

傾斜底面での浮泥流の挙動について

九州大学 工学部 学生員○渡辺亮一

同 上 正 員 楠田哲也 正 員 二 渡 了

1. はじめに

シルテーションは、沿岸域や感潮域における生態系を破壊したり、航路の埋没を引き起こすなど、種々の問題を生じさせている。シルテーションの研究の進展にともなう、これらの問題は、高濃度の懸濁物質の直接の沈降によってではなく、一旦、海底に沈降した粘土・シルト粒子が浮泥流として、水平方向に輸送されることによって、生じていることが、明らかとなってきた。したがって、斜面上での浮泥流の挙動を明らかにすることは、シルテーション問題の極めて重要な課題であると考えられる。

本研究では、清水中にある斜面上に、懸濁物質が沈降し、その結果として発生する薄層流の形成機構および、この発生した薄層流の成長、消滅について検討を加えることを目的としている。

2. 基礎式について

図-1に示す、勾配 θ をもつ斜面上に、懸濁物質がフラックス F_d で沈降すると、斜面上に薄い厚さ h の浮泥層を形成する。浮泥層の流下に伴い、底面剪断応力が限界巻き上げ剪断応力($\rho u_*^2 e$)より大きくなると、浮泥層は、底泥を巻き上げる(フラックス F_e)と同時に、上層からの連行(フラックス F_d)を加えながら成長していく。一方、底面剪断応力が限界沈降剪断応力($\rho u_*^2 d$ 、 $u_*^2 d < u_*^2 e$)より小さくなると、浮泥層は、フラックス F_e にて、懸濁物質が沈積しながら消滅していく。

このような現象を表現する基礎式は、流体と懸濁物質の保存式と流体としての運動方程式からなる。基礎式を導くに当たって、以下に示す、①～⑤の仮定を用いている。

①浮泥の輸送現象のレイノルズ数は、充分小さく層流とみなせる。

②浮泥層には、境界層近似が適用できる。

③浮泥層厚は、全水深 H に比べて小さい($h/H \ll 1$)。

④斜面勾配は充分に小さい($\theta \ll 1$)。

⑤ブーシネスク近似が適用できる。

さらに、浮泥層の厚さ方向の流速、懸濁物質濃度等の分布には、相似仮説が適用できるとして、 x 軸を斜面流下方向に、 z 軸を斜面垂直上向きにとれば式(1)となる。式(1)となるように u の分布形と h を定め、同時に式(2)となるように ρ' を定める。他の場合も同様に定め、浮泥層内での z 方向分布は、すべて一定とする。これらの仮説のもとで、基礎式は式(3)～(8)のように与えられる。

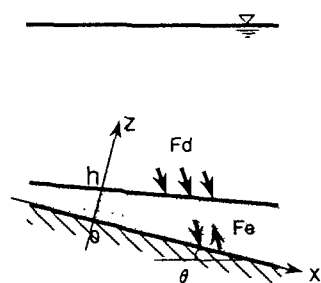


図-1 概念図

3. モデル化

特性曲線法を用い、ある流体塊の部分の浮泥層の安定性を考える。この時、浮泥層の見かけ密度は、常に一定とし、巻き上げや、上方からの沈降があれば、層厚が増し、層内の懸濁物質が沈積すれば、減少するものとすれば、式(4)より式(4')、式(5)より式(5')がもとまる。

式(5')中の右辺第一項は、浮泥層内の水平方向の圧力差による輸送項、第二項は、重力の作用による輸送項、第三項は、底面と界面での抵抗力、第四項は、流入・流出フラックス分を流速 U で動かしたり、運動を妨げて消失させてしまうための運動量を見かけ密度で除したものである。物理的作用の大きさから考えて、右辺第一項は第二項に比べて小さいので無視する。また、第四項も第二項に比べて小さいので無視する。従って、式(5')は、式(5'')となり、式(5'')と式(4')の比をとれば、式(9)を得る。式(7)、式(8)を式(9)に代入し、 $Uh = Q$ とおくと式(10-1)～(10-3)が求まる。

4. 考察

式(10-1)～(10-3)の分母が、丁度ゼロになるところの境界線は、図-2の破線として表される。これらの領域区分別に、位相平面法に従って、式(4)、(5)、(10)より求めた勾配とその方向は、図中の矢印として示されている。これらの領域のもつ物理的な意味を各領域ごとに示していく。

自己加速領域（領域FDEM）：最終的には、底泥を巻き上げ、位置エネルギーを運動エネルギーに変化させながら、自己加速していく領域である。ただし、領域LABKでは、当初、抵抗力により消費されるエネルギーの方が、与えられるエネルギーよりも大きくなっている。また、領域FDBAでは、自己加速領域に入る前に一旦、巻き上げも沈積もない領域に入っている。領域EDIでは、抵抗により流速が低下して行き、沈積によりエネルギーを失うが、エネルギーが消費する前に、加速により沈積の生じない領域へ入り、位置のエネルギーを運動のエネルギーに変化させながら自己加速領域へと入って行く。

消滅領域（領域FDEO）：最終的に、懸濁物質をすべて沈積させて、浮泥流が消滅する領域である。領域FGNでは、抵抗力でエネルギーを失い、一旦、巻き上げも沈積も生じない領域へ入った後、懸濁物質を沈積させて消滅する。領域DEPOでは、自己加速させるために必要な位置のエネルギーは存在するが、懸濁物質を浮泥流中に保持しておくほどの応力が生じていないために、消滅する領域となる。また、領域HDPOは自己加速させるために必要な位置のエネルギーもなければ、浮泥流中に懸濁物質を保持しておく応力も発生しない領域である。

ここで、線分BCは自己加速の、線分DROは消滅の収束線を示している。また、線分FD、DEは、それぞれ自己加速への境界線（AGL）となっている。

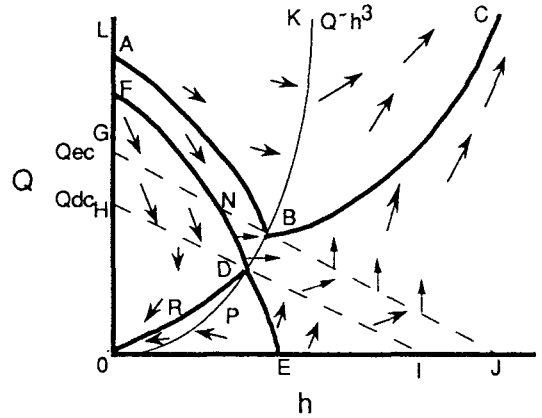


図-2 $Q-h$ 位相平面図

5・おわりに

本研究において、重要な課題であるシルテーションが、顕著に現れているのは領域HDEOであると考えられる。従って、この領域での、浮泥流の挙動を時間を変数として考察しなければならない。この点について、今後、実験を含めて検討していく予定である。

参考文献：H.M.Pantin, INTERACTION BETWEEN VELOCITY AND EFFECTIVE DENSITY IN TURBIDITY FLOW; PHASE-PLANE ANALYSIS, WITH CRITERIA FOR AUTOSUSPENSION; Marine Geology, 31(1979), pp59-99

$$\int_0^{\infty} u \, dz = U_h, \quad \int_0^{\infty} u^2 \, dz = U^2 h \quad (1) \quad \text{巻き上げ・沈積フラックス}$$

$$\begin{aligned} F_e &= \alpha (u - u_{ec}) (u \geq u_{ec}) \\ &= 0 \quad (u_{ec} \leq u < u_{ed}) \\ &= \beta (u - u_{ed}) (u < u_{ed}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{dU_h}{dh} = \frac{\frac{\rho'}{\rho} g \theta h + \frac{\tau}{\rho}}{\frac{F_e}{\rho'} + \frac{F_d}{\rho'}} \quad (9)$$

$$\int_0^{\infty} \rho' u \, dz = \bar{\rho} U_h \quad (2)$$

流体の連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_h}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

懸濁物質の保存式

$$\frac{\partial (\bar{\rho} h)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} U_h)}{\partial x} = F_d + F_e \quad (4)$$

流体の運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\bar{\rho} U_h)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} U^2 h)}{\partial x} &= -\frac{1}{2} g \frac{\partial (\bar{\rho} h^2)}{\partial x} \\ &\quad + \frac{\tau}{\rho} - \frac{1}{\rho} [F_e + F_d] U \end{aligned} \quad (5)$$

沈降フラックス

$$F_d = \rho_s (1 - \epsilon) \omega = \text{const} \quad (6)$$

$$\frac{dU_h}{dt} = \frac{\rho'}{\rho} g \theta h + \frac{\tau}{\rho} \quad (5')$$

$$\frac{dQ}{dh} = \frac{\frac{\rho'}{\rho} g \theta h^3 - \gamma \gamma Q}{\frac{\alpha}{\rho'} h (Q - Q_{ec}) + \frac{F_d}{\rho'} h^2} \quad (u \geq u_{ed}) \quad (10-1)$$

$$\frac{dQ}{dh} = \frac{\frac{\rho'}{\rho} g \theta h^3 - \gamma \gamma Q}{\frac{F_d}{\rho'} h^2} \quad (u_{ec} \geq u \geq u_{ed}) \quad (10-2)$$

$$\frac{dQ}{dh} = \frac{\frac{\rho'}{\rho} g \theta h^3 - \gamma \gamma Q}{\frac{\alpha}{\rho'} h (Q - Q_{ed}) + \frac{F_d}{\rho'} h^2} \quad (u < u_{ed}) \quad (10-3)$$

ρ : 粒子密度, $(1 - \epsilon)$: 浮泥層中の固層の体積分率, ρ' : 浮泥層を形成する流体の平均水中みかけ密度, g : 重力の加速度, ω : 懸濁物質の沈降速度, u_{ec} : 流速で示した u_{ec} , u_{ed} : 流速で示した u_{ed} , α, β : 係数