

石狩湾沿岸域における細粒土砂の 移動特性について

CHARACTERISTICS OF FINE-GRAINED SEDIMENT TRANSPORT IN THE COASTAL AREA OF ISHIKARI BAY

奥西 武¹・鈴木晃浩²・金子彰雄³・本間大輔⁴・山崎真一⁵・山下俊彦⁶
Takeshi OKUNISHI, Akihiro SUZUMURA, Akio KANEKO, Daisuke HONMA, Shin-ichi
YAMAZAKI, Toshihiko YAMASHITA,

¹ 正会員 水産科博 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

² 工修 豊田市役所公園課 (〒471-0025 愛知県豊田市西町 3-60)

³ 工修 前田建設工業(株) 北海道支店 上越トンネル作業所 (〒078-1773 上川郡上川町字日東 273)

⁴ 正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

⁵ 正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

⁶ 正会員 工博 北海道大学大学院 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

A three-dimensional hydrodynamic Princeton Ocean Model was used to compute the suspended particulate matter (SPM) transport in Ishikari Bay from February to March 2002. The sources of SPM were the input of the Ishikari River and the erosion of fine-grained sediment by stress of wave-driven and wind-driven currents in this model. The model can represent the turbidity in the coastal station of the depth 25m in Ishikari Bay. The model results show that fine-grained sediment suspended by bottom stress caused by a strong wind and high wave are moving to the southern area and the coastal area of Otaru with the characteristic costal currents in winter.

Key Words: Ishikari Bay, fine-grained sediment transport

1. はじめに

宇多 (1997) は河川では砂礫分より数倍も多くのシルト・細砂が運ばれており, それらの細粒底質の流出が阻止されると沖合の海底地盤の低下を招き, 長期的にはかなり大きな影響となる可能性がある」と指摘している。また, 海岸環境と流砂系土砂管理の必要性について論じた磯部 (1998) は, 海岸地形が特に基本的な環境要素となり, 海岸の土砂管理を通じて地形の安定化を図ることが, 海岸環境全体の向上のために非常に重要であるとしている。このような流砂系や漂砂系の観点からの, 海岸における広域的な土砂の移動特性や堆積物特性に関する研究が近年行われるようになってきた (李ら (1999), 山下ら (2000))。本間ら (2004) は石狩湾における粒径別土砂の堆積特性を調べ, 砕波帯外である水深 15m 以深の海域において, 短期的な土砂移動や, 地形変化を確認している。このような土砂移動は堆積物の巻上げによって起こっていると考えられる。ま

た, この巻上げは, 水柱への栄養塩を回帰させる要因としても重要であり, 湾内の物質循環を考える上でも堆積物の巻上げのメカニズムを知ることが必要である。

しかしながら, この砕波帯外で巻き上げ, 輸送されている細粒土砂の詳細な移動特性については, 明らかになっていない。そこで, 本研究では, 北海道石狩湾沿岸域の砕波帯外での細粒土砂の移動特性について明確にすることを目的とした。

2. 観測資料

図-1 に示した, 北海道石狩湾奥, 水深 25m・離岸距離約 7km 地点の St.A (北緯 43.288 度, 東経 141.256 度) において, 2002 年 2 月 26 日~2002 年 3 月 24 日の約 1 ヶ月間, 現地観測を実施した。観測地点において, 浮遊砂採水器, 濁度計 (海底上

0.5m, 2m, 10mに設置), ADCP (超音波ドップラ流速分布計, 海底に設置), 波高流速計 (Wave-Hunter) を設置した. 現地調査により, 流動特性, 懸濁物質の粒度組成などの把握を行った.

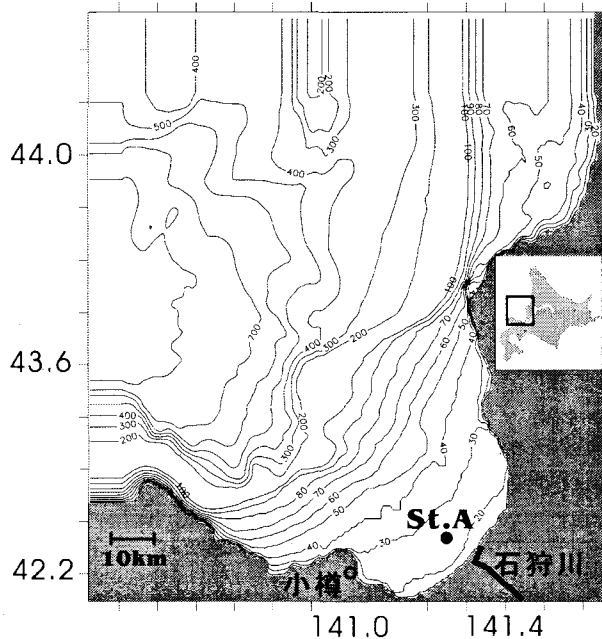


図-1 観測地点およびモデル領域 (水深 0-100m は 10m 間隔, 水深 100m 以深は 100m 間隔でコンタ線を引いている.)

3. 数値モデル

観測された濁度 (懸濁物質濃度) を再現できるような数値モデルを開発し, 底質移動特性の把握を試みた. 使用した数値モデルは, Princeton Ocean Model (POM) をベースにして改良したものである. モデル領域は図-1 に示す範囲で, 水平格子は緯度および経度方向ともに 30 秒 (x 方向で約 723m, y 方向で約 1106m) とし, 鉛直方向の σ レベルを 15 層に分割した. 各格子の水深データは海洋情報研究センター (MIRC) の緯度経度 30 秒のメッシュデータをスプライン関数で平滑化して使用し, モデルの最小水深は 10m, 最大水深は 860m とした. また, 北方向と西方向を開放境界とし, 流速および水温・塩分値に放射条件を適用した.

物理場の計算には, 2002 年 2 月から 3 月までの期間の石狩川流量と 6 時間間隔の風速の空間分布データ (メソ客観解析データ: 気象庁) を外力として利用した. 懸濁物質の計算は基本式は式 (1) のように表せる.

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S - w_0 S \quad (1)$$

ここで,

S : 懸濁物質濃度,

U, V : 水平方向の流速,

D = 水深 + 水位

K_M : 鉛直拡散係数,

F_S : 水平拡散項を省略して記述したもの

ω : 鉛直方向の流速

w_0 : 沈降速度

懸濁物質の供給源として, 河川からの懸濁物供給と波浪に伴う海底からの巻き上げを考慮した. 海底からの巻き上げの巻き上げ量は, 式 (2) に示す Partheniades (1962), Krone (1962) の式を用いた.

$$f_{ero} = \max \left\{ 0, \frac{\tau}{\tau_{c,ero}} - 1 \right\} E_0 \quad (2)$$

ここで,

f_{ero} : 巻き上げフラックス ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

τ : 底面せん断力 (Pa)

$\tau_{c,ero}$: 底質の浮上限界せん断力 (Pa)

E_0 : 巻き上げ速度 ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

底質の浮上限界せん断力を 1.5Pa, 巻き上げ速度 $0.006 \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とした.

底面せん断力は, 田中 & Thu (1993) の波・流れ共存場の海底面に作用するせん断応力を用いた. 田中 & Thu (1993) の方法では層流、粗面乱流、滑面乱流および、遷移領域におけるせん断力を陽形式で解くことができる. また、流向、波の進行方向を考慮した計算方法であるので、流向、波の進行方向が同一でない条件下での計算が可能である. 波・流れ共存場でのせん断力は (3) 式によって定義される.

$$\tau = \rho u_{cw}^2 = \frac{\rho}{2} f_{cw} U_w^2 \quad (3)$$

ここで,

ρ : 流体の密度

u_{cw} : 波・流れ共存場での摩擦速度の最大値

f_{cw} : 摩擦係数

U_w : 微小振幅波によって得られる波動流速の境界層外縁での最大値

モデル領域内全て, 滑面乱流条件として τ を算出した. 波の緒元は波高流速計から得られた有義波高を用いて, 微小振幅波理論によりモデル流域内の底面流速を算出した. また, 浮遊砂採水器で採取した浮遊砂の中央粒径 ($d_{50}=30\mu\text{m}$) より算出した沈降速度 (0.3mm/s) を懸濁物質の計算に適用した.

3. 結果および考察

St.A の流速の東西および南北成分は, ADCP による観測および数値計算ともに, 全層が同一方向となる, 順圧流が卓越していた. そこで, 時系列的な流

動変動は全層平均流速を用いて、モデル計算結果を検証した。図-3 に石狩湾奥部で観測された風速，St.A における全層平均の数値計算結果，現地観測の時系列変化を示す。計算結果および観測結果とも南西方向の流れが卓越している。最大流速はともに3月3日、3月11日前後である。特に、流速が速いこの両期間の計算結果は実測値をよく反映している。北西の風が強い時には St.A における流れは南西となる様相がよく再現されている。弱風時は流動の再現の精度は悪くなるが、この時は波浪が低いため、海底からの巻き上げ効果は小さくなるため、細粒土砂の輸送には大きな影響を及ぼさないと考えられる。

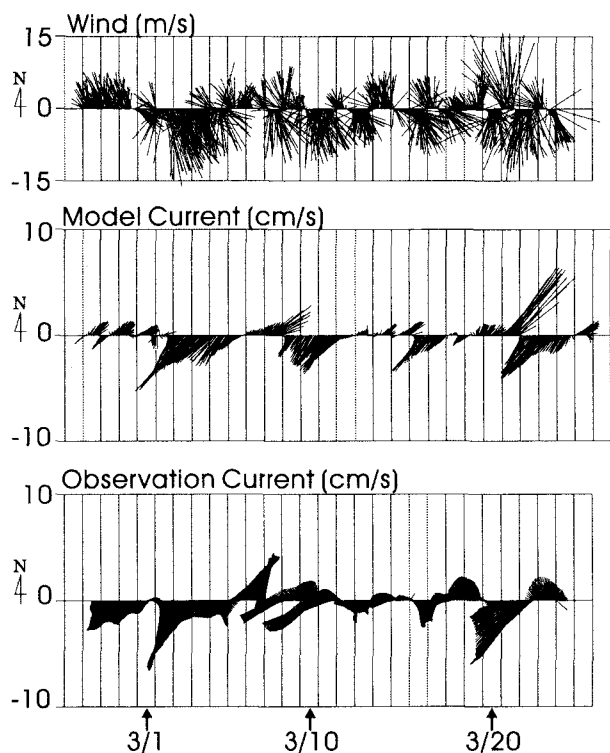


図-3 St.A における風向風速（上），計算結果の全層平均流（中），観測結果の全層平均流（下）。（観測結果は潮汐成分を除去するため25時間の移動平均をしている。）

図-4, 5 は、南西方向の強い流れが見られた、3月3日、3月11日の順圧流の日平均値を示す。両日とも、湾内に時計回りの還流が発生していることがわかる。山下ら（1999）は冬季の石狩湾において、沿岸部で強い南西流を観測している。この南西流は、数値計算結果で表現されている風応力を駆動力とした湾内の還流を捉えている可能性がある。そして、この特徴的な流れは冬季の石狩湾において、北西の季節風が強くなるときに常時発生していると思われる。

図-6 に St.A において観測された有義波高、図-7 に St.A の海底上2m、10mにおける観測された濁度、図-8 に St.A の海底上2m、10mにおける計算

で再現したの濁度の時系列変化を示す。3月3日に高濁度が観測されている。3月3日以前の現地観測による波高が低いことを考慮すれば、この高濁度は、観測地点近傍で、巻き上がった底質の影響を強く受けていることが、容易に推察できる。このときの計算濁度と比較すれば、現地観測と計算結果による濁度はよく一致している。更に3月3日での高濁度の影響が残っている3月5日においても両者は、ほぼ一致している。また、3月9日、11日における濁度変化も再現可能であり、高波浪時の濁度の再現はお

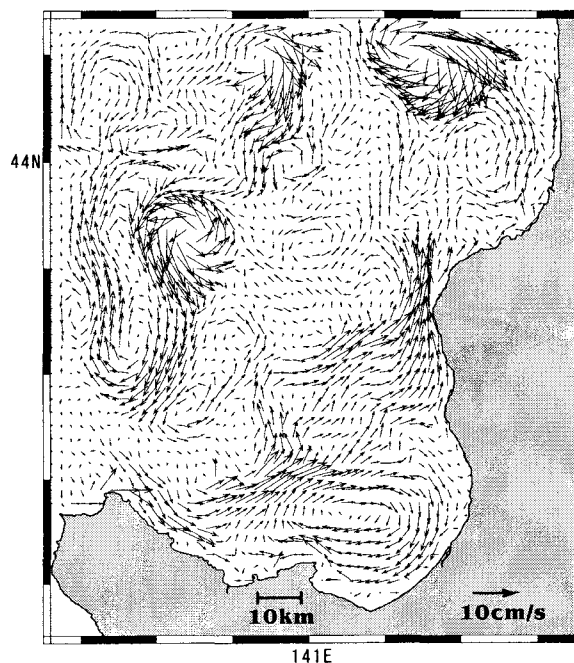


図-4 3月3日における日平均順圧流（2次元平均流）

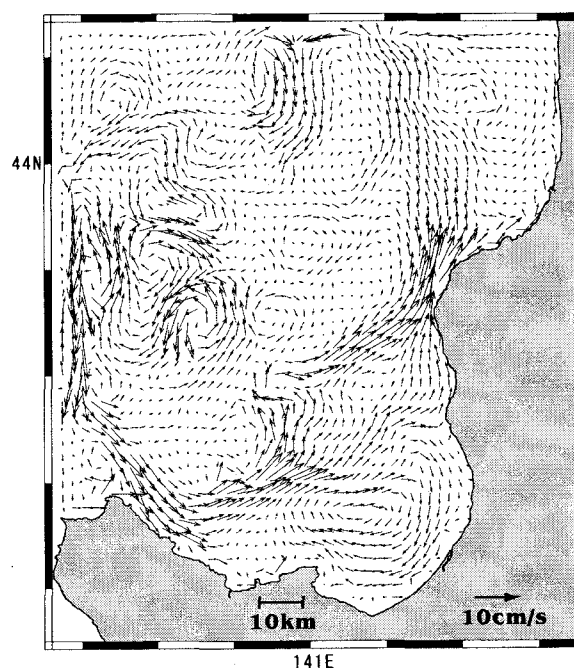


図-5 3月11日における日平均順圧流（2次元平均流）

おむね可能であった。計算結果の濁度は海底上 2m, 10mともほぼ同一の値であった。これは、高濁度時には強い風応力による鉛直拡散係数が高くなり、は鉛直混合が促進されるためである。有義波高が 1m 以下の変動によって生じている濁度変化は計算では再現できていない。これは、弱い底面応力時に巻き上がる粒子が、モデル上で評価できていないためである。堆積物からの巻き上げ過程による濁度変化を詳細にモデリングするためには、粒径別の底質の浮上限界せん断力 ($\tau_{c,ero}$)、巻き上げ速度 (s)、沈降速度を考慮したモデルを作成する必要があると思われる。

図-9 に数値計算によって見積もった巻き上げフラックスの計算期間の平均値を示す。巻き上げフラックスは 0~300 ($\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$) であり、水深の浅い場所で波浪の影響を強く受け高くなっている。また、水深約 40m 付近においても巻き上げが起きている。図-10 に数値計算によって見積もった沈降フラックスの計算期間の平均値を示す。沈降フラックスの分布は巻き上げフラックスの分布傾向と一致しているが、等高線が湾奥に向けて幅狭くなっていることが特徴的である。図-11 に数値計算によって見積もった沈降および巻き上げフラックスの収支量を示した。巻き上げ量が卓越した所が白抜きで、沈降量が卓越した所を色付である。石狩湾北東部では、巻き上げ量が沈降に比して卓越し、南部および小樽沿岸では沈降が卓越している。これは、強い北西風によって生じた波浪によって巻き上がった細粒土砂が、この時、発生している湾内を時計周りに回る還流によって運ばれていると解釈できる。これらの結果は、砕波帯外で巻き上がった細粒底質が広域的に移動してきることを示唆するものである。また、図-12 は石狩湾の底質分布を示したものである。これを見ると、小樽沿岸に粒径の小さい堆積物が分布していることが分かる。この堆積物は冬季の細粒土砂の移動によってもたらされたものであることが、計算結果より推察できる。

モデル領域の堆積物の粒度は様々であるので、同じ底面せん断力においても、巻き上げ速度は異なってくる。本研究では沿岸部の 1 地点度の濁度を検証データとして、最適な巻き上げ速度を設定した。そのため、モデル領域での細粒土砂の移動量を見積もりは大きな誤差を生じている可能性が大きい。今後は様々な粒径に対応して巻き上げ量を評価できるモデルを開発することが望まれる。そして、数値計算によって予想された底質の輸送過程を検証できるような広域観測を行い、細粒底質の移動特性をさらに明確にする必要がある。

5. まとめ

波浪に伴う流れと風応力に伴う流れによって生じる底面応力の関数によって巻き上げ速度を評価したモデルを Princeton Ocean Model に組み込んだモデ

ルを開発し、石狩湾の細粒土砂の移動特性について検討した。粒径を $30\mu\text{m}$ と想定した計算で、水深約 40m においても底面応力で巻き上がる可能性があることがわかった。また、強い北西風によって生じた波浪によって巻き上がった細粒土砂が、この時発生している湾内を時計周りに回る還流によって運ばれ、湾南部の沿岸と小樽沿岸に堆積する傾向が確認できた。

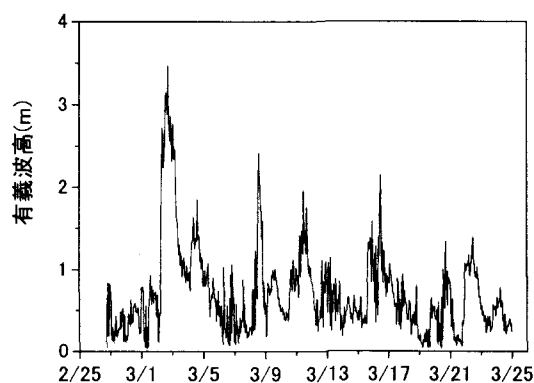


図-6 St.A における有義波高

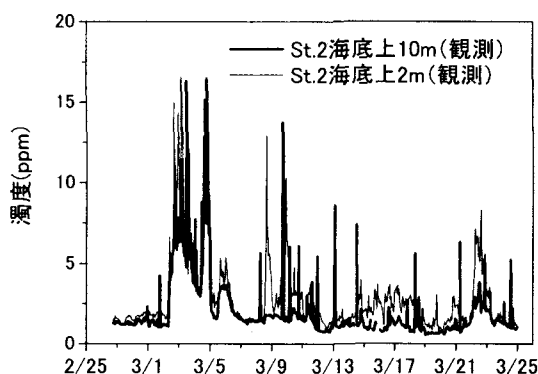


図-7 St.A における濁度 (観測結果)

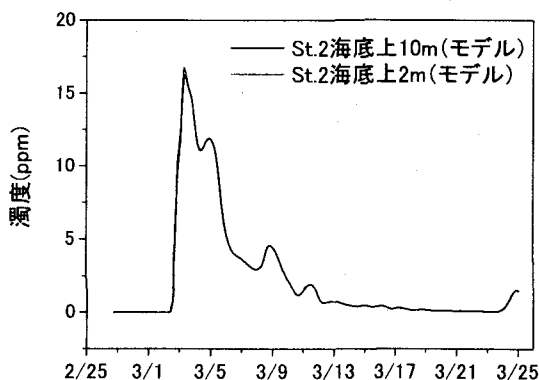


図-8 St.A における濁度 (計算結果)

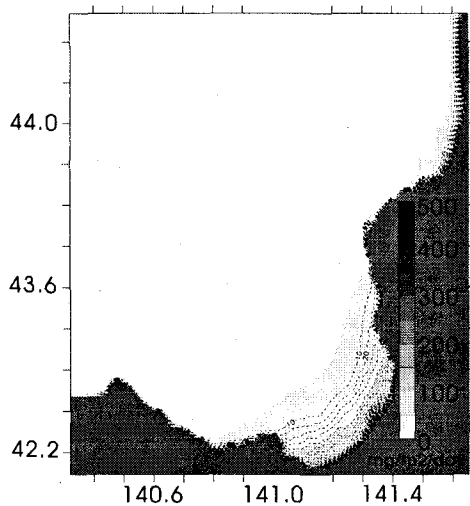


図-9 卷上げフラックスの平均値（コンタ線は 10 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 間隔）。

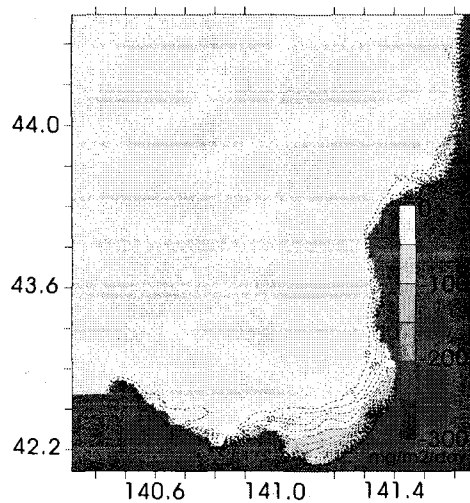


図-10 沈降フラックスの平均値（コンタ線は 10 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 間隔）。

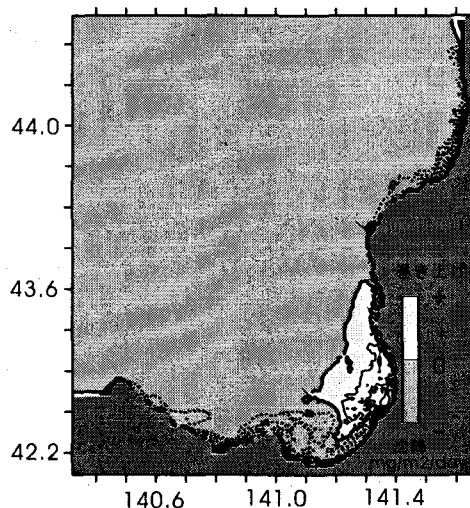


図-11 沈降および巻き上げフラックスの収支量（コンタ線は 20 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 間隔）。

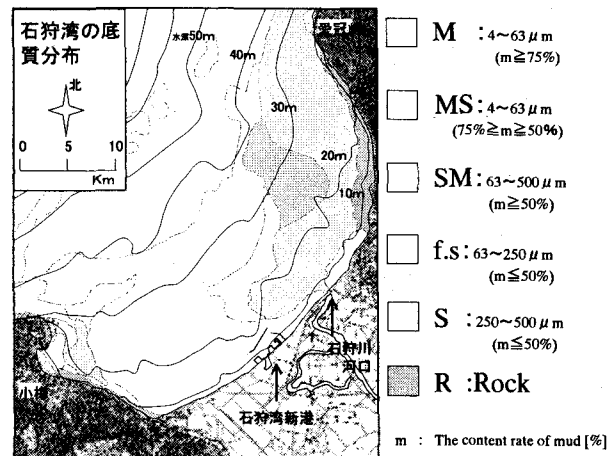


図-12 石狩湾の底質分布

参考文献

- 1) 本間大輔, 窪内 篤, 先川光弘, 鈴村晃浩, 山下俊彦 (2004) 石狩湾大水深域における冬季の流動・漂砂機構に関する現地観測, 海洋開発論文集, 第 20, pp485-489.
- 2) 磯部雅彦 (1998) ミティゲーションの調査分析と沿岸域環境管理の枠組の提案, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp1236-1240.
- 3) Krone, R. B. (1962) Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Final report, University of California, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, Berkeley, California, USA.
- 4) 李在炯, 入江功, 小野信幸, 村上啓介 (1999) 底質分析による広域の漂砂特性調査法について, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp656-660.
- 5) Partheniades, E. (1962) A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water. PhD dissertation, University of California, USA.
- 6) 田中仁, Aung Thu (1993) 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, No467, II-23, pp93-102.
- 7) 宇多高明, 木村一雄, 寺田好孝, 小倉和範, 見附敬三 (1997) 相模川河口で観測された土砂移動サイクル, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp581-585.
- 8) 山下俊彦, 星 秀樹, 新山雅紀, 長谷部隆光, 福本正, 多田彰 (1999) 石狩湾沿岸域の冬季の三次元流動特性, 海岸工学論文集, 46, pp426-430.
- 9) 山下俊彦, 新山雅紀, 菅沼剛, 早川哲也 (2000) 石狩川から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, pp676-680.