

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

岩 垣 雄 一*・ 斐 義 光**・ 森 口 治***

1. 序 論

海浜における底質の移動機構を解明するためには、流体場の水理特性を明らかにするとともに、その流体場におかれた底質がどのような機構で運動するかを明らかにする必要がある。とくに海岸工学上問題となる漂砂現象は、主として砕波帯において生ずることから、砕波帯内の波動場の特性と底質の運動特性との関係を明らかにしなければならない。

本研究は、漂砂現象のうち汀線と直角方向に運動するいわゆる“岸沖漂砂”あるいは“たて漂砂”を対象とし、2次元波動水槽における実験にもとづいて、その移動機構を明らかにすることを目的としているが、問題をより簡単にするために、比較的大きい粒径の底質が底面を転動する場合を対象として、その移動機構を解明しようとするものである。

このような立場から、著者らは波による固定斜面上に作用する底面摩擦応力と底面近傍の水粒子速度を測定し、その分布特性を検討してきた¹⁾²⁾。その結果、水粒子速度や底面摩擦応力の分布形状は、波の性質と斜面勾配によって相違すること、したがってそれから底質の移動特性が推定でき、海浜変形の傾向を論じることができることを示した。同様の研究としては、Fisher ら³⁾、佐藤⁴⁾、および渡辺⁵⁾の研究があるが、これらによると、岸向き最大水粒子速度の出現する位相と底面摩擦応力のそれとの位相差は波が砕波点に近づくにつれて線型理論から導かれる値よりも小さくなること (Fisher ら, 1974)、砕波点における底面付近の岸向きならびに冲向き最大流速はストークス波理論よりむしろ微小振幅波理論に似た傾向を有すること (佐藤, 1977)、砕波点およびその前後の波の流速振幅の実験値は流れ関数法による理論値と良い対応を示すこと (渡辺ら, 1980)、などが見出されている。

また、波による質量輸送現象についても、漂砂現象を解明するためには究明しなければならない問題である。

とくに、斜面上の質量輸送速度に関する研究としては、Bijker ら⁶⁾、平山⁷⁾、および土屋⁸⁾の研究があるが、いずれの場合も実験値の散乱が大きい。しかし、循環式波浪水槽を用いて勾配が 1/150 の斜面上を伝播する波の砕波による質量輸送速度を検討した土屋らの研究によれば、底面付近の質量輸送速度は砕波点で最大値を示し、輸送される方向は岸向きであることがわかっている。

このように、斜面上の波動場の特性が少しずつ明らかにされているが、さらに漂砂の移動機構を論じるためには、同時に底質の移動特性をも明らかにしなければならない。本論文は、固定斜面上のポリスチレン粒子 (比重 1.03) と砂の比重にほぼ等しいガラス粒子の挙動を同時に写真撮影することによって、波動場の特性と固体粒子の運動特性との関係を明らかにしたものである。

2. 実験装置および方法

(1) 実験装置

実験は、長さ 30 m、幅 50 cm、深さ 75 cm の片面ガラス張り水槽の中にアルミ製の斜面を設置して行った。波高は、容量式波高計を一樣水深部に 1 台、固体粒子を底面上に押出す斜面上の点に 1 台設置して測定した。

トレーサ粒子であるガラス粒子とポリスチレン粒子は、図-1 に示すような構造の定速度粒子押出装置によ

って、斜面上に同時に 0.05 cm/sec の速度で押出されるようにした。

本実験に使用したガラス粒子は、市販のガラス粒子をマイクロメータを用いて、ほぼ粒径が同じでかつ球形のものを選出し、それにペイントを塗って色分けした。また、ポリスチレン粒子も市

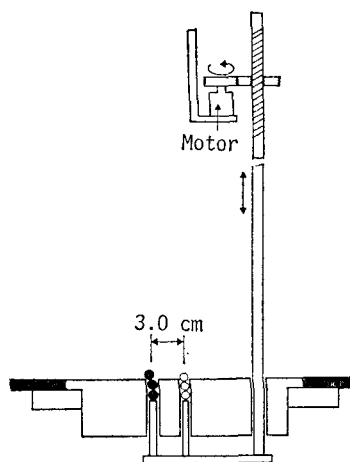


図-1 定速度粒子押出装置

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 工修 京都大学研究生 工学部土木工学科
 *** 正会員 大阪府土木部 寝屋川水系改修工管所

表-1 トレーサー粒子の特性

No.	Material	Mean Diameter (cm)	Fall Velocity (cm/sec)	Specific Gravity	Reynolds No. on Slope (Vs-dh/v)
1	Polystyrene	0.324	3.58	1.03	24
2	Glass	0.230	25.9	2.23	103
3	Glass	0.300	34.2	2.35	174
4	Glass	0.414	42.5	2.47	206
5	Glass	0.491	48.4	2.49	392

販のものを用いて、ガラス粒子と同様にペイントで色分けした。これらの粒子に関する特性は表-1に示すようである。

(2) 実験方法

本実験に用いた斜面は、勾配が 1/10 と 1/20 の 2 種類であり、表-2 に示すような条件の波を作用させ、押出装置によってガラス粒子とポリスチレン粒子を同時に底面上に押出し、16 ミリフィルムカメラを用いてそれらの粒子の動きを撮影した。なお、粒子を押出す 1 対の孔は、波の進向方向に約 40 cm ごとに底面にあけられている。

表-2 実験波の諸元

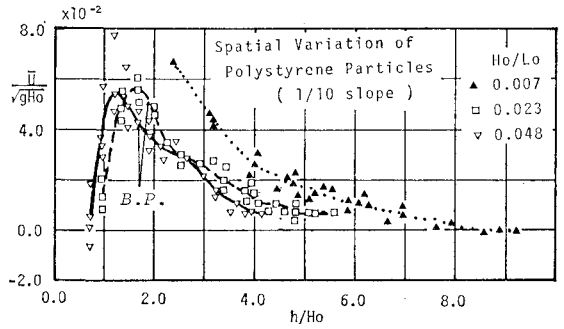
Run No.	Wave Height H_0 (cm)	Wave Period T (sec)	Depth (uniform) h_0 (cm)	Depth (on slope) h (cm)	Wave Steepness H_0/L_0	Slope
1	2.27 ~ 2.78	1.83 ~ 1.83	40.0	6.00 ~ 32.0	0.004 ~ 0.005	1/10
2	5.69 ~ 6.60	1.40 ~ 1.42	40.0	6.00 ~ 32.0	0.020 ~ 0.023	1/10
3	7.77 ~ 8.37	1.10 ~ 1.12	40.0	6.00 ~ 32.0	0.044 ~ 0.048	1/10
4	2.73 ~ 3.02	1.68 ~ 1.70	40.0	1.90 ~ 30.5	0.006 ~ 0.007	1/20
5	5.97 ~ 6.88	1.41 ~ 1.43	40.0	1.90 ~ 30.5	0.021 ~ 0.024	1/20
6	8.09 ~ 8.94	1.10 ~ 1.12	40.0	1.90 ~ 30.5	0.046 ~ 0.050	1/20

粒子の撮影は、約 24 コマ/sec の速度で行い、時間間隔の決定は、トレーサー粒子の動きと同時に撮影したストップウォッチの時間から求めた。また、カメラ誤差をできる限り少なくするために、カメラの奥行方向には、粒子が押出される孔の中心から ± 1.5 cm の間隔を保ってマジックで線を引き、その線を越えて運動する粒子はデータとして採用しなかった。この範囲におけるカメラ誤差は 3~4% 程度であった。

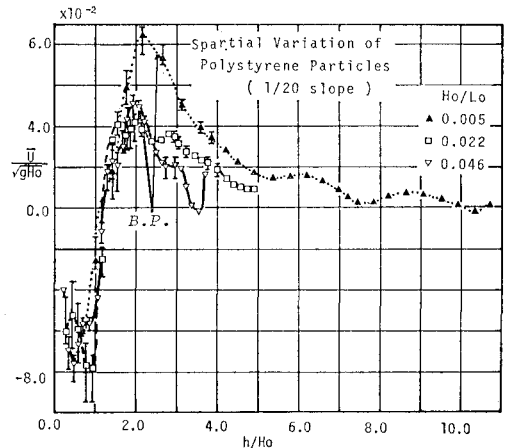
解析方法は、波の 1 周期間における粒子の移動距離をフィルム上で読み取り、波の周期で割って平均移動速度とした。

3. 実験結果および考察

図-2 は底面に沿って運動するポリスチレン粒子の波の 1 周期間の平均移動速度 $\bar{U}$ を重力加速度と沖波波高 H_0 を用いて無次元化し、水深沖波波高比 h/H_0 との関係で示したものであり、(a) が斜面勾配 1/10 の場合、



(a) 斜面勾配 1/10



(b) 斜面勾配 1/20

図-2 質量輸送速度の場所的分布

(b) が 1/20 の場合の結果で、それぞれ 3 種類の沖波波形勾配に対して示してある。これらの結果から、比重が 1.03 のポリスチレン粒子は、勾配が 1/10 の場合には波形勾配に関係なくほとんど岸方向に輸送され、碎波点よりも少し岸側で移動速度が最大を示す。斜面勾配が 1/20 の場合も、波形勾配に関係なく 1/10 斜面勾配の場合と同様な傾向を示すが、ただ $h/H_0 < 1.25$ の浅い場所では沖方向に輸送される。

図-3 は 1/10 勾配斜面におけるガラス粒子の平均移動速度の分布に及ぼす粒径の影響を沖波波形勾配別に示したものであり、図-4 は 1/20 勾配斜面の場合の結果を示している。なお、図中にはポリスチレン粒子の結果も示している。これらの図からわかることは、粒径が大きくなるほど移動速度の岸方向成分の値が小さくなり、沖方向成分の値が増加する。さらに、波形勾配が大きくなると、粒径の増大とともに移動速度の最大点が碎波点よりも少し岸側へ移って行くようである。また、移動速度が 0 となる場所すなわち Eagleson⁹⁾ のいう “null point” は、岸向き速度が存在する場合には一般に 2 カ所現われ、そのうちの沖側の点は粒径が小さくなるほど深い場所へ移動し、岸側の点はわずかながら逆に浅い方

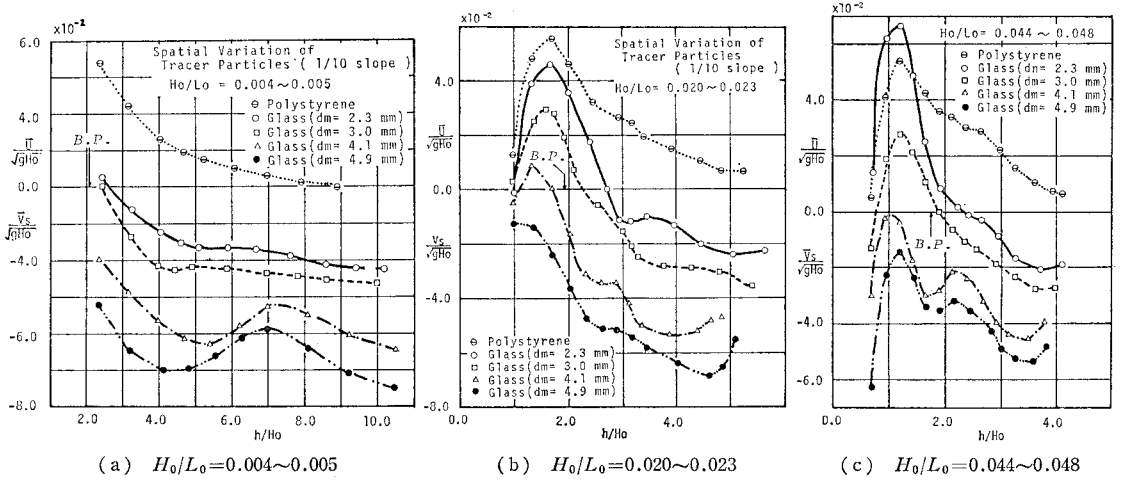


図-3 各種の固体粒子の平均移動速度(斜面勾配 1/10)

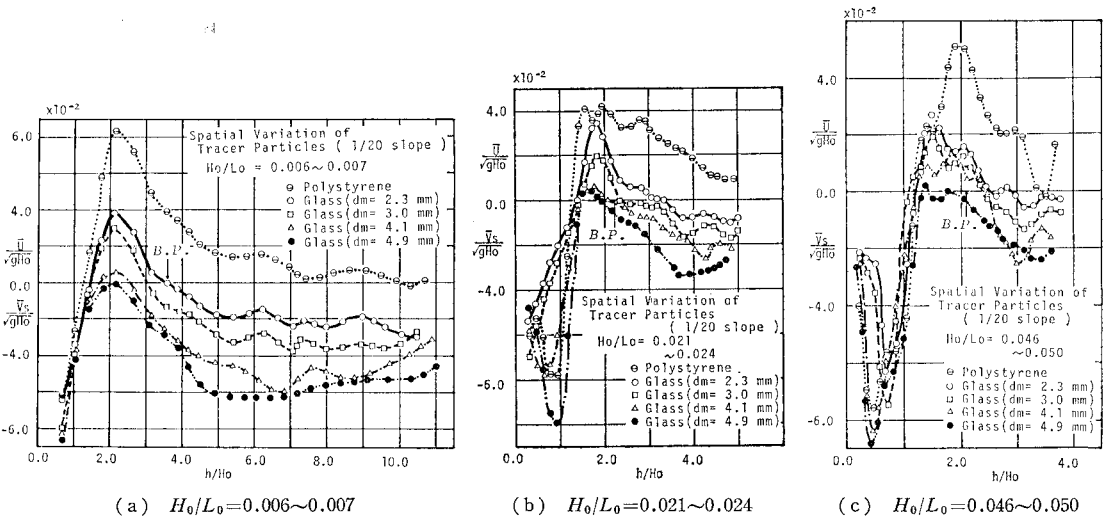


図-4 各種の固体粒子の平均移動速度(斜面勾配 1/20)

へ移動することがわかる。

図-5 は無次元平均移動速度に及ぼす波形勾配の影響を示す1例で、粒径が 2.3mm のガラス粒子の場合の結果である。分布形状は斜面勾配や波形勾配によらず同じ

形を示すが、2つの“null point”は波形勾配の増大とともに岸側へ移動するようである。

図-6 は 1/20 勾配斜面の場合のガラス粒子の平均移動速度とポリスチレン粒子のそれとの関係を示す、例として

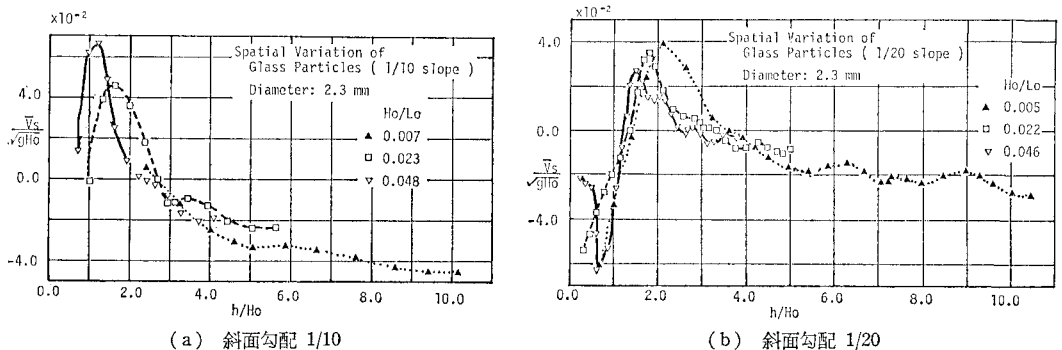
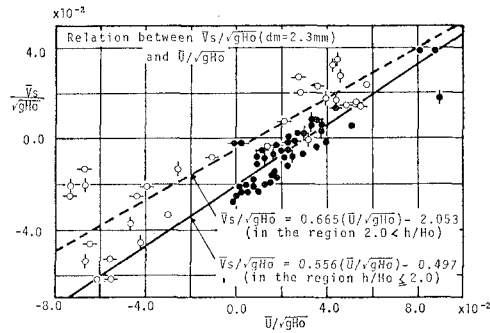
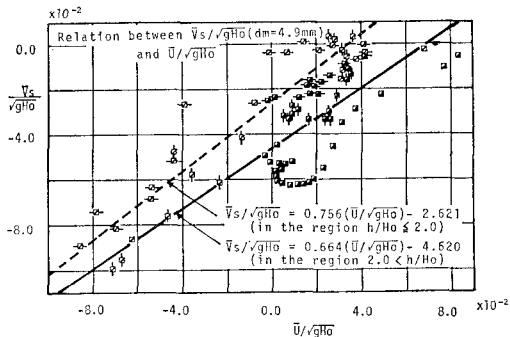


図-5 無次元平均移動速度の分布に及ぼす波形勾配の影響(ガラス粒径 2.3mm)



(a) ガラス粒径 2.3 mm



(b) ガラス粒径 4.9 mm

図-6 ガラス粒子の平均移動速度とポリスチレン粒子の平均移動速度の関係 (斜面勾配 1/20)

2.3 mm と 4.9 mm の粒径に対して示したものである。

図-3 からわかるように、 $h/H_0 \approx 2.0$ を中心として移動速度の分布が異なるので、 $h/H_0 \leq 2.0$ の場所と $2.0 < h/H_0$ とに分けて検討した。図中の直線は最小2乗法によって決定した両者の関係であり、破線は $h/H_0 \leq 2.0$ のデータ、実線は $2.0 < h/H_0$ のデータによるものである。得られた直線関係は次のようである。

$h/H_0 \leq 2.0$ の場所では、

$$\begin{aligned} \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 0.556(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 0.497 & (d_m=2.3\text{mm}) \\ \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 0.542(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 0.893 & (d_m=3.0\text{mm}) \\ \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 0.617(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 1.831 & (d_m=4.1\text{mm}) \\ \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 0.756(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 2.621 & (d_m=4.9\text{mm}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$2.0 < h/H_0$ の場所では、

$$\begin{aligned} \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 0.665(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 2.053 & (d_m=2.3\text{mm}) \\ \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 0.676(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 2.874 & (d_m=3.0\text{mm}) \\ \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 0.660(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 3.877 & (d_m=4.1\text{mm}) \\ \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 0.664(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 4.620 & (d_m=4.9\text{mm}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\bar{V}_s/\sqrt{gH_0}$ はガラス粒子、 $\bar{U}/\sqrt{gH_0}$ はポリスチレン粒子の値をあらわす。これらの結果から、 $2.0 < h/H_0$ の場所における $\bar{V}_s/\sqrt{gH_0}$ と $\bar{U}/\sqrt{gH_0}$ の関係は非常に特徴的であり、かつ興味深い。すなわち、式 (2)

でわかるように、 $2.0 < h/H_0$ の場所におけるガラス粒子の無次元平均移動速度は、粒径によらず、ポリスチレン粒子の移動速度を約 2/3 倍してある一定値を差引いた値であることである。一方、 $h/H_0 \leq 2.0$ の場所では、このような明確な関係は見出せない。

なお、斜面勾配が 1/10 の場合についても、 $h/H_0 \leq 1.8$ の場所を基準にして検討したのであるが、 $h/H_0 \leq 1.8$ の場所におけるデータ数が 8 ケースしかないため議論し得る結果は得られなかった。一方、 $1.8 < h/H_0$ の場所では、次のような直線関係が得られた。

$$\begin{aligned} \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 1.018(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 3.676 & (d_m=2.3\text{mm}) \\ \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 1.111(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 4.643 & (d_m=3.0\text{mm}) \\ \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 0.869(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 7.122 & (d_m=4.1\text{mm}) \\ \bar{V}_s/\sqrt{gH_0} &= 0.758(\bar{U}/\sqrt{gH_0}) - 8.360 & (d_m=4.9\text{mm}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

4. 結 論

本研究は、水の比重にほぼ等しいポリスチレン粒子と砂の比重に近いガラス粒子をトレーサーとして、粒径が比較的大きいガラス粒子の運動特性を波動場の特性との関係から明らかにする目的で行ったものであり、とくに波の 1 周期間における平均の移動速度について検討した。その結果、次のようなことが明らかになった。

(1) 水粒子の運動をほぼ代表するものと考えられるポリスチレン粒子の底面上における 1 周期平均移動速度の場所的分布が、斜面勾配が 1/10 と 1/20 で、沖波波形勾配が約 0.005, 0.02, 0.05 に対して明らかになった。

(2) ガラス粒子の 1 周期平均移動速度の場所的分布は粒径によらず同様の分布形状を示し、碎波点付近で最大となる。そして最大値が岸方向速度の場合には一般に“null point”が 2 カ所現われ、浅い方の岸側と深い方の沖側では粒子は沖方向に輸送される。

(3) ガラス粒子の無次元平均移動速度とポリスチレン粒子のそれとの間には、碎波点より沖側と岸側とに分けると明確な相関関係がある。

本研究において用いたガラスのトレーサー粒子の粒径は、自然海浜における細砂に比べて大きく、底面を浮遊しないで転動して移動する粒子として選んだが、得られた結果は、従来より行われてきている移動床模型海浜の実験結果をある程度説明できるのではないかと考えている。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・裴 義光：波による水底斜面上の摩擦力に関する実験，第 25 回海岸工学講演会論文集，pp. 38~41, 1978.
- 2) 岩垣雄一・裴 義光：碎波帯を含む固定斜面上の波動場の特性に関する実験的研究，第 27 回海岸工学講演会論文集，pp. 35~39, 1980.
- 3) Fisher, J., B. Johnson and M. E. McCormick: Time

- dependent shear stress beneath a shoaling wave, International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, Vol. 1, pp. 799~816, 1974.
- 4) 佐藤幸雄: 砕波点における砕波の底面流速に関する研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 40~44, 1977.
 - 5) 渡辺 晃・磯部雅彦・野沢是幸・堀川清司: 斜面上で砕波する波の底面流速に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 40~44, 1980.
 - 6) Bijker, E. W., J. P. Th. Kalkwijk and T. Pieters: Mass transport in gravity waves on a sloping bottom, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 447~465, 1974.
 - 7) 平山秀夫: 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, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 1~5, 1979.
 - 8) 土屋義人・筒井茂明・安田孝志・山下隆男・平口博丸: 砕波の質量輸送について, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 45~49, 1980.
 - 9) Eagleson, P. S. and R. G. Dean: Wave-induced motion of bottom sediment particles, Trans. ASCE, Vol. 126, Part 1, pp. 1162~1189, 1961.
-