全高波数)、独立な高波数(採択高波数)と領域内格子点数(地点数)から、次のようになる。

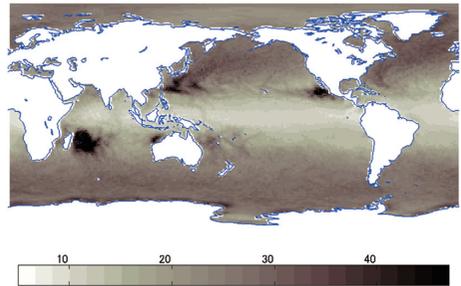
$$\text{極値資料の取得年数} = \frac{\text{採択高波数}}{(\text{全高波数}) / (\text{地点数})} \times 25 \dots (1)$$

これにより、25年より長い極値資料の取得ができることになる。閾値 u は、現在気候において u を超過したデータに一般化パレート分布を適合し、形状と修正尺度パラメータの推定値が一定になると見せる最小の値とした。将来気候でもこの閾値の設定を適用した。さらに、データを冬季(12~4月)と夏季(5月~11月)に分けて解析した。

一連の処理を施した極値資料に対して手法A及びBによって分布関数をあてはめ、50年確率波高を求めた。紙

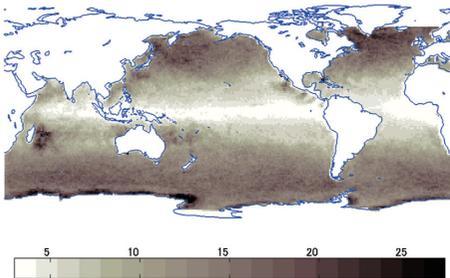


(a) 現在気候

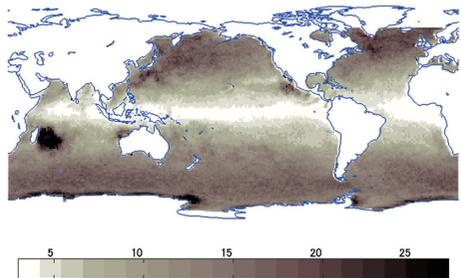


(b) 将来気候

図-2 全球の50年確率風速 [m/s]



(a) 現在気候



(b) 将来気候

図-3 全球の50年確率波高 [m]

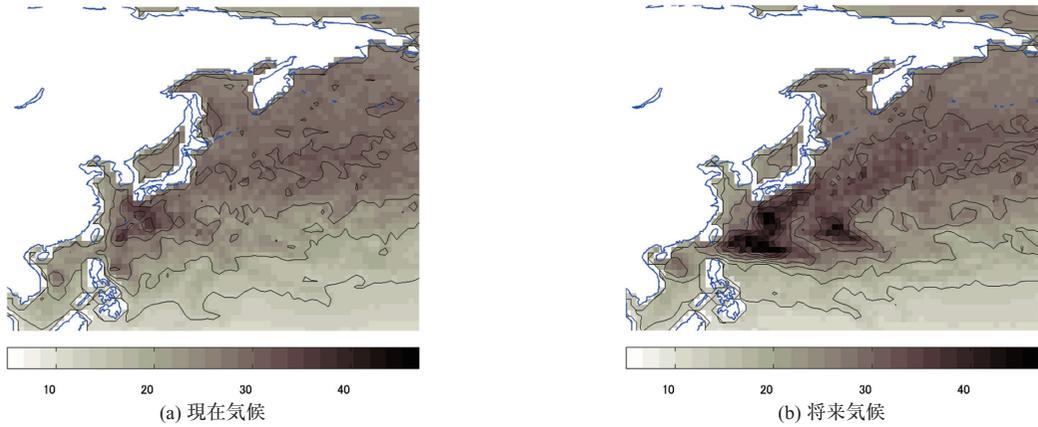


図-4 日本近海の50年確率風速 [m/s]

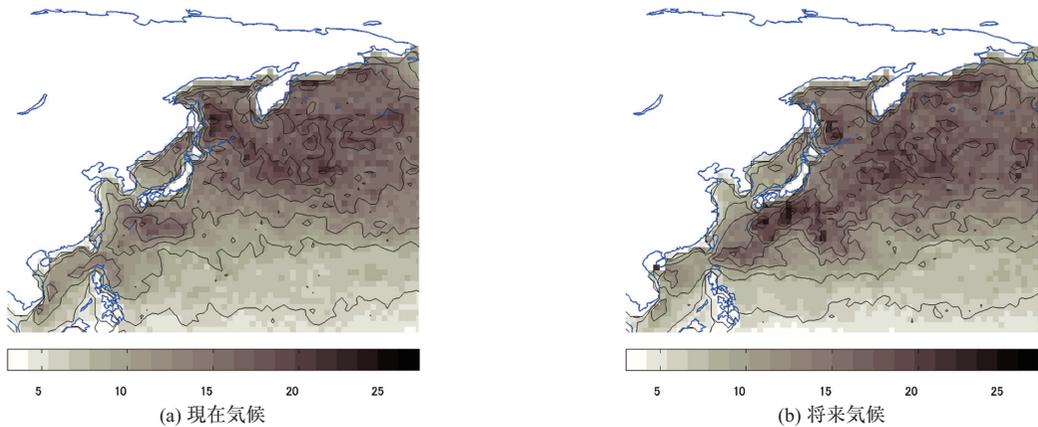


図-5 日本近海の50年確率波高 [m]

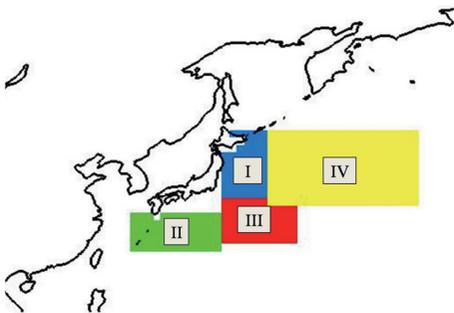


図-6 解析対象領域の分割図

面の関係上夏季の結果のみを表-2に示す。まず、各領域いずれの季節においても、50年確率波高は手法AとBでお互いの標準誤差内に収まる。このことから、上記解析法により安定した極値資料を取得できたと言える。ついで現在から将来気候の変化を見る。誤差を正規分布と仮定して、95%水準で将来気候と現在気候の差を調べた。

冬季に関しては、どの地点でも将来の50年確率波高に有意な変化は見られなかった。ただし、現在から将来に

かけてすべての領域で、特に日本の南の領域である領域II, IIIでは、高波の出現数が大幅に減少する。将来の高波数は領域IIで38%, 領域IIIで33%の減少となる。つまり、この領域において冬季の閾値(6, 7m)を超える高波の発生頻度は減るが、稀に発生する現象の強度は衰えないことが予想される。このように冬季の将来気候では、50年確率波高の有意な変化はないが、高波の発生パターンに大きな変化が表れることがわかった。

(表-2)に示したように夏季については、すべての領域で閾値を超える高波発生数が増加し、50年確率波高も増加する。領域IIIの手法ABと領域IVの手法Aにおいて95%水準の有意な変化がある。特に領域IIIの増加が顕著であり、50年確率波高が60%以上という大きな増加が示された。これは、太平洋における将来台風の強大化と発生・来襲域の北東方向への拡張に対応する(Murakamiら, 2010)。冬季、夏季いずれにおいても日本の東側に比べて南側の領域で将来変化が大きい。夏季の変化については、台風の変化によるところが大きいといえるが、冬季に関しては、はっきりとした原因は現在分からないため、

表-2 日本近海の50年確率波高：夏季

領域	閾値 [m]	気候	全高波数	採択高波数	50年確率波高 [m]	標準誤差 [m]	将来への変化量
I (51地点)	7.5	現在	443	70	A) 12.91 B) 13.07	A) 0.78 B) 1.14	A) +2.76m (21.4%)
		将来	591	78	A) 15.67 B) 15.82	A) 1.18 B) 1.53	B) +2.75m (21.0%)
II (59地点)	7.5	現在	639	63	A) 19.90 B) 20.12	A) 1.48 B) 2.16	A) +4.56m (22.9%)
		将来	788	73	A) 24.46 B) 24.81	A) 2.16 B) 2.79	B) +4.69m (23.3%)
III (56地点)	8	現在	198	33	A) 13.30 B) 13.16	A) 0.66 B) 0.60	A) +8.35m (62.8%)
		将来	614	54	A) 21.65 B) 21.65	A) 1.24 B) 1.35	B) +8.49m (64.5%)
IV (56地点)	8	現在	2523	240	A) 14.23 B) 13.97	A) 0.47 B) 0.69	A) +2.34m (16.4%)
		将来	2779	229	A) 16.57 B) 16.80	A) 0.85 B) 1.13	B) +2.83m (20.3%)

表-3 日本近海の50年確率風速：夏季

領域	閾値 [m/s]	気候	全強風数	採択強風数	50年確率風速 [m/s]	標準誤差 [m/s]	将来への変化量
I (51地点)	21	現在	365	44	A) 30.50 B) 30.62	A) 1.13 B) 1.63	A) +3.46m/s (11.3%)
		将来	408	47	A) 33.96 B) 34.28	A) 1.36 B) 2.01	B) +3.66m/s (12.0%)
II (59地点)	20	現在	539	39	A) 35.14 B) 35.65	A) 0.54 B) 2.08	A) +3.08m/s (8.8%)
		将来	674	48	A) 38.22 B) 38.98	A) 0.64 B) 2.53	B) +3.33m/s (9.3%)
III (56地点)	18	現在	424	54	A) 28.24 B) 28.23	A) 1.75 B) 2.32	A) +8.86m/s (31.4%)
		将来	905	56	A) 37.10 B) 39.63	A) 0.48 B) 2.70	B) +11.4m/s (40.4%)
IV (56地点)	21	現在	2730	110	A) 31.38 B) 31.12	A) 0.89 B) 0.98	A) +5.29m/s (16.9%)
		将来	2599	95	A) 36.67 B) 36.86	A) 1.38 B) 1.96	B) +5.74m/s (18.3%)

今後は大気の解析を行い原因解明をしていく。

風速に関しても、波高と同様に解析を行った。夏季の結果のみ表-3に示す。結果は波高と同様であり、冬季の50年確率風速に大きな変化はないが、閾値を超える強風の発生数が減少し、夏季には50年確率風速値そのものが増大するという結果が得られた。

5. 結論

波高と風速に関する将来への変化傾向の結果をまとめると以下の通りとなる。

全球スケールでは、熱帯低気圧のストームトラックに相当する海域の強風、高波の明確な強化とその強風、高波海域が移動または拡張するという結果が得られた。日本近海では、冬季に、50年確率波高に有意な変化はないものの、強風、高波発生数の減少が見られた。一方、夏季には50年確率値において20～60%増加するという結果になった。日本近海の50年確率値の増加する海域には、強風・高波の強化により増加する海域と強風・高波域の拡張により増加する海域があった。冬季同様、特に太平洋南側における将来変化が顕著であることがわかった。

今後は、これらの変化の物理的相互関係を明らかにするために、大気との包括的な解析を行う。

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国土技術研究センターのサポートによる成果である。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 合田良実 (2008)：耐波工学，鹿島出版会，pp.327-379。
 高橋倫也 (2009)：極値統計学 Statistics of extremes, 情報論的学習理論テクニカルレポート，7p。
 森 信人・岩嶋亮太・安田誠宏・間瀬 肇・T. Tracey (2009)：地球温暖化予測に基づく全球の海上風・波浪の変化予測，海岸工学論文集，第56巻，pp.1271-1275。
 Caires, S., and A. Sterl (2005): 100-year return value estimates for ocean wind speed and significant wave height from the ERA-40 data, Journal of Climate, 18 (7), pp.1032-1048。
 IPCC (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 5, Cambridge Univ. Press, pp.387-429。
 Kitoh, A., T. Ose, K. Kurihara, S. Kusunoki, M. Sugi and KAKUSHIN Team-3 Modeling Group (2009): Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the kakushin program, Hydrological Research Letters, Vol.3, pp.49-53。
 Mori, N., T. Yasuda, H. Mase, T. Tom and Y. Oku (2010): Projection of extreme wave climate change under the global warming, Hydrological Research Letters, Vol.4, pp.15-19。
 Murakami, H. and M. Sugi (2010): Effect of model resolution on tropical cyclone climate projections, SOLA, 印刷中。
 Wang, X.L., and V.R. Swail (2006): Climate change signal and uncertainty in projections of ocean wave heights, Climate Dynamics, 26 (2), pp.109-126。