

地球温暖化が河口・沿岸部の堤体設計に およぼす影響評価

京都大学防災研究所 准教授 森 信人

概要：

地球温暖化シナリオに基づく海面上昇・高波および高潮などの河口・沿岸環境の将来変化は、台風の特性変化、気候変動パターンに依存し、これらの気候変動特性は、予測モデルと二酸化炭素排出シナリオの両者に影響を受ける。本研究では、温暖化予測モデルの予測結果をもとに系統的な解析を行い、21世紀末における波浪の変化予測を行う。これに加えて、海面上昇の影響を考慮し、沿岸部の影響評価を行った。さらに、地球温暖化に伴う外力変化の影響を考慮した防波堤の滑動量解析を実施し、設計供用期間中の外力変化について検討した。

キーワード：地球温暖化、海面上昇、波浪変化、構造物の安定性

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、この変化量はここ10年で増加傾向が見られる。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人口が密集しているため、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。

例えば、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。沿岸水域の防災・環境に波浪の影響は重要にも関わらず、長期的な波浪の変化は海域によって異なるため、その把握が難しい。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。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ものである。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。

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

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では、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; Kitohら2009)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。

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

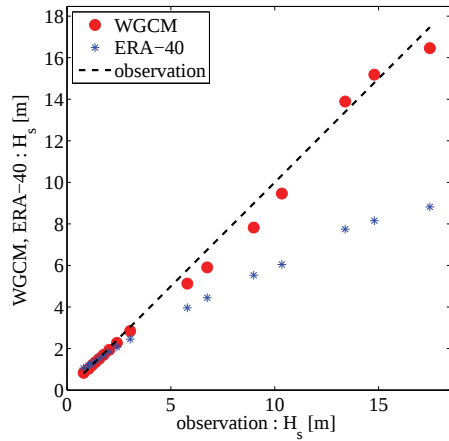


図-1 H_s のQ-Q plot (四国南沖 21004)

測する．波浪については，GCMの U_{10} を外力として，スペクトル型波浪モデルSWANを用いて予測計算を行った（以下，WGCM）．解析は並列計算機(64CPU)を用い，1runを25年計算として実時間約10日/run掛かった．アフリカ大陸先端部を計算域両端とし，計算の都合上，北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61年間に渡る時間積分を実施した．

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，洋上ブ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WG

CM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，例として四国南沖ブイ(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

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 [%]	
	nrmse ₉₅	nrmse ₁₀₀	nrmse ₉₅	nrmse 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)

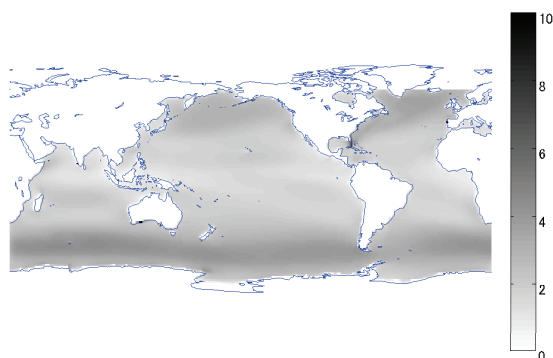
現精度が相対的に高いという結果が得られた．これは，元々のGCMの計算時の水平解像度が約20kmと高く，熱帯低気圧の表現が良いためと考えられる．ERA-40に対する相対的な精度の高さは，有義波高 H_s についても同様であった．ここで，Quantile値における観測値からの誤差を次の二つの指標でまとめる．6～95％値の基準化rms誤差をnrmse₉₅，96～100％値の基準化rms誤差をnrmse₁₀₀として，すべての地点での誤差をまとめたのが表-1である． U_{10} については，#21004のnrmse₉₅以外では，nrmse₁₀₀も含めて，GCMの方がERA-40より値が小さく，再現性が良い．GCMのnrmse₉₅は，約3.5～10％であった．nrmse₁₀₀は約3～16.5％である．有義波高 H_s のnrmse₉₅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，nrmse₁₀₀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．

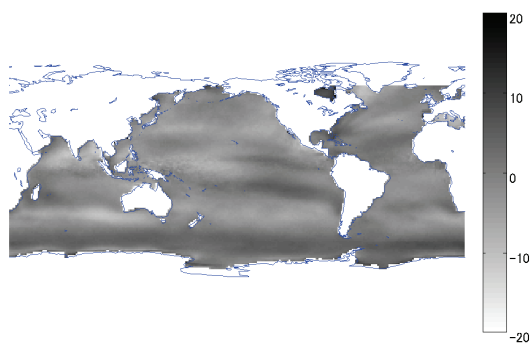
4. 現在気候と将来気候における平均波高の変化

図-2(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 $\langle H_s \rangle$ ，図-2(b)は， $\langle H_s \rangle$ 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 $\langle H_s \rangle$ 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 $\langle H_s \rangle$ 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， $\langle H_s \rangle$ で見ると，約 ± 0.3 m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

Past Average WAVE HEIGHT



(a) 現在気候の $\langle H_s \rangle$ (単位m)



(b) 現在から将来気候における $\langle H_s \rangle$ の変化率

図-2 期間平均有義波高 $\langle H_s \rangle$ の空間分布

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パラツキが大きく、また常に増加する傾向は見られないことがわかる。

5. 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。

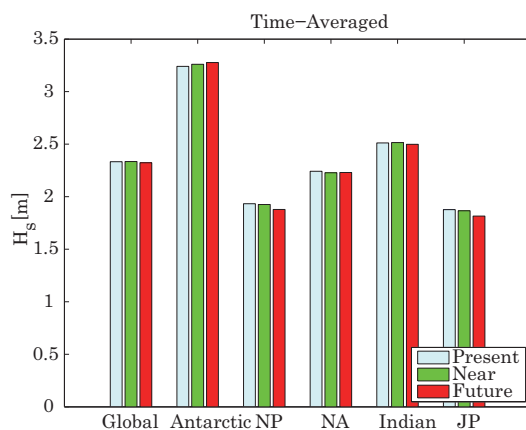


図-3 領域平均した $\langle H_s \rangle$ の将来変化 (Global: 全球, Antarctic: 南極海, NP: 北太平洋, NA: 北大西洋, Indian: インド洋, JP: 日本近海)

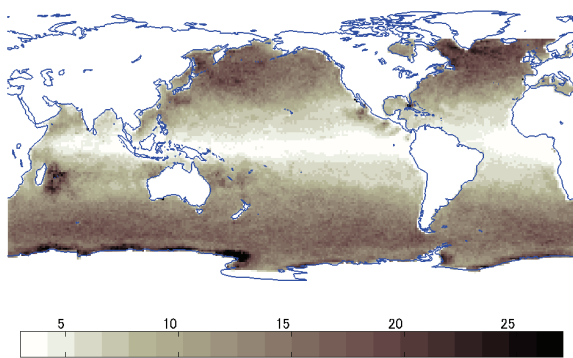
極値資料として年最大値資料を用いる手法が一般的であるが、本研究で取得できる年最大値資料は25年分であり、極値資料として十分な量ではない。そこで、ある閾値より大きいデータを取り出して解析するPOT(Peak Over Threshold)解析を採用する。ある閾値を超えるデータを取り出し、その閾値超過データの時間的に連続な部分を1連の高波現象と考える。ピーク同士が48時間以内の場合、同じイベント内の現象とした。閾値は、閾値を超えるデータ数が、全データ数の1~5%となるように場所毎に設定し、それぞれの閾値で解析を行った。

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、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。

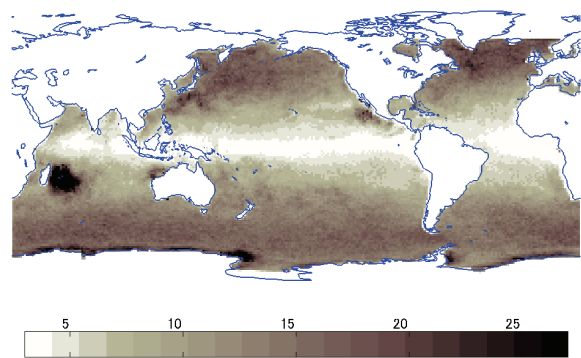
上記の一般化パレート分布による手法に加え、一般的な(合田, 2008)な波浪の極値解析をもとに、ワイブル分布(形状母数 $k = 0.75, 1.0, 1.4, 2.0$)と極値I型分布、極値II型分布(形状母数 $k = 2.5, 3.3, 5, 10$)の中から、最小二乗法により最適分布関数を選択する手法によっても50年確率値を求めた。二つの手法の差異から予測結果の不確実性を考察し、以下では一般化パレート分布を当てはめる手法をAとし、ワイブル分布・極値I型分布・極値II型分布の中から最適関数を選択する手法をBとする。

(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年確率波高を図-4に示す。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東沖、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



(a) 現在気候



(b) 将来気候

図-4 全球の50年確率波高 [m]

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。

6. 防波堤の滑動量解析

前節までの検討を踏まえ、地球温暖化に伴う設計供用期間内の外力変化を考慮して、防波堤の滑動量解析を行い、外力変化が滑動安定性に及ぼす影響を検討する。波堤の滑動安定性に影響を及ぼす外力の中で、地球温暖化による外力変化として、

1. 海面上昇
2. 高潮偏差の増大
3. 来襲波浪

の増大を対象とした。設計供用期間中の外力は、基本的に線形増加すると仮定し、極値分布で求まる高潮偏差と沖波波浪は、現在と将来の極値分布から毎年の値を抽出し、発生年次を考慮して、それらを線形補完することで、その年に発生する値を求めた。

設計供用期間中の防波堤の滑動量解析は、下迫・高橋(1998)に基づいた高山ら(2010)の滑動量算定モデルを用いた。計算条件として、IPCCの日本近海の将来予測値、0.26m/100年の海面上昇を考慮し、高潮偏差は、河合ら(2004)が予測した大阪地点での極値分布を採用した。来襲波浪条件は、前節の値を用いた。想定する防波堤は、以下の条件を考えた

1. 設置水深 7.0m, 堤体幅 10.0m, 天端高 15.0m
2. 設置水深 22.5m, 堤体幅 23.0m, 天端高 27.0m

3. 設置水深 3.8m, 堤体幅 4.8m, 天端高 6.4m

気候変動に伴う、滑動量の出現傾向を把握するために、0.1m, 0.3m, 1.0mの滑動量に対する発生確率を算出した。図-5はその結果であり、期待滑動量の増加が顕著な a) 波浪増大のみと、b) 全てを考慮した場合では、比較的小規模な0.1m~0.3mの滑動量の発生確率は殆ど変わらないが、1.0mを超えるような大規模被災の発生確率は著しく増加することがわかった。ついで、設置水深による影響について調べた。設置水深を7m, 10m, 15mと変化させた場合について、現在の期待滑動量に対する地球温暖化を考慮した場合の増加率を算出した。図-6はその結果である。波浪増大のみを考慮した場合では、水深が深くなると碎波の影響を受けずに大きな波浪が来襲しやすいため、滑動量の増加率は大きくなった。一方、c) 海面上昇のみと d) 偏差増大のみを考慮した場合は、水深が浅くなると水位上昇の影響を大きく受けるため、滑動量の増加率は大きくなる。すべての影響をを考慮した場合では、波浪増大による影響が大きく、水深増加に伴って増加率が大きくなった。

7. 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高波の明確な強化とその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、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、高波の強化により増加する海域と高波域の拡張

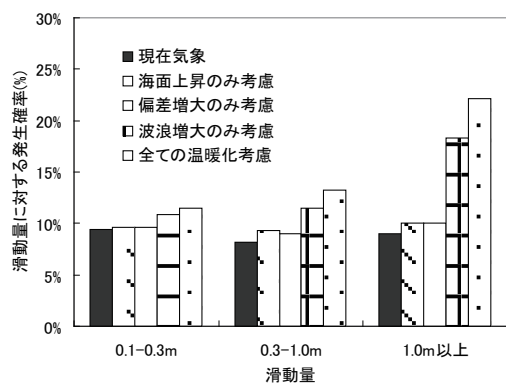


図-2 滑動量の出現確率結果 (h=10m)

図-5 滑動量の出現確率結果 (h=10m)

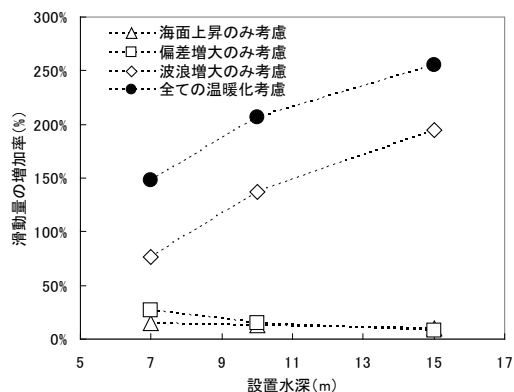


図-3 外力変化に伴う期待滑動量の増加率

図-6 外力変化に伴う期待滑動量の増加率

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。

さらに、地球温暖化に伴う海面上昇や高潮偏差の増大、来襲波浪の増大を対象として、設計供用期間中の外力変化の影響を考慮した防波堤の滑動量解析を実施した。滑動を許容した防波堤の設計では、地球温暖化に伴う設計供用期間中の外力変化を考慮する必要があることがわかった。

参考文献

- 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., Swail, V.R. (2006): Climate change signal and uncertainty in projections of ocean wave heights, *Climate Dynamics*, 26(2), pp.109-126.
- 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.