

二次元傾斜海浜における波による質量輸送速度の特性について

平 山 秀 夫*

1. 緒 論

最近、海浜地形変動を事前に予測しようという試みが、色々な角度からかなり精力的に進められてきている^{1)~6)}。精度の高い予測手法を確立するためには、数値計算上の種々の問題点の改善もさることながら、基本的には、種々の条件下での波や流れなどの外力の変化特性を的確に評価するとともにそれによって誘起される漂砂現象、中でもとりわけその漂砂量の時・空間的変動量と移動方向を定量的に把握することが不可欠である。

著者は、このような観点から、海浜変形予測の基礎研究として、波動場での底質移動の要因の1つである質量輸送速度に着目して、その特性を種々の角度から調べ、質量輸送と底質の輸送との関連性を究明しようと試みてきている。特に昨年度は、勾配が 1/10 の二次元傾斜海浜上での質量輸送速度の水平分布特性を主として実験的に調べ、それらの結果を従来提案されている種々の理論結果と比較し、理論の適合性について若干の検討を加えた⁷⁾。

本研究では、これに引き続いて、さらに砕波帯全域にわたる傾斜底面上および水表面上での質量輸送速度の実態を主として実験的に明確にしようとするもので、ここでは特に、1) 新たに勾配が 1/20 の傾斜底面上における質量輸送速度の水平分布特性を詳細に調べ、これを昨年度の勾配が 1/10 の場合の結果と比較検討することによって、斜面勾配の相違による質量輸送速度の種々の特性の差異を明確にするとともに、これまでの水底面上の場合と同様に、水表面上での質量輸送速度についても、理論値との適合性の検討を含め、一般的な特性の把握を行うこと、2) 質量輸送速度を Battjes⁸⁾ が提案した surf similarity parameter で整理し、それと砕波型式との関連性を明確にすること、3) 質量輸送速度と水面波形の非対称性との関連性を、後述の新たに定義した非対称性を表わす 1 つの指標を用いて検討するとともに、波速と質量輸送速度の相互関係を、両者の比の値の場所的变化特性を把握することによって明確にすること、4) 底面上および水表面上の質量輸送速度の分散値によって定義さ

れた拡散係数のオーダーや両者の水平分布特性の相違を明らかにすること、などに主眼をおいて種々の検討を行ったものである。

2. 実験装置、実験方法および解析方法

実験は、水槽の端部に勾配 $i=1/20$ の斜面を設置した $21\text{m}\times 0.7\text{m}\times 1.0\text{m}$ の片面 ガラス張り水槽を用いて行った。

実験の方法は、造波開始後 15 および 300 波目の波について、水底面と水表面上の所定の位置に、それぞれスチロール樹脂球（粒径 1.91 mm, 比重 1.04）とポリプロピレン球（粒径 2.51 mm, 比重 0.9）を投入し、その 1 周期毎の位置を、昨年度と同様にモータードライブ付きカメラで連続撮影を行った⁷⁾。単一粒子の投入位置は、斜面上では、水底および水表面上とも断面 I~V の 5 ケ所で、それぞれ h/h_0 (h : 測定点水深, h_0 : 砕波水深) $\approx 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ になるように選び、また水床上でも 1 地点を選んだ。

表-1 実験条件

水深 h_0 (cm)	周期 T (sec)	砕波波高 H_0 (cm)	砕波水深 h_b (cm)	測定点水深 h (cm)	砕波係数 H_0/L_0	砕波型式
45	1.0	7.8	11.0	4.5~25.8	0.050	Spilling
		9.7	13.2	7.2~25.6	0.062	"
		14.4	21.0	12.5~25.5	0.093	"
	1.5	5.2	8.3	4.3~25.6	0.015	Plunging
		10.1	14.9	12.1~25.7	0.029	"
	2.0	4.7	8.4	4.5~25.7	0.008	Surging
		7.7	12.6	7.0~25.6	0.012	Plunging

実験条件は、表-1 に示すとおり、沖測水深 $h_0=45.0$ cm と常に一定とし、波の周期 $T=1.0, 1.5, 2.0$ sec の各場合について、砕波波高 $H_0=4.7\sim 14.4$ cm の間で適当に変化させた。また、底面にはアクリル板を張って全て滑面とした。これに目盛を印して単一粒子がガラス壁面と平行に運動しているかどうかを調べ、ガラス壁面から $10\text{cm}\pm 2\text{cm}$ の範囲内の位置で運動している場合のみを解析の対象とした。

実験結果の解析法は、得られたネガフィルムから京大海岸研究室所有のモーションアナライザーを用いて、単

* 正会員 工博 大阪府立工業高等専門学校助教授

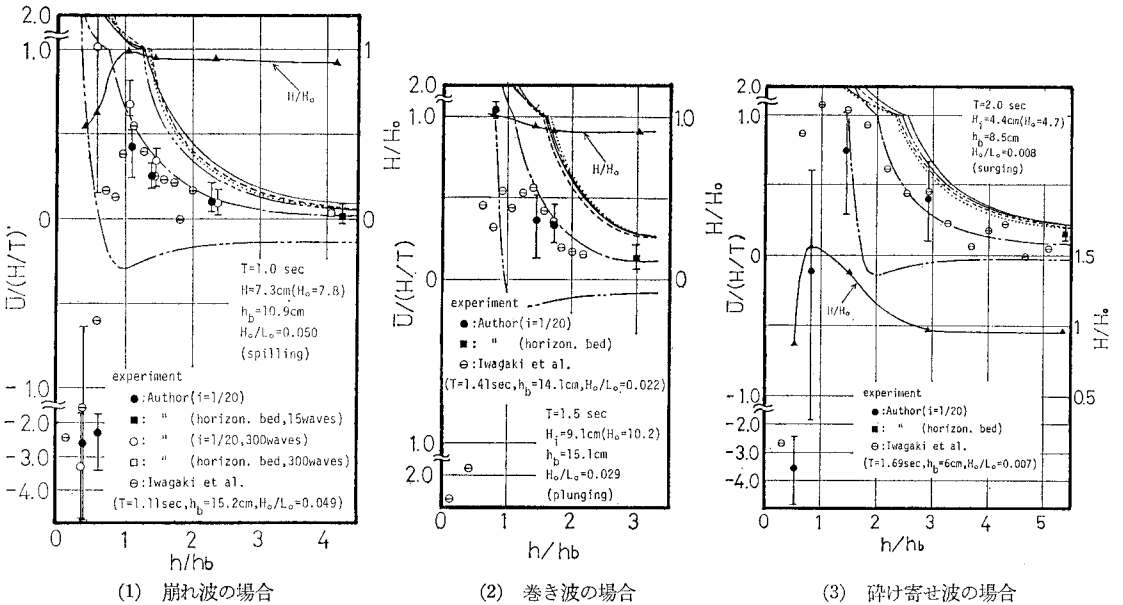
一粒子の1周期ごとの位置の座標を順次求め、それから質量輸送速度 $\bar{U}$ を求めた。また、波速は、8mm カメラで撮影された水面波形が一定距離を進行するに要するコマ数を、1コマ送りの可能な映写機を用いて求め推定した。

3. 実験結果および考察

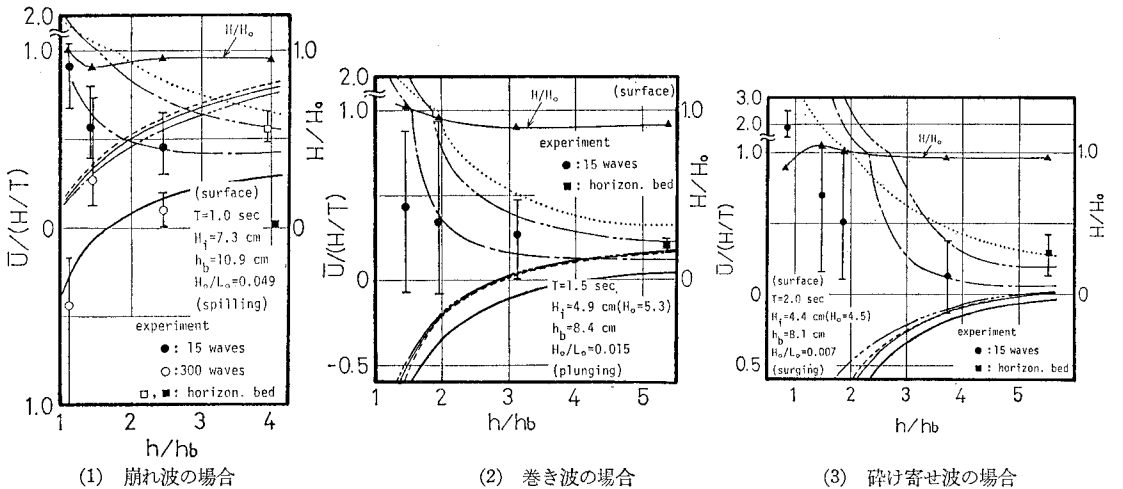
(1) 従来提案されている質量輸送速度の理論値の適合性

図一 (1)~(3) は、勾配 1/20 の傾斜底面上における水平質量輸送速度 ($\bar{U}/(H/T)$: H は測定点波高) の実験値を、昨年度示した各種の理論曲線⁷⁾ (実線: Longuet-Higgins による境界層外縁での conduction solution の結果, 破線: 同じく反射率を考慮した部分重複波による波

動境界層内での結果, 点線: Bijker らが示した斜面勾配を考慮した場合の波動境界層内での結果, 3点鎖線: 同じく波動境界層外縁での結果, 1点鎖線: 著者が示した、波速の第1定義に基づく Stokes 波の第3次近似解を用いて計算した結果, 2点鎖線: 同じく波速の第2定義に基づく Stokes 波の第2次近似解を用いた場合の結果) と、それぞれ砕波型式が崩れ波, 巻き波および砕け寄せ波の場合に分けて比較したもので、図中には岩垣⁹⁾の実験結果 (○印) 及び波高分布 (▲印) も合わせて示してある。これらの図から明らかなように、前報⁷⁾で示した勾配 1/10 の場合における結果と同様に、本実験条件の範囲内の砕波点より沖側では、砕波型式にかかわらず、全般的に実験値は著者が提案した理論曲線 (1点鎖線) によく合致する傾向にあるようである。一方、図一2



図一 底面質量輸送速度の理論値と実験値の比較 ($i=1/20$)



図二 水面質量輸送速度の理論値と実験値の比較 ($i=1/20$)

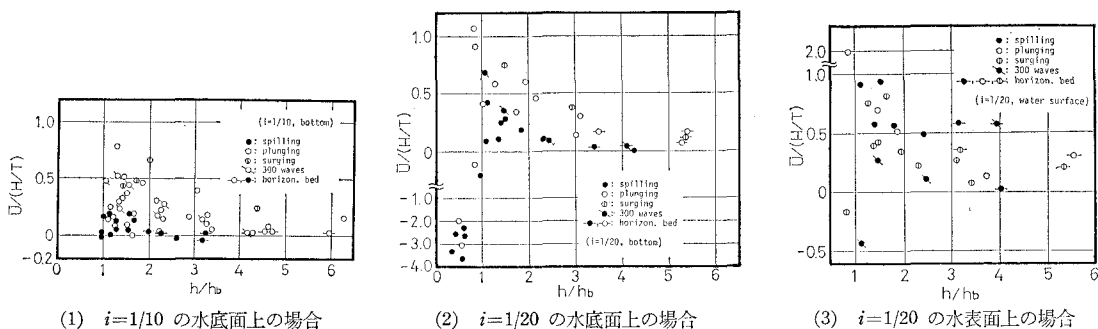


図-3 砕波型式による水平質量輸送速度の分布特性の比較

(1)~(3) は斜面勾配が $1/20$ の場合の水表面上における水平質量輸送速度の理論値と実験値の比較を、傾斜底面上の場合と同様に砕波型式別に示したものである。これらの図中の各理論曲線は、細い実線が Longuet-Higgins による conduction solution の結果 ($\bar{U}_{s1}$), 破線は同じく反射率を考慮した場合の部分重複波による結果 ($\bar{U}_{s2}$), 太い実線は Huang による水表面が清水 (clear water) の場合の結果¹⁰⁾ ($\bar{U}_{s3}$), 点線は同じく水表面が油などで淀んでいる場合の結果¹⁰⁾ ($\bar{U}_{s4}$), 3 点鎖線は Bijker らが示した斜面勾配を考慮した場合の結果 ($\bar{U}_{s5}$), 1 点鎖線は著者が示した、波速の第 1 定義に基づく Stokes 波の第 3 次近似解を用いて計算した場合の結果 ($\bar{U}_{s6}$), 2 点鎖線は同じく波速の第 2 定義に基づく Stokes 波の第 2 次近似解を用いた場合の結果 ($\bar{U}_{s7}$) であって、これらは、それぞれ次のように表わされる。

$$\bar{U}_{s1} = \frac{\sigma H^2 k}{16 \sinh^2 kh} \cdot \left\{ 2 \cosh 2kh + 3 + kh \sinh 2kh - 3 \left(\frac{\sinh 2kh}{2kh} + \frac{3}{2} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{U}_{s2} = \bar{U}_{s1} \times \left(1 - r^2 - \frac{6}{5} r \sin 2kx \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{U}_{s3} = \frac{\sigma H^2 k}{16 \sinh^2 kh} \left\{ 2 \cosh 2kh - \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{\sinh 2kh}{kh} + 1 \right) \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{U}_{s4} = \frac{\sigma H^2 k}{16 \sinh^2 kh} (2 \cosh 2kh + \cosh^2 kh) \dots\dots\dots (4)$$

$$\bar{U}_{s5} = \bar{U}_{s1} \times \left(1 - \frac{3}{5} \frac{1}{Ak} \cdot \frac{\partial A}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$\bar{U}_{s6} = \frac{1}{2} \cdot C (F_1^2 \cosh 2kh + F_2^2 \cosh 4kh + F_3^2 \cosh 6kh) \dots\dots\dots (6)$$

$$\bar{U}_{s7} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (F_1^2 \cosh 2kh + F_2^2 \cosh 4kh) + \frac{\sigma H^2}{8h} \coth kh (-F_1 \cosh kh \sin k\bar{x} - F_2 \cosh 2kh \cdot \cos 2k\bar{x} - 1) \dots\dots\dots (7)$$

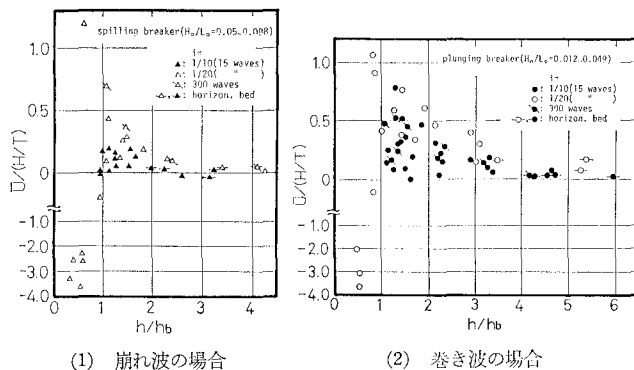


図-4 斜面勾配の相違による水平質量輸送速度の比較

ここで、 $C=L/T$, $\sigma=2\pi/T$, $k=2\pi/L$, r =反射率, $\bar{x}$ =粒子の 1 周期後における平均位置, x =汀線を原点 ($x=0$) とした場合の沖向き方向距離, $\partial h/\partial x = -0.05$, A , F_1 , F_2 , F_3 は k , H , h の関数⁷⁾である。これらの図から明らかなように、水表面上では各理論曲線間の分布傾向の差異や経過時間による実験値の分布特性の差異が著しく、最早、これらのいずれの理論曲線では水表面上での実験値を十分に説明できないようであるが、本実験条件の範囲内の砕波帯外ではどちらかと言えば、15 波目の実験値は式 (6) の結果に合致する場合が多いようであるが、実験数が少ないので、今後実験数を増やして詳細に検討する必要がある。

(2) 砕波型式および斜面勾配の相違による水平質量輸送速度の分布特性の差異

図-3 (1)~(3) は、水底面および水表面上における質量輸送速度の水平分布特性が砕波型式によってどの程度の差異があるかを調べたもので、(1) および (2) はそれぞれ斜面勾配が $1/10$ および $1/20$ の場合の水底面上の結果、(3) は $1/20$ 勾配の場合の水表面上での結果である。これらの図から明らかなように、底面上では、砕波型式別の分布特性の相違が明確で、spilling 型、plunging 型、surging 型の順に正側 (岸向き) に大きくなっているが、一方、水表面上ではそのような傾向は見られなく、全般的に砕波型式の相違による分布特性の差異は見い出せないようである。

図一4 (1), (2) は, 斜面勾配の相違による質量輸送速度の水平分布特性を砕波型式別に示したもので, (1) は崩れ波, (2) は巻き波の場合の結果である。これらの図から明らかなように, 一般的に水平質量輸送速度は, 勾配が急な 1/10 の場合が, 1/20 のそれに比して小さくなる傾向が見られ, 特に (1) の崩れ波型の場合には, 砕波点から沖側では, 1/20 勾配の場合には全て正 (岸向き) の値であるが, 一方, 1/10 勾配の場合には, 負の値 (沖向き) が生じる場合もあることがわかる。これは戻り流れの効果に起因するものと思われるが, このように, 特に波形勾配が大きい波が来襲してくる場合の砕波帯外で, 斜面勾配の相違によって質量輸送速度の方向が異なる場合があるということは, 海岸の変形機構 (平衡勾配) を論じる場合, 特に波形勾配と同時に海岸の初期勾配が重要である¹¹⁾ということを示唆しているように思われ, 非常に興味深いことである。

(3) Surf similarity parameter による質量輸送速度の分類

図一5 (1)~(3) は Battjes⁸⁾ が提案した surf similarity parameter $\xi (= \tan \theta / \sqrt{H_0/L_0}$; $\tan \theta$ は斜面勾配) と $\bar{U}/(H/T)$ の関係を, 場所的に分けて示したもので, (1) は $h/h_0 < 1$, (2) は $1.0 < h/h_0 < 1.5$, (3) は $1.5 < h/h_0 < 2.5$ の場合の結果である。これらの図から明らかなように, 一般に砕波帯外では ξ の増大とともに $\bar{U}/(H/T)$ は増加し, かつ正の値をとる傾向にあるが, 一方, 砕波帯内では, 実験値が分散して明確なことは言えないが, ど

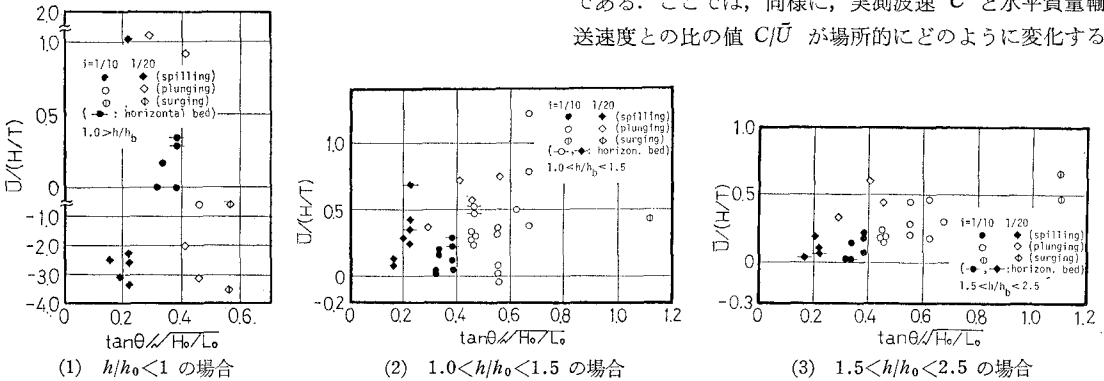
ちらかと言えば, ξ の増大とともに $\bar{U}/(H/T)$ 逆には減少し, しかも負の値をとる傾向にあるようである。また, これまで服部¹²⁾ および Battjes⁸⁾ が示した結果と同様に, $\xi \approx 0.4$ が spilling 型から plunging 型への移行限界値であることが見出される。一方, 利穂¹³⁾はこの ξ の値で浮遊砂の卓越方向を区分できることを示しているが, 本実験結果の底面上での質量輸送速度の結果から判断すると, 砕波帯外では ξ の値にかかわらず $\bar{U}/(H/T)$ は正であることから, 掃流漂砂はこの ξ の値では区分できないのではないかと推察される。

(4) 質量輸送速度と水面波形の非対称性との関係

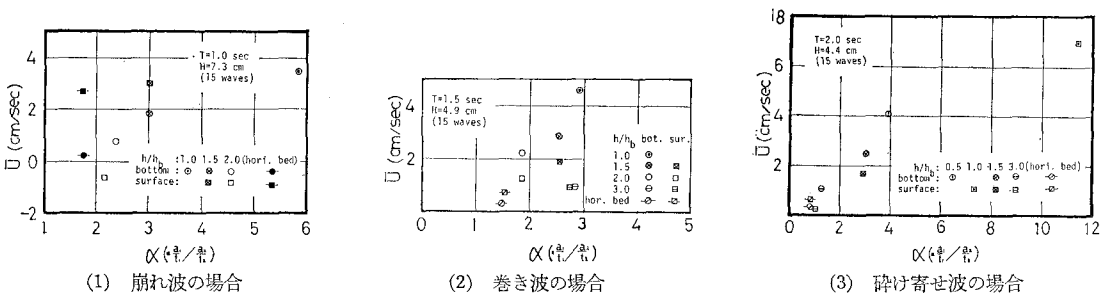
これまで, 灘岡¹⁴⁾らは流速変動の skewness の程度が質量輸送速度の大きさに関係あることを示したが, ここでは新たに非対称性の程度を表わす一つの指標 $\alpha (= (a_1/t_1)/(a_2/t_2))$; a_1, t_1 : それぞれ wave-set up or set down を考慮した水面波形の峰の部分の振幅と継続時間, a_2, t_2 : 同じく水面波形の谷の部分の振幅と継続時間) を定義し, これを用いて水面波形の非対称性と質量輸送速度の関連性を調べた。その結果が 図一6 (1)~(3) で, それぞれ砕波型式別に分けて示したものである。これらの図から明らかなように, 砕波点より沖側では, 波形の非対称性が強ければ強いほど, 質量輸送速度は増大する傾向にあることがわかる。

(5) 波速と質量輸送速度の関係

砕波点近傍では水平最大水粒度 $u_{\max}$ と波速 C は $u_{\max}/C \approx 1$ になるということはいく知られていること¹⁵⁾である。ここでは, 同様に, 実測波速 C と水平質量輸送速度との比の値 $C/\bar{U}$ が場所的にどのように変化する



図一5 Surf similarity parameter による質量輸送速度の分類



図一6 水面波形の非対称性と質量輸送速度の関係

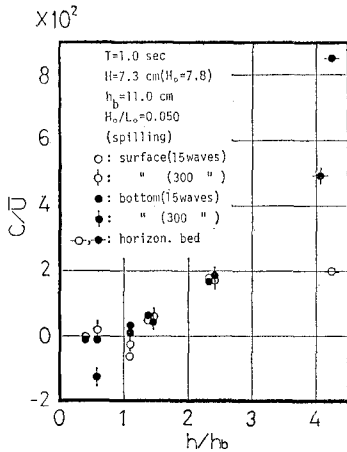
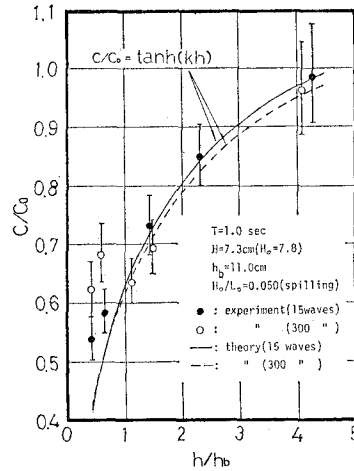
図-7 $C/\bar{U}$ の水平分布の一例

図-8 実測波速の場所的変化と理論値との比較

かを水表面と水底面上の場合に分けてその一例を示したのが図-7である。この図から明らかなように、 $C/\bar{U}$ は砕波帯外では、砕波点から沖側に行くにつれて直線的に増加するが、一方、砕波帯内ではどちらかと言えば、ほぼ一定値になる傾向が見られるが、 $u_{\max}/C$ の値のように明確な関係は見い出せないようである。なお、図-8は波速の場所的変化の実測値と微小振幅理論による結果を比較したもので、図中の実験値は同一測定点での平均値とその変動幅（最大値と最小値）で示してある。この図から明らかなように、砕波帯外では、実測波速は微小振幅理論とほぼ合致する傾向にあるが、砕波帯内では、実測値は理論値よりもはるかに大きくなり、最早、微小振幅理論では説明できないようである。

4. 結 論

以上の結果を要約すれば、次のとおりである。

- 1) 本実験条件の範囲内での底面質量輸送速度の実験値は、どちらかと言えば、斜面勾配にかかわらず、著者が提案した理論曲線によく合致する傾向にある。
- 2) 質量輸送速度は、surf similarity parameter (ξ) で整理すれば、砕波帯内では、 ξ の増大とともに質量輸送速度は減少するが、砕波帯外では、逆に増加する傾向にあるようである。また、来襲波の砕波型式をこの ξ の値で分類でき、崩れ波から巻き波型への遷移限界の ξ の値は、従来の結果と同様、 $\xi \approx 0.4$ であることが明らかになった。
- 3) 一般に無次元質量輸送速度は、砕波点より沖側では spilling, plunging, surging 型の順に大きくなっているが、水表面上では、砕波型式による明確な分布特性の差異はないようである。

4) 砕波点より沖側の底面上における質量輸送速度の水平分布は、斜面勾配にかかわらずほとんど正(岸向き)である。また、その大きさは砕波型式にかかわらず、斜面勾配が急なほど、小さくなる傾向にあり、これは戻り流れの影響によるものと思われる。

5) 質量輸送速度は、砕波点から沖側では、明らかに水面波形の非対称性の程度に応じて大きくなる傾向にある。

最後に、暖かいご指導を賜った京都大学工学部岩垣雄一教授、ご助言を賜った酒井哲郎助教授および実験や解析に協力を惜しまなかった上建政広・小森孝浩の両君に心から感謝の意を表

する。

参 考 文 献

- 1) 西村仁嗣：海浜変形の数値シミュレーション，1978年度水工学に関する夏期研修会講義集，78-B-5，1978。
- 2) 野田英明：海浜変形と海岸構造物，1980年度水工学に関する夏期研修会講義集，80-B-9，1980。
- 3) 土屋義人・安田孝志：海浜変形の簡単なモデル，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 189~193，1978。
- 4) 渡辺 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。
- 5) 山口正隆・大津正司・西岡洋一：非定常波浪による2次元海浜変形の数値計算，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 290~294，1981。
- 6) 橋本 宏・宇田高明・竹淵 勉：経験的的海浜変形モデルによる構造物周辺の地形変化予測，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 300~304，1981。
- 7) 平山秀夫：傾斜底面上における波による質量輸送速度に関する実験的研究，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 29~33，1981。
- 8) Battjes, J. A.: Surf similarity, Proc. of 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 466~480, 1974.
- 9) 岩垣雄一・襄 義光・森口 治：波による固定斜面上の固体粒子の運動機構に関する研究，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 242~246，1981。
- 10) Huang, N. E.: Mass transport induced by wave motion, Jour. Mari. Res., Vol. 28. pp. 35~50, 1970.
- 11) 尾崎 晃・渡辺 揺：波による二次元汀線変化の相似に関する実験的研究，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 200~205，1976。
- 12) 服部昌太郎・川又良一：海岸堤防による二次元海浜の地形変化，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 234~239，1976。
- 13) 利徳吉彦・渡辺 晃・堀川清司：二次元海浜変形と岸沖漂砂，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 217~221，1981。
- 14) 瀬岡和夫・近藤隆道・田中則男：LDAを用いた砕波帯内の流速場に関する実験的研究，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 24~28，1981。
- 15) 岩垣雄一・酒井哲郎・開沼淳一・川島 毅：砕波付近の表面水粒子速度に関する実験，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 67~72，1970。