

波・流れ共存場での砂漣上の漂砂現象に対する 離散渦法による数値シミュレーション

三 鼓 晃*・小林智尚**・磯部雅彦***・渡辺 晃****

1. 緒 言

海浜域に多目的な利用が求められている現在、海浜変形予測手法の確立はこの海浜域の開発・保全などの面からもきわめて重要な課題である。そしてそれも波動のみの場だけではなく、実海岸のより複雑な条件にあった波・流れ共存場を対象とした予測手法の早急な確立に目が向けられているのが現状である。このような複雑な海浜変形予測手法を確立するにあたっては、特に波・流れ共存場での砂漣上の境界層特性や底質の移動機構の解明が重要な要素となることが従来より指摘されている。

波動場あるいは振動流場での砂漣上境界層に関しては、桢山・三村・渡辺(1981)や浜本・三村・渡辺(1982)による砂漣上の流速場に関する一連の実験的研究、あるいは画像変換を用いた佐藤・三村・渡辺(1983)や $k-\epsilon$ モデルによる佐藤・上原・渡辺(1985)や澤川・金・五ノ谷(1989)などの数値解析を用いた研究などにより、その特性は次第に明らかにされつつある。これに対し、波・流れ共存場における数漣上境界層については実験と Cloud-in-cell 法による数値解析とを併用したイスマイル・首藤(1985)による研究が行われている程度であり、その境界層特性については解明すべき点が多く残されている。

一方、砂漣上における岸沖漂砂量の算定に関しては、振動流を対象とした Madsen and Grant (1976)をはじめ、浮遊砂の質量輸送に着目した Nielsen, Svendsen and Staub (1978), あるいは個々の砂粒子の挙動に着目した早川ら(1987), 辻本ら(1989)による研究などが行われている。しかし、波・流れ共存場において、砂漣上の net の漂砂量を理論的に算定した研究は著者らの知る限り見あたらない。

こうした現状をふまえ、本研究ではまず数値解析による波・流れ共存場での砂漣上の境界層内の流れの解析を行い、さらに個々の砂粒子の挙動を解析することによ

り、最終的に砂漣上における浮遊砂濃度分布・net の漂砂量の算定を試みた。砂漣上境界層特性の解析にあたっては数値流体解析モデルとして比較的容易に渦度場を表現しうる2次元の離散渦法を用いた。また、砂粒子の挙動の解析では、pick-up rate の概念を導入して底質の移動開始量を評価し、さらに移動を開始した底質についてはその時間的移動状況を個々の砂粒子について Lagrange 的に追跡した。

2. 砂漣上振動流の数値解析

(1) 数値解析モデルと境界条件

本研究で対象としている砂漣上の振動流境界層のように渦度が集中した領域で用いられる数値流体解析モデルとして、渦度の連続的な分布を無数の渦点の離散的な分布で表現する離散渦法はとくに有効なモデルである。この離散渦法は他の流体モデルに較べて比較的容易に流れ場をシミュレートできるばかりではなく、個々の渦点の運動を Lagrange 的に追跡できる点からも、対象とした渦度場の特性の解明には有効である。

個々の渦点は底面で発生した後、流体中を移動しながら、循環の減衰や接近した渦点同士での合体を行い、最後には拡散・消滅する。モデル中での循環の減衰は実在流体のもつ粘性や乱流混合による効果を示しており、本研究で用いたモデルでは、Kiya and Arie (1980) にしたがって、次式に示されるような時間的に減衰させる方法を採用している。

$$\frac{\Gamma(t)}{\Gamma_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma^2}{4\nu t}\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 σ : 渦点の渦核半径、 ν : 水の動粘性係数、 t : 渦点発生からの経過時間、 Γ_0 : 渦点発生時の循環、 $\Gamma(t)$: 発生から t 時間経過後の渦点の循環、を示す。

底面の境界すなわち砂漣表面でもすべて渦点を用いて条件を満足している。すなわち、まず砂漣表面に無数の渦点(束縛渦)を配置し、流線がこの砂漣表面と一致するように個々の束縛渦の循環を決定する。つぎに砂漣表面からごくわずかな上方の位置に無数の新たな渦点を配置し、砂漣表面での接線方向誘導速度がゼロとなるように

* 正会員 工修 関西電力(株)

** 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

**** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

表-1 砂漣上境界層流れの計算条件

主流条件	周期	T	4.0s
	全振幅	d_0	36.0cm
砂漣条件	砂漣波長	λ	12.0cm
	砂漣波高	η	2.0cm
	非対称比	$\lambda_1:\lambda_2$	1:1.5

個々の新たな渦点を持つ循環を決定する。これらの操作を各時間ステップごとに行い、砂漣表面では non-slip の境界条件を満足させている。そして、砂漣表面からごくわずかに上方に配置されたこれらの新たな渦点は、その時間ステップに底面で生成された渦点として流れ場に放出される。

つぎに、岸沖方向の境界条件について述べる。ここでは、砂漣形状が岸沖方向に周期的であり、したがって砂漣境界層内の流れも砂漣長を 1 周期とする周期的現象となると考える。よってこの方向の境界条件には周期境界条件が適用でき、数値モデル上、1 砂漣長間の流れ場についてのみの解析で砂漣上境界層内の流れが再現可能となる。

(2) 解析結果

本モデルによる数値計算は表-1の条件下で行った。ただし、主流としての振動流は次式で表わされる 3 次の Stokes 波の流速波形をもつ非対称振動流である。

$$u = U_0(\cos \omega t + \alpha_1 \cos 2\omega t + \alpha_2 \cos 3\omega t) \cdots \cdots (2)$$

$$(U_0 = -29.5[\text{cm/s}], \alpha_1 = 0.258, \alpha_2 = 0.048)$$

また、砂漣非対称比に用いられている λ_1 , λ_2 はそれぞれ砂漣の沖側と岸側の斜面の水平長を示している。これらの計算条件は Sato, Shimosako and Watanabe (1987) によって行われた砂漣上流速分布測定実験と同一の条件である。

本数値モデルを用いた解析結果を図-1に示す。また、同一条件の下で行われた Sato *et al.* (1987) の実験結果の一部を図-2に示す。図-1の砂漣上振動流の解析結果を見ると、冲向流速加速初期 ($3\pi/10$) では砂漣頂部で生成された大規模な剝離渦の発達の様子を捉えられている。この様子は図-2でも見られ、その剝離渦の位置・規模とも一致している。また、冲向流速加速後期 ($7\pi/10$) では砂漣頂部での先走り現象が観察できる。そして岸側最大流速期 ($15\pi/10$) には岸側斜面上での先走り現象も見られる。さらにこの位相では、渦点の分布の様子から特に沖側斜面上では強い乱れが発生していることがわかった。図-1と図-2との比較から砂漣上振動流境界層の流れは離散渦法を用いた本流体解析モデルで十分表現しうることがわかる。

この結果をふまえ、次にこの流体解析モデルを用いて波・流れ共存場における砂漣上の漂砂量算定を試みる。

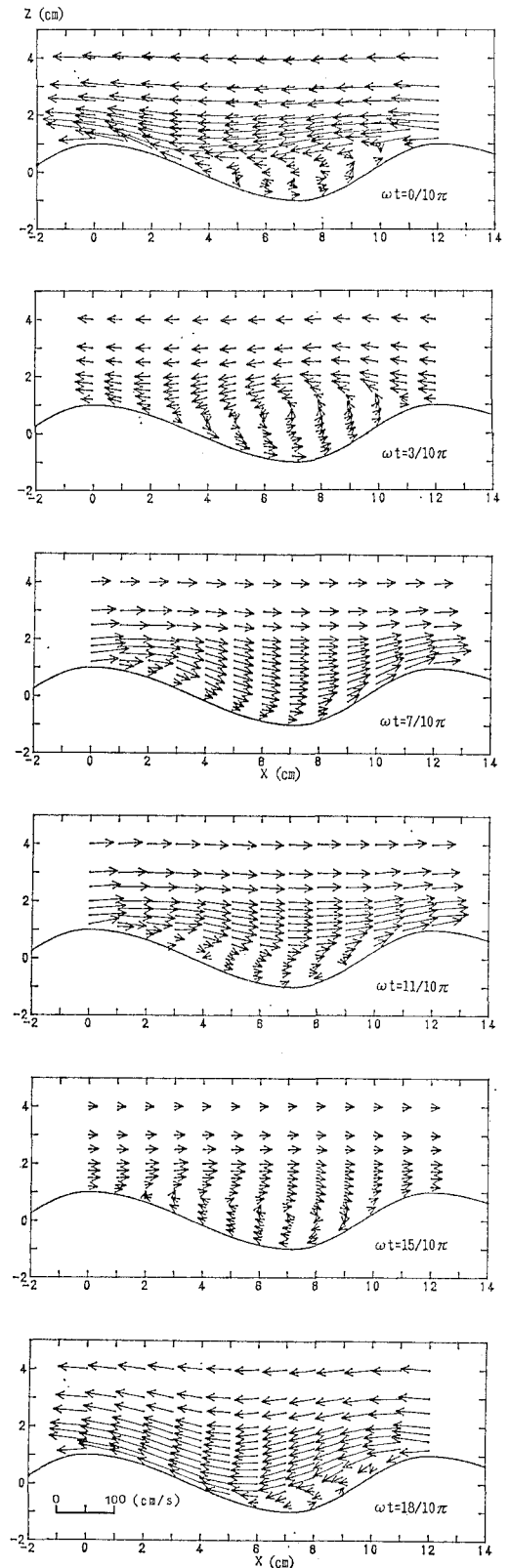


図-1 流速場の数値解析結果

3. 砂漣上漂砂量の数値解析法

波・流れ共存場における砂漣上の現象を表現するため、流体運動については先に示した離散渦法による流体解析モデルを用い、また、砂粒子の運動については底質砂の移動開始条件と浮遊砂移動状況との2つに分け、以下に述べる方法で漂砂現象をモデル化し、評価を行う。

(1) 底質砂移動開始の評価

底質砂の移動開始の判断には、van Rijn (1984) によって示される sediment pick-up function の概念を用いて評価を行った。ここで、pick-up rate を見積るに当たり、まず底面ごく近傍での流速分布が

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (3)$$

(u : 底面から鉛直方向 z [cm] の流速, u_* : 底面摩擦速

度, κ : Karman 定数 ($=0.4$), z_0 : 流速が0となる鉛直位置 ($=0.033 k_s$), k_s : 粗度係数 ($=2D_{50}$)) で表わされる対数則に従うと仮定する。

pick-up rate Φ_p は van Rijn (1984) により、詳細な実験結果をもとに提案された

$$\Phi_p = 0.00033 \cdot D_*^{0.3} \cdot T_*^{1.5} \quad (4)$$

を用いる。 D_* , T_* はそれぞれ、無次元の particle parameter と transport-stage parameter で

$$D_* = D_{50} \left[\frac{sg}{\nu} \right]^{1/3} \quad (5)$$

$$T_* = \frac{u_{*cr}^2 - u_*^2}{u_*^2} \quad (6)$$

と表わされる。ここで、 D_{50} : 底質平均粒径, $s(=(\rho_s - \rho)/\rho)$, ρ_s : 底質密度, ρ : 水の密度, g : 重力加速度, u_{*cr} : 移動限界摩擦速度 ($=\sqrt{sgD_{50}\Psi_c}$), Ψ_c : 移動限界シールド数, である。移動限界シールド数 Ψ_c は渡辺 (1979) にしたがう、底質粒径 d と境界層厚さの尺度 $\delta_L(=\sqrt{\nu T/\pi})$ の比による表-2 の値を用いた。

表-2 限界シールド数

	分類条件	Ψ_c
細砂	$d/\delta_L < 1/6.5$	0.11
粗砂	$d/\delta_L > 1/4.0$	0.06

(2) 浮遊砂移動のモデル化

移動を開始した砂粒子の運動は、底面に達するまで、個々の砂粒子について Lagrange 的に解析を行った。流速場の解析に用いた離散渦モデルが個々の渦点を Lagrange 的にあつかうので、この流体解析モデルの特徴を利用して、浮遊した砂粒子も循環を持たない渦点と考えて解析を進めている。ただし、砂粒子の誘導速度算定にあたっては、水との相対密度により生ずる沈降速度の項を新たに加えている。砂漣上振動境界層内では乱れが強いため、静止流体中の砂粒子の沈降速度をそのまま適用することはできない。本研究では、関根・吉川 (1987) にならい、境界層内での沈降速度 w_p を以下のように見積った。

$$w_p = A \cdot B \cdot w_s \quad (7)$$

ここに、 w_s : 静止流体中での沈降速度, A : 鉛直振動流による沈降速度の低下の割合, B : 水平振動流による沈降速度の低下の割合, を表す。本研究では $A=0.7$, $B=A/2$ として解析を行った。

4. 砂粒子移動の解析結果

(1) 砂粒子の運動

以上で述べた数値モデルを用いて漂砂量の算定を行った。算定を行ったケースの一部についてその計算条件と算定結果の漂砂量を表-3 に、また、そのときの浮遊砂

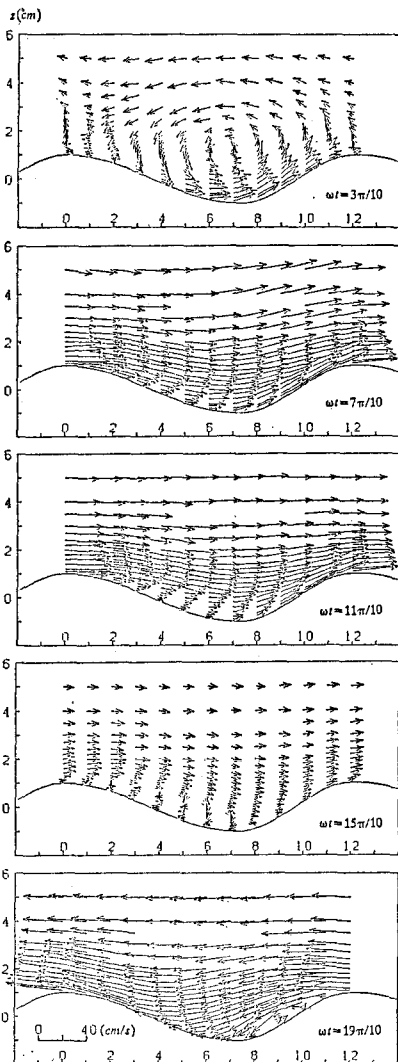


図-2 流速分布の実験測定結果 (Sato et al., 1987)

表-3 漂砂量算定結果

$\frac{u_c}{u_r}$	T [s]	u_c [cm/s]	U [cm/s]	λ [cm]	η [cm]	$\frac{\lambda_2}{\lambda}$	q [cm ² /s]
0.5	3	54.0	25.2	11.2	1.3	0.41	40.8
0.6	3	86.0	14.6	17.6	1.4	0.47	61.2

の挙動を図-3に示す。表中 u_r , u_c , U , λ , η は、それぞれ主流流速振幅、主流正方向流速振幅、主流定常流速、砂漣波長、砂漣波高を示しており（渡辺・先灘・磯部, 1989）, q は数値解析によって得られた net の漂砂量である。 $u_c/u_r=0.5$ のケースすなわち正弦振動流下でのケースは岸向流速の流れが大きい場合で、岸側方向の最大流速付近までに移動を開始した砂粒子が沖側方向流速時に砂漣頂部上方を浮遊砂雲となって沖側へ移動する様子がよく現われている。また、 $u_c/u_r=0.6$ のケースすなわち非対称振動流下でのケースでは、岸側方向の定常流成分が加わっており、かなりの高濃度の浮遊砂雲が生じている。

(2) 漂砂量算定結果、および実験結果との比較

この数値解析モデルを用いて、主流の振動流振幅、振動波形、定常流速などを様々に変化させてそれぞれのケースでの漂砂量を算定した。そして、これらの解析結果を同条件の下で行われた渡辺ら（1989）による実験結果と比較した。その結果を図-4に示す。主流の振動流の非対称性や定常流速により、砂漣上の漂砂量が図-4の実験値に示されるように変化することが渡辺ら（1989）の実験的研究により報告されている。この図で本研究の

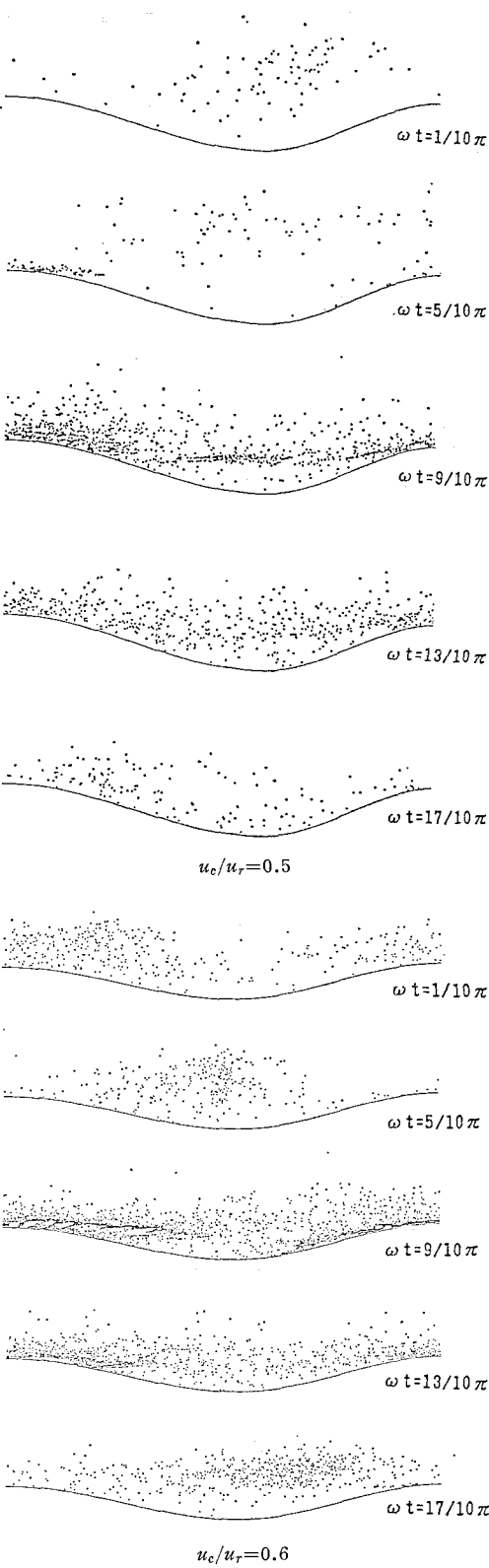


図-3 漂砂量分布の様子

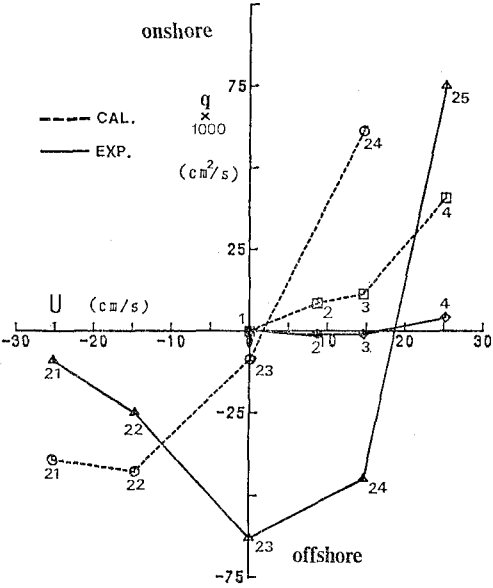


図-4 漂砂量と流れの諸元の関係

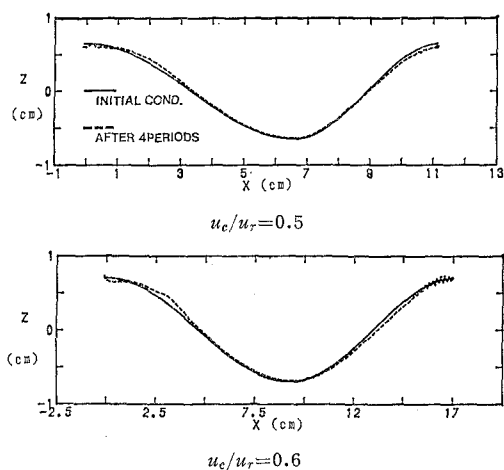


図-5 砂漣形状の変化

数値解析結果をその実験値と比較すると、数値解析により得られた漂砂量は定量的には異なるものの、漂砂の方向性など定性的には実験で得られた傾向を再現している。図-3をはじめとする様々なケースでの砂移動形態を参照すると、図-4に示される漂砂移動形態の傾向は、主流部の成分だけではなく、砂漣形状、特に砂漣波長・波高比にもかなり影響することが見出せた。

(3) 砂漣形状変化への適用

本研究の漂砂量算定モデルを用いて、さらに砂漣形状の変化の様子のシミュレーションを試みた。先に述べた砂粒子の運動の数値解析から算出される砂漣表面での砂粒子量の収支をもとに、地形変化の時間変化の予測を行った。ここでは、表-3に示される図-3と同一の計算条件の下での砂漣形状変化の解析を行っている。4周期後の砂漣地形変化の計算結果を図-5に示す。正弦振動流($u_c/u_r=0.5$)下でのケースでは、砂漣がほぼその形状を保存したまま岸向きに移動している。しかし、非対称振動流($u_c/u_r=0.6$)下では、同様の砂漣の岸方向移動が見られるものの、砂漣頂部では数値解析上の不安定が生じている。これは、砂漣頂部において砂粒子の運動が特に激しく解析上誤差が現われやすいために、この地点で数値誤差による不安定が顕著に現われたものと考えられる。この数値解析による砂漣形状変化予測結果は本研究で用いた数値解析モデルの適用の可能性を示すものの、実用的解析に向けてさらにモデルの改良を進める必要性を示唆している。

5. 結 語

波・流れ共存場における砂漣上境界層内の流れを2次元の離散渦法を用いて数値解析を行い、さらに pick-up function の概念を導入して漂砂量の算定を試みた。離散渦法による砂漣上境界層内の流れの数値解析では、砂漣

頂部からの大規模な剥離渦などの流体现象が捉えられており、その解析結果は、同一条件のもとで行われた実験結果とよい一致を示した。これはこの数値流体解析モデルの妥当性を示している。この流体解析モデルを基礎にさらに pick-up function の概念を用いた漂砂モデルを適用し、様々な条件の波・流れ共存場のもとでの砂漣上の漂砂量の算定を行った。実験値との比較の結果、本数値解析モデルにより、漂砂量と主流である波や流れの諸元との関係はその傾向を定性的にはよく再現できることが確かめられた。今後、定量的に漂砂量の算定が可能となるようモデルの改良を進めたい。

最後に、本研究は文部省科学研究費による研究成果の一部であることを記し、謝意を表わす。

参 考 文 献

- イスマイル アイディン・首藤伸夫 (1985): 波と流れによる砂漣上の流況, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 278~282.
- 佐藤慎司・三村信男・渡辺 晃 (1983): 砂漣上の振動流境界層に関する研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 189~193.
- 佐藤慎司・上原啓史・渡辺 晃 (1985): 乱流モデルによる砂漣上の振動流境界層の数値シミュレーション, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 26~30.
- 関根正人・吉川秀夫 (1987): 脈動流中の粒子の沈降特性に関する研究, 土木学会論文集, 第387号/II-8, pp. 209~218.
- 滝川 清・金 南亨・五ノ谷清一 (1989): 波動場における任意海底面上の境界層の解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 11~15.
- 辻本剛三・市山 誠・早川典生・福嶋祐介・中村由行 (1989): 乱流モデルによる砂漣上の浮遊砂濃度と浮遊砂輸送機構, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 284~288.
- 浜本健一・三村信男・渡辺 晃 (1982): 砂漣上の振動流境界層に関する実験的研究(2), 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 189~193.
- 早川典生・辻本剛三・涌井正樹・早川典生・福嶋祐介・中村由行 (1987): 砂漣を形成する海底上の岸沖漂砂量の理論的検討, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 237~241.
- 渡辺 晃 (1979): 振動流境界層と海浜過程, 第15回水工学研究学会講義集, pp. B-3-1~B-3-13.
- 渡辺 晃・先灘正成・磯部雅彦 (1989): 波・流れ共存場における砂漣形状と漂砂量, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 419~423.
- Kiwa, M. and M. Arie (1980): Discrete-vortex-simulation of unsteady separated flow behind a nearly normal plate, JSME, Vol. 23, No. 183, pp. 1451~1458.
- Lyne, W. H. (1970): Unsteady viscous flow over a wavy wall, J. Fluid Mech., Vol. 50, part 1, pp. 33~48.
- Madsen, O. S. and W. D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1093~1112.
- Nielsen, P., I. A. Svendsen, and C. Staub (1978): Onshore-offshore sediment movement on a beach, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1475~1492.
- Sato, S., K. Simosako and A. Watanabe (1987): Measurements of oscillatory turbulent boundary layer flow above ripples with a Laser-Doppler Velocimeter, Coastal Engineering in Japan, Vol. 30, No. 1, pp. 89~98.
- van Rijn, L. C. (1984): Sediment pick-up functions, Jour. Hydraulic Eng., Vol. 110, No. 10, pp. 1494~1503.