

波による掃流砂量と堆積型海浜の形成機構に関する研究

柴 山 知 也*・堀 川 清 司**

表-1 実験ケース (実験 A)

Run No.	周 期 T (s)	波 高 H (cm)	静水時水深 d (cm)
A-1	0.94	9.0	16.7
A-2	0.96	9.2	16.7
A-3	1.00	9.4	16.7
A-4	1.16	9.6	16.7
A-5	1.25	8.2	16.7
A-6	1.29	9.4	16.7
A-7	0.98	9.1	15.5
A-8	1.05	8.1	15.5
A-9	1.30	8.7	15.4
A-10	1.32	10.7	15.4
A-11	1.40	9.6	15.5
A-12	1.41	7.1	15.5
A-13	1.44	8.5	15.5

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示されるような二次元地形の変化機構について考察を加える。漂砂は、従来から移動形式によって浮遊漂砂と掃流漂砂に分けられている。底面に砂れんが形成され、砂れん近傍に発生する浮遊漂砂が卓越するような場合については、既に筆者らは net の移動量を与える式を提案している¹⁾ので、ここでは底面に砂れんが形成されず、砂が掃流状態で運動している場合に考察の対象を絞る。一方、海浜の岸沖漂砂による断面変化に関する研究については、最近二次元実験の地形変化から漂砂量を推定し、その空間分布、時間的変化を論じた研究が行われているが²⁾、逆に漂砂量から地形変化の機構を論じたものは、堀川らの研究³⁾に限られるようである。そこで本論文では、まず掃流砂量公式について検討を加える。さらに求められた掃流砂量公式を参考にして、堆積型海浜の砂移動機構及び堆積型海浜の形成機構について論じる。

2. 波による掃流砂量

(1) 実験装置と実験方法

実験 A では波の各位相における表面波形、底面付近の流速及び掃流砂量を同時に計測して比較することを目的とした。実験条件を 表-1 に示す。底質には粒径が 0.7 mm、比重 2.65 の相馬標準砂を用いた。各ケースとも水路の中央部に長さ 0.8 m にわたって水路幅一杯に 0.04 m の厚さに砂を敷きつめて、波を作用させた。実験を通じて底面に砂れんは形成されず、砂は掃流砂として運動した。底面附近の水粒子速度を測定するために、粒径 2 mm、比重 1.02 のポリスチレン球を投入した。また、掃流砂量を計測するために、局所洗掘を防止するためのスカートをつけた平板を掃流砂測定装置として、底面に設置した。実験装置の概略を 図-1 に示す。図に示されるように、水粒子速度を代表するポリスチレン球

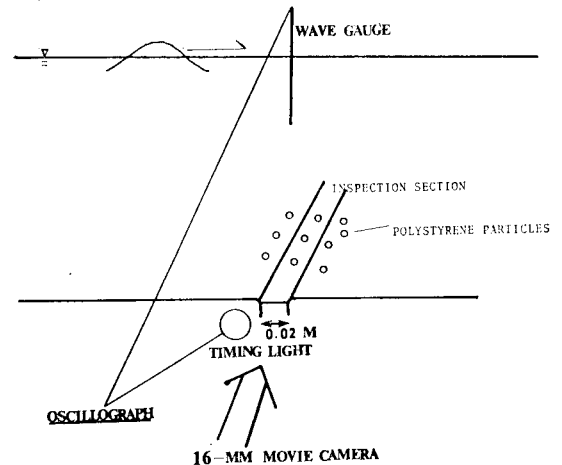


図-1 実験装置 (実験 A)

の動き、及び掃流砂量束 (flux) を代表する掃流砂測定装置と砂面の境界を横切る砂粒数を、16 mm 撮影機で 48 frames/s の速度を用いて撮影することにより、底面流速、掃流砂量をそれぞれ求めた。測定地点における表面波形は容量式波高計で求め、タイミングライトの使用によって底面流速、掃流砂量の測定と同期させた。測定を通じて掃流砂測定装置周辺に局所的な洗掘は起こらず、地形も顕著な変化はなかった。また、本実験の範囲では砂の運動は表面から 1~2 粒子層厚に限られており、目視によっても、測定装置と砂面の境界を横切る掃

* 学生会員 工修 東京大学大学院工学系研究科

** 正 会 員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

掃流砂量と、測定装置を設置しない場合の掃流砂量の間には違いは見られなかった。以上より今回の測定は信頼し得るものと思われる。

(2) 掃流砂量公式の導入

Madsen・Grant⁴⁾ は, Kalkanis, Abou-Seia, Manohar らの振動板上での実験結果に基づいて, 掃流砂が卓越する条件下での半周期平均の無次元漂砂量を算定する式として, 流速が正弦的に変化する場合について, 次式を提案した。

$$\bar{\phi} = 12.5 \phi_m^3 \dots\dots\dots (1)$$

ここで, $\bar{\phi} = \bar{q}/wd_0$: 無次元漂砂量, $\phi_m = f_w u_m^2/[2(s-1) \cdot g d_0]$: Shields 数, $\bar{q}$: 半周期平均体積漂砂量, w : 底質沈降速度, s : 底質比重, d_0 : 底質粒径, f_w : Jonsson⁵⁾ の摩擦係数, u_m : 底面流速振幅, g : 重力加速度である。

この Madsen・Grant の解析は, 半周期分の合計として求められた漂砂量をデータとして導入されており, 流速変化の各位相における移動量に対する考察はなされていない。そこで本論文では波の各位相における移動量に関する実験室での観測から得られた知見をもとに, 若干の修正を加えることとする。

一方向定常流による掃流砂量についての Brown の公式を準定常の仮定の下に適用すると, 流速が変化する場合について

$$\phi(t) = 40 \phi^3(t) \dots\dots\dots (2)$$

を得る。ただし $\phi(t) = q(t)/wd_0$, $\phi(t) = f_w u(t)^2/[2(s-1) \cdot g d_0]$ である。ここで今回の実験で得られた知見, すなわち掃流砂として一度動き始めた砂粒子は流速が逆転するまで止まりにくいという事実を用いると, 式 (2) より流速が加速されている状態について

$$\phi(t) = 40 \phi^3(t) \dots\dots\dots (3)$$

また, 流速が減速されている状態について

$$\phi(t) = \phi_m \times u(t)/u_m \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。ここで ϕ_m は最大流速時の無次元漂砂量である。

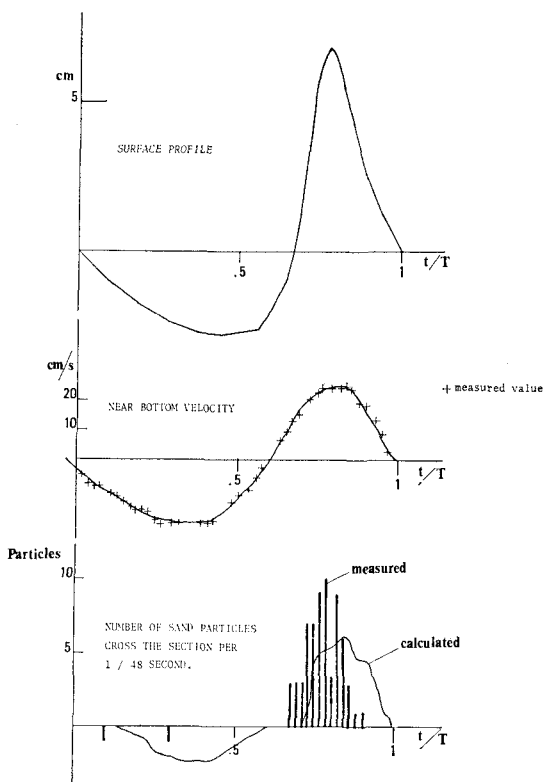
なお, Madsen・Grant にならって底面流速が正弦的に変化するとして式 (3), (4) を適用すると, 半周期平均の無次元漂砂量として式 (1) の係数を 19 とした式が得られる。

(3) 実験結果との比較

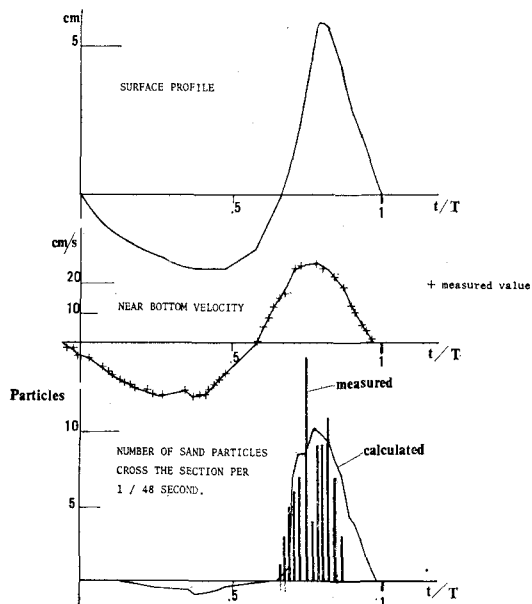
実験結果の一部を図-2 (a)~(c) に示す。図において, 上部の図は一周期内の表面波形の時間的変化を示し, 中央部の図は表面波形に対応するそれぞれの位相の底面付近の流速を示す。また下部の図において measured は, 1/48 秒すなわち 16 mm フィルム 1 コマ当りの時間に幅 2 cm の測定断面を通過した砂粒子数で掃流砂量束 (flux) を表わしている。図中の calculated は観測された底面流速を式 (3) 及び (4) に代入して求めた

ものであり, Shibayama⁶⁾ の結果により, 底面流速が加速される場合, Shields 数 0.05 以下の場合には移動が開始しないとして掃流砂量を 0 とした。

図に示されるように, 表面波形と底面流速の間には位

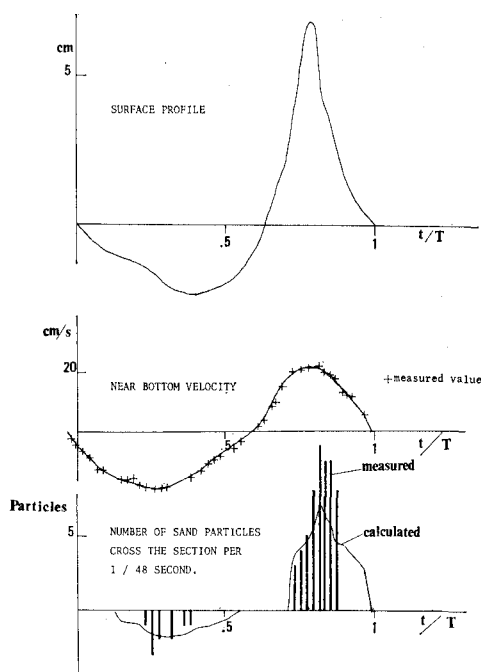


(a) Case A-4



(b) Case A-5

図-2 表面波形, 底面流速と掃流砂量



(c) Case A-7

図-2 (つづき)

相のずれが観測された。また掃流砂量束 (flux) について計算値と実測値は比較的よい一致を示しているが、流速の減速期における計算値は実測値を多少上まわる傾向がある。これは一度動きはじめた砂粒子の一部は流速が逆転すると停止するためと思われる。

3. 堆積型海浜での底質移動機構及び 堆積型海浜の形成機構

(1) 堆積型海浜における底質移動機構の分類

筆者らは長さ 25 m, 深さ 1.5 m, 幅 0.8 m の二次元造波水路における実験 B 及び東京都三宅村錆ヶ浜海岸における現地観察を行なって、堆積型海浜での底質移動機構の分類を試みた。実験室においては、各ケースとも所定の一様勾配に底質を敷きならした後に波を作用させ、一定時間ごとに地形の縦断形状の測定を行い、また

表-2 実験ケース (実験 B) と現地条件

Run No.	周期 T (s)	沖波波高 H_0 (cm)	初期勾配 i_0	実験時間 Run Time (hr)	底質粒径 d_0 (mm)	堀川らの数 定 C
B-1	1.5	9.3	0.1	2	0.7	4.2
B-2	1.7	5.4	0.05	2	0.7	1.9
B-3	2.2	4.5	0.05	2	0.7	1.3

Field No.	周期 T (s)	水深 1 m での波高 H_1 (cm)	底質粒径 d_0 (mm)	観測日 Date	堀川らの数 定 C
F-1	5.0	40	2	Nov. 3, 1979	3.9
F-2	7.0~8.0	40~60	10	May 24, 1980	1.0~1.3

底質移動機構の観察を 16 mm 撮影機もしくは 8 mm 撮影機を用いて行なった。実験条件を表-2 に示す。

一方現地海岸においては、目視、水中写真、水中 8 mm 映画の撮影等によって移動機構の観察を行なった。波高及び周期については、波高は zero-up cross 法、周期は前の峰の通過から注目した波の峰の通過までの時間を測る方法により、観察した波のそれぞれの波高及び周期を求めた。なお錆ヶ浜海岸は底質砂粒が 0.1~1 cm と大きいので、一年を通じて堆積型の海浜が形成されている場合が多い。現地での条件を表-2 に示す。表に堀川らによる海浜変形パターンを分類する無次元パラメータ

$$C = (H_0/L_0)(i_0)^{0.27}(d/L_0)^{-0.67} \dots\dots\dots (5)$$

を付した。ただし現地海岸における i_0 には汀線と移動限界水深を目視で定め、その間の勾配をとっている。いずれの場合にも C は 4 程度までであり、堀川らによるタイプ III の海浜すなわち堆積型海浜の場合に相当している。

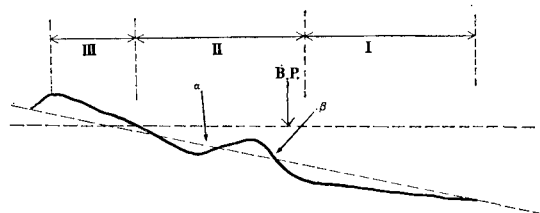


図-3 堆積型海浜の領域分け

以上の実験及び現地観察の結果、堆積型海浜は底質移動機構によって、図-3 に示すような 3 つの領域に分けて考えるのが妥当と思われる。すなわち

- ① 沖 浜 帯……底質は掃流状態で運動する。
- ② 砕 波 帯……掃流状態で運動する底質の他に砕波による乱れによって浮遊状態で運動する底質もある。
- ③ 寄せ波帯……底質が粒子の厚さ数層にわたって動かされており、いわゆる sheet flow 状態で砂が移動している。また勾配の影響による戻り流れの影響も強い。

以下にそれぞれの領域について検討を加える。

(2) 沖浜帯における移動量

沖浜帯においては第 2 節に示した掃流砂量公式の適用が可能であると考え、以下のような実験 C を行なった。実験 C では沖浜帯における底面流速を測定し、式 (3) 及び (4) を用いて net の無次元漂砂量を算定して地形

表-3 実験ケース (実験 C)

Run No.	周期 T (s)	沖波波高 H_0 (cm)	初期勾配 i_0	実験時間 Run Time (min)	測定間隔 Time Interval (min)
C-1	1.01	4.3	0.05	15	5
C-2	1.01	6.2	0.05	20	5
C-3	1.30	4.8	0.05	30	5
C-4	1.32	8.1	0.05	30	10

変化から求めた net の無次元漂砂量と比較した。実験 C は実験 A と同じ造波水路を用いて行ない、初期地形を一樣勾配斜面として一定時間 (5 分間もしくは 10 分間) ごとに地形変化を記録すると共に、砕波点より沖側に熱膜流速計を設置して一定時間ごとに流速の測定を行った。実験条件を表-3 に示し、実験装置の概略を図-4 に示す。実験を通じて沖浜帯に砂れんは形成されず、したがって浮遊状態の砂は沖浜帯には存在しなかった。また実験開始前に底質材料をよく水洗いしたため、実験中に水質が変わることもなかった。実験を通じて、沖浜帯では岸方向のみに底質は運ばれ、流速が沖方向に向かう時には砂は移動しなかった。流速の測定に当っては、流速計プローブを底面から 1.5 cm ほどの位置に設置し、水平方向の速度に比して鉛直方向の速度は無視できると考えた。これは水平方向の最大流速時には速度の

鉛直成分はなく、また水平方向最大流速が漂砂量算定に大きな意味をもつという点からも妥当である。

実験結果を図-5 に示す。図の横軸は計算された無次元漂砂量を表わし、流速の変化から式 (3) 及び (4) を用いて計算したものを時間平均したものである。計算に当たっては流速が岸方向に向かう時のみに砂が移動することから、流速の岸方向に向かう時間について時間平均をとった。ここで流速のサンプリング間隔は対象となる波について岸方向流速時間を 10 等分した。また、実験 A と同様に流速が加速されている場合、Shields 数が 0.05 以下では移動量は 0 とした。図の縦軸は地形変化から砂の連続式を用いて逆算した net の無次元漂砂量であり、やはり流速が岸方向に向かう時間について平均化されている。図中で実線は両者が一致する線を示し、破線はそれぞれ一方が他方の 1/2 となる範囲を示している。図から第 2 節で求めた掃流砂量の式が沖浜帯の砂移動量を比較的良好に表現していると考えられる。

(3) 砕波帯における移動形式

実験室及び現地海岸における観察から、この領域においては、底面にそって運ばれる掃流砂の他に、砕波による plunging point における底質のまき上げ (図-3 の α の部分) の影響があると思われる。また、形成された step のすその部分に、戻り流れ時に発生する渦 (図-3 の β の部分) による砂の浮遊も観察された。図-6 に plunging point における砂の浮遊状態の観察の例を示す。図中で左上の図は表面波形の変化を示している。図に示されるように plunging point で巻き上げられた砂がどの部分に落下するかという条件、すなわち Dean⁹⁾ によって指摘されているように、砕波による底質巻き上げ高と底質沈降速度及び底面流速の関係が浮遊した砂の移動方向を決定すると考えられる。地形変化から逆算して、この領域においても、実験 B 及び C を通じて掃流砂、浮遊砂の和としては、砂は岸向きに移動していた。

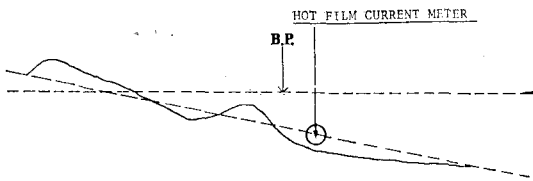


図-4 実験装置 (実験 C)

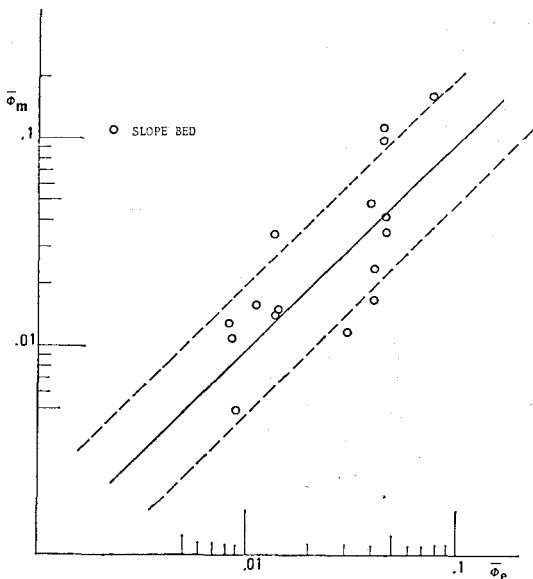


図-5 沖浜帯における掃流砂量の実験値と算定値の比較

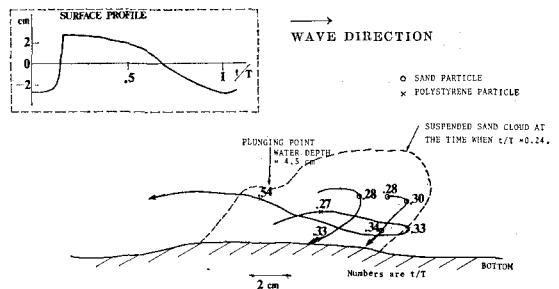


図-6 Plunging Point における砂の浮遊の例 (Case B-2, 45 分後)

(4) 寄せ波帯 (swash zone)

この領域では砂の運動は底面の表層から砂粒子の大きさ数層にわたる範囲でおこり、いわゆる sheet flow 状態となっている。また、この領域では特に底面の勾配が 0.1~0.2 程度と大きいために、移動量の式に底面勾配の影響を加える必要があると思われる。水平床における sheet flow に関しては香取ら⁹⁾が詳細な実験的研究を行っており、彼らは水平床 sheet flow においても、式(1)に類似な関係が存在すると述べている。

(5) 堆積型海浜の形成機構

図-7(a)に例示されるような堆積型海浜断面は、定性的には以下のような機構により形成される。波が深海から浅海に進入するにつれて有限振幅性を増し、底面付近の流速場も非対称となり、また水深が浅くなるため、流速が増大して、岸方向の net の漂砂量が大きくなる。よって沖浜帯では砂が岸方向に移動し平均の砂面は低下することとなる。沖浜帯から運ばれた砂は、砕波帯及び寄せ波帯 (swash zone) でも岸向きに運ばれつつ堆積する。この時、初期の砕波点付近に step が形成される。以後 step のすそ部分で砕波が起こり、砕波点の変化は少ない。また 3.(3)に述べたような浮遊形式による砂の移動のために、砕波形式が plunging 型である場合 plunging point では砂面が低下する。図-7(b)に地形変化から連統方程式を用いて逆算した岸沖漂砂量分布の例を掲げる。また沖浜帯における砂面の低下、すなわち水深の増加によって底面付近の流速が小さくなると、沖浜帯における砂移動量はしだいに低下し、沖浜帯からの砂の供給がなくなり、堆積型海浜断面は平衡状態に近づく。同様に砕波帯、寄せ波帯においても底面勾配の影響

等により平衡状態に近づくと考えられるがこの点については次の機会にさらに検討を加えたい。

4. 結 論

掃流砂が卓越するような漂砂機構について実験及び現地での観察に基づいて簡単な考察を加えた。その結果以下の結論を得た。

- (1) 水平移動床実験において、波の各位相における掃流砂量を測定し、水面波形、底面流速と関連づけた。その結果、掃流砂量は一方向流れの場合の掃流砂量公式を変形することにより評価し得ることがわかった。
- (2) 上記(1)の掃流砂量公式は堆積型海浜の沖浜帯に適用することが可能である。また、砕波帯、寄せ波帯 (swash zone) での砂移動量については一層の検討を要する。

現地観察を行うにあたっては東京大学海洋調査探検部の諸君の協力を得た。また東京大学磯部雅彦助手には多くの助言を頂いた。記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Shibayama, T. and K. Horikawa: Laboratory study on sediment transport mechanism due to wave action, Proc. JSCE, No. 296, pp. 131~142, 1980.
- 2) 例えば、渡辺 晃・利穂吉彦・堀川清司: 二次元海浜変形と岸沖漂砂量分布, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 172~176, 1980.
榎木 享・出口一郎・岡田 学: 二次元海浜の砕波帯における漂砂移動について, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 167~171, 1980.
- 3) 堀川清司・砂村継夫・柴山知也: 二次元海浜変形に関する実験的研究—沖浜帯における漂砂量測定法—, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 170~174, 1977.
- 4) Madsen, O. S. and W. D. Grant: Sediment transport in the coastal environment, Report No. 209, R. M. Parsons Laboratory, M.I.T., 105 p., 1976.
- 5) Jonsson, I. G.: Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., ASCE, Vol. 1, pp. 127~148, 1966.
- 6) Shibayama, T.: Sediment transport and beach transformation due to waves, Tech. Report No. 1, Coastal Eng. Laboratory, University of Tokyo, 75 p., 1980.
- 7) 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.
- 8) Dean, R. G.: Heuristic models of sand transport in the surf zone, Proc. Conf. on Engineering Dynamics in the Surf Zone, pp. 208~214, 1973.
- 9) 香取完和・渡辺 晃・堀川清司: シートフロー状態の底質移動に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 202~206, 1980.

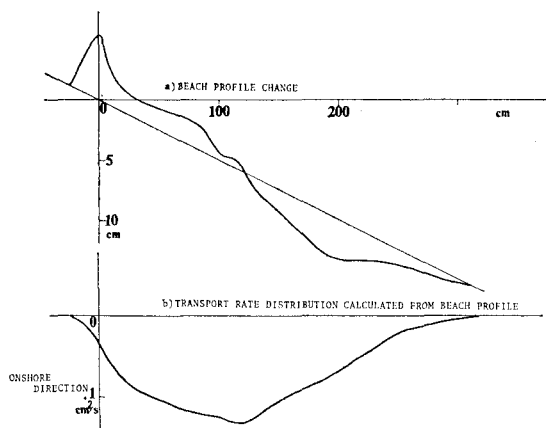


図-7 堆積型海浜の断面形状と岸沖漂砂量分布の例 (Case B-2, 60 分後)