

# 積雪寒冷地の海岸の保全に関する研究

研究予算：運営費交付金  
研究期間：平成 18 年～平成 22 年  
担当チーム：寒冷沿岸域チーム、寒地技術推進室  
研究担当者：菅原吉浩、大塚淳一、大井啓司

## 【要旨】

本研究では、港周辺海域における地形変化量を精度良く再現するための土砂移動モデルの開発を行った。波浪場の不規則性と非定常性に加えて境界外からの SS を考慮することにより、従来よりも地形変化量の計算精度が大幅に向上することが確認された。また、構築したモデルを用いて港湾周辺の地形変化量を予測し、港湾機能の確保および周辺海岸の保全に必要な長期的な費用を算出した。一方、気候変動がサロマ湖海岸の侵食に与える影響を実験的に検討した結果、越波するような高波浪条件においても砂州は安定し、海面水位を 1m 上昇させた場合においても砂州の決壊は確認されなかった。

キーワード：漂砂、海岸保全、土砂移動モデル、養浜、越波

## 1. はじめに

砂浜域に建設された港湾や漁港では、港内に流入する土砂が船舶航行の障害となるのを防ぐため、定期的な浚渫および防砂構造物の整備などが行われている。浚渫を行う適切な時期および効果的な防砂構造物の配置を検討するためには、港周辺海域の地形変化量を精度良く予測することが必要といえるが、従来適用されている計算手法では十分な予測精度が得られていないのが現状である。

地形変化量を予測する際には、通常、波浪の規則性と定常性を仮定して風波の波高と海浜流の流速を計算し、それらの値から浮遊砂量と掃流砂量を評価する。この場合、波浪場の計算を効率的に行うことは可能であるが、実際の複雑な波浪場を再現することが困難であり、地形変化量の計算精度も大きく低下する。そのため、波浪場の計算を行う際に波浪の不規則性と非定常性を考慮することにより、地形変化量の計算精度が向上すると考えられる。また、近年、風波や海浜流のみならず長周期波や広域吹送流が沿岸域の漂砂現象に影響を与えることが報告されており<sup>1)2)</sup>、これらの影響を考慮した地形変化量の評価が必要と言える。

一方、積雪寒冷地特有の流氷が来襲するオホーツク海のサロマ湖海岸に目を向けると、地球温暖化による海面水位の上昇および流氷勢力の減少に伴う冬期の波浪増大による砂州の侵食が懸念され、早急に現状の砂州の安定性を検討する必要がある。

本研究では、図-1 に示す石狩湾を対象に地形変化量を精度良く再現できる数値モデルの開発を行うとともに、開発した数値モデルを用いて、海岸保全施設の土砂集積効果と養浜砂が港湾機能へ与える影響について確認し、長期的費用を含めた海岸管理手法の検討を行う。また、

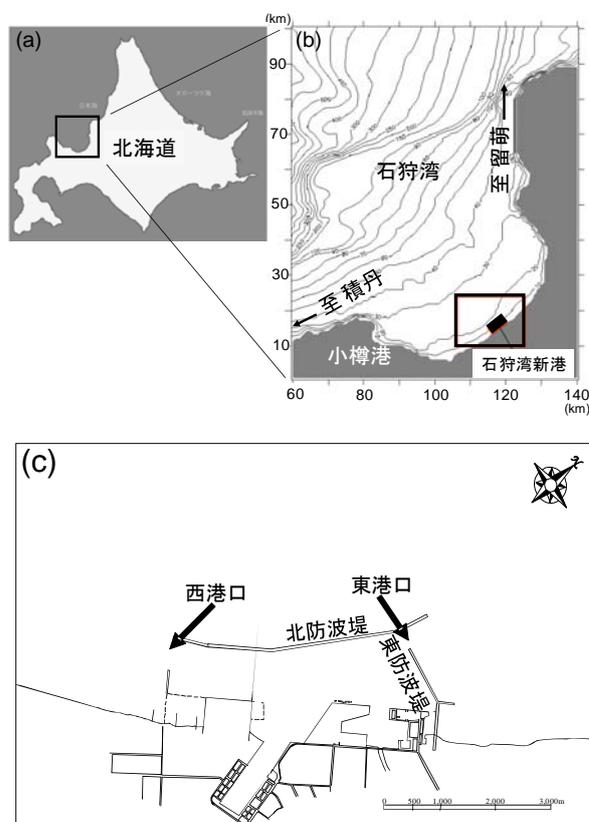


図-1 石狩湾新港の位置図(a) (b)と港湾形状(c)

地球温暖化による水位上昇および砂州を越波するような高波浪が海岸侵食へ与える影響を水理模型実験により確認するとともに、海岸保全工法としての養浜土砂の投入水深別の効果について検討する。

## 2. 土砂移動モデルの開発

土砂移動モデルには、波・流れによる土砂移動に伴う

表-1 狭域モデルの漂砂と外力モデルの関係

	掃流砂発生	掃流砂移動	浮遊砂発生	浮遊砂移動
風波	○	×	○	×
海浜流	○	○	○	○
長周期波流動	×	×	×	○
吹送流	×	×	×	○

表-2 波高別の波向き

波高	波向き
0m ~ 1.0m未満	WNW
1.0m以上 ~ 3.0m未満	NW
3.0m以上	NNW

平面的および3次元的地形変化を再現する海浜変形モデルと、広範囲を対象に長期間の海岸線の変化が予測可能な汀線変化モデルがある。

本研究では、石狩湾新港周辺海域の沿岸方向 12km、岸沖方向 7km の範囲については海浜変形モデル（以下、狭域モデル）を適用し、石狩湾新港から石狩川を含む広領域 22km の範囲については汀線変化モデル（以下、広域モデル）を適用した。

## 2.1 狭域モデルの概要

狭域モデルは、表-1 に示す外力モデルの組合せによって構成されている。計算では、はじめに波浪変形計算を行い、波高分布を元に海浜流を計算した後、掃流砂については海浜流で移動させる。また、浮遊砂については、吹送流と海浜流の合成流速と長周期波流動により移動させ、それぞれの移動量を合計して地形変化量を算出する。

### 2.1.1 風波・海浜流・長周期波の計算方法

風波の計算では、砕波によるエネルギー減衰（渡辺ほか<sup>3)</sup>）を考慮した非定常緩勾配方程式を適用した。計算格子サイズは 10 m、時間ステップ 0.2 秒とした。また、石狩湾新港周辺海域における 1 年間の地形変化量を評価するため、2002 年 7 月～2003 年 8 月に観測された 1 年間の沖波観測データをもとに、図-2 に示すとおり、風波の時間変化（波浪の非定常性）をモデル化した。各時間の波高に対応する周期は図-3 に示す 1 年間の波浪データから得られた波高と周期の相関式によって決定した。波向きについては、波浪データから波高ランク別に波向き頻度表を作成し、最も頻度の高い波向きを当該波高ランクにおける波向きとした。（表-2 参照）

海浜流の計算では、風波の波高分布から得られるラディエーションストレス項を加えた非線形長波方程式を

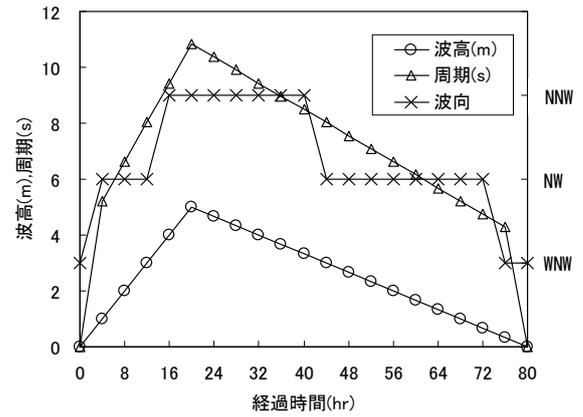


図-2 風波の時間変化モデル

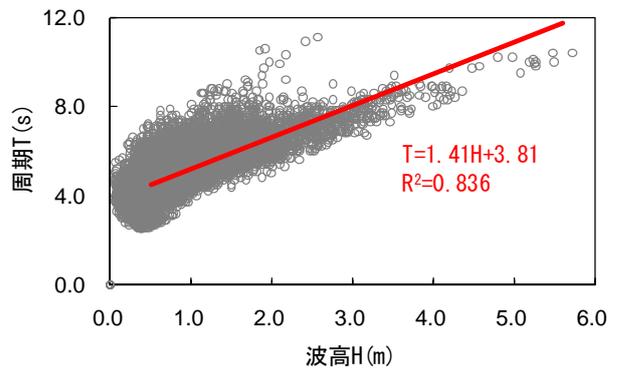


図-3 風波の波高と周期の相関

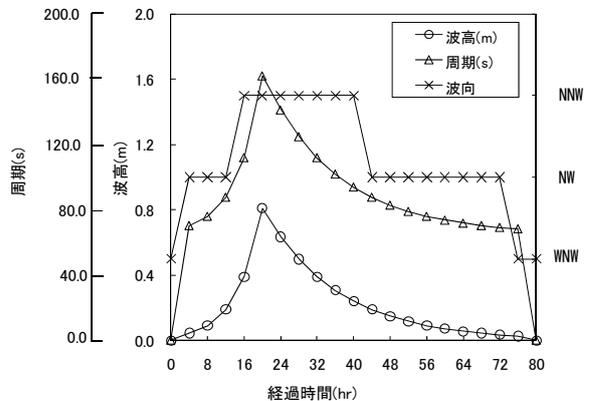


図-4 長周期波の時間変化モデル

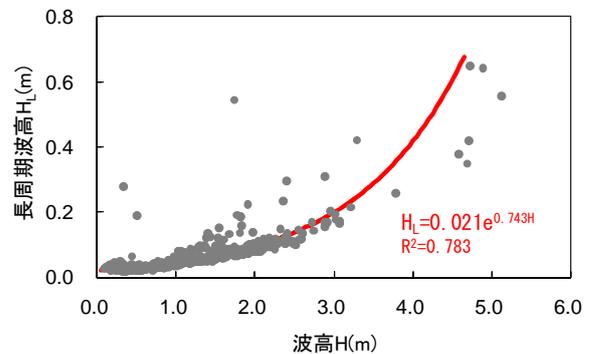


図-5 風波の波高と長周期波高の相関

適用した。

長周期波の計算では、Madsen 型 Boussinesq モデルを用いた港湾空港技術研究所が公開しているプログラムソース (NOWT-PARI) を適用し、計算格子サイズ 20 m、時間ステップ 1 秒として長周期波の波高分布と流速分布を求めた。沖側および側壁の境界に設定したスポンジ層の厚さは無反射条件で計算を行うため波長の 2 倍程度に設定した。なお、本計算では長周期波の周期帯を 30 秒～300 秒と設定し、この周期帯の波浪によって発生する流動を長周期波流動と定義した。計算領域については風波および海浜流の計算領域と同一とした。

長周期波の時間変化モデルを図4に示す。長周期波高については、1年間の沖波波浪観測データをもとに、風波と長周期波高の相関式 (図5参照) を求め、この式に図2に示した各時間における風波の波高を与えることにより長周期波高の時間変化を考慮した。周期については、波浪データから長周期波の波高と周期に対する相関式を求め、この式に各時間の長周期波高を与えることにより、長周期の時間変化をモデル化した。また、波向きについては、長周期波が風波の拘束波として入射することを考慮して風波と同一の波向きを与えた。

### 2.1.2 広域吹送流の計算方法

広域吹送流の計算は、準三次元マルチレイヤーモデルである Princeton Ocean Model (POM) を適用した。計算領域は石狩湾全域を包含するように経度方向 120 km、緯度方向 200 km とした。POM の計算外力として必要な風向・風速は日本気象協会によって公開されている再解析データを使用した。石狩湾では年間を通じて NW 方向および NNE 方向の風が高い頻度で発生するため、広域吹送流の計算ではこの2方向の風を考慮した。なお、広域吹送流の計算を行った結果、石狩湾新港周辺海域における吹送流の流速は NW 方向、NNE 方向ともに 0.3 m/s 程度であることが確認されたため、地形変化量を計算する際には、図-6に示すように NW 方向、NNE 方向の吹送流として計算領域の側方境界から一定流速 0.3 m/s を境界条件として与えることとした。

### 2.1.3 漂砂量の評価方法

掃流砂量については、無次元限界掃流力は岩垣<sup>4)</sup>の式によって算出し、砂粒子の沈降速度および掃流砂量の評価では Rubey 式<sup>5)</sup>と Brown 式を適用した。掃流砂の粒径は 2003 年の石狩湾新港周辺海域における底質調査結果をもとに 0.15 mm と設定した。

浮遊砂の発生量は Sheng<sup>6)</sup>の式とし、沈降速度は Rubey<sup>5)</sup>式を適用した。浮遊砂の粒径についても、掃流砂と同様に 0.15mm した。

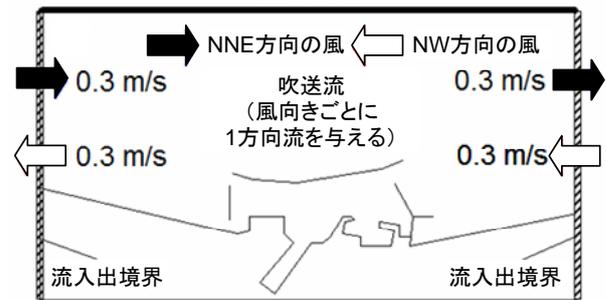


図-6 吹送流の境界条件

### 2.1.4 境界外からの土砂の流入量

境界外からの土砂流入については、境界に SS を設定することで考慮した。この場合、境界上の SS は現地観測などに基づきにより適切に設定する必要がある。石狩湾での SS に関しては、本間ら<sup>7)</sup>が石狩湾新港東側の水深 23.5m 地点において 2003 年 1 月に現地観測を実施しており、有義波高 5.5m の条件で底面上 2.0m の SS は 150ppm を超えていた。また、波高が 2m 以下の静穏時の SS は概ね 10ppm 程度で推移していた。

山崎ら<sup>8)</sup>は、石狩川河口沖 5km の水深約 20m の地点において 2002 年 11 月に流況、濁度、波高の連続観測を実施しており、期間中の波高 2m～4m に対応する海底面から 1.25m の底面付近の SS は 50～150ppm となっているが、海底面から 14.5m の水面付近では 30～60ppm となっており、底面付近に比べて水面付近の SS は小さくなっていた。

山崎ら<sup>8)</sup>は、石狩川河口付近の水深 20m 地点で融雪期 (4月中旬から5月中旬) の出水による濁度観測を実施しており、最大 60ppm 程度の観測結果が得られている。

以上より、SS は水深が深い沖合でも確認されていることから、東西両側境界において沿岸部から沖方向へ一律の濃度が流入する境界条件を設定した。また、静穏時においても 10ppm 程度の SS が確認されていることから西側境界では 10ppm とし、東側境界は石狩川からの出水により SS が高くなっていると考え 50ppm とした。

### 2.2 広域モデルの概要

広域モデルは波浪変形モデルと汀線変化モデルを組み合わせたモデルとし、波浪変形モデルにより砕波点における波高と波向きを求め、汀線変化モデルにより沿岸漂砂量と汀線変化量を算出することとした。

波浪変形モデルには、エネルギー平衡勾配方程式を用い、汀線変化モデルには、沿岸方向の地形変化に関する連続式で表される 1-line モデルを用い、沿岸漂砂量の算出には小笹・Brampton<sup>9)</sup>の式を適用した。

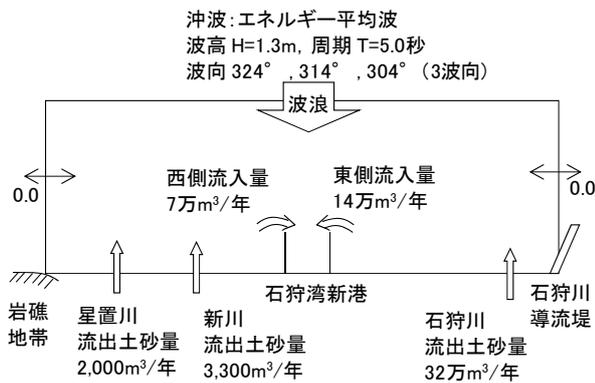


図-7 広域モデルの外力条件

広域モデルの外力条件を図-7に示す。入射波高は、年エネルギー平均波とし、沖波の波向きについては、平成13年度の冬期に行われた沖合水深25m地点の波浪観測結果より、地点毎に卓越する波向きが異なることから、沖合3地点で波向きを変化させた。川からの土砂量としては、清水ら<sup>10)</sup>は石狩川の流出土砂量を約80万 $m^3$ /年としており、また、藤田ら<sup>11)</sup>は、川からの流出土砂量の内、海岸形成に寄与する割合は約40%であるとしている。このため、石狩川からの土砂量を32万 $m^3$ /年とした。新川と星置川については、芦田・奥村<sup>12)</sup>による流域面積と年平均比土砂流出量の関係図を用いて、各河川の流域面積から年間流出土砂量を推定した。また、石狩湾新港内へ流入する土砂量の境界条件としては、既往の深浅測量の結果から港湾の東側では14万 $m^3$ /年、西側では7万 $m^3$ /年の配分量とした。

### 2.3 狭域モデルの現況再現結果

図-8は2002年夏期～2003年夏期における地形変化量の実測値(a)と海浜流による地形変化量の再現計算結果(b); 規則波、(c); 不規則波)を示している。規則波による地形変化量の計算結果(図-8(b))では、東防波堤内側や港内西側の地形変化は概ね再現されたものの、東西沿岸方向に着目すると実現には見られない侵食と堆積が交互に分布する傾向が確認できる。また、東港口周辺の堆積状況の再現も十分とはいえない。一方、不規則波による計算結果(図-8(c))では、交互に分布する侵食・堆積がみられず、さらに、東側港口付近や東防波堤内側において実測値(図-8(a))と同様な堆積傾向を示している。このように、波浪場の不規則性を考慮することにより再現性は向上すると言える。

図-9は長周期波流動による地形変化量の計算結果を示している。東西両港口外側では水深が浅く浮遊砂濃度が高いため港口外側の浮遊砂が長周期波流動によって港内側に流入する。しかしながら、長周期波流動による浮遊

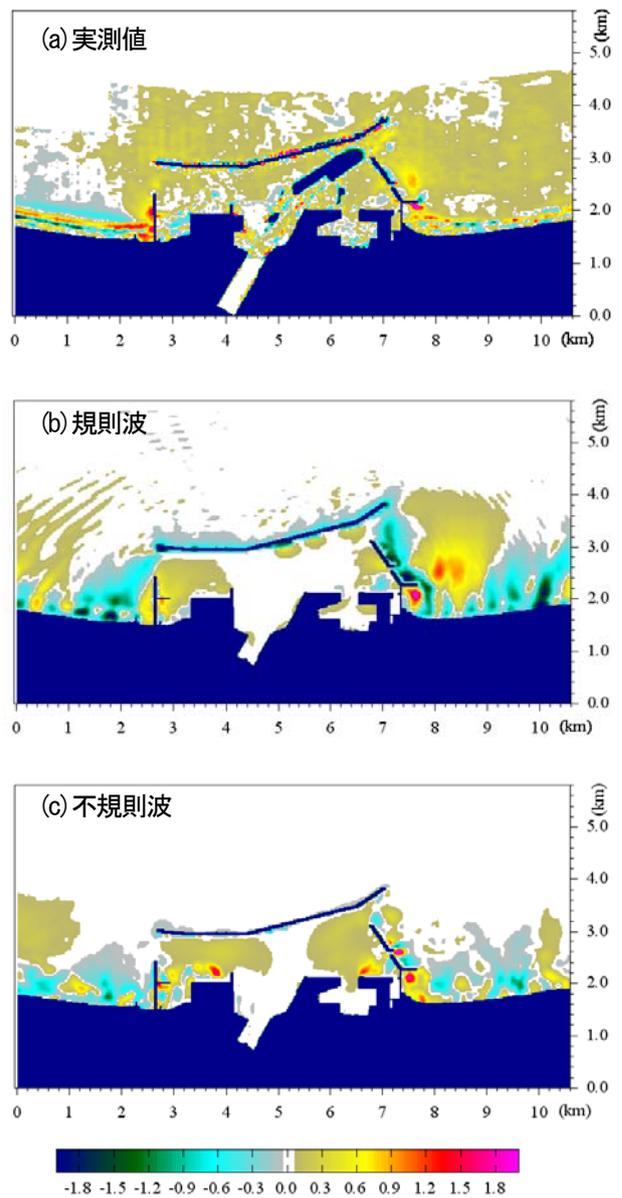


図-8 地形変化量の実測値(a)と海浜流による地形変化量の計算結果

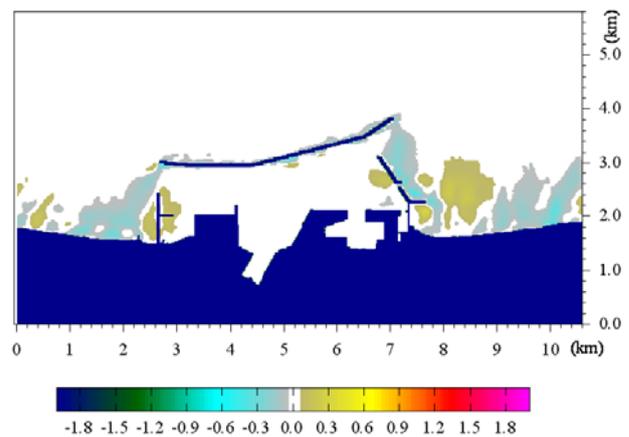


図-9 長周期流動による地形変化量の計算結果

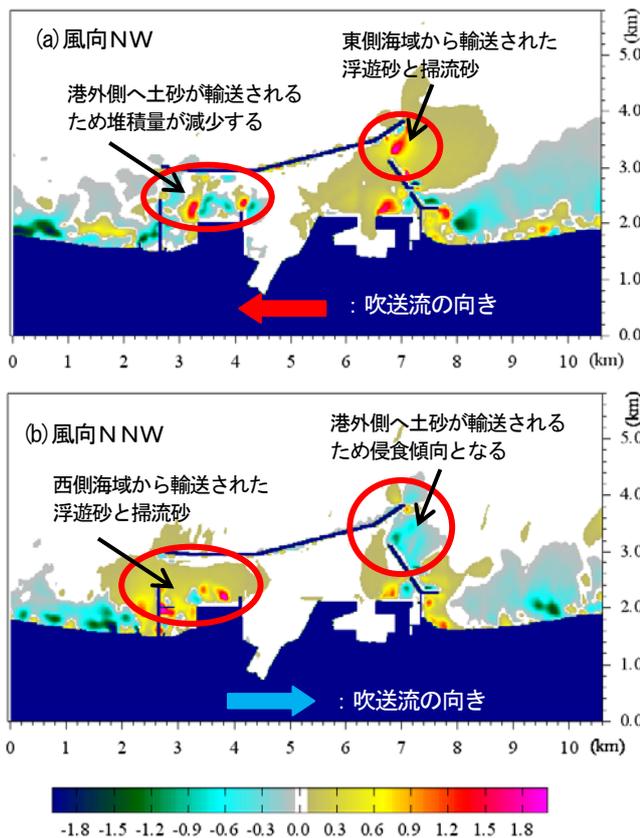


図-10 海浜流と吹送流による地形変化量の計算結果

砂の輸送距離は石狩湾新港のような大規模港湾では相対的に短くなるため、港奥部まで輸送される浮遊砂は比較的少なくなっている。

図-10は海浜流と吹送流を考慮した地形変化量の計算結果を示している。NW方向の風による吹送流を考慮した場合、東側の防波堤に沿う強い流動場が形成され、東側の海域から輸送された掃流砂と浮遊砂が東港口周辺に堆積する(図-10(a)、東側赤枠内)。また、図-8(c)で確認された西港口付近の堆積土砂は、西向きの吹送流によって港外側へ輸送されるため、堆積量が減少すると考えられる(図-10(a)、西側赤枠内)。NNE方向の風による吹送流を考慮した場合、図-10(a)とは対照的に西側の海域から輸送された土砂が西港口付近に堆積し(図-10(b)、西側赤枠内)、東側では東港口付近が侵食傾向となる(図-10(b)、東側赤枠内)。本結果では、各風向きによる吹送流の影響によって、東西両海域および港口付近に侵食・堆積が顕著に現れることが確認できた。今後は、各風向きの発生頻度を考慮した地形変化量の評価を行うことが必要といえる。

図-11は図-8(c)の不規則波の海浜流に加え、長周期波流動および吹送流を考慮した場合の地形変化量の再現計算結果を示している。なお、吹送流による地形変化量に

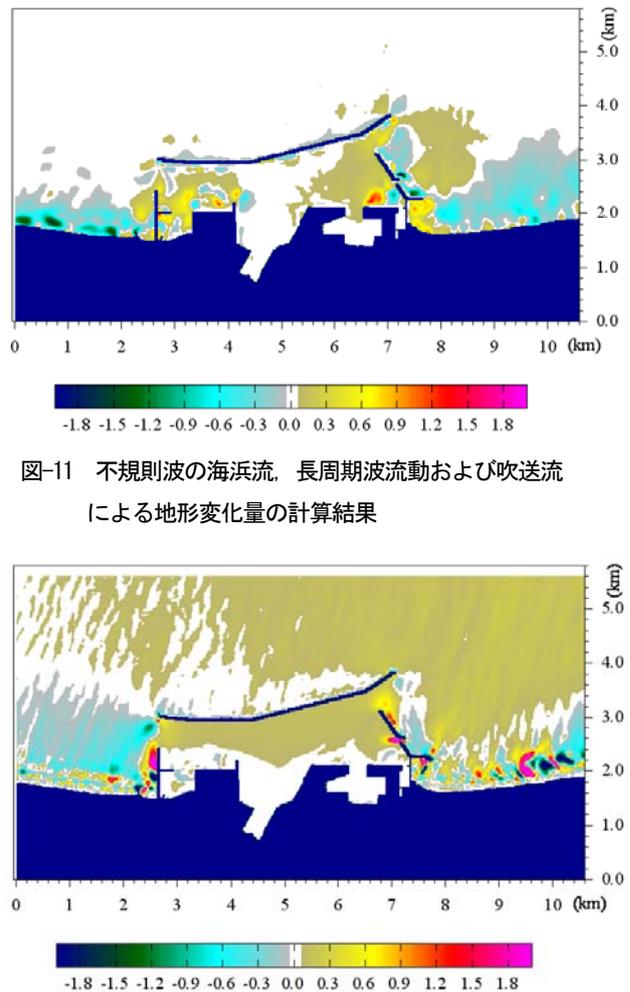


図-11 不規則波の海浜流、長周期波流動および吹送流による地形変化量の計算結果

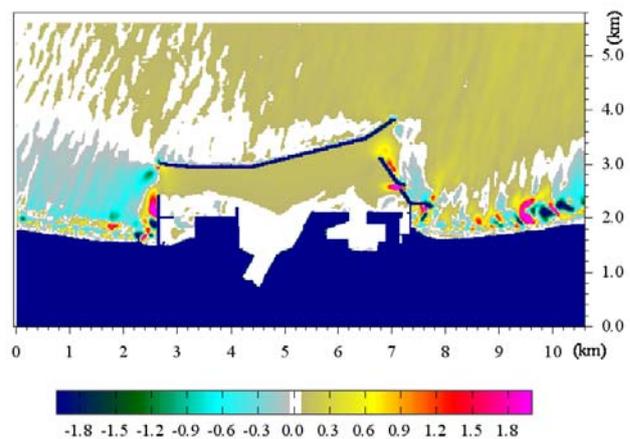


図-12 境界からのSS流入を考慮した場合の地形変化量

についてはNW方向とNNE方向の風が同一頻度で吹くと仮定して、両方向の風向きにおける地形変化量の平均値を与えている。実測値(図-8(a))と比較すると、東側の防砂堤付近や港口付近の堆積状況と西港口付近の堆積状況が概ね再現されている。しかし、港外では実測地形にはみられない侵食領域もみられる。これは、計算領域内での土砂の発生箇所は砕波帯付近に集中するからであり、境界外からの土砂の流入を考慮しない場合には、砕波帯付近において一方的に侵食傾向となるためである。

図-12は境界からのSS流入を考慮した場合の地形変化量である。図-11と比較すると東側港外の侵食範囲が小さくなっている。一方で、実測とは地形変化量が異なる領域が依然としてみられる。これは、年間の波浪エネルギーを80hrの時間変化でモデル化しており、潮流や静穏時による長期的な地形変化が再現されていないためと考えられる。

図-13に年間の領域別土砂変化量を示す。なお、港内の航路部や泊地で浚渫を行っている領域は土砂量算出の対象外とした。図に示すように境界外からのSSの流入

を考慮することにより、領域別の土砂変化量は実測値に近くなっている。特に、東側港内および東側港外において実測に近づいている。このように、吹送流や長周期波流動に加え計算領域外からの SS 流入を考慮することにより、地形変化量の予測精度が向上することを確認した。

## 2.4 広域モデルの現況再現結果

図-14(a)は、石狩湾新港建設前の 1947 年～1974 年の再現計算結果を示す。実測の汀線では、1947 年～1971 年の期間は安定した形状を保っている。これに対し、計算汀線（青線）も、実測値と同様な傾向を示しており、良好な再現性を示している。一方、同図には、入射波の波向きを修正しない場合の計算結果（緑線）も示しているが、実測とは大きく異なる結果である。従って、石狩湾のような広い領域を対象とした汀線変化を検討する場合には、入射波の波向の設定に十分注意する必要がある。また、石狩川河口からの供給砂をゼロとした計算結果（橙線）では、石狩川河口付近で実測に比べて大きな侵食傾向を示している。このことから、安定海浜の形成には川からの土砂供給量も大きく寄与することが分かる。

図-14(b)は 1971 年～1995 年の広域土砂移動モデルの再現計算結果を示す。計算汀線は港内への土砂流入が無い場合（青線）と有る場合（緑線）を示しているが、港内への土砂流入有りの方が 1995 年の汀線（赤線）と同様な形状で再現性が良い。このように、港内への土砂流入を境界条件として組み込むことにより、汀線変化の再現性が向上することが確認された。なお、土砂流入量の設定の仕方、計算汀線は大きく異なるため、土砂量を設定する際には、深浅測量結果などから適切な境界条件とする必要がある。

## 3. 土砂移動モデルによる海岸管理手法の検討

沿岸漂砂が卓越した海岸において防波堤・導流堤・埋立護岸、あるいは突堤や離岸堤などの構造物が設置されると上手側の構造物では堆積が生じ、沿岸漂砂の一部または全てが遮断されることにより構造物の下手側海岸で侵食が生ずる。このような沿岸漂砂の不連続性に伴う堆積や侵食を抑止するためには、長期的なライフサイクルを考慮した海岸管理手法の検討が必要となり、土砂移動モデルは有用なツールとなる。

このため、構築した狭域および広域土砂移動モデルを用いて、石狩湾新港周辺における海岸保全施設および養浜を実施した場合の効果について検討する。

計算ケースは図-15 に示す 4 ケースを対象とした。ケース 1 は汀線平行方向の既設防砂堤を 500m 延長した場合で、東側から港湾内に流入する土砂を抑制すること

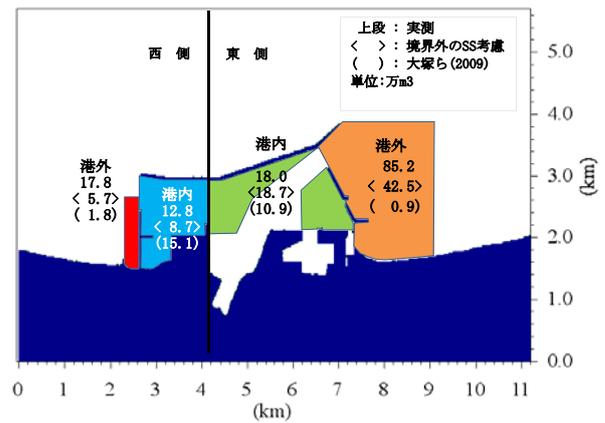


図-13 年間の領域別の土砂変化量

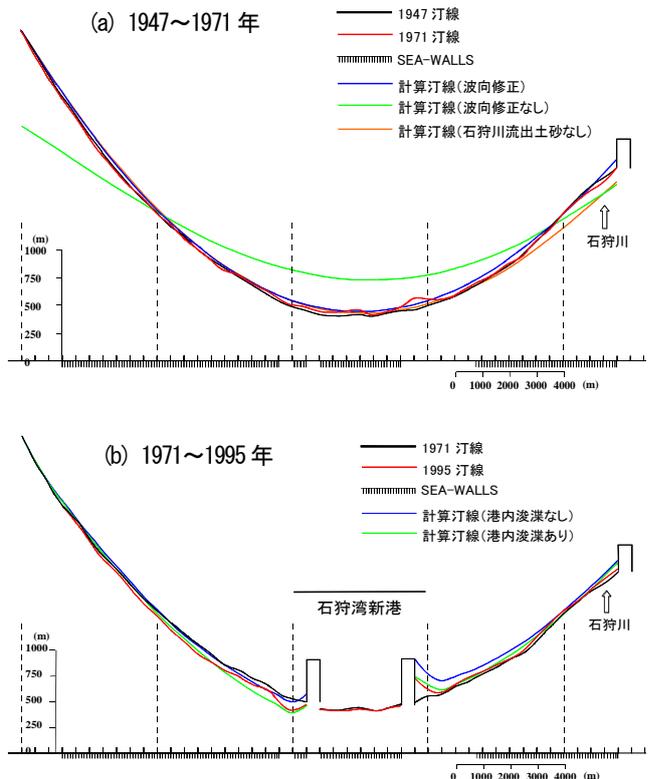


図-14 広域モデル再現計算結果

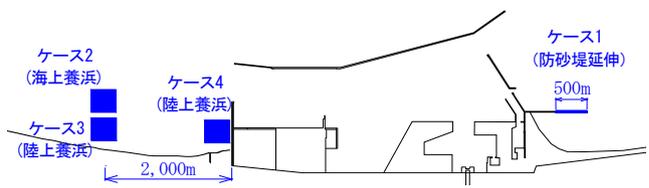


図-15 海岸管理手法の検討ケース

により、航路泊地の維持浚渫費を低減する効果を想定したものである。ケース 2～4 は養浜を行った場合で、陸

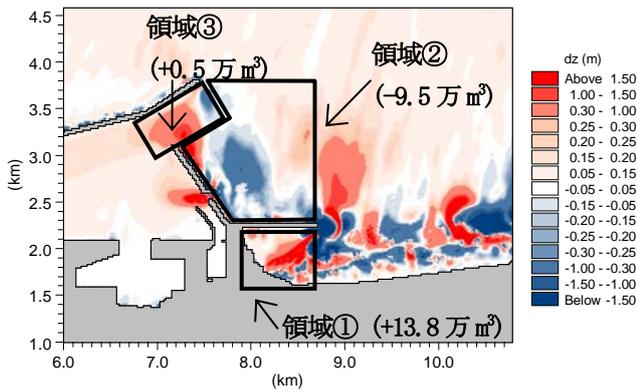


図-16 ケース 1 の地形変化量

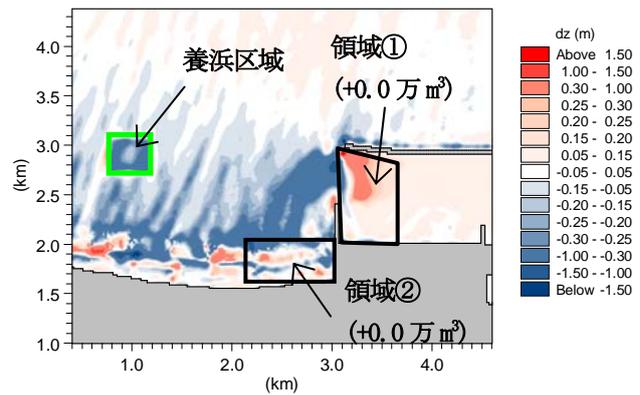


図-17(a) ケース 2 の地形変化量

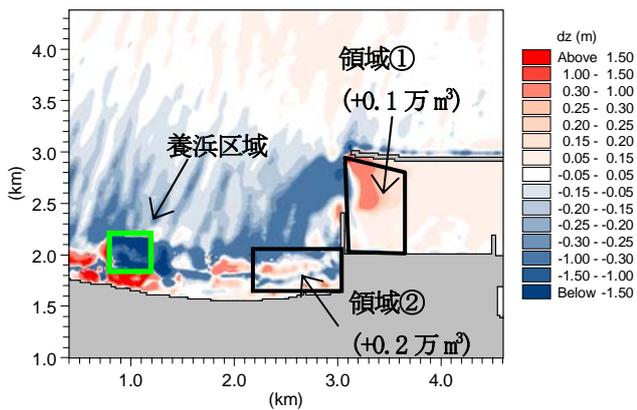


図-17(b) ケース 3 の地形変化量

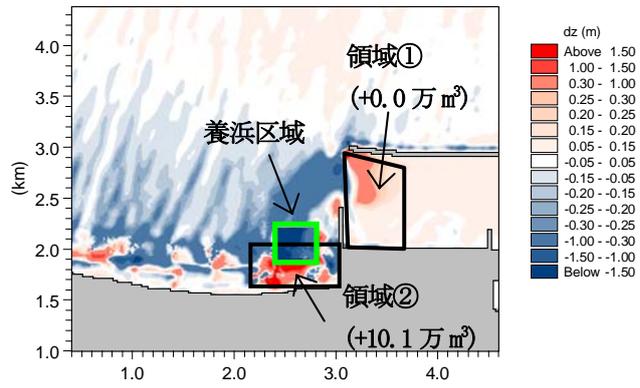


図-18 現況港形の地形変化量

上養浜と海上養浜による港湾内への土砂流入量の違いを確認するものである。なお、養浜土砂量は平成 17 年夏期～平成 21 年夏期の期間に東側航路と東側防砂堤内に堆積した土砂量の年間当たりの平均値から 19.8 万  $m^3$  とした。検討対象期間は、狭域モデルでは 2.1.1 と同様とし、広域モデルでは 10 年間とした。

### 3.1 海岸保全施設の配置検討

図-16 に、ケース 1 の地形変化量を示す。延伸した防砂堤背後（領域①）において砂の集積が大幅に増加しており、防砂堤延伸による漂砂特性が再現されている。図中の括弧内の数字は現況港形との地形変化量の差を示しているが、現況港形に対する土砂変化量の差は、領域①で+13.8 万  $m^3$ 、領域②で-9.5 万  $m^3$ 、領域③で+0.5 万  $m^3$  であった。領域③（航路部）の現況港形の土砂堆積量は 13.1 万  $m^3$  で、それに対してケース 1 の土砂変化量は +0.5 万  $m^3$ （合計 13.6 万  $m^3$  の堆積）であり、防砂堤を延伸しても航路部への土砂流入を抑制されていない。これは、領域②での大規模な侵食傾向から推測すると、もともと領域②に堆積していた土砂が領域③へ移動したためと考えられる。また、領域②で大規模な侵食傾向となったのは、防砂堤を延伸することにより、碎波帯領域

を含む領域①からの土砂供給が無くなったためと考えられる。このことから、長期的には航路部への土砂流入を抑制する効果が有るとと思われる。

### 3.2 土砂管理手法の検討

図-17(a)～(c)は、港湾の西側港外に養浜したケース 2～ケース 4 の 1 年間当たりの地形変化量の予測計算結果である。図中の括弧内の数字は図-18 の現況港形との地形変化量の差を示している。養浜砂の投入場所が港湾に最も近いケース 4 では、養浜区域に近い領域②では 10.1 万  $m^3$  の堆積となるが、港内の領域①では変化が無い。また、港湾の西側 2km の海上養浜するケース 2 では領域①②の地形には変化が無く、ケース 3 では領域①で+0.1 万  $m^3$  と僅かに増加しているにすぎない。

このように、狭域モデルは港湾内や港湾周辺海域への養浜砂の影響検討にも活用可能であり、石狩湾新港での検討例では、港湾内への養浜砂流入の影響が少ないことが確認された。

図-19は、19.8万 m<sup>3</sup>の土砂を港湾西側に毎年養浜した場合の広域モデルによる10年後の汀線予測結果である。港湾の東側では、石狩川や防砂堤付近において汀線の前進が著しい。港湾の西側では、養浜無しで若干の侵食傾向となるが、養浜有りでは堆積傾向を示している。このように、広域モデルでは長期的な汀線変化の将来予測が可能であり、石狩湾で養浜を行った場合には海浜保持に対して効果的であることが確認された。

### 3.3 長期的な海岸管理費用の検討

図-20は、現況港形とケース1の防砂堤を500m延伸した港形において、長期的な海岸管理費用を試算したものである。維持浚渫土砂量については、図-12の狭域モデルによる東側防砂堤内や航路部への堆積土砂量から13万 m<sup>3</sup>とした。また、陸上浚渫は東側防砂堤内に堆積する土砂を陸上からバックホウ浚渫することを想定しており、海上浚渫は航路部に堆積する土砂をグラブ浚渫することを想定している。なお、ケース1では防砂堤内の領域①に13.8万 m<sup>3</sup>の土砂が堆積し、防砂堤内の水深と面積から算出した許容土砂堆積容量(約147万 m<sup>3</sup>)に対して約10年で満砂になるため、11年目から維持浚渫が必要と仮定している。

陸上浚渫は海上浚渫に比べて浚渫費が安価であるため、長期的には現行港形で陸上浚渫をした場合が最も安価な結果となった。なお、防砂堤500m延伸と陸上浚渫を併用した場合も同様の工事費となるが、防砂堤の維持管理費や将来的な改修費などを含まない。また、陸上浚渫費の中に仮設道路の費用なども含まないため、事業実施上は施工上の制約などを考慮した上での詳細な検討が必要であると思われる。

## 4 寒冷地の高波浪が海岸侵食に与える影響

### 4.1 実験概要

実験は図-21に示す二次元造波水路(長さ27.0m×幅0.6m×高さ1.2m)で行った。水路内には1/10および1/100勾配でモルタル固定床を作成し、その上に縮尺1/30でサロマ湖の砂州断面を砂で模倣的に再現した。砂の法面勾配は1/15とし、中央粒径は0.158mmの7号珪砂を使用した。

実験ケースを表-3に示す。近年の冬期波浪としては、2004年1月に有義波高7.16mの高波浪が観測されているが、浅水・砕波変形により汀線付近での波高は小さくな

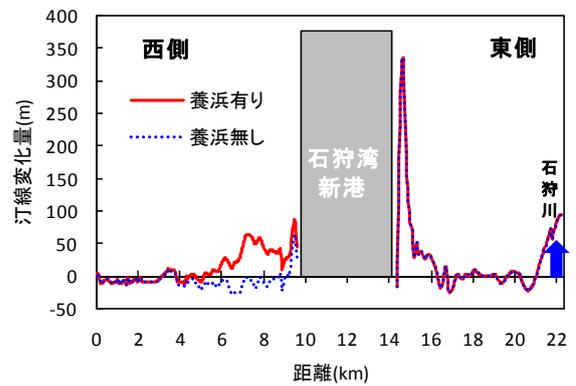


図-19 広域モデルによる10年後の汀線予測結果

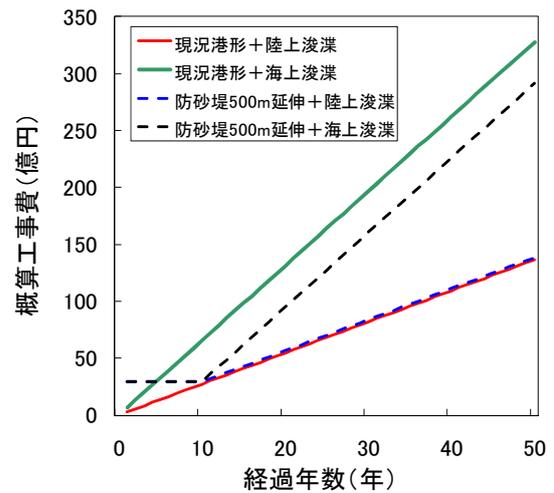


図-20 長期的な海岸管理費用の算出

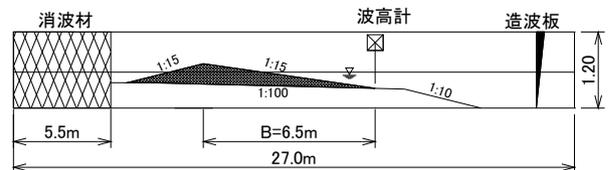


図-21 実験水路

り、砂州の侵食量は小さくなる。このため、浅水変形後に汀線付近で最大となる波で検討する必要がある。本検討では、ケースI-5およびI-6が最大沖波となっており、浅水変形考慮後の港外側の法尻地点における波高が $H_{1/3}=6.0m$ となるよう通過波を作成している。

ケースI-1~I-5では波高の大小が汀線変化に与える影響を確認し、ケースI-6により1.0mの海面水位の上昇が汀線後退へ与える影響を検討する。また、ケースII-1~II-16については、図-22に示すような養浜断面を水深別に水深0cm、12.3cm、15.7cm、19.0cmの4地点に投入し、養浜土砂の投入水深別の効果を比較検討する。また、ケースI、IIでは実験波を規則波としているが、

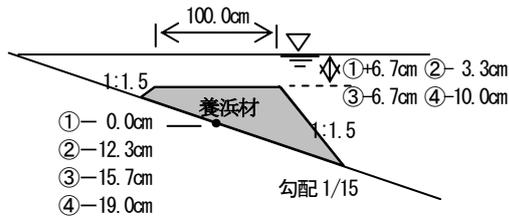


図-22 養浜断面

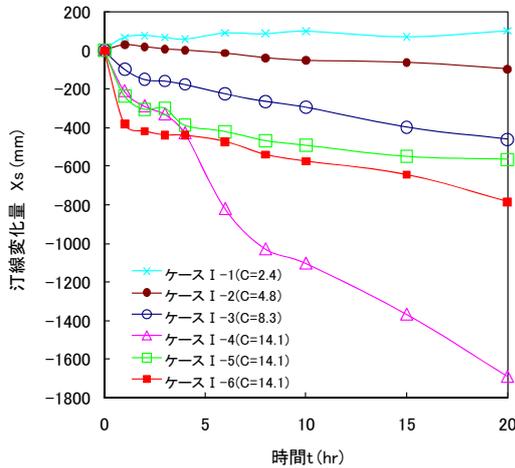


図-23 汀線の経時変化 (ケース I-1~ I-6)

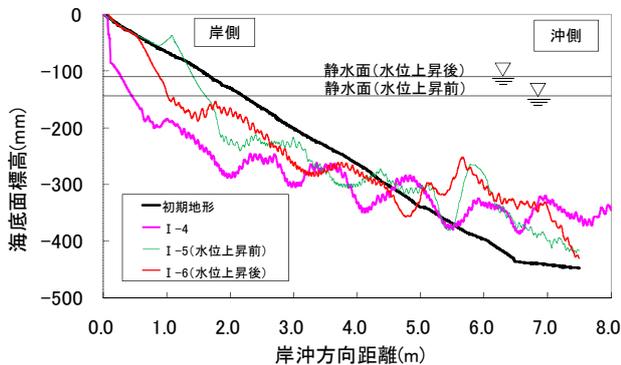


図-24 20時間後の縦断地形変化 (ケース I-4~ I-6)

ケースⅢでは不規則波とし、砂州が越波する条件での断面変化について確認する。

なお、堀川ら<sup>13)</sup>は長時間の波が作用した後の海浜形状を汀線前進・中間・後退型に分類し、次式(1)で定義されるC値で整理している。

$$C = (H_0 / L_0) \cdot (\tan \beta)^{0.27} \cdot (d_{50} / L_0)^{-0.67} \quad (1)$$

ここに、 $H_0$ は沖波波高、 $L_0$ は沖波波長、 $\tan \beta$ は移動床勾配、 $d_{50}$ は底質の中央粒径である。本実験のC値を表-3に示しているが、本実験では前進型から後退型の幅広い汀線変化に対応した波高条件としている。

表-3 実験ケース

CASE No.	砂粒径 $d_{50}$ (mm)	沖波 $H_0$ (cm)	周期 $T_0$ (sec)	水位 h (cm)	養浜水深 (cm)	造波時間 t (hr)	C値
I-1	0.158	1.67	1.10	29.0	—	20	2.4 (前進)
I-2	"	3.33	1.10	29.0	—	"	4.8 (中間)
I-3	"	7.00	1.46	29.0	—	"	8.3 (中間)
I-4	"	13.3	1.73	29.0	—	"	14.1 (後退)
I-5	"	16.0	2.28	29.0	—	"	14.1 (後退)
I-6	"	16.0	2.28	32.3	—	"	14.1 (後退)
II-1	"	1.67	1.10	29.0	12.3	6.0	2.4 (前進)
II-2	"	1.67	1.10	29.0	15.7	"	2.4 (前進)
II-3	"	1.67	1.10	29.0	19.0	"	2.4 (前進)
II-4	"	1.67	1.10	29.0	0.0	"	2.4 (前進)
II-5	"	3.33	1.10	29.0	12.3	"	4.8 (中間)
II-6	"	3.33	1.10	29.0	15.7	"	4.8 (中間)
II-7	"	3.33	1.10	29.0	19.0	"	4.8 (中間)
II-8	"	3.33	1.10	29.0	0.0	"	4.8 (中間)
II-9	"	7.0	1.46	29.0	12.3	"	8.3 (中間)
II-10	"	7.0	1.46	29.0	15.7	"	8.3 (中間)
II-11	"	7.0	1.46	29.0	19.0	"	8.3 (中間)
II-12	"	7.0	1.46	29.0	0.0	"	8.3 (中間)
II-13	"	13.3	1.73	29.0	12.3	"	14.1 (後退)
II-14	"	13.3	1.73	29.0	15.7	"	14.1 (後退)
II-15	"	13.3	1.73	29.0	19.0	"	14.1 (後退)
II-16	"	13.3	1.73	29.0	0.0	"	14.1 (後退)
III-1	"	16.0	2.28	29.0	—	20	14.1 (後退)
III-2	"	16.0	2.28	32.3	—	"	14.1 (後退)

実験終了後の砂の縦断地形は連続式砂面計により、水路中央部1測線を縦断方向に2mm間隔で計測を行った。測定時間の間隔は実験ケースI-1~I-6では実験開始後1時間、2、3、4、6、8、10、15、20時間とし、ケースII-1~II-16の場合は実験開始後1、2、3、4、6時間とした。

#### 4.2 水位上昇が海岸侵食へ与える影響

図-23にケースI-1~I-6の汀線の経時変化を示す。海浜形状の分類のC値が大きくなるほど、汀線後退量が大きくなっている。ただし、ケースI-4とI-5を比べると、沖波が小さいI-4の方が汀線変化量が大きく、波作用20時間後の地形についてはケースI-4では-1688mm、ケースI-5では-564mとなっている。これは、図-24に示すようにケースI-5では沖合にバーが発達し、沖側で波が碎波することにより汀線の後退が抑えられたためと考えられる。しかし、波高が大きい場合に侵食量が小さくなる訳では無く、沿岸方向の漂砂を考慮した場合には、波高が大きいほど侵食量は大きくなる。

次に、水位上昇後のケースI-6では、水位上昇前のケースI-5に比べ0.22m汀線後退量が多くなっている。なお、この汀線変化量は初期の汀線をゼロとしているため、水位上昇による汀線後退量(0.5m)を含んでおらず、この後退量を含めると水位上昇により約23倍の汀線後退量となることが確認された。

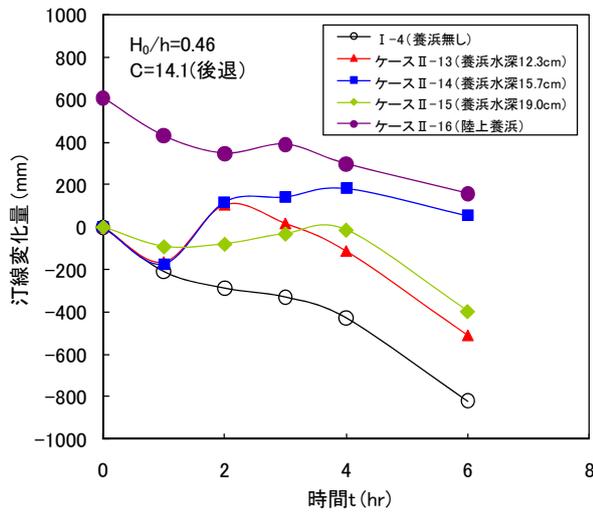


図-25 養浜による汀線の経時変化

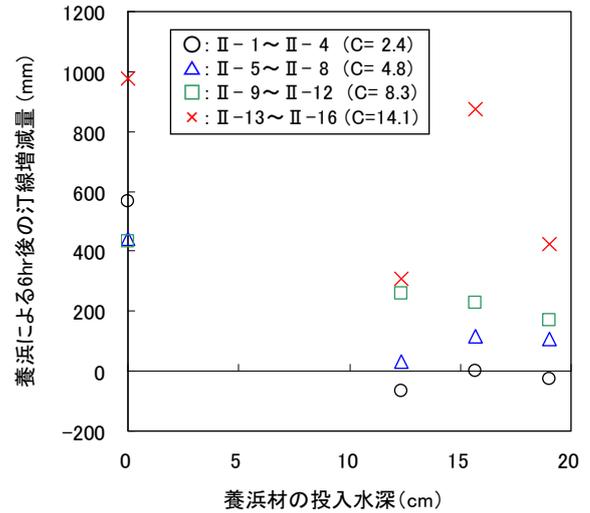


図-26 養浜材の投入水深別養浜効果

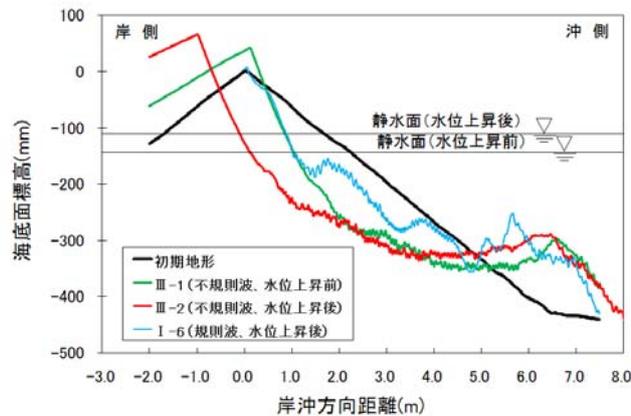


図-27 20時間後の縦断地形変化 (ケースⅢ-1～Ⅲ-2)

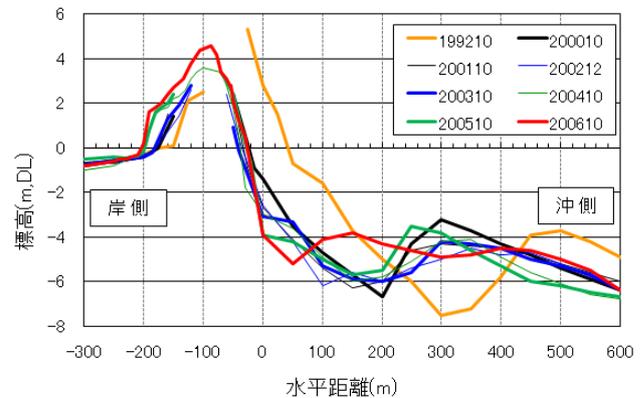


図-28 サロマ砂州断面の経年変化

### 4.3 養浜による侵食防止効果

図-25 は汀線後退量が最も大きかったケース I-4 において養浜を行った場合の汀線の経時変化を示す。養浜材が無い場合のケース I-4 と養浜を行った場合の各ケースを比べると、全ての養浜ケースで汀線後退を抑制する効果が見られた。なお、陸上部に養浜したケース II-16 の汀線変化量は466mm であるが、水中に養浜を行ったケースよりも効果が高く、6hr 後の汀線変化量もプラスとなっている。

図-26 は、横軸を養浜材の投入水深とし、縦軸は養浜材が無いケースに対する汀線増減量としたもので、投入水深別の養浜効果を示している。ほとんどのケースで汀線増減量はプラス側を示しており養浜による効果が確認できる。養浜材の投入水深別の効果については、水中部(水深 123~19.0cm) では明確な違いはみられないが、陸上部(水深 0cm) に養浜したケースは、水中部に養浜を行ったケースよりも効果が高い結果となった。C 値の

違いについては、C 値が大きいほど、すなわち高波浪条件ほど汀線増減量が大きい傾向がみられ、高波浪条件ほど養浜効果が顕著に表れやすい結果となっている。

なお、ケース II-1~ケース II-4 で縦軸が負となっているのは、C 値が 2.4 と静穏な条件であり、養浜無しの場合でも汀線が前進しており、養浜の有無による差が表れなかったためである。

### 4.4 砂州の越波が海岸侵食に与える影響

図-27は、ケースⅢ-1~Ⅲ-2での、造波開始から20時間後(現地スケールで約4.5日の時化)の縦断地形変化である。ケース I-6 の規則波では砂州を越波することはなかったが、不規則波では、波群中に高波浪が含まれるため越波が発生した。

縦断地形をみると、不規則波では規則波と比べて沖側が大きく侵食されているが、その一方で、越波により侵食された砂が砂州法面上に運ばれることにより砂州の頂部が高くなっている。また、岸側の法面についても、砂

州頂部を乗り越えた砂が砂州の背後側に堆積することにより、断面積が増加している。このことについては、著者ら<sup>14)</sup>が現地の砂州断面にもあらわれていることを報告している。図-28は、サロマ湖1湖口東側の断面地形変化を示したものである。1992年から2003年にかけて大きく侵食しているが、2003年以降に着目すると砂州高は増加傾向であり、岸側の法面については越波により砂州の断面積が増加している。

次に、水位上昇の影響については、水位上昇後のケースⅢ-2の方が水位上昇前のケースⅢ-1に比べ0.61m汀線後退量が多く、水位上昇による汀線後退分(0.5m)を含めると約2.0倍の汀線後退量となっている。一方で、砂州の頂部は水位上昇前と比べて高くなり岸側の堆積量も増えている。

なお、高田<sup>15)</sup>の打ち上げ高算定式を本実験に適用すると、ケースⅢ-1、Ⅲ-2の不規則波だけでなくケースⅠ-6の規則波でも越波することとなるが、高田の実験が固定床で行っていることにに対し、本実験が移動床であり波が斜面に浸透し越波しづらくなること、また、ケースⅠ-6では沖合にバーが発達し碎波の影響で越波しなかったと考えられる。

このように、移動床実験および現地測量結果から、現状では高波浪の越波によりサロマ湖の砂州が決壊する危険性はみられず、水位を上昇させた場合も同様であった。しかし、今後、気候変動に伴う流水減少等により来襲する波向きに変化が生じると、沿岸漂砂量および移動方向が変化するため、断面的な検討だけでなく平面的および広域的な検討により、サロマ湖砂州全体の安定性を検討することは重要な課題である。

## 5. まとめ

本研究では、石狩湾を対象に地形変化を精度良く再現可能な土砂移動モデルの開発を行うとともに、モデルを用いた海岸管理手法の効果予測を行った。また、サロマ湖砂州を対象とした移動床水理模型実験により、海面水位の上昇および越波が侵食に与える影響ならびに養浜の効果について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 狭域モデルでは、波浪場の不規則性および吹送流に加えて境界外からのSSを考慮することにより、実測値で確認された港口および東防砂堤内側の堆積傾向、さらに港湾周辺の土砂の堆積傾向を良好な精度で再現することが可能となる。
- 2) 広域モデルでは、入射波の波向きを変化させ、港湾内への土砂流入を境界条件として考慮することによ

り汀線変化の再現性が大幅に向上する。

- 3) 本研究で開発された土砂移動モデルにより、港湾周辺における効果的な防砂構造物の配置および維持浚渫場所の検討が可能となり、現場条件に応じた効果的な海岸管理手法を提案する事が可能となる。
- 4) 高波浪がサロマ湖海岸に与える影響を移動床水理模型実験により検討した結果、越波するような高波浪条件においても砂州は決壊しない事が確認された。また、1mの水位上昇により汀線後退量は約2.3倍大きくなるが、その場合においても砂州の決壊は確認されなかった。

今後は、港湾周辺の長期的な土砂の移動現象を詳細に把握するためのモデルの構築が必要である。また、流水減少による波向きの変化に対するサロマ湖砂州全体の安定性を検討することが必要である。

## 参考文献

- 1) 本間大輔, 窪内篤, 先川光弘, 山下俊彦, 安井塔基, 宮武誠: 「冬期暴浪時の石狩湾新港周辺での流動・標砂特性」, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 466-470, 2004.
- 2) 加藤茂, 山下隆男, 伊藤政博, 三島豊秋: 「風によ広域海浜流の発生機構と平面分布特性」, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 431-435, 1999.
- 3) 渡辺晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山勉: 「構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル」, 海岸工学論文集, 第31巻, pp. 406-410, 1984.
- 4) 岩垣雄一: 「限界掃流力の流体力学的研究」, 土木学会論文集, 第41号, pp. 1-21, 1956.
- 5) Rubey, W. W.: Settling velocity of gravel, sand and particles, Amer. Jour. Sci., Vol. 25, pp. 325-338.
- 6) Sheng, Y. P. and W. Lick: The transport and resuspension of sediments in a shallow lake, J. Geophys. Res., Vol. 84, pp. 1809-1826, 1979.
- 7) 山崎真一, 本間志歩, 山下俊彦: 「石狩湾河口沿岸域における底質の巻上げと水質変動」, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 966-970, 2004.
- 8) 山崎真一, 山下俊彦, 江里口知巳: 「石狩湾の土砂収支と底質の移動特性」, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 646-650, 2006.
- 9) 小笹博昭・A.H. Brampton: 「護岸のある海浜の汀線変形数値計算」, 港湾空港技術研究所報告, 第18巻, 第4号, pp. 77-104, 1979.12.
- 10) 清水康行・嵯峨浩・早川博・品川守: 「石狩川の土砂流出に関する研究」, 水工学論文集, 第42巻, pp. 1039-1044, 1998.
- 11) 藤田光一: 「流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土

- 砂動態制御への展望」, 水工学に関する夏期研修会講義集, 第36回, pp. B-4-1~B-4-15, 2000年.
- 12) 芦田和男・奥村武信: 「ダム堆砂に関する研究」, 京都大学防災研究所年報, 17-B, pp.1-16, 1974.
- 13) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右: 波により二次元海浜変化に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第21巻, pp.193-199, 1974.
- 14) 横山慎・坂口翔・林健太郎・菅原吉浩・猿渡亜由未・山下俊彦: 「サロマ湖沿岸海域の海浜過程への気候変化の影響」, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.1221-1225, 2010.
- 15) 高田彰: 「波の遡上、越波および反射の関連性について」, 土木学会論文集, 第182号, pp.19-30, 1970.
- 16) 田中博通・川口達矢・本田秀樹・鈴木操: 「沖合養浜工法の断面実験に関する研究」, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.1087-1091, 2007.
- 17) 大塚淳一・菅原吉浩・山本泰司・三船修司・宮武誠・山下俊彦: 「漂砂外力の非定常性を考慮した石狩湾新港周辺の海底地形変化予測」, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 1143-1148, 2009.
- 18) 大塚淳一・菅原吉浩・山本泰司: 「波浪の不規則性と非定常性を考慮した地形変化モデルの開発」, 寒地土木研究所月報, 第685回, 2010.
- 19) 菅原吉浩・大塚淳一・山本泰司: 「境界外からの土砂流入を考慮した地形変化予測モデル」, 北海道開発技術研究発表会論文集, 第54回, 2011.