

不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂量

入江 靖*・柴山 知也**・渡辺 晃***

1. はじめに

二次元海浜変形に関する研究は、従来から主として規則波を用いた移動床実験に基づいて行われてきた。しかしながら近年、現地における海浜変形をより詳細に説明することをめざして波の不規則性の効果に注目した研究が行われるようになってきた。沿岸砂洲の発生限界を風波を用いて検討した土屋・稲田の研究¹⁾、不規則波による漂砂量を論じた Wang・Liang の研究²⁾、数値計算によって岸沖漂砂量を支配する代表波を検討した柴山・堀川の研究³⁾などはこの例である。一方、より系統的な実験研究としては大塚ら⁴⁾が不規則波による二次元海浜変形の実験を行い、海浜過程を支配する代表波に関する検討を行っている。

本研究は、主として大塚ら⁴⁾の実験結果をふまえて、侵食型の実験条件で大塚らと同様の実験を行い、彼らの実験データをもあわせ用いて、さらに精密な議論を行うとするものである。その際特に、不規則波を波別に解析することにより不規則性の効果を検討すると共に、超音波流速計を用いた底面付近の流速場のデータを用いての検討を行った。

2. 実験条件および方法

実験は大塚ら⁴⁾の研究に、侵食条件の実験データを加

えるために行った。実験には長さ 19 m、深さ 1 m、幅 0.8 m の二次元不規則波造波水路を用い、造波機から 7.65 m の部分より水路幅を 0.8 m から 0.4 m に漸減させることにより、波高を増大させた。底質には豊浦標準砂（中央粒径 $d_{50}=0.18$ mm）を用いた。沖側一様水深部の水深は 0.45 m とし、初期底面勾配は 1/10 とした。上記の条件以外は、大塚ら⁴⁾の実験方法とほぼ同一のものとし、また彼らの実験条件（シリーズ A、シリーズ B）と区別するために本実験をシリーズ C と呼ぶことにする。実験条件を表-1 に示す。なお、ケース C-4 は C-1 とほぼ同一の条件で現象の再現性を確かめるために行ったものである。

入射波としては Bretschneider-光易型スペクトルを用いた。各ケースにつき 9 時間、不規則波を作用させ、0, 1, 3, 9 時間後に海浜縦断地形を測定し、また 0~1,

表-1 実験条件

ケース	初期勾配	シリーズ C 豊浦砂 ($d_{50}=0.18$ mm)			
		有義波		平均波	
		$(H_{1/3})_0$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	$(H_m)_0$ (cm)	T_m (s)
C-1	1/10	21.7	1.4	14.9	1.3
C-2	1/10	11.3	1.2	7.3	1.1
C-3	1/10	10.1	1.9	6.6	1.6
C-4	1/10	21.5	1.4	14.5	1.3

（添字 0 は沖波に換算した値であることを示す。）

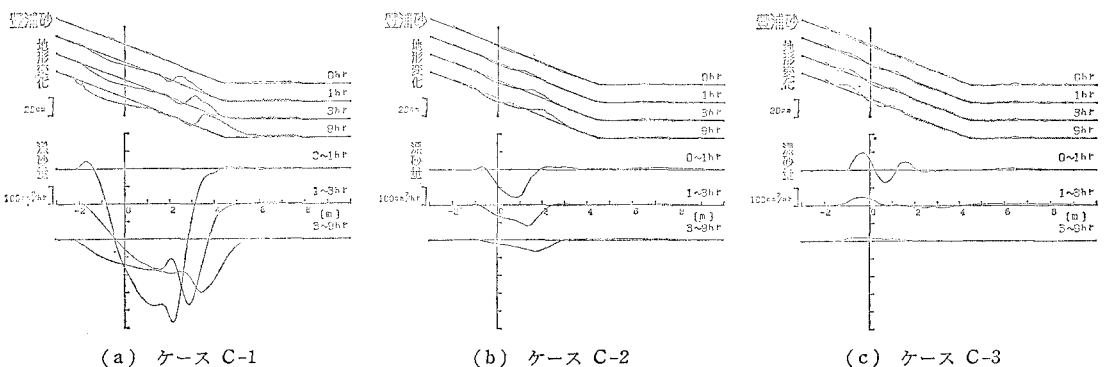


図-1 地形及び漂砂量の時間変化

* 正会員 工修 建設省近畿地方建設局

** 正会員 工博 東京大学講師 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

1~3, 6~9 時間の間に沖波波高および各測点での水面波形, 底面流速を順次測定した。水面波形および底面流速の測定点は, 初期汀線より 50 cm 間隔で配置し, 特に漂砂量が大きい所は 25 cm 間隔とした。その他, VTR を用いて碎波点や底質の移動状況を記録した。

図-1 に本実験 (シリーズ C) における地形および漂砂量の時間変化を示す。

3. 実験結果の概要

まず大塚ら⁴⁾と同様に海浜の縦断地形について検討を加える。図-2 は堀川ら⁵⁾の海浜変形パターン分類指標を用いて, 大塚ら⁴⁾の実験も含めて全実験ケースを整理したものである。C の値は次式で与えられる。

$$C = (H_0/L_0)(\tan \beta)^{0.27}(d_{50}/L_0)^{-0.67} \dots\dots\dots (1)$$

ここで H_0 , L_0 は各々換算沖波の波高および波長, $\tan \beta$ は初期底面勾配, d_{50} は底質の中央粒径である。図中で破線が規則波実験の結果に基づいて提案された堀川ら⁵⁾の境界であり, 実線が代表波として平均波を用いた場合の不規則波実験の結果である。大塚ら⁴⁾の研究では完全

な侵食型を形成するケースが一つだけであったため, タイプ II とタイプ III の境界を確定するには到らなかったが, 今回の実験結果 (図中の縦棒を付した記号) により, $C=9$ が妥当な値であることがわかる。代表波に有義波を用いて同様の整理を行うと, タイプ I → II の遷移は $C=13$, タイプ II → III の遷移は $C=5$ で与えられる。

次に岸沖漂砂量について述べる。大塚ら⁴⁾は渡辺⁶⁾がパワーモデルの概念を用いて net の無次元漂砂量 Φ とシールズ数 ϕ の関係を表した式

$$\Phi = A(\phi - \phi_0)\phi^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

を不規則波の実験結果にも適用し, $A=3$, $\phi_0=0.12$ という値を得ている。図-3 は今回の実験結果を式 (2) 及び大塚ら⁴⁾の実験結果と共に, 粒径 0.18 mm, 沖向き漂砂量の場合について示したものである。図中の破線は Madsen・Grant⁷⁾ が半周期平均の漂砂量とシールズ数 ϕ の関係を表わした式

$$\Phi = 12.5\phi^3 \dots\dots\dots (3)$$

である。シールズ数の計算に当っては有義波に対応する波の条件について, 大塚らと同様にして水面波の諸元から求めている。

図をみると, 今回の実験結果はシールズ数が多い領域のデータを提供していることがわかる。またシールズ数が小さい領域では式 (2) の一致度が良く, シールズ数の大きい領域ではむしろ式 (3) の適合性が良いといえる。しかしながら式 (3) はもともと半周期平均漂砂量を表わすものであるし, 式 (2) は波の有限振幅性の効果をあらわには含んでいないために必ずしも net の漂砂量を合理的に表わす表示とはなっていない。そこで本論では以下において, 個々の波の特性を用いた解析及び実測底面流速を用いた解析を行い, 議論の精密化を試みることとする。

4. 個々の波の特性を用いた解析

大塚ら⁴⁾ならびに本実験の結果によれば, 海浜変形パターンの分類に対する代表波としては, 平均波を用いることが規則波実験との対応上妥当である。今, 式 (1) で与えられる C 値が個々の波についても全体的な海浜変形のパターンに影響すると考えるならば, 不規則波群を構成する個々の波の C 値の分布を検討してみる価値がある。図-4 は, ケース C-1~C-3 について, 横軸に C 値, 縦軸にその確率分布を表わしたものである。図をみると平均波による C 値が分布のほぼ中央に位置しており, 平均波を代表波に用いることの妥当性が裏付けられる。しかしながら平均波が代表波と成り得るのは, 時間スケールを考えない, 海浜変形のパターン分けについてであり, 底質移動量については別途検討を行なう必要がある。

次にシールズ数の分布について考える。シールズ数 ϕ

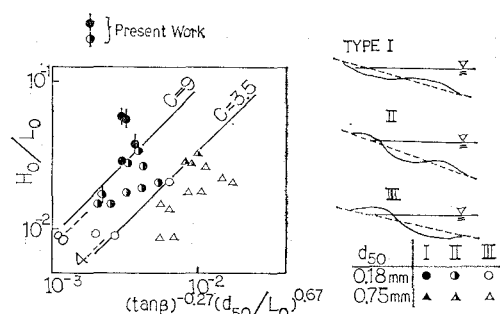


図-2 海浜変形パターンの分類

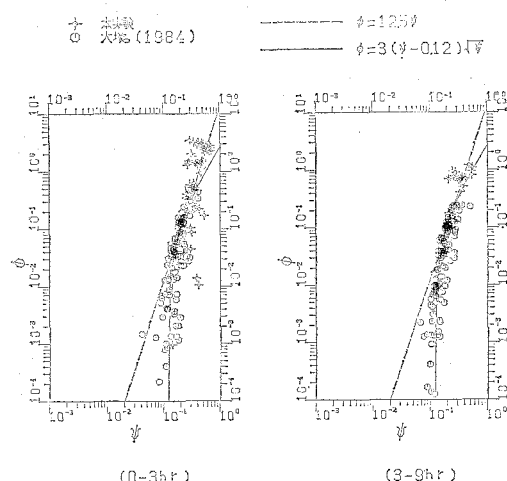


図-3 無次元漂砂量とシールズ数の関係

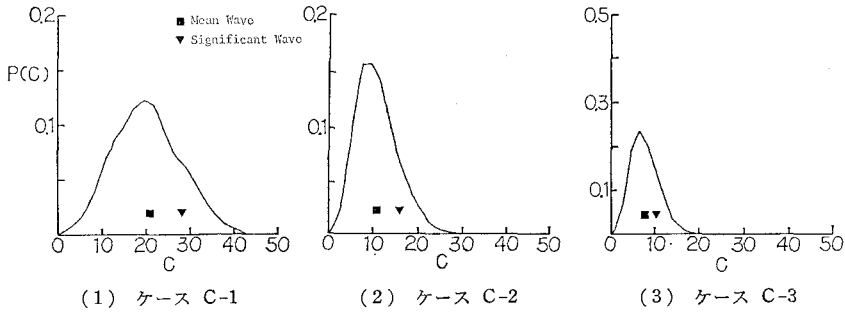


図-4 C 値の確率分布

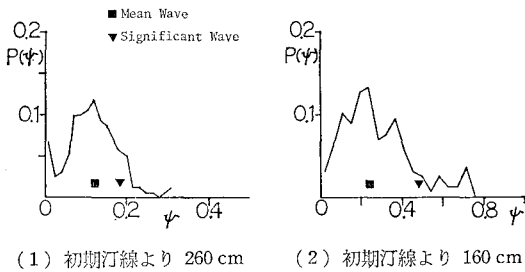


図-5 シールズ数の確率分布 (ケース A-12, 0~3 時間)

についても C 値と同様に, その確率分布を求めた. 図-5 に大塚らのケース A-12, 造波開始後 0~3 時間の場合の結果を例示する. シールズ数の分布の解析からも平均波によるものが分布のほぼ中央に位置することが結論できる. さて, 漂砂量について考えると, 式 (2) では漂砂量はシールズ数の 1.5 乗, 式 (3) では 3 乗に比例することが主張されている. このことから, 漂砂量に関しては平均波よりも大きい波の寄与が大きくなることが予想される. どの程度の波が代表的となるかについては, いずれの漂砂量則を用いるかによるが, 柴山・堀川³⁾は, 式 (3) に類似した式を用いて, 岸方向沖方向それぞれについて漂砂量を計算して正味の移動を求めるという数値実験を行い, 底質移動量を推定する際の代表波として有義波が妥当であると述べている. 彼らのモデル^{3), 5)}については次節においても検討する.

5. 底面流速データを用いた解析

漂砂量を論じるに当たって底面付近の流速の推定は, 底質の移動に直接的な効果を及ぼすために特に重要である. しかし従来はその測定が困難なことから水面波形を測定し, 例えば Dean の流れ関数法を用いて底面流速を算定することが多かった. しかし特に碎波帯内では算定値が必ずしも実測値と一致しないことがわかっている. そこで以下では超音波流速計を用いて測定した流速データを用いての解析を試みた.

まず, シールズ数と岸沖漂砂量の関係を解析した. 実測流速データから平均流速を求め, 流速データからその

平均流速をさし引いたデータを波による流速とした. 波動流速にゼロダウン法を用い, 個々の波に分割して一波毎の最大流速, 流速を時間的に積分して求めた水粒子軌道長径を求め, 田中・首藤の波流れ共存場の摩擦係数

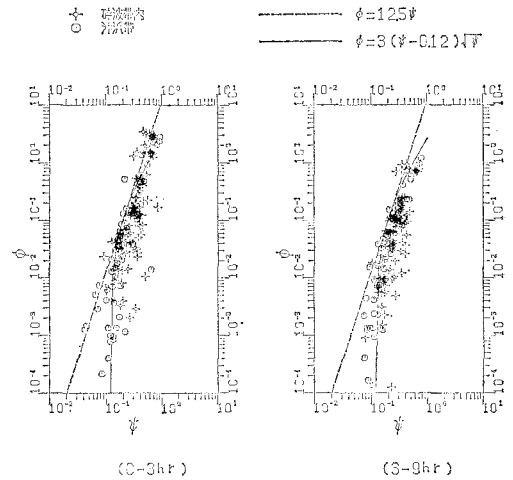


図-6 実測底面流速を用いたシールズ数と岸沖漂砂量 (底質粒径 0.18 mm, 沖向き漂砂, 有義波)

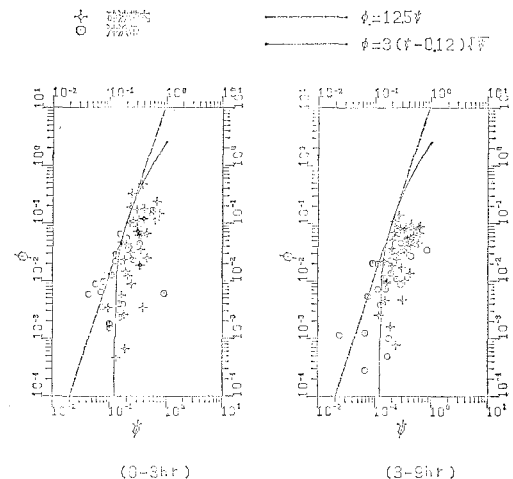


図-7 実測底面流速を用いたシールズ数と岸沖漂砂量 (底質粒径 0.18 mm, 岸向き漂砂, 有義波)

を用いてシールズ数を計算した。さらに最大流速の順に波を並べ換えることにより、有義波、平均波に対応するシールズ数を求めた。図-6, 7 は有義波を用いて、沖向き岸向きそれぞれの場合について整理したものであ

る。水面波形より換算した流速を用いた図(図-3)とほぼ同様の傾向を示しているが、碎波帯内においても式(2)、式(3)が適用可能であることを示している。

次に Shibayama・Horikawa⁸⁾の底質移動モデルによ

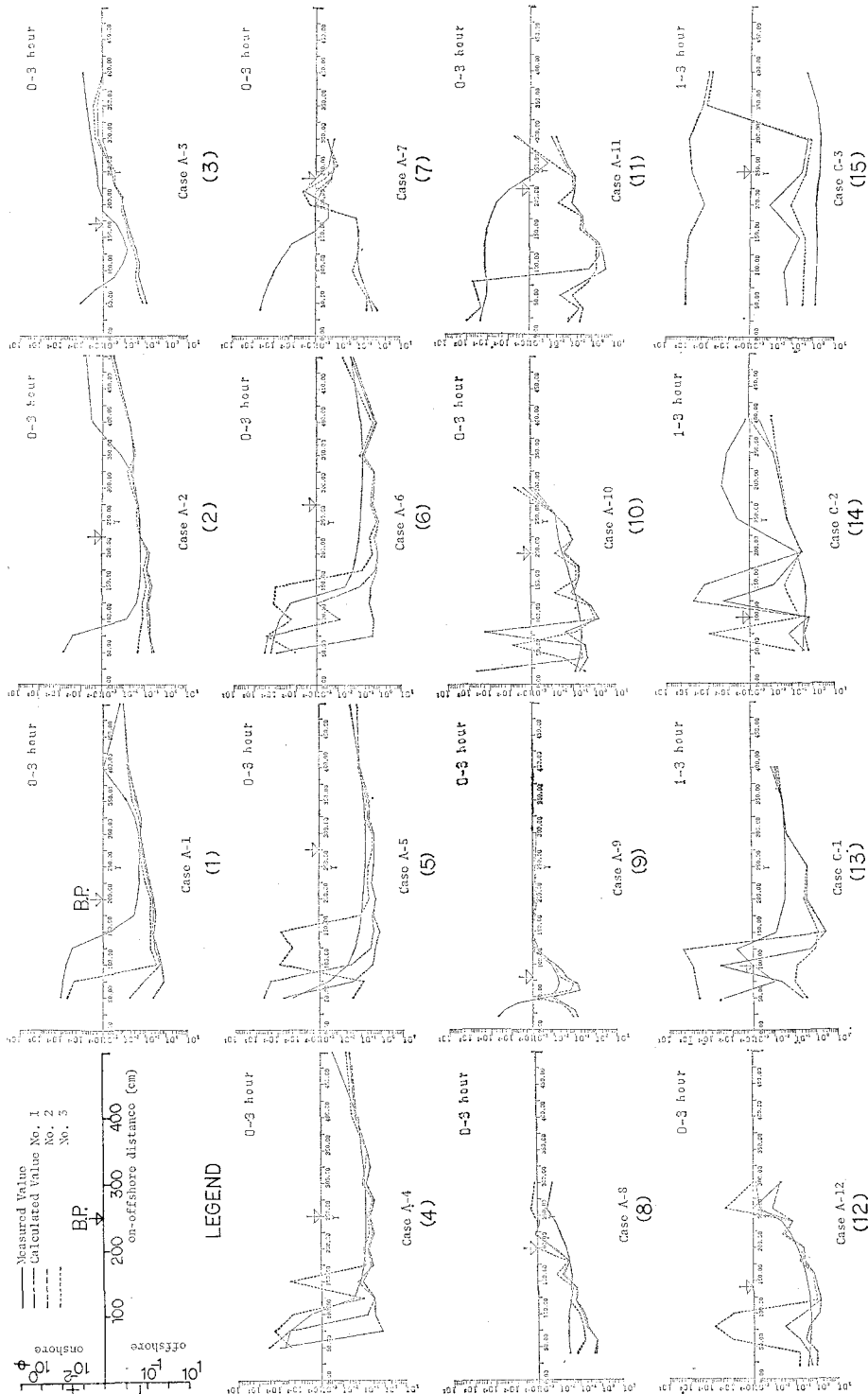


図-8 Shibayama・Horikawa⁸⁾モデルと実測の比較

る検討結果について述べる。彼らの方法は、岸向き、沖向きそれぞれの波動軌道流速を用いて、砂澱上の渦の作用を考慮しつつ岸向き、沖向きの漂砂量を別々に算定し、それらの和として正味の漂砂量を求めるものである。ここでは以下の手順により、このモデルを今回の計測結果に適用した。まず実測底面流速データをゼロクロス法により半周期毎の波に分割し、半周期毎の周期、最大流速、底面軌道振幅(流速データの時間積分値)を計算する。その際以下の3つの方法を併用して比較する。すなわち i) 流速データをそのまま用いる、ii) 流速データから平均流速を差引いたものを用いる、iii) 流速データとしては ii) を用いるが、シールズ数の計算には i) を用いる、の3通りである。シールズ数の計算には周期と流速振幅の値から半周期間の正弦的な流速変化を仮定することによって Jonsson の摩擦係数を用いて算定した。また、砂澱の形成条件の判定には、不規則波の条件のもとでは従来の規則波による結果を援用することが必ずしも適当ではないため、今回は実測砂澱データの諸元を用いた。以上により、Shibayama・Horikawa⁹⁾ モデルを適用する際に必要な3つのパラメータ、すなわちシールズ数、底面流速振幅(u_b)と底質沈降速度(w)との比、 u_b/w 、底面軌道直径(D)と砂澱波長(λ)との比 D/λ の3量を定めることができる。さらに Shibayama・Horikawa⁹⁾ モデルで与えられる半波毎の漂砂量を周期を重みとして積分し、正味の漂砂量を計算して実測値と比較した。図—8に大塚ら⁴⁾の実験も含めて流速測定を行ったすべてのケース(シリーズAおよびシリーズC)について、その結果を示す。図中の実線は地形変化から求めた実測値を表わし、一点鎖線、破線、点線はそれぞれ先ほどの方法 i) ii) iii) に対応しており、戻り流れなどの定常流の存在しない領域では三者は一致する。

図—8 から得られる知見は以下のようである。

- 1) 本モデルは砕波帯内の比較的汀線に近い部分を除いては漂砂量をかなり精度よく評価することができる(図(1)~(7), (9)~(10), (12), (13))。
- 2) 砕波による大規模渦が卓越する領域では本モデルは適用できない(図(11))。
- 3) 図(14)及び(15)の沖浜帯で予測値と実測値が一致しない理由は、ここでは砕波点を平均波の砕波点で表示しているため、大きな波の作用下にある場合は、表示した砕波点よりかなり沖側で砕波する波が多く存在するためである。
- 4) 砕波帯内において定常流が大きい場合にも予測値と実測値の一致度が悪くなる(図(13), (14), (15))。

以上のように考えると、当然のことながら本モデルの適用範囲は、底面の波動軌道流速による底面摩擦による

底質移動が卓越する場合であり、砕波による底質移動が卓越する場合及び定常流成分が大きくなる場合には、その一致度は悪くなる。このうち砕波による底質移動については、柴山・堀川⁹⁾が検討を行っているが、漂砂帯全体にわたる岸沖漂砂量モデルにこの効果を組み込むには到っていないのが現状である。

3. 結 論

大塚ら⁴⁾の実験に加えて新たに侵食型海浜を形成するような大きな波の条件で実験を行い、不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂量について検討を行った。まず海浜変形の最終地形パターンの分類については、時間スケールを無視すれば、不規則波を平均波で代表させれば、規則波の場合との対応が良い。これは一波毎の堀川ら⁵⁾の C 値の分布が、平均波による値付近にそのピークを持つことから裏付けられた。また底質移動量とシールズ数の関係についても個々の波及び底面流速データを用いて検討し、この場合にはむしろ有義波を代表波として用いることが適当ではないかと考えたがこの点については明確な結論を得るには到っていない。

次に Shibayama・Horikawa⁹⁾の底質移動量モデルを用いて、底面流速実測値から漂砂量を算定することを試みた。その結果、底面の波動軌道流速から漂砂量が決定される場合には本モデルでの算定が可能なものの、砕波による底質浮遊効果および砕波帯内沖向き定常流の効果が顕著な領域については別途より一層の検討が必要なが明らかとなった。本研究は文部省科研費一般A(代表者・堀川清司 No. 60420039)による研究成果である。

参 考 文 献

- 1) 土屋義人・稲田和則: 風波による海浜変形について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 219~224, 1974.
- 2) Wang, H. and S. S. Liang: Mechanics of suspended sediment in random waves, J.G.R., Vol. 80, No. 24, pp. 3488~3494, 1975.
- 3) 柴山知也・堀川清司: 不規則波による漂砂量の数値実験, 第40回土木学会年講概要集, Vol. II, pp. 605~606, 1985.
- 4) 大塚行則・三村信男・波辺 晃: 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 321~325, 1984.
- 5) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩石: 波による二次元海浜変形に関する実験的研究, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 193~199, 1974.
- 6) 波辺 晃: 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 285~289, 1981.
- 7) Madsen, O. S. and W. D. Grant: Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., pp. 1093~1112, 1976.
- 8) Shibayama, T. and K. Horikawa: A numerical model for two-dimensional beach transformation, Proc. JSCE, No. 357, pp. 167~176, 1985.
- 9) 柴山知也・堀川清司: 砕波による底質浮遊, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 302~306, 1985.