

二次元海浜変形予測手法の実験による検討

柴山 知也*, 堀川 清司**, 矢吹 信喜***, 半田 真一****

1. はじめに

波による砂浜海岸の地形変化は通常、汀線に直角方向の変化（二次元変化）と沿岸方向の変化とに分けて論じられている。本論文では、海浜断面の季節変化に相当する二次元地形変化の機構とその予測について考察する。二次元海浜変形の数値予測モデルとしては、既に Shibayama-Horikawa モデル¹⁾, Sunamura モデル²⁾, Mizuguchi モデル³⁾ が提案されているが、いずれも変化機構の細部にわたって説明するには到っていない。そこで本論文では筆者らの従来の研究結果^{4), 5)} に新たな実験結果を加えて、筆者らの数値予測モデルをより現実近く予測するように改良するとともに、別途行なった実験によってそのモデルの妥当性を検討する。

2. 対称振動流における底質移動量式

正弦振動流について柴山・堀川⁴⁾ は波動水路、振動流水槽、現地海浜での観測結果に基づいて砂移動の形式を5つに分類し、更にそれぞれの形式について、図-1に

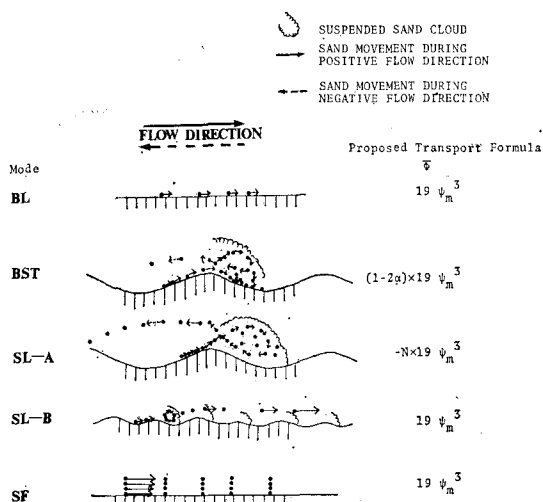


図-1 底質移動機構の分類と半周期平均の移動量式

* 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 電源開発株式会社

**** 正会員 日本国有鉄道

示すような半周期平均の底質移動量式を提案した。図で

$$\bar{\phi} = \bar{q}/wd \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\phi_m = f_w u_b^2 / [2(s-1)gd] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\bar{q}$: 半周期平均体積漂砂量, w : 底質沈降速度, d : 底質粒径, f_w : Jonsson の底面摩擦係数, u_b : 底面流速振幅, s : 底質比重 である。また α は順流時に動きだした砂のうち渦の作用によって逆方向に移動するものの割合を表わし, N は浮遊砂が砂連何波長分移動するかの距離を表わす。これら5つの移動形式の生じる条件は図-2に示すように Shields 数 ϕ_m と浮遊砂移動距離を代

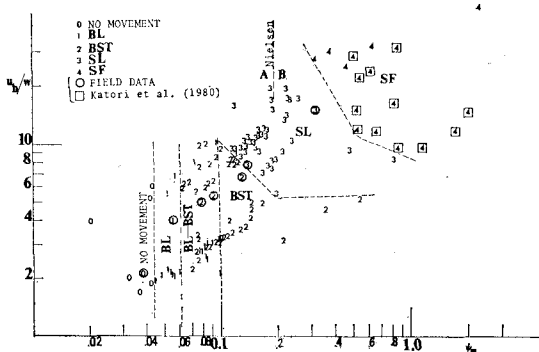


図-2 底質移動機構の整理

表するパラメータ u_b/w によって整理される。本論文での数値予測には上記の砂移動量式を用いる。

3. 有限振幅性をもつ流速場での砂移動量

2. の移動量式を移動床斜面における現象に拡張する。特に砂連上の浮遊砂雲の形成に及ぼす流速の有限振幅性の効果を検討するために実験Aを行なった。実験Aには任意の流速時間波形を入力することが可能な振動流装置を用い、流速の有限振幅性が底質の移動機構に対してどのような影響を及ぼすかという点に注目して実験を行なった。すなわち、Stokes 波の第3近似解に対応する底面流速波形を入力し、形成される砂連形状の非対称性及び底質の移動機構の非対称性について観測した。

底質材料としては、粒径 0.2mm, 比重 2.65 の豊浦標準砂及び粒径 2mm, 比重 1.42 のプラスチック粒を

用いた。振動流は周期 1.5 s~5 s, 振幅 3 cm~30 cm の範囲で Stokes 波の第 3 近似解で与えられる有限振幅性をもつ流速時間波形とした。砂連が十分に発達したときの砂連形状をガラス面から記録し, さらに 8 mm カメラ, 35 mm カメラで撮影したフィルムから砂連近傍に形成される浮遊砂雲の断面積を計測した。図-3 に砂連形状の非対称性と流速の有限振幅性の関係を, また 図-4 に形成される浮遊砂雲断面積と流速の有限振幅性の関係を示す。

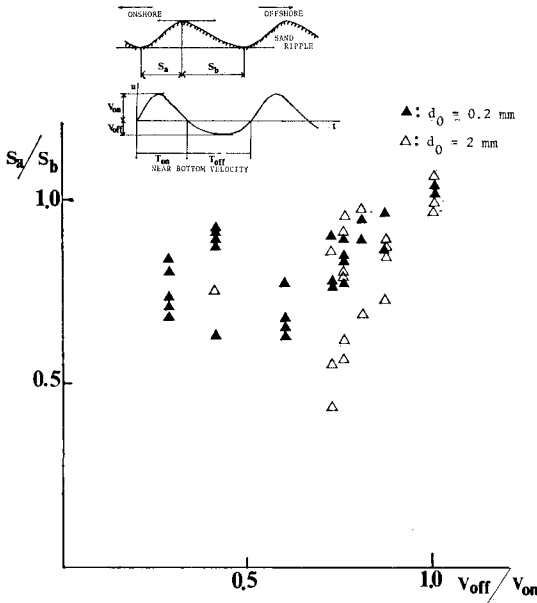


図-3 流速時間波形の有限振幅性と砂連の非対称性

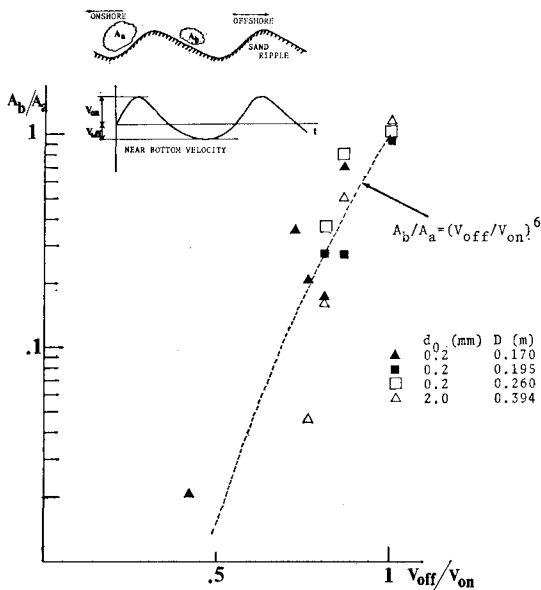


図-4 流速時間波形の有限振幅性と浮遊砂雲の非対称性

図-3 より, 流速の有限振幅性を表わすパラメータ V_{off}/V_{on} が 0.7 程度までは流速の有限振幅性が大きくなるにつれて砂連の岸側斜面が沖側斜面に比して急峻となり, 砂連形状の非対称性が大きくなることがわかる。また 図-4 より, 流速の有限振幅性が大きくなるにつれて岸向き流速時に形成される浮遊砂雲が沖向き流速時に形成される浮遊砂雲に比して著しく大きくなることがわかる。これは底面付近の流速が有限振幅性をおびるにつれて, 形成される非対称な形状の砂連との相互作用もあって, 底質移動機構は著しく非対称となり, 沖向き流速時に形成される浮遊砂雲が急速に消滅するためである。斜面上で底面に砂連が形成されず, 底質が掃流状態で運ばれる場合においても, 非対称流速場の作用により岸向き流速時の移動が沖向き時に比して著しく卓越することが報告されている¹⁾。これらの事実は 図-1 に示すように半周期平均漂砂量が流速の 6 乗に比例するとすれば, 流速の微小な有限振幅性によっても岸沖方向の底質移動整合著しく非対称となり, net の移動を生じることとも量がしている。図-4 に参考として $(V_{off}/V_{on})^6 = (A_b/A_a)$ の線を示してある。

4. 二次元海浜変形の数値予測モデル

以下に示す仮定のもとに 図-5 に示すような過程で二次元海浜変形の数値予測を行なう。

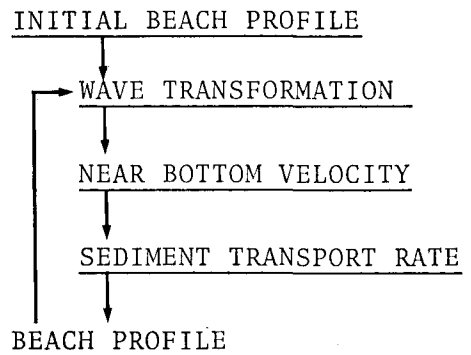


図-5 数値予測モデルの計算手順

1) 波高変化……沖波の条件から水深変化に応じて微小振幅波理論を用いて算定する。砕波の条件は次のように表わす。

$$H_B/L_B = 0.142 \tanh \left[(0.8 + 5i) \frac{2\pi h_B}{L_B} \right] \dots (3)$$

ここで H_B : 砕波波高, L_B : 砕波波長, i : 底面勾配 である。砕波後の波高は run-up の最大到達点まで直線的に減小するものとする。run-up の高さは次に示す Hunt の式を用いて求める。

$$R = 1.01 i \sqrt{H_0 L_0} \dots (4)$$

ここで R : 静水面よりの遡上高さ である。

2) 底面流速……1) で求めた波高とその点での水深を

用いて微小振幅波理論によって算定する。

3) 漂砂量……2. の漂砂量式を用いて算定する。また 3. の考察に基づいて、岸向き流速時に動きだした砂の net の移動に及ぼす影響は沖向き流速時に動きだした砂の影響に比して卓越するとして、計算の対象を岸向き流速時に動きだす砂の移動量に絞った。図-1 の BST モードにおける α の値は図-2 において BST の存在する範囲に対して、最大流速時 Shields 数に比例させ 0 から 1 まで変化させた。上記はかなり単純化した算定法ではあるが、移動床上で把握されている物理現象の観測精度と十分に整合したものである。

5. 予測モデルの検証実験との比較

上記の二次元海浜変形予測モデルの妥当性を検討するために中型造波水路を用いて二次元移動床実験(実験B)を行なった。実験Bでは侵食型、堆積型の典型的な地形が形成されていく変化の過程の中で、波がどのように変化するか、また底面付近の水粒子速度がどのように変化して地形との相互作用を起こすかという点に注目して実験を行なった。測定項目は地形、砕波点付近の浮遊砂濃度、底面付近の流速、表面波形の時間的変化である。底面付近の流速測定には、移動床のために流速計を用いることが困難であるので、中立浮子を投入して、スリット光源を用いて撮影面を定め、16mm カメラで撮影することによって求めた。表-1 に実験条件を示す。

表-1 実験条件(実験B)

Case No.	周期 T (s)	沖波波高 H_0 (cm)	沖波波形勾配 H_0/L_0	底質粒径 d_0 (mm)	初期勾配 i_0	堀川らの定数 C
1	1.5	10.6	0.036	0.2	0.1	11.3
2	1.2	6.2	0.028	0.2	0.05	6.3
3	1.5	9.3	0.027	0.7	0.1	4.4

図-6 に中立浮子法によって求めた底面付近の流速の時間波形の例を示す。図に示されているように、瞬間流速は波動成分と定常流成分の和として求められている。移動床上で浮遊砂が存在する条件下で精度よく測定しうる流速計⁷⁾が開発されるまで、この方法は有用な手段である。図-7 に各ケースにおける地形変化を示す。

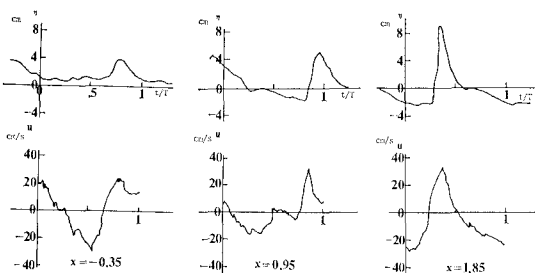


図-6 流速測定の例 (Case 1, 7.5 時間後, x は汀線よりの距離, η : 水位, u : 流速)

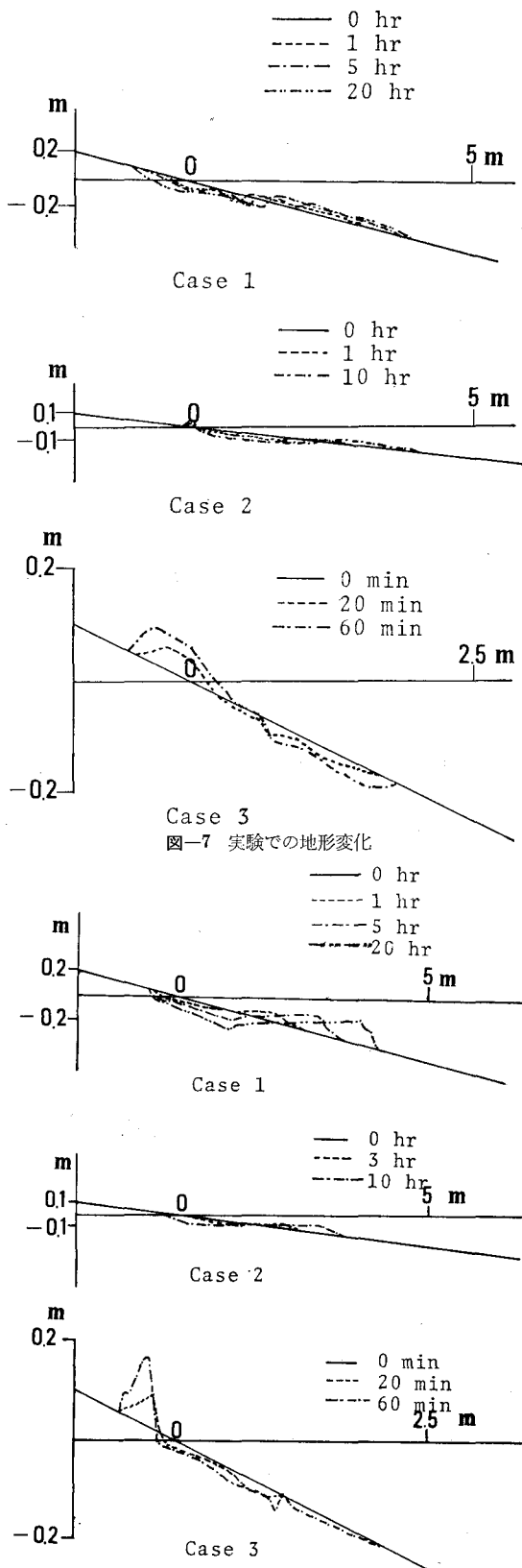


図-8 数値予測による地形変化

4. に示した数値予測モデルの妥当性を検討するために、本実験に用いた底質・初期地形・沖波の条件を与えて数値予測を行ない、実験結果と比較した。ただし数値予測の際、正弦振動流の仮定から著しくはずれる砕波帯内での移動形式の決定には図-2よりの結果を実験室での情報により、修正して用いた。図-8には図-7の実験結果に対応する数値予測による地形変化の結果を示す。これらの図の比較により、2つの結果はかなり良く一致していることがわかる。しかし、例えば Case 1 の比較的初期における砕波点付近の地形変化は、現実には plunging 砕波による horizontal roller の発生によって浮遊する底質に起因しているのに対して、数値モデルでは、沖浜帯と同様に正弦的に変化する底面流速による摩擦から地形変化を計算しているというように、因果関係が必ずしも明らかでないと考えられる部分もある。

図-9 及び 図-10 に例として Case 1 及び Case 3 における波高・底面流速・半周期平均無次元漂砂量・地形の

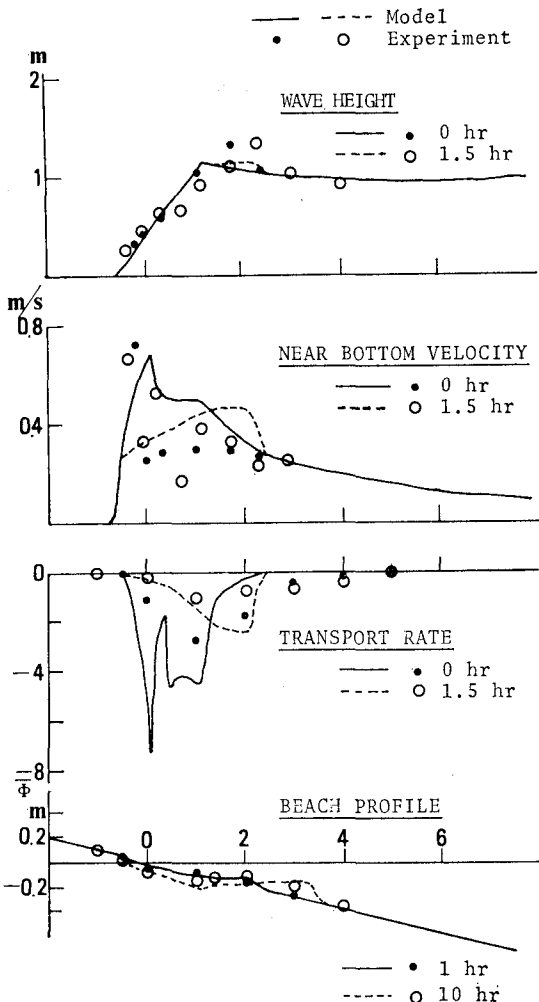


図-9 数値予測と実験の比較の例 (Case 1)

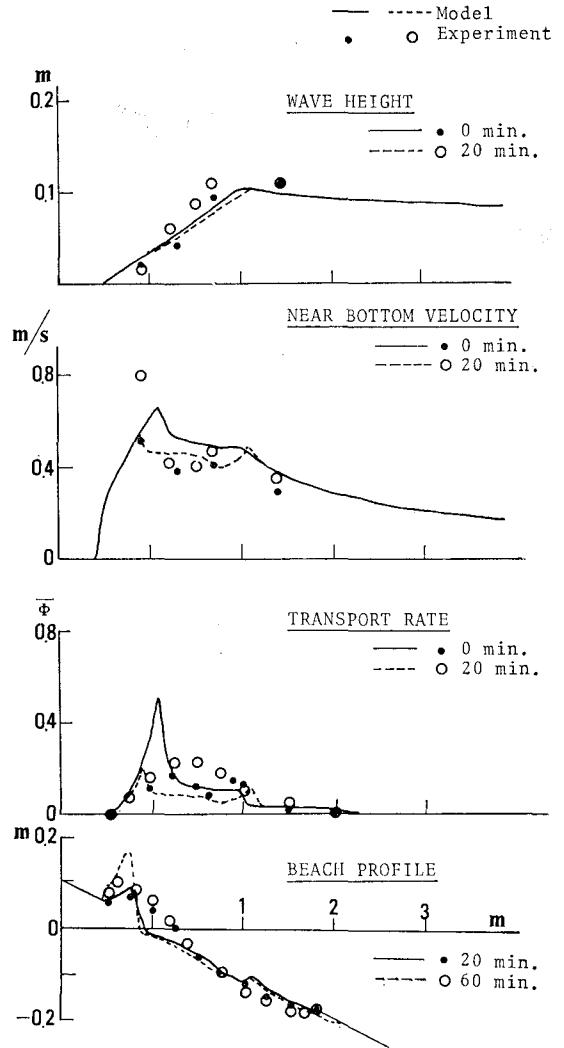


図-10 数値予測と実験の比較の例 (Case 3)

時間的変化を示す。いずれの場合においても、砕波帯内での流速の実験値がかなり場所的に変化していることがわかる。これは移動床上における砕波帯内の底面付近の流速を予測することの困難さを表わしている。しかし、これは 16mm 映画による測定は流速読み取りにかなりの多量の作業を伴うために、今回は各点での測定が一周期分に限られ、各位相での平均をとる等の操作が行なえなかったことにも起因している。

数値モデルの仮定の単純さにもかかわらず、侵食型、堆積型それぞれの海浜断面変化における bar や step の形成される様子などは比較的良く予測できている。

6. 砕波点付近の砂移動

数値モデルと現実の物理現象の異なる部分、すなわち砕波点近傍の物理現象を Case 1 について実験的に考察した。砕波点近傍については筆者らがすでに指摘してい

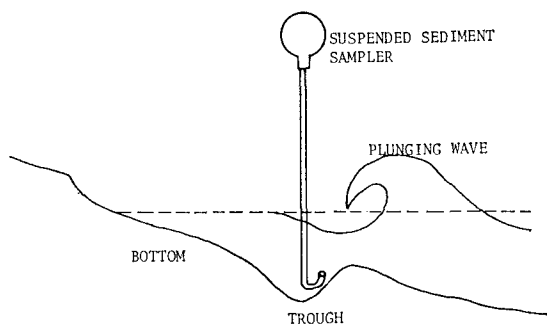


図-11 採水器とその設置方法

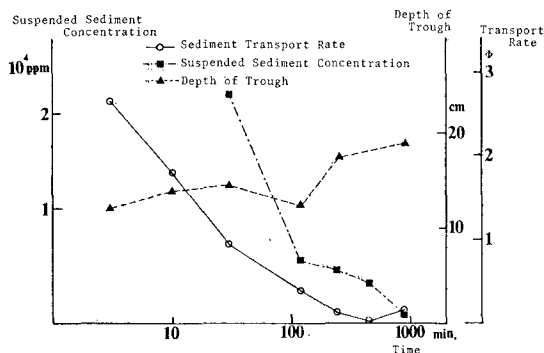


図-12 波の plunging 点における浮遊砂濃度, net の漂砂量, trough の深さの時間変化

るように⁸⁾、波の plunging によって発生する渦の作用による浮遊砂が主要な原因と考えられる。そこで浮遊砂濃度と地形の時間的な変化について考察した。一般に plunging 砕波では気泡の混入を伴うために、光学式濃度計の使用は制限を受ける。そこで今回は 図-11 に示すような採水装置を用いて、浮遊砂濃度を計測した。図-12 に浮遊砂濃度、地形変化から逆算した底質移動量、trough の深さの時間的な変化を示す。その結果、時間の経過とともに、trough が深く掘られるにつれて、浮遊砂濃度は急速に減少し、その場所における net の移動量も同様に減少していくことがわかった。よって plunging 砕波による底質の net の移動量は初期には著しく大きいものの時間の経過とともに急速に減少し、二次元海浜変形に対する効果は小さくなる。

7. 結 論

以上に述べてきたように、実験室での情報をもとに筆者らの二次元海浜変形の数値モデルを改良し、新たな実験によってその妥当性の検証を行なった。本論文の結論は以下の通りである。

- 1) 底面付近の流速場の有限振幅性が強くなると、形成される砂連形状の非対称性との相互作用により、底質の移動量は著しく非対称となる。この移動量の非対称性は、本論で用いた底質移動量が流速の 6 乗に比例する底質移動量式とも矛盾しない。
- 2) 筆者らの二次元海浜変形予測数値モデルは実験室での移動床斜面実験の結果を比較的良く説明しており、特に初期の状態及び沖浜帯における現象とよく一致している。
- 3) 波の plunging による底質の浮遊の地形変化への効果を考察した。その効果は初期の状態では重要なものであるが時間の経過とともに急速に減衰することがわかった。

以上に述べた数値予測モデルは、現時点における二次元造波水路を用いた移動床実験における底面付近の底質移動機構の観測技術の精度にほぼ対応するものである。今後はより精度の高い測定技術の開発によって、物理現象の把握に努め、その結果を用いて数値モデルを精度の良いものに改めていく必要がある。

最後に本研究の一部は文部省科学研究費補助金（奨励研究 A）の援助により行なったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Shibayama, T. and K. Horikawa: Bed load measurement and prediction of two-dimensional beach transformation, Coastal Engg. in Japan, Vol. 23, pp. 179~190, 1980.
- 2) Sunamura, T.: A laboratory study of offshore transport of sediment and a model for eroding beaches, Proc. 17th ICCE, pp. 1051~1069, 1980.
- 3) Mizuguchi, M. and M. Mori: Modeling of two-dimensional beach transformation due to waves, Coastal Engg. in Japan, Vol. 24, pp. 155~170, 1981.
- 4) 柴山知也・堀川清司: 対称波動場における底質移動機構の分類, 第 36 回土木学会年次学術講演会概要集 II, pp. 825~826, 1981.
- 5) Shibayama, T. and K. Horikawa: Laboratory study on sediment transport mechanism due to wave action, Proc. JSCE, No. 296, pp. 131~142, 1980.
- 6) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋: 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 329~334, 1975.
- 7) 例えば, 柴山知也・渡辺 晃・堀川清司: 超音波ドップラー方式による漂砂量計の試用, 第 37 回土木学会年次学術講演会概要集 II, 1982.
- 8) 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.