

## 釧路港周辺における細粒底質移動特性について

平澤充成<sup>1</sup>・金田 充<sup>2</sup>・菅原吉浩<sup>3</sup>・川口 勉<sup>4</sup>  
阿部島直哉<sup>5</sup>・山下俊彦<sup>6</sup>

釧路港西港区の港口付近を中心とする水深 14m 航路・泊地において, 近年, 堆積現象が見られている。堆積物の主成分は微細な粒径のシルト・粘土であるが, 西港区周辺に分布する主な底質は相対的に粒径の大きな細砂である。これら細粒底質の発生から堆積に至るまでのメカニズムを解明し埋没対策を立案するため, 系統的な現地観測や凝集実験を実施するとともに堆積現象を再現する数値モデルを開発した。その結果, 周辺河川から供給される懸濁粒子が堆積物の主要な起源であり, その凝集に海水だけでなく工場排水も影響していること, 高波浪時に細粒底質が港口周辺に輸送され, 静穏化とともに港口近傍の航路・泊地において卓越して堆積することが分かった。

### 1. はじめに

東北海道の太平洋側に位置する釧路港では, 新釧路川河口と阿寒川河口に挟まれた砂浜海岸において西港区の整備が進められているが, 近年, 港口付近を中心とする計画水深 14 m の航路・泊地で顕著な堆積傾向が見られ, その防止対策が求められている。主な堆積物はシルト・粘土分であるが, 西港区周辺に分布する主な底質は相対的に粒径の大きな細砂であることから, 適切な対策を講じるためには, 細粒底質であるシルト・粘土分の発生から堆積に至るメカニズムを解明することが必要となる。

このメカニズムを解明するため北海道開発局釧路港湾事務所では 2001 年より波高, 流況, 濁度や海底地形変化の現地調査を継続的に実施している。これらの調査から平澤ら (2005) は, 港口周辺の海底面で静穏時に 50 mg/l, 波浪時で 2,000 mg/l を越える SS 濃度が発生していること, 新釧路川から供給される懸濁粒子の凝集物が堆積物の起源のひとつである可能性があることなどを解明した。

本研究は引き続き系統的に実施している現地調査や周辺河川から供給される懸濁粒子の凝集実験によって細粒底質の堆積メカニズムを把握するとともに, 堆積現象を再現し, 予測することを目的に開発している海浜変形モデルについて報告するものである。

### 2. 現地調査

#### (1) 調査方法

2005 年の波高, 流況, 濁度の観測位置を図-1 に示す。観測期間は 8 月 24 日から 10 月 4 日の 42 日間である。

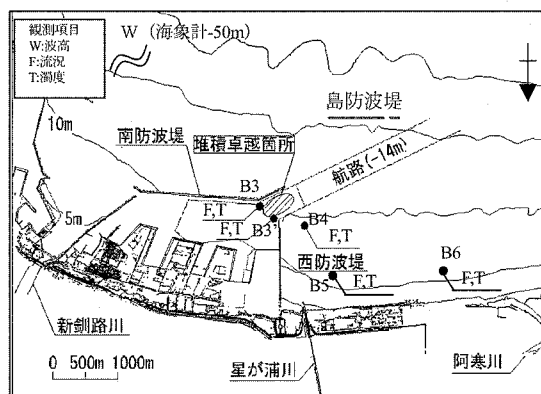


図-1 観測地点位置

波高は水深 50 m 地点に設置した海象計で観測し, その他の観測地点では流況および濁度を中層 (1/2 水深) と下層 (流況: 海底面上 0.8 m, 濁度: 海底面上 0.5 m) で観測した。観測地点は, 港口付近とともに汀線に沿った流況や濁度の変化を把握できるような配置とした。観測機器として流況はアレック電子 (株) 製の流速計 ACM-8M および COMPACT-EM, 濁度は同社製の濁度計 COMPACT-CLW および ATU3-8M をそれぞれ中層と下層で使用した。なお, 濁度については観測地点から採取した底質を用いて検定し, SS 濃度に換算した。

また同地点における浮遊粒子の特性を調べるため, 塩ビ管製の捕砂器による捕砂調査を実施した。調査は台風 14 号の来襲時 (9 月 8 日から 9 日) を含む 8 月 23 日から 9 月 12 日までの 20 日間と比較的静穏であった 9 月 12 日から 10 月 4 日までの 21 日間の 2 回実施した。なお捕砂器は, 中層 (1/2 水深) および下層 (海底面上 0.5 m) に設置した。

#### (2) SS 濃度の特性

##### a) 波浪時の特性

図-2 に示すように, 台風 14 号来襲に伴う波浪時 (最大有義波高 5.0m) に, 港外側浅海域に位置する B5,

1 正会員 北海道開発局小樽港湾事務所長  
2 (独法) 寒地土木研究所寒地水圏研究グループ  
寒冷沿岸域チーム統括主任研究員  
3 北海道開発局釧路港湾事務所港湾保安対策係長  
4 日本データサービス (株) 総合解析室  
5 正会員 博(水) (株) コマシロシステム設計技術解析部  
6 正会員 博(工) 北海道大学大学院工学研究科教授

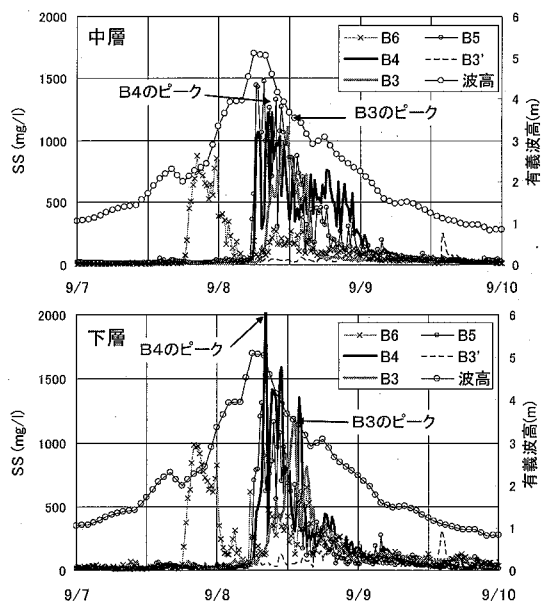


図-2 波浪時における SS 濃度変化

B6 地点で下層、中層とも最大 1,000~1,500 mg/l 程度の SS 濃度が発生し、相対的に水深が深い B4 地点では下層 2,000 mg/l、中層 1,000 mg/l と SS 濃度の最大値は下層が卓越している。

B6 地点の SS 濃度が最大値を示す波浪条件は最大波高 3.8 m、有義波周期 6.9 sec である。この波浪条件での碎波水深を推計（例えば、合田・佐藤，1981）すると、B6 地点の水深 6.0 m と概ね一致するため、碎波に伴う乱流の作用により、中層と下層が一樣な SS 濃度になったと考えられる。B5 地点（水深 6.0 m）は、沖側の島防波堤の背後に位置するが、整備途上で十分遮蔽されていない（計画延長 2,500 m のうち、現在 1,000 m 余り完成）ため、最大有義波高が発生する前後で、B6 地点と同様、碎波により鉛直方向に一樣な SS 濃度が発生したと考えられる。また B4 地点は水深条件（水深 9.4 m）や遮蔽条件から碎波は発生しないが、最も大きな流速が発生する観測地点であり、B5 方向からの SS の移流と海底面からの巻き上げにより、下層の SS 濃度が卓越する傾向を示したと考えられる。

一方、B3 地点では、SS 濃度のピークが B4 地点より 5~6 時間遅れて発生している。この時間差は港外で発生した SS の港内への移流時間と考えられる。なお、筆者らは現地目視観測によっても南防波堤に沿って港内に濁りが流れ込む現象を確認している。

以上の結果から、波浪時に高濃度の SS が浅海域から港口、さらには港内に輸送されていることが分かった。

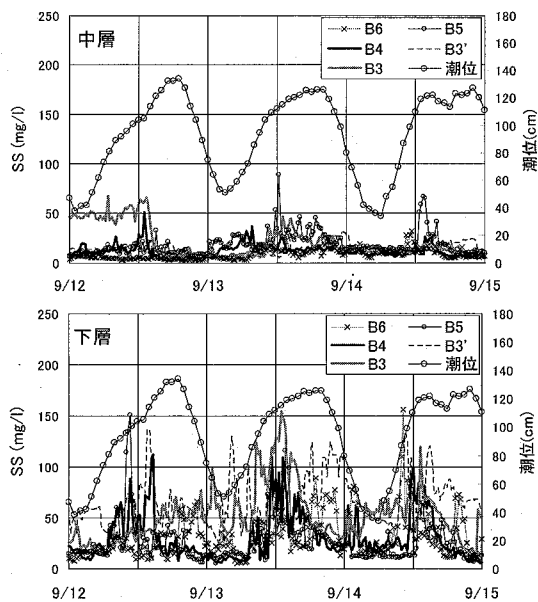


図-3 静穏時における SS 濃度変化

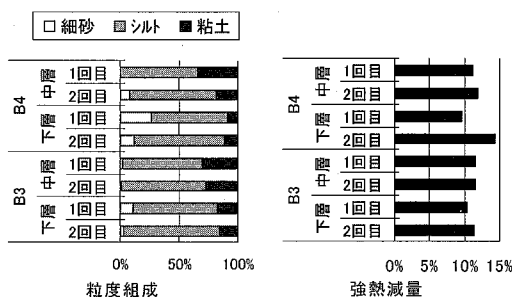


図-4 浮遊粒子の粒度組成と強熱減量

#### b) 静穏時の特性

図-3 に示すように、波浪時よりも SS 濃度の鉛直分布の相対的な較差が顕著となり、下層の SS 濃度が高くなる傾向が卓越する。下層のピーク時 SS 濃度は各地点とも概ね 60~160 mg/l であり、上げ潮時に発生する傾向にある。B4、B5 地点はその傾向が特に強いが、これは流況調査から上げ潮時に下げ潮時よりも大きな流速が航路方向に発生していることを確認しており、底面せん断応力の増加により堆積している細粒底質が巻き上がり、移流するためと考えられる。また、B3 地点の下層では、常に港内方向の流速が発生していることも観測している。

以上より、静穏時には、上げ潮時に B4 地点に代表される航路周辺海域の底面近傍 SS 濃度が高まり、航路方向に移流するとともに、航路から港内方向の流れにより SS が港口・港内に徐々に移流していることが分かった。

### (3) 浮遊粒子の特性

捕砂調査により捕捉した浮遊粒子の粒度組成は、波浪時、静穏時に関わらず港外のB4, B5, B6地点でシルト・粘土分が約80~90%であり、港内のB3, B3'では台風14号が来襲した1回目のB3下層を除きほぼ100%がシルト・粘土分であった。図-4に港外、港内の代表例としてB4とB3地点のデータを示す。西港区周辺海域の底質は調査年次により多少の変動はあるが、90%以上が細砂である場合がほとんどであり、浮遊粒子と周辺底質の粒度組成は明らかに異なる。これは細砂に比べてシルト・粘土分の沈降速度が小さく、移流・拡散しやすいことや、巻き上げの生じる限界せん断応力の較差によると考えられる。この細砂とシルト・粘土分の浮遊特性の違いにより一種のふるい分け現象が発生し、海浜流により航路周辺海域にシルト・粘土分が卓越して輸送され、流速が減少する航路等に沈降すると考えられる。

また強熱減量については、B4地点のように港外観測点の下層で1回目の数値が小さくなる傾向が見られた。これは波浪に伴う強い流れにより、細砂の捕捉率が増えたためと考えられる。

## 3. 凝集実験

### (1) 実験方法

従前の凝集実験では河床底質を懸濁粒子としていたが、本研究では台風14号に伴う出水時に新釧路川と阿寒川で採水し採取した懸濁粒子を用いて実験を行った。実験方法の詳細は平澤ら(2005)と同様であるが、西港沖で採取した海水と2種類の工場排水(港内:A排水, 港外:B排水)から表-1に示す500 mlの溶媒をつくり実験した。

凝集粒子の沈降速度は、5秒間隔で連続撮影した実体

表-1 溶媒の種類

|    | 排水なし   | A排水(港内) |       | B排水(港外) |       |
|----|--------|---------|-------|---------|-------|
|    |        | 5 ml    | 50 ml | 5 ml    | 50 ml |
| 海水 | 500 ml | ①       |       |         |       |
|    | 495 ml |         | ②     | ④       |       |
|    | 450 ml |         |       | ③       | ⑤     |

顕微鏡写真から対象粒子の沈降距離を粒径とともに計測し、算出した。また、凝集粒子の粒度分布については、実体顕微鏡写真内の全粒子の粒径を計測して求めた。

### (2) 凝集特性

図-5は溶媒と凝集後の中央粒径の関係を示したものである。図中の①から⑤は、次に示す図-6同様、表-1の溶媒の種類を示す。阿寒川および新釧路川の懸濁粒子とも、海水だけを溶媒とする場合に比べ、工場排水を添

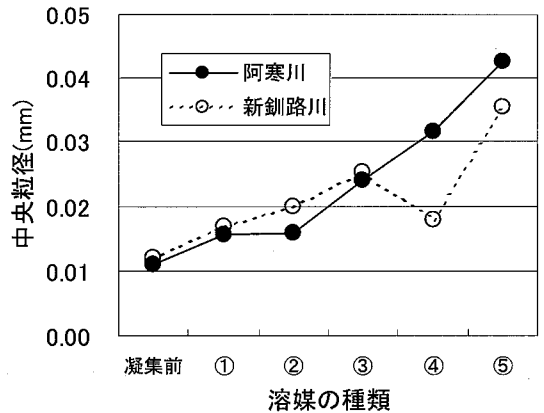


図-5 溶媒の種類と中央粒径の変化

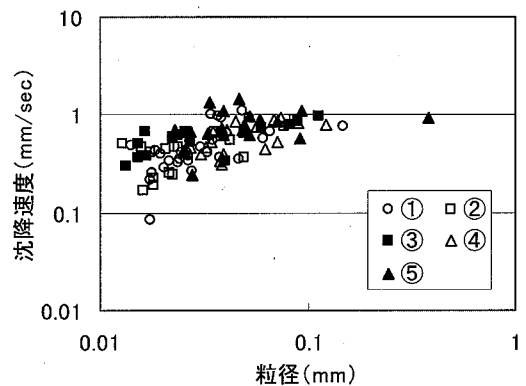


図-6 粒径と沈降速度(阿寒川)

加した場合に凝集が進捗し、その添加率が大きいほど中央粒径が増加する傾向を示す。今回の実験の場合、中央粒径の増加率は両河川の懸濁粒子とも、海水のみとの混合時の1.4倍に対して、最大で3~4倍程度であった。

図-6は阿寒川の凝集粒子について粒径と沈降速度の関係を溶媒別に示したものである。全体として粒径の増加に従って沈降速度も大きくなる傾向が見られる。この傾向は新釧路川の凝集粒子の場合も同様である。

また沈降速度を平均値と比較すると、凝集前の0.5 mm/secに対してB排水を50 ml添加した場合0.8 mm/secとなり、凝集により沈降速度が1.6倍となった。

以上のように、本実験により周辺河川から供給される懸濁粒子は海水さらには工場排水と混合することで凝集が進捗し、粒径の増大とともに沈降速度が増加することが分かった。なお、今回の実験で用いた工場排水は釧路市環境白書(2006)に示されているように水質基準を満足しているものであり、工場排水そのものが周辺の海域環境に直接的な影響を及ぼすものではないことを追記する。

#### 4. 堆積メカニズム

以上、現地調査および凝集実験より、港口近傍における航路・泊地の堆積メカニズムは次のように考えられる。

- 航路・泊地に堆積する細粒底質であるシルト・粘土分の主な起源は、阿寒川および新釧路川から供給される懸濁粒子である。懸濁粒子は海水さらには工場排水と混合することで凝集が進捗し、沈降速度が増加する。
- 浅海域に堆積した凝集粒子は、波浪時の碎波の作用や強い海浜流により細砂とともに巻き上げられ、細砂より相対的に沈降速度の小さな凝集粒子が海浜流により卓越して航路方向に輸送され、水深の増大に伴い流速が小さくなる航路やその周辺に沈降する。
- 静穏時の上げ潮時に発生する航路周辺から航路方向への流れや航路から港内方向の流れにより徐々に凝集粒子が港口・港内方向に輸送され、堆積する。

#### 5. 海浜変形モデル

本研究では主に凝集粒子からなる細粒底質と細砂が混合する本海域の底質特性を考慮できる海浜変形モデルとして、発生・沈降モデルを底質各々に設定し、その変形量の総和により海浜変形量を算定する数値モデルを検討した。数値モデルの再現性については、平成16年9月8日に来襲した台風18号に伴う波浪時を含む期間のSS濃度分布や海浜変形量を計算し、現地観測値と比較することで評価した。

##### (1) 海浜変形モデルの概要

###### a) 堆積量の算定方法

本モデルにおいて、それぞれの領域での堆積量は底面からの浮遊土砂の海底面からの発生量  $P$  と浮遊土砂の沈降量  $D$  の差分によると仮定する。

細粒底質の発生量  $P_1$  は、Shengら(1979)の考え方を参考に底泥を対象とした実海域での数値計算に良く用いられる式(1)(例えば、中川ら, 2005)で、細砂の発生量  $P_2$  は式(2)によることとし、底面濃度は樫木ら(1991)の基準点濃度算定式で、沈降速度はRubeyの沈降速度式(例えば、樫木ら, 1996)で求めた。

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= 0 & (\tau_b < \tau_e) \\ P_1 &= P_m \cdot M (\tau_b / \tau_e - 1) & (\tau_b \geq \tau_e) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$P_2 = P_s \cdot W_s \cdot C_{be} \quad (\Psi \geq \Psi_c) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $P_m$ : 底質中の細粒底質の比率、 $P_s$ : 同じく細砂の比率、 $M$ : 侵食速度係数、 $\tau_b$ : 底面せん断応力、 $\tau_e$ : 限界せん断応力、 $W_s$ : 細砂の沈降速度、 $C_{be}$ : 細砂の底面濃度、 $\Psi$ : シールズ数、 $\Psi_c$ : 限界シールズ数、である。 $M$  および  $\tau_e$  は観測値や実験値等を参考に  $M=0.0002 \sim 0.0015 \text{ mg/cm}^2/\text{sec}$ 、 $\tau_e=0.1 \sim 0.25 \text{ Pa}$  の範囲で平面分布を仮定した。また海底面上に堆積直後の

圧密の進んでいない細粒底質については、再浮上しやすさを考慮し  $M=0.002 \sim 0.015 \text{ mg/cm}^2/\text{sec}$ 、 $\tau_e=0.01 \sim 0.08 \text{ Pa}$  と設定した。

次に細粒底質の沈降量  $D_1$  は中川ら(2005)を参考に式(3)で、細砂の沈降量  $D_2$  については式(4)により求めた。

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= 0 & (\tau_b > \tau_d) \\ D_1 &= W_m \cdot p \cdot C_{bm} & (\tau_b \leq \tau_d) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$D_2 = W_s \cdot C_{be} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\tau_d$ : 沈降限界せん断応力、 $W_m$ : 細粒底質の沈降速度、 $C_{bm}$ : 細粒底質の底面濃度、 $p$ : 沈降確率 ( $p=1-\tau_b/\tau_d$ )、である。 $W_m$  については凝集実験結果及び試行計算により  $0.2 \text{ mm/sec}$  とした。

###### b) 外力等の入力方法

海浜変形を発生させる外力は、波と潮汐による流れとした。再現期間としては、現地調査の結果より波浪時だけでなく静穏時も航路・泊地の堆積に関係していることが判明したことから、図-7に示す台風18号に伴う波浪時を挟む計6日間を設定し、緩勾配方程式を有限要素法で解く手法により波浪場を求めた上で、ラジエーション・ストレス分布から海浜流を計算した。波高の時系列は、この期間の最大有義波高が5.0mであったことから、1m毎に5ランクでモデル化し沖波とした。潮流については、観測潮位を調和分解し、再合成したものを使用した。海浜流、潮流とも1層レベルで計算を行ったが、計算結果は概ね観測値を再現するものであった。

また阿寒川および新釧路川からのSS負荷量も、流量の実測値とL-Q式から求め、計算の境界条件として時系列で入力した。

##### (2) 海浜変形の再現性

図-8に台風18号通過時のSS濃度を示す。計算値は、各地点で時系列変化および鉛直分布が現地観測値とよく一致する結果となった。これは浅海域で多量に浮遊した細粒底質が海浜流により輸送され、沈降し、再浮上する現象がよく再現されているためと考えられる。

次に図-9はSS濃度と地形変化の平面分布の時間変化を示したものである。SS濃度は断面平均値を示している。

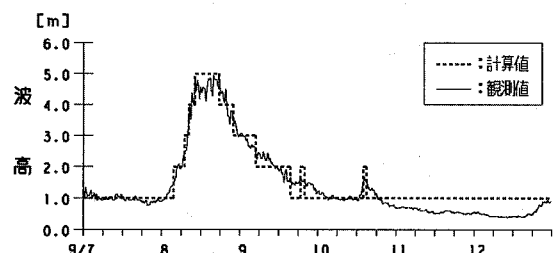


図-7 波高モデル

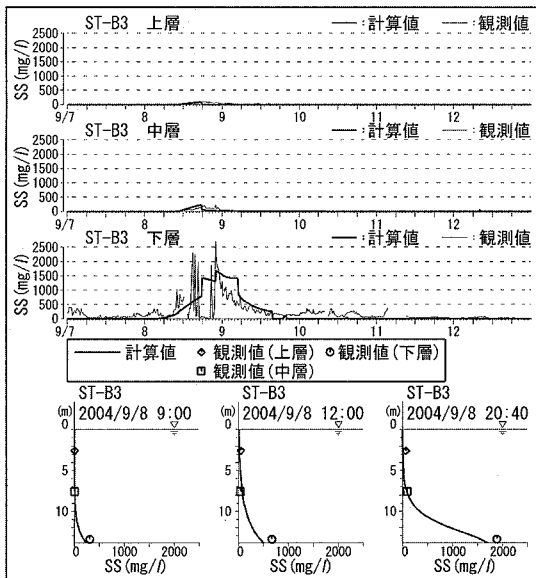


図-8 SS 濃度の観測値と計算値の比較

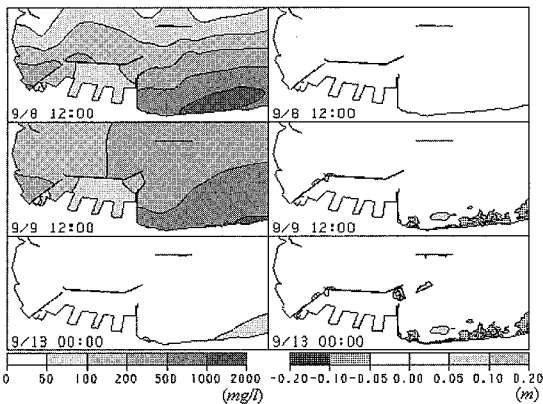


図-9 SS 濃度と地形変化の時間変化

図に示すように波浪時に細粒底質が航路方向に輸送され、静穏化とともに港口近傍で卓越して堆積する様子が計算されている。ただし、浅海域で計算上、過剰に洗掘される箇所が発生している。この原因として、海底面から巻き上げられる細粒底質の供給箇所の再現性が十分でないことが考えられる。これまでの現地観測より、阿寒

川のさらに西側海域においても高い SS 濃度が観測されているが、今回の計算ではこの西側境界からの供給は考慮していない。この点も踏まえながら、今後、海浜変形モデルを改良していく。

## 6. 結 論

- 釧路港西港区の港口近傍の航路・泊地において細粒底質が堆積するまでのメカニズムを明らかにした。特徴的な細粒底質の堆積は、周辺河川から供給される懸濁粒子の凝集と、細砂と細粒底質のふるい分け効果に関与して発生する現象であると考えられた。
- 細粒底質の再浮上を考慮した海浜変形モデルにより、SS 濃度の鉛直分布とともに、港口近傍の堆積状況を再現することができた。

最後に、本研究は釧路港漂砂対策検討委員会（委員長：北海道工業大学教授 水野雄三氏）での成果を踏まえてとりまとめたものである。特に（独法）港湾空港技術研究所・中川康之委員には海浜変形モデルについて親身なご指導をいただいた。ここに改めて委員各位に感謝の念を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 釧路市環境部環境政策課：釧路市環境白書平成 17 年度版（オンライン），<http://www.city.kushiro.hokkaido.jp/>，参照 2006-05-01
- 合田良實・佐藤昭二(1981)：わかり易い土木講座 17 新訂版海岸・港湾，彰国社，59p.
- 榎木亨・出口一郎(1996)：新編 海岸工学，共立出版株式会社，122p.
- 榎木亨・出口一郎・小野正順・襄基成(1991)：浮遊漂砂の非平衡性に着目した航路埋没の数値計算について，海洋開発論文集 Vol.7，pp. 295-300.
- 中川康之・吉田秀樹・谷川晴一・黒田祐一(2005)：潮汐流による底泥の巻き上げ現象のモデル化と浮遊泥量変動の再現，第 52 回海講論文集，pp. 441-445.
- 平澤充成・金田充・松本浩史・川口勉・佐藤寿彦・山下俊彦(2005)：釧路港周辺における細粒底質移動現象に関する現地調査，第 52 回海講論文集，pp. 461-465.
- Sheng, Y. P. and W. Lick(1979)：The transport and resuspension of sediments in a shallow lake, J. Geophys. Res., Vol.84, pp. 1809-1826.