

波打ち帯での岸沖漂砂量と地形変形

佐藤 充弘*・服部 昌太郎**

1. 本研究の目的

海浜地形変化を予測するには、地形変化が活発で汀線変動に影響をおよぼす、波打ち帯での岸沖方向底質輸送の定量評価が重要となる。このため、海浜面が常に水面下にある汀線より沖側の領域に対して開発された海浜変形予測モデルを、波打ち帯に拡張適用することが試みられている (例えば、Dibajnia ら, 1992; 佐藤・Kabiling, 1994)。しかし、波打ち帯での複雑な遡上波動場と底質移動のため、地形変形を十分な精度で予測するまでには至っていない。この一原因として、汀線沖側から波打ち帯で局所的・間欠的に発生する浮遊底質の移動挙動が考えられ、その時空間的変動の効果がモデルに組み込まれていないことが挙げられる。

本研究は、二次元移動床実験による波打ち帯での水面波形と縦断地形変形の測定結果から遡上波下の断面平均流速を算定し、佐藤・Kabiling の海浜変形モデル (以後、S・K モデルと略記) にシールズ数による浮遊底質発生 の判定を組み込んだ改良を行い、侵食性と堆積性海浜に対して改良モデルの適合性を検討する。

2. 実験装置と測定方法

ピストン式造波装置を備えた両面ガラス張り二次元波動水槽 (22m×0.4m×0.6m) 内の 1/10 勾配固定斜面上に、自然砂 ($d_{50}=0.2$ mm, 比重 $s=2.7$, 沈降速度 $w_0=2.86$ cm/s) を用いて形成した一様勾配模型海浜 (初期勾配 $\tan \beta_0=1/7$ と $1/15$) に、規則波を入射させて実験を行った。座標原点は静水汀線とし水平岸向き、鉛直上向きを正とする。実験装置の概略を図-1 に示す。

実験条件 (表-1) は、造波機性能とビデオ静止画像上の測定限界を考慮し、Sunamura・Horikawa (1974) の C 値に基づいて侵食性と堆積性海浜が出現するように決定した。

移動床実験から、波打ち帯での底質輸送量を評価するには、波動場の内部流速を精度良く測定する必要がある。しかし、波打ち帯の流体運動場は薄層流であるため、通

常の計器測定は極めて困難である。そこで、波打ち帯全域と静水汀線から最大遡上位置を撮影範囲とする、水槽側面に設置した 2 台のデジタルビデオカメラ (SONY 製: 30 コマ/s, シャッター速度 1/6000 s) で、磯浜帯から波打ち帯での水面と縦断地形の時空間変化を同時撮影し、その同期静止画像から時空間格子間隔 $\Delta t=1/30$ s と $\Delta x=0.5$ cm で水面と地形変動を測読した。

入射波高は、一様水深部 ($h_i=0.30$ m) に設置した 3 台の分圧式波高計アレーの検出データを、水口 (1991) の SLSM 法により入射波を分離して算出した。

実験開始直後の波打ち帯の地形変形は激しく、入射波特性は一波ごとに大きく変化する。このような波動場での断面平均流速と漂砂量等を精度良く測定・算定することは非常に困難である。本研究では、地形変形が比較的緩やかで、波打ち帯波動場がほぼ安定化したと認められる時点での計測データを解析の対象とした。計測時点での海浜地形の状況を、表-2 に示す。

水面の時空間変動データとして、最大打上げ時を基準として安定した連続入射波 5 波の位相平均波形を用いた。また、流速算定には水面波形の測定精度が大きく影響するため、位相平均波形に対して時空間的整合性を考

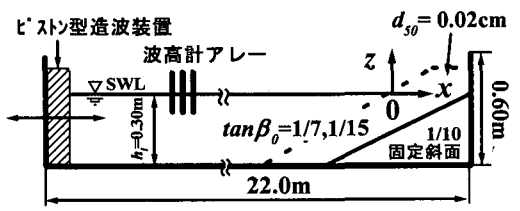


図-1 実験装置概略図

表-1 実験条件

実験	H_i (cm)	T (s)	ξ^*	$\tan \beta_0$	C	海浜地形
1	5.4	1.0	0.68	1/7	8.3	侵食性
2	2.5	1.0	0.36	1/15	3.4	侵食性
3	5.4	1.0	0.53	1/15	6.8	侵食性
4	2.5	1.3	0.77	1/15	2.6	堆積性

* 正会員 工修 大成建設(株)

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

* surf similarity parameter: $\xi_0 = \tan \beta_0 / (H_i/L_0)^{0.5}$

表一2 計測時点での海浜地形

実験	計測開始時間	ξ	静水汀線位置	$\tan \beta$
1	実験開始 60 分	1.34	20 cm 後退	1/4
2	同上	1.32	8 cm 後退	1/6
3	同上	0.90	13 cm 後退	1/6
4	実験開始 90 分	2.05	11 cm 前進	1/5

慮して平滑処理を施した。

3. 水面波形

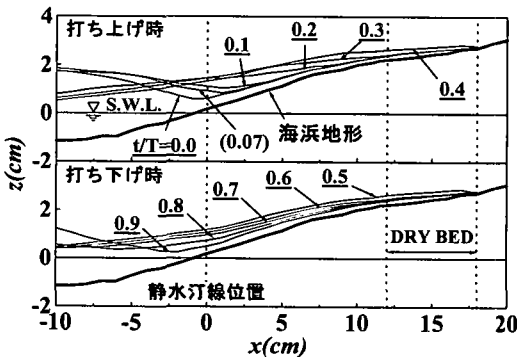
図一2 は、打上げ開始時を基準とした実験-3の空間波形を、入射波の打上げ時と打下げ時とに分けて $\Delta t/T = 0.1$ ごとに示したものである (x : 静水汀線位置を基準とした岸向き水平距離)。図中には、静水汀線位置, 最大遡上位置, 打下げ位置, および dry bed 領域が示されている。打上げ位相と比較して打下げ位相の継続時間が長く, また打上げ時の $t/T = 0 \sim 0.2$ で, 水面形が段波から遡上波への移行する bore-collapse の発生が認められる。打下げ時では, 打上げ時に比べて遡上域の水面が緩やかに低下する様子が捉えられている。このような遡上波の打上げと打下げ位相時の違いが, 波打ち帯での底質輸送に重要な影響をもたらす (有村ら, 1996)。

4. 内部流速場と底質輸送

波打ち帯波動場の断面平均内部流速は, 水面変動記録を用いて, 非線型長波の連続式 (1) から計算格子間隔 $\Delta t = 1/30$ s と $\Delta x = 0.5$ cm で算定した (内田・服部, 1998)。

$$U(x, t) = \frac{1}{h(x, t)} \frac{\partial}{\partial t} \int_x^L h(x, t) dx \dots\dots\dots (1)$$

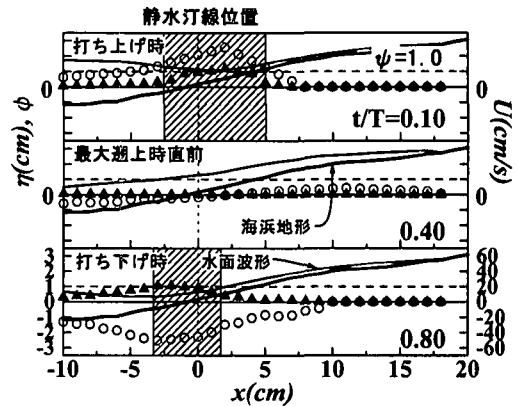
ここで, U : 断面平均流速, $h (= h_0 + \eta)$: 全水深, h_0 : 静水深, η : 静水面からの水面高, L : 地点 x から波先端までの距離である。



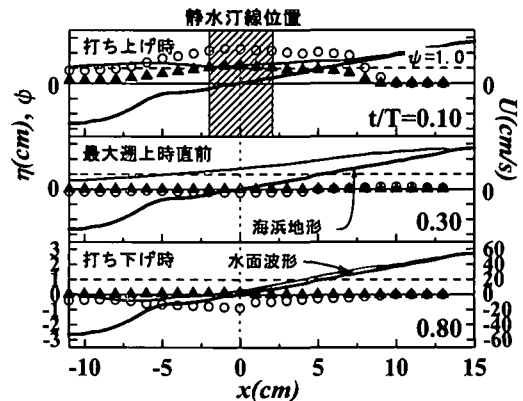
図一2 遡上波形の変化 (実験3 ; 侵食性海浜)

図一3 と 4 に, 実験 3 (侵食性海浜) と実験 4 (堆積性海浜) の縦断地形 (太実線), 水面形 η (細実線), 断面平均流速 U (○印) と, 底面摩擦係数 $f_w = 0.03$ (後出の図一7 から確認) としたシールズ数 $\psi (= f_w U^2 / 2(s-1)gd)$: ▲印) の空間分布を, 打上げ時, 最大遡上時直前及び打下げ時について示す。なお, 図中の斜線部分は, 浮遊底質の存在がビデオ静止画像から確認された領域を示し, $x=0$ は計測時点での静水汀線位置である。波打ち帯での, 掃流と浮遊の底質移動形態を明確に判定することは困難であるが, 底質の巻上げで海浜面境界が不鮮明となる区域を, 浮遊底質発生領域と判定した。

図一3 (実験 3) には, 海浜侵食を引き起こす打下げ流速の継続時間が長く, その最大流速が打上げ時を上回る流速場の特徴が捉えられている。この様な流速場により, 打下げ時にも底質の浮遊移動が静水汀線付近で発生し, 冲向きの底質移動が卓越する。この様な状況は, 後続遡上波の影響により, 汀線付近の水位が急激に下降し, 波打ち帯での引き波流速が増大することにより発生する。また実験結果には, 最大遡上時直前では, 平均汀線付近



図一3 η, U, ψ の空間分布 (実験3 ; 侵食性海浜)



図一4 η, U, ψ の空間分布 (実験4 ; 堆積性海浜)

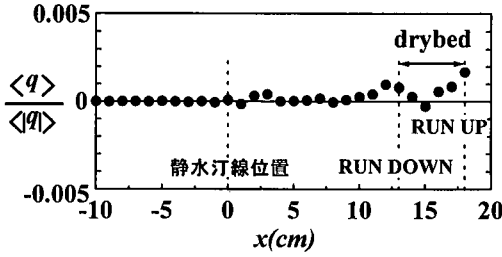


図-5 流量収支 (実験3; 侵食性海浜)

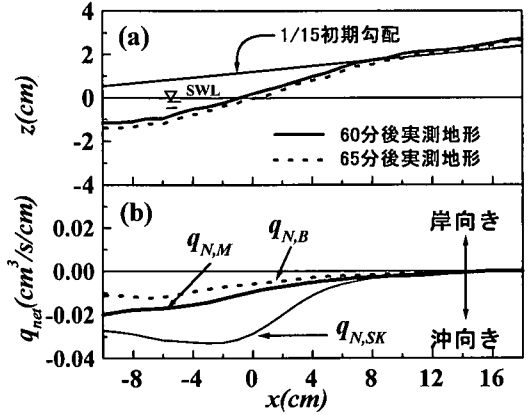


図-6 地形変化と岸沖漂砂量 (実験3; 侵食性海浜)

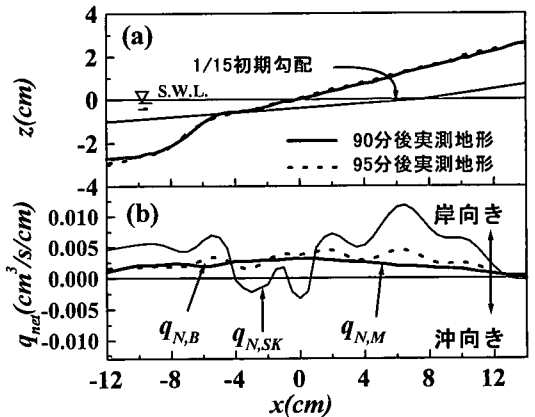


図-7 地形変化と岸沖漂砂量 (実験4; 堆積性海浜)

を境にして、岸側では岸向き、沖側は沖向きとなる波打ち帯の流れ場の特徴が認められる。

一方、step地形が形成される堆積性海浜の実験4 (図-4) では、最大流速は波打ち帯全域で打上げ時が上回り、打下げ位相の継続時間は長い、 U と ψ が非常に緩やかに変化する流速場が認められる。遡上波先端通過時に巻上げられ岸方向に輸送される底質量に比べ、打下げ時の沖向きの底質輸送が小さい、堆積性海浜の形成過程の特徴を捉えている。

流速の算定結果の妥当性は、一周期間の線流量収支により調べる。図-5 (実験3) は、net線流量 $\langle q \rangle$ と総線流量 $\langle |q| \rangle$ との比 $\langle q \rangle / \langle |q| \rangle$ の空間変化である。波打ち帯、特に dry bed 域では、up-rush時には海浜への浸透 $\langle q \rangle > 0$ 、down-rush時には海浜から浸透水の流出 $\langle q \rangle < 0$ が発生する。静水汀線より岸側の dry bed 上では浸透の影響と、遡上時間が短いため水深データ数の不足により、dry bed 域では流速の算定精度が若干低下する。しかし、流量収支差は、全ての実験に対して0.5%以下で、算定結果は連続条件を十分満たすことが確認された。

5. 波打ち帯の岸沖漂砂量

比較的緩やかに変化する5分間の縦断地形変化から、岸沖方向の net 漂砂量 $q_{N,M}$ を、底質量の連続式を差分化して計算した。

SKモデルでは、流速の時系列データから掃流砂量 $q_B(t)$ と浮遊砂量 $q_S(t)$ を、式(2)と(3)により個別に計算し、その和 ($q_B(t) + q_S(t)$) を全漂砂量とする、 $q_B(t)$ と $q_S(t)$ が時空間的に常に存在するとしたモデルである。なお、底質輸送方向は流速方向と同じとする。

$$\frac{q_B(t)}{[(s-1)gd^3]^{1/2}} = \alpha_B |\psi(t)|^{0.5} \max(\psi(t) - \psi_c) \frac{u_b(t)}{|u_b(t)|} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{q_S(t)}{u_0 d} = \alpha_S \max(\psi(t) - \psi_c) \frac{u_b(t)}{|u_b(t)|} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 d : 底質粒径、 s : 底質比重、 u_0 : 沈降速度、 α_B : 掃流砂量係数 (=1.0)、 α_S : 浮遊砂量係数 (=3.5)、 ψ_c : 限界シールズ数 (=0) である。なお、底面流速 $u_b(t)$ に

代えて、本研究では断面平均流速を用いる。

佐藤・Kabiling (1994) は、静水汀線より岸側での漂砂量は、静水汀線での漂砂量を最大遡上位置との間で線形配分して評価し、波打ち帯での流速場から漂砂量を計算していない。

図-6と7の(a)に実測縦断地形を、(b)にSKモデルによる算定 net 漂砂量 $q_{N,SK}$ (細実線) と地形変化から算出した実測 net 漂砂量 $q_{N,M}$ (太実線) に加えて、SKモデルで掃流砂量だけを考慮した場合の net 漂砂量 $q_{N,B}$ (破線) の岸沖分布を示す。図の横軸は静水汀線位置を基準とした岸向きを正とする岸沖距離、また縦軸 q_{net} は、岸向きを正、沖向きを負とする。

図-6と7に見られる様に、 $q_{N,SK}$ は $q_{N,M}$ と一致しない。侵食性海浜では汀線付近、また堆積性海浜では波打ち帯全域で浮遊底質による漂砂量が過大に評価されている。これは、局所的、間欠的に発生する浮遊砂輸送を、SKモデルでは全時空間域にわたり掃流砂輸送と共に、算定していることによる。

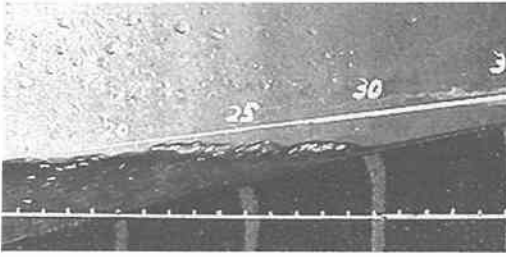


写真-1 打上げ時の静水汀線近傍での底質の浮遊

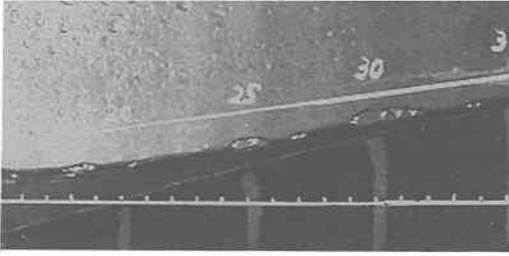


写真-2 打下げ時の引き波による底質の巻き上げ

6. 浮遊底質の発生領域

波打ち帯へSKモデルを適用するためには、一周期間での浮遊底質輸送が発生する期間と領域を正確に判定する必要があると考え、波打ち帯波動場との関連で浮遊底質の発生過程を、ビデオ静止画像と断面平均流速 U から算定したシールズ数 ψ (同位相での空間分布) とにより検討する。

写真-1と2は、図-3の $t/T=0.1$ と 0.8 における底質の浮遊状況を示したものである。図-3の浮遊砂が存在する領域を示す斜線部以外の領域では、浮遊砂は認められず、波打ち帯で底質の巻き上げ浮遊は局所的に発生し、図-3と4から底質の浮遊発生域はシールズ数が $\psi > 1$ である。浮遊砂の発生限界として、Sumerら (1996) は往復流水槽実験から $0.8 \leq \psi_{sc}$ 、また Fredsoe・Deigaard (1992) は $1.1 < \psi_{sc}$ を提案している。そこで、一周期間で底質の浮遊移動が発生・存続する時空間域の判定条件と

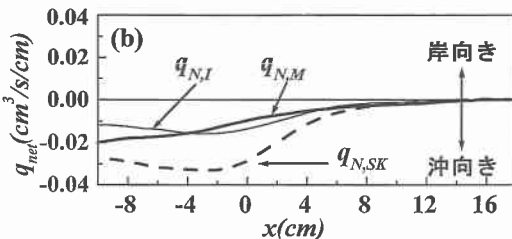


図-8 改良モデルの算定岸沖漂砂量 (実験3; 侵食性海浜)

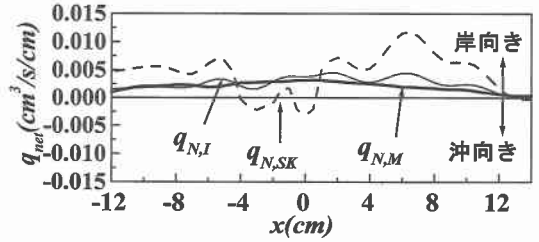


図-9 改良モデルの算定岸沖漂砂量 (実験4; 堆積性海浜)

して $1.0 \leq \psi_{sc}$ を採用し、SKモデルに組み込んだ改良モデルを提案する。

図-8と9に、改良モデルによる net 漂砂量 $q_{N,I}$ (細実線) とSKモデルで算定した $q_{N,SK}$ (破線) と地形変化から算定した net 漂砂量 $q_{N,M}$ (太実線) の比較を示す。

侵食性海浜では、打上げ時の遡上波先端部での底質巻き上げと、打下げ時の流下流速の増加による底質浮遊の局所性と間欠性が改良モデルで適切に評価され、静水汀線付近の $q_{N,I}$ と $q_{N,M}$ との一致度は向上した。堆積性海浜に対しても同様なことが認められ、改良モデルによる net 漂砂量 $q_{N,I}$ は、波打ち帯での浮遊底質移動の効果が僅かであることを示し、 $q_{N,M}$ に一致する堆積傾向に改善された。

7. 流速と岸沖漂砂量の関係

本研究では、底質移動の指標であるシールズ数 ψ の算定を、底面摩擦係数として $f_w=0.03$ を採用してきたことから、その妥当性を確認する必要がある。

一周期間における無次元最大流速 U_{max}^* ($=U_{max}/(gH_s)^{1/2}$, H_s : 静水汀線 $x=0$ での波高) と無次元実測 net 漂砂量 $q_{N,M}^* (=q_{N,M}/d_{50}w_b$; 実験1: ○, 2: □, 3: △, 4: ▽) と改良モデルで摩擦係数 $f_w=0.03$ とした算定

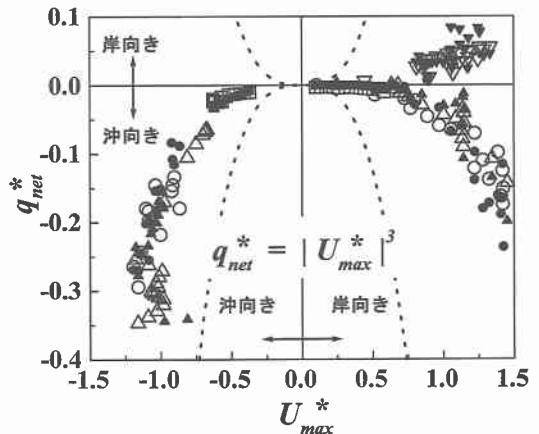


図-10 U_{max}^* と q_{net}^* との関係 (実験1~4)

net 漂砂量 $q_{N,I}^*$ ($=q_{N,I}/d_{50}u_0$: 実験 1: ●, 2: ■, 3: ▲, 4: ▼) の関係を, 図-10 に示す。

図-10 から, 波打ち帯でも net 漂砂量が流速の三乗に比例することに加えて, $q_{N,M}^*$ と $q_{N,I}^*$ との良好な一致から, これまでの数多くの底質移動に関する研究で採用されている, Jonsson (1966) タイプの底面摩擦係数 $f_w=0.03$ が, 波打ち帯においても適切な値であることが確認された。

堆積性海浜では U_{max}^* と net 漂砂量 $q_{N,M}^*$, $q_{N,I}^*$ の方向が, 波打ち帯全域にわたって岸向き, 侵食性海浜では潜水汀線付近より岸側で U_{max}^* が岸向き, 沖側で沖向きであるにも関わらず, $q_{N,M}^*$ と $q_{N,I}^*$ は波打ち帯全域で沖向きという関係が認められる。これは, 改良モデルでも SK モデルと同様に, 算定 net 漂砂量 ($q_{N,I}^*$ と $q_{N,SK}^*$) の輸送方向が, 流速だけでなく一周期間での流速の岸沖方向の継続時間に支配されていることに起因する。

8. 結 論

規則波による二次元移動床実験を行い, 波打ち帯の断面平均流速を算定し, SK モデルにシールズ数による浮遊底質の発生条件を組込んだ改良モデルを提案し, 波打ち帯での改良モデルの適合性を検討した。

本研究でえられた, 主な結論を以下に列挙する。

(1) 地形変形予測モデルの適用範囲を波打ち帯に拡張適用する上で, この海浜域での底質浮遊移動が持つ, 時空間的な挙動特性を考慮する必要がある。

(2) 二次元移動床実験から波打ち帯での断面平均流速 (U) を算定し, その時空間分布と底質移動の観測結果との比較から, 汀線位置を変動させる底質輸送の特徴と, 侵食・堆積性海浜の形成過程を捉えた。

(3) 算定断面平均流速 (U) から各瞬間のシールズ数 (ϕ) を算定し, 底質浮遊移動はシールズ数が $1.0 \leq \phi_{sc}$ となる場所と時間で発生することを見出した。この条件を佐藤・Kabiling モデル (1994) に組み込み計算した岸沖 net 漂砂量 ($q_{N,I}$) が, 実験地形変化からの算出漂砂量

($q_{N,M}$) と良好に一致することが確認された。

(4) 波打ち帯における無次元 net 漂砂量と無次元最大流速に $q_{net}^* \propto |U_{max}^*|^3$ の関係を確認し, また本研究で採用した Jonsson タイプ底面摩擦係数 $f_w=0.03$ が妥当であることが確認された。

今後の研究課題として, 二次元移動床模型実験結果に基づく改良モデルを現地問題に適用するためには, 縮尺効果に加えて, 急激な海浜地形変化や浜崖崩壊などを考慮した検討が必要である。

謝辞: 本研究を行うにあたり, 大学院生である伊藤啓勝君と倉田貴文君, また卒研究生である崎田貴徳, 鈴木鉄郎の両君には実験とデータ解析に多大な協力を頂いた。ここに記して謝意とする。

参 考 文 献

- 有村盾一・服部昌太郎・内田一裕 (1996): 波打ち帯の底質輸送と海浜地形変化の実験的研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 616-620.
- 内田一裕・服部昌太郎 (1998): 波打ち帯波動場と底面せん断力特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 171-175.
- 佐藤慎司・M. Kabiling (1994): 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 401-405.
- 水口 優 (1991): 浅海域における入・反射波の分離法について, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 31-35.
- Dibajnia, M., 清水琢三・渡辺 晃 (1992): シートフロー状態が卓越する海岸における縦断地形変化の数値計算, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 301-305.
- Fredsoe, J. and R. Deigaard (1992): Mechanics of Coastal Sediment Transport, World Scientific, Advanced Series on Ocean Eng., Vol. 3. p. 220.
- Jonsson, J. G. (1966): Wave boundary layer and friction factors, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., Vol. 1, pp. 127-148.
- Sumer, B. M., A. Kozakiewicz, J. Fredsoe, and R. Deigaard (1996): Velocity and concentration profiles in sheet-flow layer of movable bed, Journal of Hydraulic Eng., pp. 549-558.
- Sunamura, T., and K. Horikawa: Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 920-938.