

## 氷海の海象予測と沿岸構造物の安全性評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 25

担当チーム：寒地水圏研究グループ（寒冷沿岸域）

研究担当者：山本泰司、関口浩二、酒井和彦、  
上久保勝美

### 【要旨】

氷海域における波浪推算手法として、海氷密接度に応じて風速を減少させる新たな手法を提案し、その再現性を波浪推算モデル SWAN を用いて検討した。また、オホーツク海の過去 30 年間の波浪を SWAN を用いて追算し、港湾構造物の設計で用いられる 50 年確率波高の近年の変化について検討するとともに、将来的な気象・海象変動を予測した超高解像度全球気候モデルの気象データを用いて将来の 50 年確率波高の変化について検討した。次に将来の海象変化シナリオに対する既存防波堤の安定性をモンテカルロ法にて評価するとともに代表的な維持管理対策の効果を検討した。さらに消波ブロック被覆堤を対象として維持管理のコスト縮減の方策を示した。

キーワード：海象予測、SWAN、オホーツク海、MRI-AGCM3.2S、モンテカルロ法、コスト縮減

### 1. はじめに

地球温暖化の影響により、オホーツク海沿岸の海氷面積が近年減少傾向にあるとともに、将来的にも著しく減少する可能性が高いことが気象庁<sup>1)</sup>により報告されている。さらに、海面水位についても、日本近海において将来的に上昇する可能性が高いことが同じく気象庁<sup>1)</sup>により報告されている。

海氷下の波高伝達率は減少する（堺ら<sup>2)</sup>）ことから、海氷の減少に伴い、北海道のオホーツク海沿岸に将来来襲する波浪は大きくなることが予測される。将来の波浪予測を行う上で、氷海域における波浪推算手法が構築されていることが前提となるが、十分な検討がなされていない。

一方で港湾構造物の設計で用いられている確率波高は、最新の波浪データを含めて算出していない事が多い。しかし、長期的トレンドとして、オホーツク海の海氷の減少傾向および冬期波浪エネルギーの増加傾向にあるから、確率波高自体も変動している可能性がある。このため、北海道周辺海域の過去 30 年分の波浪事象について、波浪推算モデル SWAN を用いて連続計算し、極値統計解析により近年の確率波高の変化について検討する。

また、将来的な気象変動を考慮した 50 年確率波高（以下  $H_{50}$ ）の変化を把握することは、今後の港湾施設の維持管理および防災体制を検討していく上で重要と考えられる。将来的な気象変動を考慮した  $H_{50}$  の変化については、革新プログラム（気象庁・気象研究所）

による最新の超高解像度全球気候モデル（以下、MRI-AGCM3.2S）の温暖化予測実験結果（Mizuta ら<sup>3)</sup>）を波浪推算の外力条件として直接使い、将来気候における北海道沿岸における確率波高の変化を定量的に予測する。

そして、代表的な港湾施設である防波堤を対象に、将来的な海氷面積減少による波浪増大および海面水位の上昇に対する影響をレベル 3 信頼性設計法のモンテカルロシミュレーション（以下、モンテカルロ法）を用いて検討を行うこととした。また、将来の海象変化を考慮した維持管理対策と維持管理上のコスト縮減の方策を示す。

### 2. 氷海域における波浪推算

#### 2.1 検討方法

気候変動による北海道周辺の波浪の将来変化を検討する上で、オホーツク海に面する北海道では海氷の影響を考慮した波浪推算を行う必要がある。しかし、氷海域での波浪推算手法については、通常は海氷で覆われている部分を陸地とみなすことが多く、この場合、氷海域での波浪の発達および減衰が全く考慮されないことが問題となる。このため、従来手法よりも再現性が高い波浪推算手法について波浪推算モデル SWAN を用いて検討する。

計算領域は図-1 のように 2 段階ネスティングで実施した。格子間隔は第 1 領域で  $0.1^\circ$ 、第 2 領域で  $1/30^\circ$  とし、時間ステップは第 1 領域で 10min、第 2 領域で

5min とした。周波数分割数は 30 成分 (0.04~1.0Hz)、方向スペクトル分割数は 36 成分とした。風による波の発達項については Janssen<sup>4)</sup>を用いた。海上風データは気象庁の GSM (0.5°×0.5°) 及び MSM (0.0625°×0.050°) による再解析データを用いた。再現計算期間は、近年 5 カ年で海氷面積が多い 2010 年および面積が少ない 2009 年のそれぞれについて、海氷来襲時期の 1 月~3 月を対象とした。

推算値と比較する観測波浪データは、NOWPHAS 紋別 (水深 50m, N44.318°, E143.607°) を用いた。海氷分布は、気象庁が web 上で公開している 5 日毎の海氷密接度 (海氷密集割合を 10 分位法で表したもの) の画像データから RGB カラー情報を数値化した。

本研究で比較検討する波浪推算手法を表-1 に示す。手法 1-1 および 1-2 は、氷海域を陸域とみなす従来手法であるが、SWAN の HOTFILE コマンドにより、計算終了時点の境界条件を次の計算ステップの初期条件とすることにより、陸域とみなした海水の移動も考慮している。なお、気象庁の海氷分布図の更新間隔と同様に、本検討では 5 日毎に海氷を移動させる。手法 2 は、海氷密接度に応じて風速を低減させる方法である。この手法の詳細は次節で述べる。手法 3 は、海氷を全く考慮せずに、再解析データの風速をそのまま用いる方法とした。

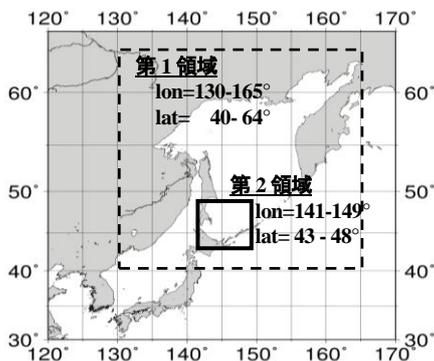


図-1 波浪推算領域

表-1 氷海域の波浪推算手法の一覧

手法	陸域とする海氷密接度の境界	推算期間中の海氷分布	風速の調整
1-1	4 以上を陸域	5 日毎に移動	無し
1-2	7 以上を陸域	5 日毎に移動	無し
2	—	5 日毎に移動	有り
3	—	無し	無し

## 2.2 氷海域における波浪の伝播

氷海域での波浪減衰に関する既往の研究事例としては、Wadhams<sup>5)</sup>がニューファンドランド沖での観測結果を踏まえ、氷板下の波高伝達率  $K_t$  が周期および氷板厚の影響を受けることを確認している。また、堺ら<sup>2)</sup>は水理模型実験により、氷板下の波高が伝播距離  $x$  に応じて指数関数的に減少すること、および氷板厚さ

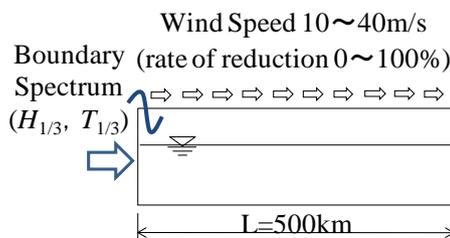


図-2 SWAN 1次元水路イメージ

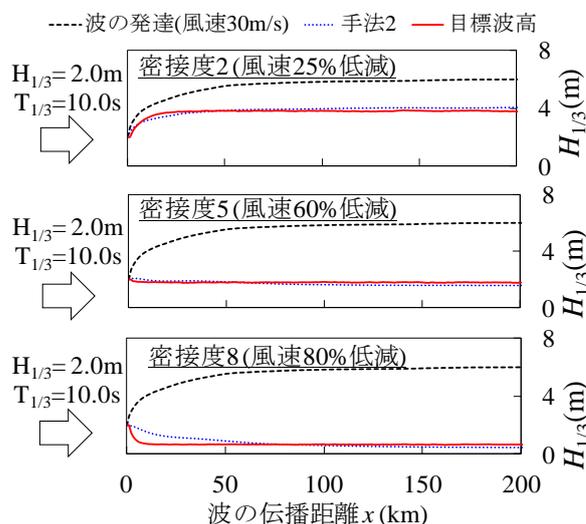


図-3 手法 2 による氷海域波高の再現例

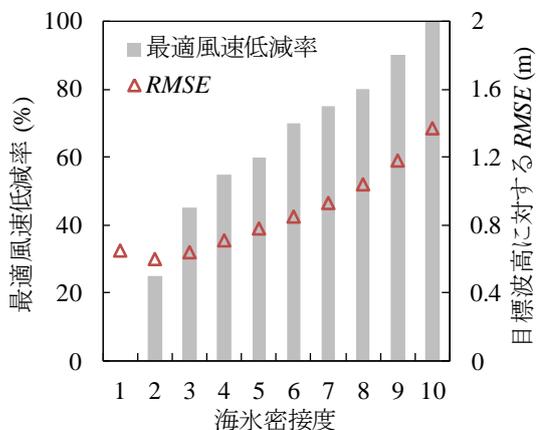


図-4 海氷密接度毎の風速低減率と RMSE の関係

別の  $K_f$  を示している。なお、 $K_f$  は下記の式で表される。

$$K_f = \exp(-Ax) \quad (1)$$

$$A = B \cdot f^n$$

ここに、 $K_f$  : 氷板下の波高の伝達率、 $A$  : 減衰パラメーター、 $x$  : 氷板下の伝播距離(m)、 $B$ 、 $n$  : 氷厚別のパラメーター、 $f$  : 波の周波数(Hz)。

一方、氷海域での波の発達、海氷部分では波を発達させずに式(1)による減衰のみを考慮し、海氷以外の海面では発達項により波を発達させれば良い。これら減衰および発達の両波高を合成した波高（以下、目標波高）が、氷海域において伝播していくものと考えられる。

### 2.3 手法2の1次元数値水路での再現性

SWANにおける波の発達項は Phillips の共鳴機構による線形増大項と Miles の不安定機構に基づく指数関数項の2種類あるが、本検討では Janssen の指数項のみを考慮している。すなわち、風速を小さくすることで、指数関数的に減衰する目標波高を再現できるはずである。このことについて、図-2のSWAN 1次元水路により検討を行った。水路長 500km、水深は底面摩擦等の影響を受けないよう 500m とし、風速を 10 m/s から 40m/s の4ケース、境界での有義波高を 2m、5m、8m の3ケース、周期を 8s、10s、12s の3ケースとし、風速を 0 から 100%の間で 5%刻みで変化させ、目標波高に最も近づく風速低減率を検討した。減衰パラメーター  $A$  は、堺らの実験縮尺を 1/100 とした場合に、現地スケールで 1.0m の氷厚に相当するものを用いた。また、実海域では海氷密度が同じでも海氷の分布範囲が異なることから、乱数により密度毎に SWAN の1次元水路内の海氷分布を 5000 種類に変化させ、各分布毎に算出した目標波高を平均した。

図-3に手法2による再現結果の一例を示す。流水が無い状態では 30m/s の風速により破線のように波が発達するが、各密度に応じて風速を減少させることで、氷海域における波の伝播（目標波高）が概ね再現されている。

図-4に、最確値を目標波高とした場合の誤差の二乗平均平方根（RMSE）と RMSE が最小となる最適風速低減率の関係を示す。密度が増大するにつれて RMSE も大きくなるが、これは、図-3の密度 8 の場合にみられるように、密度が大きい場合には  $x=0 \sim 50$ km の範囲において、風速の低減だけでは十分に波高が減衰しないことによる。

ただし、伝播距離が長くなるにつれて目標波高に近

づいている。冬期の北海道のオホーツク海沿岸部は、通常 200km 以上の広い範囲で海氷が接岸しているため、実務上の RMSE は図-4に示した誤差よりも小さくなると考えられる。

### 2.4 実氷海域での有義波高の再現性

図-5に、観測と手法1から手法3の有義波高  $H_{1/3}$  の経時変化と、図-6に観測と推算の  $H_{1/3}$  の相関を示す。なお、図-5の上段の海氷面積は、北海道東部沿岸から 200km の範囲内における面積を示している。従来手法の手法1-1および手法1-2では、氷海域での波の伝播

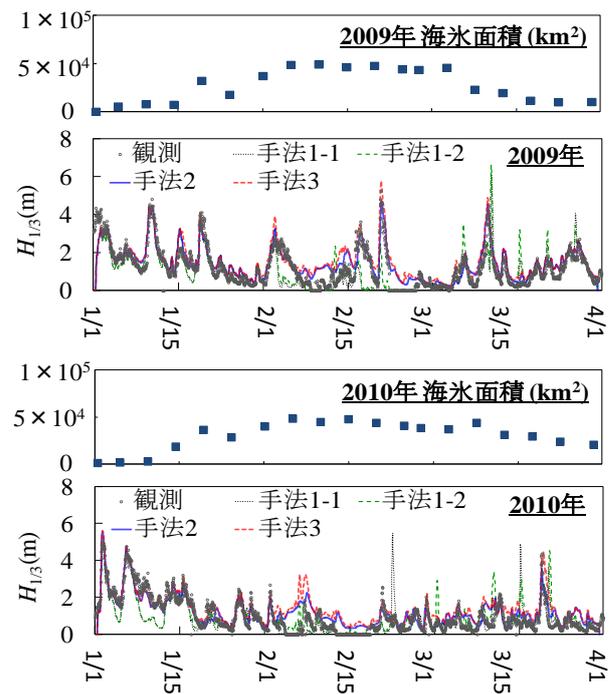


図-5 各手法の有義波高の経時変化

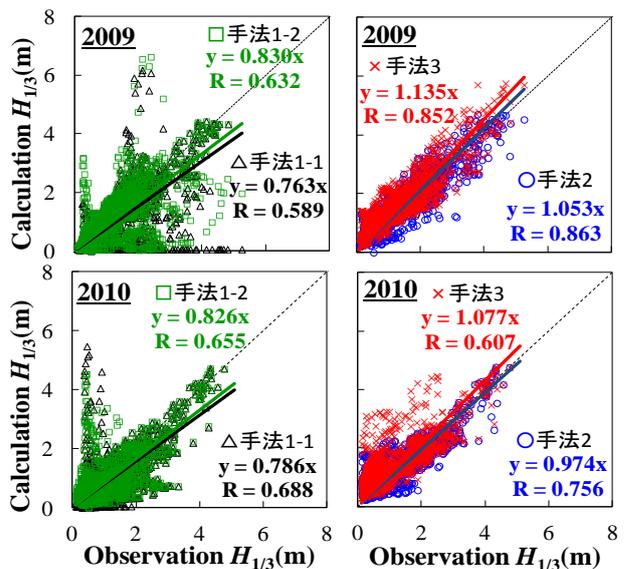


図-6 各手法と観測有義波高との相関

を全く考慮しないことにより、観測値に比べて20%程度  $H_{1/3}$  は小さくなっている。

次に、手法2と手法3の相関を比べると、手法3では観測波高より10%程度過大傾向となっているが、手法2では観測値と同程度となり相関性も向上する。また、海氷が少ない2009年よりも、海氷が多い2010年において相関性の向上が大きい。例えば、2009年2月5日、2010年2月10日や3月20日前後では、手法3では観測値を大きく上回るが、手法2では推算波高が抑制されている。

このように、手法2は風速を低減させるという簡易な手法ではあるが、実海域においても十分な再現性を有することが確認された。

## 2.5 実氷海域での周期の再現性

図-7に、手法1から手法3の有義波周期  $T_{1/3}$  の経時変化を示す。手法1-1および手法1-2では、観測値に比べ相当に小さくなるが、手法2や手法3では、経時変化が概ね再現されている。例えば、2009年2月5日付近の  $T_{1/3}$  をみると、手法2は手法3に比べて5秒以上周期が長くなり再現性が向上している。

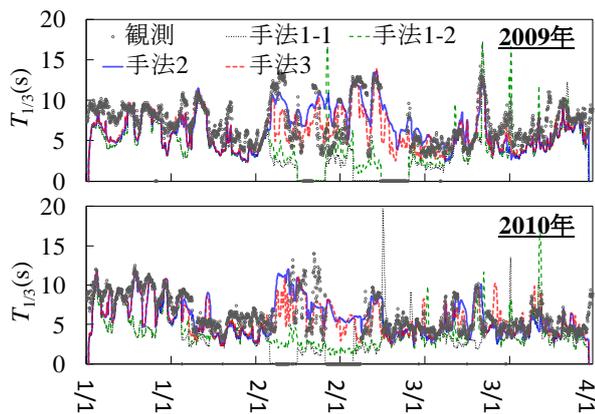
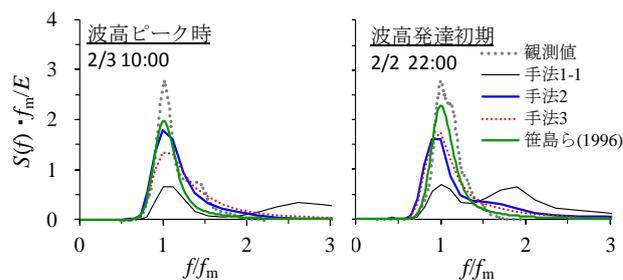


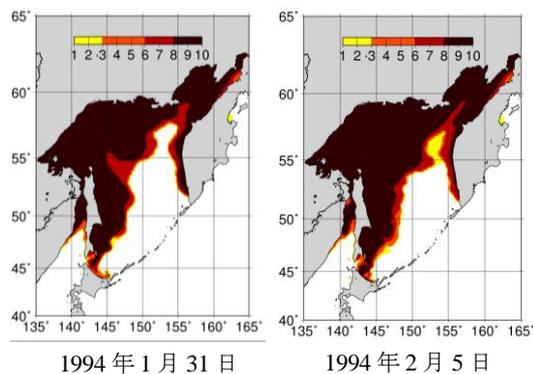
図-7 各手法の有義波周期の経時変化

図-8(a)は笹島ら<sup>9)</sup>が提案した氷海域でのスペクトル形状と、SWANによる手法1~3の計算スペクトル形状を比較したものである。横軸は周波数をピーク周波数  $f_m$  により無次元化し、縦軸は  $f_m$  と全エネルギー  $E$  により無次元化している。また、図-8(b)には、この時の海氷密接度分布を、図-8(c)には  $H_{1/3}$  および  $T_{1/3}$  の経時変化を示す。なお、1994年2月時点の気象庁MSMによる高解像度の風速データが無いため、ここではECMWF (0.75°×0.75°) の再解析データを用いている。スペクトル形状をみると、観測値では高周波成分側のエネルギーが減衰し、ピーク周波数付近が鋭く尖る氷海域での特徴的なスペクトル形状となっている。しか

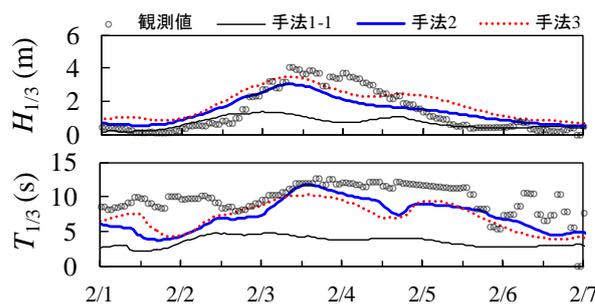
し、手法1-1では、観測値とは異なり高周波成分側にも多くのエネルギーが存在し、 $T_{1/3}$  も観測値に比べ小さくなっている。一方、手法2では波高ピーク時において笹島ら<sup>9)</sup>が提案した氷海域でのスペクトル形状と同様に  $f_m$  付近にエネルギーが集中し、手法3に比べて  $T_{1/3}$  が観測値に近づいている。このように、手法2により流氷部分の風速を密接度に応じて低減させることによって、氷海域における特徴的なスペクトル形状を比較的良く表現できることが分かる。



(a) スペクトル形状



(b) 海氷密接度分布



(c)  $H_{1/3}$  および  $T_{1/3}$  の経時変化

図-8 氷海域でのスペクトル形状 (1994年2月)

## 3. 海氷を考慮したオホーツク海の波浪に関する将来シナリオ

### 3.1 検討方法

次に、MRI-AGCM3.2SのA1Bシナリオ下における

地上 10m 風速  $U_{10}$  (空間解像度は約 20km、時間解像度 3hr) を用いて、将来気候における  $H_{50}$  を算出する。ただし、海氷が多い 12 月から 3 月については、MRI-AGCM3.2S の境界条件として用いられている月別の海氷密接度 (水田ら<sup>7)</sup>) に応じて、手法 2 により海氷の影響を考慮した。波浪推算の計算領域としては図-1 の第 1 領域のみを対象とした。対象期間は、1979～2003 年 (現在気候)、2015～2039 年 (近未来気候) および 2075～2099 年 (将来気候) の各期間 25 年分、延べ 75 年分の波浪推算を実施した。その他の波浪推算方法は、前述 2.1 と同様としている。なお、統計処理は合田<sup>8)</sup>の方法とし、閾値以上の極大値の割合が 3～5% となるように格子毎に閾値を変えている。

### 3.2 海氷の有無が50年確率波高に与える影響

図-9(a)に、水田ら<sup>7)</sup>の月別海氷分布をもとに算出した現在気候における 12 月から 3 月の平均海氷密接度を示す。また、図-9(b)は、現在気候での海氷の有無が  $H_{50}$  に与える影響として、手法 3 (海氷無し) と手法 2 (海氷有り) による  $H_{50}$  の差を示す。図より、サハリン周辺およびカムチャツカ半島周辺の密接度が高い海域での波高差が特に大きく、北海道東部沿岸および根室半島南部でも 1～2m の波高差がみられる。すなわち、海氷を考慮せずに波浪推算を行うと  $H_{50}$  を過大評価することになる。また、現在気候に対して将来気候の  $H_{50}$  を相対的に評価する場合にも、海氷を考慮することが重要である。

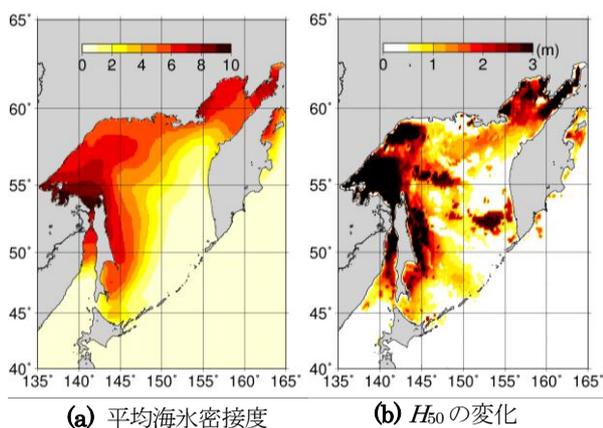


図-9 海氷の有無が現在気候の  $H_{50}$  に与える影響

### 3.3 海氷減少による50年確率波高の将来変化

図-10(a) (b)に、MRI-AGCM3.2S の  $U_{10}$  をもとに算出した、近未来気候および将来気候における現在気候に対する 50 年確率風速 (以下、 $W_{50}$ ) の変化を示す。近未来気候では千島列島南東部において、将来気候では日本海側において  $W_{50}$  が増大するなど、対象期間によ

り  $W_{50}$  の増大領域が変化している。また、北海道周辺では、近未来気候に比べ将来気候の方が風速  $W_{50}$  の増加が顕著である。

図-11 に、近未来気候および将来気候における  $H_{50}$  の現在気候に対する変化を示す。近未来気候では千島列島周辺や日本海北西部、将来気候では日本海側から太平洋沿岸にかけて  $H_{50}$  が大幅に増加しており、これは図-10 の  $W_{50}$  の変化に概ね対応しているようである。また、近未来気候における北海道沿岸での  $H_{50}$  の増加量は平均すると 0.5m 未満に留まるが、将来気候では

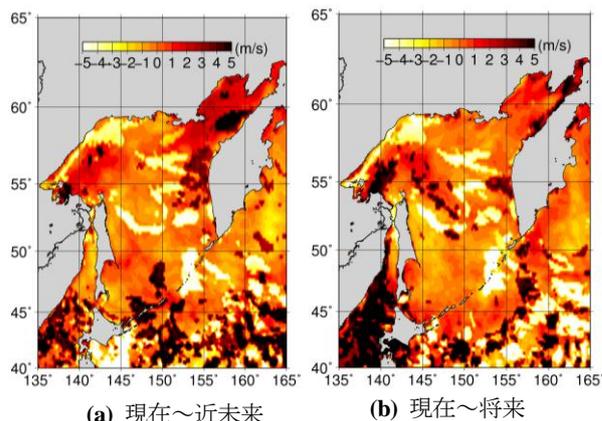


図-10 現在気候に対する 50 年確率風速  $W_{50}$  の将来変化

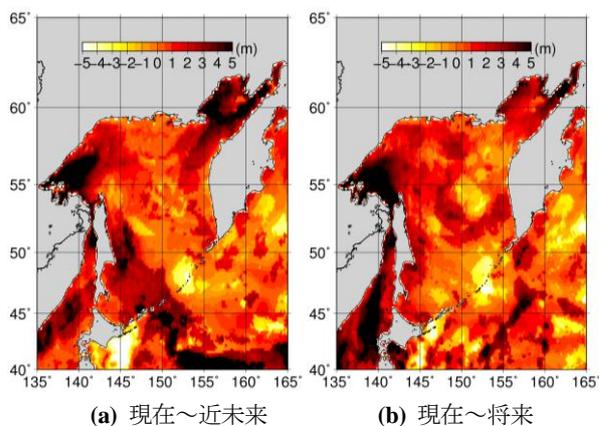


図-11 現在気候に対する 50 年確率波高  $H_{50}$  の将来変化

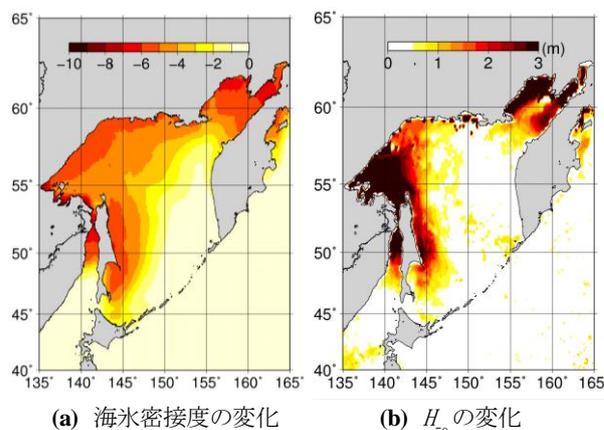


図-12 将来気候における海氷減少が  $H_{50}$  に与える影響

日本海側から太平洋にかけて4~5m、氷海域であるオホーツク海側では $H_{50}$ は1m以上増加する。

図-12(a)に、現在気候に対する将来気候での12月から3月の平均海氷密接度の変化を、図-12(b)には、将来の海氷減少が $H_{50}$ に与える影響として、風速は将来気候で海氷分布が現在気候の場合と将来気候の場合の $H_{50}$ の差を示す。なお、海氷分布が現在気候の場合では、例えば2075年1月では1979年1月、2099年3月では2003年3月の海氷分布というように、現在気候25年間と同じ海氷分布および出現順序としている。

将来気候の海氷密接度は図-12(a)より全体的に減少していることがわかる。また、図-12(b)より $H_{50}$ の変化が大きい海域としては図-9(b)と同様に、現在気候での海氷密接度が高い地域において波高差が特に大きく、北海道東部でも1m程度の波高差がみられる。このことから、将来気候における $H_{50}$ の変化は全体的には $W_{50}$ の影響が大きい、海氷密接度の大きいサハリン周辺から北海道にかけては、海氷減少の影響を受けることが確認された。

#### 4. 沿岸施設の安全性評価

##### 4.1 現況および将来シナリオにおける確率波高の検討

波浪推算手法については前述の手法と同様とし、将来シナリオについては、気象庁・気象研究所のMRI-AGCM3.2Sによる温暖化予測実験結果(Mizutara<sup>3)</sup>)の気象データを用いる。

A1Bシナリオ条件下におけるMRI-AGCM3.2Sの対象期間は、現在気候(1979~2003年の25年間)、近未来気候(2015~2039年の25年間)および将来気候(2075~2099年の25年間)とあるが、今回は近い将来の予測を行うこととし、対象期間を近未来気候とした。

現況の波浪推算は、1979~2008年の30年間における水深50m地点のナウファス紋別の現地波浪データを基に推算した。確率波高を求める際の統計手法については、極値統計解析(合田<sup>8)</sup>)を用いた。極値資料に当てはめる確率波高分布は、極値I型分布、極値II型分布(形状母数 $k=2.5, 3.33, 5.0, 10.0$ )およびWeibull分布(形状母数 $k=0.75, 1.0, 1.4, 2.0$ )の中から、最適な確率波高分布を相関係数およびMIR基準に従って選択した。なお、閾値については、閾値以上の極大値の割合が3~5%となるように格子毎に設定した。

ただし、MRI-AGCM3.2Sの現在気候は、過去の実際の気象状況を考慮していないことから、MRI-AGCM3.2S近未来気候の $H_{50}$ と現在気候の $H_{50}$ の差を、現況の $H_{50}$ に加えたものを将来シナリオの $H_{50}$ とした。こ

のため、将来シナリオの確率波高分布については、上記手法で算定した $H_{50}$ と一致するように、MRI-AGCM3.2S近未来気候の確率波高分布を一部修正したものを仮定した。

図-13は、紋別港の $H_{50}$ が最大となる波向NEの現況(極値I型分布、尺度母数 $A=0.858$ 、位置母数 $B=3.443$ )および将来シナリオ(極値II型分布、形状母数 $k=5.0$ 、尺度母数 $A=0.624$ 、位置母数 $B=5.624$ )における沖波波高と再現期間の関係を示した。なお、 $H_{50}$ は現況では8.2m、将来シナリオでは9.7mである。

また、高波の出現特性について、合田<sup>9)10)</sup>は、極値分布関数の裾の広がり具合を表すパラメータとして、50年確率波高と10年確率波高の比で定義される、裾長さパラメータ $\gamma_{50}$ を提案している。現況と将来シナリオの $\gamma_{50}$ は、1.20および1.26となる。

さらに、下迫・多田<sup>11)</sup>が、50年間の防波堤の総滑動量と $\gamma_{50}$ の関係を示しており、 $\gamma_{50}$ が大きくなるほど、総滑動量1.0m以上となる確率が大きくなることが示されている。

以上から、将来シナリオの方が再現期間に対する波高および $\gamma_{50}$ が高いことから、大きな滑動が発生しやすい状況になると考える。

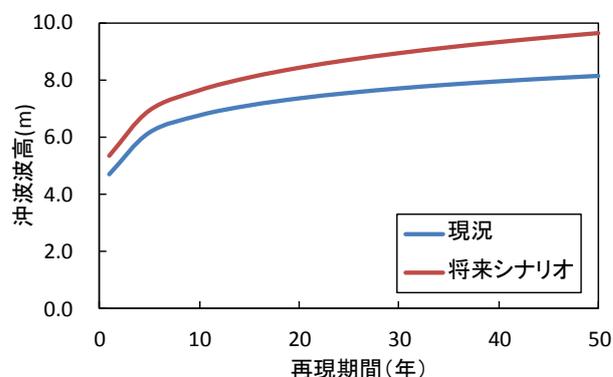


図-13 沖波波高と再現期間との関係

##### 4.2 将来シナリオにおける防波堤の性能評価

防波堤の信頼性設計法に関する既往の研究事例としてはさまざま行われているが、本研究では、高山ら<sup>12)</sup>の手法に従い、消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した堤体滑動量の算出を行う。図-14に期待滑動量の計算フローを示す。沖波は前述の確率分布に従うが、再現期間中の高波を再現させるため、下迫<sup>13)</sup>を参考に下限値を5年確率波高、上限値を200年確率波高とした。また、1年間(1波群)の有義波高 $H_{1/3}$ の継続時間は2hrとした。

防波堤の供用期間は50年と仮定し、50年間の総変

形量は乱数を発生させて繰り返し計算を行い、累積堤体滑動量、累積消波ブロック沈下量および累積消波ブロック被災度を試行回数で平均したものを期待滑動量（以下、 $S_E$ ）、期待ブロック沈下量（以下、 $D_E$ ）および期待ブロック被災度（以下、 $C_E$ ）とした。

モンテカルロ法は、乱数の発生方法や試行回数によって結果が異なってくる可能性があるため、これらの設定については慎重に行う必要がある。

乱数の発生方法については、長尾ら<sup>14)</sup>の検討を基に一様乱数の発生にメルセンヌ・ツイスタ（Mersenne Twister）を用い、正規乱数への変換にボックス・ミュラー法（Box-Muller transform）を用いた。

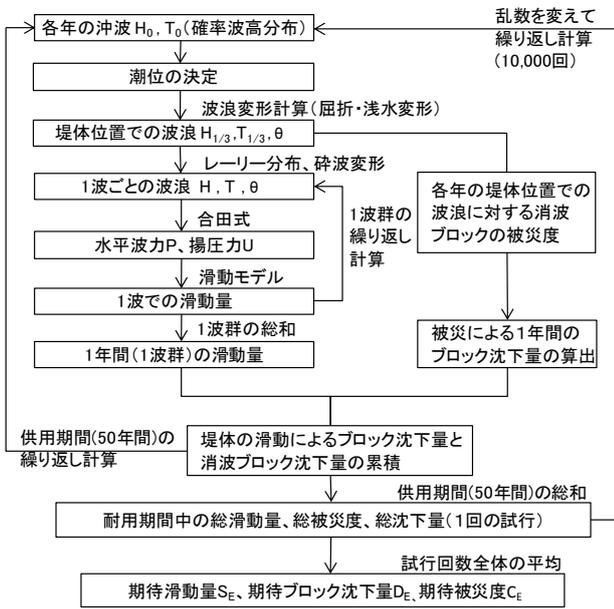


図-14 期待滑動量の計算フロー

図-15 に計算の試行回数と  $S_E$ 、 $D_E$  および  $C_E$  の変化を示す。いずれにおいても 10000 回で変動量がほぼ頭打ちとなり、その後は安定した結果が得られていることから、試行回数を 10000 回と設定した。

表-2 に、信頼性設計における各要因の正規分布の変動条件を示す。平均値の偏り  $\alpha$  や変動係数  $\gamma$  の意味は、真値と誤差のばらつきを正規分布として考慮したもので、限られた波浪データから確率分布を推定するための統計的不確実性、波浪変形および波力などの算定精度のばらつき等である。値については長尾<sup>15)</sup>と同様としている。堤体への入射角については、下迫ら<sup>13)</sup>を参考に、主波向と隣り合う波向の角度を考慮して決定した。例えば主波向が  $40^\circ$  で隣り合う波向の入射角がそれぞれ  $27^\circ$  および  $45^\circ$  の場合、 $40 \pm \{(45-27) \div 4\} = 40 \pm 4.5^\circ$  を主波向のばらつきとした。

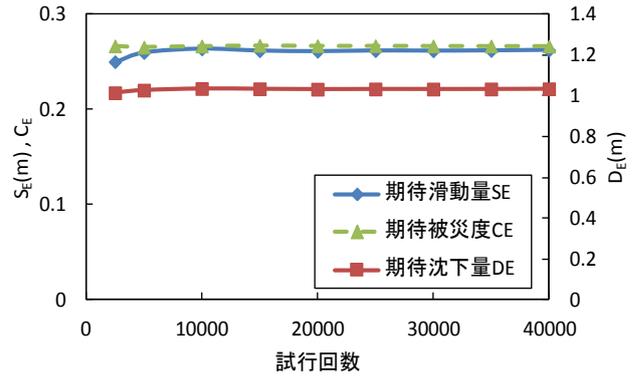


図-15 計算の試行回数と期待値の変動

表-2 各要因の正規分布の変動条件

不確定要因	平均値の偏り $\alpha$	変動係数 $\gamma$	備考
沖波	1.00	0.10	
潮位	1.00	0.20	
波浪変形	0.97	0.04	
摩擦係数	1.06	0.15	$\mu = 0.6$
砕波変形	0.87	0.10	
波力	0.84	0.12	消波ブロック被覆堤
単位体積重量			
鉄筋コンクリート	0.98	0.02	
無筋コンクリート	1.02	0.02	
中詰砂	1.02	0.04	

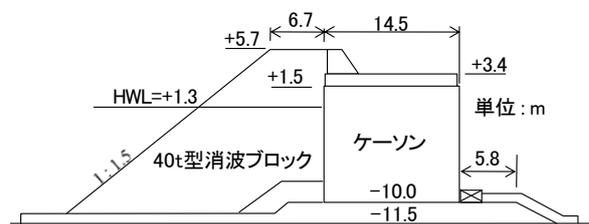


図-16 検討対象断面

表-3 期待滑動量の検討ケース

シナリオ	海面上昇	備考
I	無	現況
II	無	将来シナリオ
III	有	シナリオ I +海面上昇
IV	有	シナリオ II +海面上昇

沖波から堤体位置までの屈折係数は、1 試行回数毎に計算を行わず、現行設計法における屈折係数を一定値として与えた。ただし、正規分布のばらつきを考慮するため表-2 の波浪変形における平均値の偏り  $\alpha$  および変動係数  $\gamma$  を用いた。

検討対象施設は、紋別港の沖合の第一線防波堤を対象とし、この防波堤の設計沖波に、前節で設定した確率分布を適用させた。

検討対象断面を図-16に示す。構造形式は消波ブロック被覆堤であり、設計当時の滑動安全率は、設計沖波波高(=H<sub>50</sub>) 6.8mに対して1.21である。

表-3に検討ケースを示す。シナリオIを現況、シナリオIIを将来シナリオとし、シナリオIIIおよびIVで海面上昇による影響の検討を行う。なお、海面上昇量については、IPCC<sup>16)</sup>が作成した温暖化シナリオのうち、温暖化ガスの排出量が比較的多いA1Bシナリオにおける100年後の平均水位上昇量を21~48cmと予測していることから、本研究においては、海面上昇量を100年間で48cm上昇すると仮定し、供用期間の間では経過年数に対して線形的に増加させた。

### 4.3 将来シナリオにおける防波堤性能の検討結果

図-17は、シナリオIVにおける10000回の繰返し計算の中から50年間の総滑動量が期待滑動量30cmに近いある1回の試行を選び出し、沖波波高H<sub>0</sub>、堤体位置の有義波高H<sub>1/3</sub>、沖波周期T<sub>0</sub>および堤体変動量について示したものである。H<sub>0</sub>およびT<sub>0</sub>が大きい26年目に堤体滑動量およびブロック沈下量が増加している。

43年目についても、26年目と同様に堤体滑動量およびブロックの沈下量が増加している。しかし、H<sub>1/3</sub>については9年目および34年目等よりも小さい。この理由としては、過年度の消波ブロックの沈下により堤体に作用する波力が増加したことが考えられる。さらに、波力および摩擦係数等のばらつきによって、滑動限界を上回る外力が発生した可能性もある。

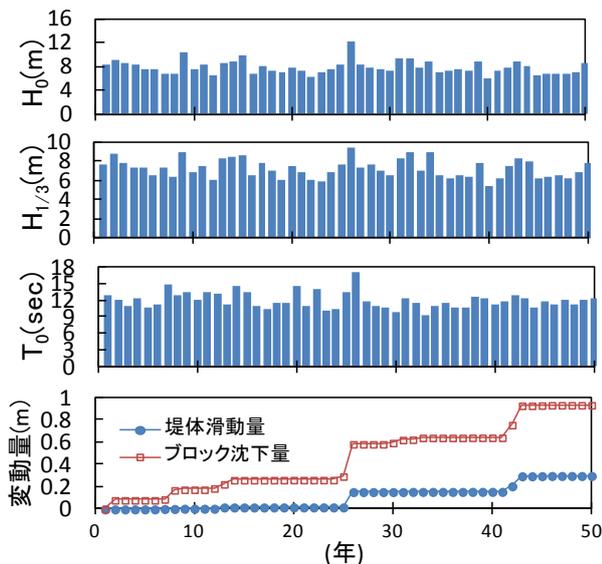


図-17 波高と被害の経年変化 (シナリオIV)

図-18に、シナリオ別の各年の期待滑動量を示す。シナリオIとIIを比較すると、50年目の期待滑動量は約23cm(約7.5倍)となった。また、期待滑動量の許容

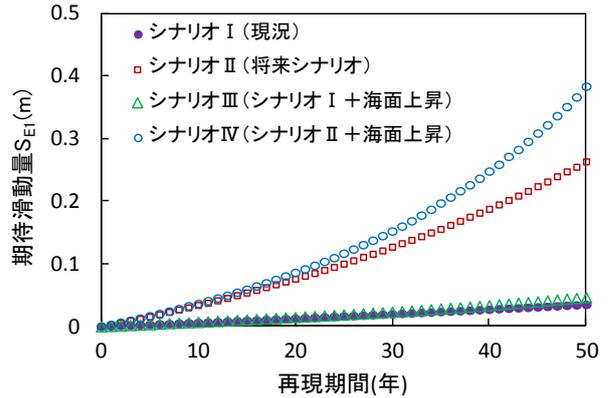


図-18 シナリオ別の期待堤体滑動量の経年変化

表-4 50年間総滑動量の超過確率の許容値

		高い	普通	低い
		滑動量	0.1m	0.15
0.3m	0.05		0.1	0.2
1.0m	0.025		0.05	0.1

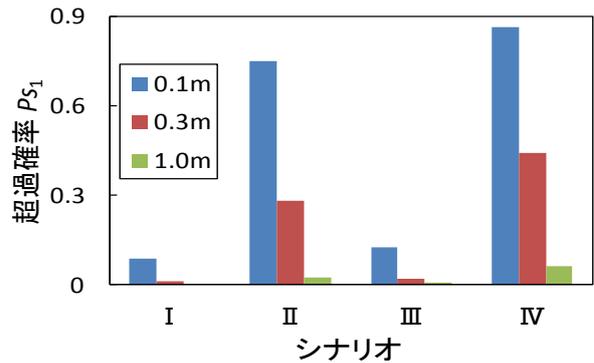


図-19 シナリオ別の50年間総滑動量の超過確率

値については下迫ら<sup>17)</sup>によりケーソン側壁の破壊を防ぐ目的および一般的な被災基準から30cm程度が目安として示されており、シナリオIVの45年目で30cmを超える結果となった。

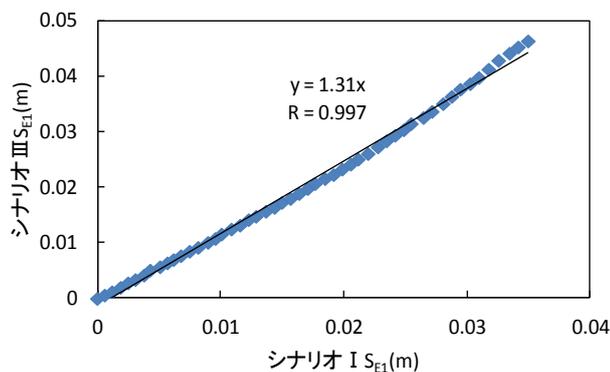
さらに、堤体滑動量の超過確率の許容値としては、下迫・多田<sup>11)</sup>が表-4を提案している。この表は港湾の施設の技術上の基準・同解説にも記載されている指標である。図-19に、シナリオ別の50年間総滑動量の超過確率を示す。なお、表-4と比較するため、滑動量0.1m、0.3mおよび1.0mに対する超過確率を抽出して棒グラフで表した。その結果、シナリオIVについては、滑動量0.1mの超過確率が約80%、0.3mでは約40%、1.0mでは約5%となっており、表-4の許容値を満足できていないことが明らかとなった。

なお、シナリオIについては、設計当時のH<sub>50</sub>を1.37mも上回っているにもかかわらず、50年目の期待

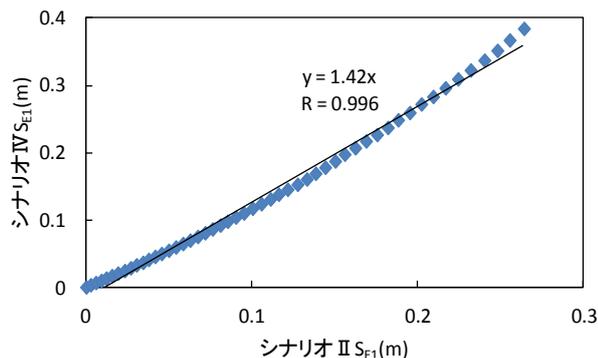
滑動量は約 4cm であった。これは、当時の設計法での滑動安全率が 1.19 程度となることから、堤体の滑動が抑えられたと考える。なお、 $H_{50}$  が大きくなっているにもかかわらず、安全率の減少量が小さいのは、砕波変形により最高波高があまり大きくないためである。

同様にシナリオⅡにおける安全率は 1.05 程度であった。シナリオⅠに比べて期待滑動量および超過確率の数値が大きくなったのは、安全率が 1.0 付近であることから、**表-2** の平均値の偏り  $\alpha$  および変動係数  $\gamma$  によって滑動限界を上回る外力が作用したからと考える。

一方、海面水位の上昇が堤体滑動量に与える影響について、**図-20(a) (b)** に示す。海面水位の上昇を考慮したシナリオⅢおよびⅣの期待滑動量は、海面上昇を考慮していないシナリオⅠおよびⅡの 1.3~1.4 倍程度となったことから、海面水位が上昇すると堤体滑動量に多大な影響を与えることが明らかとなった。



(a) 現況



(b) 将来シナリオ

図-20 海面上昇が期待滑動量に与える影響

## 5. 将来シナリオに対する維持対策の検討手法の考案

### 5.1 消波ブロック被覆堤本体の補強対策

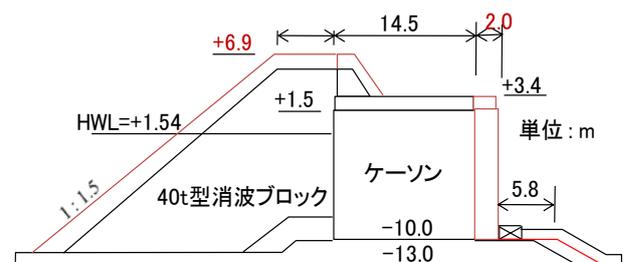
1960 年代の高度経済成長期に建設された施設の多くは、建設されてから 50 年程度が経過し更新時期を順次迎えている。しかし、近年では、既存構造物を極力

維持していくことが求められていることから、一般的な供用期間である 50 年にとらわれず、耐久性が確保できていれば、既存構造物を活かした改良方策を行っていくことと思われる。

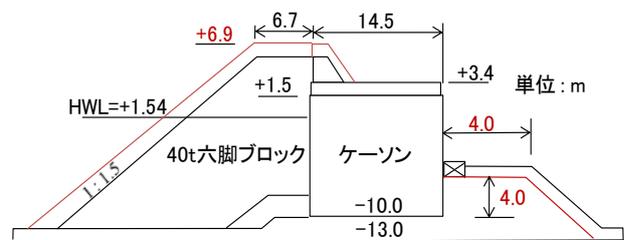
改良断面の検討は、一般的には、レベル1信頼性設計法（以下、部分係数法）を用いているが、この方法では、施設の安定性を滑動、転倒および支持力の各被災モードに対する力の釣り合いで評価するため、具体的な被災の程度が把握できない。

それに対してモンテカルロ法では、具体的な被災の程度を定量的に示すことができることから、将来における改良等の対策を講じた場合の効果に対する評価が容易になると考える。一方で消波ブロック被覆堤は防波堤の代表的な構造の一つであり、消波工によって直立部に作用する波力を減じる。このため、混成堤と比較して経済的となることが多いことから、採用例の多い構造である。ここで、消波ブロック被覆堤の維持対策の検討にモンテカルロ法を用いた一例を示す。

**図-21(a) (b)** は、改良断面の一例を示したものである。**図-21(a)** は、**図-16** に示した断面の天端高を 1.2m 嵩上げし、堤体幅をコンクリートで 2.0m 拡幅したものであり、**図-21(b)** は、嵩上げは前述と同様として、背後盛石を設置した断面である。なお、**図-21(a) (b)** の断面は、いずれも将来シナリオ  $H_{50}(9.66\text{m})$  の条件における滑動、転倒および基礎の支持力に対する安定性能を部分係数法による性能照査で確認している。



(a) 本体拡幅



(b) 背後盛石

図-21 改良断面

図-22 は、海象条件をシナリオIVとし、図-21 に改良した場合の期待滑動量の経年変化を示す。なお、比較のため、未対策（改良もブロック復旧もしない）のケース、並びに、5年目から10年毎に5回、沈下した消波ブロックを原形復旧するケース（以下、ブロック復旧）についても示す。その他の条件については、前述と同様としている。

改良を行った2ケース（堤体拡幅および背後盛石）の50年目の期待滑動量は数cmであったが、両者の値に若干の差があるのは、改良断面を部分係数法で検討した際の滑動抵抗力と外力との比が、堤体拡幅では1.02であるのに対し、背後盛石では1.12となることが要因と考える。

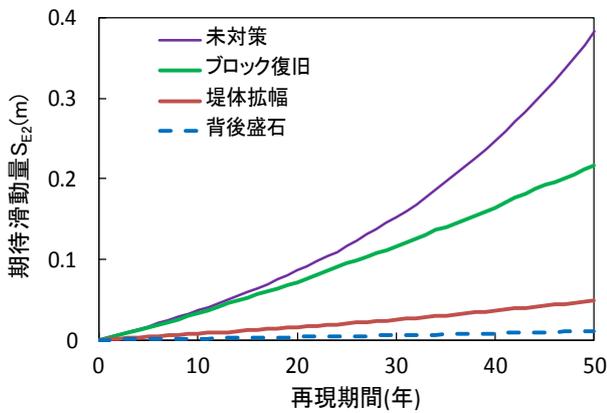


図-22 ケース別の期待堤体滑動量  $S_{E2}$  の経年変化

図-23 は、図-8 と同様に、上記検討ケースの50年間の総滑動量における超過確率を示す。

改良を行った2ケースについては、表-4 の許容値を満足していたが、ブロック復旧および未対策のケースでは満足していなかったことから、図-21(a)(b)のような改良を行う必要があると考える。ただ、ブロック復旧では、未対策のケースよりも期待滑動量および超過確率を抑えることができていた。

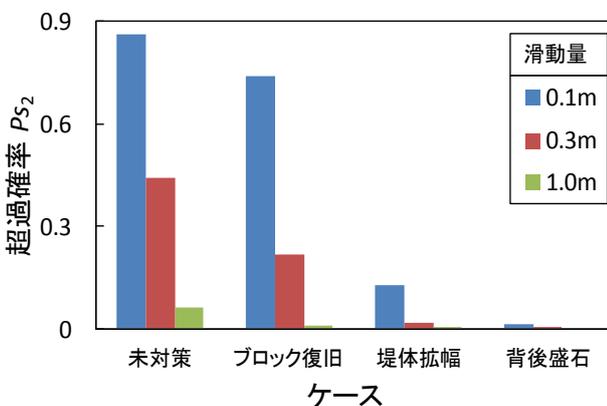


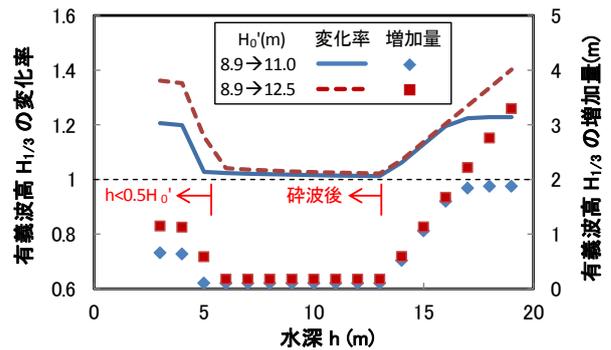
図-23 ケース別の50年間総滑動量の超過確率

## 5.2. 消波ブロック被覆堤の対策のコスト縮減方策

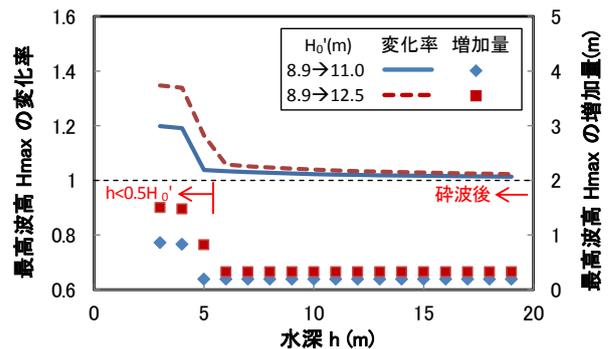
### 5.2.1 構造物設置水深と沖波波浪増大の影響

将来、沖波波高が増大することが構造物の設計波高にどの程度影響するのかを検討するため、波浪の浅水、砕波変形による設計波高の変化を試算した結果を図-24 に示す。ここでは、現在の設計沖波を  $H_0'=8.9\text{m}$ 、 $T_0=10.0\text{s}$  とし、将来の波浪増大量は+2.1m と+3.6m の2段階を仮定、海底勾配は1/100、海面上昇は考慮しないで試算した。同図(a)は有義波高の変化であるが、沖波波高が増大しても砕波帯内に相当する浅い水深帯では砕波による波高減衰のため波高の増加は小さい。ただし、水深  $h$  が沖波波高  $H_0'$  の0.5倍より小さい場合は、水深が  $h=0.5H_0'$  における波浪を設計波とするため、浅い水深帯では設計波が増大する。最高波高に対しても同様の傾向がみてとれる (図-24 (b))。

このことから、沖波の増大に対しては、構造物の設置水深が大きい施設と、反対に水深が小さい施設の設計波高がより増大するため、これらの条件の施設の対策を優先する必要があると考えられる。



(a) 有義波高  $H_{1/3}$  の変化



(b) 最高波高  $H_{MAX}$  の変化

図-24 沖波波高の増大に伴う設計波の変化の試算

### 5.2.2 防波堤改良コストの試算

まず、現在の設計沖波 ( $H_0'=8.9\text{m}$ 、 $T_0=10.0\text{s}$ ) を使って、水深毎 (3m、5m、7m、10m) に標準的な消波ブロック被覆堤の断面を設計した。ここでは、防波堤直立部の滑動・転倒に対する安定性を確保するように

して、基礎の支持力の検討は省略した。マウンドの厚さは 1.5m で一定とした。消波ブロックの所要質量は  $K_D$  値=8.3、法面勾配は  $\cot\theta=4/3$  の条件で、ハドソン式から求めた。

次に設計沖波が増大したときの防波堤の改良断面を設計した (図-25(a)~(d))。改良が必要な箇所は着色して示してある。図中の緑色は既設消波ブロックを撤去する範囲を示している。改良時の設計の考え方としては、防波堤の天端高は有義波高の 0.6 倍に嵩上げて、滑動および転倒の安全率を確保できない場合は、胸壁工の天端幅を拡げて、本体の重量を割増した。それでも、なお、安全率が確保できない場合には、水中コンクリートで堤体を拡幅することとした。なお、堤体の拡幅の最低幅は、水中コンクリートの施工性を考

慮して 1.5m とした。消波ブロックの規格が大きくなる場合には、コストができるだけ安価になるように必要分だけブロックを入れ替えることとした。

図から、水深が小さい  $h=3m, 5m$  (図-25(a), (b)) では設計波高が大きくなるため、堤体の安定及び消波ブロックの安定が確保できず、それぞれ堤体拡幅および消波工の質量割増しのためのブロック入れ替え工が必要となる。水深が  $h=7m, 10m$  (図-25(c), (d)) では設計波はあまり増大しないため、本体工の小規模な改良工事で安定は確保できる。

図-26 は、水深が 3m、5m、7m および 10m の場合の改良工事の費用を試算して、延長 1m 当たりの費用と、その中に占める消波工改良費の割合を示したものである。水深が浅いケースでは、改良費用に消波工の改良が占める割合は 6 割を超えており、消波ブロックの入

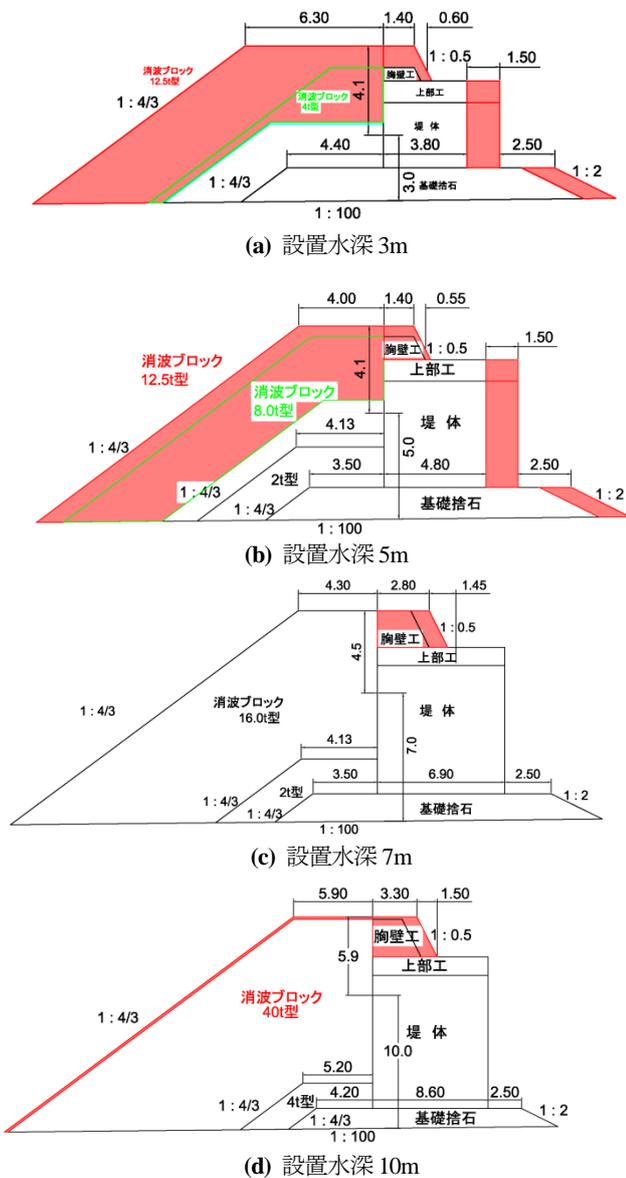


図-25 防波堤の改良断面図 ( $H_0=12.9m$ )

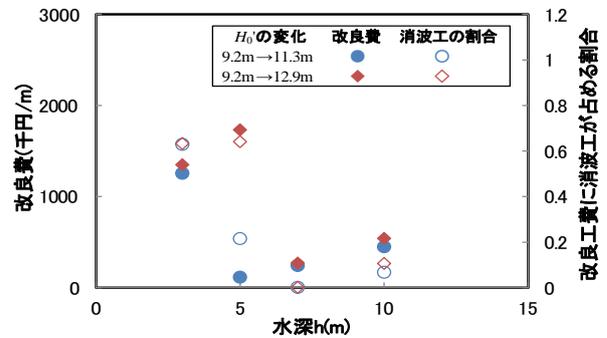


図-26 1m 当たりの改良費

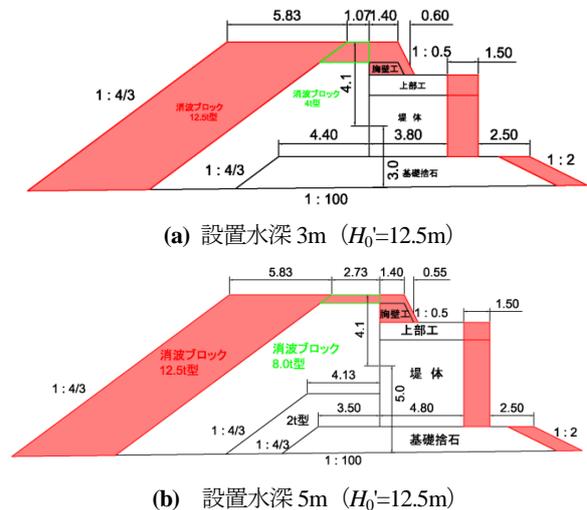


図-27 斜面被覆型の防波堤の改良断面図

表-6 斜面被覆型による改良費の縮減率

	A	B	C
沖波 $H_0$ の変化	9.2m→11.3m	9.2m→12.7m	9.2m→11.3m
水深 $h$	3	3	5
消波ブロックのランク差	3(4型→8型)	5(4型→12.5型)	3(8型→12.5型)
改良方針	入替型	斜面被覆型	入替型
撤去・処分ブロック	368	0	656
製作・据付ブロック	0	38	0
2層被覆	668	529	551
全体の改良費(千円/m)	1,254	1,055	1,733
縮減率	16%	12%	16%

れ替えなどのコスト削減が課題である。

ここで、消波ブロックの入れ替えを最小限にする方法として、既設消波ブロックを撤去せずに、既設消波工の斜面を所要質量の満たす消波ブロックで2層厚さ分だけ被覆する方法（斜面被覆型）を考える。改良費が1,000千円/mを超えた2ケースについて、斜面被覆型で改良した場合の断面を図-27に示す。図中の緑線で囲まれた箇所は、既設と同じ質量の消波ブロックを新たに製作・据付して、天端を嵩上げする部分である。

表-6は、消波工の改良の撤去・処分する個数と製作・据付のブロック個数を算定し、全体の改良費を比較したものである。その結果、斜面被覆型による改良費の縮減率が10%を超えることが確認できた。ただし、この方法は既設消波ブロックが天端に露出する部分のブロックの安定性が確保されていることが前提である。

## 6. まとめ

- 1) 海氷減少がオホーツク海における波浪の将来変化に与える影響を検討するため、海氷の影響を考慮する新たな手法を検討した。その結果、新手法は従来手法と比較して有義波高、有義波周期、スペクトル形状の再現性が高いことが分かった。
- 2) この波浪推算手法と気象庁・気象研究所によるMRI-AGCM3.2Sの温暖化予測実験結果をもとに、将来の50年確率波高 $H_{50}$ の変化を検討したところ、オホーツク海側では1m以上増大する。
- 3) 海象変化の将来シナリオを設定し、波浪増大及び海面水位上昇が消波ブロック被覆堤の安定に与える影響をモンテカルロ法により検討した。将来シナリオ下では堤体の安定性が低下することがわかった。
- 4) モンテカルロ法は、防波堤における長期の変形量を定量的に示すことができたため、堤体の安定性を評価するために有効である。
- 5) 将来の波浪増大は、堤体設置水深によってその影響の大きさが異なる。また、消波ブロック被覆堤の消波工改良費を削減する工法として斜面被覆型を提案した。

## 参考文献

- 1) 地球温暖化予測情報：気象庁，第7巻，2008。
- 2) 堺茂樹・笹本誠・片山潤之介・劉曉東・平山健一・泉山耕・金田成雄(1996)：氷板による不規則波の変形に関する実験，海岸工学論文集，第43巻，pp.426-430。
- 3) Mizuta, R. et al. (2012)：“Climate Simulations Using

MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid”，J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 90A, pp. 233-258, 2012.

- 4) Janssen, P.A.E.M. (1991)：Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, Journal of Physical Oceanography, No. 21, pp. 1631-1642.
- 5) Wadhams, P (1975)：Airborne laser profiling of swell in an open ice field, J.G.R, Vol.80, No.33, pp. 4520-4528.
- 6) 笹島隆彦・早川哲也・吉野真史・後藤智明(1996)：海氷存在時における風波の周波数スペクトル特性，海岸工学論文集，第43巻，pp.431-435。
- 7) 水田亮・足立恭将・行本誠史・楠昌司(2008)：CMIP3 マルチモデルアンサンブル平均を利用した将来の海面水温・海氷分布の推定，気象研究所技術報告，第56号，pp.1-28。
- 8) 合田良実：耐波工学—港湾・海岸構造物の耐波設計—，鹿島出版会，pp.327-379，2008。
- 9) 合田良実：防波堤の信頼性設計における極値分布の選択とその影響，海洋開発論文集，第17巻，pp.1-6，2001。
- 10) 合田良実：設計波高に係わる極値統計分布の裾長さパラメータとその意義，海岸工学論文集，第49巻，pp.171-175，2002。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 下迫健一郎，大寄菜々子，中野史文：滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法，港湾技術研究所報告，第45巻第3号，pp.1-23，2006.9。
- 14) 長尾毅，吉岡健，尾崎竜三：モンテカルロシミュレーションを用いた防波堤の滑動量に関する破壊確率の算定精度向上に関する研究，国土技術政策総合研究所研究資料，No.465，pp.1-20，2008.6。
- 15) 長尾毅：ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計手法の提案，国土技術政策総合研究所研究報告，No.4，pp.1-26，2002.3。
- 16) IPCC 第4次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約。気象庁訳，pp7-8

## WAVE FORECASTING AND SAFETY EVALUATION OF COASTAL STRUCTURES IN ICE-INFESTED SEA AREA

**Budget:** Grants for operating expenses  
General account

**Research Period:** FY2011-2013

**Research Team:** Cold-Region Hydraulic and Aquatic  
Environment Engineering Research  
Group (Port and Coast)

**Author:** YAMAMOTO Yasuji, SEKIGUCHI Koji  
SAKAI Kazuhiko, KAMIKUBO Katsumi

**Abstract:** In this study, we proposed a new method for hindcasting ocean wave heights in ice-infested seas by adjusting the wind velocity entered into the model calculation according to the concentration of sea ice, and we examined how well the method reproduces the significant wave heights of the SWAN surge estimation model. We also hindcast ocean waves on the Sea of Okhotsk for the past 30 years with the SWAN model to examine recent changes in wave height with a return period of 50 years (this is used with reference to designing harbor structures) and to estimate the changes with a period of the next 50 years by using an ultra-high-resolution global climate model that forecasts future climatic and oceanographic phenomena. Then, we assessed the stability of existing breakwaters against future scenarios of ocean phenomena with the Monte Carlo method, and we investigated the effect of typical maintenance on the breakwaters. Finally, we suggested a method for reducing the cost of maintaining breakwaters that are covered with wave-dissipating blocks.

**Key words:** *wave forecasting, SWAN model, Sea of Okhotsk, MRI-AGCM3.2S, Monte Carlo Method, cost reduction*