

表-1 に実験条件を示す。シールズ数 Ψ の算定にあたっては、摩擦係数 f の評価が必要となるが、移動床振動流下の f の評価には議論があるので、ここでは $f=0.01$ と一定とした。

3. シートフロー層厚

底質群の移動状況を写真-1に示す。水槽の底面に取り付けたインディケーターは、水槽の右側鉛直部の水位信号 η を示している。このケースの振動流の周期は

4.64 sec で、写真は 1 sec に 2 コマ測定されているから、写真-1 に示す結果はほぼ半周期の結果となる。

(a) は右側鉛直部の水位が最も上昇した位相であるから、流速は 0 の状態であるが、右から左に作用する圧力勾配のために、既に静止時の底質上端面（これを基準面 $z=0$ とする）より下方で右から左へのシートフロー移動が始まっている。(b) ではシートフロー層の厚さが増加し、移動速度も大きくなっている。インディケーターの読みから、(c) と (d) の間の位相で主流流速は最大となることがわかるが、(c)→(d) では $z<0$ のシートフロー層は既に減速・静止しつつある。 $z>0$ では流速は大きいので、右から左へのサルテーション運動が見られる。(e) では主流流速はまだ右から左に向かう位相であるにもかかわらず、圧力勾配が左から右に作用するため、 $z<0$ のシートフロー層内では粒子が右に移動している。 $z=0$ 付近では流向が逆転するために、一部の底質粒子が渦のように回転する。(f) ではシートフロー層厚がきわめて大きくなっている。以上より、 $z<0$ では粒子群は層状のシートフロー運動を行い、圧力勾配のために主流流速からの位相の先行が大きく、

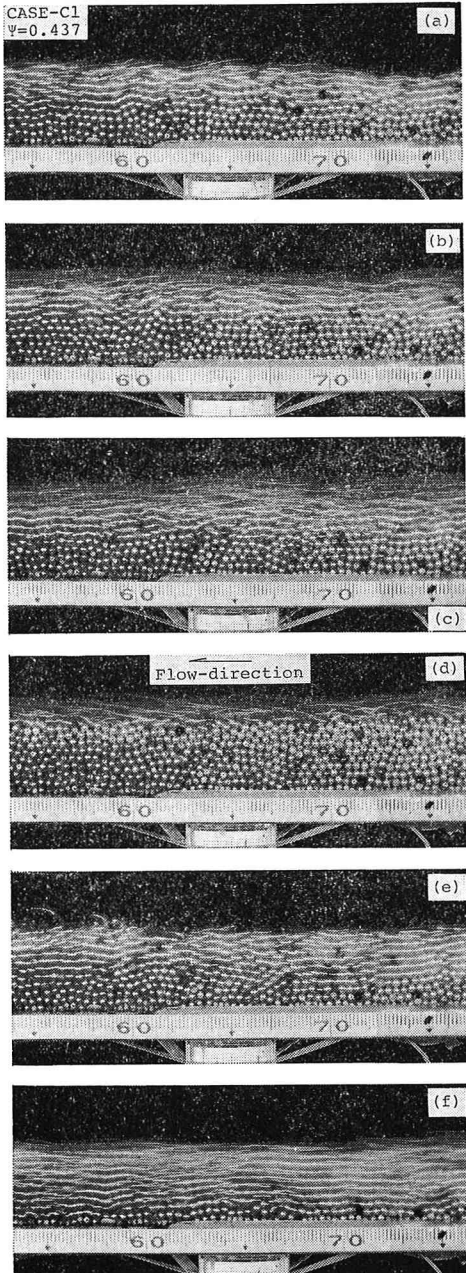


写真-1 底質粒子群の移動状況

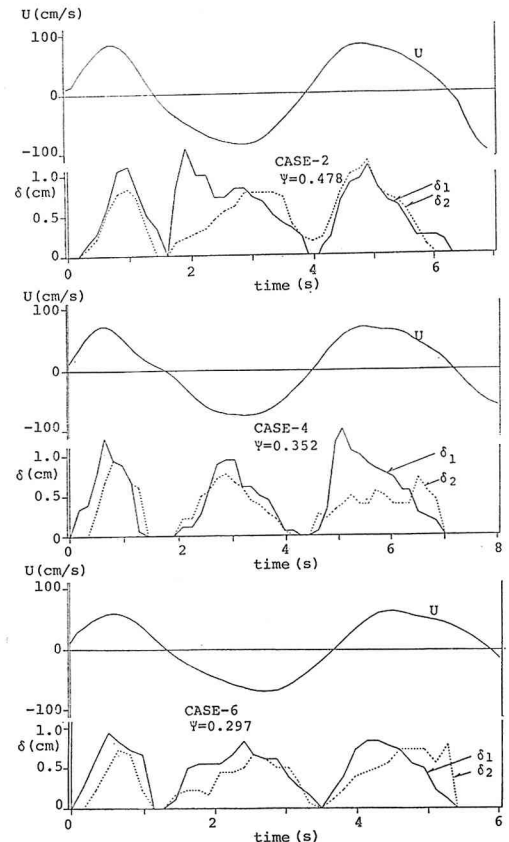


図-2 シートフロー層厚 δ_1 、サルテーション層厚 δ_2 の時間変化

$z > 0$ では流速最大時付近でサルテーション運動をすることがわかる。

そこで $z < 0$ の移動層厚をシートフロー層厚 δ_1 , $z > 0$ のサルテーション層厚を δ_2 とし, その位相による変化を調べた. その結果の一例が 図-2 である. 本実験では画像解析の容易さから, 底質に 4.17 mm という大粒径のものをを用いたため, 粒状体としての性質が大きく現れ, 図-2 の層厚の時間波形もやや不規則である. しかし, シールズ数の増加と共にシートフロー層の極大値が増加するのに対し, サルテーション層の極大値はあまり変化しないことが読み取れる. このことは, 振動流発生開始から第2～第4半周期間の δ_1 , δ_2 の極大値を平均し, シールズ数 Ψ との関係調べた 図-3 から明らかである. なお, 振動流発生開始の第1半周期は静止状態から瞬間的にピストンによる加圧を行うので, 主流の流速波形も他と異なり, 検討から除外した.

δ_1 は浅野・河田 (1988) が提案した $\delta_1 \sim \Psi$ の関係式の回りにプロットでき, シールズ数の1乗に比例する. 本結果の $\delta_1 \sim \Psi$ の関係は, 定常流に対して提案された Hanes-Bowen (1985) の詳細な理論結果, Wilson (1984) の実験結果と一致する. 一方, δ_2 については Ψ の最も大きい CASE-3 の結果を除き, Ψ とともに緩やかに増加するが, その増加の程度は流砂の結果 (例えば土屋・角野 (1967)) に比べ小さい. 振動流においては跳躍が半周期間に制限されることもこの差異が生じる大きな理由であるが, シートフロー状態では跳躍する粒子の下層の粒子群も大きな速度で流送されており, 床面との衝突・反発が完全には出現できないことも一因と考えられる.

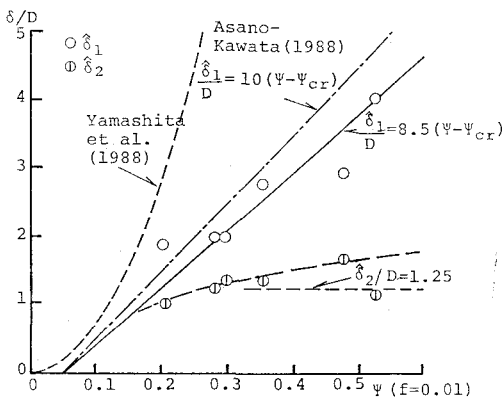


図-3 δ_1 , δ_2 とシールズ数 Ψ の関係

4. 底質移動速度

底質の移動速度 u_s が最大となる位相において, 異なる6つのケースの流速分布を重ねて示したものが 図-4 である. 粒子の移動速度は, 他の粒子との衝突や接触状況の影響を受け, 特に上方のサルテーション領域でばらつ

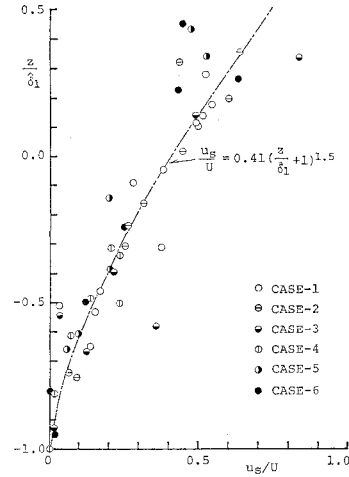


図-4 底質移動速度の鉛直分布

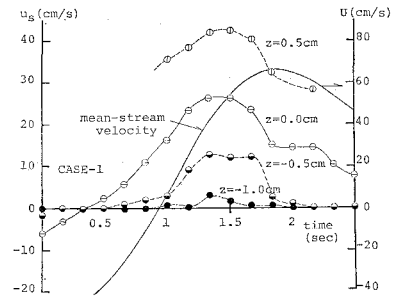


図-5 底質移動速度の位相変化

きを生じるが, δ_1 の半周期間最大値 δ_1 で z を規格化すると, おおよそ (z/δ_1) の 1.5 乗の分布で表現できる. Hanes-Bowen (1985) は, 固液混相体の構成式に基づいて, $u_s \sim \Psi^{3/2}$ を理論的に導いているが, 本実験ケースから検討した限りでは, u_s/U と Ψ のはっきりした関係は見いだせなかった. 図-5 は主流流速 U と底質移動速度 u_s の位相変化の一例を示したものである.

5. 底質濃度

濃度の鉛直分布は $z=0$ cm 付近の基準面濃度が振動流の位相と共に変化し (図-6 参照), その上部のサルテーション層では指数的に減少, 下部のシートフロー層

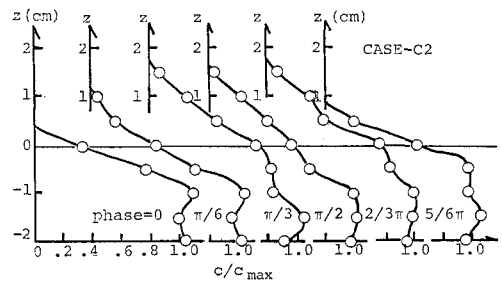


図-6 底質濃度の鉛直分布

では上に凸の分布をすることで概略は記述できる。したがって、サルテーション層とシートフロー層の境界での濃度が決定できれば、濃度分布はほぼ確定する。

本実験の境界濃度の結果と比較すべきものとして、基準点濃度に関する Engelund-Fredsoe (1976) のモデルを取り上げる。彼らは、底面での流体せん断応力が底質粒子群に伝達される時、その応力は底質層表面に作用する摩擦力（底質移動限界応力と等しいと仮定）、掃流砂として粒子を移動させるのに要する抗力、および分散応力で構成されたとした。分散応力の表示には Bagnold (1954) の実験式を用いると、無次元化した応力の釣合式は、

$$\Psi = \Psi_{cr} + (\pi/6)p \tan \phi + 0.027s\Psi\lambda_B^3 \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここに、 Ψ_{cr} は限界シールズ数、 ϕ は底質粒子間の動摩擦角、 s は底質比重である。 p は粒子の移動確率で流砂量の大きな実験データに基づいて次式で表されたとした。

$$p = \left\{ 1 + \left(\frac{\pi \tan \phi}{6(\Psi - \Psi_{cr})} \right)^4 \right\}^{-1/4} \dots\dots\dots (2)$$

λ_B は基準面における線形濃度で、基準面における体積濃度 c_B と次式の関係を持つ。

$$c_B = 0.65 / (1 + 1/\lambda_B)^3 \dots\dots\dots (3)$$

(1) 式で Ψ_{cr} 、 ϕ 、 s は底質の特性量であり、外力を Ψ で与えれば、 λ_B が求まり基準面における濃度 c_B が

(3) 式より求まる。Engelund-Fredsoe のモデルは、もともと流砂に対するものであるが、擬似定常の仮定の下に波が作用するときの基準面濃度の算定に応用されており、実験値との比較からその妥当性も確認されている (Fredsoe, Andersen, Silberg, 1985)。

図-7 は、 $z=0.5\text{cm}$ における濃度の測定結果とこのモデルによる計算結果を比較したものである。測定値として $z=0\text{cm}$ の結果を用いると、計算値より過大となり、図-7 のような一致は見られない。このことは、粒子群の骨格がせん断流体力を受けてダイレタンシーを生じ、主として流体で構成される層と粒子で構成される層の界面が、ほぼ粒径分上方の $z=0.5\text{cm}$ にせり上がるためと考えられる。この結果は今回の実験で径の大きな底質粒子を用いたことに起因するもので、実際の海底砂では上記の性質は顕著には現れないと考えられる。

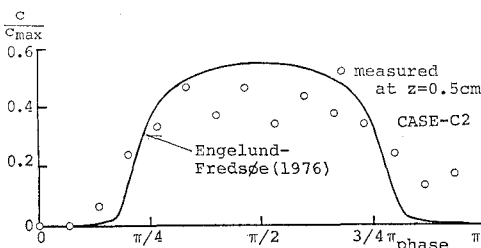


図-7 底質濃度の位相変化

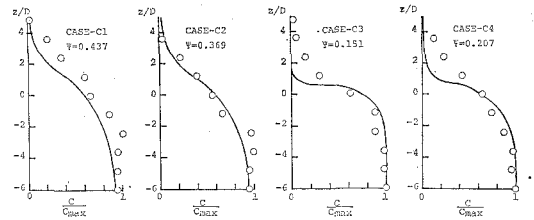


図-8 位相 $\pi/2$ における底質濃度分布

図-8 は位相 $\pi/2$ における濃度分布の実測値を示したものであり、図中の曲線は次式の指数分布で濃度分布を計算した結果である。

$$c = c_{\max} - \{c_{\max} - c_B(t)\} \exp(\alpha_1 z^*), \quad z^* < 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$c = c_B(t) \exp\{-\alpha_2 z^*\}, \quad z^* > 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $z^* = z/D$ 、 $c_{\max}$ は粒子群が移動できる最大充填濃度で 0.65 とした。 $c_B(t)$ は時間変動するシールズ数 $\Psi(t)$ を用い、Engelund-Fredsoe 式で計算される。

α_1 、 α_2 は濃度変化が起こる長さスケールの逆数で、 $\alpha_1 = D/\delta_1(t)$ 、 $\alpha_2 = D/\delta_2$ とする。 Ψ の大きな CASE-1、CASE-2 ではモデルは実測値をかなり良く表現する。

6. 漂砂量

以上の結果を総合し、漂砂量 Q とシールズ数 Ψ の関係について考察する。まずシートフロー層厚 δ_1 、サルテーション層厚 δ_2 については図-3 より、

$$\delta_1(t)/D = 8.5[\Psi(t) - \Psi_{cr}] = 8.5[\Psi \sin^2 \sigma t - \Psi_{cr}] \dots\dots\dots (6)$$

$$\delta_2/D = 1.25 \dots\dots\dots (7)$$

とする。ただし、(6) 式の [] 内が負となるときは 0 と置く。底質移動速度 u_s は図-4 より、

$$\frac{u_s(t)}{\hat{U}} = 0.41 \left(\frac{z}{\delta_1(t)} + 1 \right)^{1.5} \sin \sigma t \dots\dots\dots (8)$$

図-4 より、上式は $z/\delta_1(t)$ が大きい領域で過大となる。したがって今後詳細な測定を追加して、(8) 式の精度向上を行う必要があるが、ここで漂砂量を記述する Ψ のべき数を議論する上では大略は十分と考える。ただし、 $u_s/U > 1$ となる場合には 1 を上限とする。

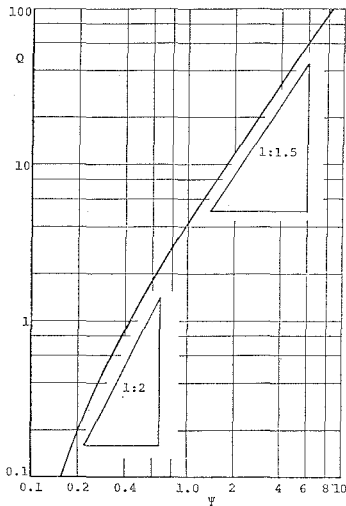
濃度については、図-8 に示す鉛直分布モデルによって計算した。以上より半周期無次元漂砂量 Q は次式で計算される。

$$Q = \frac{q}{w_0 D} = \frac{\hat{U}}{\pi w_0} \int_0^{\pi} \int_{-\delta_1(t)/D}^{\delta_2/D} c(z, \theta) \frac{u_s(z, \theta)}{\hat{U}} dz^* d\theta \dots\dots\dots (9)$$

主流流速 $\hat{U}$ は Ψ より、

$$\hat{U} = \sqrt{2(s-1)gD\Psi/f} \dots\dots\dots (10)$$

よって Q は粒径 D 、比重 s およびシールズ数 Ψ を与

図-9 無次元漂砂量 Q の計算結果

えれば一義的に決定される。ここに摩擦係数 f は 0.01 と一定とした。

本実験条件を与え、(9)式に基づく計算結果を示したものが図-9である。 Ψ が約 0.8 以上になると、 Q は Ψ の 1.5 乗で表される。このことは、(10)式より U が Ψ の 0.5 乗に比例し、底質移動領域の厚さがほぼ δ_1 に相当して、これが Ψ の 1 乗に比例することから容易に推察できる。基準濃度 c_B も Ψ と共に変化するが、Engelund-Fredsøe の式では $\Psi > 0.8$ では c_B がほぼ一定となるので、この領域では Q と Ψ の関係に影響を与えない。

7. 結 論

振動流水槽を用いてシートフロー状態の底質移動について実験的に検討し、底質移動層厚をはじめとする特性量の性質を明らかにした。画像解析を行う便宜上、径の大きな粒子を用いたため、粒状体の性質が現れて水粒子速度のような連続体の結果に比べ、一般にばらつきは大

きくなった。また本実験では10ケースの実験を行ったが、用いた粒子は1種類であり一般性のある結論を下すには実験条件の異なる多くの実験を追加する必要がある。

今回の実験結果から、サルテーション層厚 δ_2 はシールズ数 Ψ が大きくなっても急激には増加せず、またシートフロー層厚 δ_1 は Ψ に比例して増加することがわかった。濃度分布についてはここで示した指数分布で大略は説明できる。また、 $\delta_1 \sim \Psi$ の結果と、 u_s/U が Ψ にはっきり依存せず $u_s \sim U \sim \Psi^{1/2}$ となることから、 Ψ が大きい範囲では半周期漂砂量 Q は $\Psi^{3/2}$ に比例すると考えられる。

本研究は一般研究(B)(代表: 酒井哲郎京大教授)、一般研究(C)(代表: 浅野敏之)による成果であることを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 浅野敏之・河田暢亮 (1988): 移動床上の振動流れのエネルギー逸散に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 302-306.
- 土屋義人・角野 稔 (1967): 水流による砂粒の運動機構に関する実験, 京大防災研年報, 第10号B, pp. 97-107.
- 山下俊彦・日比康生・寺島貴志 (1988): シートフロー状態の移動機構と net の漂砂量, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 297-301.
- Bagnold, R. A. (1954): Experiments on a gravity free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear, Proc. of Royal Soc., pp. 49-63.
- Engelund, F. and J. Fredsøe (1976): A sediment transport model for straight alluvial channels, Nordic Hydrology, Vol. 7, pp. 293-306.
- Fredsøe, J., O. H. Andersen and S. Silberg (1985): Distribution of suspended sediment in large waves, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 6, pp. 1041-1059.
- Hanes, D. M. and A. J. Bowen (1985): A granular-fluid model for steady intense bed-load transport, J. of Geo. Res., Vol. 90, No. C5, pp. 9149-9158.
- Wilson, K. C. (1984): Analysis of contact load distribution and application to deposit limit in horizontal pipes, J. of Pipelines, Vol. 4, pp. 171-176.