

砕波による底質の浮遊

柴 山 知 也\*・堀 川 清 司\*\*

1. はじめに

従来の波による底質の移動機構の解析は、底面付近の軌道流速から底面摩擦力を算定し、それを用いて底質移動量と関連づけようとするものが多かった。しかしながら近年、砕波点近傍における底質移動には、巻き波型砕波の突っ込みによって生じる大規模渦の作用による底質の浮遊現象が支配的な要因となる場合があることが指摘されるようになってきた<sup>1),2),3)</sup>。本研究ではこのような底質の浮遊機構に関して実験室において詳細な観測を行い、その性質を明らかにする。さらにその結果に基づいて現象の数値モデル化を行い、モデルの妥当性について検討を行うこととする。

砕波帯においては砕波による乱れの作用により底質が巻き上げられ、特に砕波点近傍での浮遊砂濃度が濃くなる。砕波点付近では図-1に模式図を示すような大規模な渦の作用によって、組織的な底質の浮遊現象が起こる。すでに筆者らはこの現象について若干の報告<sup>2)</sup>を行っているが、浮遊砂濃度、砕波帯内流速場の計測技術の向上に伴い、さらに議論を精密化したのでその結果について報告を行う。また図-1に示すような底質の浮遊機構は1)巻き砕波によって発生する大規模な渦 (horizontal roller) の作用による底質の浮遊過程、2)大規模渦が崩壊した後の乱流場における底質の沈降過程の2つから成り立っていると考え、それぞれについて適当なモデル化を行い、数値モデルを作成した。

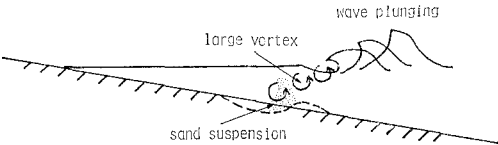


図-1 砕波による底質浮遊現象の模式図

2. 砕波による底質浮遊発生条件

室内実験においてはまず、浮遊砂の発生条件を求めるために、広範囲の条件にわたって実験を繰り返し、巻き

波型砕波による大規模渦発生条件とそれに伴う浮遊砂雲の発生条件を求めた。実験には長さ 11 m、幅 0.2 m、深さ 0.3 m の小型二次元造波水路 (水槽 A) と長さ 25 m、幅 0.8 m、深さ 1.5 m の中型二次元造波水路 (水槽 B) を使い、一様勾配移動床 (底質粒径 0.2 mm の豊浦標準砂を用いた) 上で行った。底質移動の記録にはビデオカメラを用い、底質の浮遊状況、運動を観察した。表-1 に本研究の実験条件と筆者らの過去の実験の条件<sup>2)</sup>を合わせて示す。実験ケースの内、A は水槽 A を用いた実験を示し、B は水槽 B を用いた実験を示す。

表-1 実験条件

| Case                                     | Wave Period<br>T (s) | Deep Water<br>Wave Height<br>H <sub>0</sub> (cm) | Deep Water<br>Wave Steepness<br>H <sub>0</sub> /L <sub>0</sub> | Initial Slope<br>i <sub>0</sub> |
|------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| (a) Present Work                         |                      |                                                  |                                                                |                                 |
| A-1                                      | 0.65                 | 5.33                                             | 0.081                                                          | 0.05                            |
| A-2                                      | 0.73                 | 5.22                                             | 0.082                                                          | 0.05                            |
| A-3                                      | 0.80                 | 4.81                                             | 0.048                                                          | 0.05                            |
| A-4                                      | 0.60                 | 5.35                                             | 0.095                                                          | 0.067                           |
| A-5                                      | 0.61                 | 5.37                                             | 0.093                                                          | 0.067                           |
| A-6                                      | 0.65                 | 5.33                                             | 0.091                                                          | 0.067                           |
| A-7                                      | 0.73                 | 5.19                                             | 0.066                                                          | 0.067                           |
| A-8                                      | 0.82                 | 4.82                                             | 0.046                                                          | 0.067                           |
| A-9                                      | 0.62                 | 5.35                                             | 0.095                                                          | 0.1                             |
| A-10                                     | 0.61                 | 5.12                                             | 0.088                                                          | 0.1                             |
| B-1                                      | 3.00                 | 4.50                                             | 0.0032                                                         | 0.05                            |
| (b) Shibayama and Horikawa <sup>2)</sup> |                      |                                                  |                                                                |                                 |
| A-11                                     | 1.62                 | 3.0                                              | 0.0073                                                         | 0.05                            |
| A-12                                     | 1.42                 | 3.4                                              | 0.011                                                          | 0.05                            |
| A-13                                     | 1.24                 | 3.8                                              | 0.016                                                          | 0.05                            |
| A-14                                     | 1.05                 | 2.6                                              | 0.018                                                          | 0.05                            |
| A-15                                     | 1.00                 | 4.4                                              | 0.028                                                          | 0.05                            |
| A-16                                     | 0.87                 | 4.0                                              | 0.034                                                          | 0.05                            |
| A-17                                     | 0.78                 | 6.6                                              | 0.069                                                          | 0.05                            |
| A-18                                     | 0.67                 | 7.6                                              | 0.11                                                           | 0.05                            |
| B-2                                      | 1.52                 | 8.7                                              | 0.024                                                          | 0.1                             |
| B-3                                      | 1.51                 | 10.4                                             | 0.031                                                          | 0.1                             |
| B-4                                      | 1.50                 | 12.5                                             | 0.036                                                          | 0.1                             |
| B-5                                      | 1.50                 | 15.7                                             | 0.045                                                          | 0.1                             |

図-2 は、樫木・岩田<sup>4)</sup>の固定床実験における大規模渦 (horizontal roller) の発生条件にならって移動床実験における浮遊砂の発生条件を、底面勾配と沖波波形勾配を用いて整理したものである。砕波形式の分類については従来からイリバーレン数  $I_r$  (Battjes)<sup>5)</sup> が用いられている。 $I_r$  の定義は次式である。

$$I_r = i_0 / (H_0 / L_0)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$i_0$ : 底面勾配,  $H_0 / L_0$ : 沖波波形勾配

この  $I_r$  の値によって砕波形式は

- $I_r > 3.3$

$0.5 < I_r < 3.3$

$I_r < 0.5$
- 砕け寄せ波型砕波

巻き波型砕波

崩れ波型砕波

のように分類されている。しかしこの分類は必ずしも渦

\* 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 工学部長

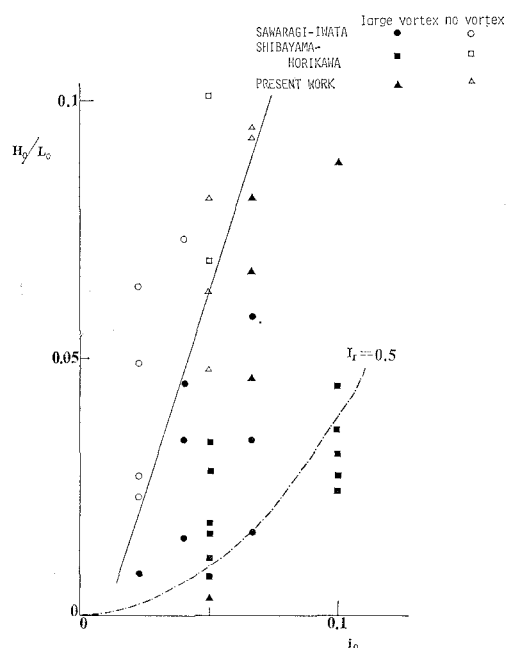


図-2 底質浮遊発生条件

の存在を考慮したものではない。図中に  $I_r=0.5$  の値を示すが、 $I_r$  の値が 0.5 より大きい部分まで浮遊砂を生じさせるような大規模渦の発生がみられるようである。なお底質粒径が 0.2 mm の底質を用いて実験すると、渦が発生する場合には常に底質の浮遊が発生していた。当然のことながら底質粒径が大きくなるに従ってこの発生領域は小さくなると考えられる。

### 3. 浮遊底質の運動と濃度分布

上記実験のうち、最も典型的に渦の発生する条件であるケース B-1 について浮遊底質の運動の追跡と濃度分布の計測を行った。計測の方法については、文献 6) にも述べてある。まず砕波によって生じる大規模な渦の作用によって浮遊する砂について、その発生・移動の過程をモータードライブ装置を取り付けた 35 mm カメラによる連続撮影で記録した。シャッタースピードは 1/30 s とし、観測領域に設置した波高計と同期させることにより、表面波形と関連づけた。また、浮遊砂濃度の測定には、光学式濃度計を用いた。浮遊砂雲発生領域に 71 個の測定点を配置し、鉛直方向に並んだ 5 ないし 6 測点から成る 1 測線を 1 グループとし、測定はこの測線ごとに行った。底面を一樣勾配にひきなおした後に波を起こし、20~30 波の濃度のデータを記録した。これは、実験を通じて条件を同一に保つために底面地形が大きく変化しないうちに計測を終了させるためである。別の測線の測定を開始するに当たっては、改めて斜面の整地を行い、上記の測定を繰り返した。また濃度測定と平行して

表面波形の測定も容量式高計を用いて同時に行った。得られた濃度データを 20 Hz のサンプリング周波数で AD 変換し、15 波分のデータを用いて、沖波波形記録を基準として、位相平均値を計算した。一般に光学式濃度計は気泡の影響を受けやすいが、本実験では周期が 3 s と長い気泡の影響を受ける位相は波の plunging 直後に限られており、またその範囲も水面近傍に限定される。

図-3 (a) は浮遊砂移動を図化したものである。図中の点の密度は写真に撮影された浮遊砂粒子数を表わし、また図中の矢印は、写真に写った浮遊砂の軌跡から求めた砂粒子速度を示している。表面波形の時間変化も図 (a') に掲げた。

図-3 (b) は浮遊砂濃度の時間変化を示したものである。図中に、水面の位置及び水底の位置を表す線及び  $2.5 \times 10^3$  ppm ごとの等濃度線が記入してある。(b') は位相平均操作を行った表面波形の位相変化である。

以上の観測により、砕波点付近の浮遊砂運動は次のように記述できる。①砕波後の波峰が通過した直後に、砕波によって発生した大規模な渦が砂面に到達することにより、底質が巻き上げられ、浮遊砂が発生する (位相 1)。②浮遊砂は渦の作用下で成長し、水面近傍に達する高濃度の浮遊砂雲を形成する (位相 2)。③大規模な渦の通過後、浮遊砂は周囲に拡散し、また徐々に沈降していく (位相 3)。④拡散沈降しつつ浮遊砂は沖向きに移動する (位相 4, 5)。⑤新たな波峰部分が到達し、沖向きに移動した砂粒子の一部は、再び岸向きに移動する (位相 6)。

図-3 (a) に示す浮遊砂濃度分布を、各位相について浮遊砂雲が存在する範囲すべてについて積分することにより、底質の全浮遊量を算定することができる。図-4 に結果を、幅 1 cm あたり質量 (g/cm) を用いて表面波形とともに示してある。図より渦発生直後に急激に浮遊砂量が増大し、以後しだいに浮遊砂が沈降することにより浮遊量が減少する様子がわかる。

以上の観測結果は砕波による底質の浮遊沈降過程を 1) 大規模渦による浮遊過程、2) 乱流中での沈降過程、に分けて取り扱うことの妥当性を支持しており、以下ではそれぞれの過程のモデル化について考察を加える。

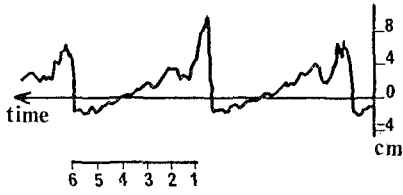
### 4. 底質運動のモデル化

砕波帯内浮遊漂砂の地形変化への寄与をモデル化するには以下の 2 つの過程をそれぞれに評価することが必要となる。すなわち

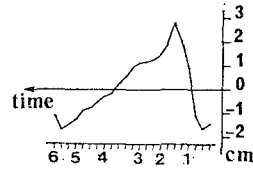
- 1) 砕波の agitation による底質の浮遊過程
- 2) 砕波帯内の乱れを伴う流速場での底質の拡散及び沈降過程

である。

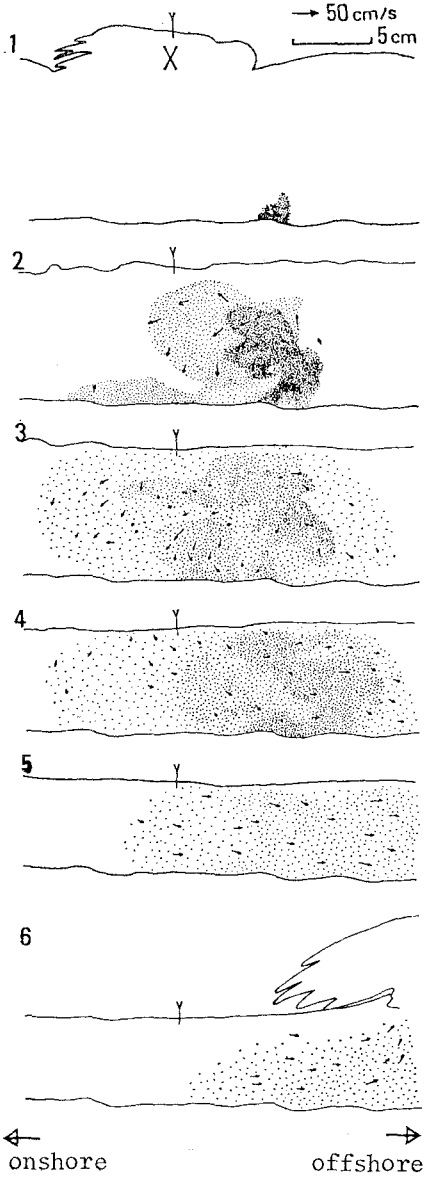
従来漂砂量式はその大半が波による底面付近の軌道



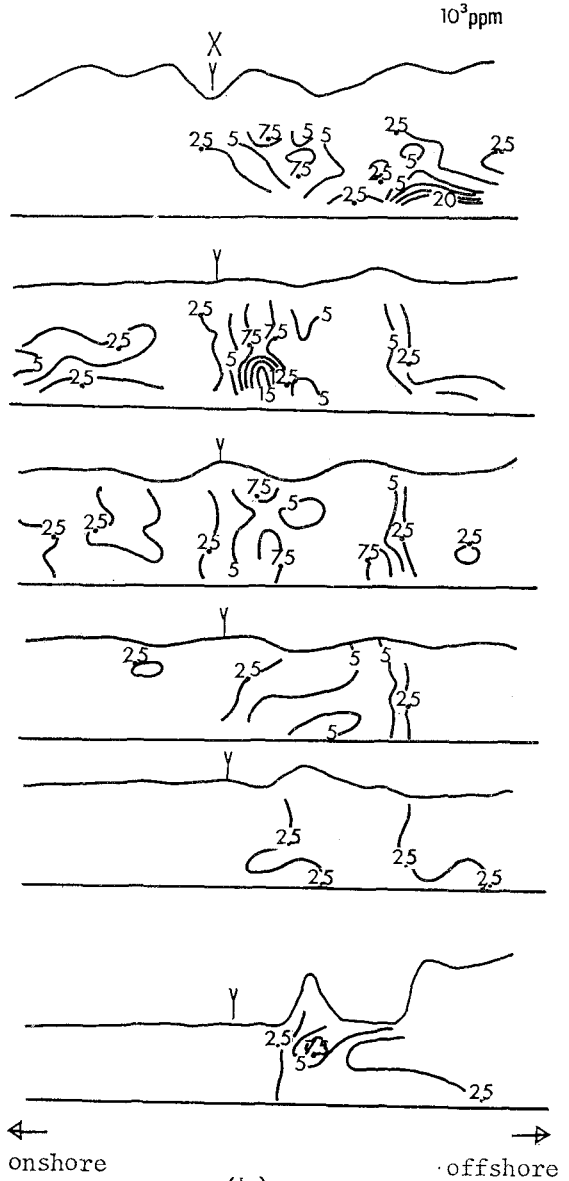
(a') SURFACE PROFILE AT POINT X



(b') SURFACE PROFILE AT POINT X



(a)



(b)

図-3 浮遊底質の運動と濃度分布

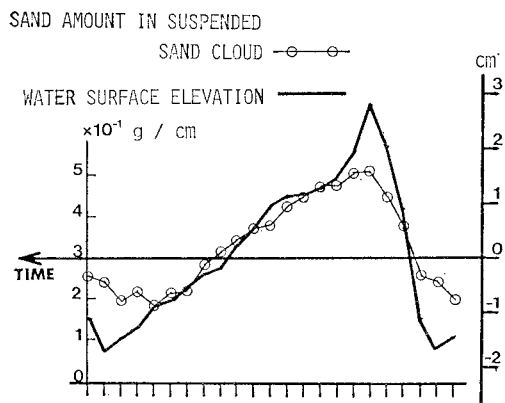


図-4 底質浮遊量の時間変化

流速による底面の摩擦応力にその基礎をおいていた。一方、砕波の agitation による底質の浮遊量を考えるとき、波の plunging によって生じる大規模渦の大きさ、渦の底面に与える影響についてはいづれも十分な情報が得られてはいない。そこで現段階では Nielsen<sup>7)</sup> が砂連上の浮遊砂の解析に用いているような底質の飛び出し率を与える pick up function  $f$  を考える。ここでは  $f$  の関数形を次式のように仮定して 1) の過程をモデル化する。

$$f(t) = A \sin(2\omega t + \varphi) \quad (2)$$

ただし  $f(t) > 0$ ,  $0 \leq \omega t + \frac{\varphi}{2} \leq \pi$ , のみを考える。

ここで  $A$ : 実験によって定める係数,  $\omega$ : 角周波数,  $\varphi$ : 位相差である。 $A$  は前述したように大規模渦の大きさ、その底面に与える影響などによるため、一般的に定めるのは容易ではない。

砕波によって発生した大規模渦が底面に達した段階で底面の境界層から上方に、ある初速度  $v_0(t)$  をもって砂粒子が運動を開始する。運動を開始する砂粒子数は式 (2) に示すような時間変化をし、表面波形、水深、底質特性によって変化するが、例えば大規模渦の作用下での沈降する粒子数、すなわち上記 1) の浮遊過程における沈降粒子を無視すれば 図-4 の曲線の傾きで定数  $A$  を評価できる。次に、浮遊した砂粒子の運動については、筆者ら<sup>2)</sup> が取り扱っているように、一つ一つの砂粒子について、乱流中での流体力を求め、その運動を追跡することが考えられる。しかしながら流体力係数の評価法に問題があるため、ここでは砂粒子の運動が水粒子の運動に底質沈降速度をたしたもので近似できると考えた。この方法は Nielsen<sup>9)</sup> が浮遊砂の運動を解析するにあたり第 0 次近似 (zero-order solution) と呼んでいるものであるが、Nielsen<sup>9)</sup> も指摘しているように砂粒子の運動を追跡するには充分有効な方法である。さらに流速の分布には、三村ら<sup>8)</sup> のホットフィルム流速計による流速測定結果を用いた。すなわち、空間の格子点で時系列的

に与えられた位相平均流速、鉛直方向乱れ、水平方向乱れを用いて、各点、各位相での位相平均流速、乱れ成分を空間的及び時間的な線形補間法によって算定した。乱れ流速成分は、正規乱数を発生させ乱れ強度をかけあわせることによって求めた。

本研究の実験条件 B-1 と三村ら<sup>8)</sup> の実験条件は異なっているが、いづれの実験も巻き波型砕波の突っ込みによって生じる渦の作用が支配的な領域を計測の対照としており、このような領域における数値解析の可能性を検討するという意味で以上のような試みは許容されると思われる。

図-5 に上記の手順によって求めた浮遊砂分布のシミュレーション例を示す。計算に当たっては底面から 4 cm 以下の砂粒子は bed load として除いて考えている。図より浮遊砂が拡散しつつ移動していく様子が再現できていることがわかる。また 図-6 に示したのは一周期間の

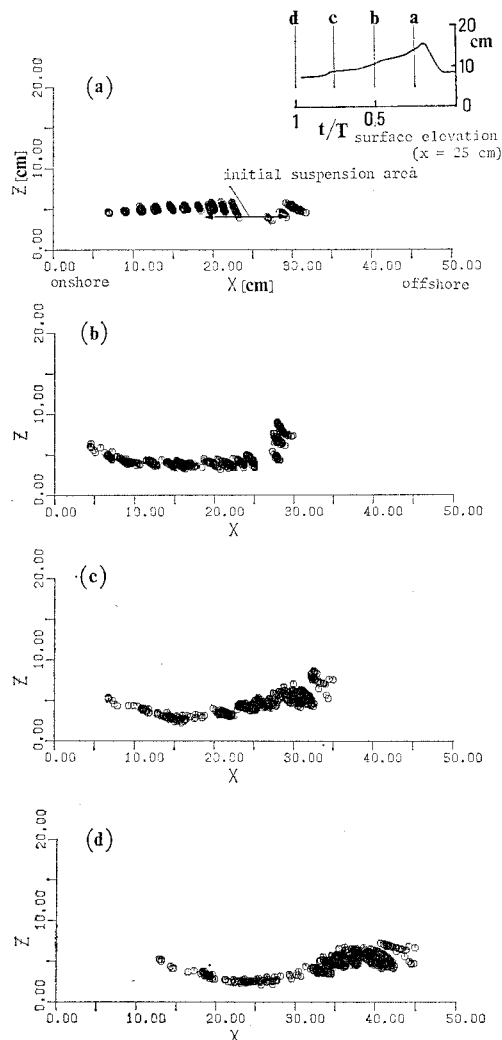


図-5 実測流速を用いた浮遊砂分布シミュレーションの例

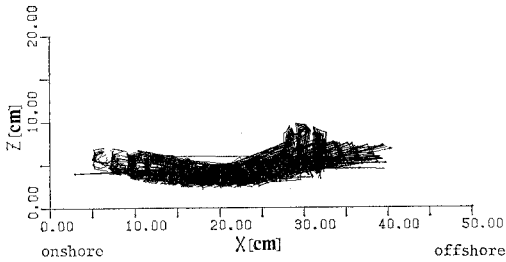


図-6 砂粒子運動の軌跡

浮遊砂の軌跡を図化したものであり図中の線の分布の濃淡は一周平均の濃度に対応している。この図からも浮遊砂がその発生領域からしだいに主として乱れの作用によって拡散しつつ移動していく様子を読みとることができる。

## 5. 結 論

巻き波型砕波による底質の浮遊現象について実験室での観測を行ない、それに基づくモデル化を行った。主要な結論は以下のようである。

- 1) 砕波による底質浮遊の発生条件は、沖波波形勾配と底面勾配によって整理できるが、従来の巻き波型砕波の発生領域に比較すると、かなり大きいイリバーレン数の範囲に及ぶ。
- 2) 浮遊砂濃度の計測に基づいて、底質の飛び出し率の関数形を与えその係数を定める方法について考察を加えた。本方法により、底質の飛び出し率が計算できる。
- 3) 浮遊砂運動追跡シミュレーションモデルに実測流

速を入力して浮遊砂運動を計算した。その結果が現象の傾向と一致することを確認した。

最後に、室内実験に共同で参加された樋口明彦氏（現五洋建設）に感謝の意を表する。また本研究は文部省科学研究費奨励研究 A (No. 59750405 代表者：柴山知也) による研究成果である。

## 参 考 文 献

- 1) Dean, R. G.: Heuristic model of sand transport in the surf zone, Proc. Conf. on Engineering Dynamics in the Surf Zone, pp. 208~214, 1973.
- 2) 柴山知也・堀川清司：砕波による底質の浮遊と侵食型海浜の形成機構に関する研究，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 227~231, 1981.
- 3) 酒井哲郎・内田雅博：巻き波型砕波による乱れと底質浮遊機構，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 296~300, 1984.
- 4) 樫木 亨・岩田好一郎：周波数特性からみた砕波後の波の変形に関する一考察，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 81~86, 1975.
- 5) Battjes, J. A.: Surf similarity, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., pp. 466~480, 1974.
- 6) 柴山知也・樋口明彦・堀川清司：砕波による底質の浮遊，第39回土木学会年次学術講演会概要集，第2部，pp. 183~184, 1984.
- 7) Nielsen, P.: Some basic concepts of wave sediment transport, Technical Univ. of Denmark, Series Paper No. 20, 160 p., 1979.
- 8) 三村信男・岡安章夫・柴山知也・Kamronrithisorn, P.: Plunging 砕波によって発生する砕波帯内流速場の構造，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 11~14, 1984.
- 9) Nielsen, P.: On the motion of suspended sand particles, J.G.R. Vol. 89, No. C1, pp. 616~626, 1984.