

底層水中の浮遊粒子濃度におよぼす流れの影響

熊谷 幹郎*・大形 俊英**・西村 肇***

1. はじめに

海面埋立や人工島の建設が沿岸環境におよぼす影響の1つに、流れの変化にともなう底質の変化、特に粒度組成の変化の問題がある。底質の粒度組成は、ベントスの棲息に強く影響することが知られており、その変化を定量的に明らかにすることは、重要な研究課題である。

流れが強くなると、一般には粒子は堆積しにくくなる。これは、粒子がたとえ沈降しても、底層流によって粒子が巻き上げられ、運ばれてしまうためである。大きく重い粒子は、多少くらい流れが強くなっても堆積しつづける。したがって、底質の粒度組成の変化を明らかにするためには、流れの強さと巻き上げとの関係を、粒子の粒径、密度等をパラメータにして調べる必要がある。

底泥近くの粒子濃度が定常状態にあると仮定しよう。粒子は沈降速度 W を持っているので、平均として下向きに沈降フラックス WC_0 があるはずである。ここに C_0 は底泥直上の粒子濃度である。粒子濃度が定常であるためには、沈降のフラックスを補償するために、大きさが WC_0 に等しく上向きの巻き上げフラックスがなければならない。すなわち、底泥海水の界面では

$$\phi_{up} = WC_0 \dots\dots\dots (1)$$

が成り立っている。 ϕ_{up} は巻き上げのフラックスである。式(1)が示すように、巻き上げフラックス ϕ_{up} の値は、粒子の沈降速度と界面における濃度とから計算できる。したがって巻き上げフラックスの研究は、底泥近くの粒子濃度そのものの研究でもある。

波による底質の巻き上げについては、これまで数多くの研究が行われてきたが、その大部分は水中の分布に関するものである。界面付近の粒子濃度そのものに関する研究はほとんど報告されていない。Hommaらは、界面近くの濃度と流速を両対数方眼紙上にプロットすると、直線の関係が得られることを見出した¹⁾。しかし、現地観測と水理模型の結果を統一的に整理することはできなかった。また粒径の効果も考慮されていない。岸

ら²⁾、鹿島・斉藤³⁾は、水理模型を用いて研究している。

われわれの関心があるのは、砂よりも小さい粒子(細砂～シルト)の挙動であるが、これに関する報告は見あたらない。ここでは、大阪湾で行なった現地観測と、円筒水槽を用いた実験の結果を報告する。

2. 現地観測

2.1 方法

この種の研究で重要なことは、広い流速範囲にわたってデータを収集することである。それには海の荒れた時にデータが取れることが望ましい。そこで沖合に設置した採水塔から陸上までホースを引き、流速計を海底に設置しておいて、陸上で採水、測流ができるようにした。

調査地点は、大阪府水産試験場(泉南郡岬町)地先の護岸堤から約60mのところである。岸から100m離れたところには、岸に平行に長さ約120mの離岸堤がある。水深は約5mで、底質の平均粒径は54 μ m、対数標準偏差は0.93であった。

採水には、底から20, 40, 60, 80, 100cmの高さにホース(内径20mm)の先端を固定し、これを陸上まで引いて(約120m)、ポンプで採水できるようにした。採水時は、はじめの40lを捨て、次の2lを試水とした。これをフィルター(Whatman GF/C, 孔径1.2 μ m)でろ過し、前後の重量差から浮遊物量を求めた。

浮遊粒子の沈降速度は以下のようにして求めた。8本の3lメスシリンダーに海水を入れ、よく攪拌してから静置し、時間をはかりはじめる。5, 15, 30分, 1, 2, 4, 8時間後に、上澄みを約2l吸い上げ、この液と下に残った液をフィルターでろ過して粒子濃度を求める。この濃度変化から沈降速度分布、したがって平均の沈降速度を求めることができる。

流速は、超音波式流速計(電子工業 K.K., DS 104, 1次元)の測流部を底から10cmの高さに設置して測定した。設置前に主流の向きを調べたが、どの向きの流速も同じくらいの大きさであった。最終的には岸に平行な成分が測れるように固定した。

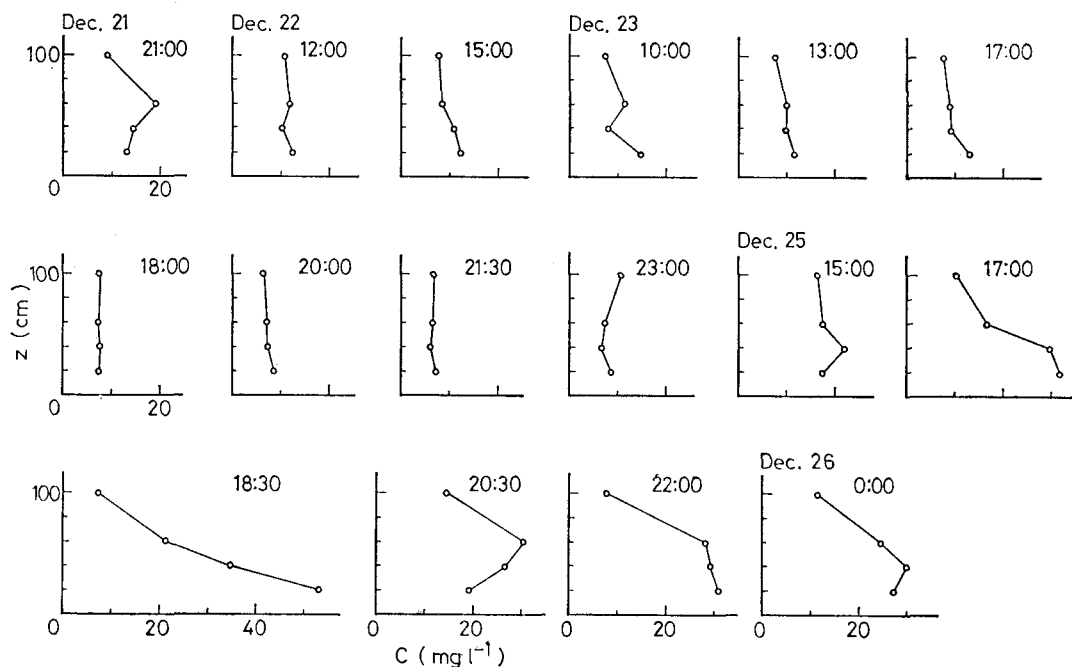
2.2 結果

浮遊粒子濃度は、夏冬2日ずつ(1977年8月20, 25

* 正会員 工博 東京大学助手 工学部化学工学科

** 株式会社日立製作所

*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部化学工学科



図一 大阪府水産試験場池先水域における浮遊粒子の海底付近の鉛直分布 (1977 年 12 月)

日, 12 月 23, 25 日) 波の穏やかな日と荒れた日について, 約 2 時間おきに一潮時にわたり測定した。8 月 20 日, 12 月 23 日は波の穏やかな日であり, 8 月 20 日は台風の影響で, また 12 月 25 日は強い季節風のため海が荒れた日である。

12 月の浮遊粒子濃度の鉛直分布を 図一1 に示す。80 cm のデータがないのは, ホースがつぶれて採水できなくなってしまうためである。波の穏やかな 23 日は, 濃度は 10 mg l^{-1} 前後で低く, わずかではあるが底に近いほど濃度が高くなる傾向が見える。海の荒れた 25 日は, 水中の浮遊粒子濃度はずっと高く, 多くの場合, 底近くで濃度は急激に上昇している。これとは逆の, 底近くで濃度が減少する分布も何回か観測された。

定常状態の浮遊粒子の濃度分布は, 通常次式で記述される。

$$\frac{d}{dz} \left(K_z \frac{dC}{dz} \right) + \frac{d}{dz} (WC) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに, C は粒子濃度, z は底からの距離, K_z は鉛直方向の乱流拡散係数である。これを, K_z は一定と仮定して正味の沈降フラックスが 0 で, $z=0$ で $C=C_0$ の条件で解くと,

$$C = C_0 \exp \left(-\frac{W}{K_z} z \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

を得る。

この式を導く際の仮定がすべて満たされていれば, 濃度と底からの距離を半対数方眼紙上にプロットすると, 直線的な関係が得られるはずである。図一1 に示した分

布および 8 月の分布のうち, 濃度が底に向かって単調に増加しているものの大部分に対し, 式(3)をあてはめることが可能であった。その数は, 全部で 28 例の観測のうち, 19 例である。ただし, グラフにプロットしたのは, 観測された濃度 C そのものではなく, 長時間静置していても沈降しない粒子の寄与分を差し引いた値である。沈降しない粒子の量は, 浮遊粒子の沈降実験から求めた。

海水中の浮遊粒子の沈降速度を求める実験は, 8 月に 1 回, 12 月に 6 回行った。結果は, 8 月が $W=0.0045 \text{ cm s}^{-1}$, 12 月が $W=0.0165 \pm 0.0019 \text{ cm s}^{-1}$ であった。海が荒れた時の浮遊粒子は, 穏やかな時の粒子と異なっている可能性があるが, 12 月の海が荒れた時の沈降実験が失敗してしまったために, この点は不明である。

浮遊粒子の沈降速度がわかると, 式(3)を用いた解析の結果と合わせて, 乱流拡散係数 K_z を推定することができる。図一2 は, C_0 と K_z の相関を示したものである。両者の関係は, 次式でよく近似することができる。

$$C_0 = 65 K_z^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに C_0, K_z の単位は, $\text{mg l}^{-1}, \text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ である。

流速が測定されているのは 12 月だけである。観測された変動流速のうち, 巻き上げに寄与している成分を調べるために, 流速をスペクトル解析してみた。データの読み取り間隔は 1.0 s, データ長は $N=256$ で, FFT 法により計算した。それによると, この海域では 2 つの成分が卓越していることがわかった。海が静かな時は, 周期が約 4 分以上のほとんど変動しない平均流が卓越し, 荒れている時は, 周期 3~5 秒の波が卓越していた。

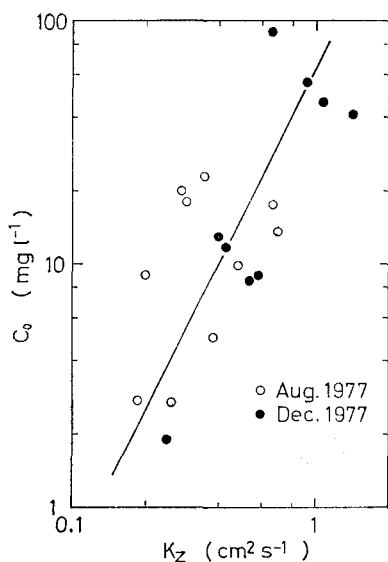


図-2 現地における底面浮遊粒子濃度と鉛直方向乱流拡散係数の相関

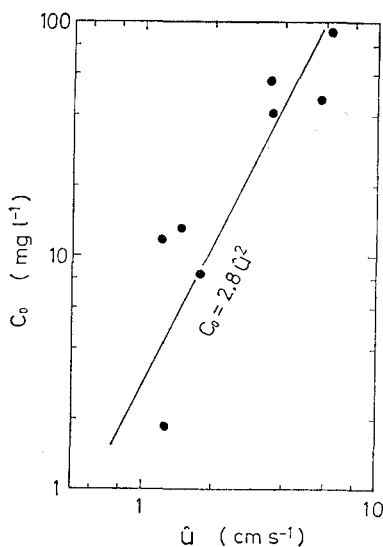


図-3 現地における底面浮遊粒子濃度と根二乗平均流速の相関

この結果を利用して、底面浮遊粒子濃度 C_0 と、種々の流速成分とのあいだの相関を調べてみた。最も相関が良かったのは、根二乗平均流速であった。これを 図-3 に示す。 C_0 は根二乗平均流速 $\bar{u}$ の 2 乗に比例していると思ふことができる。相関が最も悪いのは平均流であり、また、変動成分のみとの相関もあまり良くない。この結果は、平均流と変動成分の両者がともに巻き上げに寄与していることを意味している。

3. 円筒水槽による実験

3.1 方法

図-4 に示すように、内径 190 mm のアクリル製円筒容器内に外径 88 mm の円筒を置き、底にガラスビーズ（真密度 2.48 g cm^{-3} ）を 25 mm の厚さに敷き並べて実

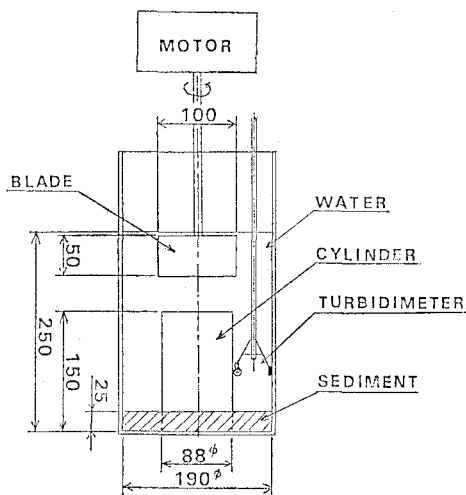


図-4 実験装置

験を行った。ガラスビーズは市販のものを 30, 60, 100, 200, 250, 270 メッシュの篩で分け、粒径をそろえたものを用いた。平均粒径は篩目間隔の幾何平均とした。浮遊した粒子の濃度は、豆電球とシリコンフォトセルとから成る自作の濁度計（光路長 46 mm）によって測定した。この測定は、底質の表面から 25, 50, 75 mm の高さで行った。

3.2 結果

底を平らにしておいてモータのスイッチを入れると、しばらくは巻き上げは起こらない。約 1 分後、内側の円筒周辺部の底質が徐々に巻き上げられ、その付近に砂澱を生ずる。底質粒子

は砂澱の谷に沿って内側へと移動し、外側にも部分的に砂澱を生じてくる。さらに 1 分半ほど経過すると容器内全面に渡って砂澱ができた。外周部の底質粒子は、砂澱の谷に沿って移動し、山から吹き上げられるようにして巻き上がっている。このようにして浮遊粒子濃度が定常に達するのに約 9 分かかる。

定常状態における浮遊粒子濃度と回転数との関係を 図-5 に示す。粗い粒子ほど巻き上げられにくく、また鉛直方向の濃度差の大きいことがわかる。細い粒子では上下の濃度差はほとんどない。

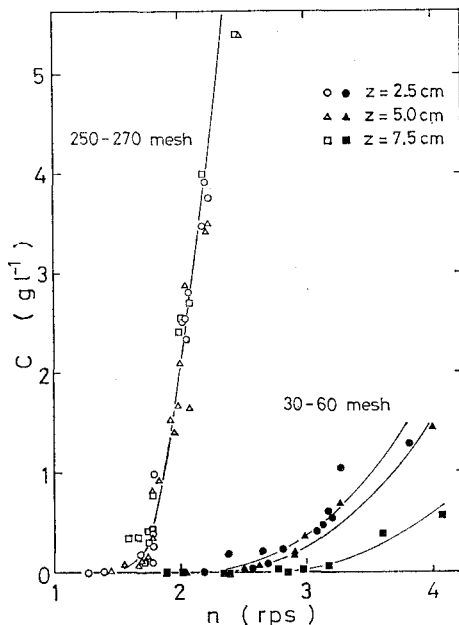
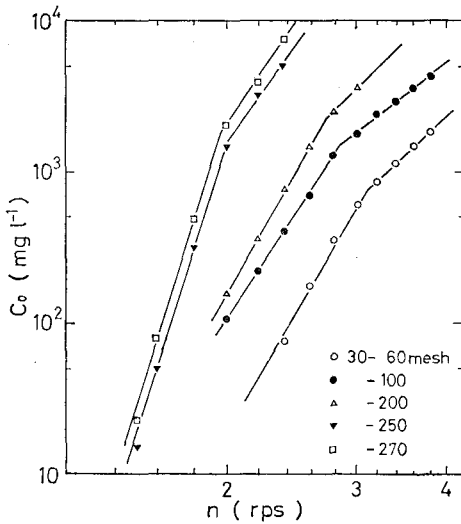


図-5 回転数と定常状態における浮遊粒子濃度



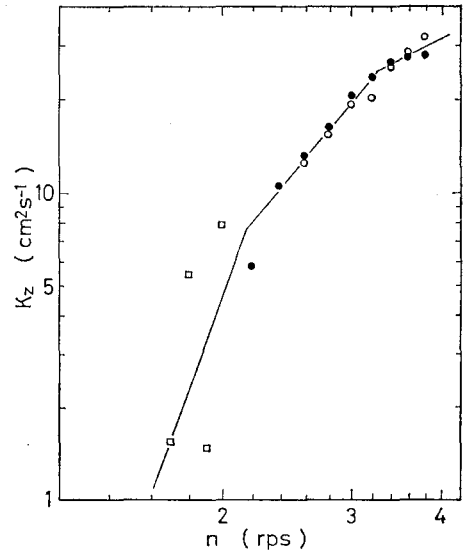
図—6 底面浮遊粒子濃度と回転数の相関

このようなデータから底面における粒子濃度を外挿によって求め、これをあらためて回転数に対してプロットしたのが 図—6 である。この図の特徴は、グラフが折れまがっていることである。折れまがりとは、2 rps と 3 rps の付近で生じている。グラフの勾配は、 $n < 2$ rps では 15, $2 < n < 3$ rps では 7.5~8.4, $3 < n < 4$ rps では 3.7~4.7 である。回転数によって勾配がこのような変化しているのは、砂漣の形成のされ方に関連があるようである。例えば、200 メッシュより細かい粒子の場合、回転数が 1.7 rps 以下では砂漣は全然形成されず、これより速くなると急に 10~12 個の砂漣が生ずる。この回転数は、図—6 の折れ曲がり点にほぼ対応している。

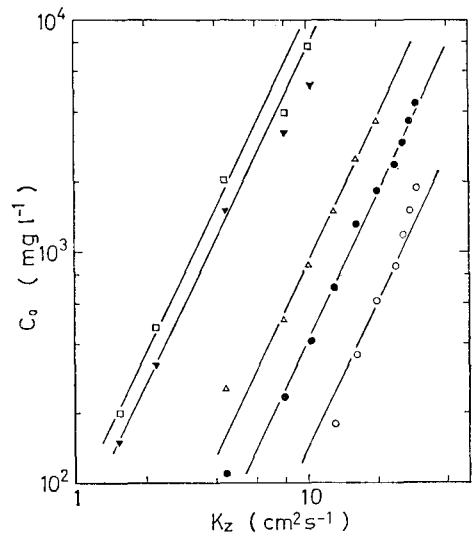
水槽内の流速が回転数に比例しているとすれば、図—6 の結果は、底面浮遊粒子濃度が流速の 3.7~15 乗に比例して変化することを意味している。現地調査の、2 乗に比例という結果と比べると著しく異なっている。

図—7 は、円筒水槽における鉛直方向乱流拡散係数を回転数に対してプロットしたものである。この乱流拡散係数は、鉛直方向に明瞭な濃度差のある分布に対して、式 (3) を適用して求めたものである。沈降速度 W は、径 $135 \mu\text{m}$ 以下の粒子は Stokes の式、それ以上の粒子は Allen の式により求めた。図—7 から、 K_z は n の増加とともに急激に増加していることがわかるが、最も大きな特徴は、図—6 と同様に、2 rps と 3 rps の付近でグラフが折れ曲がっているように見える点である。

図—8 は、図—6 と 図—7 から求めた C_0 と K_z の関係をプロットしたものである。これを求める際に、鉛直方向乱流拡散係数は回転数のみに依存して、浮遊粒子の粒径にはよらないと仮定している。このグラフでは 図—6 にあった折れ曲がりが消えており、しかも底面浮遊粒子濃度 C_0 は乱流拡散係数 K_z の 2 乗に比例して変化



図—7 水槽内における鉛直方向乱流拡散係数と回転数の相関



図—8 拡散係数の関数として求めた底面浮遊粒子濃度

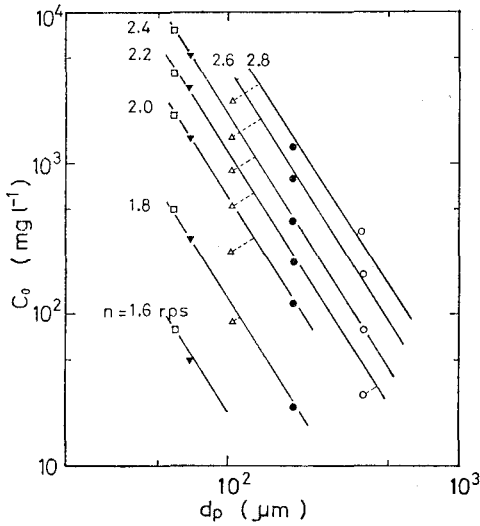
していることがわかる。これは現地調査の結果と一致している。

図—9 は、回転数をパラメータにして、底面浮遊粒子濃度と粒径の関係をプロットしたものである。 C_0 はほぼ粒径の 2.5 乗に逆比例して減少していることがわかる。100~200 メッシュのデータが直線からはずれているのは、平均径の推定値に問題があったためと思われる。

図—8、図—9 より、底面浮遊粒子濃度 C_0 (mg l^{-1}) は、粒径 d_p (cm)、乱流拡散係数 K_z ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$) を用いて次のように表わすことができる。

$$C_0 = 2.42 \times 10^{-4} K_z^2 d_p^{-2.5} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、30~60 メッシュ、100~200 メッシュの粒子は、



図—9 底面浮遊粒子濃度の粒径依存性

この式からややはずれる。

4. 結 語

現地および水槽実験で共通に、底面浮遊粒子濃度が乱流拡散係数の2乗に比例するという結果が得られたのは

興味深く、何らかの意味があると思われる。しかし相違点もいくつかある。1つは既に述べたように、 C_0 の流速依存性がまったく異なっている点である。もう1つは、底面浮遊粒子濃度が現地と実験とで大きく違っている点である。式(5)から、密度 2.45 g cm^{-3} 、 $W=0.0165 \text{ cm s}^{-1}$ の粒子に対する C_0 を求めると、

$$C_0 = 3.0 \times 10^3 K_z^2 \dots\dots\dots (6)$$

となる。これを式(4)と比較すると、約46倍も大きい。Hom-maらの結果も、水槽実験のほうが現地調査より大きくなっている¹⁾。今後はこの相異の原因を明らかにしてゆくことが必要であろう。

参 考 文 献

- 1) Hom-ma, M., K. Horikawa and R. Kajima: A study on suspended sediment due to wave action, Coastal Eng. Japan, 8, 85~103, 1965.
- 2) 岸 力・榎 国夫・山崎貞元: 波動に依る底質の浮遊, 第21回土木学会年次学術講演会講演概要, II-66, 1966.
- 3) 鹿島遼一・斉藤昭三: 振動流による浮遊砂の濃度と粒径, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 355~358, 1971.