

海況の変化にともなう浮遊粒子濃度の変化

熊谷幹郎*・西村肇**

1. 緒言

強風が吹き海が荒れると、沿岸域では底質の巻き上げが起り、水中のにごりが増加する。また海面埋立、人工島建設などで潮流が変化した場合も、底質の巻き上げフラックスが変化し、水中のにごりや底質の粒度組成の変化をもたらす¹⁾。本研究の目的は、このような海況変化にともなう、浮遊粒子の濃度変化に関する基礎的知見を得ることである。

水中の浮遊粒子濃度は、鉛直拡散係数と底質の巻き上げフラックスに大きく依存している。したがって、これら2つの因子と流れとの関係がわかれば、海況変化にともなう浮遊粒子濃度の変化が予測できるはずである。これまでに、鉛直拡散係数と底質の巻き上げフラックスに関しては、数多くの研究が行われている^{2,3)}。しかし、海況の変化との関連で行われた研究は、数が少ない。

われわれは、同じ目的のもとに行なわれた現場観測の結果を既に報告しているが⁴⁾、データ数が少なく、流速の変化の幅も大きくはなかったので、不十分な結果しか得られていない。そこで、さらに2回の現場観測を行ない、海況が大きく変化した時の、浮遊粒子の濃度分布の変化を連続観測した。本報では、底質の巻き上げに対する波と平均流の寄与の比較、および海況変化にともなう鉛直拡散係数の変化を中心として、調査の結果を報告する。

現場調査において、大阪府水産試験場金井利次場長、城久氏から多大なる御援助を頂いた。記して感謝の意を表わしたい。

2. 観測方法

観測は、大阪府水産試験場(東南郡岬町多奈川)地先の水域で行なった。護岸堤から約60m離れた水深5mの地点に採水塔を設置し、流速計を取り付けた。岸から約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。採水塔周辺の底質は、150 mesh (105 μm) 以下が49.9%の、泥まじりの細砂である(表-1)。

表-1 ふるい分けによる底質と浮遊粒子の粒度組成

(単位: 重量%)

粒 径 (μm)	底 質	浮 遊 粒 子 (4 月)	
		19 時, 10 cm	21 時, 10 cm
0—53	13.9	62.9	62.5
53—105	36.0	22.8	15.2
105—210	50.2	14.3	22.3

採水塔から陸上まで、内径20mmの塩化ビニル管を5系列引き、陸上のポンプで試水を連続的に採水できるようにした。各塩化ビニル管の先端は、底から10, 30, 50, 70, 100cmの位置に固定した。塩化ビニル管の延長は約120mあるので、採水時は、最初の40lを捨て、次の2lを分析に用いた。採水速度は4l/minであった。浮遊粒子濃度は、フィルター(Whatman GF/C, 孔径1.2 μm)によるろ過によって求めた。

底質および浮遊粒子の粒度組成は、70, 150, 270 mesh のふるいをを用いたふるい分けと、3lメスシリンダーを用いた沈降法によって求めた¹⁾。

流速は、超音波式流速計(電子工業 K.K., DS104, 1次元)で測定した。流速計の測流部は、底から10cmの岸に平行な成分がはかれるように固定した。固定前に、底からの距離の影響を調べたが、違いは見い出されなかった。

3. 観測結果

観測は、1979年3月2~3日および4月12~13日に行なった。3月は、観測を始めた時の風速は8~9m/sで、数時間後には3m/s以下に落ちた。これに対応して、波高も時間とともに減少した。4月は、始めは無風であったが、18時頃から風が強くなり、19時頃には風速は12m/sを越えた。この風は、22時頃には止んだ。

この水域の変動流速の特徴を知るために、流速をスペクトル解析してみた。パワースペクトルはFFT法で計算し、Hanningのwindowによって平滑化した。データの読み取り間隔は0.5秒、データ数は $N=512$ である。図-1に4月2日19時の流速のパワースペクトルを示した。この時は、強風が吹いていて海は荒れていた。図には示していないが、 $f=0$ で $E=312\text{ cm}^2/\text{s}^2$ であった。

* 正会員 工博 東京大学助手 工学部化学工学科

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部化学工学科

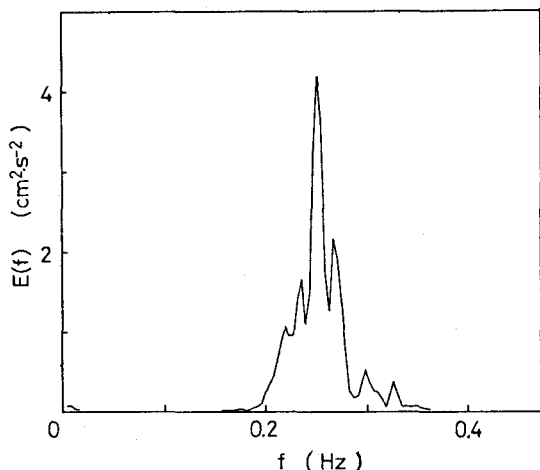


図-1 4月2日19時の流速のパワースペクトル

この図から明らかなように、この時の流れは、周期が256秒以上の平均流と、周期が3~5秒の波という2つの成分の重ね合わせと見なすことができる。他の時間の流れもこの2つの成分の重ね合わせになっていて、それらの相対的な大きさが、時間によって異なっていた。

根2乗平均流速を $\bar{u}$ 、変動流速を u' 、平均流速を $\bar{u}$ とすれば、これらは

$$\bar{u}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2, \quad \bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i, \quad u'^2 = \bar{u}^2 - \bar{u}^2$$

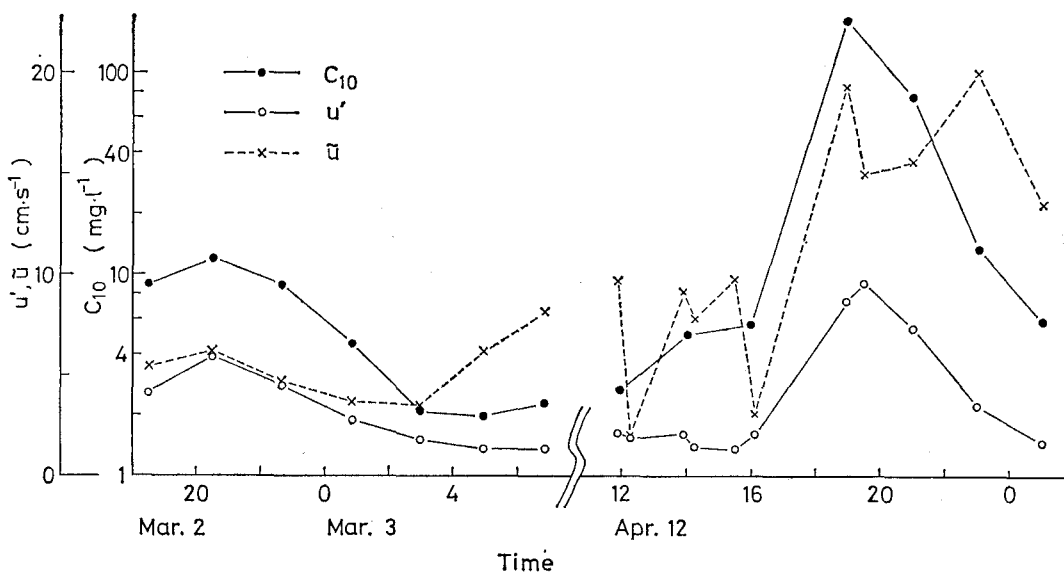
で与えられる。ここに u_i は、0.5秒間隔で読み取った i 番目の流速値である。変動流速 u' は、一般には様々な周期の波からの寄与を含んでいるが、本水域では、上で示したように、周期3~5秒の波による流速と見なすことができる。

図-2は、底から10cmの位置の浮遊粒子濃度 C_{10} と、変動流速 u' および根2乗平均流速 $\bar{u}$ の時間変化を示したものである。浮遊粒子濃度の変化は、変動流速の変化とよく対応している。根2乗平均流速との対応はよくない。3月3日の4時以降を見ると、 C_{10} と u' はともに減少しているが、 $\bar{u}$ は逆に増加している。また4月12日の20時以降は、 C_{10} と u' は急速に減少しているが、 $\bar{u}$ はあまり変化していない。このように、 C_{10} と $\bar{u}$ の相関は悪い。これは、2つの流速成分のうち、巻き上げに有効であるのは波による変動流速で、平均流は有効ではないことを意味している。

図-3は、底層の浮遊粒子濃度 C_{10} と変動流速 u' との相関を示したものである。 C_{10} は、 u' の2~3乗に比例して増加している。流速が大きくなると、このべき指数は大きくなるようである。

海が荒れて変動流速 u' が大きい時は、浮遊粒子濃度が高くなるだけではなく、粒度組成も変化しているはずである。表-1に底泥と浮遊粒子の粒度組成を示した。これは、ふるい分けで求めたものである。53 μm より粗い粒子は、海が静かな時にはほとんど巻き上げられない粒子であるが、海が荒れている時は、浮遊粒子の37%がこの粗い粒子によって占められている。

図-4は、底から10cmの位置の浮遊粒子の平均沈降速度を、 u' に対してプロットしたものである。平均沈降速度は、沈降法およびふるい分けによって求めた粒度組成から推定した。図から、平均沈降速度 W は、 u' のほぼ1.5乗に比例して増加していることがわかる。上で示したように、海が荒れている時は、粗い粒子も巻き上げられているためである。

図-2 底から10cmの位置の浮遊粒子濃度 C_{10} 、変動流速 u' 、根2乗平均流速 $\bar{u}$ の経時変化

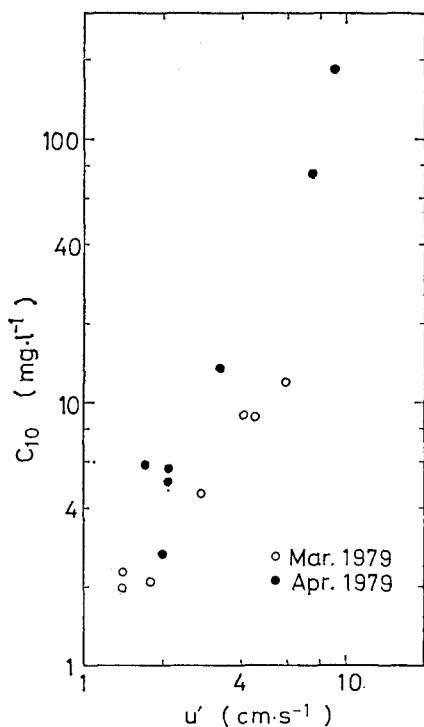


図-3 底層の浮遊粒子濃度と変動流速の相関

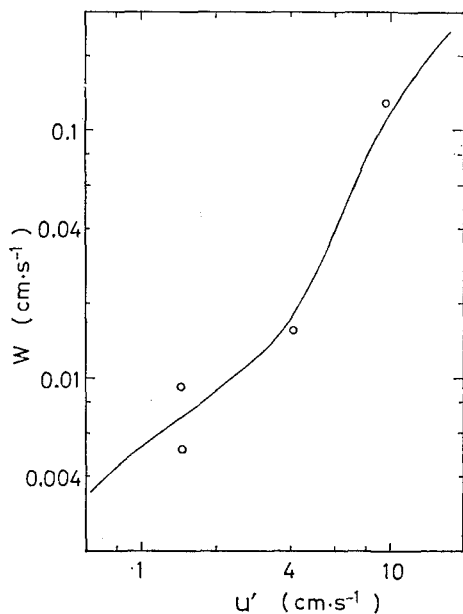


図-4 浮遊粒子の平均沈降速度と変動流速の相関

4. 鉛直拡散係数の推定

水中に N 種類の粒子が浮遊していて、それらの粒子の沈降速度が W_i ($i=1, \dots, N$) であるとしよう。沈降速度 W_i の浮遊粒子の濃度を C_i とすると、定常状態における粒子の鉛直分布は、

$$W_i C_i + K_z (dC_i/dz) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

で記述される。ここに z は底からの距離、 K_z は浮遊粒子の鉛直拡散係数である。この式を $i=1, \dots, N$ まで加え、これを総濃度 $\bar{C} = \sum C_i$ 、平均沈降速度 $\bar{W} = \sum W_i C_i / \sum C_i$ を用いて書き換えると、

$$\bar{W} \bar{C} + K_z (d\bar{C}/dz) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\therefore \bar{W}/K_z = -d \ln \bar{C} / dz \quad \dots\dots\dots (3)$$

を得る。すなわち、総濃度 $\bar{C}$ と底からの距離 z を半対数方眼紙上にプロットすると、そのグラフの勾配から各 z に対する $K_z/\bar{W}$ を求めることができる。別に、その水深の浮遊粒子の平均沈降速度 $\bar{W}$ が、実測または推定されていれば、その水深の K_z を求めることができる。この方法は、 K_z が z に依存する場合にも使えることに注意しよう。

平均沈降速度は、実測されていない場合は、図-4 を用いて変動流速から推定した。また $\bar{W}/K_z$ の推定には、観測された濃度 C そのものではなく、長時間静置してにおいても沈降しない粒子の寄与分、 C_∞ を差し引いた値、 $C - C_\infty$ を用いた。 C_∞ は、底質の巻き上げとは無関係の、植物プランクトン起源の浮遊粒子量を表わしていると考えられるからである。

図-5 は、このようにして求めた、底から 10 cm の位置での鉛直拡散係数 K_z を、 u' に対してプロットしたものである。図中の直線は、

$$K_z = 0.2u' \quad \dots\dots\dots (4)$$

を表わしている。なおこの図には、1977 年 12 月のデータもプロットされている。

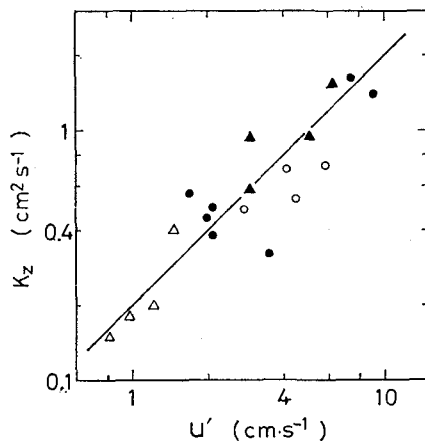


図-5 鉛直拡散係数と浮遊粒子の相関

5. 考 察

(1) 巻き上げへの波と平均流の寄与

今回の実験結果は、巻き上げには平均流よりも波の方が有効であることを示している。しかし平均流が巻き上げに全く寄与しない、ということはありません。十分に

流速が速ければ、平均流も底質を巻き上げ得るはずである。

この結果は、底質の巻き上げには、流速そのものではなく、流れが海底面におよぼす摩擦応力がきいていると考えて、説明することができる。すなわち、同じ流速で比較すると、平均流の摩擦応力は波のそれよりもはるかに小さいのである。以下、Kajiura³⁾ に従ってこれを示す。

振動流の流速振幅を $\hat{U}$ 、海底面に作用する摩擦応力の振幅を $\hat{\tau}_B$ とすれば、

$$\hat{\tau}_B/\rho = \hat{C}\hat{U}^2 \dots\dots\dots (5)$$

が成り立つ。ここに ρ は海水の密度、 $\hat{C}$ は摩擦係数である。摩擦係数の値を推定するには、まず海底面が流体力学的に見て粗面か滑面かを判別する必要がある、そのためには砂漣の大きさを知る必要がある。

周期 4 秒、流速振幅 10 cm/s の波を想定し、Hom-ma, Horikawa, Kajima²⁾ の方法で砂漣の大きさを推定すると、ピッチは $\lambda=9.3$ cm、高さは $\eta=1.53$ cm となる。Nielsen⁴⁾ の方法では、 $\eta=1.38$ cm を得る。したがって砂漣の高さは 1.4 cm 程度と推定される。

ただし、これは砂漣の存在を仮定したうえでの推定である。砂漣が生じるためには、砂の移動が起らなければならない。砂漣はないとして、初期移動限界を推定すると、 $\hat{U}=8.6$ cm/s となる。また砂漣がある場合は、 $\hat{U}=2.3$ cm/s が全面移動限界である^{3,5)}。したがって、はじめに砂漣がなかったとしても、海が荒れて $\hat{U}$ が 8.6 cm/s を越えれば砂の移動が始まり、砂漣ができてくる。ある程度砂漣が形成されると、砂は移動しやすくなるので、砂漣は急速に成長する。今回の巻き上げの観測によれば(図-3)、数 cm/s でもはげしい巻き上げが起っている、砂漣は形成されていたと考えられる。

これがわかると、摩擦係数の推定は容易に行なうことができる。周期 4 秒、 $\hat{U}=10$ cm/s の波の場合、底面は粗で、底層境界層の流れは乱流である。この時、摩擦係数の値は、

$$\hat{C}=1.70(\hat{U}/\sigma z_0)^{-2/3} \dots\dots\dots (6)$$

で計算することができる。ここに σ は角周波数、 $z_0=D/30$ 、 D は Nikuradse の相当粗度で、 $D=4\eta$ で与えられると仮定した。式 (6) に数値を代入すると、 $\hat{C}=0.16$ となる。

長周期波に対する摩擦係数も同様に推定することができる。例えば、周期 400 秒で $\hat{U}=10$ cm/s の波の場合、底面は粗で底層境界層は乱流であり、式 (6) から $\hat{C}=0.0075$ を得る。このように、周期が長くなると、摩擦係数の値は著しく減少する。式 (6) を式 (5) に代入すると、同じ摩擦係数を与えるには、流速は周期の平方根に比例して増加しなければならないことがわかる。すなわ

ち、周期 400 秒の場合、周期 4 秒の波の 10 倍の流速が必要である。平均流が巻き上げには寄与しないという結果は、以上の議論で説明することができる。

1977 年 12 月の観測では、平均流も巻き上げに寄与しているように見えた。この時は、平均流の流速が遅く、かつほぼ同じ大きさの波と平均流が重ね合わされていたため、両者の寄与を分離することは困難であった。今回の結果の方が正しいと考えられる。

(2) 鉛直拡散係数

図-5 に示したように、浮遊粒子の鉛直拡散係数と変動流速とのあいだには、良い相関がある。この鉛直拡散係数は、乱流境界層の理論で用いられる渦動粘性係数と、何らかの関係があると考えられる。

Kajiura³⁾ は、底面が粗な場合の鉛直渦動粘性係数 A_z として、

$$A_z = \begin{cases} \alpha k \hat{u}_B^* D_R & 0 \leq z \leq D_R \\ k \hat{u}_B^* z & D_R \leq z \leq d \\ k \hat{u}_B^* d & d \leq z \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

を用いた。ここに k は Kármán 定数 ($=0.4$)、 α は定数 ($=0.369$)、 $\hat{u}_B^*$ は底面摩擦速度の振幅、 D_R は内層の厚み ($=D/2$)、 d は中間層の上限の高さで、

$$d=0.05(\hat{C}^{1/2}\hat{U}/\sigma)$$

で与えられる。

今回の流れの場合、内層の厚みは 2.8 cm であり、中間層の上限高さは、周期 4 秒、 $\hat{U}=10$ cm/s の波を考えると、 $d=0.13$ cm となる。 $D_R > d$ ということは、中間層は未発達であり、内層だけを考えればよいことを意味している。したがって底面境界層内の渦動粘性係数としては、第一式だけを考えればよい。これに数値を代入し、 $\hat{u}_B^*=\hat{C}^{1/2}\hat{U}$ と式 (6) を用いると、

$$A_z=0.357\hat{U}^{2/3} \dots\dots\dots (8)$$

を得る。 $\hat{U}=2$ cm/s の時、 $A_z=0.57$ cm²/s、 $\hat{U}=10$ cm/s の時、 $A_z=1.66$ cm²/s である。これを図-5 の浮遊粒子の鉛直拡散係数と比較すると、流速依存性はやや異っているが、値はほとんど同じであることがわかる。

(3) 底面浮遊粒子濃度

鉛直拡散係数 K_z が底からの距離によらず一定と仮定すると、式 (1) および総濃度 $\bar{C}$ の定義から、

$$\bar{C} = \sum C_{i0} \exp\left(-\frac{W_i}{K_z} z\right) \dots\dots\dots (5)$$

を得る。ここに C_{i0} は沈降速度 W_i を持つ浮遊粒子の $z=0$ における濃度である。この式が示すように、浮遊粒子の鉛直分布を予測するには、 C_{i0} の値を知る必要がある。ここでは濃度そのものではなく、底面における浮遊粒子の組成について考察する。

底面における浮遊粒子の組成は、底泥の巻き上げのパターンに依存している。海が荒れ、変動流速が大きい時

は、底泥表面がマスとして削りとられるような巻き上げが起り、底面における浮遊粒子の組成は、底泥の組成に等しいと考えられる。一方、変動流速が小さい時は、底泥表面に露出している粒子のうち、細かい粒子のみが選択的に巻き上げられている可能性がある。

実際にはどうであったかを見てみよう。今回の観測中最も海の荒れていた4月19日19時には、 $z=10$ cmの浮遊粒子のうち、 $53\mu\text{m}$ 以下の分画の組成は62.9%であったが、これは底面の粒子組成は底泥の組成に等しいとして、式(5)を適用して推定した値60.5%とよく一致する。このことから、この時はマスとして巻き上げが起っていたと考えられる。

さらに流速が小さい場合においても、少なくとも粒子群の平均沈降速度 $\bar{W}$ への影響から見る限り、選択的巻き上げの影響は無視してもよいと思われる。実際に図-4に示すように、変動流速 $u' \geq 1.5$ cm/s の範囲では、平均沈降速度の実測値は、底面における粒子群の組成が底泥のそれと等しいとして計算した平均沈降速度とほぼ一致するからである。

ただし、変動流速が小さい時の選択的巻き上げの可能性が完全に否定されたわけではない。変動流速が小さい時は K_s が小さいため、粗い粒子は巻き上げられてもすぐに沈降してしまい、粗い粒子の巻き上げの有無は、平均沈降速度の推定にはあまりきかないからである。選択的巻き上げの有無は、今後の検討課題である。

6. 結 語

1) 海況が大きく変化した時の、浮遊粒子の濃度分布の変化を連続的に観測し、底層の浮遊粒子濃度は、変動

流速の2~3乗に比例して増加すること、浮遊粒子の鉛直拡散係数は、変動流速にほぼ比例して変化することがわかった。

2) 平均流は、波に比べると巻き上げにはほとんど寄与していなかった。この結果は、巻き上げにきくのは流れが海底におよぼす摩擦応力であって、しかも平均流の摩擦応力は、同じ流速で比較すると、波のそれに比べるかに小さいためと考えられる。

3) 浮遊粒子の鉛直拡散係数は、波による乱流境界層の理論³⁾で用いられている渦動粘性係数と、値がよく一致していた。

4) 変動流速の広い範囲 ($u' \geq 1.5$ cm/s) にわたり、底泥の巻き上げは、小粒子のみの選択的巻き上げではなく、マスとしての巻き上げの形で起っている可能性がある。

参 考 文 献

- 1) 熊谷幹郎・大形俊英・西村 肇: 底層水中の浮遊粒子濃度におよぼす流れの影響, 第25回海講論文集, pp. 223~227, 1967.
- 2) Homma, M., Horikawa, K. and R. Kajima: A study on suspended sediment due to wave action, Coastal Eng. in Japan, 8, pp. 85~103, 1965.
- 3) Kajiura, K.: A model of the bottom boundary layer in water waves, Bul. Earthquake Res. Inst., 46, pp. 75~123, 1968.
- 4) Nielsen, P., I. A. Svendsen and C. Staub: Onshore-offshore sediment movement on a beach, Proc. Coastal Eng., vol. II, pp. 1475~1492, 1978.
- 5) 堀川清司・渡辺 晃: 波による砂移動に関する一考察, 第13回海講講演集, pp. 126~134, 1966.
- 6) 土木学会編: 水理公式集, 616 p., 1976.
- 7) 堀川清司: 海岸工学, 317 p., 1977.