

石狩湾の土砂収支と底質の移動特性

山崎真一¹・山下俊彦²・江里口知己³

2002 年, 2003 年に石狩湾において流動, 巻き上げ, 沈降量等に関する調査を実施し, また土砂移動シミュレーションモデルを構築し石狩川から流出した懸濁物質の石狩湾内における収支, 移動特性を検討した. 石狩湾では冬期の季節風が強まる時期に底質が巻き上げられ, この時期に海底付近で卓越する南西～西南西に向かう流れによって底質が輸送されていると考えられる. また, 融雪期～夏期にかけては底質の巻き上げ量は少なく, 流出した懸濁物質は東岸沿いに堆積している. 2002 年に石狩川から流出した約 0.9×10^8 kg の懸濁物質の約 60% は水中に懸濁し, もしくは沖に流出しており, 湾内に堆積した底質も加えると年間では約 3×10^8 kg の土砂が沖に流出していると考えられる.

1. はじめに

石狩川から流出した土砂は, 河口沿岸海域に広く堆積している. 底質環境は沿岸域の生態系, 沿岸海域の水産資源との関わりが強く, 特に出水時には大量の土砂が周辺海域に堆積し長期間にわたり沿岸海域に影響を及ぼすこともある. 近年は, 北海道内の河口周辺海域においても養殖漁業が行われており, 出水による漁業影響も数多く報告されており, 漁業被害を軽減するためには河口周辺海域における土砂の堆積, 底質の移動についてその特性を明らかにする必要がある.

石狩湾の堆積物に関する調査に関しては, 大島ら (1978) が底質調査を実施し, 現海水準下における石狩川からの流出土砂が沖の大陸棚上に存在しないこと等を明らかにしている. 山下ら (2000) は, 沿岸域の粒径 $75\mu\text{m}$ 以上の土砂に関する土砂収支を検討している. また, 山崎ら (2004) は石狩湾の底質の年代測定結果を基に, 明治期以前及びそれ以降の石狩湾における年間の堆積土砂量を推定している. 今回の調査では, 流動, 海水中の濁質濃度, 沈降量, 及び底質の巻き上げ特性に関する調査を行い, また湾内全体の土砂移動を再現できる数値シミュレーションモデルを構築し, 石狩川から流出する懸濁物質の年間を通した移動, 収支について検討を行った.

2. 現地調査の概要

図-1 に調査地点を示した. 2002 年 1 月～2003 年 5 月に St.A (水深約 20 m) に ADCP (WH-SI200, RD Instruments 製), 波高計 (WH-Σ94 I-O テクニク製), 底面から 2, 8, 14.5 m の各地点に濁度計 (ATU-8M

アレック電子製他) を設置した. また St.E には波高計 (WH-Σ94 I-O テクニク製), St.H には ADCP (WH-S600 RD Instrument 製) を設置した. 底質の巻き上げ調査は 2002 年 11 月に St.A で実施し, 海底面から 0.5, 1.25, 2, 5.4, 8, 14.5 m の位置に濁度計 (ATU-8M アレック電子製他) を設置し濁質濃度分布を計測し, また砂面計 (USR-10 カイジョー製) を設置し海底面高の変化を計測した. 2003 年 4 月中旬～5 月中旬の融雪期には, St.A, 及び St.B の中間水深に連続自動セディメントトラップ (日油技研工業製) を設置し, 石狩川から流出した懸濁物質の沈降量を調査した. また, 2001 年～2003 年の洪水時に札幌大橋採取した懸濁物質, 2002 年に石狩湾の St.A, St.B, St.C, St.D, St.E で採取した底質の粒度組成を分析した.

3. 数値シミュレーションモデルの概要

石狩川から流出した懸濁物質の石狩湾海域における空間的, 時間的な移動を把握するために数値シミュレーションを行った. モデルは潮汐, 風応力により生じる流れ, 河川からの淡水流入による密度流が複合した沿岸部の流れ場を解析するために鉛直多層型の 3 次元流動モデルを用いた (Taguchi et. al, 1999). 石狩湾が開放系であることから, 図-1 に示しているとおり検討を行う湾奥部の計算領域外に広域の計算領域を設定し, 得られた潮位を解析対象領域の境界条件として与えた. 海上の風速については, 気象庁のメソ客観解析データを用いた. 風応力については, 杉原ら (2004) の整理した風速と海面摩擦係数の関係を参考に設定したが, 加藤ら (1999) によれば海上風速はメソ客観解析データが実測値に比べやや小さめの値をとることが述べられおり, 計算では実際の海域の流速が観測値とほぼ合うように海面摩擦係数 γ_a^2 を (1) 式で与えた.

$$\gamma_a^2 = (3.79 + 3.1/w + 7.7/w^2) \times 10^{-3} \dots\dots\dots (1)$$

ここで, w は海面上 10 m の風速 (m/s) である. 計算

1 正会員 工修 北海道開発局石狩川開発建設部千歳川河川事務所
2 正会員 工博 北海道大学大学院教授工学研究科環境フィールド工学専攻
3 中電 CTI テクノロジーソリューション事業部

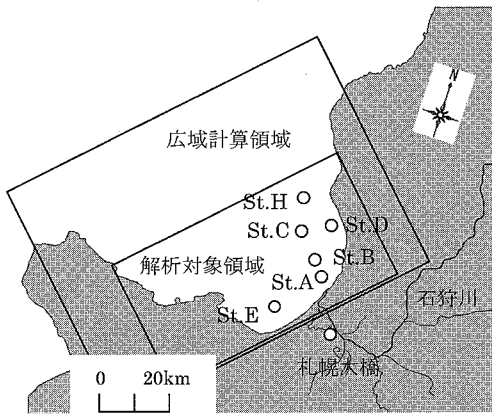


図-1 計算対象領域、及び現地調査地点

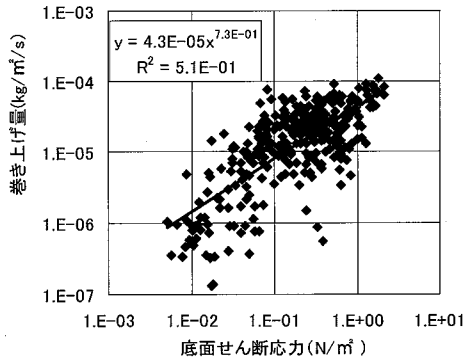


図-2 底面せん断応力と底質の巻き上げ量の関係

では、石狩川から流出した懸濁物質の沈降速度は粒径毎に与えるが、海水中では懸濁物質は凝集すると考えられることから、沈降速度については石狩川で採取した懸濁物質を用いて実施した凝集・沈降試験結果から得られた(2)式で与えた(山崎ら, 2003年)。

$$W_s = 2.59 \cdot d^{0.82} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 W_s は粒子の沈降速度 (mm/s)、 d は凝集径 (mm) とする。底質の巻き上げ特性については、2002年11月の調査によって得られた底質巻き上げ量と海底面に作用するせん断応力の関係(図-2)から(3)式が得られている。

$$E = 4.3 \times 10^{-3} \tau_{0\max}^{0.73} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 E は巻き上げ量 ($\text{kg/m}^2/\text{s}$)、 $\tau_{0\max}$ は海底面に作用するせん断応力 (N/m^2) で、田中ら(1993)の方法を用いた波・流れ共存場での値である。石狩湾の海底面には、僅かな擾乱でも巻き上がる性質を持つ浮泥と限界せん断応力以上で巻き上げられるような性質を持つ底質が存在していると考えられる。図-3にSt.Aにおける

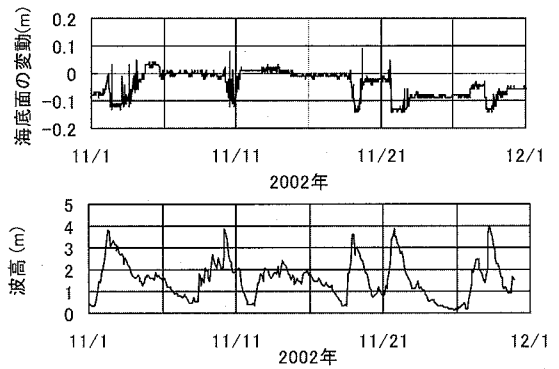


図-3 砂面計の変動及び波高

砂面計の計測結果及び波高を示すが、波高が2m以上(せん断応力が 0.4 N/m^2 程度に相当)になると海底面高が変化しており、このせん断応力が底質の巻き上げ限界せん断応力(楠田ら, 1988)に相当するものと考えられる。一方で 0.4 N/m^2 以下のせん断応力でも底質は巻き上げられており浮泥によるものと考えられる。懸濁物質の輸送の数値シミュレーションは、粒径区分毎の追跡が必要となるが、現地巻き上げ調査では粒径毎の巻き上げ特性を示すことは出来ないため、計算では巻き上げについては粒径を考慮せず(3)式を用いた。但し、懸濁物質が河川から流出し海底面に堆積するまでの間については、粒度組成を考慮し粒径毎の凝集・沈降特性を用いた計算を行った。図-4に示す石狩川から洪水時に流出する懸濁物質の粒度分布を参考に、表-1に示す粒径区分を行った。なお、石狩川の懸濁物質はその90%が粘土・シルトで、細砂は約10%である。初期条件として与える海底面の堆積土砂分布は、石狩川から1年間に流出した懸濁物質の収支を考えるために初期の堆積量をなしとしたケースA、及び既に堆積している底質も含めた収支を検討するために図-5に示した泥の堆積域を初期値として与えたケースBの2ケースとした。

4. モデルの再現性の検証

計算について、河川から流出する懸濁物質の沈降量及び巻き上げ時の海水中の濁質濃度の再現性を検証した。St.A, St.Bで実施したセディメントトラップ調査結果と沈降量の計算結果を図-6に示した。計算結果は、粒径区分毎に計算した沈降量(粒径毎の懸濁物質の流出量は河川の総流出量と同じとして計算)、及び粒度区分毎の比率を考慮して計算した沈降量を示した。沈降速度の違いから粒径毎に沈降域に違いが生じ、St.Aに最も到達する粒径は $20 \sim 40 \mu\text{m}$ であるが、St.Bでは $5 \sim 10 \mu\text{m}$ と粒径が細くなる。また、粒径が $80 \mu\text{m}$ 以上になるとほとんどSt.Bまで到達しない。計算結果をみると粒

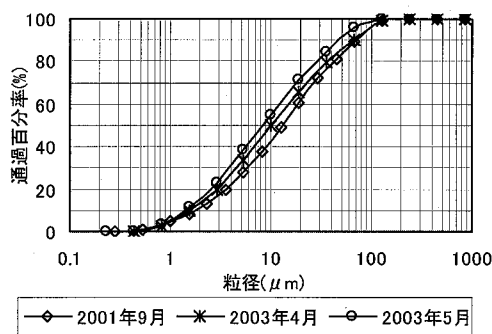


図-4 石狩川の懸濁物質の粒度分布

表-1 粒度区分

凝集前の粒径 μm	凝集後の沈降速度 mm/s	構成比 %
~ 1.25	0.015	10
1.25 $\sim$ 2.5	0.027	10
2.5 $\sim$ 5	0.047	15
5 $\sim$ 10	0.083	15
10 $\sim$ 20	0.146	15
20 $\sim$ 40	0.258	15
40 $\sim$ 80	0.455	10
80 $\sim$	0.804	10

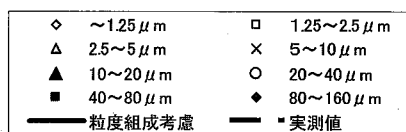
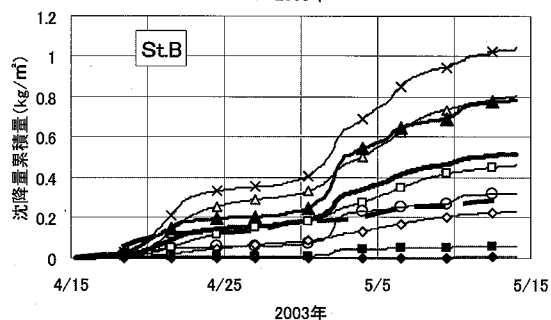
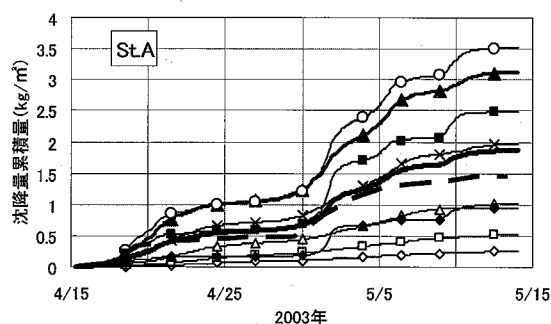


図-6 沈降量の実績値及び計算結果

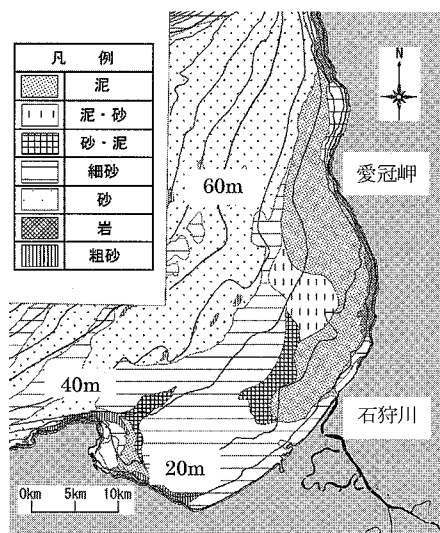


図-5 石狩湾の底質図 (海上保安庁水路部, 1980)

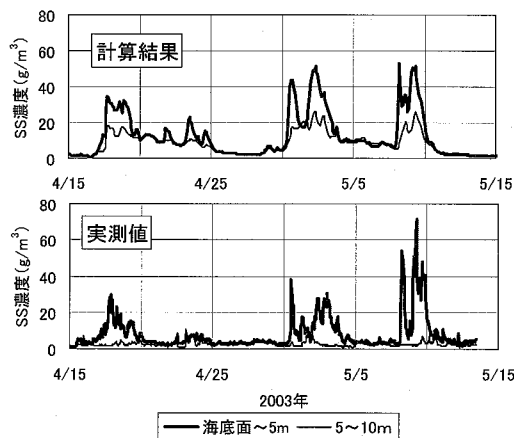


図-7 海水中の濁質濃度の計算結果及び実測値

度を考慮した値が実測に近く、これに対し代表的な値を用いた場合には堆積域の計算結果に誤差が生じると考えられる。次に、図-7に底質の巻き上げ量の実測値と計算値を示したが、濁質濃度が高い海底に近い層での値について再現性が確保されていることがわかる。このように、今回用いた計算モデルによって石狩湾内の流動、懸濁物質、濁質の移動がある程度再現ができるものと判断した。

5. 土砂移動特性と土砂収支

(1) 石狩湾奥部の底質の移動特性

図-8に2002年のSt. Aにおける主要な月の月平均、鉛直平均の流向・流速及び懸濁物質の通過量の実測値を示す。10, 11, 1月には懸濁物質の移動が顕著であるが、季節風の影響によって底質が巻き上げられこの期間に卓

越する流れにより南西～西北西方向に移動しているためである。1月については、流向と懸濁物質の移動方向にずれが生じているが、これは、流向・流速が鉛直方向に変化しており、一方で濁質濃度も下層が高く均一ではないため、流向と懸濁物質の移動方向が正確には一致しないためである。4月～9月の間には流速は比較的大きい時期もあるが、底質の巻き上げ量が少なく移動量は冬季に比べると少ない。図-5に示したとおり、石狩湾内では、粒径の細かなシルト、粘土は石狩湾東岸沿いに堆積しているが、これは洪水時にはコリオリ力によって河川水の流れが東岸よりに曲げられ、懸濁物質が沈降した結果と考えられる。図-9に底質の移動が顕著であった11月の1月間の底質の移動量の計算結果（ケースB）を示す。計算結果をみると、水深が小さな沿岸沿いで底質が巻き上げられ、沖方向に移動していることがわかる。水

深の浅い領域では海底面に作用するせん断力が大きく粒径の細かな土砂は頻繁に巻き上げられ流出するため、結局粒径の粗い土砂が残ると考えられ、今回の計算に用いた巻上げ特性は水深の浅い領域では大きめに見積もられていると考えられる。沖に向かうと徐々に水深が増すため、海底面に作用するせん断力が低下し、徐々に堆積傾向が現れる結果となっている。St.A では、実測データから考えると南西方向に底質が移動していると考えられるが、計算では、St.A では沖方向の西方向に移動しており、計算での流動計算の精度が不十分であることが原因と考えられる。石狩川河口の西側の小樽付近の粘土・シルト等の堆積域は、主として冬季間の流動により移動し堆積したものと考えられる。

(2) 石狩湾の土砂収支

大島ら (1978) によれば、石狩湾の水深が 40 m 以下の領域 (図-5 参照) には、石狩川から流出した粒径の細かな懸濁物質が堆積し、水深 40 m 以深には現世堆積物が殆ど堆積していないことが確認されている。シルト・粘土などについては沈降速度が低く外海へ流出することが考えられる。100 μm 程度の細砂に関して、水深 40 m 程度が底質の移動限界となるか検討してみた。水深 40 m が表層移動限界水深 (表層の砂が波の方向に集団で輸送される限界の水深) (佐藤ら, 1962) と仮定しそのときの粒径を計算した結果では、巻き上げ調査を実施した 2001 年 11 月の最大波高 4 m 程度では粒径 100 μm の粒子の移動限界とはならず、従って河口周辺に堆積した底質が短い時間で沖に流出することはないと考えられる。ケース A で 2002 年に石狩川から流出した土砂の収支を計算した結果を図-10 に示す。河川から流出した懸濁物質は $0.9 \times 10^8 \text{ kg}$ に達するが、水深 40 m より沖に流出した懸濁物質は約 $0.5 \times 10^8 \text{ kg}$ で、残りの土砂は海底面に堆積、若しくは水中に懸濁して存在している。また、冬期の 1 月～3 月, 11, 12 月の沖合いへの流出量が増加していることがわかる。図-11 に懸濁物質が堆積

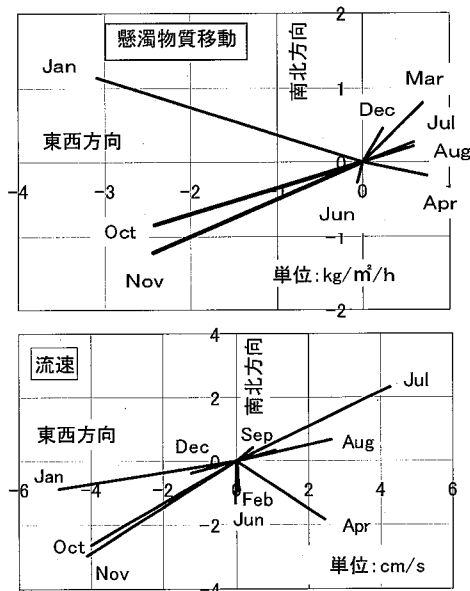


図-8 実測の2002年月平均流速・濁質輸送量

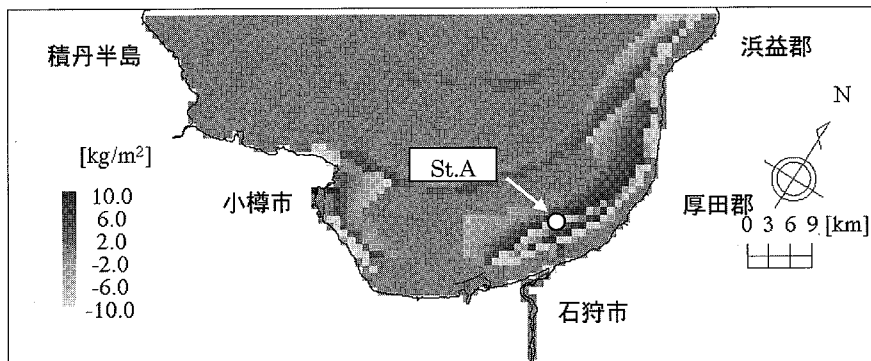


図-9 11月 1月間の底質の堆積量の変化 (ケースB)

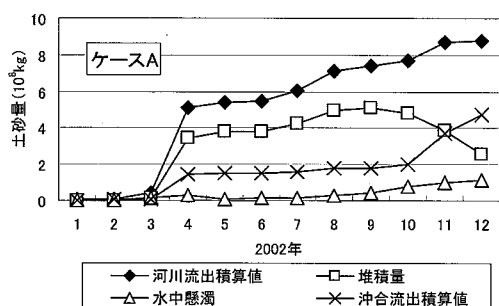


図-10 2002年に石狩川から流出した懸濁物質の収支

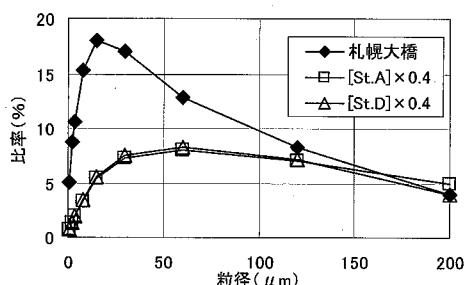


図-11 石狩川の懸濁物質と石狩湾の底質の粒度比較

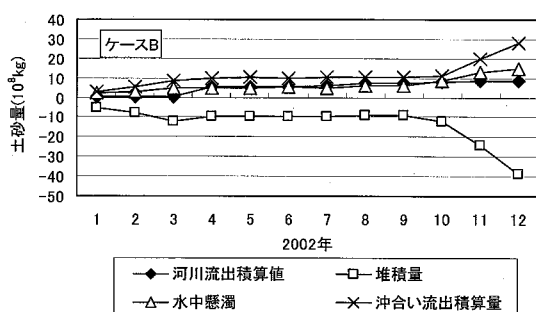


図-12 既に堆積している底質を加えた懸濁物質の収支

している St.A, St.D の表層付近で採取した底質と石狩川の洪水時に採取した懸濁物質の粒度組成の関係を整理した。St.A, St.D では $100\mu\text{m}$ 以上の成分が流出せず保存されていると仮定すると、河川の懸濁物質と海域の底質の $100\mu\text{m}$ 以上の組成比率をほぼ一致させるためには、底質の割合を約 40% 程度に除する必要がある、残りの約 60% に相当するシルト、粘土等の細粒成分は底質中から流出することになる。この結果はケース A の土砂収支計算結果とほぼ一致しており、相当量の細粒成分が沖に流出するものと考えられる。次に、既に堆積している底質も含めた懸濁物質の収支はケース B により計算されるが、図-12 に示すように年間で約 $3 \times 10^8 \text{ kg}$ の土砂が水深 40 m より沖合いに流出する計算結果となった。2002 年は石狩川から流出する浮遊砂量は $0.9 \times 10^8 \text{ kg}$

程度で沿岸に近い水深の浅い領域の底質の巻き上げ量がやや大きめに計算されているため沖合いに流出する量が大きめに計算されていると考えられるが、2002 年の収支は概ねこの程度であると考えられる。石狩川からの懸濁物質の流出量は過去 50 年間の平均では年間約 $2 \times 10^8 \text{ kg}$ 程度と推定され(山崎ら, 2004), 2002 年の流出土砂量はやや少ないと考えられるが、長期的な収支に関しては他の年の収支を検討する必要がある今後の検討課題と考えられる。

6. おわりに

石狩湾における土砂移動特性、土砂収支について、以下のことが明らかとなった。

- (1) 石狩湾では、融雪出水等によって湾の東岸沿いに懸濁物質が堆積するが、冬季間には波浪によって底質が巻き上げられ、南西～西北西方向の小樽方向に土砂が移動していると考えられる。
- (2) 2002 年に石狩川から流出した約 $0.9 \times 10^8 \text{ kg}$ の懸濁物質の約 60% は海水中に懸濁し若しくは沖に流出しており、湾内に堆積した底質も加えると年間では約 $3 \times 10^8 \text{ kg}$ の土砂が沖に流出していると考えられる。

参考文献

- 楠田哲也, 山西博幸, 川添正寿, 二渡了(1988): 波による底泥の浮遊及び挙動に関する研究, 海岸工学講演会論文集, 第 35 巻, pp. 352-356.
- 大島和雄, 横田節哉(1978): 北海道石狩湾の堆積物, 地質調査所月報, 第 29 巻, 第 8 号, pp. 501-529.
- 海上保安庁水路部(1980): 5 万分の 1 沿岸の海基本図海底地形地質調査報告書 小樽, 及び雄冬岬.
- 加藤茂・山下隆男・路明(1999): 3 次元広域海浜流数值モデルの適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 211-215.
- 佐藤昭二, 田中則男(1962): 水平床における波による砂移動, 第 9 海岸工学講演会論文集, pp. 95-100.
- 杉原裕司・津守博通・大賀崇史・吉岡洋・芹澤重厚(2004): 風波とうねりが混在する波浪場の海面抵抗則に関する研究, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 66-70.
- 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 No. 467/ II -23, pp. 93-102.
- 山崎真一・森田真郷・山下俊彦(2003): 河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集・沈降特性, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 961-965.
- 山崎真一・山下俊彦(2004): 長期の石狩川の浮遊砂の流砂量と沿岸海域の底質堆積特性, (独) 北海道開発土木研究所月報, NO. 617, pp. 2-16.
- 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, pp. 676-680.
- Taguchi, K., K. Nakata and T. Ichikawa(1999): A 3-D Simulation of Long-term Variability in the Flow Field and T-S Structure in the Ise-Mikawa Bay estuary, J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soc. Vol. 5, No. 1&2, pp. 37-48.