# 境界外からの土砂流入を考慮した地形変化予測モデル

（独）土木研究所寒地土木研究所　○菅原　吉浩
大塚　淳一
山本　泰司

石狩湾新港周辺を対象に土砂移動現象を精度良く再現できる数値モデルを開発した。既往の土砂移動モデルと比較して、境界外からの SS 流入を考慮することにより地形変化量の再現性が向上することを確認した。また、開発した土砂移動モデルを用いることにより、防砂堤や養浜による港湾周辺の地形変化を予測することが可能となり、海岸管理手法を検討するツールとしての有効性が確認された。

キーワード：漂砂、海岸管理、養浜、非定常緩勾配不規則波動方程式

## １．まえがき

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、定期的な浚渫や防砂構造物の整備が行われている。浚渫を行う適切な時期や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なるが、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。

土砂移動モデルに関する既往の研究事例として、著者ら [1)]は石狩湾新港を対象に波浪の不規則性と非定常性を考慮した波浪場の計算を行い、漂砂外力として風波、海浜流、長周期波、広域吹送流を与えることにより、地形変化量の計算精度が向上することを確認している。しかし、計算領域内で過剰に侵食が発生する場所がみられるなど、再現性に課題が残っている。

また、沿岸漂砂が卓越した海岸において防波堤・導流堤・離岸堤などの構造物が設置されると構造物の上手側では堆積が生じ、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。

本研究では、土砂移動モデルの計算精度の向上を図るため、石狩湾新港を対象に計算境界外からの土砂の流入を考慮した地形変化量の計算手法の開発を行う。また、開発した土砂移動モデルの活用例として、海岸保全施設の土砂集積効果と土砂管理として養浜を行った場合の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効果的な海岸管理手法の検討を行う。

## ２．土砂移動モデル

土砂移動モデルには、波・流れによる土砂移動に伴う平面的および３次元的な地形変化を再現する海浜変形モデルと、広範囲で長期間の海岸線の変化を予測する汀線変化モデルがある。本研究では、図-1 に示す石狩湾新港周辺海域の沿岸方向 12km、岸沖方向 7km の比較的広い範囲を対象に海浜変形モデルを適用した。

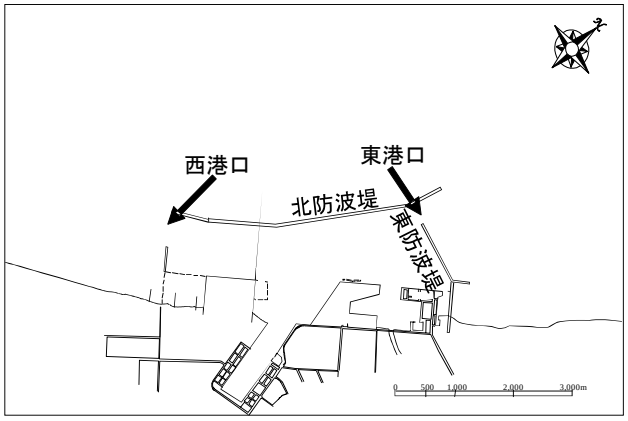


図-1 計算領域と港湾形状

表-1　土砂移動モデルの漂砂と外力の関係

| | 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 | × | × | × | ○ |

Yoshihiro Sugawara , Junichi Otsuka , Yasuji Yamamoto

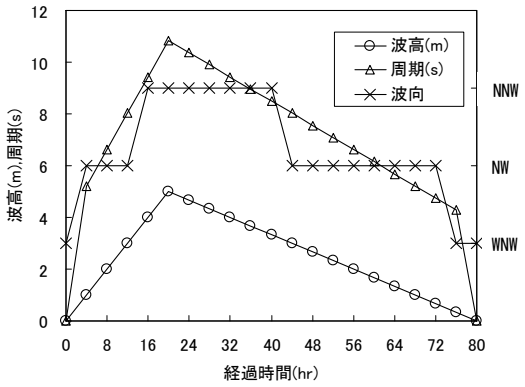


図-2　風波の時間変化モデル

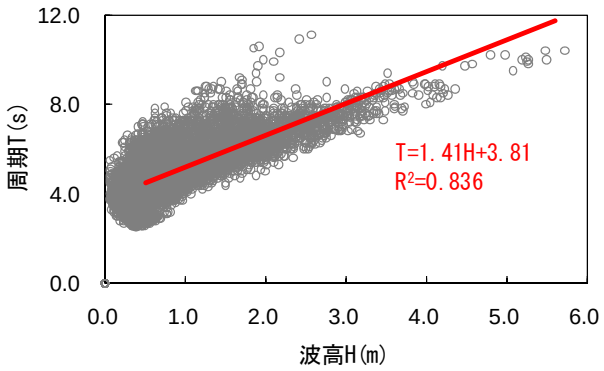


図-3　風波の波高と周期の相関

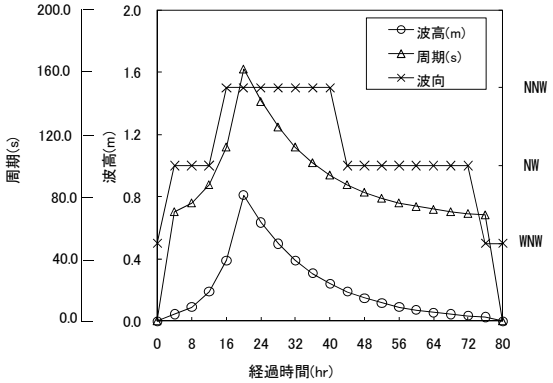


図-4　長周期波の時間変化モデル

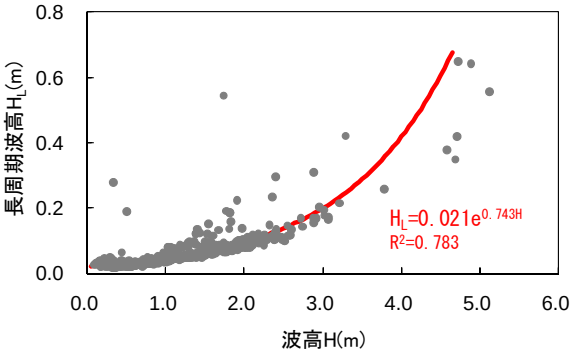


図-5　風波の波高と長周期波高の相関

本モデルは、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。

### (1) 風波・海浜流・長周期波流動の計算方法

風波の計算では、砕波によるエネルギー減衰（渡辺ほか [2]）を考慮した非定常緩勾配方程式に不規則波を適用した。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 年間の沖波波浪観測データをもとに、図-2 に示すとおり、風波の時間変化をモデル化した。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。

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) 広域吹送流の計算方法

広域吹送流の計算では、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、

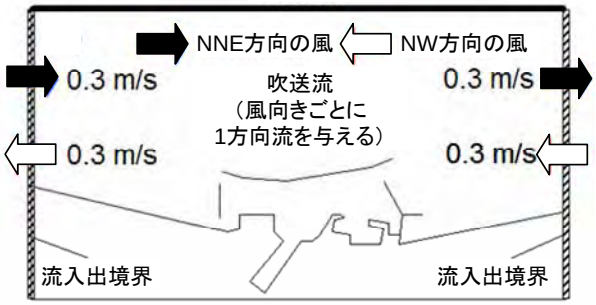


図-6　吹送流の境界条件

緯度方向 200 km と設定した。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。

### (3) 漂砂量の評価方法

掃流砂量については、無次元限界掃流力を岩垣 [3]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 の式とし、沈降速度は Rubey 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。

### (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 濃度を設定することで考慮することとした。この場合、境界上の SS 濃度を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 [4] が石狩湾新港の東側水深 23.5m 地点において 2003 年 1 月に現地観測を実施しているが、有義波高 5.5m の条件で底面上 2.0m の SS は 150ppm を超えており、波高が 2m 以下の静穏時では概ね 10ppm 程度で推移している。

山崎ら [5]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 が小さくなっている。

山崎ら [6]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、SS 濃度については、静穏時においても 10ppm 程度が確認されていることから西側境界は 10ppm とし、東側境界は石狩川からの出水により SS 濃度が高くなっていると考え 50ppm とした。

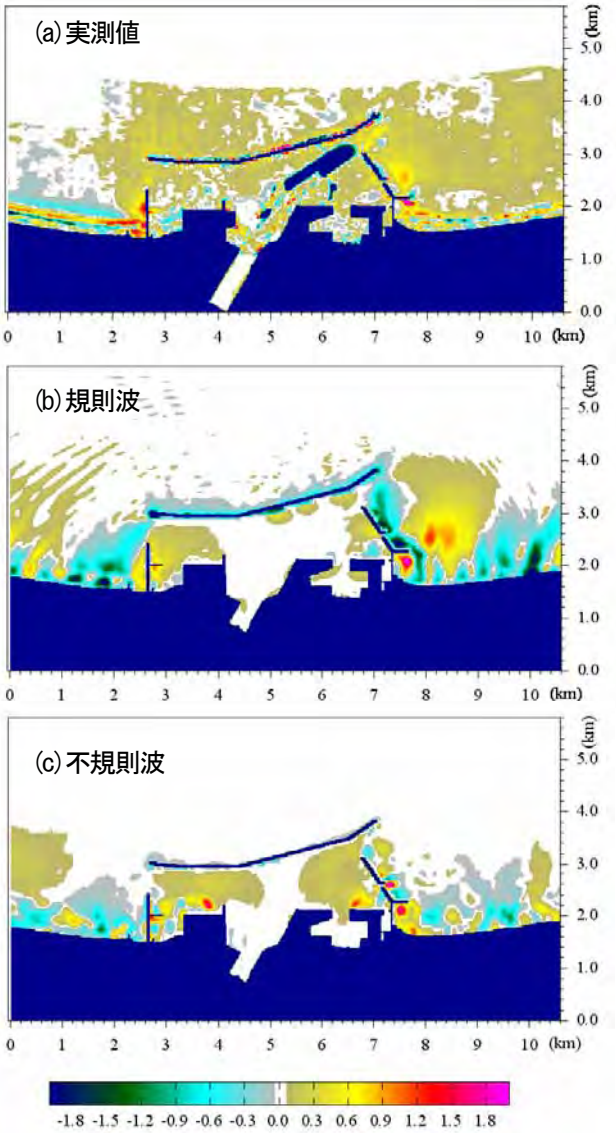


図-7　海浜流による地形変化量の再現計算結果

## 3　土砂移動モデルの現況再現

図-7 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

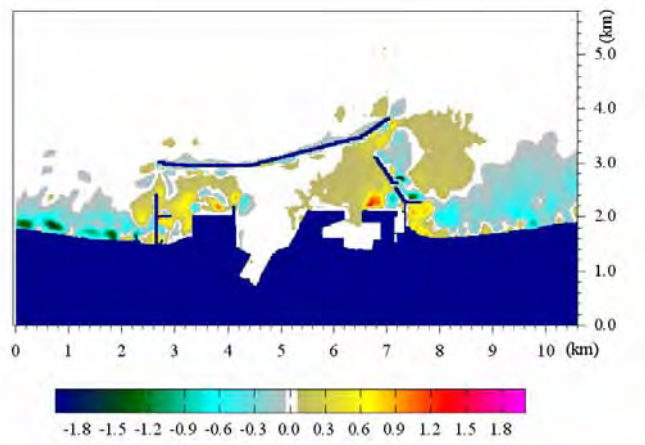


図-8　不規則波の海浜流，長周期波流動および吹送流による地形変化量の計算結果

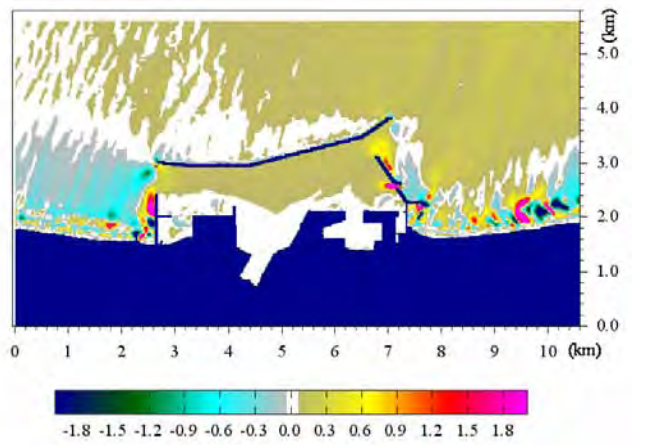


図-9　境界からのSS流入を考慮した場合の地形変化量

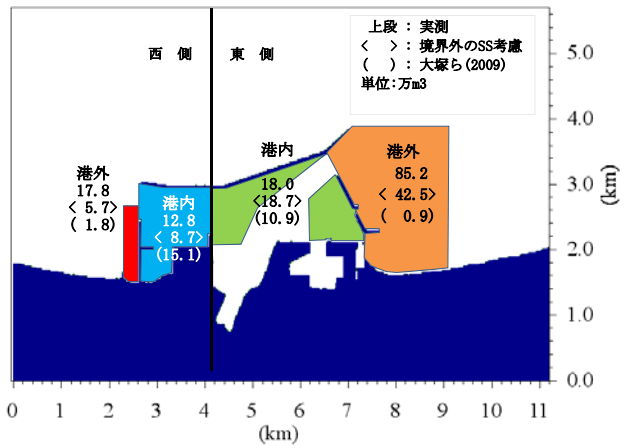


図-10　年間の領域別の土砂変化量

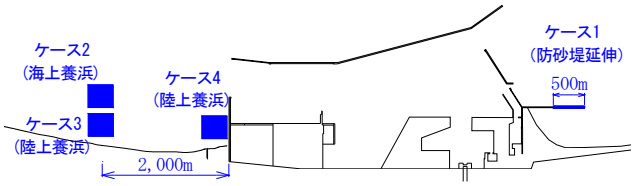


図-11　海岸管理手法の検討ケース

よる地形変化量の計算結果（図-7(b)）では、東防波堤付近や西側港口付近の堆積傾向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象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-7(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-7(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。

図-8 は図-7(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、東側の防波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、港湾の東側では実測にはみられない過剰な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し、境界外からの土砂の流入を考慮しない場合には一方的に侵食傾向となるためである。

図-9 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-8 と比較すると東側港外の侵食範囲が小さくなっており、実測地形に近づいている。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-10 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、東側港外においては、著者らの既往モデルよりも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領域外からの SS 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が確認された。

## 4．土砂移動モデルによる海岸管理手法の検討例

計算ケースは図-11 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により、航路の維持浚渫費を低減する効果を想定したもの

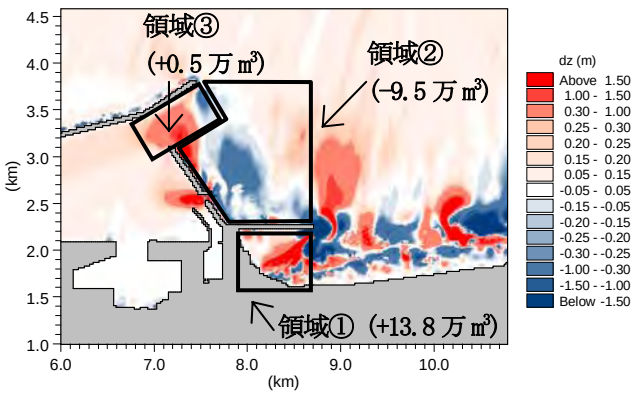


図-12 ケース 1 の地形変化量

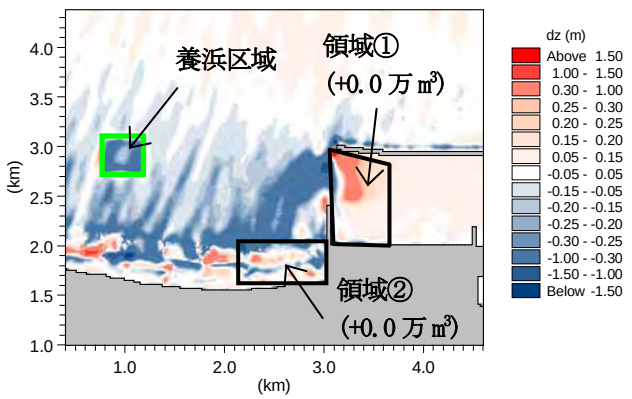


図-13(a) ケース 2 の地形変化量

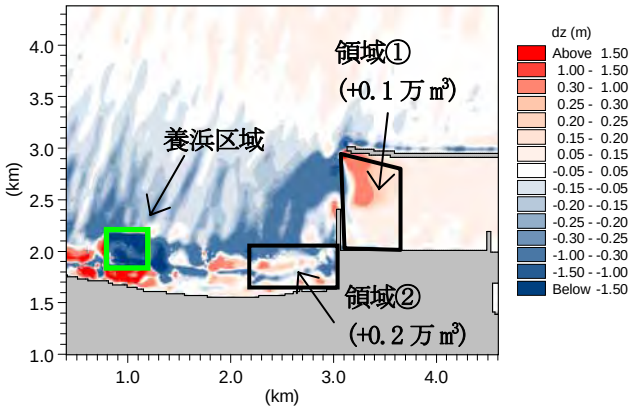


図-13(b) ケース 3 の地形変化量

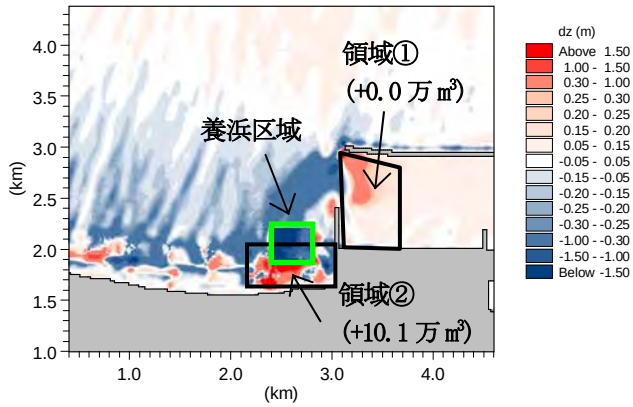


図-13(c) ケース 4 の地形変化量

である。ケース 2～4 は土砂管理として養浜を行った場合で、陸上養浜と海上養浜の違いによる港湾内への土砂流入の影響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。

### (1) 海岸保全施設の配置検討

図-12 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と考えられる。図中の括弧内の数字は図-9 の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 m3、領域②で-9.5 万 m3、領域③で+0.5 万 m3 であった。図-9 における現況港形の領域③（航路部）の土砂堆積量は 13.1 万 m3 であるが、それに対してケース 1 の土砂変化量は+0.5 万 m3（合計 13.6 万 m3 の堆積）であり、防砂堤を延伸しても航路部への土砂流入が抑制されていない。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、砕波帯領域を含む領域①

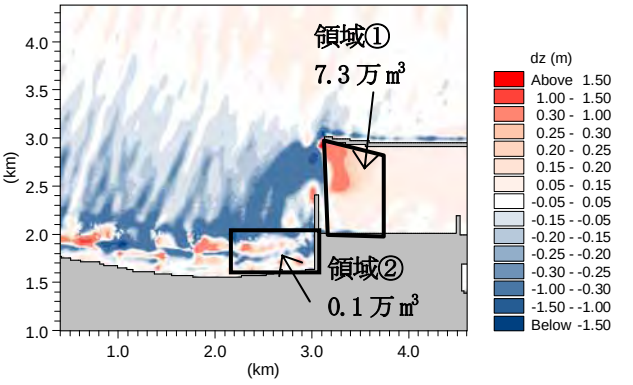


図-14 現況港形の地形変化量

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思われるが、本研究の土砂移動モデルは 1 年間の土砂移動をモデル化したものであり、長期的な土砂の移動現象を把握するためには、異なるモデルへの改良が必要である。

### (2) 土砂管理手法の検討

図-13(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-14 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 m3 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 m3 と僅かに増加しているにすぎない。

このように、土砂移動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、石狩湾新港の例では、港湾内への養浜砂の流入の影響が少ないことが確認された。

### (3) 長期的な海岸管理費用の検討

図-15 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-9 における航路部への堆積土砂量から 13 万 m3 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③に 13.8 万 m3 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 m3）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んでいない。また、陸上浚渫費の中に仮設道路の費用なども含んでいないため、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。

## 5．まとめ

本研究では、石狩湾新港を対象に土砂移動現象を精度良く再現できる数値モデルの構築と、モデルの活用例として海岸保全施設や土砂管理手法の効果について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 波浪場の不規則性や吹送流に加えて境界外からの SS を考慮することにより地形変化量の再現性が向上する。
2) 構築したモデルにより、防砂堤や養浜による港湾周辺の地形変化を予測することが可能となり、海岸管理手法を検討するツールとしての有効性が確認された。

**謝辞**：本研究を行うに際し、北海道開発局小樽港湾事務所からは深浅データの提供など多大なる御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

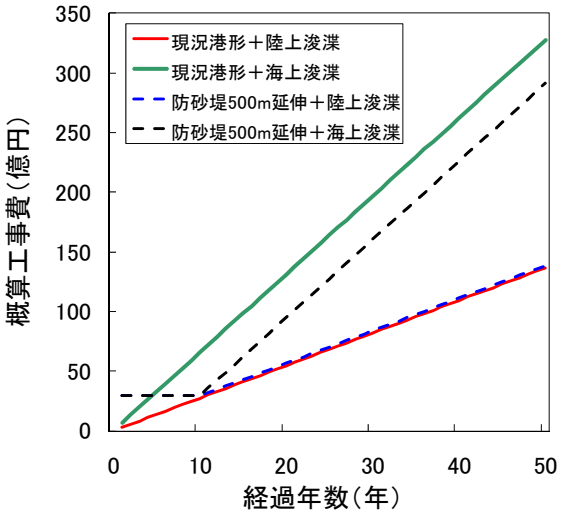


図-15　長期的な海岸管理費用の算出

### 参考文献

1) 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.
2) 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.
3) )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.
4) 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.
5) 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.
6) 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.
7) 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.
8) 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.
9) 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.