

# 進行波による浮遊砂の濃度分布について

細井正延\*・稲垣青生\*\*

## 1. まえがき

海岸の漂砂現象を取り扱う場合の基礎事項の一つとして、進行波による浮遊漂砂がある。底質の浮遊に関する研究としては、実験や現地観測によって浮遊砂の鉛直濃度分布と波・底質特性との関係を明らかにしようとするもの<sup>1)~3)</sup>、あるいは流体運動の乱流構造から浮遊機構を解明しようとするもの<sup>4)</sup>などの研究がなされてきた。特に底面に砂れん (Sand ripples) が形成されている場合において、時間的平均濃度の鉛直分布形状、分布曲線の基準点の位置およびその点での濃度、拡散係数の鉛直分布、濃度の時間的変動の性状などに関しては、満足すべき結果が得られていない。著者の1人は先に、濃度分布曲線の基準点の位置と波・水深・底質粒径との関係、濃度変動のスペクトル解析による底質の浮遊機構について考察を行ったが<sup>5)</sup>、その後には得られた実験資料をも加え

て、今回は濃度の鉛直分布形状、分布曲線の折曲点 (基準点) の底面からの高さ、基準点での濃度、さらに水路方向の濃度分布について検討を行った結果を報告する。

## 2. 実験装置と方法

実験は長さ 26.9m、幅 0.6m、深さ 1.2m の片面ガラス張り鋼鉄製造波水槽の底面に水平に砂を敷き、波を起

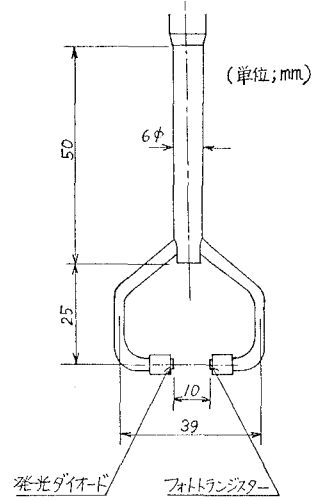


図-1 光電管式濃度計

表-1 実験条件

実験番号	中央粒径 $d_{50}$ (mm)	水温 $t$ (°C)	水深 $h$ (cm)	波周期 $T$ (sec)	波高 $H$ (cm)	実験番号	中央粒径 $d_{50}$ (mm)	水温 $t$ (°C)	水深 $h$ (cm)	波周期 $T$ (sec)	波高 $H$ (cm)		
1	0.05	15.5	29.0	1.00	8.02	23	0.15	11.0	29.0	1.37	11.43		
2	"	13.2	"	"	8.24	24	"	"	"	"	9.71		
3	"	14.0	"	1.37	7.92	25	"	"	"	1.70	10.25		
4	"	16.0	"	"	10.03	26	"	8.0	"	"	13.06		
5	"	12.5	"	"	10.41	27	"	12.0	"	"	10.25		
6	"	14.5	"	"	10.01	28	S <sub>1</sub>	0.19	15.0	35.0	1.30	10.15	
7	"	16.0	"	1.70	7.21	S <sub>2</sub>	"	"	"	"	10.43		
8	"	16.5	"	"	10.97	29	S <sub>1</sub>	"	5.5	"	1.50	10.27	
9	"	14.0	"	"	11.06	S <sub>2</sub>	"	"	"	"	11.55		
10	"	12.0	"	"	10.49	30	S <sub>1</sub>	"	14.5	"	"	7.96	
11	"	13.8	35.0	1.00	9.70	S <sub>2</sub>	"	"	"	"	9.74		
12	"	10.8	"	1.20	9.60	31	S <sub>1</sub>	"	13.5	"	1.68	9.69	
13	S <sub>1</sub>	"	8.0	"	8.78	S <sub>2</sub>	"	"	"	"	10.77		
S <sub>2</sub>	"	"	"	"	10.21	32	S <sub>1</sub>	"	18.8	"	1.70	12.04	
14	0.09	"	29.0	1.37	11.48	S <sub>2</sub>	"	"	"	"	12.89		
15	"	9.0	"	"	10.37	33	S <sub>1</sub>	"	6.5	"	1.90	9.69	
16	"	6.5	"	"	10.17	S <sub>2</sub>	"	"	"	"	11.45		
17	S <sub>1</sub>	"	15.5	35.0	1.30	9.55	34	S <sub>1</sub>	"	12.9	"	2.10	9.18
S <sub>2</sub>	"	"	"	"	10.20	S <sub>2</sub>	"	"	"	"	10.36		
18	S <sub>1</sub>	"	11.0	"	9.10	35	0.21	14.5	"	1.15	10.45		
S <sub>2</sub>	"	"	"	"	10.40	36	S <sub>1</sub>	"	12.5	"	1.50	9.10	
19	S <sub>1</sub>	"	3.0	"	9.36	S <sub>2</sub>	"	"	"	"	9.47		
S <sub>2</sub>	"	"	"	"	10.70	37	S <sub>1</sub>	"	22.5	30.0	1.22	12.54	
20	S <sub>1</sub>	"	10.0	"	1.90	11.00	S <sub>2</sub>	"	"	"	12.61		
S <sub>2</sub>	"	"	"	"	11.40	38	S <sub>1</sub>	"	27.0	"	1.45	10.39	
21	S <sub>1</sub>	"	10.2	30.0	1.88	8.24	S <sub>2</sub>	"	"	"	12.61		
S <sub>2</sub>	"	"	"	"	9.39	39	S <sub>1</sub>	"	25.5	"	1.63	10.20	
22	0.15	11.0	29.0	1.37	11.19	S <sub>2</sub>	"	"	"	"	11.48		

\* 正会員 工博 名古屋工業大学教授 土木工学科  
 \*\* 正会員 工修 日本工管(株)技術研究所

として浮遊砂濃度を測定した。濃度の測定にはメトロ電機研究所製の光電管式濃度計を用いた。濃度計は 図-1 に示すように、発光ダイオードとフォトトランジスタとからなっていて、水中を透過する光を砂粒子が遮断する割合によって濃度を測定しようとするもので、受光面における光量の増減を電圧変換するようになっている。実験に用いた砂は中央粒径が 0.05, 0.09, 0.15, 0.19~0.21 mm の 4 種類で、波の周期は 1.0~1.9 sec, 波高 7~13 cm, 水深 30 cm, 35 cm である。実験条件は表-1 のとおりである。

3. 実験結果と考察

(1) 水路方向の濃度分布

水深・波長比 ( $h/L$ ) が小さく、波高・水深比 ( $H/h$ ) が大きい場合は非定形波となり、二次波峰現象が現われる。したがって、二次波峰の発生点と重なり点が波の進行方向に一定の間隔で繰り返し出現する。水路底に砂を敷いて、このような波を長時間にわたって作用させると、二次波峰の発生間隔と同じ波長をもつ砂堆 (Sand wave) が発生することを、すでに著者が報告している<sup>6)</sup>。すなわち、水路方向の波の不均一性、したがって砂床面近くの水粒子速度が一様でないことが砂堆の発生原因と考えられるので、二次波峰の重なり点 ( $S_1$  点) と発生点 ( $S_2$  点) で鉛直方向の濃度分布を測定したところ、 $S_1$  点での濃度の方が  $S_2$  点でのそれよりも常に大きくなった。そこで、 $S_1, S_2$  点での波高および水底から水面までの種々の高さでの水粒子速度の水平成分の時間変化を測定し、一方各成分波の合成波としての波形の式から計算によって水粒子速度を求めた。この場合、波高  $H=9.1$  cm ( $S_1$  点), 11.2 cm ( $S_2$  点), 周期  $T=1.78$  sec, 水深  $h=30$  cm である。二次波峰現象における波形  $\eta(t, x)$  は、次のように 6 個の振幅の大きい成分で表示できる<sup>7)</sup>。

$$\begin{aligned} \eta(t, x) = & A_{01} \cos(k_0 x - 2\pi f_0 t) \\ & + A_{02} \cos(2k_0 x - 4\pi f_0 t) \\ & + A_{03} \cos(3k_0 x - 6\pi f_0 t) \\ & + A_{11} \cos\{(k_0 + \Delta k)x - 2\pi f_0 t\} \\ & + A_{12} \cos\{(2k_0 + \Delta k)x - 4\pi f_0 t + \pi\} \\ & + A_{13} \cos\{(3k_0 + \Delta k)x - 6\pi f_0 t + \pi\} \\ & \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ここで、 $f_0, k_0$ : 基本波の周波数, 波数,  $\Delta k = 2\pi/X$ ,  $X$ : 二次波峰の発生点の間隔, である。

式 (1) で  $x=0, t=0$  とし、 $S_1$  点での波高 9.1 cm を代入し、また各成分波の振幅  $A_{02} \sim A_{13}$  と基本波の振幅  $A_{01}$  の比と  $h/L$  との関係を表わす石田の実験結果 (参考文献 7) の 図-7 から、 $A_{01} \sim A_{13}$  を求めた。また、近似的に波頂面の曲率を考慮しない長波と見なして、 $u = \sqrt{g/h \cdot \eta}$  で水粒子の水平速度  $u$  を表わし、 $x=0$  ( $S_1$  点) および  $x=X/2=2.5$  m ( $S_2$  点) での  $u$  の時間

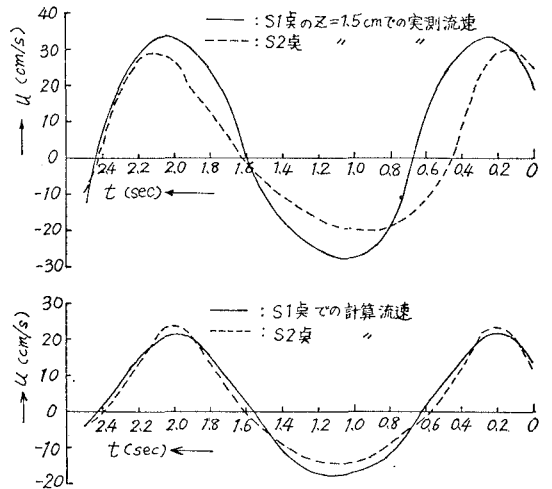


図-2 水粒子速度の時間変化

変化を算出した。水底面からの高さが 1.5 cm の  $u$  の計算値と測定値を示すと 図-2 のとおりである。計算値と測定値はかなり大きな差があるが、計算値は波を長波と見なして求めたものであり、また測定も電磁誘導型プロベラ式の流速計を用いているので精度が良好でなく、いずれの値も正確ではない。しかし、冲向きの流速 (図-2 で流速値が負で示されている) を  $S_1$  と  $S_2$  で比較すると、 $S_2$  の方が小さいことがわかる。すなわち、浮遊砂に大きな影響を与える冲向き流速が小さいことは、 $S_2$  点での浮遊砂濃度が  $S_1$  点でのそれよりも小さいことを意味しており、したがって水路方向の場所によって浮遊砂濃度が異なることが理解でき、またこの現象が砂堆の形成に関連するものと考えられる。このことから、底面に砂れんが発生し、しかも  $h/L$  が小さく  $H/h$  が大きい状態での実験では、濃度測定的位置を適切に選定しないと測定値の信頼性に問題が生じることになる。

(2) 濃度の鉛直分布形状

浮遊砂濃度が定常状態に達したときの、波の 1 周期当りの平均濃度の鉛直分布は、近似的に次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \epsilon_z \frac{dm}{dz} + w_0 m &= 0 \\ \therefore \frac{m}{m_a} &= \exp\left(-\int_a^z \frac{w_0}{\epsilon_z} dz\right) \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 $\epsilon_z$ : 鉛直方向の拡散係数,  $w_0$ : 砂粒の沈降速度,  $m_a$ :  $z=a$  の所の濃度, である。

$m$  の値を求めるためには、 $\epsilon_z$  と  $m_a$  の値を与えなければならない。進行波の場合の  $\epsilon_z$  の鉛直分布については、本間・堀川・鹿島, 野田の研究<sup>8), 9)</sup> があるので、ここでは  $z=a$  の位置 (基準点) のきめ方を実験によって検討した。基準点を分布曲線のどの位置にとるかについても本間らは実験的検討を行い、底面に形成される砂れんの影響を考慮して、 $m_a$  が  $a/\lambda$  と  $u_0 \sqrt{\nu/T}$  ( $\lambda$ : 砂れん

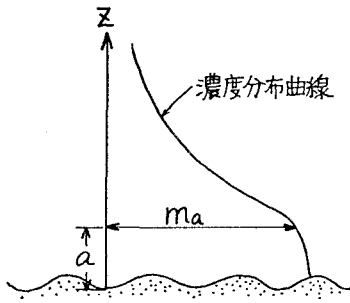


図-3 濃度分布曲線の基準点

のピッチ,  $u_0$ : 底部水粒子移動の最大速度,  $\nu$ : 水の動粘性係数,  $T$ : 波の周期) の関数であることを見いだした<sup>10)</sup>。ここでは, 砂れん上に発生する渦の内部とそれより上方では拡散係数  $\epsilon_z$  が著しく異なるであろうと考えて, 浮遊砂濃度の鉛直分布形状が急変する点, すなわち逆くの字形曲線の折曲点を基準点にとることとし, その点の砂れん谷上からの高さを  $a$  で表わし, そこでの濃度値を  $m_a$  とした (図-3)。

濃度分布形状の形式として, “くの字形” と “逆くの字形” の 2 種類に分類されることはすでに野田<sup>11)</sup>および著者<sup>12)</sup>が報告しているが, その後に著者が続いて行った実験資料も併せて用いて, 逆くの字形の出現条件を波・水深・底質粒径から調べたところ, 境界層厚さを  $\delta$  とすると  $u_0\delta/\nu$  が大きく, また  $w_0h/\nu$  が小さいほど逆くの字形が現われやすいことがわかった。この関係を示すのが図-4 である。図-4 で曲線より下方で逆くの字形が現われ, 上方では直線形または形状が不規則で形式の判断が不可能なものである。底面に砂れんが存在するときには, 水粒子が冲向きに移動する際の渦のために底質砂が浮き上って, 渦が強く影響する高さまでは濃度の減少があまりなく, それより上方で濃度が急減する場合に逆

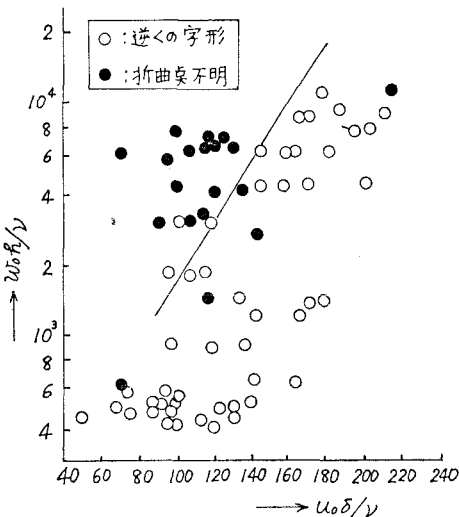


図-4 逆くの字形曲線の出現条件

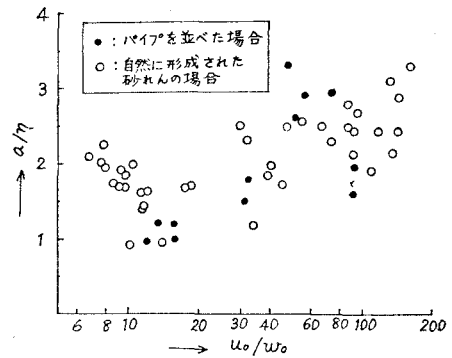


図-5 基準点の高さ ( $a/\eta$  と  $u_0/w_0$  の関係)

くの字形が現われる。底面に砂れんが発生しない場合を除けば, たとえ砂れんが非常に小さい場合でも, 底面のごく近くでは逆くの字形が出現しているはずであるが, これは測定結果に現われにくい。このことから, 砂れんが存在しないか, あるいは非常に小さな砂れんの場合には, 逆くの字形分布は生じないと考えてよいであろう。

前にも述べたように, 基準点の高さとして砂れんの谷から上方へ, 逆くの字形曲線の折曲点までの高さ  $a$  を採用することにした。実測の砂れんの高さを  $\eta$  とし,  $a/\eta$  と  $u_0/w_0$  との関係を示すと図-5 のようである。前報<sup>13)</sup>では  $a/\eta$  と  $u_0\delta/\nu$  の関係で表わしたが, その後に行った実験資料を加えて整理したところ, 図-5 のような表示方法がより良好であることがわかった。図-5 の中の黒丸印は, 前報に示したように水槽底面に直径 3.4 cm の円形管を 7 cm 間隔に敷き並べ, その間に砂を敷いて人工粗度をつくり波を起こした場合で, このときの  $\eta$  はパイプ間の凹部の砂床面からパイプ上面までの高さをとった。図-5 の実験値はかなり散乱しているが, 波高・周期・水深・水温・砂粒径が既知であれば,  $u_0$  と  $w_0$  は計算され, また本間・堀川・鹿島の実験結果<sup>14)</sup>を用いれば  $\eta$  が求まるから, 図-5 から基準点の高さ  $a$  の値を推算することができる。次に, 横軸に  $u_0$  をとり縦軸に  $a$  をとって粒径の大きさごとに示すと図-6 のようになり, 両者の間には粒径にかかわらず一定の関係が成立す

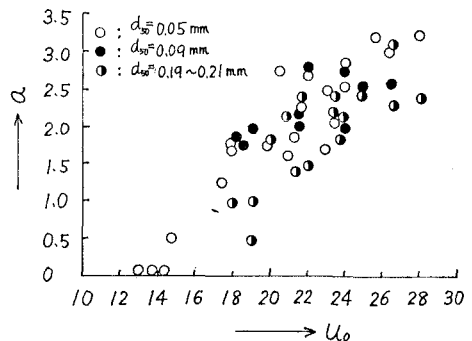


図-6 基準点の高さ ( $a$  と  $u_0$  の関係)

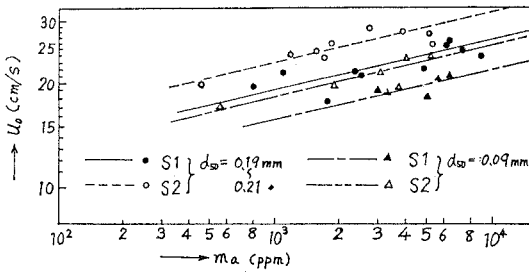


図-7 基準点での濃度 ( $m_a$  と  $u_0$  の関係)

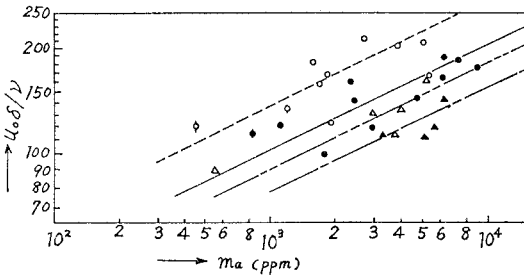


図-8 基準点での濃度 ( $m_a$  と  $u_0 \delta / \nu$  の関係)

ることがわかる。図-6では、図-5のように砂れんの高さ  $\eta$  および砂粒の沈降速度  $w_0$  の要素ははいっていないが、これは  $w_0$  にほぼ比例した  $\eta$  の値をもつ砂れんが発生するからであると考えられる。

(3) 基準点における浮遊砂濃度

$S_1$  および  $S_2$  点における時間的平均濃度の鉛直分布曲線から、基準点  $z=a$  の高さの所の濃度  $m_a$  を求め、 $m_a$  と  $u_0$  の関係を粒径別に示すと図-7のようになる。同様に  $m_a$  と  $u_0 \delta / \nu$  ( $\delta = \sqrt{\nu T / \pi}$ ) の関係は図-8のようである。図-7, 8ともに実験値はかなり散乱しているが、濃度と波高・周期・水深との間にはほぼ一定の関係が存在する。しかし粒径効果については実験資料数が不足であって、なお検討の必要がある。

4. 結 論

(1) 底質移動の実験を行う場合には、進行波であっても二次波峰現象によって生じる水路方向の濃度変化を考慮して、測定点を選定しなければならない。

(2) 浮遊砂濃度の鉛直分布曲線の形状や、水底から水面までの浮遊砂の全量を求めるために必要な基準点の高さおよびその点の濃度と波の大きさ・水深・底質粒径との関係を明らかにすることができた。しかし、この結果を現地海岸に精度よく適用するためには、現地の観測資料を加えて縮尺効果を十分に検討することが望ましい。

(3) 水底から水面までの浮遊砂の全量を求める場合に、本研究の方法で定められる基準点は底面に非常に接近しているので、基準点から水面までの量を全量と考えてよい。あるいは、逆くの字形曲線であるから基準点より底面までの間は一様濃度として全量を求めてもよい。

この研究を行うにあたり、二次波峰現象について石田昭助教授より助言を、また実験と資料整理について大学院生安藤智幸君の助力を得たので謝意を表するとともに、この研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 本間 仁・堀川清司・鹿島遼一：波による浮遊砂に関する研究，第11回海岸工学講演会講演集，1964.
- 2) 野田英明：波による底質の浮遊，第14回海岸工学講演会講演集，1967.
- 3) 野田英明・岩佐敏博：波による底質の浮遊機構(1)，第18回海岸工学講演会論文集，1971.
- 4) 堀川清司・渡辺 晃：波運動に伴う乱れと底質の浮遊，第17回海岸工学講演会論文集，1970.
- 5) 細井正延・木田三次：進行波による底質の浮遊機構，第20回海岸工学講演会論文集，1973.
- 6) 細井正延・石田 昭・平山秀夫：進行波によるduneの発生に関する研究，第25回年次学術講演集，1970.
- 7) 石田 昭：浅海領域での分裂波 Soliton の特性について，第22回海岸工学講演会論文集，1975.
- 8) 1) に同じ
- 9) 野田英明・岩佐敏博：進行波による底質の浮遊機構(II)，第20回海岸工学講演会論文集，1973.
- 10) 1) に同じ
- 11) 3) に同じ
- 12) 5) に同じ
- 13) 5) に同じ
- 14) 1) に同じ