

平成22年度（財）港湾空港建設技術サービス センター研究開発助成報告書

助成番号：平成23年1月28日付 第10—3号

研究開発項目：(④) 建設マネジメントに関するもの

気候変動を考慮した海岸防護施設の 耐波設計とライフサイクルマネジメント に関する研究

平成24年4月30日

京都大学防災研究所

間瀬 肇

1. 日本周辺の冬季波候とテレコネクションパターンの関係

波浪の長期変動が気候変動と何らかの関係を持つことが知られている。現在、地球温暖化による気候変動への影響が明らかにされつつあり、沿岸への影響評価のために、気候変動に対応した波浪の長期変化予測が求められている。

大気の大規模な循環場が組織化されたパターン（テレコネクションパターン）で変動していることが知られており、テレコネクションパターンの変化は地域ごとの気候変動・変化に大きく関わっている。例えば、北半球においては、北大西洋振動の長期トレンドとストームトラックの長期トレンドが関係していると言われている(IPCC,2007)。そのため、波浪の長期変化を予測するために、テレコネクションパターンと波浪の関係を明らかにすることは興味深い課題である。

一方波浪の長期変化予測にあたっては、予測の不確実性も評価しなければならない。一般に不確実性を評価する方法として、数種類の気候モデルや温暖化シナリオを用いて波浪を予測し、そのアンサンブル平均が最も妥当な予測値とし、そのアンサンブル平均からのばらつきを不確実性と定義することが多い(Wang・Swail, 2006)。気候モデルの計算結果から波浪を求めるには、回帰式などを用いた統計的手法と波浪モデルを用いた力学的手法がある。これまで波浪モデルを用いて直接波浪の将来変化を予測した例(森ら, 2010)があるが、直接計算は負荷が大きく、様々なモデル・シナリオを用いたマルチアンサンブルには向かない。統計的手法は、観測等から得られた関係が温暖化条件下の将来において維持されない可能性があるものの、計算負荷が小さいのでマルチアンサンブルに向いている。

そこで、本研究では、マルチアンサンブル予測への適用を目指し、森ら(2010)の波浪の直接計算結果と再解析値を用いて、テレコネクションパターンと大気場と波浪のマクロ的な関係を明らかにする。

1.1 解析方法とデータの概要

台風の影響を除くため、日本周辺の冬季波浪（12～2月）に解析を絞り、次の3点、(1) 日本周辺の波浪と大気場の局所的な空間分布の関係、(2) テレコネクションパターンと日本周辺の気圧配置・波浪の関係、(3) テレコネクションパターン・気圧配置・波浪の将来変化について検討する。

項目(1)では、気象庁・気象研究所による全球気候モデルMRI-AGCM3.1S (Kitoh ら, 2009)の海面更正気圧 (SLP)、海上風 (U_{10}) と、その U_{10} から波浪モデルで計算された有義波高 (H_s) データ (森ら, 2010) を用いる。これらを GCM の SLP, U_{10} , H_s と記述する。さらに、ヨーロッパ中期気象予報センターの再解析値 ERA-40 を用いて同様の解析を行う。これらのデータは6時間毎の瞬時値である。

項目(2)では、テレコネクションパターンを求めるために 500hPa 面高度 (Z500) の月平均値を用い、テレコネクションパターン、気圧および波高の月平均値の関係を解析する。ここでは、アメリカ国立気象局と大気研究センターの再解析値 (NCEP/NCAR 再解析値)、ERA-40、GCM による解析値を用いる。

項目(3)では GCM の現在気候値と A1B シナリオ温暖化条件下（大気中の温室効果ガス濃度が 100 年間で約 2 倍）での将来気候値を比較し、テレコネクションパターン、気圧配置および波浪の将来変化を解析する。ここでは、代表値として Z500, SLP, H_s の月平均値を用いる。解析に用いたデータセットの詳細を表-1 に示す。

表-1 データ概要

モデル		期間 (年)	解像度	データ名
再解析値	ERA-40	1959-2001	2.5 °	Z500, SLP, U_{10} , H_s
	NCEP/NCAR	1951-2000	2.5 °	Z500, SLP
温暖化実験 MRI-AGCM3.1S	GCM/現在気候	1979-2003	1.25 °	Z500, SLP, U_{10} , H_s
	GCM/将来気候	2075-2099	1.25 °	Z500, SLP, U_{10} , H_s

1.2 解析値による大気場と波浪の局所的な関係

まず始めに大気場と波高のメソスケールの関係を明らかにし、大気場の情報から波高を統計的に求める関係式を求める。Wang・Swail (2006)は、有義波高の月平均値等の波高統計量を、海面更正気圧(SLP)の月平均値を用いた回帰式から求めている。これに対して本研究では、SLP, U_{10} , H_s の物理的関係を考慮に入れながら、解析値を基に回帰式を構築する。このとき、それぞれの値は6時間毎の瞬時値である。大気の運動(風)に関しては、気圧傾度力が外力となる。また、波を発達させる海面応力は U_{10} の2乗の関数となる。このことから、SLPの空間勾配・ U_{10} の2乗値・有義波高を変数にとり解析を進めた。

本研究で用いているデータの空間解像度は $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ と $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ であるが、SLPの空間勾配は、格子点を中心とした $20^\circ \times 20^\circ$ の範囲の平均値、 U_{10} の2乗値と H_s には、 $6.25^\circ \times 6.25^\circ$ の平均値を用いた(図-1参照)。

まず、SLP勾配と U_{10} の関係について考察する。厳密に、大気の運動は気圧傾度力、重力、コリオリ力、摩擦力によって変化するが、ここでは重力、コリオリ力、摩擦力を無視する。図-1に示した領域における時々刻々のSLP勾配と U_{10} の2乗値をプロットすると、図-2のように線形的な関係を得る。低気圧性の傾度風を仮定し、図-2に、動径方向の距離 r を $\infty, 500, 300, 200, 100\text{km}$ とした U_{10}^2 の値を追加した。これによりプロット点のばらつきは、 r によるものであることが分かった。

ついで、 U_{10} と H_s について考察する。森ら(2011)は、解析値をもとに無限フェッチを仮定したとき、月平均の H_s は U_{10} の2乗値に比例し、その傾きは $0.2 \sim 0.3$ 程度であるとしている。本研究における6時間の瞬時値に関しても、この関係を満たしていた。

SLP勾配- $U_{10}^2-H_s$ (SUH)の関係は、GCMおよびERA-40のいずれのデータにおいても成り立ち、 H_s とSLP勾配の関係においても線形の関係が成り立つことが分かった。ただし、2つのモデルで傾きに差が見られた。そこで、 H_s およびSLP勾配を、それぞれのモデルにおける平均値と標準偏差で基準化し評価した。この操作により、いずれのモデルにおいても $H_t = P_t$ という関係式を得ることができた。ここで、 H_t はある時刻 t における基準化 H_s 、 P_t はある t における基準化SLP勾配であり、図-3に示した通りである。

ここで取り扱うのは気候値であり、この関係式の推定精度について25年分のパーセンタイル値で検証した(図は省略する)。この推定精度は良好であり、GCMおよびERA-40で同等であった。これに

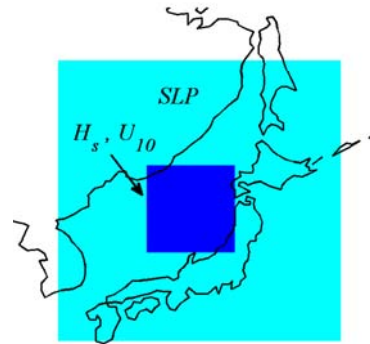


図-1 ある点を代表としたメソスケール
調査範囲設定例

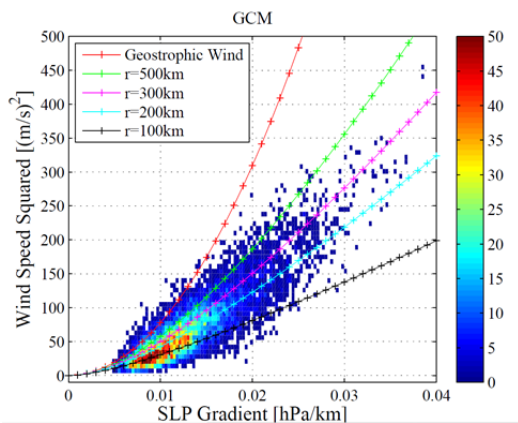


図-2 SLP勾配と U_{10} の2乗値の関係(カラーはデータ数)

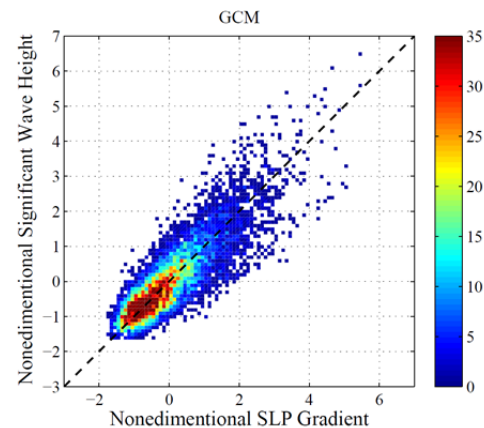


図-3 無次元 SLP 勾配と無次元 H_s の関係(カラーはデータ数)

より、大気場から数年といった長期間の H_s の気候値を高精度に予測できることがわかった。この関係式を用いることにより、様々な温暖化シナリオ・モデルに基づく長期的な波浪の変化を統計的に予測することが可能となる。ただし、次元をもった量に戻す際に、GCM の値を用いれば、GCM により計算したものと同等の H_s が得られ、ERA-40 を用いるなら、ERA-40 の H_s に即した値を得ることになる。ただし、うねりが支配的な低緯度で関係式の精度は悪くなる。

1.3 テレコネクションパターン、気圧配置、波浪の関係

テレコネクションパターンのある時刻における発生の強さを表わしたものを時係数（インデックス）と記述する。インデックスの算出は次のように行う。まず、再解析値からテレコネクションパターンのローディングパターン（変動パターンの空間分布）の同定を、Climate Prediction Center (CPC) の方法に基づいて行った。NCEP/NCAR 再解析値の Z500 偏差場データの過去 50 年分(1951～2000 年)の月平均値に回転経験直交関数解析を適用し、表-2 のように北緯 20° 以北におけるパターンを 8 つ同定した。ただし、北極域ほど面積に対する格子数が多くなるため、北極域の寄与が大きくなる。この対処方法として、各格子点の寄与が均等になるように格子を切りなおした。求めたローディングパターンをそれぞれのモデルの Z500 偏差場データに投射することによりインデックスを算出した。

表-2 解析に用いたテレコネクションパターン（分散寄与率は、領域内の全変動成分に対するそのパターンの変動量の割合を表す）

パターン名	分散寄与率(%)
North Atlantic Oscillation	9.8
Pacific North America (PNA)	9.7
East Atlantic / Western Russia	7.7
Western Pacific (WP)	7.6
Polar/Eurasia (POL)	7.3
Scandinavia	7.0
Tropical/Northern Hemisphere	6.8
East Atlantic	5.5

前章の大気場と波浪の局所的な関係の解析で、SLP 勾配と H_s の関係が明らかになったので、ここでは、SLP 勾配とテレコネクションパターンの関係について検討する。特に断らない限り NCEP/NCAR 再解析値の結果を示す。図-1 の領域の SLP 勾配とインデックスの相関解析を行うと WP との相関係数が最も高く -0.40 の逆相関となった。WP のローディングパターンは、シベリアと北太平洋西部に気圧偏差場の中心を持つダイポール構造で表わされる。CPC によると、WP パターンが正のフェーズの合は、北太平洋西部の低緯度で気温が下がり、シベリア東部で気温が上がる傾向にあり、また、北太平洋高緯度で降水量が増加し、北太平洋中央部で降水量が減少する、という気候の変化をもたらす。

図-1 の領域において 1 つのインデックスを用いた解析に加え、複数のインデックスを線形結合したものとの相関をみると、2 つのときには 0.45、3 つのときには 0.47、8 つすべて用いたときには 0.49 と微増する。複数のインデックスを用いたとき相関係数はやや改善されるが、この領域においてはやはり WP が支配的である。これは、図-1 の領域以外の西日本の南沖・東日本の東沖といった太平洋側を対象としたときにも、WP が最も強い影響を示した。また、ERA-40 においても同様の結果を得た。

ここまで、図-1 に示したような日本付近の特定地域の SLP 勾配とインデックスの相関係数を求めたが、次に、SLP 勾配とインデックスの相関係数の北半球における空間分布について解析した。WP インデックスと各格子点における SLP 勾配の相関係数の空間分布を北緯 20° 以北について図-4 に示す。北太平洋中央部において北に向かって、+-+- の正負帯状の構造となり、日本周辺においては、逆相関となって最大約 -0.5 程度であった。

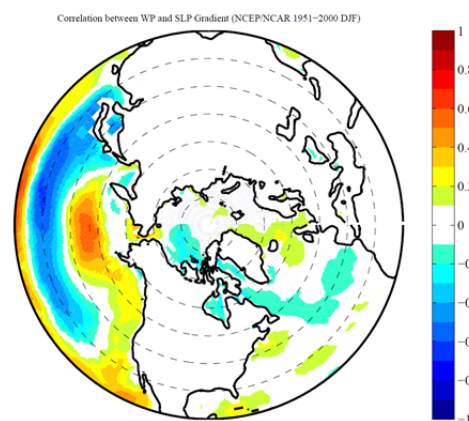


図-4 Western Pacific (WP) パターンと SLP 勾配の相関係数

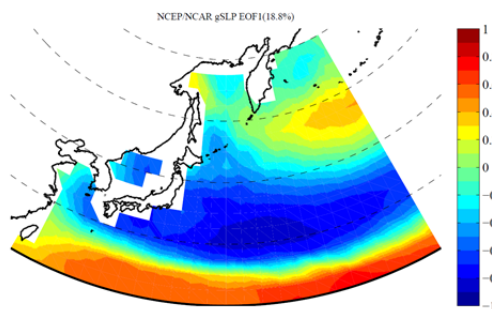


図-5 NCEP/NCAR における SLP 勾配の EOF 第 1 モード

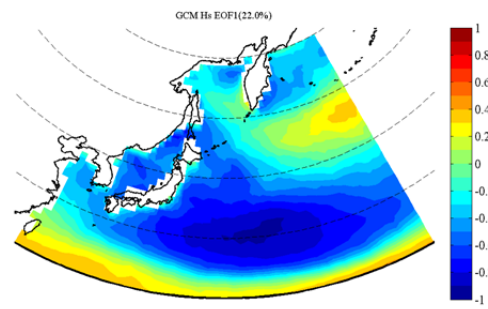


図-4 GCM (現在気候) における H_s の EOF 第 1 モード

このように相関係数の空間分布に組織的構が見られることから、SLP 勾配は、空間的に組織立って変動していることが考えられる。そこで、日本を含む北太平洋西部(北緯 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 東経 $120^{\circ} \sim 180^{\circ}$)において、各格子点の標準偏差で無次元化した SLP 勾配偏差場に EOF 解析を適用し、卓越する時・空間変動パターンを抽出した。最も卓越する変動パターンである EOF 第 1 モードは図-5 となった。この図は、SLP 勾配が帯状に組織立って変動することを表わしている。ERA-40 と GCM (現在気候)も共に同様な南北方向の帯状構造を示した。また、このパターンを各時刻の SLP 勾配偏差場に投射して作成した時係数と、WP インデックスとの相関係数は 0.68 であった。すなわち、この領域に卓越する SLP 勾配の組織的な変動は、WP パターンの出現と関連していることを示唆している。さらに、インデックスを複数用いてもそれほど相関係数は改善せず、すべてのインデックスを線形結合させたものに対しては、相関係数は 0.78 となった。

WP パターンと SLP 勾配の時空間変動パターンの関連を示したが、次に SLP 勾配と H_s の時空間変動パターンについて検討した。ここでは、 H_s データを有する ERA-40 と GCM (現在気候) を使用した。ERA-40 の SLP 勾配の EOF 第 1 モードの時係数は、 H_s の EOF 第 2 モードと相関係数が高く 0.70 であった。 H_s の EOF 第 2 モードは帯状構造であったが、第 1 モードは帯状構造を示さず、SLP 勾配の変動パターンとの関係は、 H_s の EOF 第 2 モードに比べて小さかった。 H_s の EOF 第 2 モードの時係数は、SLP 勾配の EOF 第 1・2 モードの時係数を線形結合したものとの相関係数が 0.85 となり、SLP 勾配の変動パターンと連動していることが分かった。一方で、GCM において SLP 勾配の EOF 第 1 モードと H_s の EOF 第 1 モード(図-6) は相関係数が 0.87 であり、2 つの第 1 モードは連動していると考えられる。

本研究では、ERA-40 と GCM の上記 H_s の EOF モードの違いについては深く検討しないが、大気場と波浪の局所的な関係の章で求めた関係を考慮すると、SLP 勾配が大きい(小さい)ときは H_s が大きく(小さく)なるので、GCM において見られる SLP 勾配と H_s の EOF 第 1 モードが同様のパターンで変動することの方が、ERA-40 の結果より妥当であると考えられる。ただし、いずれのモデルにおいても、SLP 勾配と H_s は帯状構造の変動パターンを持ち、高い相関を持つ。

1.4 温暖化実験による冬季の将来変化

これまでの結果に基づき、GCM の温暖化条件下におけるテレコネクションパターンのインデックス、SLP 勾配、 H_s の将来変化について調べた。GCM (将来気候、2075~2099 年) の SLP 勾配の平均値から GCM (現在気候、1979~2003 年) の平均値を引いたものを図-7 に示す。ここでも、北に向かって帯状の空間分布が得られた。日本を含めた北太平洋西部においては、SLP 勾配の将来変化の空間分布が、WP インデックスと SLP 勾配の相関係数の空間分布および EOF 第 1 モードに類似していることが分かった。つまり、将来気候では WP インデックスが正の方向に変化していると考えられる。そこで、GCM が WP パターンを再現できていることを確認し、温暖化条件下における WP インデックスの将来変化

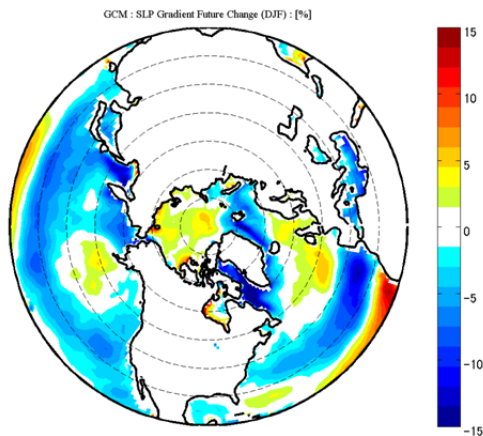


図-7 SLP 勾配の将来変化[%]

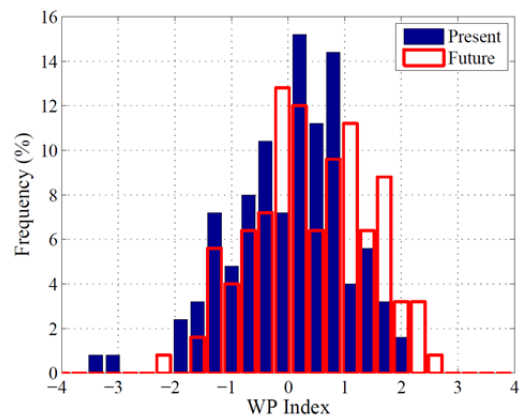


図-8 WP インデックスの将来変化

を図-8 のように求めた。その結果 WP インデックスは正の方向に変化を示すことがわかった。

以上, WP インデックスの将来変化傾向, WP インデックスと SLP 勾配の相関係数分布, 北太平洋西部における SLP 勾配の将来変化の空間分布をまとめると, 地球温暖化により, WP パターンの発生傾向が現在気候に比べ正の方向に偏り, それが SLP 勾配の変化につながる。特に, WP パターンの正方向への偏りが, SLP 勾配の EOF 第 1 モードの正の方向への偏りを引き起こす。その変化により, 日本周辺で SLP 勾配が減少する。さらに, GCM において SLP 勾配の第 1 モードは H_s のものと連動しているため, 図-9 のように H_s の第 1 モードについても正に偏る。その結果, 一連の変化により, 図-10 に見られるように日本近海冬季の波高減少につながると考えられる。森ら(2010) は直接計算により, 温暖化による冬季波浪の変化は, 日本東沖より南沖の方が大きいとしたが, 図-6 のように元来持つ変動が南沖で大きいためと考えられる。

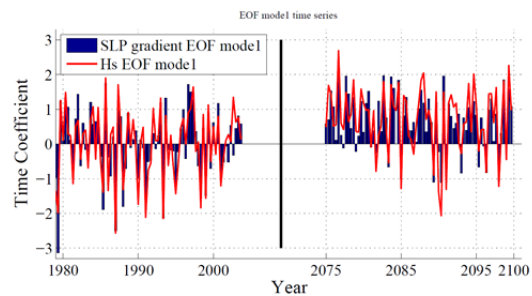


図-9 SLP 勾配と H_s の EOF 第 1 モード時係数の将来変化

SLP 勾配と H_s それぞれの EOF 第 1 モードの時係数の将来変化量から, 空間的な将来変化を求めると図-11 (H_s のみ掲載) となり, 図-10 と比較して変化量を過小評価しているが, EOF 第 1 モードの変化で将来変化の空間分布の大まかなトレンドをある程度表わせることが分かった。特に, 北緯 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ の減少を良く捉えられている。この傾向は第 2, 3 モードまで複数用いてもそれほど変わらなかった。

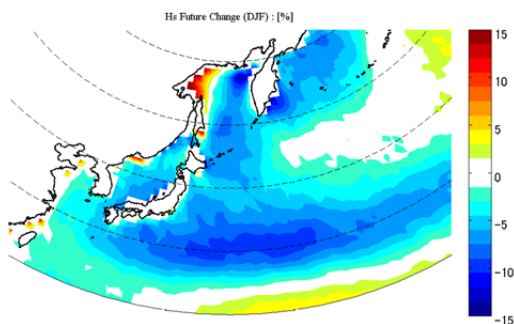


図-10 GCM における H_s の将来変化[%]

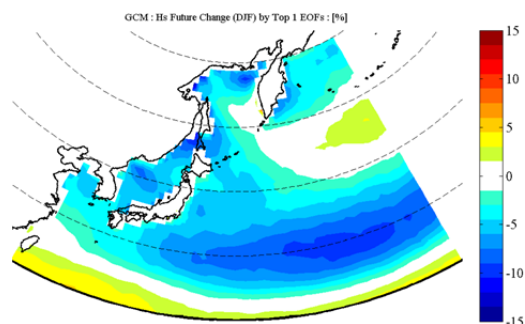


図-11 EOF 第 1 モード時係数変化から求めた H_s 将来変化[%]

ただし、EOF の時係数の将来変化から求めた将来変化の空間分布は、GCM による将来変化を完全に表わしておらず、変動パターン自体が変化する可能性がある。

1.5 まとめ

大気場と波浪の局所的な関係について、SLP 勾配・海上風・有義波高の物理的關係を考慮しながら線形回帰式を構築した。これにより、温暖化に伴う波浪の将来変化を、数種のシナリオ・モデルを用いて簡単に予測することが可能となった。

日本付近の SLP 勾配の変化は、WP パターンの出現特性と関係が最も強かった。SLP 勾配の変動パターンの空間分布は帯状の分布を持っており、その組織的な変動は WP パターンの出現と関係が強い。さらに、SLP 勾配の変動パターンは H_s の変動パターンと連動している。将来変化については、WP パターンが正の方向に変化し、日本付近の SLP 勾配と H_s が減少した。将来変化の空間分布は、SLP 勾配と H_s が現在有する変動パターンと類似していた。温暖化による変化は、変動パターン自体の変化ではなく、変動パターン出現のフェーズの偏りによるものが大きいといえる。

参 考 文 献

- 森 信人・志村智也・安田誠宏・間瀬 肇 (2010) : 地球温暖化による極大波高の変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, pp.1231-1235.
- 森 信人・志村智也・中條壮大・安田誠宏・間瀬 肇 (2011) : マルチモデルアンサンブルに基づく地球温暖化に伴う沿岸外力の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, pp.1191-1195.
- CPC : Climate Prediction Center, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
- IPCC (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 3, Section 6, Cambridge Univ. Press, pp.286-295.
- 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.
- 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.

2. 地球温暖化に伴う海象要因変化が海岸護岸の安全性能に及ぼす影響評価

近年、観測事実から地球温暖化がほぼ明らかになっており、また、種々の温暖化シナリオのもとで気候変動の長期予測が行われている（例えば、IPCC, 2007）。我が国の多くの海岸では、昭和 30 年代後半に設定された計画外力を確定値として、海岸構造物が設計されてきたが、地球温暖化に伴う海面上昇や波の将来変化といった計画外力の変化を考慮して、今後は海岸構造物の設計や維持管理を図らなければならない。

不確定な要素を合理的かつ定量的に取り扱う設計法の一つに信頼性解析法があり、現況の設計条件に対しては、防波堤や消波ブロックの耐波安定性、越波流量に及ぼす影響等が検討されている（例えば、下迫ら, 1997；河合ら, 1997；長尾ら, 2005）。しかし、将来気候における外力状況のもとで、海岸構造物の安全性能を評価した事例は見当たらない。

本章は不確定要因を確率的に取り扱うことができ、合理的な設計が可能となる設計水準レベル 3 の信頼性設計法に基づき、海象要因の変化が海岸構造物（特に海岸護岸）の安全性能に及ぼす影響を評価したうえで、海岸特性に応じた適応策を検討するための方法を提案する。

2.1 信頼性解析および性能関数

(1) 信頼性解析

既往の海岸構造物の設計では、安全率が設計基準値以上であれば構造物の安全性が確保されていると見なす、安全率に基づく設計法が採用されてきた。これに対して、信頼性設計法は構造物の被災モードを特定し、被災が生じる確率を定量的に評価して、それぞれのモードに関する被災確率を許容値以下に抑えようとするものである。信頼性設計法には、被災確率の評価レベルによって、設計水準レベル 3、2 および 1 の 3 通りがある（例えば、星谷・石井, 1986）。ここでは、被災モードに対する被災確率を正しく求めようとする設計水準レベル 3 を採用し、不確定要因の統計的特性やパラメータがすべて既知として与え、破壊生起確率をモンテカルロ法（以下、MCS と称す）により直接計算で算出した。

(2) 性能関数

信頼性設計法では、まず特定した各被災モードに対して、それぞれの被災モードを規定する性能関数 Z を定義する。性能関数は、被災モードごとにそれぞれに関係する設計因子を抽出し、抵抗力と作用力の差などとした数式として表し、 $Z > 0$ であれば被災の事象が生起せず、 $Z \leq 0$ であれば被災が生じると見なす。性能関数は構造物の被災モードごとに異なるが、既往の研究成果（海岸保全施設設計便覧, 2000; FLOODSite, 2007）より、1) 越波による堤防・護岸の崩壊、2) 空洞化した堤防・護岸天端の打込み波圧による陥没、および 3) 波圧によるパラペットの倒壊の 3 つの被災モードを対象とした。越波による護岸の崩壊とは、越波流量 q がある許容越波流量 q_a を越えることと仮定した。これらの被災モードは厳密には独立ではないが、ここではそれぞれ別のものとして解析する。

図-1 はそれぞれの被災モードの模式的に示したものであり、各被災モードに対する性能関数は式 (1) ～ 式 (3) のようである。

- ・越波による堤防・護岸の崩壊

$$Z = q_a - q \leq 0 \quad (1)$$

- ・空洞化した堤防・護岸天端の打込み波圧による陥没

$$Z = \sigma_y - \frac{M(P_v, B)}{Z_d} < 0 \quad (2)$$

- ・波圧によるパラペットの倒壊

$$Z = f_{yk} - \frac{M(P_h, E_p)}{Z_d} \leq 0 \quad (3)$$

ここに、 Z は性能関数、 q_a は許容越波流量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)、 q は越波流量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)、 σ_y は天端被覆工の引張

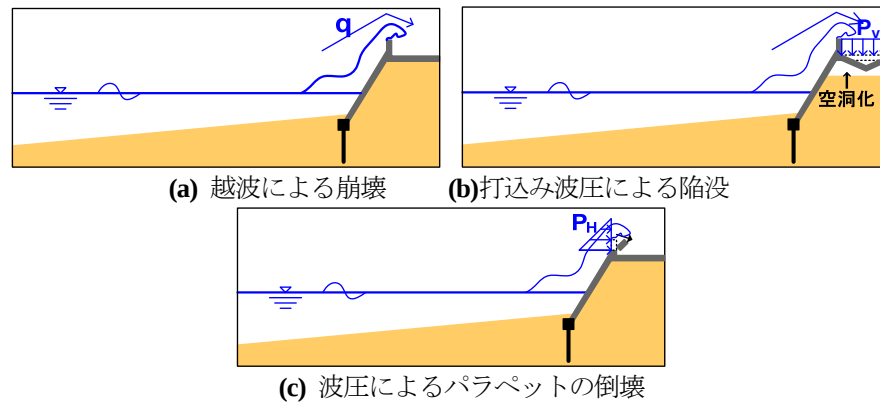


図-1 被災形態と性能関数

り降伏応力度 (N/mm) , $M (P_v, B)$ は鉛直力と空洞幅から求まる曲げモーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$) , Z_d は天端被覆工の断面係数 (cm^3) , f_{yk} は鉄筋の引張り降伏応力度 (N/mm^2) , P_h はパラペットに作用する波圧強度 (kN/m) および E_p は裏込め土砂による受動土圧抵抗力 (kN/m) である.

2.2 対象海岸における地形・海象条件の設定

(1) モデル海岸選定と現在気候での設計条件

既往の研究成果として, 太平洋側での地球温暖化に伴う波浪の将来変化の予測結果はある (例えば, 森ら, 2010) が, 日本海側や瀬戸内海側のものは見当たらない. そこで予測結果のある太平洋側の仙台湾南部海岸, 駿河海岸および高知海岸の3海岸をモデル海岸として選定した.

表-1 は, 国土交通省河川局海岸室監修 (2008) を参考にして, それぞれの海岸ごとの現時点の海底勾配, 堤防形状・諸元および設計条件 (潮位, 波高, 周期) を整理したものである. いずれの海岸においても, 設計波高は 50 年確率有義波高であると仮定した. 潮位, 波高および周期は確率変数であるため, それぞれの確率分布として正規分布 ($\sigma=0.1\mu$) , Weibull 分布 ($\kappa=0.75, 1.0, 1.4, 2.0$) および正規分布 ($\sigma=0.01\mu$) を適用し, 互いの変量は独立として扱った. ただし, 波高と周期の確率分布において乱数を用いて計算した場合, 周期に対して存在し得ない波高が発生する可能性がある. そこで, 周期に対する波高の上限値には, 合田 (2008) を参考に, 次式より得られる波高と周期の関係を用いた.

$$(H_{1/3})_{\text{上限値}} = 0.63 \sqrt{T_{1/3}/3.3} \quad (4)$$

表-1 現在気候における設計諸元および確率分布

Coast Name	unit	Sendai	Suruga	Kochi
Gradient	$\cot\alpha$	1:3	1:1.5	1:0.5
Bottom	$\tan\beta$	1/20	1/10	1/20
Wave Height	m	7.7	4.45	13.0
Wave Period	s	13.0	14.0	15.5
Sea Level	T.P.m	1.60	1.66	2.20
Crown Height	T.P.m	6.2	8.2	9.3
End of Slope	T.P.m	2.0	3.3	3.9

※駿河海岸は離岸堤透過後の波高

表-2 現在気候での確率分布のパラメータ

Coast Name	Sendai	Suruga	Kochi
Distribution of Wave Height	Weibull distribution	Weibull distribution	Weibull distribution
1) $\kappa=0.75$	1) $\kappa=0.75$	1) $\kappa=0.75$	1) $\kappa=0.75$
$A=1.249$	$A=0.721$	$A=2.109$	
2) $\kappa=1.0$	2) $\kappa=1.0$	2) $\kappa=1.0$	2) $\kappa=1.0$
$A=1.969$	$A=1.137$	$A=3.322$	
3) $\kappa=1.4$	3) $\kappa=1.4$	3) $\kappa=1.4$	3) $\kappa=1.4$
$A=2.908$	$A=1.680$	$A=4.908$	
4) $\kappa=2.0$	4) $\kappa=2.0$	4) $\kappa=2.0$	4) $\kappa=2.0$
$A=3.895$	$A=2.248$	$A=6.575$	
Distribution of Wave Period	Normal distribution	Normal distribution	Normal distribution
$\mu=13.0$	$\mu=14.0$	$\mu=15.5$	
$\sigma=0.013$	$\sigma=0.014$	$\sigma=0.016$	
Distribution of Sea Level	Normal distribution	Normal distribution	Normal distribution
$\mu=1.6$	$\mu=1.66$	$\mu=2.20$	
$\sigma=0.16$	$\sigma=0.17$	$\sigma=0.22$	

※ κ :形状母数, A :尺度母数, μ :平均, σ :分散

ここに、 $H_{1/3}$ は沖波波高 (m) , $T_{1/3}$ は沖波周期 (s) である. 表-2 には現在気候で設定した確率分布のパラメータを示す. なお, 海面上昇や波高の増大に対して被災確率を算定する際には, IPCC (2007) の A1B シナリオの想定値より大きな値まで検討した. また, 信頼性解析においては, 護岸勾配や前浜勾配も変動性を考えて, 確率変数として与えることもできるが, 本研究では現況の護岸勾配および前浜海底勾配を固定値として設定した.

(2) 将来気候に対する設計条件

100 年後を想定した将来気候における海象条件については, 海面上昇量は IPCC (2007) の A1B シナリオの全世界平均である +0.3m を設定した. この数値は日本沿岸を対象に将来気候における海面上昇量を提案している野口ら (2010) の研究成果とも整合する. 一方, 将来気候の設計波高は森ら (2010) を参考に, 仙台湾南部海岸, 駿河海岸および高知海岸において, 現在の設計波をそれぞれ 1.08 倍, 1.22 倍および 1.12 倍して, それらを 50 年確率有義波高とした. また, 波の周期は現在気候のそれに比べて 5% 長くなると仮定した. 表-3 は将来気候を想定した設計諸元である. いずれの確率変数についても現在気候と同様の考え方に基づいて, 表-4 に示す確率分布のパラメータを設定した. 海面上昇や波高増大に対する被災確率の算定において, IPCC (2007) の A1B シナリオの想定より大きな値まで検討したことは現在気候と同様である.

(3) 抵抗力と作用力

ここでの抵抗力には, 許容越波流量 q_a ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) , 天端被覆工の引張り降伏応力度 σ_y (N/mm) および鉄筋の引張り降伏応力度 f_{yk} (N/mm²) が該当する. 許容越波流量 q_a は対象としたモデル海岸が, いずれも 3 面張り構造の堤防形式であったため, 合田 (2008) に準じて 0.05 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) とした. また, 天端被覆工の引張り降伏応力度 σ_y (N/mm) は横道・藤田 (1971) および日本道路協会 (2002) で使用される 0.67 (N/mm²) を, 鉄筋の引張り降伏応力度 f_{yk} (N/mm²) は岡安 (2005) の数値を参考に 295 (N/mm²) をそれぞれの被災限界の判定に用いた. なお, σ_y や f_{yk} の算出時に必要となる部材の分布関数パラメータは, 国土交通省港湾局監修 (2007) に基づいて設定した.

一方, 作用力の算出に際しては, 越波流量の算定に式(5) に示す玉田ら (2010) の越波流量算定式を採用した.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_0^{1.3}}} = \begin{cases} 0.0183 \sqrt{\frac{R_{\max}}{H_0}} \left\{ 1 - \left(\frac{R_c}{H_0} \right) / \left(\frac{R_{\max}}{H_0} \right) \right\}^{6.240} & \text{for } 0 \leq R_c \leq R_{\max} \\ 0 & \text{for } R_{\max} \leq R_c \end{cases} \quad (5)$$

ここに, $R_{\max}$ は確率変数であるため, 玉田ら (2010) と同様に, 式 (6) および式 (7) から推定した.

表-3 将来気候における設計諸元

Coast Name	unit	Sendai	Suruga	Kochi
Wave Height	m	8.32	5.42	14.57
Wave Period	s	13.7	14.7	16.3
Sea Level	T.P. m	1.90	1.96	2.50

※駿河海岸は離岸堤透過後の波高

※その他の諸元は表-1 と同様

表-4 将来気候での確率分布のパラメータ

Coast Name	Sendai	Suruga	Kochi
Distribution of Wave Height	Weibull distribution 1) $\kappa=0.75$ $A=1.349$ 2) $\kappa=1.0$ $A=2.126$ 3) $\kappa=1.4$ $A=3.140$ 4) $\kappa=2.0$ $A=4.205$	Weibull distribution 1) $\kappa=0.75$ $A=1.003$ 2) $\kappa=1.0$ $A=1.580$ 3) $\kappa=1.4$ $A=2.331$ 4) $\kappa=2.0$ $A=3.123$	Weibull distribution 1) $\kappa=0.75$ $A=2.363$ 2) $\kappa=1.0$ $A=3.725$ 3) $\kappa=1.4$ $A=5.500$ 4) $\kappa=2.0$ $A=7.365$
Distribution of Wave Period	Normal distribution $\mu=13.7$ $\sigma=0.0137$	Normal distribution $\mu=14.7$ $\sigma=0.0147$	Normal distribution $\mu=16.3$ $\sigma=0.0163$
Distribution of Sea Level	Normal distribution $\mu=1.90$ $\sigma=0.19$	Normal distribution $\mu=1.96$ $\sigma=0.20$	Normal distribution $\mu=2.50$ $\sigma=0.25$

※ κ : 形状母数, A : 尺度母数, μ : 平均, σ : 分散

$$(R_{\max})_{99\%,100} = 2.15R_s = 1.54R_{2\%} \quad (6)$$

$$R_{2\%}/H_0 = 2.99 - 2.73 \exp(-0.57 \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0}) \quad (7)$$

ここに、 $\tan \beta$ は波の打上げ高と碎波水深地点の2点間の実断面の面積から求まる改良仮想勾配、 H_0 と L_0 は沖波波高 (m) と沖波波長 (m) である。

打ち込み波圧の算定には、今井ら (2009) および清水ら (2010) を参考に、式 (8) の打ち込み波圧算定式を定式化したものを採用した。今井ら (2009) および清水ら (2010) は、道路護岸を対象に越波による打ち込み波圧に関する水理模型実験を実施し、打ち込み波圧と波浪の関係、波浪と越波流量の関係をj得ている。これらから越波流量と打ち込み波圧の関係を整理し、玉田ら (2010) の越波流量算定式より得られた越波流量から、打ち込み波圧を推定できるように定式化した。

$$p = 10,828q \quad (8)$$

ここに、 p は打ち込み波圧強度 (kN/m^2) である。

また、対象としたモデル海岸ではいずれも前浜が発達しており、陸上部に堤防・護岸が設置されていた。そのため、富永・久津見 (1971) の波圧式を用いてパラペットへ作用する波圧を算定した。

$$p = 1.8\rho_0 g \tan \beta [(H_0/L_0)^{1/2} - x] \quad (9)$$

$$R_0 = 1.7 \tan \beta [(H_0/L_0)^{1/2} - x] \quad (10)$$

ここに、 p は堤体基部 (地盤面) での波圧強度 (kN/m^2)、 R_0 は波圧が 0 となる地盤面上の高さ (m)、 β は海底勾配、 x は汀線から直立壁までの距離 (m) である。

2.3 被災確率の算定結果

(1) 越波による堤防・護岸の崩壊

モデル海岸ごとの地形・構造物条件に対して、波高増大量および海面上昇量を種々変化させ、許容越波流量に対して MCS で 1 万回の試行を行い、許容値超過確率、すなわち、越波による護岸の崩壊の被災確率を図-2および図-3のように得た。図-2 および図-3 は駿河海岸および高知海岸における許容越波流量に対する被災確率の計算結果であり、(a) 図は波高増大量と被災確率の関係、(b) 図は潮位上昇量と被災確率のj関係を表している。図中のパラメータは、現在気候および将来気候のそれぞれの条件下において、Weibull 分布の形状母数 κ が 0.75, 1.0, 1.4 および 2.0 の場合のものである。

これらによると、いずれの図においても、現在気候よりも将来気候の被災確率は約 5 ～ 10 倍増加している。これらは、気候変動の影響により現在気候に比べて、将来気候の海象条件が厳しくなったためである。また、年最大波高の出現率が Weibull 分布で表される場合、形状母数 κ が大きいほど被災確率が大きくなった。一般に、形状母数

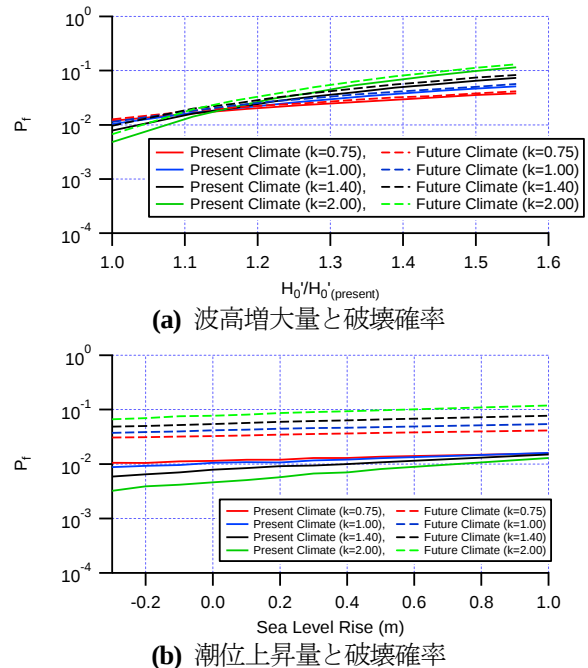


図-2 波高増大量・海面上昇量と破壊確率の関係 (駿河海岸, 海底勾配 1/10)

κ が小さい方が極値の発生確率は大きくなるが、式(4)のとおり波高に当てはめたWeibull分布に上限を設定しているため、全体的に大きな波高の発生確率が高くなる形状母数 $\kappa=2.0$ の被災確率が大きくなったものと考えられる。

図-2に示したとおり、海底勾配が1/10程度と急勾配である駿河海岸では、被災確率は海面上昇量に比べて波高増大量の影響を顕著に受けるが、図-3のように海底勾配が1/20よりも緩い高知海岸では、被災確率には波高増大量よりも海面上昇量の影響のほうが支配的であるといえる。紙面の都合上掲載できなかったが、海底勾配が1/20である仙台湾南部海岸でも高知海岸と同様の傾向を得た。

(2) 堤防・護岸天端の打ち込み波圧による陥没

近年、全国各地で護岸の空洞化の問題が多数報告されていることから、護岸天端上に空洞化が発生した場合を想定した。空洞化幅を0~2.0mまで種々変化させて、天端被覆工の引張り降伏応力度 σ_y に対してMCSで1万回の試行を行い、空洞化護岸に対する打ち込み波圧による堤防・護岸天端の被災確率を算定した。

図-4は高知海岸での堤防天端の陥没の検討結果例である。これによると、空洞が発生していないか、もしくは空洞幅が0.1m以下であれば、いずれの条件下においても被災しなかった。しかし、空洞幅が0.2mより大きくなると被災が生じはじめ、空洞幅1.5m以上になるとすべてのケースにおいて被災に至ることが明らかとなった。仙台湾南部海岸および駿河海岸においても、ほぼ同様の傾向がみられ、すべてのケースにおいて被災する空洞幅は1.5mで一致していた。これを限界空洞幅と称する。海岸堤防・護岸の老朽化、空洞化問題が顕在化する中で、限界空洞幅が一つの指標となるといえる。

(3) 波圧によるパラペットの倒壊

本研究で対象としたモデル海岸は、いずれも前浜があり法先水深が負、すなわち、護岸は陸上部に設置されていた。そのため、鉄筋の引張り降伏応力度 f_{yk} の許容値に対して、パラペットに作用する波圧は著しく小さく、パラペット倒壊に対しては十分な安全性を有していた。

2.4 気候変動に対する海岸構造物の適用策の一考察

将来気候では現在気候に比べて、海面が上昇しかつ波高も増大することが想定される。将来気候の海象状況下において、現在気候と同程度の構造物の安全性を確保するために、堤防天端高の嵩上げと前浜の養浜を例にとり、対策規模の定量化を試みた。堤防天端高および法先水深を種々変化させ、MCSで1万回試行した。

図-5は堤防天端高と被災確率の関係、図-6は法先水深と被災確率の関係を示したものであり、い

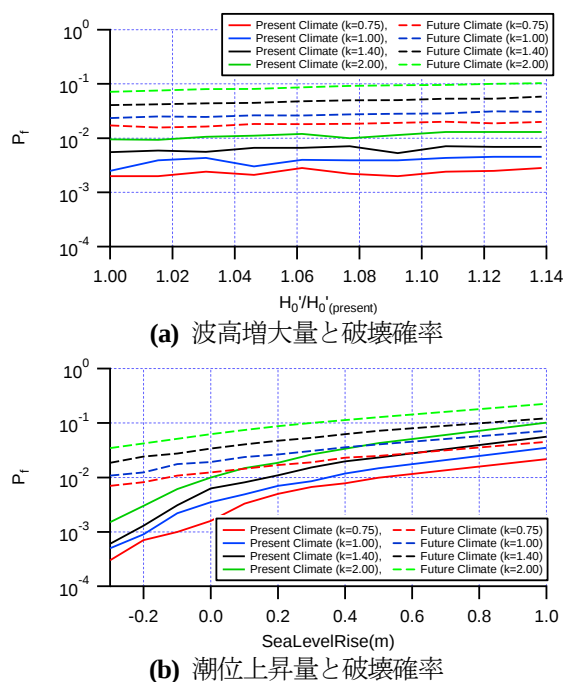


図-3 波高増大量・海面上昇量と被災確率の関係 (高知海岸、海底勾配 1/20)

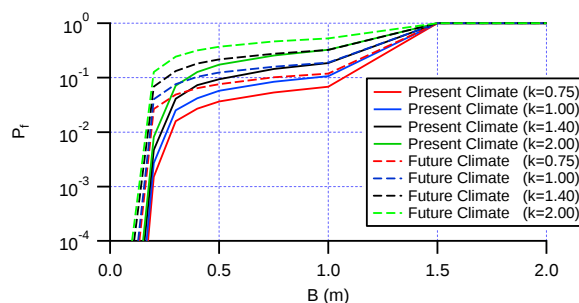


図-4 空洞幅と打ち込み波圧による被災確率 (高知海岸、海底勾配 1/20)

れも高知海岸での検討例である。図-5 によると、将来気候において現在気候と同程度の安全性能を確保する、すなわち、被災確率を同じにするためには、堤防天端高を現在よりも1.2 倍程度嵩上げする必要がある。また、図-6 に示したとおり、将来気候では0.1~0.2 倍法先水深を浅くする対策（例えば前浜の養浜等）を講じることで、現在気候と同程度の安全性が確保される。このような傾向は、仙台湾南部海岸および駿河海岸においても同様に確認された。

2.5 まとめ

得られた主要な結果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 本研究で対象としたモデル海岸においては、現在気候よりも将来気候の各モードの被災確率は約5~10 倍増加する。また、年最大波高の出現率がWeibull 分布で表される場合、形状母数 κ が大きいほど被災確率は大きくなる。
- (2) いずれの被災モードにおいても、構造物の安全性能に及ぼす影響は、海底勾配が1/10 程度の急勾配の場合には波高増大量の影響が大きく、海底勾配が1/20 よりも緩い海岸では海面上昇量の影響が支配的であった。
- (3) 将来気候では現在気候に比べて越波による被災確率が増加するが、現在気候と同程度の安全性能を確保するためには、堤防天端高を1.2 倍程度嵩上げする必要がある。また、法先水深と被災確率の関係から、将来気候では0.1~0.2 倍法先水深を浅くする対策（例えば養浜等）を講じることで、現在気候と同程度の安全性が確保される。
- (4) 空洞化護岸に対する打ち込み波圧による天端陥没の被災では、空洞幅1.5m 以上になるとほぼ被災に至ることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 今井浩平・木村克俊・清水敏明・上久保勝美 (2010)：海岸道路を対象とした越波および打ち込み波圧に関する水理模型実験，平成21 年度土木学会北海道支部論文報告集，第66 号，B-47。
- 岡安徹也 (2005)：高知県菜生海岸における被災事例調査，JICE REPORT vol.8 / 05.11，pp.17-22。
- 河合弘泰・高山知司・鈴木康正・平石哲也 (1997)：潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率，港研報告，第36 巻，第4 号，pp.3-41。
- 合田良実 (2008)：耐波工学—港湾海岸構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp.40-41，p.146。
- 国土交通省河川局海岸室監修 (2008)：海岸50 年のあゆみ，pp.605-609，pp.634-637，pp.652-656。
- 国土交通省港湾局監修 (2007)：港湾の施設の技術上の基準・同解説（下巻），p.835。
- 清水敏明・木村克俊・高橋 翼・山本泰司・上久保勝美・名越隆雄・吉野真史 (2010)：海岸道路を走行する車両の高波によるフロントガラス被害の分析，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 66，No.1，pp.746-750。
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1997)：期待滑動量を用いた防波堤の信頼性設計法，港研報告，第37 巻，第3 号，pp.3-30。
- 玉田 崇・間瀬 肇・安田誠宏 (2010)：波の打上げを考慮した越波流量算定法の提案，土木学会論文

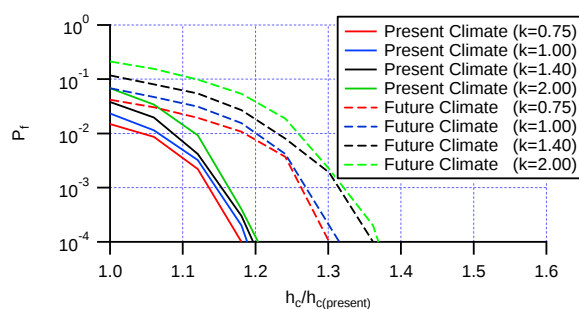


図-5 堤防天端高と被災確率の関係
(高知海岸，海底勾配 1/20)

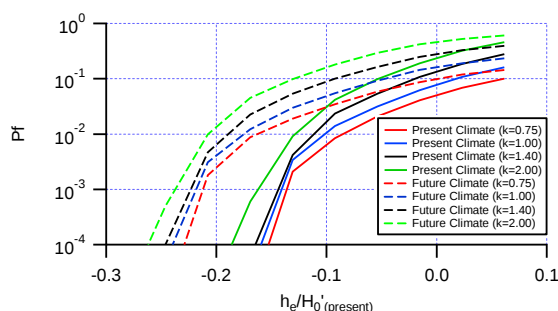


図-6 法先水深と被災確率の関係
(高知海岸，海底勾配 1/20)

- 集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp.926-930.
- 土木学会海岸工学委員会編 (2000) : 海岸施設設計便覧, pp.517-525.
- 富永正照・久津見生哲 (1971) : 海岸堤防に作用する砕波後の波圧, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp.515-221.
- 長尾 毅・藤村公宜・森屋陽一 (2005) : 越波流量の算定制度を考慮した護岸天端高の設定方法に関する研究, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.773-778.
- 日本道路協会 (2002) : 道路橋示方書・同解説, p.147.
- 野口賢二・諏訪義雄・五味久昭・松藤絵理子 (2010) : 気候変動適応に向けたわが国沿岸の既海面上昇基準量の設定にむけて, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp.1256-1260.
- 星谷 勝・石井 清 (1986) : 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 208p.
- 森 信人・志村智也・安田誠宏・間瀬 肇 (2010) : 地球温暖化に伴う極大波高の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp.1241-1245.
- 横道英雄・藤田嘉夫 (1971) : 鉄筋コンクリート工学, 共和出版会, p.7.
- FLOODsite (2007): Failure Mechanisms for Flood Defence Structures, 203p.
- IPCC Fourth Assessment Report (2007): Climate Change 2007, 104p.

3. 地球温暖化による沿岸外力変化を考慮した消波ブロック被覆堤の滑動量解析

2007 年に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」((社) 日本港湾協会¹⁾) では、性能設計が採用された。こうした背景のもと、設計波としての 50 年確率波だけではなく、設計供用期間に発生する高波浪を対象として、変形量を考慮した防波堤の設計法確立に向けた研究が進められてきた。消波ブロック被覆堤の滑動量を考慮した設計法における既往の研究として、下迫ら²⁾ は、下迫・高橋³⁾ の混成堤の滑動量算定手法を消波ブロック被覆堤に拡張し、実海域の構造物設計を行った。また、高山ら⁴⁾ は、下迫らでは考慮されていなかった設計供用期間中の消波ブロックの被災を考慮し、不完全被覆による波圧増大を考慮した滑動量算出法を提案している。これらの研究では地球温暖化に伴う沿岸外力の変化は考慮していないが、地球温暖化による外力変化を考慮して、防波堤の安定性を検討した例がいくつかある(例えば、酒井・岡安⁵⁾、高木ら⁶⁾ など)。しかし、将来変化の設定は最近の気候変動予測に基づくものではなく、想定した将来変化を仮りに与えているだけであった。また、現在から将来への経年的な変化は考慮されておらず、現在と将来の状態のみを対象とした検討であり、設計で重要となる台風による高潮偏差の変化も考慮されていない。

本章では、地球温暖化に伴って変化すると予測される設計供用期間内の沿岸外力の変化を考慮した消波ブロック被覆堤の滑動量解析を行い、外力特性の変化が滑動安定性に及ぼす影響を検討する。

3.1 検討対象外力と解析方法

(1) 検討対象外力

防波堤の滑動安定性に影響を及ぼす沿岸外力要因には様々あるが、本研究では、a) 地球温暖化に伴う海面上昇、b) 台風の強大化等に伴う高潮偏差の増大、c) 台風の強大化等に伴う来襲波浪の増大を対象とする。

a) 海面上昇

2007 年に発表された気候変動に関する政府間パネル⁷⁾ の第 4 次報告書では、温暖化シナリオとして 6 種類のシナリオを想定しており、それぞれに対する気温変化の最良の推定値、予測幅と海面水位上昇の予測幅が報告されている。今世紀末の海面水位に関しては、最低でも 0.18m、最大で 0.59m 上昇すると指摘されている。

森ら⁸⁾ は、図-1 に示すように、CMIP3 の結果をもとに、シナリオ・モデル・アンサンブル平均として日本近海の海面水位の将来変化を (0.26m / 100 年) を計算している。本研究ではこれを設定条件として採用する。

b) 高潮偏差

高潮偏差の将来変化については、高波の条件と同一の気候変動の条件から考えることが望ましいが、高潮は高波よりも台風の経路に鋭敏に依存するため、決定論的に将来変化を推定することは難しい⁹⁾。

このような気候変動に従う台風特性の変化に伴う高潮の変化についての研究は、いくつか検討されている(例えば、河合ら¹⁰⁾ ¹¹⁾ ¹²⁾ および安田ら¹³⁾)。河合らの研究では、橋本ら¹⁴⁾ が示した将来気候下における台風特性の変化に準じて高潮がどのように変化するかを検討している。

海面上昇と比べて、高潮偏差についての将来変化予測の不確実性は大きく、地域に大きく依存するが、本研究では、1 つの可能性として、将来の高潮偏差を河合ら¹¹⁾ が予測した大阪地点での極値分布(図-2)を採用した。

c) 来襲波浪

地球温暖化による台風の強大化、極端化によって来襲する波浪特性の変化について、森ら¹⁵⁾ は A1B シナリオに基づく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や波浪場の将来変化の予測を行った。波浪解析には GCM の海上風を外力としてスペクトル型波浪モデルを用いて予測計算を行い、図-3 に示す I ~ IV の領域に対して、現在と将来の極値分布の変化を示している。

本研究では、来襲波浪として、森らの現在気候 25 年間と今世紀末 (2075 ~ 2100 年) の波

浪解析値から得た領域 II と III の極大値分布を用いた。例として領域 II の極大値分布を図-4、図-5 に示す。森らの結果は、一年を夏季と冬季に分けた極大値資料に基づく極値分布であるので、それぞれの季節における年平均発生数 λ_j を求めた上で年最大値分布を次式で求めた。

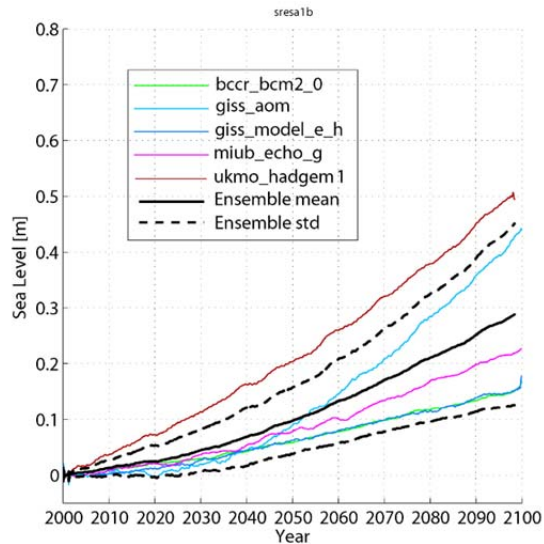


図-1 日本近海の海面上昇の予測値：SRES A1B（森ら⁸⁾）
（黒実線：モデル平均，黒破線：平均＋標準偏差，その他：各GCMの結果）

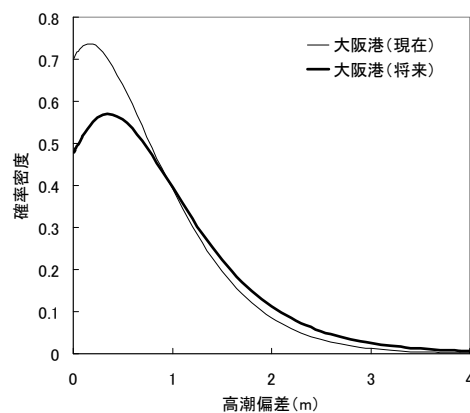


図-2 大阪港の現在と将来の高潮偏差の極値分布（河合ら¹¹⁾）

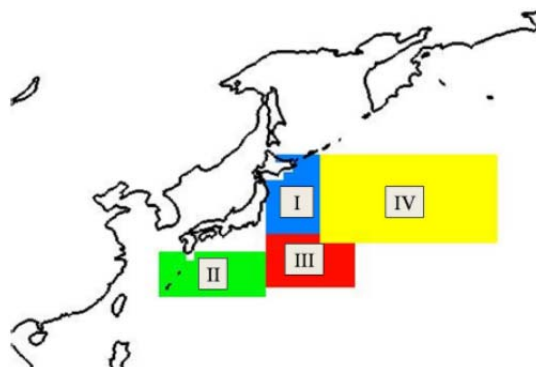


図-3 波浪の極値統計解析対象領域（森ら¹⁵⁾）

$$F(x) = \exp \left\{ - \sum_{j=1}^n \lambda_j [1 - F_j(x)] \right\} \quad (1)$$

ここに、 $F(x)$ ：年最大値分布の発生確率 x の確率値、 $F_j(x)$ ： j 番目の極大値分布の発生確率 x の確率値、 n ：極大値分布の数、 λ_j ：各季の極大値分布に対応する年平均発生数である。森らではそれぞれに領域に対して夏季（6 ヶ月）と冬季（6 ヶ月）の極値分布を求めているため、ここでは、 $n = 2$ である。

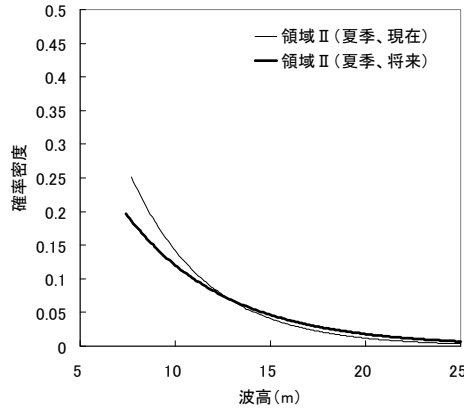


図-4 現在と将来の波高極値分布（森ら¹⁵⁾，領域Ⅱの夏季）

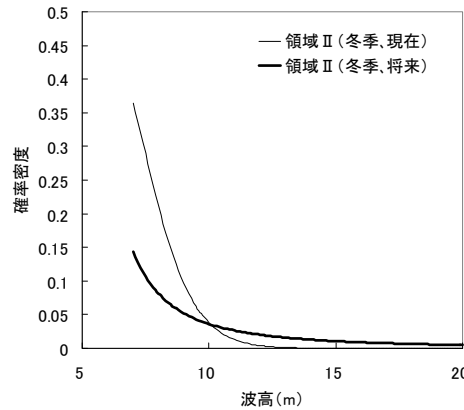


図-5 現在と将来の波高極値分布（森ら¹⁵⁾，領域Ⅱの冬季）

(2) 外力変化の考慮方法

設計供用期間中の外力は、基本的に線形増大すると仮定する。海面上昇については、モデルアンサンブルから平均値として $0.26\text{m} / 100$ 年の上昇が予測されているため、検討対象年に応じて、年間 0.0026m の海面上昇から L.W.L. を設定し、その後に天文潮位による水位変化を考慮した。ここで天文潮位は将来変化しないと仮定している。また、現在気候と将来気候における極値分布から算定される高潮偏差と沖波波浪は、次式のように、発生年次を考慮して線形補完することで、その年に発生する高潮偏差と沖波波浪を求めた。

$$H(x) = H_1(x) + \frac{y}{Y} [H_2(x) - H_1(x)] \quad (2)$$

ここに、 $H(x)$ ：年最大値分布の発生確率 x の確率値 $H_1(x)$ ：現在の年最大値分布の発生確率 x の確率値、 $H_2(x)$ ：将来の年最大値分布の発生確率 x の確率値、 Y ：将来の基準年（本研究では 100 年後を対象としているため $Y = 100$ ）， y ：検討対象の経過年（発生年次）である。

表-1 計算条件（領域II）

項目	値		
沖波波浪 (現在, 夏)	50年確率波浪 20.07m ($\lambda=0.43$) Weibull分布 $k=1.0, A=4.02,$ $B=7.74$		
沖波波浪 (現在, 冬)	50年確率波浪 10.82m ($\lambda=1.47$) Weibull分布 $k=1.4, A=1.80,$ $B=5.72$		
沖波波浪 (将来, 夏)	50年確率波浪 24.79m ($\lambda=0.53$) Weibull分布 $k=1.0, A=5.25,$ $B=7.58$		
沖波波浪 (将来, 冬)	50年確率波浪 10.84m ($\lambda=0.91$) Weibull分布 $k=1.0, A=1.26,$ $B=6.03$		
設置水深 (h)	7m	10m	15m
堤体幅: K_r =1.0	16.8m	18.3m	21.3m
堤体幅: K_r =0.5	14.3m	16.1m	19.3m
天端高: K_r =1.0	4.2m	5.2m	6.8m
天端高: K_r =0.5	3.8m	4.8m	6.4m
高潮偏差	50年確率偏差 2.616m Weibull分布 $k=1.4, A=0.998,$ $B=-0.248$		
高潮偏差 (将来)	50年確率偏差 3.199m Gumbel分布 $A=0.646, B=0.358$		
水位上昇	0.0026m/yr (0.26m/100yrs)		
継続時間	2時間		
設計供用期間	50年		
繰返し回数	10,000回		
要補修被災度	全被覆面積の5%		

表-2 計算条件（領域III）

項目	値		
沖波波浪 (現在, 夏)	50年確率波浪 13.1m ($\lambda=0.14$) Weibull分布 $k=1.4, A=3.42,$ $B=7.63$		
沖波波浪 (現在, 冬)	50年確率波浪 12.3m ($\lambda=0.77$) Weibull分布 $k=1.0, A=1.42,$ $B=7.12$		
沖波波浪 (将来, 夏)	50年確率波浪 21.5m ($\lambda=0.42$) Weibull分布 $k=1.4, A=6.41,$ $B=7.30$		
沖波波浪 (将来, 冬)	50年確率波浪 13.46m ($\lambda=1.16$) FT-II分布 $k=5.0, A=0.90,$ $B=7.84$		
設置水深 (h)	7m	10m	15m
堤体幅: K_r =0.5	12.5m	14.1m	17.4m
堤体幅: K_r =0.3	12.0m	13.5m	13.8m
天端高: K_r =0.5	3.5m	4.5m	4.5m
天端高: K_r =0.3	3.2m	3.2m	2.8m

* 高潮偏差以降の条件は表-1 と同様である。

(3) 解析方法・条件

設計供用期間中における防波堤の滑動量解析は、下迫・高橋³⁾に基づいた高山ら⁴⁾の滑動量算定モデルを用いた。計算条件は日本近海領域 II を表-1 に、領域 III を表-2 に示す。各領域の堤体幅と天端高は、領域 II の 50 年確率波に対して、屈折係数 0.5 と 1.0 の 2 通りの設計波を基に安全率が 1.2 となる断面とし、領域 III に対しても同様に屈折係数 0.3 と 0.5 の 2 通りを対象とした。計算ケースとして、温暖化を考慮する場合と考慮しない場合、さらに、消波ブロックを補修する場合と補修しない場合を対象とした。

3.2 解析結果

(1) 期待滑動量

表-1、表-2 に示す計算条件を基に、各ケースの期待滑動量を算出した。例として領域 II、屈折係数 0.5 の場合の期待滑動量を図-6 に示す。消波ブロックの補修を考慮しない場合、設置水深 7m、10m、15m の時に、それぞれ 12t、16t、20t で期待滑動量がピークをもつ。これは、消

波ブロックが不完全被覆された状態で補修されずに放置された時に、非常に大きい衝撃波圧が作用するため、それよりも軽いブロックを用いた場合の期待滑動量よりも大きくなるためである。一方、消波ブロックの補修を考慮した場合では、補修基準を上回って消波ブロック天端が沈下すると、設計時のブロック天端高まで補修するので、不完全被覆による衝撃波圧は作用しない。このため、ブロックの質量を重くするほど、期待滑動量は小さくなる。本ケースでは、地球温暖化に伴う沿岸外力の増大を考慮した場合、考慮しない場合に比べて、10%～60% 程度期待滑動量が増加していることがわかる。

(2) 必要堤体幅

各ブロックでも同一の安定性を満たす堤体幅をブロックの質量に応じて決めるために、表-3 に示す下迫・多田¹⁶⁾が提案する滑動量に対する超過確率の設定例を用いて、ブロック質量毎の必要堤体幅を求めた。例として領域 II, 屈折係数 0.5 の場合の必要堤体幅を図-7 に示す。被災したブロックを補修しない場合、期待滑動量の算出結果と同様に、設置水深 7m, 10m, 15m の時に、それぞれ 16t, 20t, 25t で必要堤体幅がピークをもつ。これは、期待滑動量算出時と同様に、不完全被覆による衝撃波圧が作用するためと考えられる。

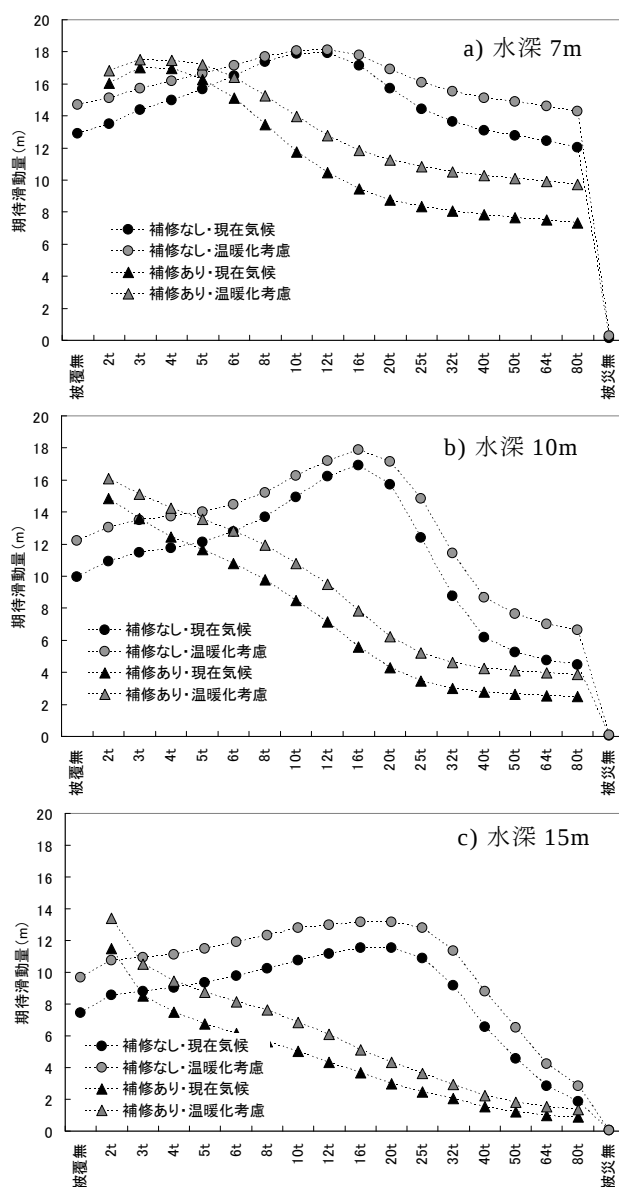


図-6 期待滑動量の算出結果（領域II, 屈折係数0.5）

表-3 滑動量に対する超過確率の設定例（下迫・多田¹⁶⁾）

		超過確率		
		1.0 m	0.3 m	0.1 m
重要度	1.低い	10 %	20 %	50 %
	2.普通	5 %	10 %	30 %
	3.高い	2.5 %	5 %	15 %

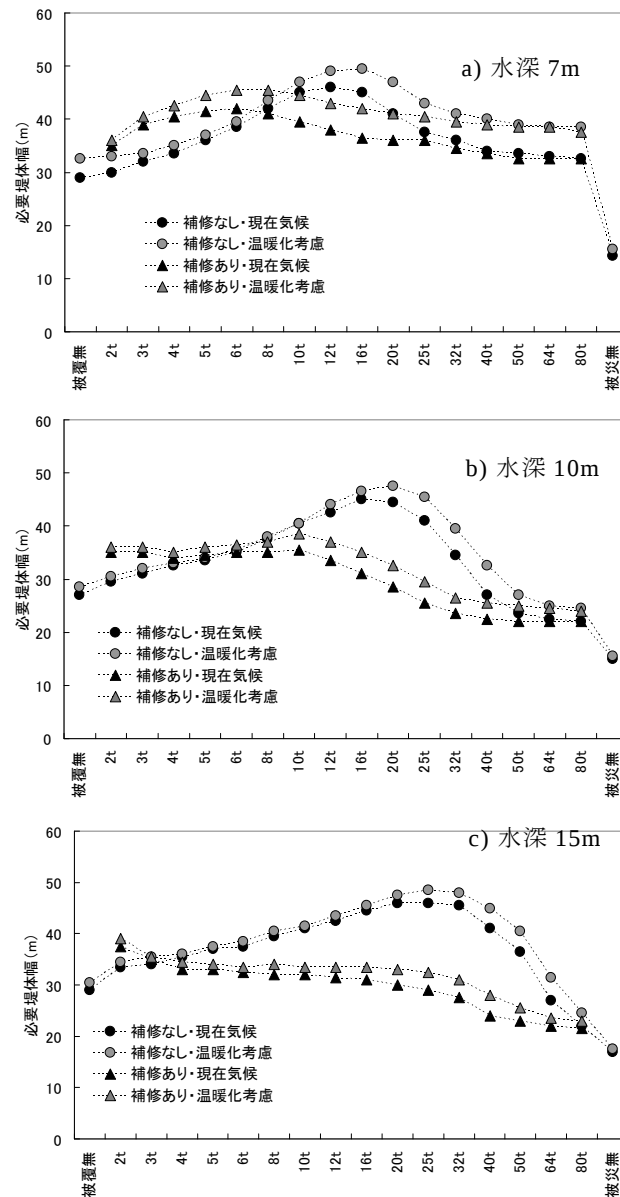


図-7 必要堤体幅の算出結果（領域II，屈折係数0.5）

3.3 考 察

(1) 水深波高比による違い

ハドソン式による必要質量のブロックを用いた場合の期待滑動量と必要堤体幅について、堤体前面波高と設置水深の比（水深波高比）を用いて整理し、図-8 に示す。期待滑動量と必要堤体幅は同様の傾向であるが、水深波高比 1.5～2.0 で最低値を取り、水深波高比が小さくなるか、大きくなると期待滑動量や必要堤体幅が大きくなる。また、水深波高比が小さくなる場合の方が、大きくなる場合よりも期待滑動量等が大きくなる。これは、波浪の砕波の影響によるものである。水深波高比が 2.0 程度よりも大きい範囲は、浅水変形が卓越している状態であり、水深波高比が 1.5 未満の場合、砕波が進行して、波高が小さくなっている状態である。モンテカルロシミュレーションでは、乱数によっては大きな波高が発生することもあり、水深が深い場合ではそのまま防波堤設置地点に到達する。また、水深が浅い場合では、周期が長い波浪が発生した場合、砕波限界波高が大きくなり、期待滑動量等が大きくなったと考えられる。水深波高比が 1.5～2.0 の間では、浅水変形から砕波変形の境界区間であり、設計時の波高が他に比べて高いことも、期待滑動量や必要堤体幅が小さくなる要因と考えられる。

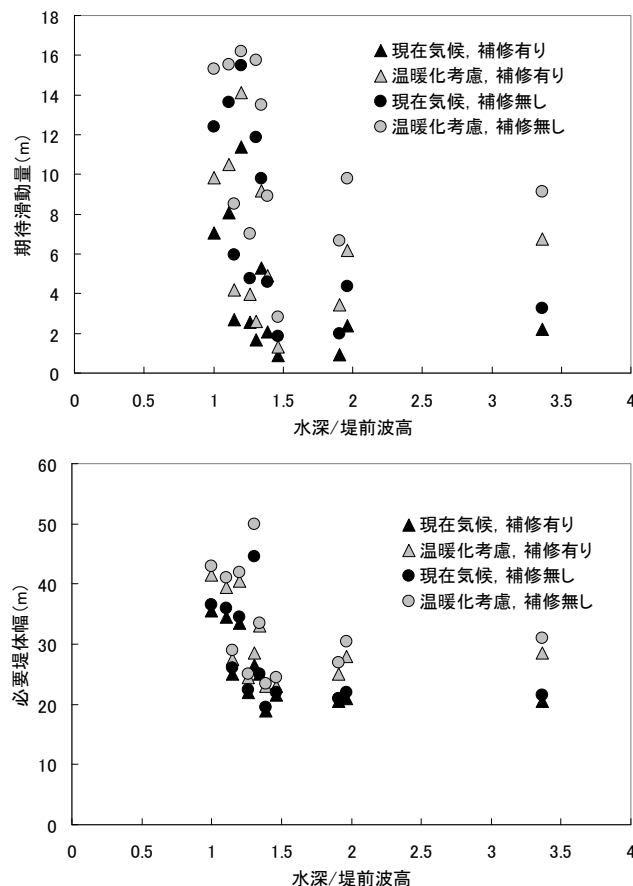


図-8 水深波高比に対する期待滑動量と必要堤体幅

(2) 地球温暖化にともなう増加率

地球温暖化を考慮しない場合に対する考慮した場合の期待滑動量と必要堤体幅の増加率を求め、水深波高比との関係を図-9 に示す。水深波高比が 1.0～1.5 程度では、期待滑動量と必要堤体幅は、それぞれ 150% と 110% 程度で変化は小さいが、水深波高比が 1.5 を超えると、期待滑動量と必要堤体幅ともに増加し、それぞれ、最大で 350% と 140% となった。これは、水深波高比が

大きい場合では、温暖化によって増大した波高がそのまま来襲しやすくなるためと考えられる。一方で、水深波高比が小さい場合では、温暖化で波高が増大しても、砕波の影響によって波高が砕波限界波高よりも大きくならないため、増加率はあまり大きくならない。これらの結果から、地球温暖化による期待滑動量と必要堤体幅への影響は、想定される波高変化だけでなく水深波高比に大きく依存し、特に大水深域で影響が大きくなることがわかった。このため、実際の設計においては、大水深域に設置する防波堤の設計において、地球温暖化による各種影響を考慮する必要がある。

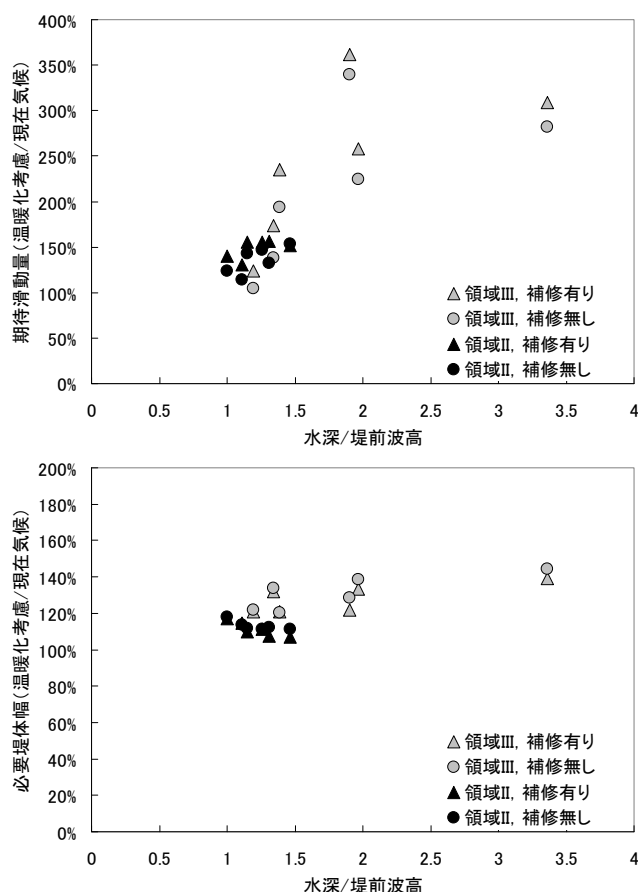


図-9 地球温暖化による期待滑動量と必要堤体幅の増加率

3.4 まとめ

地球温暖化に伴う設計供用期間中の外力変化の影響を考慮して、消波ブロック被覆堤の滑動量解析を実施した。主要な結論は以下の通りである。

- 1) 本計算条件では、地球温暖化を考慮すると、期待滑動量が 100 ～ 350% 程度増加し、必要堤体幅が 100 ～ 140% 程度増加する。
- 2) 温暖化による期待滑動量と必要堤体幅への影響は、想定される波高変化だけでなく、水深波高比に大きく依存する。
- 3) 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長期的な沿岸外力変化を考慮する必要がある、特に大水深域に設置する場合、その影響が大きくなることがわかった。

参 考 文 献

- 1) (社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 2) 下迫健一郎, 高橋茂雄：期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, 第 37 巻, 第 3 号, pp. 3-30, 1998.
- 3) 下迫健一郎, 大寄菜々子, 中野史丈：滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法, 港湾空港技術研究所報告, 第 45 巻, 第 3 号, pp. 1-20, 2006.
- 4) 高山知司, 辻尾大樹, 安田誠宏：消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した期待滑動量算定法の検討, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 906-910, 2007.
- 5) 酒井和彦, 岡安章夫：温暖化による海面上昇を考慮した防波堤の信頼性設計法, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 686-690, 2004.
- 6) 高木泰士, 柏原英広, 柴山知也：港湾構造物に及ぼす気候変動の影響とその定量的予測—防波堤を対象として—, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp. 891-895, 2009.
- 7) IPCC AR4 : IPCC fourth assessment report (AR4), <http://www.ipcc.ch/>, 2007.
- 8) 森 信人, 志村智也, 中條壮大, 安田誠宏, 間瀬 肇：マルチモデルアンサンブルに基づく地球温暖化に伴う沿岸外力の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, pp.I_1191-I_1195, 2011.
- 9) Mori, N.: Projection of Future Tropical Cyclone Characteristics based on Statistical Model, In Cyclones Formation, Triggers and Control, Nova Science Publishers, Inc., 24p., 2011.
- 10) 河合弘泰, 橋本典明, 松浦邦明：確率台風モデルを用いた地球温暖化後の瀬戸内海における高潮の出現確率分布の推定, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 1271-1275, 2006.
- 11) 河合弘泰, 橋本典明, 松浦邦明：確率台風モデルを用いた内湾の高潮の極値と継続時間の推定, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 301-305, 2007.
- 12) 河合弘泰, 橋本典明, 山城 賢, 安田誠宏：確率台風シミュレーションの風場モデルと将来の台風出現特性による確率高潮偏差の変化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No.1, pp. 1256-1260, 2009.
- 13) 安田誠宏, 安藤 圭, 森 信人, 間瀬 肇：地球温暖化に基づく将来台風変化予測とその確率モデリング, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp. 1281-1285, 2009.
- 14) 橋本典明, 河合泰弘, 松浦邦明：地球温暖化を考慮した将来の台風特性の解析と確率台風モデルの導入, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 1221-1225, 2005.
- 15) 森 信人, 志村智也, 安田誠宏, 間瀬 肇：地球温暖化に伴う極大波高の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp. 1231-1235, 2010.
- 16) 下迫健一郎, 多田清富：混成堤の性能照査型設計法における滑動量の許容値設定に関する検討, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 766-770, 2003.