# 岩礁域に囲まれた苫前漁港の漂砂特性

# Sediment Transport Characteristics of the Tomamae Fishery Port and Surrounding Shore Reef

# 海津博行<sup>1</sup>·平野誠治<sup>2</sup>·山下俊彦<sup>3</sup>·中山哲嚴<sup>4</sup>·栗山善昭<sup>5</sup>·佐藤寿彦<sup>6</sup>·石黒一郎<sup>7</sup>

Hiroyuki KAITU, Seiji HIRANO, Toshihiko YAMASITA, Akiyoshi NAKAYAMA Yoshiaki KURIYAMA, Toshihiko SATO and Ichiro ISIGURO

Countermeasures against channel shoaling at the Tomamae fishery port on the west side of Hokkaido, have been deemed necessary. Therefore the sediment transport characteristics must be properly understood. In this study, field observations in terms of wave dimensions, flow, and such like , were conducted to find that the sediment behind the artificial reef and around the shoreline had been transported by the longshore current and rip current. Based on these characteristics, a calculation method was developed. It consisted of a two-dimensional analysis of the advective diffusion equation considering vertical distribution of the suspended sediment concentration. The calculation results were in good agreement with the measured flow velocities, flow directions and changes around the sea bottom.

# 1. はじめに

第3種苫前漁港(図-1)は、水産資源が豊富な武蔵堆 の近傍の日本海沿岸に位置しており、いか釣り外来船、 ホタテ種苗生産、エビ桁漁の基地として整備が進められ ている.本漁港では、近年、航路埋没(図-2)により利 用漁船の船底が海底地盤と接触する等、利用上の支障が 報告されており、地元から早急な対策が求められている. 一方、既存の現地調査によると漁港周辺の地質は岩盤で あることが確認されているが、漂砂の供給源や航路埋没 の発生メカニズムは確認されていない.

そこで、本研究では、岩礁域に囲まれた苫前漁港の漂 砂特性を把握するため、西側と東側からの流れの影響を勘 案した現地調査を行い、底質分布と砂層厚、高波高時にお ける海浜流の形成、浮遊砂濃度と中央粒径及び粒径スペク トル等を明らかにした.更に、確認された漂砂特性を再現 可能な数値モデルを構築し、妥当性の検証を行った.

# 2. 現地調査

### (1) 調査概要

現地調査は2008年及び2009年の二ヵ年に渡って行った. 観測位置を図-3に, 観測概要を表-1に示す.ここで, 波浪観測は超音波式及び水圧式を併用したハイブリッド

1			北海道開発局 留萌開発建設部 留萌港 湾事務所
2			北海道開発局 水產課 課長補佐
3	正会員	工博	北海道大学教授 大学院工学研究院 環
			境フィールド工学専攻
4	正会員	工博	(独法)水産総合研究センター水産工学研究
			所 水産基礎グループ グループ長
5	正会員	工博	(独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工
			部 チームリーダー
6	正会員		(株)クマシロシステム設計 技術解析部
7			(社)寒地港湾技術研究センター



型の海象計(DL-3),濁度は赤外散乱光方式の濁度計 (MTB-16K),流況は電磁流速計(COMPACT-EM)を用 いた.また,浮遊砂濃度はレーザー回折の原理を応用し た粒径・粒度分布計(LISST-100X)を,水平流速分布は ドップラー流速計(H-ADCP)を用いた.更に,サイド スキャンソナー及び地層探査機を用いて本漁港の東側海 域及び西側海域の底質分布と砂層厚を調査し,同時に底 質調査を実施した.

# (2) 調査結果及び考察

## a)砂質土の分布と砂層厚及び土砂性状

図-4は,砂質土の平面分布と砂層厚及び底質の土砂性 状である.これによると,東側海域は人工リーフから港

水深	2008年	2009年
-18m	波高, 波向	波高, 波向
-5.7m	流況, 濁度	流況,濁度 浮遊砂濃度
-4.3m	流況, 濁度	
-4.3m	波高,波向,流況 濁度(中層,下層)	波高, 波向
-3.1m	流況, 濁度	
-5.0m	流況, 濁度	
-3.0m	—	水平流速分布
	水深 -18m -5.7m -4.3m -4.3m -3.1m -5.0m -3.0m	水深 2008年   -18m 波高,波向   -5.7m 流況,濁度   -4.3m 流況,濁度   -4.3m 流況,濁度   -4.3m 波高,波向,流況   -3.1m 流況,濁度   -5.0m 流況,濁度   -3.0m —

表-1 観測概要

注) 観測層は海底上1.0m(下層)



図-3 観測位置図



図-4 砂質土の分布と砂層厚及び土砂性状

口部と港内,西側海域では汀線近傍に砂質土が分布し, 沖合は岩盤である.砂層厚は人工リーフから港口部に掛けて1.4m程度,北防波堤先端の浅瀬で最大2.6mであった. 底質は人工リーフ上部が細砂(d50 = 0.19mm),港 口部が細砂・中砂(d50 = 0.25mm),港内はシルト以下 (d50 = 0.029mm),西側海域の汀線近傍は中砂・粗砂以 上(d50 = 0.49mm)の占める割合が多く,場所によって 土砂性状が大きく異なる.これは,本漁港の西側海域と 東側海域で波浪条件が異なる事が要因と考えられる.

## b)高波高時における海浜流の形成

図-5は波向W,波高2mクラスの時化における海浜流



図-5 海浜流の形成(観測値, 2008年)



図-6 港口部における水平流速分布(観測値, 2009年)

ベクトル、図-6は港口部における水平流速分布である. これによると、本漁港の周辺海域では、北防波堤に沿う 東向きの沿岸流、及び東外防波堤に沿う北西向きの離岸 流が形成されている.更に港口部において、流向の異な るこれらの流れが拮抗し、北防波堤の遮蔽域内から遮蔽 域外に掛けて流向及び流速が大きく変化している.北防 波堤先端における浅瀬及び航路埋没は、この様な複雑な 流れの作用によって形成されたものと考えられる.

#### c) 浮遊砂の輸送

図-7は波向W,波高4mクラス,6日間の時化における 浮遊砂のSSフラックスである.これによると,北防波堤 側では約8×10<sup>3</sup>kg/m<sup>2</sup>の浮遊砂が港口部に流入している. 一方,東外防波堤側では,ST-4→ST-5→ST-3の順にSS フラックスは減少しているものの,ST-3(中層)から航 路上に4.3×10<sup>3</sup>kg/m<sup>2</sup>の浮遊砂が流入している.これらの ことから,高波高時には,北防波堤側及び東外防波堤側 の両方から航路に浮遊砂が流入していることが分かる.

#### d) 浮遊砂の濃度及び土砂性状

図-8は、ST-2(1) における濁度計とLISST-100Xによ る浮遊砂濃度の相関分析(2009年観測)である.ここで、 濁度は観測地点の海底の土砂を用いてキャリブレーショ ンを行い浮遊砂濃度に換算した.一方、LISST-100Xは観 測値(µℓ/ℓ)に土粒子の密度(g/cm<sup>3</sup>)を考慮して浮遊砂 濃度に換算した.これによると、濁度計による浮遊砂濃 度はLISST-100Xの約7倍の高濃度の評価であった.

図-9は、ST-2(1)における浮遊砂の土砂性状であり、

上段より浮遊砂の粒径スペクトル,浮遊砂濃度,中央粒 径を示している.これによると,中央粒径の平均値は d50=0.108mm,粒度組成の平均値はシルト以下が43%, 細砂が35%,中砂は22%であった.

これらより,岩礁域を通過した浮遊砂は,濁度計によ る浮遊砂濃度の約1/7と濃度は薄い一方で,シルト以下 の微細粒子が多量に含まれる等の特徴が確認された.こ の様な浮遊砂の土砂性状と港口部における底質の特徴 (図-4)から,航路埋没に影響を与えるのは浮遊砂に平均 57%含まれる細砂以上の土粒子と考えられる.





図-8 濁度計とLISST-100Xによる浮遊砂濃度の相関分析



# 3. 数値モデル

## (1) 概 要

苫前漁港においては、北防波堤及び東外防波堤の両方 から流入する細砂・中砂等の浮遊砂によって航路埋没が 生じている.このため、予測手法として「細砂・中砂を 対象とする浮遊砂の発生・移流拡散・沈降」を基本とし、 「外力(波浪・流れ)の時間変化」を考慮した数値モデ ルを構築する.数値モデルの構成図を図-10に、概ね3日 間を基本とした2パターンの外力モデルを図-11に示す.

#### (2) 波浪変形・海浜流計算

風波及び長周期波の波浪変形計算では、平山(2002) の研究による「ブシネスク方程式(NOWT-PARI Ver4.6c5a)」を用いた.また、風波の海浜流計算では、 本間・堀川(1985)に基づきRadiation Stress項を用いた 「海浜流方程式」及びプシネスク方程式を用い、長周期 波の海浜流計算ではブシネスク方程式を用いた.

## (3) 浮遊砂による地形変化計算

黒木ら(1988)及び椹木ら(1991a)の研究によれば, 浮遊砂による地形変化は,浮上・沈降フラックスのバラ ンスが崩れる非平衡状態の浮遊砂濃度が現れる領域で生 じると考えられている.この様な非平衡状態の浮遊漂砂 を簡易に取り込むため,「二次元移流拡散方程式と浮遊 砂濃度の鉛直分布関数及び平衡基準点濃度の近似式を組 み合わせた浮遊砂モデル」を用いる.

計算に用いた二次元移流拡散方程式を式(1)に示す.

$$\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} + U \frac{\partial \overline{C}}{\partial x} + V \frac{\partial \overline{C}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial \overline{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial \overline{C}}{\partial y} \right) + W_d \left( C_{be} - C_b \right) \cdots (1$$

ここで, $K_x$ , $K_y$ : x, y方向の拡散係数, U, V: x, y 方向の流速(風波と長周期波による海浜流ベクトル),  $W_d$ : 粒径dの土粒子沈降速度,  $\overline{C}$ : 浮遊砂の平均濃度,  $C_{be}$ : 平衡基準点濃度,  $C_b$ : 非平衡底面濃度である.

浮遊砂の平均濃度は式(1)を基に求め、浮遊砂の浮



上フラックス  $(W_d \cdot C_{be})$  と沈降フラックス  $(W_d \cdot C_b)$  の差が地形変化量 ( $\Delta$ ) に対応する.

式(1)に含まれる底面近傍の非平衡底面濃度は,黒 木ら(1988)の研究に基づき式(3)で評価するととも に,式(3)に含まれる平衡基準点濃度は椹木ら(1991a) に基づいて式(4)から求める.

 $C(\zeta) = C_b \cdot \exp(-R\zeta) + R(C_b - C_{be})\zeta \cdot \exp\{-(R+1)\zeta\} \quad \cdots \quad (3)$ 

$$\begin{array}{l} \boldsymbol{\zeta} \subset \boldsymbol{\mathcal{T}}, \quad \boldsymbol{\zeta} = (h+z)/(h+\eta) \\ R = \frac{W_d \cdot (h+\eta)}{Kz} \end{array}$$

Kz:鉛直拡散係数, h:水深, η:潮位である.

$$C_{be} = \alpha_{co} \left[ \frac{0.688 u_w^2}{1.13 \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g w_f T} \right]^{1.77}$$
 (4)

ここで、 $\alpha_{co}$ :平衡状態の底面濃度を規定するフィッテ ィング係数、 $u_w$ :底面波動流速振幅、 $\rho_s$ :土粒子の密度、  $\rho$ :海水の密度、 $w_f$ :土粒子の沈降速度、T:波周期、 g:重力加速度である.

図-12は、平衡状態の浮遊砂濃度が出現すると想定されるST-4を対象に、式(3)を用い平衡状態を仮定して 算出した平衡基準点濃度と式(4)による近似値の比較 である.ここで、浮遊砂に含まれる細砂以上を対象に、 底質の粒径はd50 = 0.25mm、浮遊砂はd50 = 0.14mmとし、 波・流れ共存場の摩擦速度は椹木ら(1984)によった. 図-12によると、式(4)に含まれる係数α<sub>co</sub>は0.00069の 設定で平衡基準点濃度を概ね近似できる.

#### (4) 計算条件

数値モデルは、実際に出現した時化を対象に波浪変形、 海浜流の形成及び浮遊砂濃度の各項目について、計算条 件の妥当性を検証した上で、代表波浪(図-11)を外力と して概ね一年間を対象とする航路埋没の再現性を検討し た.再現性を検証した主な計算条件を表-2~表-5に示す.

#### (5)計算結果と考察

a)海浜流ベクトル

高波高時における流れは,風波(海浜流方程式又はブ



図-12 椹木の式による平衡基準点濃度の近似 (ST-4)

シネスク方程式)と長周期波(ブシネスク方程式)によ る流速ベクトルが合成されたものと仮定して,再現性を 検証した.図-13は実際に出現した時化(波高2.02m,波 向277.3°,周期6.2s)の海浜流ベクトル,図-14は代表波 浪(波向W,波高2m,周期8s)における海浜流ベクトル の一例であり,風波は海浜流方程式,長周期波はブシネ スク方程式による流速ベクトルが合成して描かれている.

図-13によると、北防波堤の遮蔽域内から遮蔽域外に 掛けて、沿岸流と離岸流が拮抗し、流向及び流速が大き く変化する特徴が概ね再現されている.また、図-14に よると、北防波堤の沿岸流、及び東外防波堤から航路に 向かう離岸流の流向と流速は観測値と近似している.

表-2 風波の計算条件

項目	設定値
方向スペクトル	Brestschneider_光易型スペクトル×光易型 方向関数,成分波数n=512
計算の時間間隔	$\Delta t = 0.01 \text{sec}$
格子サイズ	$\Delta x = \Delta y = 10m$

表-3 長周期波の計算条件

項目	設定値
方向スペクトル	30~300secの周期帯,成分波数n=270,代 表周期90sec,単一方向不規則波,入射成 分を考慮
計算の時間間隔	$\Delta t = 0.2 \text{sec}$
格子サイズ	$\Delta x = \Delta y = 10m$

表-4 海浜流の計算条件

項目	設定値
外 力	ブシネスク方程式で計算された波高,波 向を基にRadiation Stressを設定
海底摩擦係数	C <sub>f</sub> :砂地盤0.01, 岩盤0.05
渦動粘性係数	Al=Nx√gh: Longuet Higginsの式N=0.016, xは海岸からの距離. xを砕波帯まで増加 させ、その沖側は一定

表-5 漂砂シミュレーションの計算条件

項目	設定値
底質分布	砂質土の分布と砂層厚(図-4)を設定
代表粒径,空隙	細砂・中砂を対象に底質はd50=0.25mm, 浮遊砂はd50=0.10mm, 0.14mm, 0.18mm の代表3粒径,空隙 $\epsilon = 0.4$
浮遊砂の発生限界	土屋らの移動限界式, 椹木 (1991b)
土粒子の沈降速度	Rubeyの式, 河村 (1982)
鉛直拡散係数	構木ら (1984, 1991a) 及び運輸省第四港 湾建設局 (1982) に基づいて設定 港口部においてKz=0.02~0.05m <sup>2</sup> /sec Kzの下限値は0.02m <sup>2</sup> /secを設定
水平拡散係数	構木 (1991b) 及び運輸省第四港湾建設局 (1982) に基づいて設定 港口部においてKx=Ky=2~5m <sup>2</sup> /sec



図-14 海浜流ベクトル図(代表波浪,波向W,波高2m)

# b) 地形変化

地形変化計算は、各粒径別に行った.図-15に水深変 化量の一例(d50=0.14mm)を、図-16に地形変化量の 比較を示す.これによると、東側海域の水深変化の平面 分布は、観測値(図-2)の特徴を良く現している.また、 航路に設定した評価区域1~5において侵食・堆積の特 徴が概ね再現され、その再現性は粒径別にd50=0.10mm は73.7%、0.14mmは66.9%、0.18mmは61.2%であった.

# 4.まとめ

現地調査により,岩礁域を通過した浮遊砂は濃度が薄 い一方で,微細粒子が多量に含まれることを確認した. 更に,航路埋没は,高波浪時に本漁港の東側に位置する 人工リーフ周辺の土砂が舞い上がり,北西向きの離岸流



-600 **評価区域(航路)** 図-16 地形変化量の観測値と計算値の比較

-400

によって航路に輸送されるとともに,西側海域の汀線近 傍の土砂も東向きの沿岸流によって航路に輸送され,両 者が航路に沈降・堆積することによって生じていること を確認した.

風波及び長周期波に起因する流速ベクトルを重ね合わ せ、広域・狭域での海浜流の再現性を向上した.また、 二次元移流拡散方程式と浮遊砂濃度の鉛直分布関数,及 び平衡基準点濃度の近似式を基に浮遊砂モデルを構築 し、更に岩礁域における砂質土の分布及び砂層厚を考慮 することにより、航路埋没は61.2%~73.7%の再現性を 検証した.

今後,航路埋没対策の検討結果を基に防砂堤を建設し, 建設後は効果の検証を実施する予定である.

#### 参考文献

- 運輸省第四港湾建設局(1982):しゅんせつ埋立による濁り等 の影響の事前予測マニュアル, pp. 143-146.
- 河村三郎(1982):土砂水理学1,森北出版株式会社, p.23.
- 黒木幹男・史 亜傑・岸 力 (1988):非平衡浮遊砂理論とそ の応用,第32回水理講演会論文集, pp. 407-412.
- 椹木 亨・李 宗燮・出口一郎(1984):河口周辺の海浜流及 び地形変動モデルに関する研究,第31回海講論文集,pp. 411-415.
- 椹木 亨・出口一郎・小野正順・襄 基成(1991a):浮遊漂砂の非平衡性に着目した航路埋没の数値計算法について、 海洋開発論文集Vol.7、pp. 295-300.
- 椹木 亨(1991b):波と漂砂と構造物,技報堂出版, pp. 176-179.
- 平山克也(2002):非線形不規則波を用いた数値計算の港湾設計 への活用に関する研究,港湾空港技術研究所資料, No.1036
- 本間 仁·堀川清司 (1985):海岸環境工学,東京大学出版, pp. 249-271.