

斜面上の波動中における単一粒子の残留速度に関する研究

平 山 秀 夫*

1. 緒 論

斜面上の波動中における質量輸送速度の実態を把握することは、海浜流系の機構や海浜漂砂の動態を究明する上で重要なことである。これまで質量輸送の問題は、Stokes¹⁾を端緒にして Longuet-Higgins²⁾, Russell & Osorio³⁾などをはじめ、ごく最近では Isaacson⁴⁾や土屋ら⁵⁾などの多くの研究者によって理論と実験の両面からかなりの研究がなされてきたことは周知のとおりであるが、これらはほとんど一定水深での結果であって、海浜の変形機構を論じる場合に最も重要となる碎波点を含む斜面上での研究成果としては、Eagleson & Dean⁶⁾や Bijkel et al.⁷⁾などの研究を除いて他にほとんど見当たらないようである。中でも Bijkel et al.⁷⁾は斜面勾配を考慮に入れた傾斜底面上における質量輸送速度を理論的に算出し実験値と比較するとともに、斜面上での質量輸送速度の鉛直分布の場所的分布特性を実験的に調べるなど興味ある結果を示しているが、理論値と実験値との差異はかなり著しく、しかも実験的にも碎波型式と質量輸送速度の分布特性との関連や鉛直方向の質量輸送速度の特性などに関してはほとんど言及していないなど残された課題も少なくない。

本研究では、このような観点から、これまでの水平床上での研究成果^{8),9)}を踏まえて、斜面上での質量輸送速度の特性を主として実験的に検討しようとするもので、ここではまず最初に、斜面上での単一粒子の挙動特性、特にその速度や軌跡などの特性を実験的に詳しく調べ、従来と全く同様な手法による理論曲線やこれまでの一定水深の場合における結果⁸⁾とも比較し、その相違点などを明確にする。次に、斜面上での単一粒子の水平および鉛直残留速度の時・空間的分布特性を実験的に詳しく調べ、前報に示した水平床上の場合における結果⁹⁾とも比較検討するとともに、残留速度の鉛直分布特性と来襲波の碎波型式との関連性などについても若干の考察を加える。さらに、前報⁹⁾と全く同様にして斜面上での残留速度の分散値から拡散係数を推定し、そのオーダーや場所的分布特性を調べて、斜面上の波動中に内在する拡散効

果の実態を定量的に把握する。このように、斜面上での単一粒子の挙動特性を種々の角度から調べることによって、海浜の変形機構を探るための基礎資料を得ようとするものである。

2. 実験装置・実験方法・解析方法

実験は、水槽の端部に勾配 1/20 の斜面を設置した長さ 21 m、高さ 1 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 7 波目、100 波目および 1 000 波目の波の場合について水表面の波峰の位置から単一粒子（粒径 2.21 mm、沈降速度 2.99 cm/sec、比重 1.043）を水中に投入し、その挙動をストロボを照射して写真撮影を行った。単一粒子の投入位置は、目測の碎波点から沖側にほぼ 0.9 m および 2.0 m の位置の 2 ケ所を選んだ。実験条件は表-1 に示すとおり、水深 $h=45.0$ cm と常に一定とし、周期 $T=1.0, 1.5, 2.0$ sec の各場合について沖波波高を $H_0=4\sim 15$ cm の間で適当に変化させ、かつ鉛直方向の測定位置も水面から約 10 cm 間隔で変化させた。また、底面には、滑面として 50 cm $\times$ 70 cm $\times$ 0.5 cm の鏡面を使用し、この鏡面を用いて単一粒子が同一鉛直面内で運動しているかどうかを調べ、この面からはずれた場合には、解析の対象としなかった。

実験結果の解析法は、このようにして得られたネガフィルムから、フィルムモーションアナライザーを用いて、単一粒子の速度が $u=0, w=w_{\max}$ と考えられる位置よ

表-1 実験条件

水深 h (cm)	周期 T (sec)	測定点水深 h_s (cm)	沖波波高 H_0 (cm)	沈降速度 w_f (cm/sec)	沖波波形勾配 H_0/L_0
45.0	1.0	17.2	6.3 $\sim$ 15.1	2.98	0.039 $\sim$ 0.101
		22.9		3.03	
		31.8		2.97	
	1.5	17.2	4.0 $\sim$ 8.7	2.98	0.011 $\sim$ 0.025
		22.8		2.98	
	2.0	12.9	4.1 $\sim$ 7.7	2.99	0.007 $\sim$ 0.012
		17.5		2.92	
		22.8		2.92	

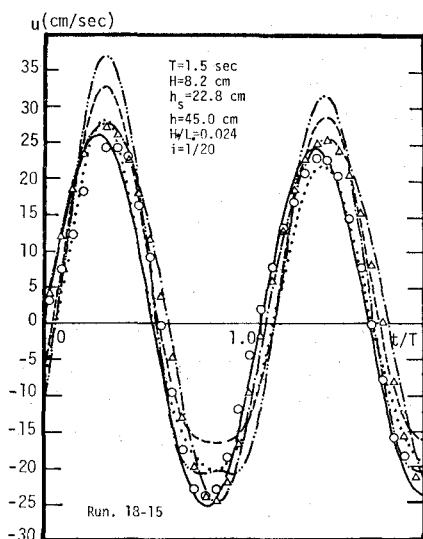
* 正会員 工博 大阪府立工業高等専門学校助教授

り逐次 Δt (ストロボの照射周期で, ここでは $\Delta t=0.077$ sec) 時間間隔ごとの位置の座標を読みとり, これらの位置の座標を用いて, 単一粒子の速度 (u, w) および残留速度 ($\bar{U}, \bar{W}$) を求めた⁹⁾.

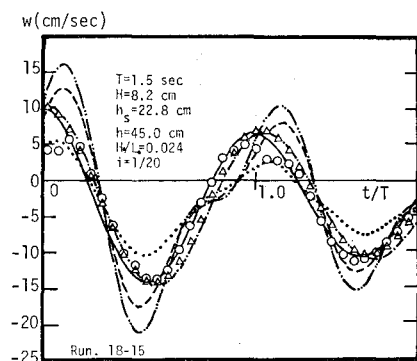
3. 実験結果および考察

(1) 斜面上における単一粒子の速度と軌跡

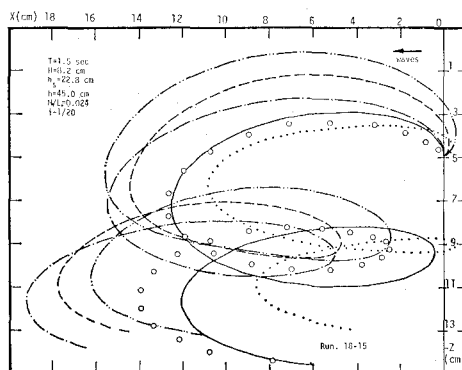
図—1, 2 および 3 は, それぞれ斜面上における単一粒子の水平速度, 鉛直速度および軌跡の実験結果の代表的な一例を示したもので, これらの図中の各曲線は, 従来示した方法⁹⁾に基づいて求めた理論結果である. すなわち, 実線は微小振幅波理論に基づく解析的解法, 1点鎖線は微小振幅波理論による差分法, 2点鎖線は波速の第2定義に基づく Stokes 波の第2近似解による差分法および点線はハイパボリック波による差分法に基づく結果で, また△印は実測の単一粒子の位置の座標を用いて微小振幅波理論から各測定点における流速を見積った結果, ○印は実験結果である. これらの図から明らかなよ



図—1 単一粒子の水平速度 (斜面上)

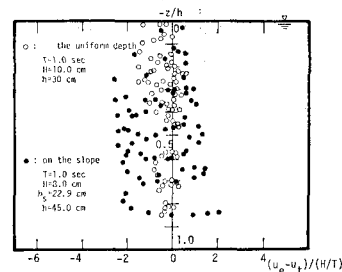


図—2 単一粒子の鉛直速度 (斜面上)

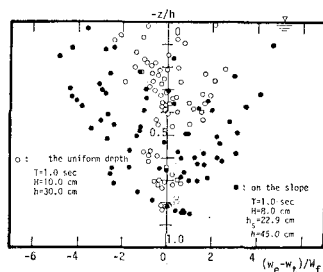


図—3 単一粒子の軌跡 (斜面上)

うに, 速度および軌跡とも, 理論値と実験値の傾向はほぼ類似しているが, これまでの一定水深の場合での結果と比較して, 各理論曲線間の差異や理論値と実験値との間の位相や大きさの差異が著しく, 最早, これらの理論曲線では実験結果を説明できないようである. しかしながら, 水深が浅くなってくると, どちらかと言えば, ハイパボリック波理論による結果が他の理論曲線に比してより実験値に近いようである. なお, 図—4 (1), (2) は単一粒子の速度の実験値 (u_e, w_e) と理論値 (u_t, w_t) (u, w : 単一粒子の実測の座標を用いて微小振幅波理論から算出した結果) との適合の程度の場所的分布特性を調べるため, 実験値と理論値との差異の鉛直分布を一定水深の場合 (図中○印) と斜面上の場合 (図中●印) とで比較した一例を示したもので, それぞれ (1) は水平速度の場合の結果, (2) は鉛直速度の場合の結果であ



(1) 水平速度の場合



(2) 鉛直速度の場合

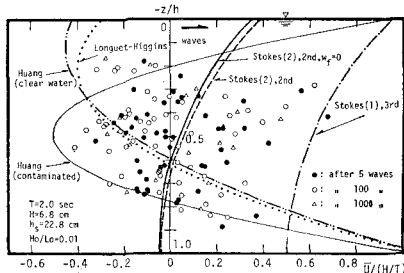
図—4 単一粒子の速度の実験値と理論値との差の鉛直分布

る。これらの図から明らかなように、斜面上では、水平床上的場合の結果に比して水平および鉛直速度とも理論値と実験値の差異が著しく、特に鉛直速度の場合には、水表面に近いほどそのような傾向が顕著であることが明らかである（図中の h_s : 斜面上の測定点での水深）。

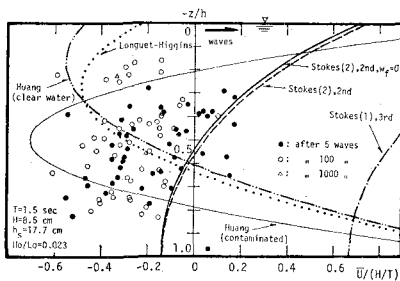
(2) 斜面上における単一粒子の残留速度の鉛直分布特性

ここでは、最初に、単一粒子の残留速度の鉛直分布の一般的特性を述べた後、残留速度の鉛直分布と碎波型式との関連性について述べる。

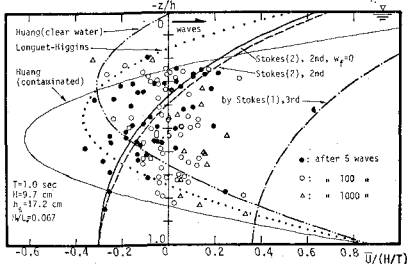
図—5 (1)~(3) は種々の条件下での斜面上における単一粒子の水平残留速度の鉛直分布の代表例を示したものである。図中の ●, ○ および △ 印はそれぞれ 7 波後, 100 波後および 1000 波後の場合の実験結果を、また各曲線は、参考のために従来示されている水平床上における理論結果を示したもので、それぞれ点線は Longuet-



(1) $T=2.0$ sec, $H=6.8$ cm, $h_s=22.8$ cm (巻き波)



(2) $T=1.5$ sec, $H=8.5$ cm, $h_s=17.7$ cm (巻き波)



(3) $T=1.0$ sec, $H=9.7$ cm, $h_s=17.2$ cm (崩れ波)

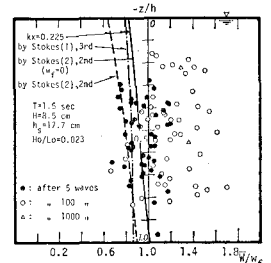
図—5 単一粒子の水平残留速度の鉛直分布

Higgins の Conduction solution²⁾ の結果、細い実線は水表面が油などの薄膜が淀んでいる場合の Huang の理論結果¹⁰⁾, 2点鎖線は水表面が clear water の場合の Huang の理論結果¹⁰⁾, 太い実線は波速の第2定義に基づく Stokes 波の第2近似解を用いて算出される残留速度を $w_f=0$ とおいた場合の結果⁹⁾, 破線は同じく $w_f \neq 0$ の場合の結果⁹⁾, 1点鎖線は Skjelbreia の第3次近似解を用いた場合の結果⁹⁾を示す。これらの図から明らかなように、斜面上では水平床上における場合と異なって、波の継続時間の相違による実験値の分布特性の差異がなく、しかも実験値の分散の程度も水平床上でのそれと比較してかなり著しく、その分布傾向は全般的に不明確で、従来の一定水深上の場合でのいかなる理論曲線のそれとも若干相違しているように思われる。ただ、図の(2)のように、碎波点に近づくにつれて、一般的に残留速度は負に多く分布する傾向

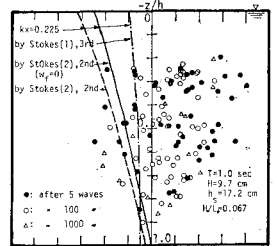
が見られるが、これは、斜面上に発生する戻り流れなどの影響によるものと思われる。

一方、図—6(1)~(3) は、種々の条件下での鉛直残留速度の実験値の鉛直分布の代表例を示したもので、図中の各曲線や○印などの記号は 図—5 のそれと全く同じである。鉛直残留速度の場合も、水平残留速度の場合と同様に、造波してから波の継続時間の違いによる分布特性の差異はなく、しかも全般的に、一定水深の場合の結果と比較して実験値の分散の程度が著しく、また実験値の分布傾向も水平床上での理論曲線や従来の実験結果⁹⁾のそれと著しく相違しているようである。すなわち、水平床上においては、全般的に鉛直残留速度は静水中での沈降速度より小さく、しかもそのような傾向は水表面に近づくにつれて顕著であ

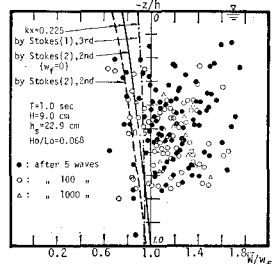
った⁹⁾が、斜面上では、逆に静水中での沈降速度



(1) $T=1.5$ sec, $H=8.5$ cm, $h_s=17.7$ cm (巻き波)



(2) $T=1.0$ sec, $H=9.7$ cm, $h_s=17.2$ cm (崩れ波)



(3) $T=1.0$ sec, $H=9.0$ cm, $h_s=22.9$ cm (崩れ波)

図—6 単一粒子の鉛直残留速度（沈降速度を含む）の鉛直分布

より大きく、しかもその分布傾向は鉛直方向の位置によってあまり変化がないようである。このように、水平床と斜面上での鉛直残留速度の分布特性に著しい相違があることは興味深いことであるが、このような原因の1つとして、斜面上における波形の変形や碎波による乱れおよび戻り流れなどの影響が考えられよう。

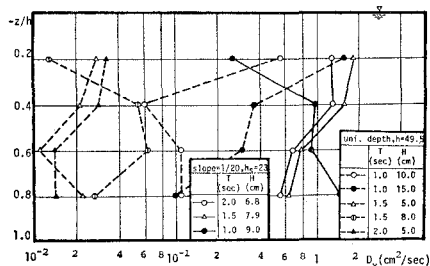
以上、残留速度の鉛直分布の一般的特性について述べてきたが、次に、このような残留速度の鉛直分布特性と碎波型式との関連性について若干の考察を試みる。

前掲の図-5(1)~(3)は、それぞれ(1)と(2)は碎波型式が巻き波、(3)は崩れ波の場合の水平残留速度の鉛直分布の例である。これらの図から明らかなように、水平残留速度の分布は、碎波型式にかかわらずかなり広範囲に分散しており、碎波型式による明確な差異を見い出せないが、本実験結果の範囲内では、巻き波の場合には、どちらかと言えば、図の(2)のように鉛直方向全断面にわたって負の値(沖向き)をとる傾向が強いようである。しかしながら、中には図の(1)のように、必ずしもそのような傾向でない場合があるので、今後さらに詳しい検討が必要である。一方、鉛直残留速度の結果を示した図-6(1)~(3)は、それぞれ(1)は巻き波、(2)と(3)は崩れ波の場合の例であるが、これらの図から明らかなように、本実験条件の範囲内では、ただ7波目の実験結果の分布状態が巻き波と崩れ波の場合とで若干相違することを除けば、水平残留速度の場合と同様に、一般的に碎波型式による残留速度の鉛直分布特性の顕著な差異は見い出せないようである。

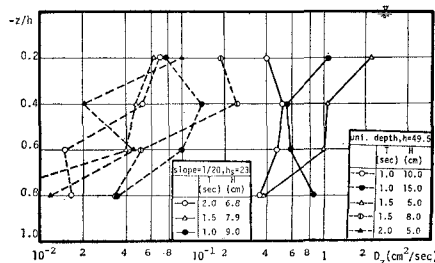
(3) 斜面上における単一粒子の残留速度による拡散係数

ここでは、前報と全く同様にして、潮流の水平混合の場合と類似な考え方に基づいて、単一粒子の水平および鉛直残留速度の分散値から求めた拡散係数の定義式⁹⁾を用いて、斜面上の波動中における拡散係数を推定し、その鉛直分布やオーダーを調べて、これまでの一定水深の場合の結果と比較する。

図-7(1)、(2)は、種々の条件下での斜面上における拡散係数の鉛直分布の結果を、従来の一定水深上の場合のそれと比較した一例で、それぞれ(1)は水平拡散係数、(2)は鉛直拡散係数の結果である。これらの図から明らかなように、斜面上の波動中における拡散係数のオーダーは、水平および鉛直拡散係数とも $10^{-1} \sim 1$ であって、これまでの一定水深の場合の結果(水平拡散係数: $10^{-2} \sim 10^{-1}$, 鉛直拡散係数: $10^{-3} \sim 10^{-1}$)と比較して、明らかにオーダーが1桁大きく、しかもその鉛直分布は、水平床上の場合と同様、波の周期や波高などの波の特性や水平方向の場所的な違いなどによっても若干の差異が見られるようである。このような原因の1つとして、碎波による乱れ効果や戻り流れの影響、斜面上での



(1) 水平拡散係数



(2) 鉛直拡散係数

図-7 傾斜面上の波動中における拡散係数

反射や波の変形に伴う波形の不安定性などの種々の要因が考えられるが、前述のように、斜面上の波動の場合、水平床上に比して拡散効果が大であるということは、傾斜海浜での底質の浮遊機構を論じる上で非常に重要なことであると思われる。

4. 結 論

以上、沈降速度を有する単一粒子を用いて、斜面勾配1/20の傾斜面上の波動中における粒子の挙動特性を、特に速度、軌跡および残留速度に主眼を置いて主として実験的に検討するとともに、残留速度の実験値の分散値から拡散係数を推定し、傾斜面上の波動中に内在する拡散効果の実態を定量的に把握することに努めてきた。その結果を要約すれば、次のようである。

1) 傾斜面上における単一粒子の速度および軌跡は、一定水深の場合の結果と比較して各理論曲線間の差異や理論値と実験値との間の位相や大きさの差異が著しく、従来示した理論曲線では実験値の説明はできないようである。

2) 斜面上での残留速度の実験値は、一定水深の場合の結果と異なって、波の継続時間などの実験条件の違いによる分布特性の差異が明確でなく、しかも一定水深の場合の結果と比較して実験値の分散の程度がかなり著しく、一般的に、その分布傾向は従来示されている一定水深の場合での理論曲線では表わし得ないようである。

3) 残留速度の分布特性の碎波型式による明確な差異はないようであるが、水平残留速度の場合、どちらかと言えば、巻き波における結果は、崩れ波の場合のそれと

比較して鉛直方向の全断面にわたって負の値（沖向き）をとる傾向が強いようである。

4) 傾斜面上での拡散係数は、水平および鉛直方向とも $10^{-1} \sim 1$ のオーダーであって、水平床上での場合の結果と比較して明らかにオーダーが1桁大きい。

最後に、本研究を実施するにあたり、終始、温かいご指導を賜った京都大学工学部岩垣雄一教授、ご助言を賜った京都大学防災研究所土屋義人教授および実験に協力を惜しなかった浦井巧・大石晴弘の両君（当時大阪府立高専学生）に心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Stokes, G. G.: On the theory of oscillating waves, Trans. Camb. Phil. Soc., 8, pp. 441~455, 1847.
- 2) Longuet-Higgins, M. S.: Mass transport in water waves, Phil. Trans. Royal Soc., London, Series A, No. 903, Vol. 245, pp. 535~581, 1953.
- 3) Russel, R. C. H. and J. D. C. Osorio: An experimental investigation of drift profiles in a closed channel, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., pp. 171~183, 1958.
- 4) Isaacson, M. de St. Q.: Mass transport in shallow water waves, Proc. ASCE, Vol. 104, No. WW2, pp. 215~225, May, 1978.
- 5) 土屋義人・安田孝志・山下隆男: 新しい波浪水槽について, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 51~54, 1978.
- 6) Eagleson, P. S. and R. G. Dean: Wave-induced motion of bottom sediment particles, Trans. ASCE, Vol. 126, part 1, pp. 1162~1189, 1961.
- 7) Bijker, E. W., Kalkwijk, J. P. Th. and T. Pieters: Mass transport in gravity waves on a sloping bottom, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 447~465, 1974.
- 8) 平山秀夫: 進行波における単一粒子の挙動に関する研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 5~9, 1977.
- 9) 平山秀夫: 波浪水槽中における進行波による単一粒子の残留速度に関する研究, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 23~27, 1978.
- 10) Huang, N. E.: Mass transport induced by wave motion, Jour. Marine Res., Vol. 28, No. 1, pp. 35~50, 1970.