

II-262

振動流・一方向流共存場における砂漣上の浮遊過程のモデル化

京都大学大学院 学生員 渡辺 幹広

京都大学大学院 学生員 後藤 仁志

京都大学工学部 正 員 中川 博次

金沢大学工学部 正 員 辻本 哲郎

1. まえがき 波動場における砂漣上の浮遊砂の輸送過程において浮遊砂雲の果たす役割の重要性は、良く知られるところであり、これまでも浮遊砂雲の特性を明らかにするための研究が行われ、有益な成果が得られてきた。一方、モデル化については、周期平均特性に着目したものがほとんどであり、浮遊砂雲の移動過程を詳細に取り込んだモデルは無いようである。そこで本研究では、振動流・一方向流共存場を対象として、浮遊砂雲を浮遊砂生成源とした拡散過程として砂漣上の浮遊過程を捉え、生成項を有する非定常拡散方程式により浮遊過程を記述して、浮遊砂雲の移動軌跡の特性を加味した浮遊砂モデルの構築を試みるものである。

2. モデルの構成 基礎方程式は、連続式、運動方程式および次式の浮遊砂濃度 C に関する拡散方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{sx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{sy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + w_0 \frac{\partial C}{\partial y} + S(x, y, t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

である。ここに、 U, V =流速の x, y 成分、 $\varepsilon_{sx}, \varepsilon_{sy}$ = x, y 方向の浮遊砂の拡散係数、 w_0 =沈降速度である（ x :一方向流の流下方向、 y :鉛直上向き）。生成項 $S(x, y, t)$ については、可視化実験から求めた浮遊砂雲の移動軌跡を考慮して、後述のように評価する。すなわち生成項の評価に当たっては、実験に基づき (i) 浮遊砂雲の含有浮遊砂量の時間変化と (ii) 浮遊砂雲の「核」の存在位置と大きさについての仮定を行う。

まず、(i) 浮遊砂雲の含有浮遊砂量の時間変化 $q_v(t)$ については、指数型を仮定して、

$$q_v(\omega t) = q_{v01} \cdot \exp \left[-\frac{\omega t - \phi_1}{\beta_D \omega t_D} \right] \quad \omega t > \phi_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

とする。ここに、 q_{v01} =浮遊砂の初期含有量、 ω =角振動数、 ϕ_1 =浮遊砂雲の移動開始位相、 t_D =浮遊砂雲の寿命時間である。添字 1 は、浮遊砂雲の移動方向（一方向流に対して順流・逆流）を示している。 β_D は、渦の寿命時間に浮遊砂雲内に残存する砂粒子の割合を規定する定数であるが、寿命時間に残存する砂粒子が初期含有量の1パーセント以下であるとして、 $\beta_D=4.0$ を用いた。

次に(ii)浮遊砂雲の「核」の存在位置と大きさについては、可視化実験の結果から評価する。浮遊砂雲に含まれる浮遊砂は浮遊砂雲の中心付近に集中的に分布するものと仮定し、これを「核」と呼ぶ。画像解析から得られた多数の浮遊砂雲の中心の移動軌跡を統計処理して、中心の平均存在位置 (x_c, y_c) 、標準偏差 σ_x, σ_y 、相関係数 γ を評価し、浮遊砂雲の中心の分布範囲を求める。平均存在位置まわりの分布性状は、2次元正規分布

$$f_c(r_x, r_y, \sigma_x, \sigma_y, \gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} \exp \left[-\frac{r_x^2}{2\sigma_x^2} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y \sqrt{1-\gamma^2}} \exp \left[-\frac{1}{2(1-\gamma^2)} \left(\frac{r_y}{\sigma_y} - \gamma \frac{r_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

で良好に示されることが実験から確認されている。ここに、 r_x, r_y =浮遊砂雲の中心からの距離の x 成分、 y 成分、 σ_x, σ_y =浮遊砂雲の中心回りの標準偏差の x 成分、 y 成分、 γ =浮遊砂雲の中心からの距離の x 成分と y 成分の相関係数であり、 $r_x, r_y, \sigma_x, \sigma_y, \gamma$ は全て位相 ωt の関数である。結局、生成項の空間分布 $S(x, y, \omega t)$ は、

$$S(x, y, \omega t) = -\frac{dq_v(\omega t)}{dt} \cdot f_c(x-x_c(\omega t), y-y_c(\omega t), \sigma_x(\omega t), \sigma_y(\omega t), \gamma(\omega t)) \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表現される。計算格子については、水平方向に20分割、鉛直方向に19分割したスタッガード格子点を生成した。基礎方程式の離散化は、Patankerのコントロールボリューム法に準拠して行われた。

境界条件として上方境界では、計測から求めた一様流速部の流速値を与え、濃度については、上方境界を通り抜ける正味のfluxがゼロであるとした。底面境界では、流速については non-slip条件を、濃度については、

底面での砂粒子の堆積を許し、特定の条件を課さないこととした。通常、移動床の場合には底面濃度を評価する必要があるが、これには底面からの巻き上げを考慮した方法や底面での掃流砂濃度を境界条件として与える方法などがあるが、本モデルは掃流から浮遊への遷移を浮遊砂雲による浮遊砂の生成として表現しようとするのだから、底面の濃度に関して付加的な取扱いは必要としない。

計算の初期値としては、流速の水平方向成分については、上方境界での流速を、流速の鉛直方向成分と濃度については、0をそれぞれ与え、4周期にわたり繰り返し計算した。計算時刻は、1/20周期とした。

3. 計算結果結果の検討 次に、計算結果を振動流・一方向流共存場における光学式濃度計による点計測結果と比較し、モデルの有効性を検証する。計測は、図-1に示すU字管式振動流装置を用いて、表-1の条件で行った。実験に用いたのは、粒径 $d=0.04$ cm、比重 $\sigma/\rho=2.65$ の砂粒子である。なお、浮遊砂雲の移動軌跡については、同一の水理条件の下に可視化実験を行い、多数の浮遊砂雲の中心の移動軌跡を統計処理して、中心の平均存在位置 (x_c, y_c) 、標準偏差 σ_x, σ_y および相関係数 γ を求めて、計算における浮遊砂生成項の評価に用いている。浮遊砂雲の移動が活発なクレストの底面付近の測点について計算と実験を比較したのが、図-2である。濃度のピークの位相についてずれはあるものの、濃度分布が鋭いピークを持つという特性については良好に模擬されている。さらに、濃度の絶対値についても、浮遊砂雲が初期に含有する浮遊砂の濃度がわかれば、本シミュレーションによりほぼ良好な濃度時系列の予測が可能である点が示された。

濃度の時空間分布の計算結果の一部を図-3に示す。位相 $(2/5)\pi$ には、順流時に掃流砂を取り込んだ剥離渦が切り放され、高濃度の浮遊砂を含む流体塊が持ち上げられつつある様子が示されている。位相 $(3/5)\pi, (4/5)\pi$ と進むにつれ、この高濃度の塊は移流効果により徐々に右側へ移動して拡大し、逆向き最大流速となる位相 $(5/5)\pi$ には、高濃度部が上方へと持ち上げられている。

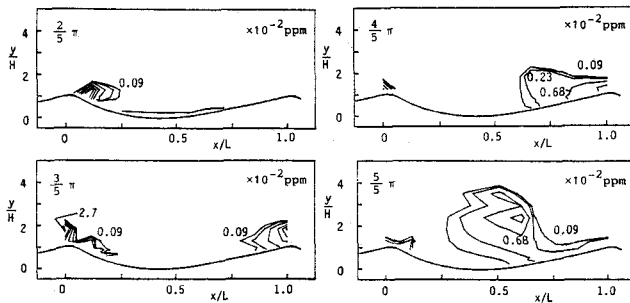


図-3 濃度の時空間分布

表-1 実験条件

振動周期	: $T = 2.6$ sec
流速振幅	: $U_w = 28.0$ cm/sec
一方向流速	: $U_c = 15.5$ cm/sec
砂漣の平均波長	: $L = 22.5$ cm
砂漣の平均波高	: $H = 3.5$ cm
砂漣の波形勾配	: 0.156
砂漣形状	: 非対称

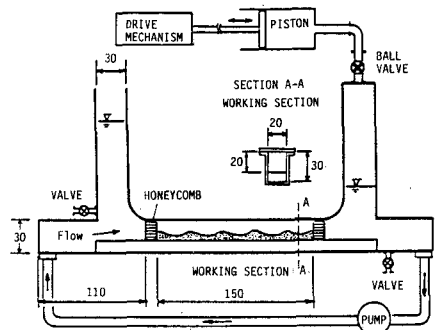


図-1 U字管式振動流装置

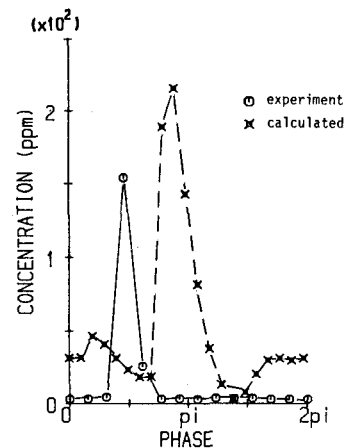


図-2 濃度時系列

4. あとがき 以上のように移動する浮遊砂生成源としての浮遊砂雲からの拡散現象として砂漣上の浮遊過程を捉えると、実験観察から指摘されてきた浮遊砂雲の土砂輸送への貢献を良好に再現することができる。