

実規模不規則波砕波帯内における浮遊砂フラックス

池野正明*・清水隆夫**・田中寛好***・今井澄雄****

1. はじめに

砕波帯内では、海底砂が顕著に巻き上げられ、浮遊砂現象が卓越する。海浜変形予測モデルの精度向上のためには、浮遊砂の特性を十分把握し漂砂量の算定に適切に反映させる必要がある。また、波浪中の長周期波成分が浮遊砂輸送に顕著な影響を及ぼすことが指摘されている(佐藤ほか, 1993)。

そこで、本研究では、大型造波水路を用いた実験により浮遊砂を計測し、実規模不規則波砕波帯における浮遊砂フラックスの特性を明らかにする。また、長周期波成分が浮遊砂輸送に及ぼす影響を、波群拘束長周期波を正確に再現するために開発された新しい造波方法(自由長波制御法)を用いて検討する。ついで、実験で得られた浮遊砂濃度の特性を数値シミュレーションにより再現を試みる。

2. 岸沖海浜変形実験

長さ 205 m, 幅 3.4 m, 深さ 6 m の大型造波水路を用いて海浜変形実験を実施した。水路内に一樣勾配の砂斜面を整形した。実験対象とした砂の中央粒径は 1 mm である。初期海浜斜面勾配を 1/10, 1/20, 1/50 の 3 種類とし、表-1 に示す L1~L7 の 7 ケースを実施した。本研究では、不規則波中に含まれる長周期波成分が浮遊砂に及ぼす影響を詳しく検討するため、L4 と L6 を対象に、最近開発された新しい造波システムを用いて海浜変形実験を実施した。これは、造波板に付随して発生する予期せぬ自由長周期波を消去するため、これと逆位相となる自由長周期波の造波信号を不規則波群の造波信号に付加することにより、波群拘束長周期波を正確に再現する造波方法(池野・田中, 1996)であり、その有効性は既に一部報告している(池野・田中, 1995)。ただし、この方法では、長周期波の造波板変位信号を付加するため、従来法

表-1 大型造波水路実験のケース一覧

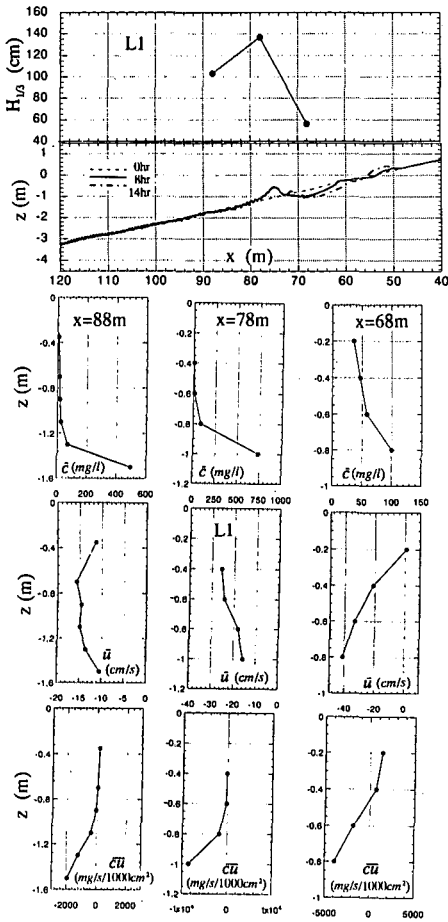
ケース	初期斜面の勾配	沖波の有義波高	沖波の有義波周期	スペクトルの集中度 γ	造波方法
L1	1/20	1.0 m	5.0 s	規則波	従来法
L2	1/20	1.0 m	5.0 s	1	従来法
L3	1/20	1.0 m	5.0 s	7	従来法
L4	1/20	0.6 m	5.0 s	1	自由長波制御法
L5	1/10	1.2 m	3.0 s	7	従来法
L6	1/10	1.2 m	3.0 s	7	自由長波制御法
L7	1/50	0.5 m	8.0 s	7	従来法

砂の中央粒径は 1 mm, 不規則波の周波数スペクトルは JONSWAP 型

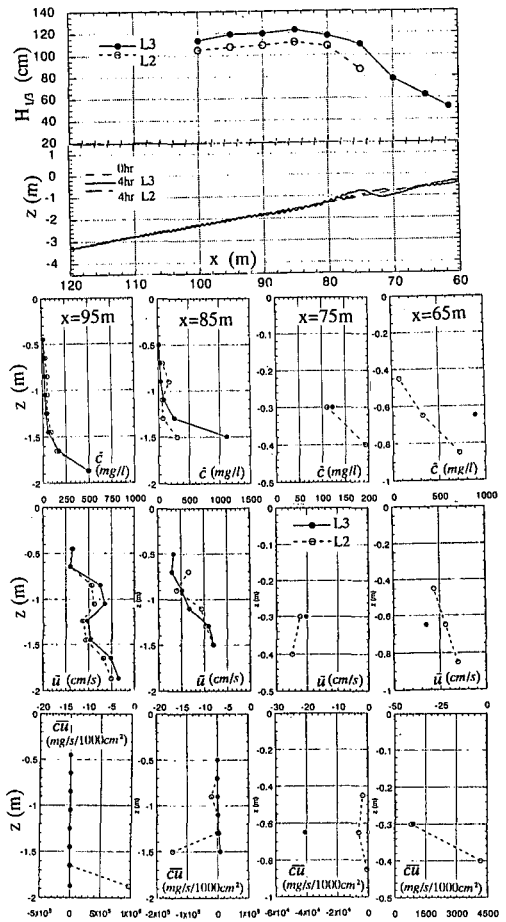
よりも造波板変位が大きくなる。

上記の 2 ケース以外は、従来の造波方法を用いた。有義波高を 0.5~1.2 m, 有義波周期を 3~8 s とした。不規則波のスペクトルは JONSWAP 型とし、ピークの先鋭度を表すパラメータ γ の値を、L2 では風波に相当する 1, L3 ではうねりに相当する 7 とした。L5 と L6 では、初期海浜斜面勾配と波形勾配を大きくして侵食性の波浪を対象とした。L5 が従来の造波方法, L6 が新しい造波方法の場合である。L7 では初期海浜斜面勾配と波形勾配を小さくして堆積性の波浪を対象とした。L1 は L2 の有義波高相当の規則波で検討した。不規則波の造波信号を 100 波で繰り返すように作成し、データの計測時間も造波信号の繰り返し時間と全く同じになるようにした。計測台車に、光学式濁度計 2 台、電磁流速計 2 台、容量式波高計 1 台を取り付けて、砕波帯内の鉛直 2 地点の水平・鉛直方向流速 2 成分と濃度を同時計測し、さらに異なる鉛直地点で繰り返し計測することにより、砕波帯内最多 6 断面程度・鉛直方向最多 7 点における浮遊砂フラックスの鉛直分布を計測した。光学式濁度計のキャリブレーション用として、採水による時間平均浮遊砂濃度の測定も同時に行った。採水ホースを濁度計と同じ測定位置に入射波進行方向と直角になるように取り付けた。採水量は流量メーターで測定し乾燥後の採砂重量を測定した。砕波帯内断面を一通り計測し終わるまでに 2~4 hr を要した。また、海底地形変化を数時間毎に車輪型連続式砂面計を用いて計測し、海浜変形が顕著に生じたと判断される時点で、浮遊砂フラックスの鉛直分布を繰り返し

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部
 ** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部 構造水理グループリーダー
 *** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部 上席研究主幹
 **** 正会員 東京電力株式会社 原子力建設部 土木建築課 副長



図一 砕波帯内浮遊砂フラックスの鉛直分布 (ケース L1)



図二 砕波帯内浮遊砂フラックスの鉛直分布 (ケース L2 および L3)

し計測した。

3. 砕波帯内の浮遊砂フラックスの特性

(1) 時間平均浮遊砂フラックスの鉛直分布

図一1～図一4に、各ケースに対応する浮遊砂濃度の時間平均値 $\bar{c}$ 、定常水平流速 $\bar{u}$ 、浮遊砂フラックス $\bar{cu}$ を示す。ただし、紙面の都合上 L4 に対応するものは割愛している。図には、浮遊砂計測期間中の有義波高の岸沖分布と海底地形変化も併せて示している。まず、図一1の L1 では、入射波を14時間まで作用させ、8～14時間の間に図に示す浮遊砂フラックスを測定した。図二2の L2 と L3 および図一3の L5 と L6 では、浜地形の速度が比較的に速いので、入射波作用後4時間までに浮遊砂フラックスを測定した。図一4の L7 では、浜地形の速度が遅いので、入射波を25時間まで作用させ、16～25時間の間に浮遊砂フラックスを測定した。図一1～図一4によると、侵食性波浪 L5 および L6 の場合の浮遊砂フラックスが比較的大きく、特に砕波帯内のバー地形形成点付近で最も顕著な浮遊砂が生じている。次に図二2中の L2 と L3

を比較すると、沖波波高は同じであるが、 γ が1 (風波) と7 (うねり) の場合とで浅水変形に有意な差が生じており、L3の方がL2よりも砕波帯内の有義波高値が1割程度大きい。これに対応して、L3の方がL2よりも浜地形が速く進行し、浮遊砂濃度とフラックスの時間平均値に両者の差が生じている。次に図一3中の L5 と L6 を比較すると、従来の造波法と自由長波制御法とで、砕波帯内の有義波高値と浜地形に有意な差は生じていない。これに対し、浮遊砂濃度の時間平均値の鉛直分布に差が生じており、L6の沖向き定常水平流速がL5の場合よりも大きい。また、両者の浮遊砂フラックスの鉛直分布に差が生じている。

(2) 浮遊砂フラックスの時間変動

図一5に、L1 と L6 に対応する砕波帯内バー形成地点の底面上20 cmの高さにおける浮遊砂濃度と水平流速および水位の時間変動の計測例を示す。図一5によると、規則波、不規則波の場合とも、水平流速がゼロクロスする時刻付近で底面からの巻き上げが発生している。砕波

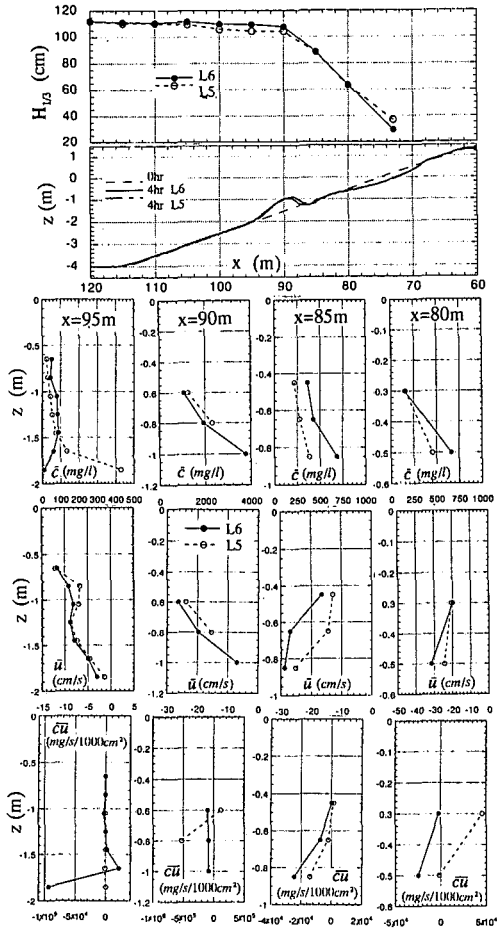


図-3 砕波帯内浮遊砂フラックスの鉛直分布 (ケース L5 および L6)

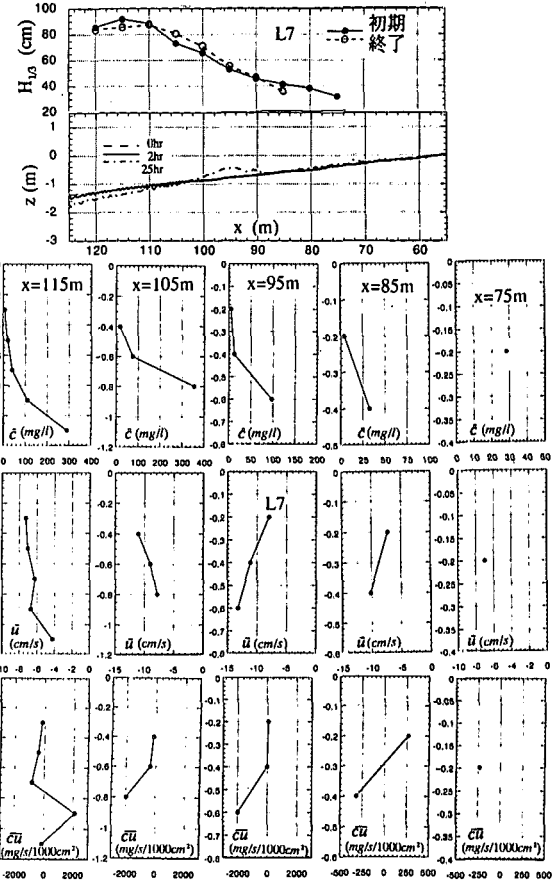


図-4 砕波帯内浮遊砂フラックスの鉛直分布 (ケース L7)

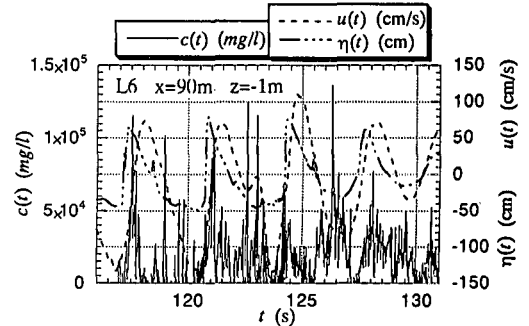
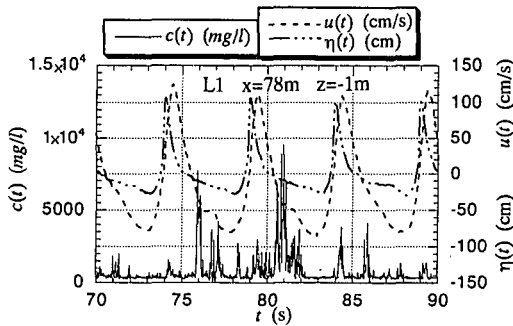


図-5 計測された水位、水平流速および浮遊砂濃度の時間変動の代表例
(バー形成地点付近における海底面上 20 cm の高さ)

帯内バー形成地点では底質が顕著に巻き上げられ、高濃度の浮遊砂が発生している。

図-6 に、L6 に対応する海底面上 20 cm の高さにおける浮遊砂フラックスのパワースペクトルの代表例を示す。図中の細実線は砕波帯内バー形成地点、太実線はこ

れより沖側の地点に対応する。図-6 によると、浮遊砂フラックスは、ちょうど 0.07 Hz 付近を境にして、短周期波成分と長周期波成分に分けることができる。砕波帯内バー形成地点では、短周期波成分よりも、長周期波成分の方が卓越している。

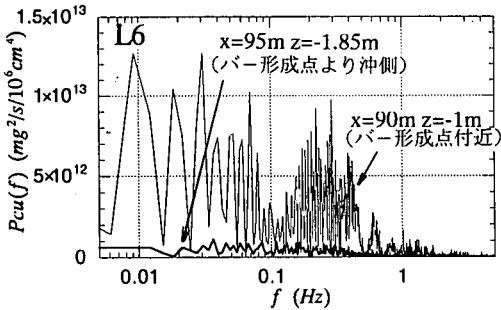


図-6 浮遊砂フラックスのパワースペクトルの代表例(海底面上 20 cm の高さ)

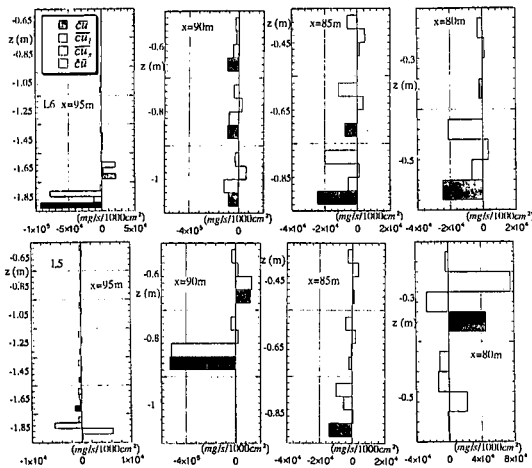


図-7 浮遊砂フラックスの周波数帯別の鉛直分布

(3) 浮遊砂フラックスの周波数帯別特性

前述の検討結果から、浮遊砂フラックスを、定常成分 $\bar{c}$, 0.07 Hz 以上の短周期成分 $\overline{c_u}$, 0.07 Hz 以下の長周期成分 $\overline{c_{\bar{u}}}$ の 3 種類からなると考え、各々の寄与分を評価する。浮遊砂フラックスの時系列 $c(t)u(t)$ を FFT 解析し、対象とする周波数帯以外の複素フーリエ係数を 0 に置き換え、逆 FFT 解析により時系列に戻して時間平均量を算定した。

図-7 は、侵食性波浪を対象に、浮遊砂フラックスの周波数帯別の鉛直分布を調べたものの代表例である。上段が自由長波制御法 L6、下段が従来の造波法 L5 の場合に対応する。図-7 によると、L5 と L6 とで特に浮遊砂フラックスの長周期成分の大きさと向きに有意な差が生じている。L6 の方が L5 よりも底面付近で冲向きの浮遊砂フラックスが卓越している。概してフラックスの長周期成分は冲向きに、短周期成分は岸向きに、定常成分は冲向きとなっている。また、L6 では、岸に近づくに従い、冲向き定常成分の占める割合が増加している。

4. 数値シミュレーションによる浮遊砂濃度特性の再現

ここでは、実験で得られた不規則波砕波帯内の浮遊砂濃度の時間変動や時間平均値の鉛直分布の再現を試みる。

佐藤ほか (1993) と同様に、次の鉛直 1 次元拡散方程式 (1) を用いる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = w_s \frac{\partial c}{\partial z} + \varepsilon_s \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$-\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} = p(t) \quad \text{at } z = -h \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 c は浮遊砂濃度、 w_s は底質の沈降速度 (粒径 1 mm の時 0.095 m/s)、 ε_s は拡散係数、 h は水深である。海底面における砂の巻き上げの境界条件として式 (2) を使い、巻き上げ量は、佐藤ほか (1995) を参考に、式 (3) のようにモデル化した。

$$p(t) = \alpha_s w_s \rho_s (\Psi_{i-1} - \Psi_c)^{1.5} \delta(t - t_i) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $p(t)$ は底質の巻き上げ量であり、底面流速の i 番目の半周期の開始ゼロクロス時に巻き上がると仮定した。 $\delta(t - t_i)$ はディラックのデルタ関数である。 Ψ_c は限界シールズ数 (粗砂 0.06)、 Ψ_{i-1} は $i-1$ 番目の半周期のシールズ数である。 α_s は定数であり、実験結果をもとに 0.053 と定めた。これは、佐藤ほか (1995) による現地観測結果との比較時の値 0.01 よりも大きい。 ρ_s は底質の密度 (2.65) である。拡散係数 ε_s は規則波を対象に提案された Nielsen (1988) による次式を用いる。

$$\varepsilon_s = w_s \xi [1.24 \exp\{-40(w_s/\bar{u})^2\} + 0.2] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ξ は砂澱の波高であり実験結果をもとに 0.15 m とした。 $\bar{u}$ は底面水平流速振幅である。ただし、本研究では、式 (3) 中のシールズ数 Ψ_{i-1} の算定および式 (4) 中の底面水平流速振幅 $\bar{u}$ には、実測された底面水平流速の時系列をゼロクロス解析して用いた。

図-8 は、L6 について、砕波帯内で海底地形がバーを形成し浮遊砂が最も顕著となる地点を対象に、浮遊砂濃度の時間変動を計算し実験結果と比較したものの代表例である。図には、計算に用いた底面水平流速、底面上 20 cm の地点の浮遊砂濃度を示している。図-8 によると、浮遊砂濃度の時系列の計算結果は、実験結果の時間変動に比べ幾分滑らかとなっているが、底面流速の不規則な時間変動に追従して生じる浮遊砂濃度の特性の概略を十分再現している。

図-9 は、L1, L2, L6 について浮遊砂が最も顕著となる地点を対象に、浮遊砂濃度の時間平均値の鉛直分布を計算値と実験値とで比較したものである。計算に先立ち、実験による浮遊砂濃度の時間平均値から得られる拡散係数と Nielsen (1988) の提案式 (4) とを比較した結果、

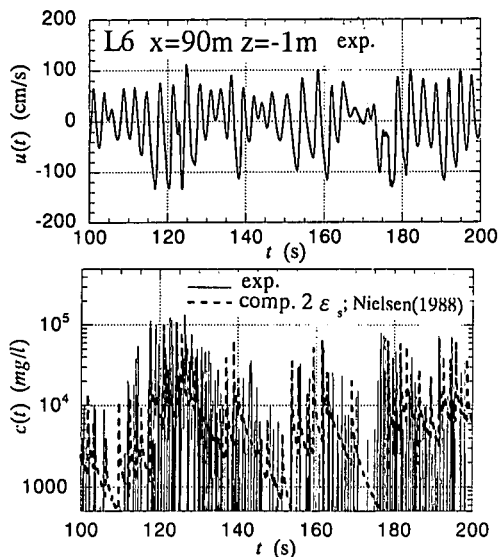


図-8 数値シミュレーションによる浮遊砂濃度の時間変動の再現例

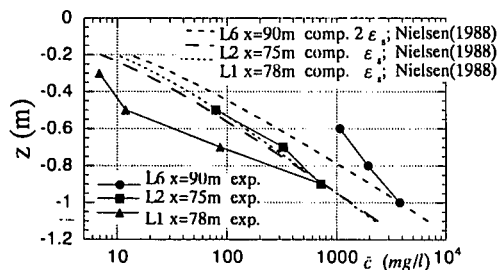


図-9 浮遊砂濃度の時間平均値の鉛直分布の再現例

L6のように侵食性波浪で plunging 型碎波となるケースでは、式(4)ではかなり過小評価となることがわかったので、L6の計算では、式(4)による ϵ_s の値を2倍にして計算した。図-9によると、比較的海底面に近い高さの浮遊砂濃度の計算値と実験値の対応はL1, L2, L6ともに良好である。さらに海底面から上に離れるに従い、L1, L2では計算値と実験値の対応はほぼ良いが、L6では計算値が実験値を下回っている。

5. 結 論

1) 自由長波制御法と従来の造波法とで、碎波帯内の浮遊砂フラックスの長周期成分の大きさと向きに違いが

生じる。波浪の長周期成分が浮遊砂輸送に及ぼす影響を検討する場合には精密な実験が必要である。

2) 本検討ケースのうち侵食性波浪の場合の浮遊砂フラックスが最も大きく、碎波帯内のバー形成点付近で顕著となる。

3) 碎波帯内では、概して、浮遊砂フラックスの長周期成分は沖向きに、短周期成分は岸向きに、定常成分は沖向きとなる。また、岸に近づくに従い、沖向き定常成分の占める割合が大きくなる。

4) 侵食性波浪で plunging 型碎波となる場合以外では、不規則波による浮遊砂濃度の時間変動と鉛直拡散特性の概略を本数値シミュレーション法で十分再現できる。

本研究は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施した成果であることを付記する。本研究を実施するにあたり、(株)シーアールエスの稲葉大介氏、安川剛史氏、(株)八重州土木技術センターの嶋野三男氏、(株)開発計算センターの定森良夫氏、久保道仁氏の協力を得たことを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 池野正明・田中寛好 (1995): 自由長波制御により造波された波群拘束長周期波の浅水・碎波変形と構造物による重複波の特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 156-160.
- 池野正明・田中寛好 (1996): 沖合い波群により生成される長周期波の実験的再現方法とその波浪変形特性, 電力中央研究所報告, 研究報告U 95042.
- 入江 功・寺崎賢次・加藤一正 (1985): 砂れん上の底質の浮遊過程を考慮した漂砂観測法に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第2号, pp. 123-156.
- 加藤一正・柳嶋慎一 (1992): 長周期波によるバームの侵食, 土木学会論文集, 第452号/II-20, pp. 41-50.
- 佐藤慎司・島谷 学・志村豊彦 (1993): 不規則碎波帯における浮遊砂輸送量の解析法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 321-325.
- 佐藤慎司・田中茂信・野口賢二・山本幸次 (1995): 碎波点付近における浮遊砂の現地観測, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 135-144.
- 柴山知也・W. Rattanapitikon (1995): 浮遊漂砂量予測を取り入れた二次元海波変形モデル, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 446-450.
- Nielsen, P. (1984): Field measurements of time-averaged suspended sediment concentrations under waves, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 51-72.
- Nielsen, P. (1988): Three simple models of wave sediment transport, Coastal Eng., Vol. 12, pp. 43-62.