

振動流による浮遊砂の濃度と粒径

鹿 島 遼 一*・齊 藤 昭 三*

1. ま え が き

波動により発生する浮遊砂に関する研究は近年大いにすすめられつつあるが、底質の粒度構成と基準点における濃度の関連が明らかでないため、海底取水管方式によって取水した海水中に含まれる砂粒子の一部を除去する沈砂池の設計に必要なデータであるところの、流入砂粒径分布を推定することは困難である。また浮遊砂の機構を知るためにも、底質粒径分布と濃度の関係を把握することは有用であろう。著者らは、波動によって生じる浮遊砂の底面付近における粒径区分ごとの濃度と底質粒径分布の関係を検討する目的で、小型の振動流発生水槽を用いた実験を行なった。

2. 実 験

実験は、本体全長 4 m の中央部に深さ 5 cm、長さ 1 m のポケットを有する小型振動流発生装置を使用して行なった。図-1 にその模式図を示す。中央のポケット部

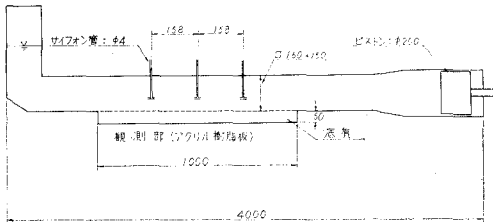


図-1 振動発生装置模式図

に底質サンプルを敷いて、その左右部分の底面と等しい高さにしたときの流水断面は幅 15 cm、高さ 16 cm となる。測定のために中央部両側面および上蓋はアクリル樹脂製であり、上蓋は底質の取出し、充填のために取りはずしができる。一端のシリンダ内でピストンを往復させることにより、強制的に水槽内に振動流を発生させる方式で、駆動には可変速モーターを用いて、周期は 1.6 ~ 5 sec の間で変化させることができる。ピストンストロークの可変範囲は 0 ~ 25 cm である。浮遊砂採集のために上蓋中央とその左右 15.8 cm の点の合計 3 カ所に内径 4 mm の T 字型真鍮管を取りつけ、サイフォン方式により採集した。採集した浮遊砂および底面の粒度分

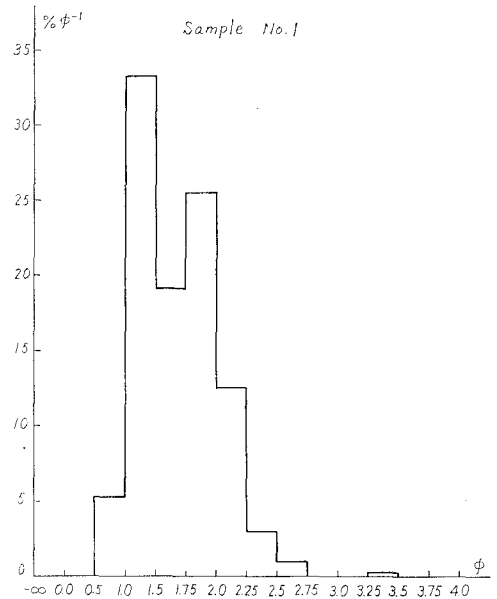


図-2 底質粒径分布

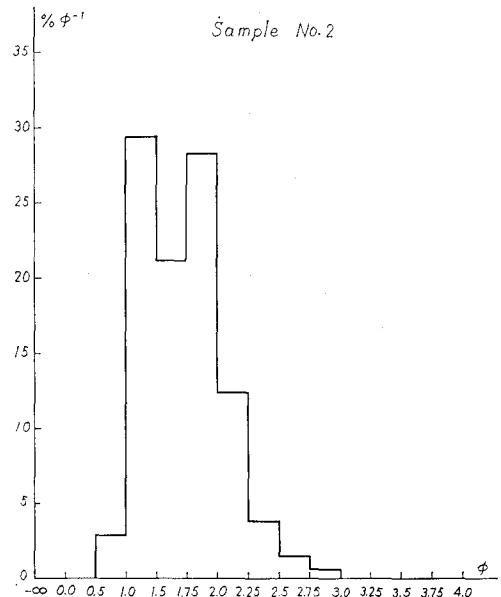


図-3 底質粒径分布

析はエメリー管を用いる沈降法によった。

実験に用いた底質は高萩産の天然砂で、ほぼ同様な粒

* 正会員 (財) 電力中央研究所

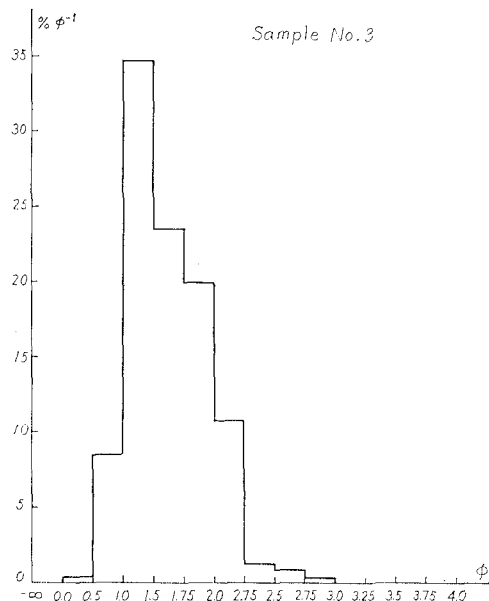


図-4 底質粒径分布

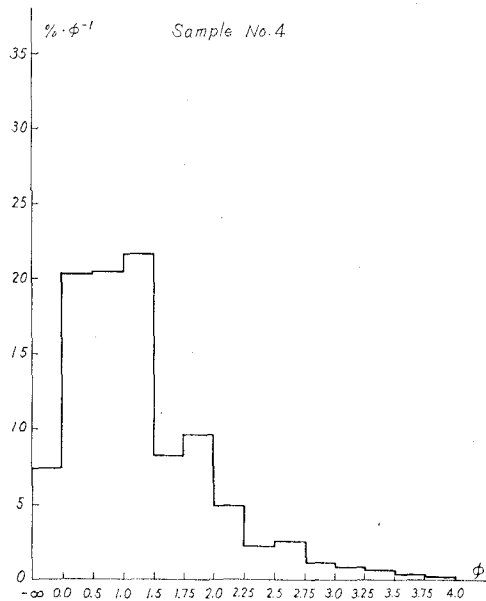


図-5 底質粒径分布

径分布を有するもの3種と、粒径分布範囲を広くするために、これら3種の底質より粒径の大きい砂と小さい砂を混合した底質1種を使用した。図-2~5にこれらの底質サンプルの粒径分布を示す。ピストン全振幅を23.4 cmと19.6 cmに固定して周期を2.1~5.0 secの間で段階的に変えて実験を行なった。また水温、浮遊砂採集流速はそれぞれ12.4~23.6°C、46.6~54.9 cm/secであった。これら諸条件を表-1に示す。

はじめに、水槽中央部に底質を平坦に敷きつめ、上蓋を本体に固定させ、浮遊砂採集管先端を平均底面から所定の高さに調節した後、水を水槽内に満たし、あらかじめ設定したストロークと周期により振動流を発生させ、底面に生じる砂れんがほぼ安定したところで採水を開始する。採水した水は、できるだけ浮遊砂を濃縮して、電気乾燥炉で110°Cで乾燥した後、浮遊砂重量を測定し、3点の浮遊砂を混合した後粒度分析を行なった。実験中に観測部外に流出する砂粒があるため、採水高さを変えるごとに砂を補給する必要があった。このようにして得られた浮遊砂分布の例を図-6~8に示す。

3. 境界層諸量の推定

今回の実験では流速測定は行っていないが、全流量はピストンのストロークと周期を

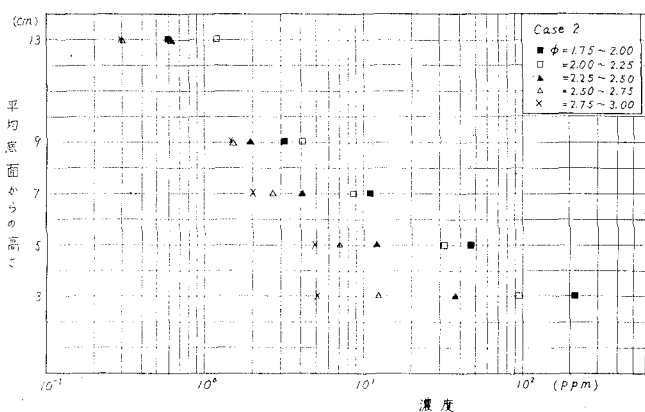


図-6 浮遊砂粒径別濃度分布例

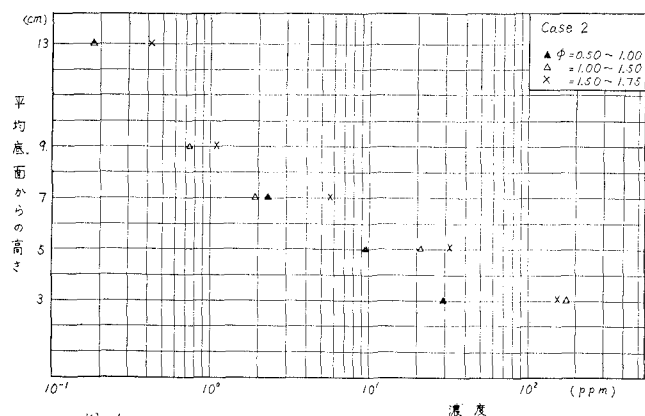
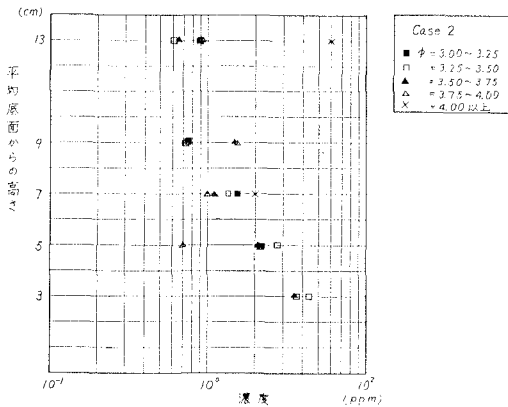


図-7 浮遊砂粒径別濃度分布例



図—8 浮遊砂粒徑別濃度分布例

表—1 実験条件

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ストローク (cm)	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	19.6	19.6	19.6	19.6
周期 (sec)	2.1	2.5	3.0	3.4	3.8	4.2	5.0	2.1	2.5	3.0	3.4
水温 (°C)	20.6	23.3	23.6	20.0	20.2	20.3	20.6	13.4	13.7	12.4	14.2
Sample No.	2	1	1	2	3	3	3	4	4	4	4
採集流速 (cm/sec)	47.0	52.5	51.6	47.0	53.4	54.9	54.5	49.8	46.6	48.7	50.8

測れば知ることができる。そこで、現在のところ最も体系的で、かつ数値的にも利用しやすい形で提出されている、振動流境界層の堤浦のモデル¹⁾を用いて、実験において生じた境界層諸量を推定した。ただし Nikuradse の相当粗度 $D=4\eta$ (η : 砂れん高さ) とした。振動流水槽のシリンダーの断面積を A 、ピストンストロークを S とする。測定部は砂を敷きつめた時の断面が、高さ $t_1=16$ cm、幅 $t_2=15$ cm の矩形である。境界層外縁の水粒子移動振幅 $\hat{U}/\sigma$ を推定するために、両側面と上面に沿う滑面境界層の排除厚を無視できるものとすれば、底面境界層の波動排除厚を δ_B^* として近似的に

$$\frac{\hat{U}}{\sigma} = \frac{S}{2} \cdot \frac{A}{(t_1 - \delta_B^*)t_2} \dots\dots\dots (1)$$

となるものとする。ところで $(S/2) \cdot A/(t_1 t_2) \doteq 15$ cm

であり、これは $\hat{U}/\sigma$ の近似値であるはずであるから $\hat{U}/(\sigma z_0) \lesssim 10^2$ となり、摩擦係数に対して、

$$\hat{C}_B = 1.70 \left(\frac{\hat{U}}{\sigma z_0} \right)^{-2/3} \dots\dots\dots (2)$$

が成り立っている。そこで $\delta_B^* = \hat{C}_B \hat{U}/\sigma$ を用い、かつ

$$\frac{\hat{U}}{\sigma} = \frac{SA}{2t_1 t_2} \cdot x \dots\dots\dots (3)$$

とおけば式 (1) は x に関する式

$$\frac{1.70^3}{2} \cdot \frac{ASz_0^2}{t_1^4 t_2} x^4 - (x-1)^3 = 0 \dots\dots\dots (4)$$

となるので、 $A=340$ cm²、 $t_1=16$ cm、 $t_2=15$ cm を代入し、各実験ケースごとに $z_0=4\eta/30$ と S の値を変えて 1 以上の実根を求め、(3) 式によって $\hat{U}/\sigma$ を決定できる。それから流速最大値 $\hat{U}$ 、 $\hat{C}_B$ が求められ、底面摩擦速度の振幅 $\hat{u}_B^*$ 、波動排除厚 δ_B^* 、defect layer のスケール Δ_B などを算定することができる。また、ここで無視できると仮定した側面境界層のスケールは滑面境界層として計算できる。これらの諸量を表—2 にまとめて示す。今回の実験では $\hat{U}/\sigma=14.8 \sim 19.7$ cm、 $\hat{U}=24 \sim 53$ cm/sec、 $\hat{u}_B^*=9.3 \sim 18.1$ cm/sec であって、底面境界層の排除厚は $\delta_B^*=2 \sim 3.4$ cm、defect layer のスケールは $5 \sim 8$ cm となる。また側面および上蓋に沿って発達した境界層の排除厚 δ_s^* は約 1 mm である。

4. 底面近くの浮遊砂の粒度特性

海底付近の浮遊砂濃度が砂れんを媒介として、実験室と現地のスケールで、ある程度統一的に表現できることを本間・堀川・鹿島²⁾ が示したが、その力学的機構は明らかにされなかった。一方、岸・榎・山崎³⁾ は Lane & Kalinske⁴⁾ のモデルを修正して、浮遊機構はともかくとしても、物理的イメージのはっきりしているモデルを提出した。前者は粒径の効果が入っていないが、後者にはこれが考慮されている。しかし、後者も全粒子群に対し、均等な沈降速度を対応させているようである。著者らは、Lane & Kalinske モデルの基本的アイデアから考えて、粒径範囲の広い粒子群を粒径別グループに分けてモデルの適合性を検討して見た。Lane and Kalinske

表—2 境界層諸量

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\hat{U}/\sigma$ (cm)	17.8	18.1	19.0	19.0	19.3	19.7	19.0	14.8	15.3	15.5	15.6
$\hat{C}_B$	0.116	0.125	0.152	0.154	0.160	0.170	0.152	0.132	0.157	0.161	0.168
δ_B^* (cm)	2.06	2.26	2.89	2.93	3.09	3.35	2.89	1.95	2.40	2.50	2.62
Δ_B (cm)	6.06	6.40	7.41	7.46	7.73	8.13	7.41	5.37	6.06	6.22	6.40
$\hat{U}$ (cm/sec)	53.3	45.4	39.7	35.2	31.8	29.5	23.9	44.3	38.4	32.4	28.9
$\hat{u}_B^*$ (cm/sec)	18.1	16.1	15.5	13.7	12.7	12.2	9.3	16.1	15.2	13.0	11.8
δ_s^* (cm)	0.075	0.078	0.084	0.089	0.093	0.097	0.101	0.074	0.080	0.085	0.089
η (cm)	2.4	2.7	3.8	3.9	4.2	4.7	3.8	2.4	3.2	3.4	3.7
λ (cm)	16.6	18.45	18.9	19.2	19.9	18.9	18.0	15.0	15.8	15.2	16.3

は底面近くでの鉛直乱れ速度 w の粒子沈降速度 w_0 以上の平均値と、その沈降速度を有する粒子の底面における存在率 $\Delta F(\phi)$ に比例して、砂粒子が底面から浮遊すると考えた。したがって平衡条件から、そのような粒子の濃度は底面近くで

$$\Delta \bar{m}_B(\phi) \cdot w_0(\phi) \propto \Delta F(\phi) \cdot \int_{w_0(\phi)}^{\infty} wf(w)dw \quad \cdots (5)$$

となる。ここで粒径の関数となるものには (ϕ) をつけた。また $f(w)$ は鉛直乱れの確率密度である。

$f(w)$ をガウス分布として、標準偏差 w' は摩擦速度に比例すると考えれば、 $k' = w'/\hat{u}_B^*$ として

$$\frac{\Delta \bar{m}_B(\phi)}{\Delta F(\phi)} \propto \frac{k' \hat{u}_B^*}{\sqrt{2\pi} w_0(\phi)} \exp\left\{-\frac{w_0^2(\phi)}{2 k'^2 \hat{u}_B^{*2}}\right\} \quad \cdots (6)$$

上式の k' について、堀川・渡辺⁵⁾の電解式乱流計による実測例から算出して見る。周期 1.35 sec、水深 30 cm、波高 7.9 cm の条件から境界層外縁流速振幅値を微小振幅波理論で求めると $\hat{U} = 16.8$ cm/sec となり、この時の砂れん高さ $\eta = 0.95$ cm、動粘性 $\nu = 0.014$ cm²/sec を用いれば、境界層は粗面上の乱流境界層に相当し、 $\hat{u}_B^* = 8.4$ cm/sec が得られる。一方、流速変動の測定値から $w' \doteq 2$ cm/sec が知れるので、

$$k' = w'/\hat{u}_B^* \doteq 0.25 \quad \cdots (7)$$

となり、これより式 (6) の右辺を $P(\phi)$ と書けば

$$P(\phi) = 0.1 \frac{\hat{u}_B^*}{w_0(\phi)} \exp\left(-\frac{8 w_0^2(\phi)}{\hat{u}_B^{*2}}\right) \quad \cdots (8)$$

が得られる。粒子群を ϕ スケールで 0~0.5, 0.5~1.0, 1.0~1.5, 以下 0.25 ϕ 刻みで 4 ϕ まで分けて、各粒径区分ごとの濃度を平均底面から砂れんピッチ λ の 1/5 だけ上がった点で求め、これを $\Delta \bar{m}_{0.2\lambda}(\phi)$ と書いて式 (6) の $\Delta \bar{m}_B(\phi)$ に相当するものとした。図-9 は、 P と $\Delta \bar{m}_{0.2\lambda}(\phi)/\Delta F(\phi)$ の関係を図示したものである。ばらつきは大きいが比例関係が傾向的に見られる。図中の実線は平均的に描いたものであり、そのまわりへのばらつき具合には粒径およびその分布の広狭による偏りはないようである。実線の式は

$$\frac{\Delta \bar{m}_{0.2\lambda}}{\Delta F} = 7 \frac{\hat{u}_B^*}{w_0} \exp\left(-\frac{8 w_0^2}{\hat{u}_B^{*2}}\right) \times 10^{-5} \quad \cdots (9)$$

となる。

一方、内層における鉛直拡散係数の理論値 K_{zm} と底面から 3 cm, 5 cm における濃度から粒径別に算出した値 K_{zs} を比較して示したのが 図-10 である。ばらついているが比較的に近い 2 ϕ あたりで $K_{zs}/K_{zm} \doteq 0.25$

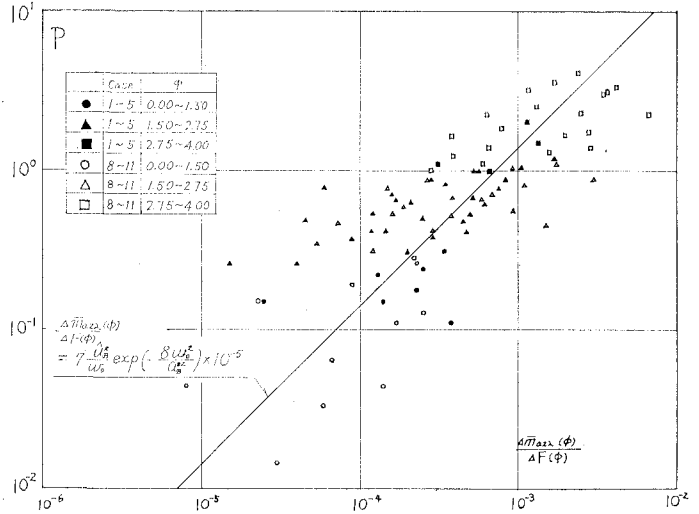


図-9 底面付近における粒径別濃度と底面摩擦の関係

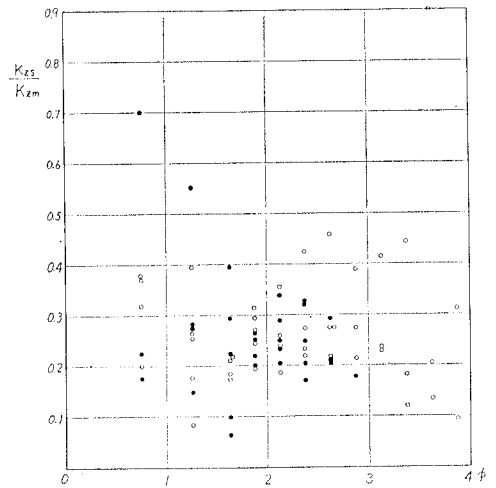


図-10 境界層内層における鉛直拡散係数の理論値 K_{zm} と実測値 K_{zs} の比

であり、粒径あるいはその分布の影響は、はっきりしない。この結果は明らかに堀川・渡辺⁵⁾の結果と異なっているが、今後検討する必要がある。

最後に本実験遂行に際する、当時日本大学生産工学部学生関達夫氏(現日本出版販売 K.K.)の多大な協力に謝意を表する。

参考文献

- 1) Kajiura, K.: On the Bottom Friction in an Oscillatory Current, 震研彙報 42 巻, 1964
- 2) 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
- 3) 岸 力・榎 国夫・山崎貞元: 波動による底質の浮遊, 第 21 回土木学会年次学術講演会講演概要, 1966
- 4) Lane, E. & Kalinske, A.A.: Engineering Calculations of Suspended Sediment, Trans. AGU, Vol 22, 1941
- 5) 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
- 6) 堀川清司・渡辺 晃: 表面波による振動流境界層に関する実験的研究, 第 15 回海岸工学講演会講演集, 1968