

二次元海浜変形と岸沖漂砂量分布

渡 辺 晃*・利 穂 吉 彦**・堀 川 清 司***

1. 結 言

波による砂浜海岸の地形変化を予測するためには、与えられた条件、すなわち潮位・波浪・現地形・底質等の条件に対する漂砂量の場所的分布とその変動を知る必要がある。沿岸漂砂量ならびに汀線に直角方向の漂砂量をこれらの諸条件と関連づける試みは従来より数多くなされており、相当の成果が挙ってきたことは周知のことであるが、特に後者の岸沖漂砂量については、実用に供し得る一般的な算定式は得られていない。

本論文においては、海浜断面の季節変化と密接に関連するこの岸沖漂砂量の特徴を把握することを目的として行なった2次元造波水路における実験結果を示し、若干の考察を加える。

2. 実験条件と方法

本研究では碎波帯内外を通じての漂砂量を対象とするため、それを実験的に直接測定することは困難であることから、海浜縦断形状の時間変化より間接的に net の漂砂量を算定する方法をとった。また条件を単純化し現象の把握を容易にするため、初期地形を一樣勾配の斜面とし、波の作用1時間後の地形とから平均漂砂量を求めた。

実験条件を表一に示す。底質材料は粒径 d が 0.2 mm と 0.7 mm の2種類で、いずれも Trask の淘汰係数は 1.1 である。初期勾配 $i = \tan \beta$ は 1/10 と 1/20 の2種類、周期 T は 1.0, 1.5, 2.0 sec の3種類で、沖波波高 H_0 を 4~5 段階に変化させて、計 58 ケースの実験を行なった。

実験は長さ 25 m、深さ 1.5 m、幅 0.8 m の2次元規則波水路を用いた。各ケースとも所定の一樣勾配に底質を敷き均したのち波を作用させ、1時間経過後、波を止めて地形を測定した。途中約 30 分経過後に、沖波波高ならびに碎波帯内外の地形変化域各地点 (10~50 cm 間隔) の水面変動波形の測定を容量式波高計により行なった。また波の作用開始直後および停止直前に、碎波点、

表一 実験ケース

Case A-1 $d=0.2\text{ mm}$ $i=1/10$				Case B-1 $d=0.7\text{ mm}$ $i=1/10$			
Case No.	T (sec)	H_0 (cm)	H_0/L_0	Case No.	T (sec)	H_0 (cm)	H_0/L_0
A-111	1.0	2.6	1.7×10^{-2}	B-111	1.0	2.6	1.7×10^{-2}
2		5.1	3.3	2		5.0	3.2
3		6.9	4.4	3		6.4	4.1
4		8.9	5.7	4		8.5	5.4
5		10.5	6.7	5		10.0	6.4
A-121	1.5	3.2	0.9	B-121	1.5	3.0	0.8
2		5.8	1.7	2		5.3	1.5
3		8.3	2.4	3		7.7	2.2
4		10.5	3.0	4		10.5	3.0
5		12.1	3.5	5		11.3	3.2
A-131	2.0	3.1	0.5	B-131	2.0	3.5	0.6
2		5.4	0.9	2		5.3	0.9
3		6.1	1.0	3		6.7	1.1
4		7.5	1.2	4		8.2	1.3
5		9.2	1.5	5		9.6	1.5

Case A-2 $d=0.2\text{ mm}$ $i=1/20$				Case B-2 $d=0.7\text{ mm}$ $i=1/20$			
Case No.	T (sec)	H_0 (cm)	H_0/L_0	Case No.	T (sec)	H_0 (cm)	H_0/L_0
A-211	1.0	2.9	1.9×10^{-2}	B-211	1.0	2.9	1.9×10^{-2}
2		5.2	3.4	2		5.1	3.3
3		7.3	4.7	3		7.0	4.5
4		9.6	6.2	4		8.9	5.7
5		11.5	7.3	5		10.6	6.8
A-221	1.5	3.1	0.9	B-221	1.5	3.2	0.9
2		5.7	1.6	2		5.4	1.5
3		7.9	2.3	3		7.7	2.2
4		10.2	2.9	4		9.7	2.8
5		11.7	3.3	5		12.1	3.5
A-231	2.0	2.7	0.4	B-231	2.0	2.7	0.4
2		4.0	0.6	2		4.3	0.7
3		6.2	1.0	3		6.1	1.0
4		8.2	1.3	4		7.8	1.3

碎波波高、波の邇上境界地点等を記録した。

なお沖側一樣水深部には底質を厚さ 5 cm に敷き、ここでの水深を 45 cm とした。

3. 実験結果

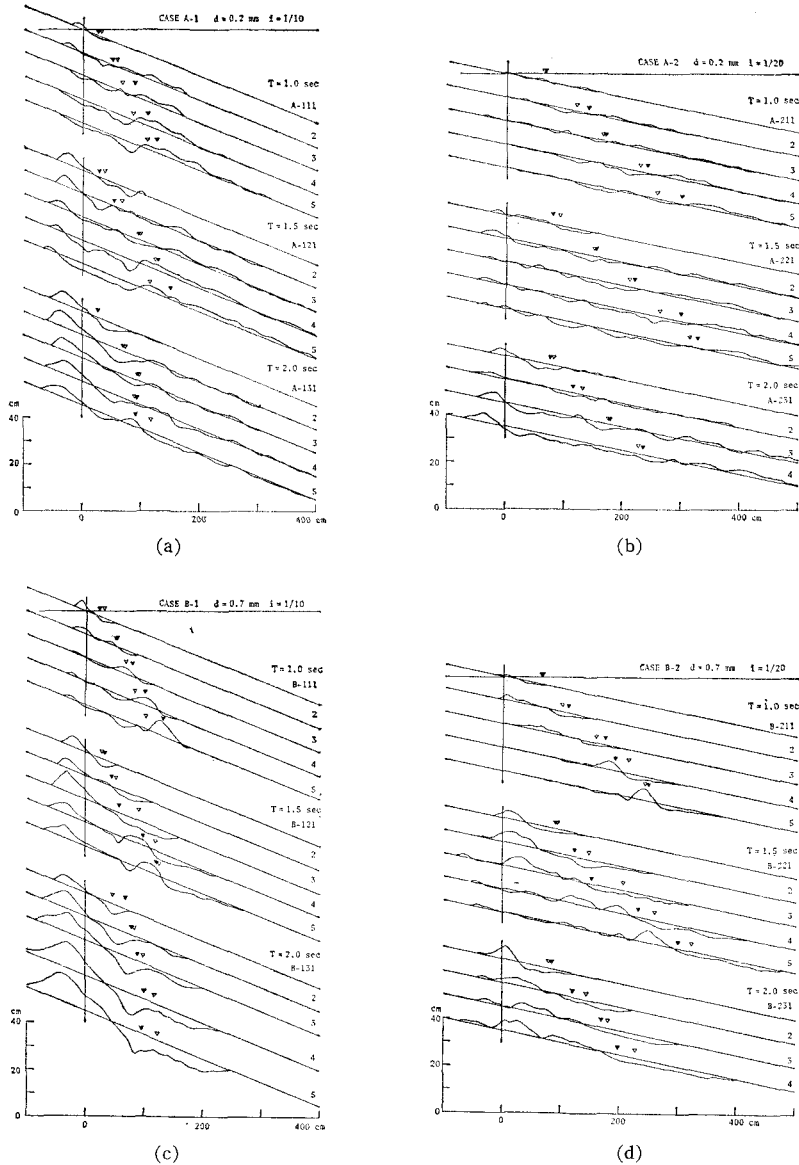
(1) 地形変化

図一1 に波作用1時間後の地形を示した。勾配 1/20 で波高が大きいケースでは、図示された範囲以深でも地

* 正 会 員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

** 学生会員 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



図一 1 時間後の海浜形状 (▽, ▼: 波作用開始直後および 1 時間後の砕波点)

形変化が生じている。図中には砕波点位置も示されている。

表一 1 との対応により、沖波波形勾配の増加にともない砂洲があらわれその規模が増大している様子が顕著にうかがえる。逆に、周期・波高が共に大きく波形勾配は比較的小さい時には、初期汀線以浅に砂が堆積し berm が形成される。これは特に勾配が $1/10$ のケースにおいて著しい。図には示されていないが、侵蝕性・堆積性の地形をとわず、有意な地形変化が生じている岸側限界点の位置は波の遡上限界地点のそれにほぼ一致している。ただし初期勾配 $1/20$ で周期 1.0 sec のケース (A-21, B-21) では、砕波後の波の勢いが弱く汀線付近に明瞭な

地形変化はあらわれない。

粒径 0.2 mm の細砂のケースでは、砕波帯の外側には常に砂れんが形成され主に浮遊形式の砂移動が卓越しているように観察された。波高が大きいときには、砂れんは一樣水深部にも形成されたが、そこでの有意な地形変化は生じていない。特に勾配 $1/20$ のケースでは、砕波帯内にも砂れんが観察されることが多く、その規模も砕波帯内外を通じて連続的であった。しかし、砕波帯内では沖浜帯と異なり、砂れん上の渦の発生はあまり観察されず、浮遊砂にも卓越した移動方向は認められなかった。

次に粒径 0.7 mm の粗砂では、本実験の波浪条件で一般に砂れんは形成されず、波作用初期段階に砂れんが形

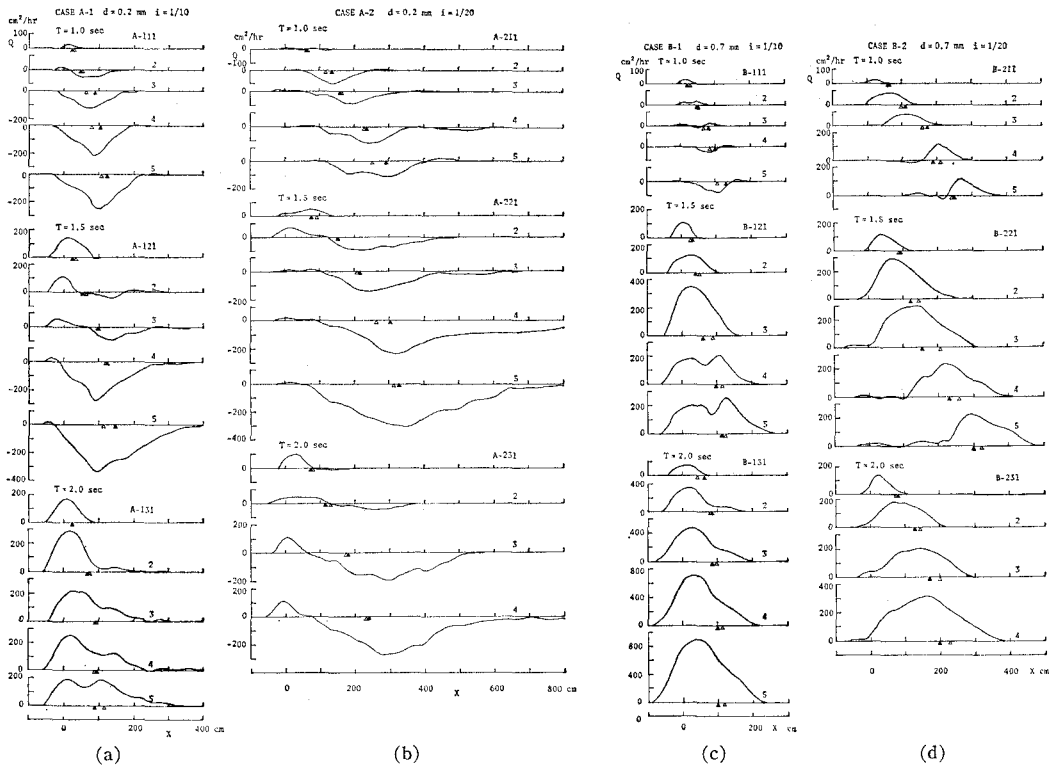


図-2 1時間平均の岸沖漂砂量分布 (Q: 岸向き漂砂量が正, Δ , $\blacktriangle$: 波作用開始直後および1時間後の碎波点)

成されなかったケースでも時間の経過につれて消滅した。一部のケース (B-133~5) では碎波帯近傍に砂れんが存在し渦の発生も認められたが、それによる砂の巻き上げは極めて少量であった。一方砂れんより大規模の地形の凹凸によりかなりの浮遊砂が生じるケース (B-11, B-12, B-21で波高の大きい場合) があった。粗砂の場合、一般には掃流形式での砂移動が卓越している。

(2) 岸沖漂砂量

初期汀線より沖向きに x 座標をとり、基準レベルよりとった各位置での底面高さを $z(x, t)$ 、単位幅・単位時間当りの net の岸沖漂砂量を $q(x, t)$ (ただし岸向きに正)、底質砂の空隙率を λ_0 とすると、底質砂量の保存則より次式が得られる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda_0)} \cdot \frac{\partial q}{\partial x} \quad (1)$$

したがって、 Δt 時間の平均漂砂量 $\bar{q}(x)$ は同一時間内の底面高変動量 Δz より次式で算定できる。

$$\bar{q}(1-\lambda_0) = \int_{x_0}^x (\Delta z / \Delta t) \cdot dx \quad (2)$$

ここで x_0 は岸側の地形変化限界点の x を意味する。

図-1の地形変化にこの式を適用して、各ケースの岸沖漂砂量分布を算定した結果が、図-2に示されている。横軸は初期汀線よりの距離 x 、縦軸は式(2)の左辺に相当する単位幅当り1時間平均有効漂砂量 $Q = \bar{q} / (1-\lambda_0)$ にとってある。

粒径 0.2 mm のケース A-1, 2 では大部分の条件で沖向き漂砂量 ($Q < 0$) が卓越しているが、沖波波形勾配の小さいケース A-131~5 では全域で岸向き漂砂になっている。しかしこれらとはほぼ同条件の沖波を作用させた勾配 1/20 のケース (特に A-233~4) では、汀線付近を除いて沖向きの漂砂が顕著であり興味深い。

粒径 0.7 mm のケースでは、勾配 1/10 で沖波波形勾配の大きいケース (B-114~5) を除き、ほぼ全域で岸向き漂砂が卓越している。

いずれの粒径でも波高がある程度以上に大きくなると、net の漂砂量としては岸向き沖向きを問わず碎波点付近で最大値をとるようである。

4. 考 察

(1) 地形変化

2次元海浜変形に関しては、堀川・砂村ら⁷⁾や服部・川又⁸⁾等により、変形のタイプを波浪・底質等の条件と関連づける試みがなされている。ここでは前者の扱いにより本実験で得られた結果を検討する。

堀川・砂村らは、海浜変形パターンを、1) 汀線が後退し沖において砂が堆積するタイプⅠ、2) 汀線が前進し沖に砂が堆積するタイプⅡ、3) 汀線が前進し沖において砂が堆積しないタイプⅢ、の3つに分類し、沖波波高 H_0 と波長 L_0 、粒径 d 、初期勾配 $i = \tan \beta$ より作ら

れる無次元パラメタ,

$$C=(H_0/L_0) \cdot (\tan \beta)^{0.27} \cdot (d/L_0)^{-0.67} \dots\dots\dots (3)$$

が7以上でタイプⅠ, 4~7でタイプⅡ, 4以下でタイプⅢとなることを示した。この結果は波の作用160時間の平衡地形の実験資料より求められたものである。

図—1に示した波作用1時間の地形変化図は一部タイプ分けの困難なものも含まれるが、一応全ての結果を整理すると図—3が得られる。波の作用時間が1時間と短

れるとし、巻き上げられた砂が半周期 ($T/2$) 後に沈澱する位置を表わす尺度として λ/w_0T (w_0 : 沈降速度) を選んだ。一方、有限振幅性の波で水粒子運動の非対称性が強いときには、波峰通過時にのみ顕著に砂が巻き上げられることから、この非対称性の指標として各位置で実測された波形の平均水面からの波頂高 η_0 と波高の比 η_0/H をとった。

砕波点 (図—4で記号に棒を付したもの) および沖浜域でのデータのみを、沖向き漂砂 (白印)、岸向き (黒印) および遷移域別に示してある。上記2つのパラメタが小さいときに岸向き漂砂が卓越する傾向がうかがえるが、うまく分類できたとはいえない。特にパラメタ λ/w_0T についてはより適切な指標に変える必要があろう。

(3) 岸沖漂砂量

Madsen・Grant⁴⁾ は、Kalkanis, Abou-Seida, Manoharらの振動板上での実験結果に基づいて、平坦な底面上および砂れんが存在するが掃流砂が卓越する条件での半周期平均漂砂量を算定する式として次式を提示した。

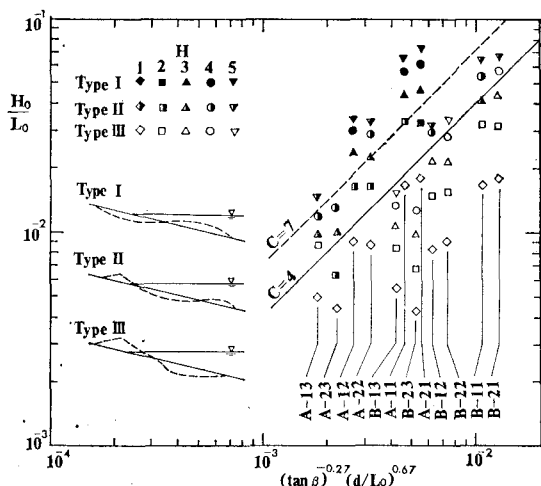
$$\Phi = 12.5 \Psi^3 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\Phi = \bar{q}/w_0d = (1 - \lambda_0)Q/w_0d$: 無次元漂砂量, $\Psi = \tau_{om}/(\rho_s - \rho)gd$: Shields 数, ρ_s, ρ : 底質と水の密度であり、底面剪断力の振幅 τ_{om} は底質粒径 d を粗度としたときの Jonsson⁵⁾ の摩擦係数 f_w と底面流速振幅 u_{om} を用いて、 $\tau_{om} = f_w \rho u_{om}^2/2$ より求める。一方、Shibayama⁶⁾ は砂れんが存在し沖向きの浮遊漂砂が卓越する場合の一周期平均の net 漂砂量に対して、式 (4) の係数値を 18.5 にした関係が適合すると述べている。これらはいずれも沖浜域を対象としたものといえる。

本実験の結果を無次元漂砂量 Φ と Shields 数 Ψ の関係でまとめたものが、図—5 (a)~(d) である。初期汀線より 50 cm の地点より沖向きに 50 cm 間隔の地点および砕波点 ($x=x_0$) での値を用いてある。 $|\Phi| < 10^{-3}$ のデータは 10^{-3} 、 -10^{-3} 軸の中間に示した。粒径 0.2 mm と 0.7 mm のそれぞれにつき、空隙率 λ_0 は 0.64 と 0.50、沈降速度 w_0 は 2.4 cm/sec と 8.0 cm/sec とした。また底面流速振幅 u_{om} は実測波高と周期および初期水深と最終水深の平均水深を用いて微小振幅波理論により計算した。波の有限振幅性を表わす指標である η_0/H の値および砕波帯内外で記号が区別されている。

図—5より得られる主な結論を列記しよう。

- 1) データのばらつきは大きい、 Φ と Ψ の間には明瞭な相関が認められる。しかも沖浜帯については、粒径のみならず漂砂の方向が岸向き・沖向きと異なっても、 $|\Phi|$ と Ψ とはほぼ一定の関係を示す。
- 2) 砕波帯内では沖浜域に比し、同じ Ψ の値に対し大きな Φ の値を示す。砕波帯内での底面流速および Ψ の評価も含めて更に検討を要する。
- 3) 沖浜域のデータより推定される有意な net の漂砂



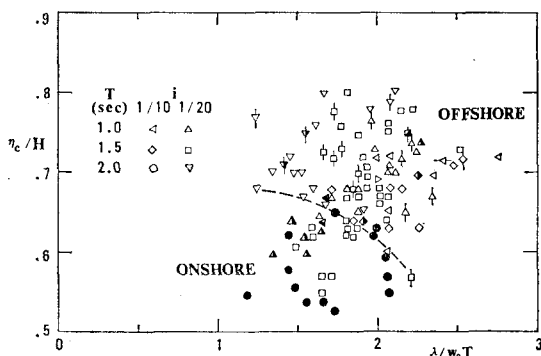
図—3 海浜変形のタイプ分け

かいにも拘らず、上記のパラメタでかなり明瞭に分類できるといえる。

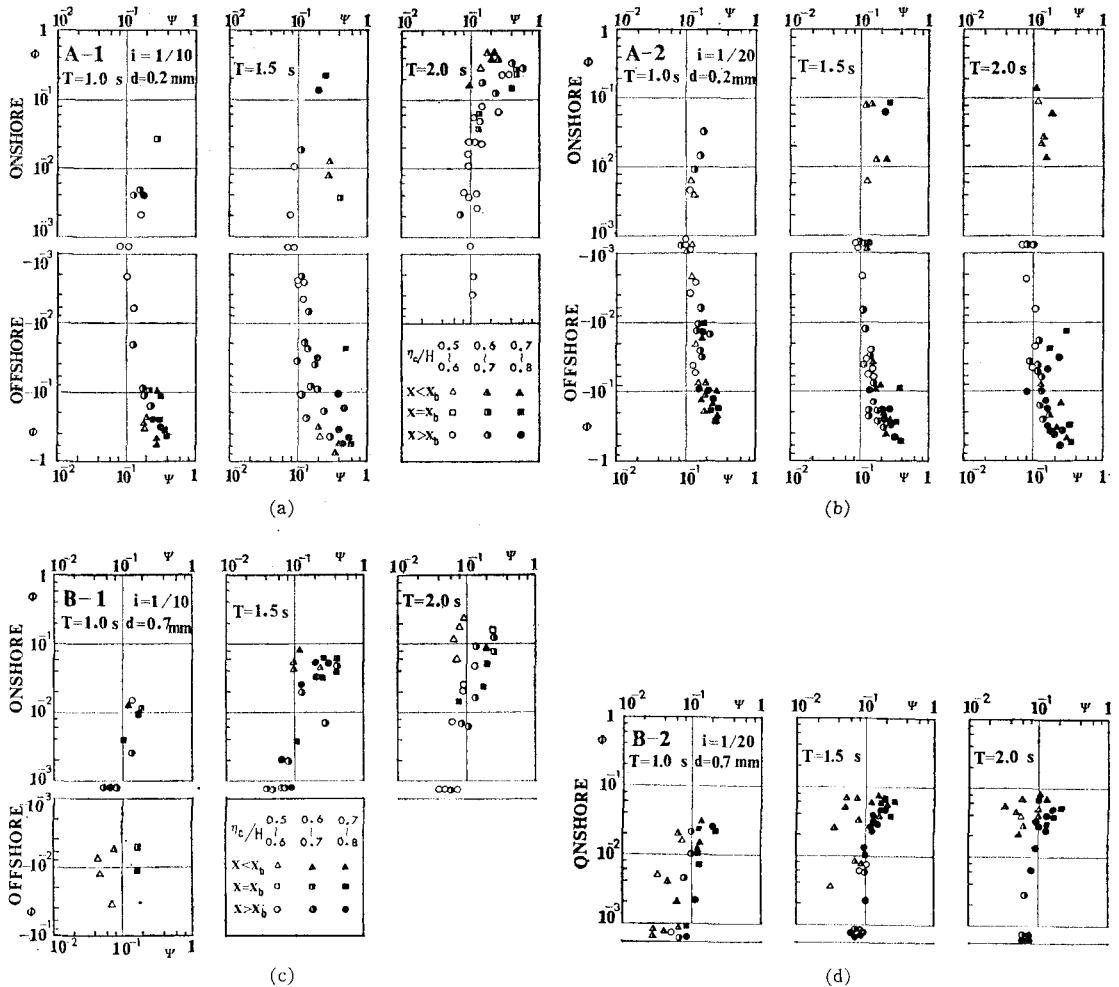
(2) 漂砂の卓越方向

3. (2)で述べたように、掃流形式の砂移動による net の漂砂は一般に岸向きであるが、浮遊砂の場合には条件により異なり、同条件の波を作用させても勾配 1/20 のケース A-23 では沖向き、勾配 1/10 の A-13 では岸向きになっている。また勾配 1/10 でも周期 1.5 sec 以下の波に対しては沖向き漂砂が卓越する。

これを解釈する一つの試みとして示したのが図—4である。浮遊砂の巻き上げ高が砂れん波長 λ により規定さ



図—4 浮遊漂砂の卓越方向

図-5 ϕ と ψ の関係

量を与える ψ の限界値は、両者の粒径とも 0.1 程度である。

4) 相対波頂高 η_c/H によって代表させた波の有限振幅性すなわち底面流速の非対称性の効果は明瞭でない。

5. 結 語

2次元海浜変形の実験資料に基づいて簡単な考察を加え、若干の興味ある結果が得られたように思う。浮遊漂砂の卓越方向について更に検討するとともに、本論文で十分に議論しなかった swash zone の漂砂量に関しても解析をすすめ、機会をあらためて報告したい。

実験・データ解析・図面作成の過程で、東京大学港湾研究室の諸氏、特に大学院生 香取完和、榊山 勉の両君には並々ならぬ御助力を頂いた。著者らの心からの感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右：波による二次元海浜変形に関する実験的研究，第21回海浜講演集，pp. 193-199, 1974.
- 2) 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回海浜講演集，pp. 329-334, 1975.
- 3) 服部昌太郎・川又良一：碎波帯内の海浜変形過程，第25回海浜講演集，pp. 218-222, 1978.
- 4) Madsen, O. S. and W. D. Grant: Sediment transport in the coastal environment, Rept. No. 209, Dept. Civil Eng., MIT, 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.: Laboratory study on sand suspension over ripples due to wave action, Master's Thesis, Dept. Civil Eng., Univ. Tokyo, 47 p., 1979.