

進行波による底質の浮遊機構について

細井 正延*・木田 三次**

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^{1),2),3)}、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⁴⁾などの研究がなされてきた。しかし、濃度の鉛直分布形状、分布曲線の折曲点（基準点）の高さ、拡散係数の分布、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。特に、底面に砂れん（Sand ripples）が形成されている場合には多くの問題点があるので、本研究ではこの状態を対象にして実験的に検討を行なった。

2. 実験装置と方法

浮遊砂の濃度分布は底面粗度すなわち砂れんの規模と密接な関係があることは明らかであるが、実験によって形成される砂れんはその形状・大きさが制約されるので、現象を明確には握ることがむずかしい。そこで、図-1に示す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造り、波を起こして浮遊砂濃度を測定した。同時に、波によって水平砂床に発生した砂れんの場合についても同様の測定を行なった。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⁵⁾。図-2に示すように、発光

ダイオードとフォトトランジスターとからなっていて、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、平均粒径が 0.05, 0.09, 0.15 mm のほぼ一様粒径の 3 種類である。波の周期は 1.00, 1.37, 1.70 sec, 波高は 6.5 ~ 11.5 cm で、水深はすべて 30 cm で 25 種類の実験を行なった（表-1）。

3. 実験結果と考察

(1) 濃度分布曲線の基準点の高さについて

濃度計により測定した濃度の時間的変動を示すと、たとえば図-3 のようである。濃度計をパイプ間の砂床面上の 0.5, 2.5, 4.5 cm の所に置いて測定した記録で、波の周期は 1.7 sec, 波高 10.0 cm である。濃度計増幅器から出る電圧出力を磁気テープに記録し、このデータの中から水面波の 5 波分の時間内のものを 1/100 sec ごとに取り出して、時間的平均濃度 ($\bar{m}$) を算定した。横軸に $\bar{m}$ をとり、縦軸に砂れんの谷またはパイプ間の砂面からの高さ (z) をとって鉛直濃度分布の図を描いたが、それらの中の 2 例を示すと図-4, 図-5 のようである。また、同図には濃度の時間的変動値の標準偏差から $\bar{m}$ を差し引いた値 $\sqrt{m'^2}$ の鉛直分布も示されている。 $\bar{m}$, $\sqrt{m'^2}$ とともに底面近くでは大きな変化はなく、分布曲線は「逆くの字形」をしているが、それより上方では「くの字形」になっている。図-6 に示すように、底面近く

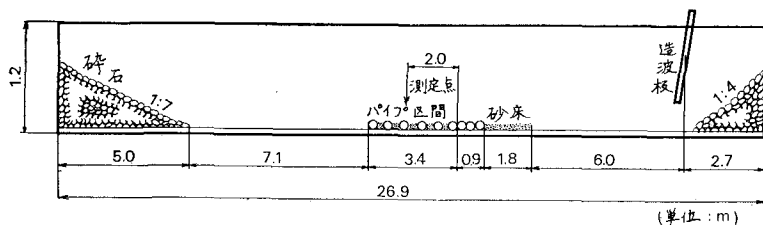


図-1 波動水槽

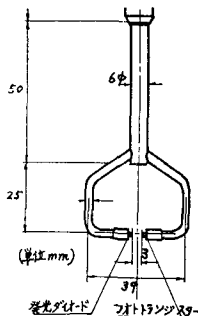


図-2 光電管式濃度計

* 正会員 工博 名古屋工業大学教授 土木工学科

** 正会員 水産庁漁港部

表-1 実験の条件

実験 番号	平均粒径 d (mm)	周 期 T (sec)	波 高 H (cm)		砂床面から、パイプ 上面までの高さ η_p (cm)	砂れんの高さ η_s (cm)	砂れんの波長 λ (cm)
			パイプ上	砂れん上			
1	0.05	1.00	7.78	8.02	1.2	0.7	3.6
2	"	1.00	8.36	8.24	2.5	0.8	3.3
3	"	1.37	7.48	7.92	1.0	—	—
4	"	1.37	9.10	10.03	1.1	—	—
5	"	1.37	8.93	10.41	1.6	0.9	5.9
6	"	1.37	9.06	10.01	0.5	1.1	5.6
7	"	1.70	6.51	7.21	1.1	1.3	4.7
8	"	1.70	10.20	10.97	2.0	1.5	4.9
9	"	1.70	10.00	11.06	2.3	1.4	6.5
10	"	1.70	10.13	10.49	0.9	1.2	5.9
11	0.09	1.37	10.33	11.48	1.7	1.3	5.7
12	"	1.37	9.68	10.37	2.5	0.9	5.8
13	"	1.37	10.01	10.17	0.8	1.1	5.4
14	0.15	1.37	12.06	11.19	1.8	1.2	6.5
15	"	1.37	9.98	11.43	2.5	1.3	6.8
16	"	1.37	9.35	9.71	0.8	1.4	6.8
17	"	1.70	8.30	10.25	1.7	1.5	9.0
18	"	1.70	10.90	13.06	2.5	1.2	7.6
19	"	1.70	8.29	10.25	1.0	1.7	8.0
20	0.09	1.00	—	8.57	—	0.6	3.5
21	"	1.70	—	7.25	—	0.8	5.2
22	"	1.70	—	9.25	—	1.3	7.4
23	0.15	1.00	—	8.23	—	0.7	3.5
24	"	1.70	—	10.35	—	1.7	7.5
25	"	2.00	—	6.48	—	1.8	9.0

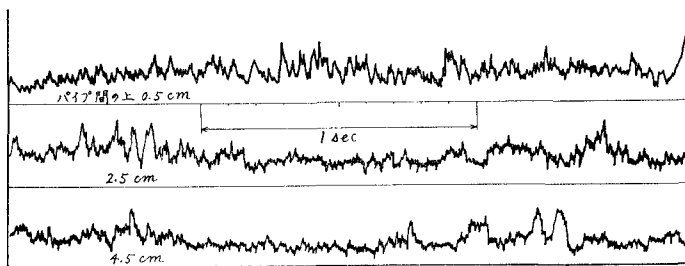


図-3 濃度の時間変動

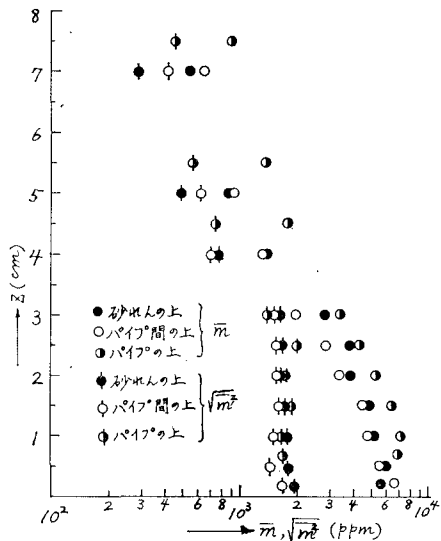


図-4 鉛直濃度分布 (No. 6)

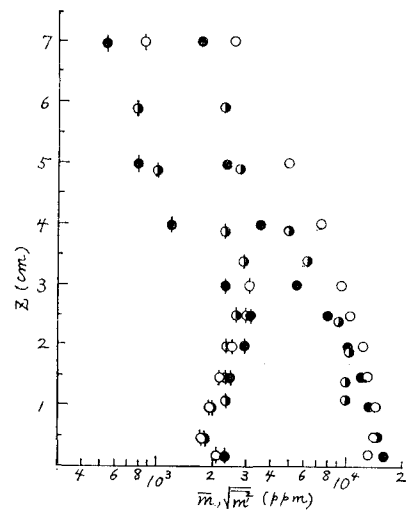
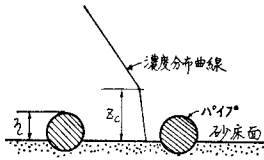
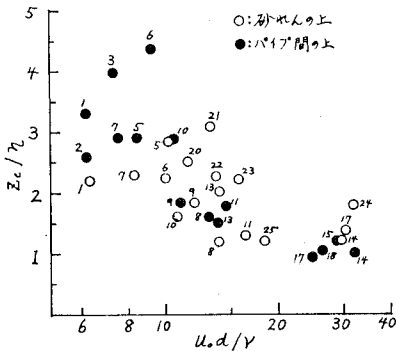


図-5 鉛直濃度分布 (No. 10)

図—6 η と z_0

の「逆くの字」の折曲点の位置を濃度分布曲線の基準点と定義する。表—1 に記載の実験種類に対して、縦軸に基準点の高さ z_0 を η (砂床面からパイプ上面までの高さ、または砂れんの谷から山までの高さ) で除した値をとり、横軸に砂粒に関するレイノルズ数 $u_0 d/\nu$ (d : 砂の平均粒径, ν : 水の動粘性係数, u_0 : 底面における水粒子の最大速度で、微小振幅波として計算した) をとって示すと 図—7 のとおりである。点はばらついてはいるが、 z_0/η と $u_0 d/\nu$ との間には一定の関係が見られ、パイプを敷いた場合でも、また砂れんが形成されている場合でも同じ関係が存在している。本実験ではパイプの中心間隔が 7 cm の 1 種類しか行なっていないが、さらに間隔を変えて検討するつもりである。



図—7 基準点の高さ

(2) 拡散係数について

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。

$$\varepsilon_z \frac{d\bar{m}}{dz} + w_0 \bar{m} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ε_z : 拡散係数, w_0 : 砂粒の沈降速度。

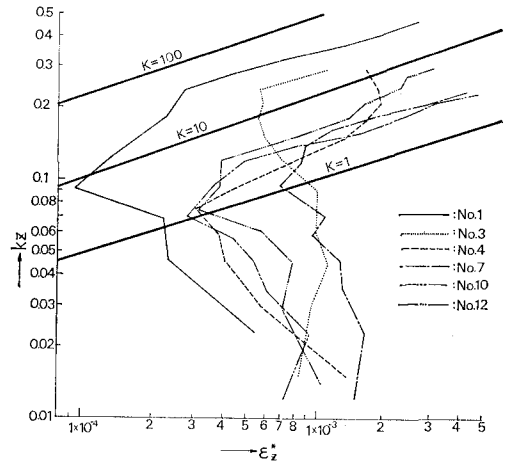
本間・堀川・鹿島は混合距離の概念を導入して、 ε_z の理論式 (2), (2)' を導いた⁷⁾。

$$\varepsilon_z = \frac{1}{K} \frac{HL}{T \sinh kh} \frac{\sinh^3 kz}{\cosh^2 kz} \quad \dots\dots\dots (2)$$

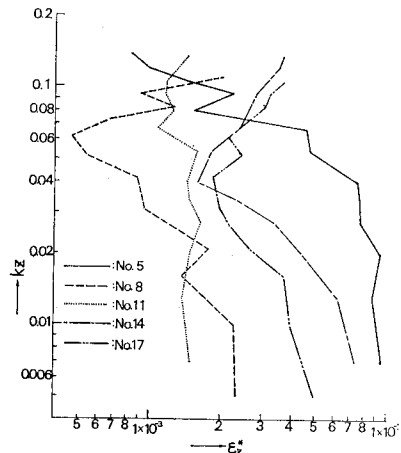
$$\varepsilon_z^* = \frac{\varepsilon_z}{HL/T \sinh kh} = \frac{1}{K} \frac{\sinh^3 kz}{\cosh^2 kz} \quad \dots\dots\dots (2)'$$

ここで、 h : 水深, k : 波数 ($=2\pi/L$), T : 波の周期, H : 水深 h の所での波高, L : 水深 h の所での波長, K : 砂れんの規模に関する係数。

鉛直濃度分布の実験値から式 (1) を用いて ε_z を求め、これを $HL/T \sinh kh$ で除して ε_z^* を算定してこれを横軸にとり、縦軸に kz をとって示すと、図—8 およ図—9 のようである。図—8 は砂れんの所での ε_z^* の分布であるが、基準点 ($kz=0.07\sim0.2$) の上方と下方とは、拡散係数の状態は著しく異なる。図には、 $K=1, 10, 100$ のそれぞれに対して、式 (2)' の右辺から求めた ε_z^* の計算値を表わす直線が記入されているが、基準点より上方では 3 本の直線の勾配と実験値を結んだ折線の勾配とはかなりよく一致している。 K の値と砂れんの規模との関係については、本間・堀川・鹿島が実験によって検討している⁷⁾。図—9 はパイプを敷いた場合のパイプ間上での ε_z^* の分布で、 $\eta=0.5\sim2.5$ cm のうちの $\eta=1.6\sim2.0$ cm のものだけについて示した。No. 5 は基準点の位置が非常に高いが、その他については基準点 ($kz=0.04\sim0.1$) の上方と下方とで拡散係数の分布状態が異っていることは、砂れん上の場合と同様である。 K



図—8 拡散係数の鉛直分布 (砂れん)



図—9 拡散係数の鉛直分布 (パイプ)

の値および基準点の高さがわかれば、基準点とそれより上方の拡散係数の値を式(2)から求めることができる。

以上の実験は濃度分布曲線の基準点の高さおよび拡散係数値の分布状態を調べるために行なわれたものであるが、さらに基準点での濃度がわかれば式(1)を用いて基準点より上方の浮遊砂濃度分布曲線を描くことができる。また、基準点より下方の浮遊砂濃度および拡散係数についても、今後引き続いて研究を進める予定である。

(3) 濃度変動のスペクトル解析

底質砂の浮遊機構を調べるために、濃度の時間的変動値のスペクトル解析を行ない、周波数特性を検討した。実験条件は、① 波高 7.0 cm, 周期 1.70 sec, 砂粒径 0.09 mm, ② 波高 8.6 cm, 周期 1.37 sec, 砂粒径 0.05 mm で、水深はともに 30 cm で、砂れん上で濃度の測定を行なった。データの読取りは、時間間隔 1/15 sec, データ個数 2000, ラグプロダクト 100 個, 自由度 38 である。計算は Tukey の方法に従い、自己相関をフーリエ変換してパワースペクトルを求めた。実験①では、砂れんの高さ 1.2 cm, 波長 5.5 cm で、濃度測定点は砂れんの谷から上方へ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0 cm の所である。それらの結果を図-10 (a)~(f) に示す。信頼度 90% として検定を行なってパワースペクトルが集中する周波数を調べたが、 $z=0.5$ cm では $f=0.6$ (水面波と同じ周波数) の所に明瞭な大きな峰が、また $f=1.2, 1.8, 2.3$ の所に小さな峰が現われている。 $z=1.0, 1.5$ cm でもよく似た状態が見られる。しかし、 $z=2.0$ と 3.0 cm では、 $f=1.2$ の 2 倍周波数の所で明瞭な峰が現われ、 $f=0.6, 1.8, 2.4, 3.0, 3.6$ の所に小さな峰がある。さらに、 $z=5$ cm では $f=0.6$ に大きな峰が現われ、 $f=1.2$ と 1.8 の峰は小さい。実験②では、砂れんの高さは 1.1 cm, 波長 6.0 cm で、 $z=0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0$ cm で濃度の測定を行なった (図-11 (a)~(e))。実験①と②に共通な点は、床面のごく近くでは ($z=0.5$ cm) 特別に卓越した周波数は見られないこと、反対にかなり上方では (①では $z=5.0$ cm, ②では $z=4.0$ cm) 水面波と同じ周波数成分がその他の周波数成分に比べて著しく大きいことである。中間の高さの所では、①と②とでは若干の差異はあるが、基本周波数および種々の倍周波数の数か所にピークが存在する。

底面の砂は、水粒子が岸向きに移動するときには掃流状態であるが、水粒子が沖向きに移動するときには砂粒が渦に巻き上げられて浮遊状態になる。したがって、底面の近くでは波の 1 周期の間に濃度のピークが 2 回あるいは 2 回以上現われる。すなわち、底面付近における水粒子の水平移動の振幅のほうが砂れんの波長より大きい場合には、渦の移動する距離が渦の発生する間隔より大きく、2 回以上の濃度のピークが現われるはずである。一方、掃流砂の影響が及ばないような上方においては、水

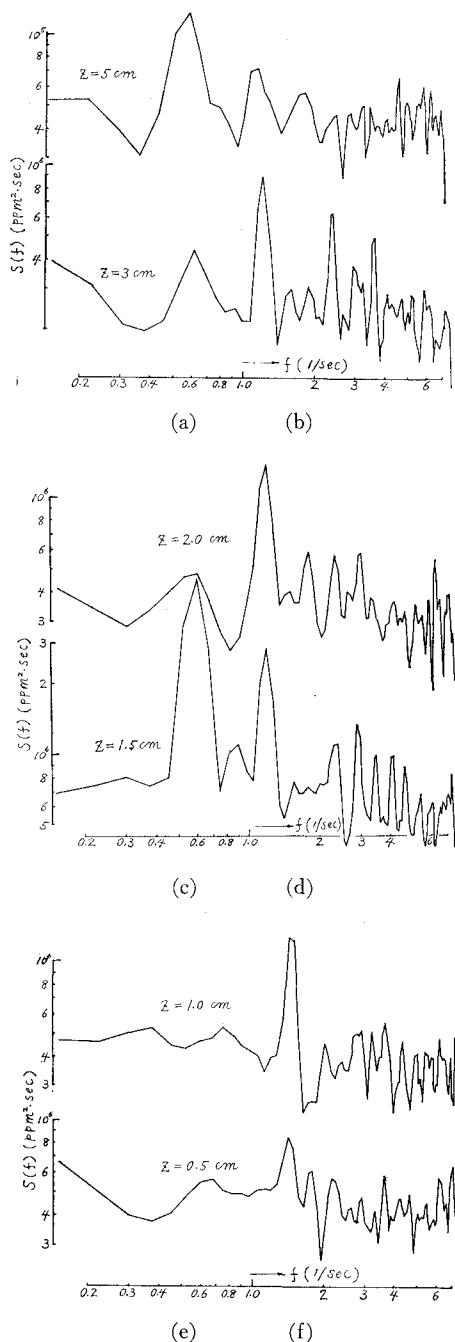
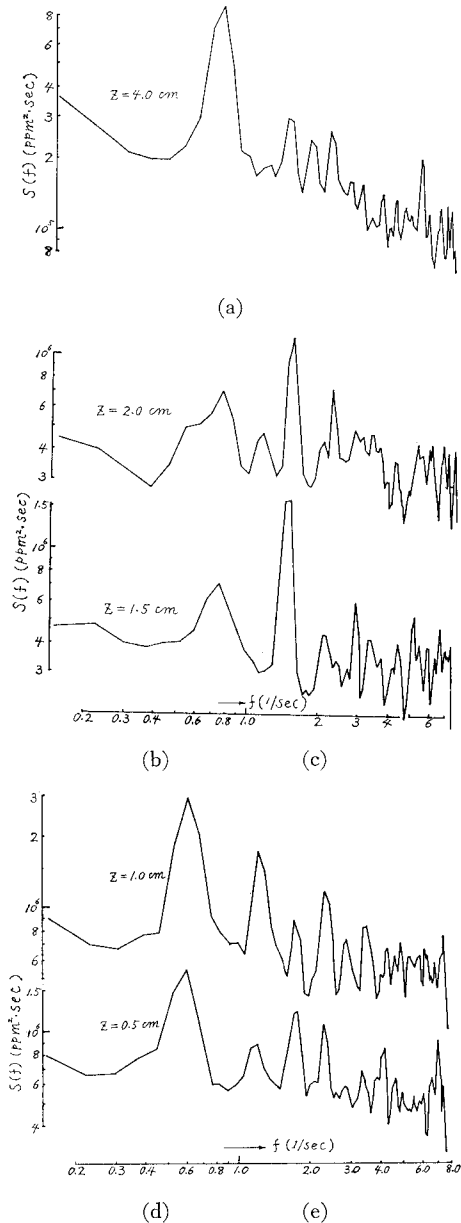


図-10 濃度のパワースペクトル
($H=7.0$ cm, $T=1.70$ sec, $d=0.09$ mm)

粒子が沖向きに移動するときだけに濃度ピークが現われるであろう。次に考えられるのは、上方と下方とを問わず、有限振幅波の種々の周波数の成分波に対応して幾つもの濃度ピークが現われるということであるが、今後さらに検討を行なうつもりである。



図—11 濃度のパワースペクトル
($H=8.6$ cm, $T=1.37$ sec, $d=0.05$ mm)

4. 結 語

今回の研究で明らかになった点は次のとおりである。

(1) 浮遊砂の濃度分布曲線の基準点の高さ z_0 は、砂れんの高さ η および底質砂に関するレイノルズ数 $u_0 d/\nu$ に関係する。すなわち、 z_0/η は $u_0 d/\nu$ の増大に伴って減少する。

(2) 基準点より上方における拡散係数の分布の状態は、本間・堀川・鹿島の研究結果とよく合うようであるが、下方の分布状態は全く異なっている。この点についての検討は今後続けて行なうつもりである。

(3) 底質砂の浮遊機構を明らかにするために、2種類の実験を行なって濃度変動のスペクトル解析を行なった。底面の近くと上方とでは、卓越する周波数の分布状態がかなり異なっており、底面近くでは掃流砂の影響が強く現われ、上方では浮遊砂の影響が強く現われるからであろう。また、パワースペクトルのピークが数個の周波数の所に現われるのは、渦の移動距離が渦の発生間隔より大きいことによるのか、あるいは有限振幅波の成分波の影響によるか、今のところ明らかでない。今後さらに検討を続けるつもりである。

本研究は文部省特別研究「沿岸地帯の開発に伴う自然災害の予測の研究」によるものであることを付記し、研究に協力された大学院生の稲垣青生君、48年3月卒業の笠田勝幸君（名古屋市役所）に感謝の意を表します。

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，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) 道上正規・白川 清：浮遊砂に関する研究(2)，京都大学防災研究所年報，第14号B，1971.
- 6), 7) 1) に同じ.