

II-36

大陸棚上における乱泥流の自己加速メカニズム

 東北大学工学部 学生員 ○山口健治
 東北大学大学院 正会員 泉 典洋

1. はじめに

均一な流体中に土砂を含んだ流体が流入するとき、その密度差により乱泥流と呼ばれる密度流が形成される。この流れは、海中の大陸棚から大陸斜面の間に存在する海底溪谷の成因となっている事が分かっている¹⁾。乱泥流は流下と共に底面からの土砂の巻き上げや、底面への沈降および堆積を行うことでその流速を増減させる。底面からの土砂の巻き上げが沈降よりも大きい場合は密度が増大し、質量運動量が増す。その結果乱泥流は加速するというような現象が起こり、そのような現象を自己加速と呼ぶ。乱泥流は大陸斜面のように急な勾配を流下する時ほど自己加速を起こしやすい事が分かっている²⁾。

そこで、本研究では大陸棚上を流下する乱泥流について理論的に構築される乱泥流を検証し、その運動特性を明らかにする。また、その発生条件についても考察を加える。

2. 解析モデル

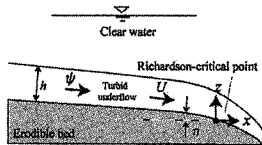


図-1 乱泥流の概念図

図-1 のように大陸棚を流下する乱泥流を考える。大陸棚は平坦で一様な勾配 (0.001) を有しており、下流端は比較的急な勾配 (0.05) の大陸斜面へと続いている。図-1 の座標系において変数となるのは層平均された流速 U 、浮遊土砂量 ψ 、そして層厚 h である。ここでリチャードソン数 Ri によって流れを評価する。リチャードソン数は密度が層状に変化している境界層流れの不安定性を表す無次元数であり、次式で表せる。

$$Ri = \frac{Rg\psi}{U^3} \quad (1)$$

ここで R は土砂の比重、 g は重力加速度である。この値が 1 よりも大きい場合は流れが常流となり、1 よりも小さい場合は流れが射流となる。乱泥流は勾配の平坦な大陸棚上では常流的に、勾配の急な大陸斜面部分では射流的に流れており、大陸棚と大陸斜面の間にはリチャードソン数が 1 となるリチャードソン限界点が存在することが提唱されている³⁾。大陸棚上の乱泥流はこ

の点に向かうことになる。

3. 定式化

(1) 支配方程式

乱泥流を支配する方程式を次に示す。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{-RiS + e_w(2 - \frac{1}{2}Ri) + \frac{u_*^2}{U^2} + \frac{1}{2} \frac{v_s}{U} \gamma_0 Ri (\frac{E_s h U}{r_0 \psi} - 1)}{1 - Ri}$$

$$\frac{h}{U} \frac{dU}{dx} = \frac{RiS - e_w(1 + \frac{1}{2}Ri) - \frac{u_*^2}{U^2} - \frac{1}{2} \frac{v_s}{U} \gamma_0 Ri (\frac{E_s h U}{r_0 \psi} - 1)}{1 - Ri}$$

$$\frac{h}{\psi} \frac{d\psi}{dx} = \frac{v_s}{U} \gamma_0 (\frac{E_s h U}{r_0 \psi} - 1) \quad (2a, b, c)$$

ここで e_w は水の連行係数、 E_s は土砂の連行係数、 u_* は摩擦速度、 S は勾配、 v_s は土粒子の沈降速度、 r_0 は浮遊土砂濃度と底面付近の濃度の比で 1.6 とする。また、式中の各値について次式を用いる。

$$e_w = \frac{0.00153}{0.0204 + Ri}, \quad E_s = K \left(\frac{u_*}{v_s} \right)^n, \quad u_* = (c_D U^2)^{0.5} \quad (3, 4, 5)$$

$$v_s = \sqrt{RgD_s} \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36}{d_*}} - \sqrt{\frac{36}{d_*}} \right), \quad d_* = \frac{RgD_s^3}{v^2} \quad (6, 7)$$

ここで v は水の動粘性係数、 c_D は底面の抵抗係数、 D_s は土砂の粒径、 K および n は経験的に得られるパラメータでそれぞれ 6.7×10^{-5} 、2 とする。次に底面の斜面形状を決定する。上流側無限遠点 ($x \rightarrow -\infty$) において一定勾配 $S_n (=0.001)$ に漸近する次の斜面形状を仮定する。

$$\eta = -S_n x - \frac{Hc}{\theta} \left[e^{\theta(c_0 - S_n) \frac{x}{h_c}} - 1 \right], \quad S = -\frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (8, 9)$$

ここで η は原点からの底面高さ、 θ は斜面形状の曲率を表すパラメータ、 h_c はリチャードソン限界点における層厚である。

(2) 境界条件

式(2a-c)を解く為には 3 つの境界条件が必要になる。

ここで前述したリチャードソン限界点における各変数の値を境界条件とすることを考える。リチャードソン限界点ではリチャードソン数が 1 となるので式(2a,b)の分母が 0 となり、数学的に特異性を有する。しかし実際にはその様な流れは存在しない。そこで式(2a,b)の分母が 0 となると同時に分子も 0 となる正則条件が要求

される。リチャードソン限界点における層厚，流速，土砂量をそれぞれ h_c ， U_c ， Ψ_c とすれば，正則条件と $Ri=1$ の条件より次式が成り立つ。

$$Uc = \frac{Kc_D Rg h_c - v_s^2}{2v_s(S - e_w - c_D)}, \quad \Psi_c = \frac{U^3}{Rg} \quad (10,11)$$

式(10,11)から h_c の値によって U_c ， Ψ_c が決定される。この式において h_c を変化させてみたところ， h_c が約 10m 以上の値になると U_c ， Ψ_c の値が負となり，流れが存在し得ないという結果となった。よって限界水深 h_c は約 10m までの値しか取り得ないことになる。このリチャードソン限界点における値を境界条件とする。つまり，

$$h=h_c, U=U_c, \Psi=\Psi_c \quad \text{at } x=0 \quad (12)$$

式(12)の境界条件を用いて式(2a-c)を上流方向に積分する。ただし，実際にはこれらの値そのものを境界条件に使うことは出来ないため，このリチャードソン限界点における各値からそれぞれ上流方向に線形的に微小変位させた次の値を境界条件として使う。

表-1 実際の境界条件

h_c (m)	h_0 (m)	U_0 (m/s)	Ψ_0 (m ² /s)
2.0	2.00000016	2.41265501	0.86851183
9.0	9.00000025	0.40421201	0.00409644

4. 計算結果及び考察

次に支配方程式の計算結果を示す。

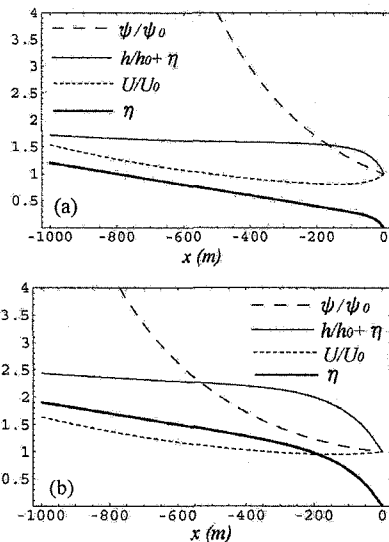


図-2 層厚，流速，土砂量，斜面形状の流下方向変位
(a) $h_c=2.0$ (b) $h_c=9.0$

図-2は層厚 h ，流速 U ，土砂量 Ψ ，底面高さ η の上流方向に積分した結果を表したものである。ただし，それぞれリチャードソン限界点での値 h_0 ， U_0 ， Ψ_0 で無次元化している。この結果により層圧に関しては，乱泥

流が大陸棚の一定勾配の部分を通る場合は流下と共に厚くなり，斜面勾配が急になり始める場所から減少を起し限界水深に達するという結果となった。流速に関しては，大陸棚の一定勾配の部分を通る場合は減速しながら流下し，斜面勾配が急になり始める場所から加速するという結果が得られた。浮遊土砂量に関しては，流下と共にその量を減らしてリチャードソン限界点に達するという結果となった。

次に，乱泥流の発生条件について考察する。大陸棚を流下しリチャードソン限界点に達する様な乱泥流の解は上流方向遠点において層圧は 0 となり，流速と土砂量は共に無限大に発散してしまう。土砂量に関しては，リチャードソン限界点から上流方向に 1000m も離れていない地点において現実的でない値まで増大している。これより大陸斜面まで流下する様な乱泥流は大陸棚下流端にあるリチャードソン限界点からあまり離れていない地点で発生することが予想される。また，図-3の(a)と(b)を比較すると限界水深 h_c の値が小さいほど上流方向遠点での乱泥流発生条件が厳しくなることが分かる。

5. 結論

大陸棚を流下し大陸斜面まで達するような乱泥流の挙動を理論的に検証した。乱泥流は大陸棚のほぼ平坦な一定勾配部分を流下する時には減速しながら土砂量を減少させる。そして，底面勾配が急になり始める辺りから加速し，リチャードソン限界点に達するという結果が得られた。そしてこの限界点から上流方向にあまり離れた場所ではその発生条件が厳しくなることが分かった。

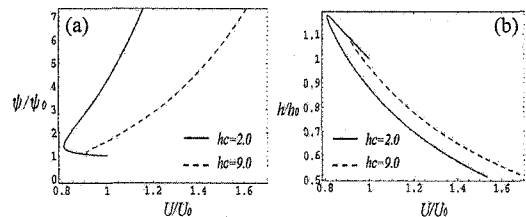


図-3 層厚，流速，土砂量の相関

(a) $\Psi/\Psi_0 - U/U_0$ (b) $h/h_0 - U/U_0$

図-3 は層厚と流速および土砂量の相関を表したものである。各境界条件において，これらの値が図-3の曲線上に乗るときに乱泥流は発生すると考えられる。

参考文献：

- 1) 泉典洋.: 河道網の形成. ながれ 24(2005)5-14.
- 2) G.Parker, Y.Fukushima and Pantin.: Self-accelerating turbidity currents. J.Fluid Mech, Vol.171, pp.145-181, 1986.
- 3) 泉典洋.: 乱泥流による海底峡谷の形成理論. 土木学会論文集 No.712/II-60, 45-46, 2002.8.