

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

ESTIMATION OF BOTTOM TOPOGRAPHY CHANGES IN ISHIKARI NEW PORT
BY A MODEL CONSIDERING UNSTEADY FORCES ACTING ON DRIFT SAND

大塚淳一¹・菅原吉浩²・山本泰司¹・三船修司³・宮武誠⁴・山下俊彦⁵
Junichi OTSUKA, Yoshihiro SUGAWARA, Yasuji YAMAMOTO, Shuji MIFUNE,
Makoto MIYATAKE and Toshihiko YAMASHITA

¹正会員 博(工) (独) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²正会員 (独) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³正会員 日本データサービス株式会社 (〒065-0016 北海道札幌市東区北16条東19丁目1-14)

⁴正会員 博(工) 函館工業高等専門学校環境都市工学科 (〒042-8501 北海道函館市戸倉町14-1)

⁵正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

In this study, bottom topography changes over a period of a year in Ishikari new port was estimated by a sediment transport model that considered unsteady forces acting on drift sand. Wind-wave heights, nearshore currents, long-wave period currents and wind-driven currents were considered as the unsteady forces. The accuracy of the model was evaluated from the field data of bottom topography changes in the port. It was found that the effects of the long-wave period currents on bottom topography changes were relatively small in the port. It was also found that the erosion velocity highly increased in the east-side sea area and around the eastern entrance of the port and sediments transported from outside the port gradually accumulated in the middle of the port when waves developed.

Key Words : Bottom topography changes, Unsteady forces, Sediment transport

1. はじめに

砂浜域を有する海域に港湾施設を建設した場合、港内への流入漂砂による航路埋没や周辺海域の侵食・堆積が生じやすく、海岸保全施設の設置や浚渫等による土砂管理対策が必要となる。合理的な土砂管理対策を構じるためには、港内および港湾周辺海域における地形変化量の将来予測を精度良く行うことが不可欠といえるが、既往の地形変化モデルでは漂砂外力の非定常性や吹送流等の実際の複雑な流動場を考慮したモデルが少なく、実用上十分な再現精度を有するモデル構築には至っていない。

本研究では、漂砂外力(風波、海浜流、長周期波流動および吹送流)の非定常性と波浪の不規則性を考慮した石狩湾新港周辺海域(図-1 参照)に対する1年間の地形変化モデルを構築し、各漂砂外力による港湾周辺海域の地形変化特性を明らかにするとともに、各漂砂外力による地形変化量を合成し実測値と比較することによりモデルの再現

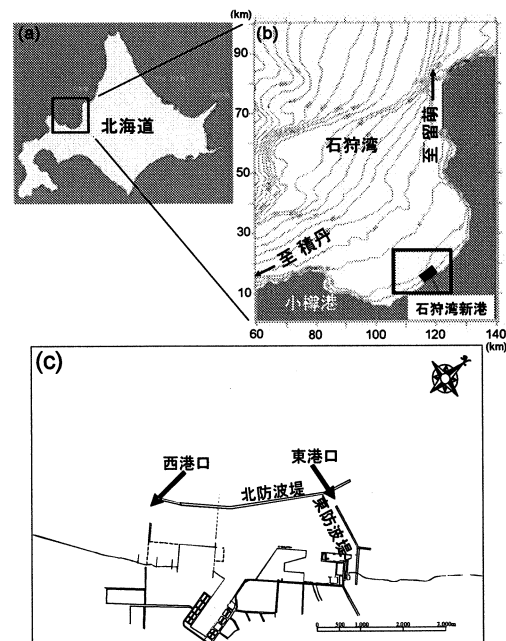


図-1 石狩湾新港の位置図(a)(b)と港湾形状(c)

性を評価した。

2. 地形変化量の計算手法

(1) 漂砂外力の計算手法

地形変化量の計算では漂砂外力として、時間変化を考慮した風波、海浜流、長周期波に伴う流動（以下、長周期波流動）および石狩湾全域を対象とした広域吹送流を考慮した。以下に、各漂砂外力の計算手法を示す。

a) 波浪・海浜流

砕波によるエネルギー減衰（渡辺ほか，1987）¹⁾を考慮し、非定常緩勾配方程式によって石狩湾新港周辺海域（沿岸方向 12 km，岸沖方向 7 km）における波浪変形計算を行った。計算は規則波と不規則波で行われ、波浪の不規則性が地形変化量の計算結果に与える影響について検討した。海浜流は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によって計算した。

b) 長周期波

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）を使用し、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計算した。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海浜流の計算領域と同一とした。

c) 広域吹送流

石狩湾全域を対象とした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) を使用した。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 の計算条件として与える風向・風速については現地観測データが得られてないため、日本気象協会によって公開されている風向・風速の計算結果（2003 年）を使用した。石狩湾では年間を通じて NW 方向および NNE 方向の風の発生頻度が高いことから、広域吹送流の計算では冬期暴浪期におけるこの 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 0.1～0.3 m/s 程度であり、地形変化量を計算する際には、図-2 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た。

(2) 漂砂の発生量・移動量の評価

漂砂については掃流砂と浮遊砂を考慮した。粒径は 2003 年の現地観測結果をもとに全計算領域に

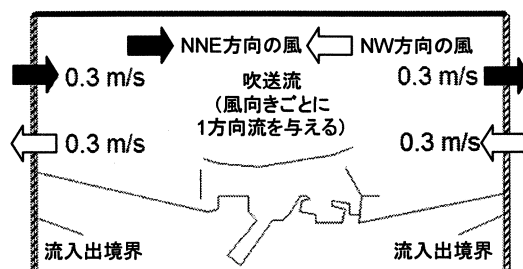


図-2 吹送流の境界条件

表-1 掃流砂と浮遊砂の発生・移動に考慮した漂砂外力

	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	×	×	×	○

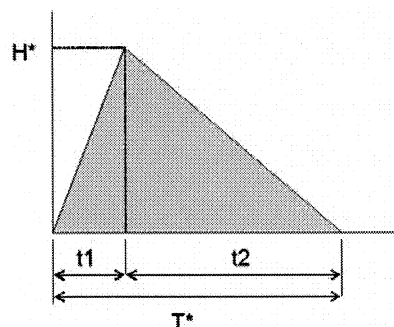


図-3 1 年間を代表する風波の波浪事象モデル（H*：最大波高，T*：継続時間，t1：波高上昇時間，t2：波高下降時間）

表-2 波高別の波向き

波高 (m)	波向き
0 - 1.0 m 未満	WNW
1.0 - 3.0 m 未満	NW
3.0 m 以上	NNW

において 0.15 mm と設定した。以下に、各漂砂の発生量と移動量の評価手法を示す。

a) 掃流砂

掃流砂の発生量は風波の波高および海浜流の流速によって評価し、発生した掃流砂の移動外力として海浜流の流速を考慮した。なお、底質砂に対する無次元限界掃流力は岩垣の式²⁾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 Bowen 式³⁾と Rubey 式を適用した。

b) 浮遊砂

浮遊砂の発生量も掃流砂と同様に風波の波高お

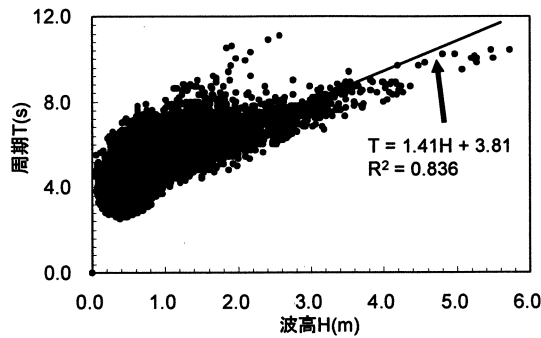


図-4 風波に対する波高と周期の相関

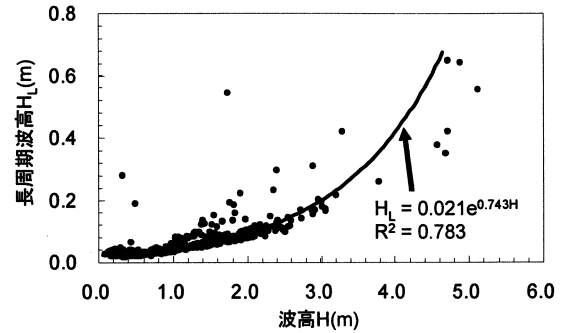


図-6 風波と長周期波の波高に関する相関

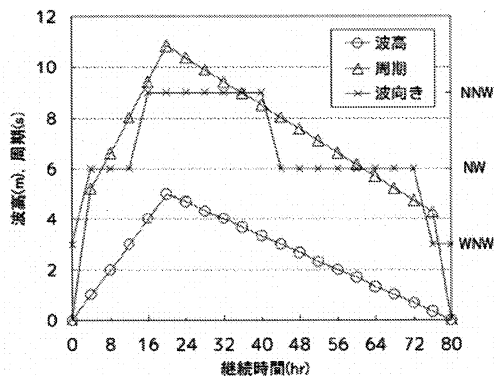


図-5 モデル化された 1 年間の風波の波高、周期および波向きの時間変化

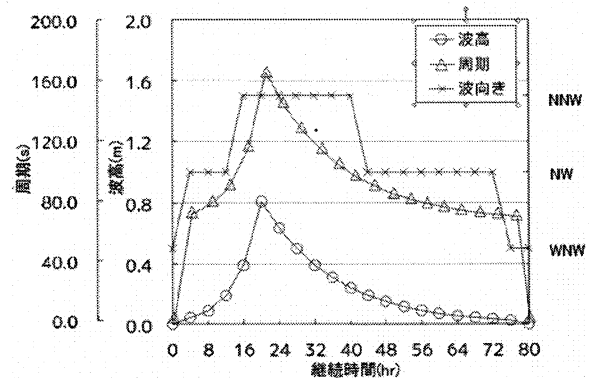


図-7 モデル化された 1 年間の長周期波の波高、周期および波向きの時間変化

よび海浜流の流速で評価し、発生した浮遊砂の移動外力については海浜流、長周期波流動および広域吹送流を考慮した。なお、浮遊砂量の評価では Sheng の式、沈降速度は Rubey 式を適用した。表-1 に掃流砂と浮遊砂の発生・移動に考慮した漂砂外力を示す。

(3) 波浪変化のモデル化

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にあたって、当海域の 1 年間の代表する風波の波浪変化を図-3 に示す最大波高 H^* 、継続時間 T^* 、最大波高到達までの波高上昇時間 t_1 、波高下降時間 t_2 となる時化の発生でモデル化した。最大波高 H^* は石狩湾新港周辺海域において 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年 1 回最大有義波高 5.0 m とした。また、この波浪データから時化時の波浪変化を全て抽出し、最も発生頻度の高い時化の継続時間、最大波高到達までの波高上昇時間および波高下降時間を求め、それらの値から $T^* = 80$ 時間、 $t_1 : t_2 = 1 : 3$ と設定した。各時間の波高は時化の開始から最大波高到達時および最大波高到達時から時化終了時まで直線的に変化すると仮定した。各時間の波高に対応する周期は図-4 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

の高い波向きをその波高における波向きとした（表-2 参照）。図-5 にモデル化された 1 年間の代表する風波の波高、周期および波向きの時間変化を示す。

長周期波については 1 年間の波浪データから風波と長周期波の波高に対する相関式を求め（図-6 参照）、この式に図-5 に示す各時間の風波の波高を与えることにより波高の時間変化をモデル化した。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、この式にモデル化された各時間の波高を与えることにより、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。図-7 に 1 年間の代表する長周期波の波高、周期および波向きの時間変化を示す。

なお、波浪変形、海浜流および長周期波流動の計算では、図-5 と図-7 に示すモデル化された 4 時間間隔で与えられる風波と長周期波の波浪諸元を入射波条件として計算を行い、各時間における波高分布、海浜流および長周期波流動を求めた。

3. 結果および考察

図-8 は 2002 年夏期～2003 年夏期における地形

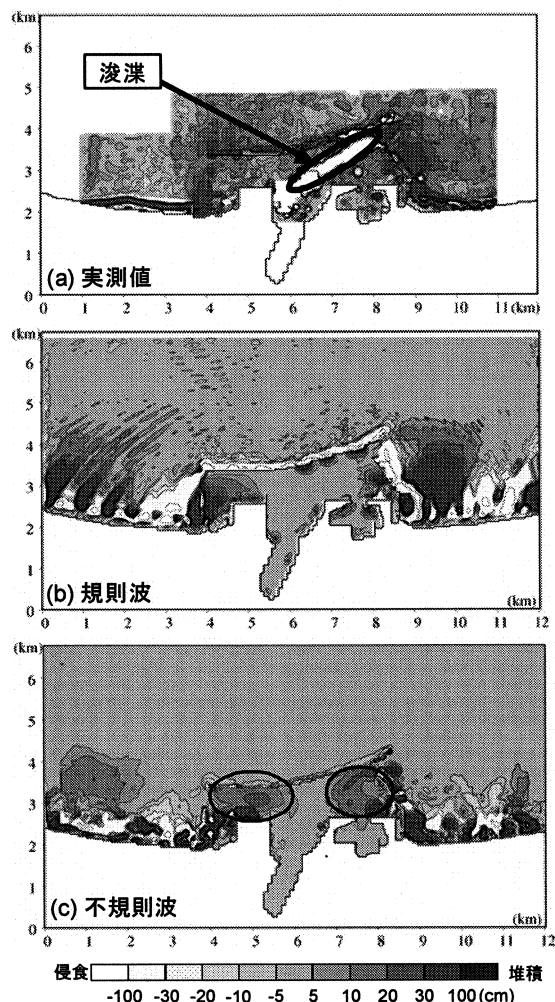


図-8 地形変化量の実測値(a)と海浜流による地形変化量の計算結果 (b); 規則波, (c); 不規則波)

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 (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、東防波堤内側や西側の港内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・堆積が見られず、さらに、東西両港口付近や東防波堤内側 (黒枠内) において実測値 (図-8(a)) と同様な堆積傾向を示している。この結果を踏まえ、以下に示す計算結果については波浪場の不規則性を考慮した計算結果をもとに議論する。

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、港奥部

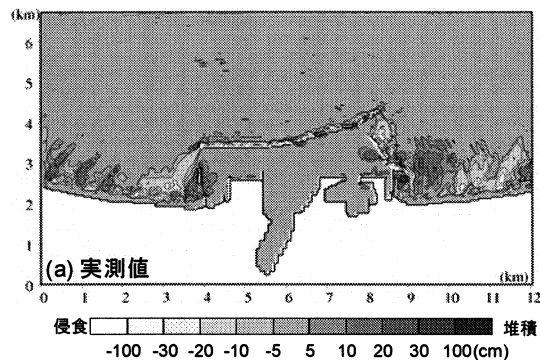


図-9 長周期波流動による地形変化量の計算結果

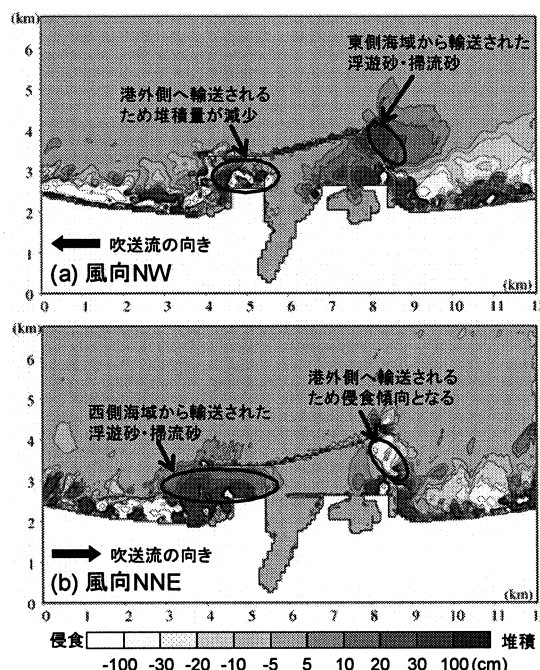


図-10 海浜流と吹送流による地形変化量の計算結果 ((a); 風向 NW, (b); 風向 NNE)

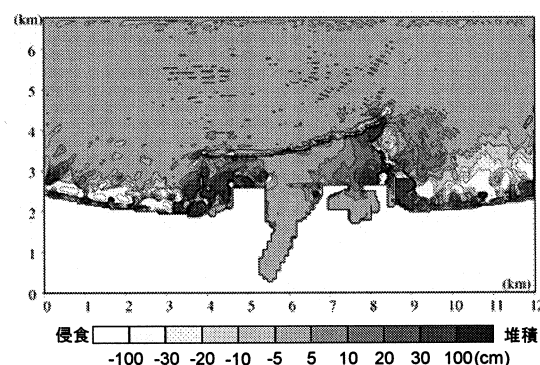


図-11 海浜流、長周期波流動および吹送流による地形変化量の計算結果

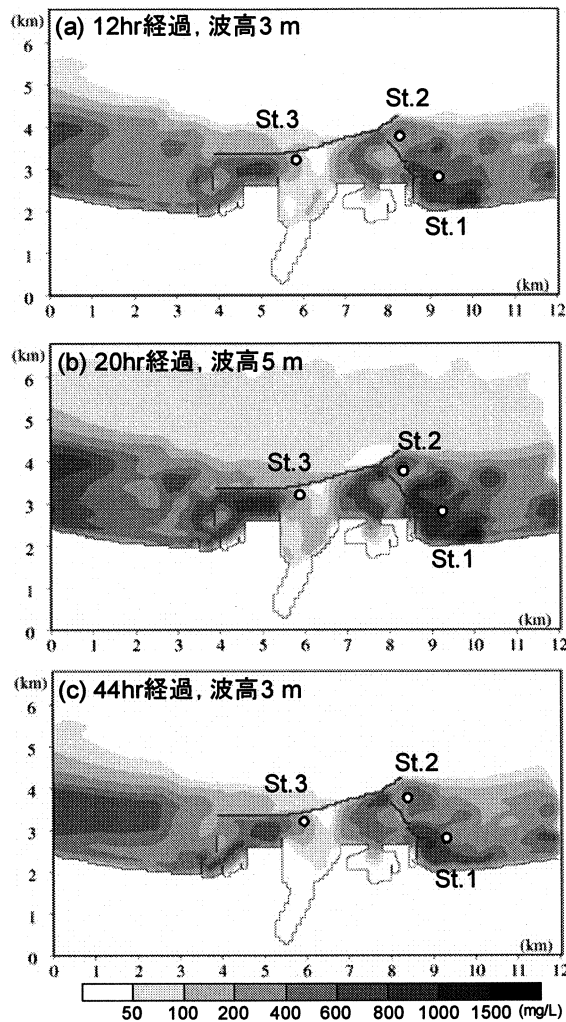


図-12 浮遊砂濃度の計算結果 (a):12 hr, 波高 3 m, (b):20 hr, 波高 5 m, (c):44 hr, 波高 3 m) と St.1, St.2, St.3 における浮遊砂濃度の計算結果の時系列 (d)

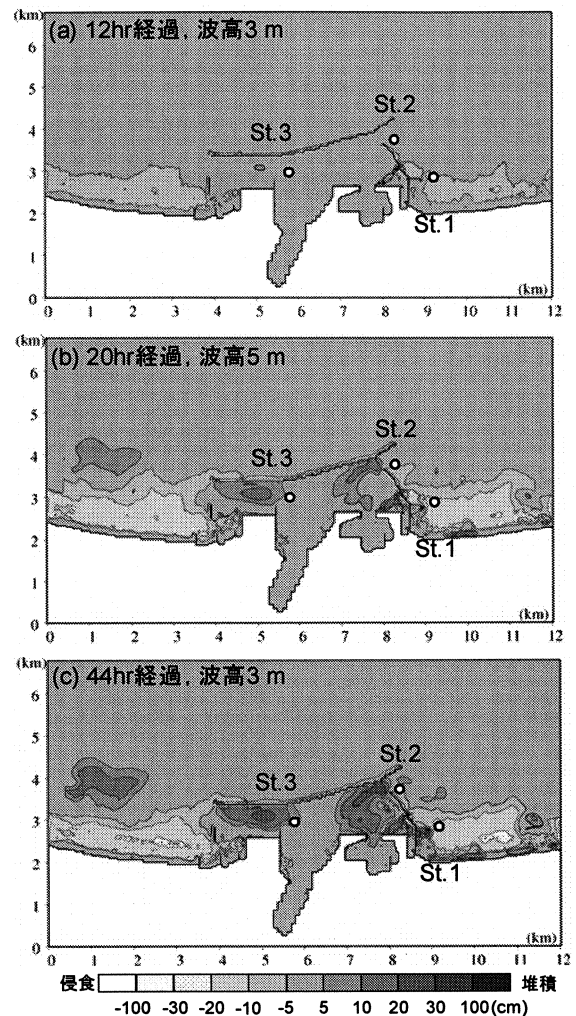
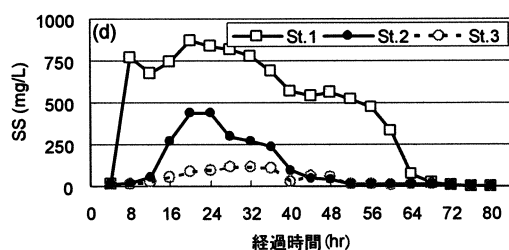
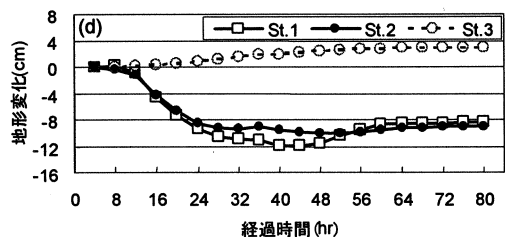


図-13 海浜流による地形変化量の計算結果 (a):12 hr, 波高 3 m, (b):20 hr, 波高 5 m, (c):44 hr, 波高 3 m) と St.1, St.2, St.3 における海浜流による浮遊砂濃度の計算結果の時系列 (d)



まで輸送・堆積される浮遊砂は比較的少ないと考えられる。

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 (図-10(a))、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 (東側黒枠内)。また、図-8(c)において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 (西側黒枠内)。NNE 方向の風による吹送流を考慮した場合 (図-10(b))、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 (西側黒枠内)、東側では東港口付近が侵食傾向となる (東側黒枠内)。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・堆積が顕著に表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 は海浜流、長周期波流動および吹送流を考慮した地形変化量の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比較的良好な精度で再現されているといえる。この結果より、卓越する 2 方向の風の発生頻度を精度良く見積もり、その結果を年間の吹送流の評価へ反映することにより、地形変化量の予測精度が向上するものと推測される。

図-12 は浮遊砂濃度の計算結果(a)(b)(c)と St. 1（東側海域）、St. 2（東港口付近）、St. 3（港内中央部）における浮遊砂濃度の計算結果の時系列(d)を示している。波浪の発達に伴い東西両海域および両港口付近の浮遊砂濃度が顕著に増加し(a)。最大波高到達時(20 hr)ではその濃度は最大となり(b)、波高の下降に伴い減少する(c)。St. 1 における浮遊砂濃度は波浪発達の初期段階において 750 mg/L 程度の高い値を示し、最大波高到達時において最大となる。St. 2 では、St. 3 よりも 8 時間程度遅れて濃度が上昇し最大波高到達時において最大値を示す。St. 3 における浮遊砂濃度は、St. 2 と比較してかなり緩やかに上昇し、最大波高到達時から 8 時間程度遅れて最大値を示す。このような、東港口付近と港内中央部における最大浮遊砂濃度の到達時間の遅れは 2003 年 1 月に観測された時化時の波浪データにおいても確認されており、本計算では時化時における港内外の浮遊砂濃度上昇の時間的遅れを定性的ではあるが再現することが可能といえる。

図-13 は海浜流による地形変化量の計算結果(a)(b)(c)と St. 1（東側海域）、St. 2（東港口付近）、St. 3（港内中央部）における海浜流による地形変化量の計算結果の時系列(d)を示している。波浪の発達に伴い東西両海域の侵食量および港口内側の堆砂量が増加する。St. 1 と St. 2 では侵食傾向を示し、波浪が発達する時間帯(4 hr-20 hr)において侵食量が急激に増加し、最大波高到達後に侵食量はほぼ一定となる。St. 3 では、港外側から土砂が輸送され堆積傾向を示す。堆積速度は波浪発達時においてもかなり遅く、堆積傾向は最大波高到達後も緩やかに継続し、時化開始から 50 時間程度経過した時点で堆積量が最大となる。

4. 結論

本研究の主要な結論を以下に示す。

- 1) 漂砂外力の非定常性と波浪の不規則性を考慮した北海道石狩湾新港周辺海域に対する 1 年間の地形変化モデルを構築し、各漂砂外力による地形変化特性を明らかにした。
- 2) 波浪場の不規則性を考慮した場合、規則波による計算結果で確認された交互に分布する侵食・堆積傾向は見られない。また、実測値で確認された港内および東防砂堤内側の堆積傾向を比較的良好な精度で再現することが可能となる。
- 3) 港口外側の浮遊砂は長周期波流動によって港内側へ輸送される。石狩湾新港のような大規模港湾では長周期波流動による浮遊砂の輸送距離は相対的に短く、港奥部まで輸送される浮遊砂量は少ないといえる。
- 4) 吹送流を浮遊砂移動の外力として考慮した場合、港内および港湾周辺海域において、風向きに応じた吹送流の影響による侵食・堆積傾向が顕著に現れる。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が必要といえる。
- 5) 東西両海域と港口付近の浮遊砂濃度は波浪の発達時に大きく上昇する。港湾中央部では波浪発達時においても浮遊砂濃度の上昇速度は遅く、浮遊砂濃度は最大波高到達後も緩やかに上昇し、最大波高到達時から時間的遅れを伴って最大値を示す。
- 6) 東側海域と東港口周辺では波浪発達時において侵食速度が最も速く、最大波高到達後では侵食量に大きな変化は見られない。港内中央部では堆積傾向を示すが、波浪発達時においても堆積速度は遅く、港外から輸送された土砂が港内中央部まで到達するには比較的時間を要するといえる。

参考文献

- 1) 渡辺晃・丸山康樹：屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法，海岸工学講演会論文集，第 31 巻，pp. 103-107，1984。
- 2) 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。
- 3) Bowen, A. J. : Simple models of nearshore sedimentation, beach profiles and longshore bars, The Coast-line of Canada, ed. by S. B. McCann, Geophysical Survey of Canada, pp. 1-11, 1980。