

# 石狩湾新港における漂砂特性と対策工法について

小樽開発建設部 小樽港湾事務所 計画課 ○福田 俊  
八柳 敦  
横山 慎司

石狩湾新港は札幌圏に隣接する重要港湾であり、北海道日本海側の物流拠点として重要な役割を担っている。しかし、石狩湾新港東地区および航路付近の埋没が近年進行し、本港を利用する船舶の安全航行に支障を来すことが懸念される。本報告では、漂砂外力として波浪・海浜流・長周期波流動・恒流に加え、吹送流を導入した手法を用いて本港の漂砂特性を解明することを試みた。また、本港における有効な漂砂対策工法案について考察した。

キーワード：漂砂、港内埋没、数値解析、漂砂対策

## 1. 序論

石狩湾新港(図-1)は1973年に整備が開始され、同年に重要港湾に指定されている。港湾区域内においては、2012年からLNG基地の供用が開始されており、隣接する札幌圏を含む道内各地へのエネルギー供給拠点として注目されている。しかし、石狩湾新港東地区および中央航路の埋没が近年進行していることから、これまでに石狩湾新港における漂砂現象を対象とした様々な研究が行われている。本間ら(2005)は現地調査により得られた流動の水理特性を数値解析に反映させることにより、浮遊砂の港内侵入に及ぼす海浜流および長周期波の影響について検討し、精度の高い解析のためには、石狩湾新港周辺を包含した吹送流の影響を考慮する必要があると結論づけた<sup>1)</sup>。これを受け、大塚ら(2009)は、漂砂外力として、波浪・海浜流・長周期波に加え、広域吹送流を考慮した数値解析を実施し、掃流砂移動および浮遊砂移動の観点から石狩湾新港における海底地形変化を予測した。その結果、吹送流を考慮することにより、地形変化の予測精度が向上すると結論づけた<sup>2)</sup>。また、菅原ら

(2010)は、大塚ら(2009)と同じく広域吹送流を考慮した数値解析を実施することで、実測の地形変化量を概ね再現できることを示した<sup>3)</sup>。

以上を踏まえ、本報告では、過去に石狩湾新港において行われた現地調査結果および近年の海象・気象データ、石狩川からの流出土砂の影響等を整理し、本港における漂砂特性を考察する。また、上述した既往の研究における数値計算モデルを参考に、漂砂外力として波浪・海浜流・長周期波流動・恒流に加え、吹送流を導入した漂砂解析モデルを構築し、本港における漂砂メカニズムの現況再現および漂砂対策工法の提案を行うことを目的とする。

## 2. 石狩湾新港における漂砂特性の考察

本章では、石狩湾新港における波浪・流況特性および石狩川からの流出土砂の影響等について整理し、本港における漂砂特性を考察する。

### (1) 波浪特性

石狩湾新港沖合に設置されているナウファス(全国港

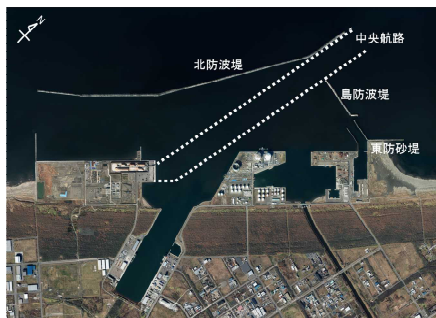


図-1 石狩湾新港の港湾形状

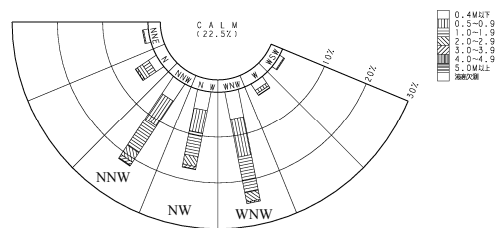


図-2 波向別波高出現頻度図

湾海洋波浪情報網) のデータを基にした、2005年～2015年までの波向別波高出現頻度図を図-2に示す。同図より、当該海域における波向はWNWからNNWの出現率が高く、波高3m以上の高波高も出現していることが分かる。ここで、海底地形の変化に大きな影響があると考えられる高波高の発生状況を把握するため、直近の3年間(2013年～2015年)のナウファスデータに着目し、時化(波高2m以上)の発生回数と波浪エネルギーフラックスについて整理する(図-3)。なお、波浪エネルギーフラックスは、波のエネルギー $E = 1/8 \omega_0 g H^2$ と群速度 $C_G = n \cdot C$ ( $\omega_0$ は海水の単位体積重量、 $g$ は重力加速度、 $H$ は波高、 $C$ は波速、 $n = 1/2 + kh/\sinh 2kh$ 、 $h$ は水深、 $k$ は波数)の積で表される。図-3より、時化の発生回数は前述した3波向(WNWからNNW)の時化が主であり、波浪エネルギーフラックスは各年共にNNWからのエネルギーが高い

ことが分かる。また、2013年と2015年では、年最大波高が6mを超えていることが分かる。続いて、2005年～2015年までの時化の継続時間(波高2m以上～2m未満となる期間)を図-4に示す。なお、最大波が2m～3m、3m～4m、4m以上の場合における時化の継続時間について整理した後に、最大波が3m～4m、4m以上となる時化については、波高3m以上～3m未満および4m以上～4m未満となる期間について別途整理している。同図より、最大波の波高が大きくなるほど時化の継続時間が長くなり、最大波が3m～4mの時化においては継続時間の平均が29.4時間、最大波が4m以上の時化においては40.8時間であることが読み取れる。

## (2) 流況特性

始めに、波浪によって生じる海浜流の影響を把握するため、2012年に実施された流況観測調査結果における、石狩湾新港東地区の高波高時の流況を図-5に示す。同図より、波高4m以上の荒天時の期間では、東防砂堤付近(St.2)および島防波堤付近(St.4)において北西方向にそれぞれ37cm/s  $\approx$  0.4m/s、18cm/s  $\approx$  0.2m/s程度の流速が発生しており、東防砂堤から中央航路へと向かう海浜流が生じていることが分かる。

続いて、波高・風速と流況の関係について考察する。ナウファスにおいて波高2m以上が観測された風況について、石狩市におけるアメダス気象データを用いて風向別風速出現頻度図に整理する(図-6)。同図より、波高が2m以上となる場合の卓越風向は風向Wであり、その

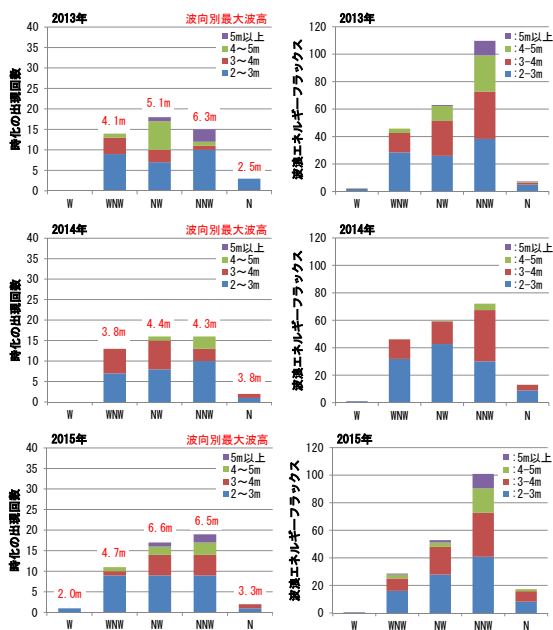


図-3 時化の発生回数と波浪エネルギーフラックス

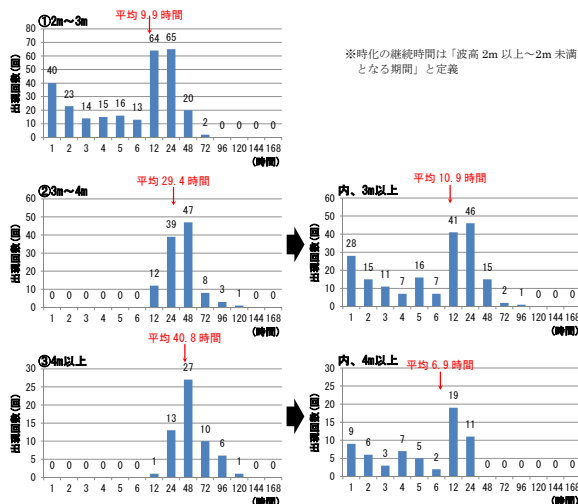


図-4 時化の継続時間(2005年～2015年)

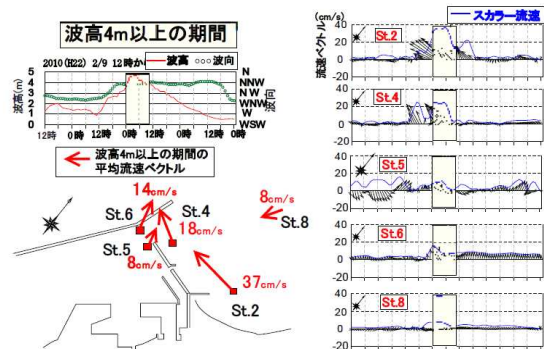


図-5 高波高時の流況

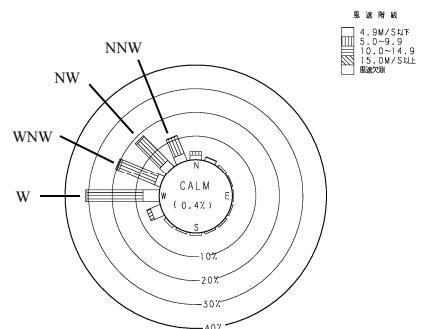
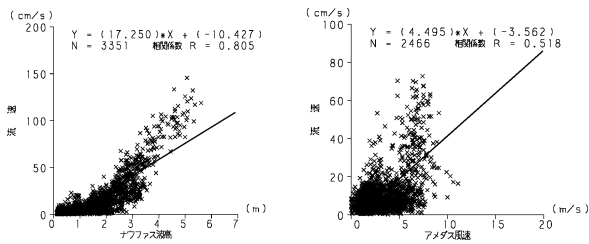


図-6 風向別風速出現頻度表(波高2m以上)



(a) 波高・流速相関図 (b) 風速・流速相関図  
図-7 波高・風速と流況の関係

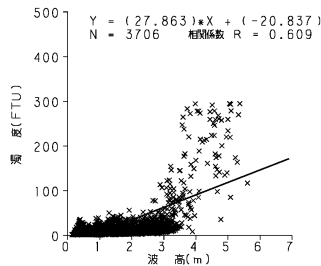


図-8 波高と濁度の関係

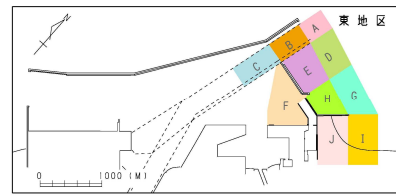
他の風向として、風向WNW、NW、NNWの順に出現率が高いことが分かる。風速については、これら4つの風向に10m/s以上の風速が出現していることが読み取れる。ここで、2014年の流況観測調査結果を基に、東地区における波高・風速と流速の関係を分析すると図-7に示すとおりとなる。同図より、波高3m程度までは流速は線形に増大するが、波高3m以上になると指数関数的に流速の増大が生じている。さらに、風速と流速との関係については、風速5m/s程度を超えた場合に流速が増大する傾向が認められる。以上のことから、波高3m以上の海象では風速も大きいことが多く、波浪によって生じる海浜流に加え、風によって生じる吹送流の影響により流速増大が生じているものと推察される。このことは、山下ら(1999)において示されている、冬季間に北西風により生じる強い南西方向の吹送流の影響<sup>4)</sup>とも合致している。

### (3) 漂砂外力と底質の巻上げの関係

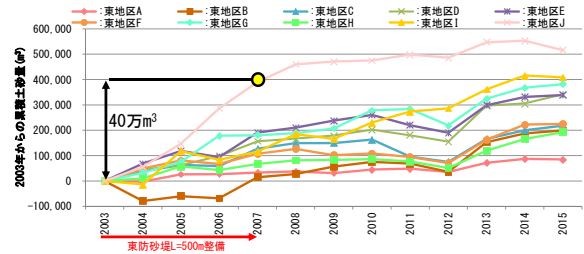
漂砂外力によって生じる底質の巻上げ状況を把握するため、2014年における濁度観測結果を基に、ナウファス波高と濁度の関係を図-8に示すとおり整理した。なお、観測地点は図-5におけるSt4に相当する。同図より、中央航路付近において波高と濁度に線形の関係が成り立つことが読み取れる。また、波高が3m以上の場合に濁度が急激に上昇する傾向にあることが分かる。

### (4) 石狩川からの流出土砂の影響

山下ら(2000)は、石狩川河口域において現地観測を実施しており、細砂以上の粗粒成分の推定流出土砂量は30万m<sup>3</sup>/年であり、そのうち20万m<sup>3</sup>/年は汀線変化に影響を与える12m以浅に堆積している<sup>5)</sup>と考察している。



(a) 区域図



(b) 累積土砂量の経年変化

図-9 東地区における区域別累積土砂量の変化

表-1 区域A~Hにおける累積土砂量の変化

区域	'03年~'11年	'03年~'15年	差分
A	49,000	87,000	38,000
B	70,000	200,000	130,000
C	96,000	220,000	124,000
D	180,000	340,000	160,000
E	220,000	340,000	120,000
F	95,000	220,000	125,000
G	280,000	380,000	100,000
H	77,000	190,000	113,000
合計	1,067,000	1,977,000	910,000

※単位: m<sup>3</sup>

ここで、深浅測量結果を基に、東地区における累積土砂量の変化を図-9に示す。図-9(b)より、東防砂堤の整備過程においては、防砂堤背後(区域J)に4年間で約40万m<sup>3</sup>(10万m<sup>3</sup>/年)の堆積が生じているものの、東防砂堤の整備後において東防砂堤背後の累積土砂量がほぼ変化していないことが確認でき、東防砂堤の漂砂捕捉機能が失われていると推察できる。また、2003年から2015年の東地区(東防砂堤背後の区域I・Jを除く)の累積土砂量を整理すると、2011年から2015年の4年間で合計91万m<sup>3</sup>(23万m<sup>3</sup>/年)の堆積が生じており(表-1)、前述した石狩川からの推定流出土砂量と概ね一致する。以上より、石狩川からの流出土砂が本港における漂砂供給源であると推測され、近年は東防砂堤により捕捉されなかった漂砂が東防砂堤を越え、東防砂堤付近における海浜流により中央航路へ輸送されていると考えられる。

## 3. 漂砂解析モデルの概要

本章では、2章において考察した石狩湾新港における漂砂特性を踏まえ、漂砂解析モデルを構築する。本モデルにおける解析領域を図-10に示す。

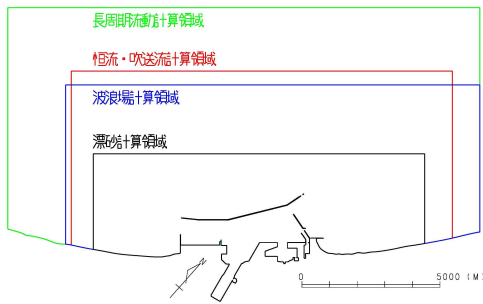


図-10 解析領域

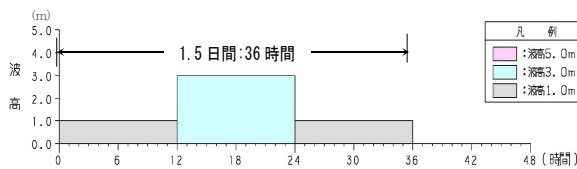
### (1) 波浪・海浜流・長周期波流動・恒流・吹送流の計算手法

波浪の計算については、緩勾配方程式を採用し、2013年から2015年のナウファスデータを基に、計算条件（波向、代表波高、周期）を設定した。なお、大塚ら（2009）および菅原ら（2010）によると、本港周辺の漂砂環境を再現するためには波浪の時間変化を導入することが有効であると示されている。そこで、2章における時化の継続時間に対する考察を踏まえて、図-11に示す2つの海象モデルを設定した。

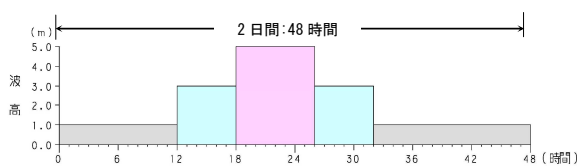
海浜流の計算については、波高分布により得られるラディエーションストレス分布の項を用いた2次元平面海浜流方程式を採用した。

長周期波流動の計算については、ブシネスク方程式を採用した。長周期波高については、ナウファスデータを基に有義波高と有義周期および長周期波高の相関を求めることにより設定した。また、2012年度の波浪観測結果において、港外における長周期波周期の平均が60s程度であることが判明している。そのため、本モデルにおける長周期波周期についても、本港に來襲する平均的な長周期波周期として60sを設定した。

恒流の計算については、浅海長波方程式を採用し、流況観測調査結果を踏まえ、汀線に沿う方向に東から西へ



(a) 海象モデル1



(b) 海象モデル2

図-11 本モデルにおける海象モデル

の流向を設定した。

吹送流の計算については、恒流と同様、浅海長波方程式を採用した。大塚ら（2009）および菅原ら（2010）によると、冬季に卓越するNW方向からの風に対し、石狩湾新港周辺では時計回りの流れが発生し、汀線に沿った南西方向の0.1m/s～0.3m/s程度の流れが生じていることが判明している<sup>23)</sup>。また、山下ら（1999）においても、冬季季節風に対し、ほぼ全水深に渡る時計回りの強い流れの発生が確認されている<sup>4)</sup>。以上を踏まえ、吹送流の境界条件としては、冬季季節風に対する南西方向の流れとして、汀線に沿った西向きの流れ（境界流速 0.3m/s）を設定した。

### (2) 底質条件

解析に用いる底質条件は、2014年に実施された最新の底質調査結果を踏まえて設定した。調査結果によると、港外は細砂が主であり、港内はシルトおよび粘土が主であることから、対象粒径は細砂 ( $d_{50}=0.15\text{mm}$ )、シルト ( $d_{50}=0.05\text{mm}$ ) の2粒径とした。

### (3) 掃流砂・浮遊砂の計算手法

漂砂については、掃流砂および浮遊砂を考慮した。掃流砂の発生量は、波浪および海浜流の平均流速を用いて評価し、発生した掃流砂の移動外力として波浪および海浜流を考慮した。なお、底質砂に対する無次元限界掃流力は岩垣の式によって算出し、掃流砂量の評価にはBrown式、砂粒子の沈降速度はRubey式を適用した。

浮遊砂の発生量については掃流砂と同じく波浪および海浜流の平均流速を用いて評価し、発生した浮遊砂の移動外力については、波浪、海浜流、長周期波流動、恒流、および吹送流を考慮した。浮遊砂の巻上げはSheng式を、浮遊砂の沈降速度はRubey式を用いて算出した。

なお、掃流砂による地形変化と浮遊砂による地形変化の寄与率は十分に明らかとなっていないことから、本モデルでは、沿岸漂砂量の経験公式であるCERC公式のK値の算出に関するBailardの提案式における掃流砂と浮遊砂の寄与率の関係をj用いることにより、地形変化に占める掃流砂と浮遊砂の割合を4対6として解析を行った。

## 4. 漂砂解析モデルによる現況再現

本章では、3章において設定した漂砂解析モデルによる石狩湾新港の地形変化特性の再現計算を実施し、本モデルの妥当性を検証する。なお、2章における考察を踏まえて、地形変化に対する漂砂の影響が大きいと考えられる東地区について着目する。

漂砂外力の再現性の検討については、既往の観測値と比較可能であり、漂砂の巻上げ、移流拡散に対して影響が大きいと考えられる海浜流を対象とする。図-12に、波高 5m、波向 NNW の海浜流の計算値を示す。同図より、東防砂堤付近において 0.4m/s 程度、島防波堤付近において 0.2m/s 程度の北西方向の流速が発生していることが分かる。図-5に示した同等の条件下における観測値と比較すると、東防砂堤付近の流れおよび中央航路に向かう流れが、流向・流速ともに概ね再現できていることが分かる。以上のことから、漂砂移動の主たる巻上げ、移流拡散の外力となる海浜流の現地再現性は良好なものと判断した。

地形変化の再現目標は図-13(a)に示すとおり 2013 年～2015 年の年平均的な地形変化であり、図-13(b)に示す計算値における地形変化分布の傾向と比較することにより再現性を検証する。なお、初期水深は 2013 年 8 月の深淺測量結果により設定し、1 年間の地形変化を計算した。図-13より観測値と計算値を比較すると、侵食域・堆積域の傾向が概ね再現されており、図中に示す東地区の東防砂堤付近の堆積や、切通しからの流入傾向、航路部の埋没傾向が再現されていることが分かる。

また、漂砂外力として吹送流を考慮した場合と考慮しない場合における地形変化量の比較を図-14に示す。同

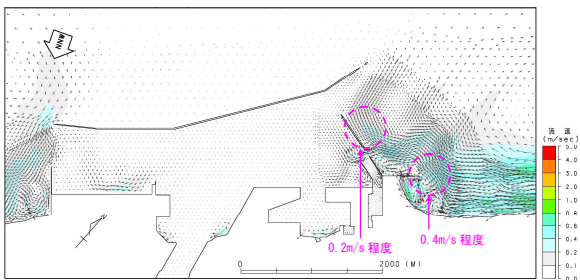
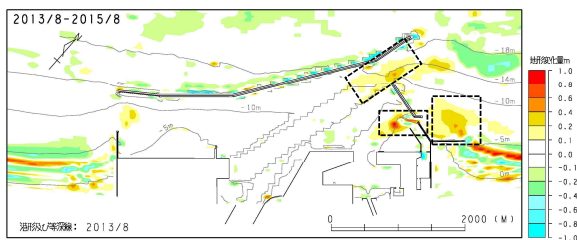
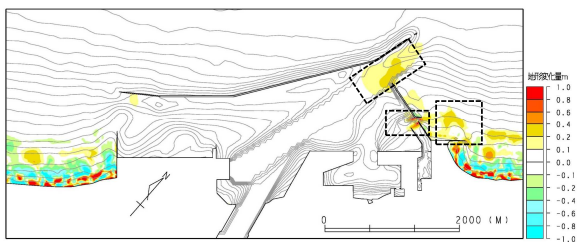


図-12 波高 5m・波向 NNW の海浜流計算値

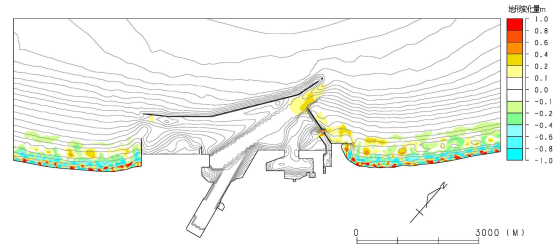


(a) 観測値 (2013年～2015年の年平均値)

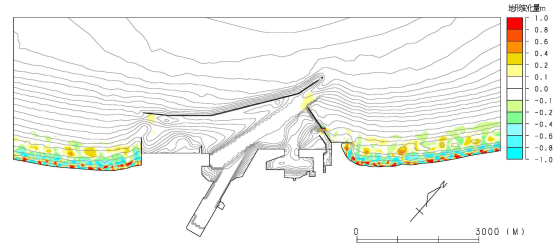


(b) 計算値

図-13 地形変化分布の比較



(a) 吹送流を考慮



(b) 吹送流を未考慮

図-14 地形変化に対する吹送流の影響

図より、吹送流を考慮しない場合、浮遊砂の輸送外力が低下することにより、航路・港内への浮遊砂流入が減少していることが分かる。そのため、波浪・海浜流・長周期波流動・恒流に加え吹送流を漂砂外力として考慮することで、現況の地形変化の再現性が向上することが明らかとなり、石狩湾新港の地形変化計算に対する本モデルの妥当性が示された。

## 5. 石狩湾新港における漂砂対策工法

4 章において本モデルの妥当性が検証されたことを踏まえて、本章では石狩湾新港における対策工法について提案し、その有効性について考察する。

石狩湾新港における最重要課題は船舶の安全航行の観点から中央航路の水深維持であり、港口付近の約 7 万 m<sup>3</sup>/年の堆積土砂量 (図-9(a)に示す区域 A～C の合計堆積量) を低減させることが課題となっている。このための漂砂対策としては、一般的な①維持浚渫、②防砂堤に



図-15 漂砂対策工の案

表-2 漂砂対策工法の比較

対策工法の種類	制約条件・対策工法の考え方等	期待される対策効果及び問題点・課題
①維持浚渫	・中央航路における7万m <sup>3</sup> /年の堆積	○航路水深の維持 ■水深維持に関わる浚渫費用が課題
②防砂堤	・東防砂堤の延伸は、港湾区域との関係から港湾区域の変更が必要	○掃流砂・浮遊砂の捕捉による航路埋没の低減 ■一定の効果は期待できるが、効果の維持が課題（将来的に満砂状態となる）
③潜堤	・中央航路の岸側であれば、航行船舶への影響も少なく、設置可能	○掃流砂と一部の浮遊砂を捕捉することによる航路埋没の低減 ■現況再現の漂砂解析を実施した際に、主に浮遊砂が中央航路に堆積する傾向にあることが判明しており、潜堤により捕捉しきれなかった浮遊砂による航路埋没が課題
④サンドポケット	・中央航路の岸側であれば設置可能	○掃流砂と一部の浮遊砂を捕捉することによる航路埋没の低減 ■潜堤と同じく、サンドポケットにより捕捉しきれなかった浮遊砂による航路埋没や、航路埋没量（7万m <sup>3</sup> /年）を捕捉するポケットの規模等が課題
⑤サンドバイパス	・東防砂堤付近で浮遊砂を含む海水を取水し、北防波堤港外側へ排出するのであれば対応が可能	○排砂による航路埋没の低減 ■ポンプ施設等のイニシャルコスト、ランニングコストや、周辺漁場への影響等が課題
⑥サンドリサイクル	・東防砂堤背後の堆積箇所を定期的に陸上浚渫することでの対応は可能	○東防砂堤の漂砂捕捉機能の回復による航路埋没の低減 ■陸上浚渫方法、浚渫土砂の活用方法、浚渫間隔等の検討が課題

※○期待される効果、■問題点・課題を示す。

加え、③潜堤、④サンドポケット、⑤サンドバイパス、⑥サンドリサイクル等が挙げられる（図-15）。本港の漂砂環境、制約条件から、それぞれの漂砂対策工法の効果・問題点を想定すると、表-2に示すとおりであり、適用が困難、または効果が少ないと考えられるものも存在する。しかし、東防砂堤背後の堆積箇所を陸上浚渫するサンドリサイクルについては、海上浚渫よりも安価であると考えられることに加え、東防砂堤の漂砂捕捉機能の回復についても期待できる漂砂対策工法である。今後は表-2に示す漂砂対策工法をベースに、本報告で構築した漂砂解析モデルによる漂砂対策効果の検証を行う予定である。なお、漂砂対策工法の具体的なコスト（浚渫間隔等）の算出、効果継続性等については今後の検討課題であり、現地のモニタリング調査等についても将来にわたり継続していくことが求められる。

## 6. 結論

本報告では、石狩湾新港における漂砂特性を分析すると共に、漂砂解析モデルによる地形変化の現況再現を行った。そして、本港における有効な漂砂対策工法について考察した。最後に、これまでに得られた主要な結論を列挙し、本報告の結びとする。

- (1) 波高 4m 以上の荒天時の期間では、東防砂堤から中央航路へと向かう海浜流が発生することが分かった。また、風速が 5m/s 以上の場合では、海浜流に加えて吹送流の影響により流速が増大すると考えられる。
- (2) 石狩湾新港東地区の土砂収支の観点から、本港における漂砂供給源は石狩川からの流出土砂であると考えられ、その大部分が東地区に堆積していることが判

明した。

- (3) 石狩湾新港における漂砂特性を踏まえて設定した漂砂解析モデルにより、東地区における地形変化傾向を良好に再現することができた。また、風によって生じる吹送流を考慮することにより再現性の精度が向上することを示した。
- (4) 東防砂堤整備過程における堆積傾向を踏まえると、サンドリサイクルは漂砂対策工法の一つとして期待できる。今後は、コスト（浚渫間隔等）、効果継続性等の検討課題を踏まえ、サンドリサイクルを含めた漂砂対策工法の有効性の検証を進める必要がある。

### 参考文献

- 1) 中間大輔, 坂井洋平, 窪内 篤, 宮武 誠, 山下俊彦: 石狩湾新港周辺での流動・濁度の暴浪時時空間特性, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 466-470, 2005.
- 2) 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.
- 3) 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海洋開発論文集, 第 54 回, 2010 年度.
- 4) 山下俊彦, 星 秀樹, 新山雅紀, 長谷部隆光, 福本 正, 多田彰秀: 石狩湾沿岸の冬期の三次元流動特性, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 426-430, 1999.
- 5) 山下俊彦, 新山雅紀, 菅沼 剛, 早川哲也: 石狩川からの供給された粒径別土砂の河口沿岸域での堆積特性と土砂収支の試み, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 676-680, 2000.