

任意形状を有する大陸棚上における乱泥流による海底溪谷形成機構

東北大学大学院 学生員 ○山口 健治
北海道大学大学院 正会員 泉 典洋

1. はじめに

大陸縁辺部において横断方向に一定の間隔をもつ平行な海底溪谷群が存在することが分かっており、この溪谷群は乱泥流によって形成される¹⁾。乱泥流とは土砂を浮遊した密度流のことである。乱泥流は海底面を土砂を巻き上げもしくは堆積させながら流下することで、その浮遊砂濃度を増減させるという特徴を持つ。乱泥流による海底溪谷形成理論の今までの研究においては保存型の斜面が定義され、また乱泥流の上層からの水の連行が無視されていた²⁾。本研究では任意の形状の斜面上を流下する乱泥流を数学的なモデルで記述し、また上層からの水の連行を考慮に入れた。そして乱泥流の運動方程式および連続式、浮遊土砂の移流方程式、乱泥流による海底面の地形変化に関する式を用いて定式化し、線形安定解析を試みた。

2. 理論的展開

2.1 モデルおよび支配方程式

図-1 に示すような大陸棚上を流下する二次元の乱泥流を考える。原点における各変数の値によって無次元化された乱泥流の運動方程式は次のように表せる。

$$\alpha \frac{\partial U h}{\partial t} + \frac{\partial U^2 h}{\partial x} + \frac{\partial U V h}{\partial y} = -\frac{1}{2} h^2 \frac{\partial C}{\partial x} - C h \frac{\partial h}{\partial x} - C h \frac{\partial \eta}{\partial x} + C h \sigma - (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}} U \quad (1)$$

$$\alpha \frac{\partial V h}{\partial t} + \frac{\partial U V h}{\partial x} + \frac{\partial V^2 h}{\partial y} = -\frac{1}{2} h^2 \frac{\partial C}{\partial y} - C h \frac{\partial h}{\partial y} - C h \frac{\partial \eta}{\partial y} - (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}} V \quad (2)$$

ここで x および y はそれぞれ流下方向および横断方向座標、 U および V は x および y 方向の流速成分、 h は乱泥流の層厚、 C は浮遊砂濃度、 η はの一樣勾配斜面を基準にしたときの底面高さ、 σ は正規化された大陸棚の斜面勾配である。また、水の連続式および土砂の移流方程式は次のようになる。

$$\alpha \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U h}{\partial x} + \frac{\partial V h}{\partial y} = e_w (U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\alpha \beta \frac{\partial C h}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial U C h}{\partial x} + \frac{\partial V C h}{\partial y} \right) = \gamma (U^2 + V^2) - C \quad (4)$$

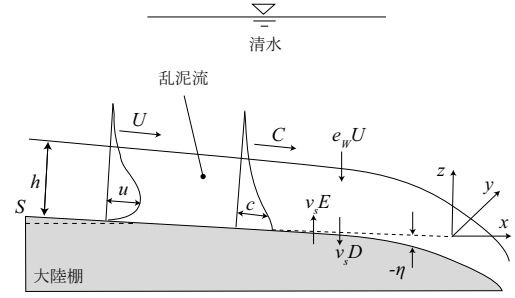


図-1 乱泥流の概念図。

ここで e_w は上層からの水の連行係数である。底面上における底質粒子の連続式は以下のように表せる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = C - \gamma (U^2 + V^2) \quad (5)$$

2.2 一次元基本状態

一旦発生した乱泥流は、かなり長期間に亘って継続することが観測されている。つまり、非定常性の影響は小さく、乱泥流はほとんど定常であるとみなすことができる。そこで式 (1)-(4) について時間微分項を無視し、流れが横断方向に一樣であると仮定すると支配方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial U^2 h}{\partial x} = -\frac{h^2}{2} \frac{\partial C}{\partial x} - C h \frac{\partial h}{\partial x} - C h \frac{\partial \eta}{\partial x} + C h \sigma - U^2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial U h}{\partial x} = e_w U^2 \quad (7)$$

$$\gamma \frac{\partial U C h}{\partial x} = U^2 \gamma - C \quad (8)$$

大陸棚上流の正規化された斜面勾配 σ に漸近すると仮定すると、原点からの底面高さ η および斜面勾配は次式で表せる。

$$\eta = \frac{1}{\theta} \left(\sigma - \frac{S_c}{c_D} \right) e^{\theta x}, \quad S(x) = \sigma - \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (9a, b)$$

ここで θ は曲率を表すパラメータ、 S_c は原点における勾配、 c_D は底面の抵抗係数である。境界条件はリチャードソン限界点において与える。流速および浮遊砂濃度、層厚はそれぞれ限界点における値によって無次元化しているので、境界条件は以下のようになる。

$$U = 1, \quad C = 1, \quad h = 1 \quad \text{at} \quad x = 0 \quad (10)$$

2.3 結果および考察

式 (6)-(8) を式 (10) の境界条件で積分した結果を図-2 に示した。これによれば大陸棚上を流れる乱泥流は流下

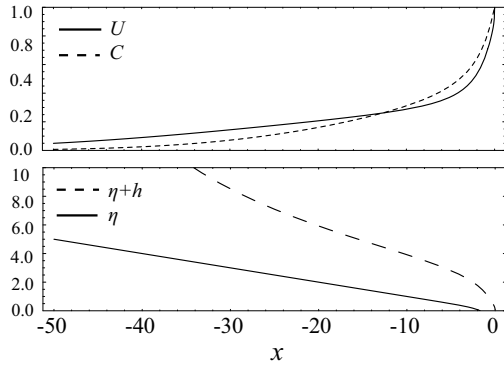


図-2 一次元基本解 ($\beta=10, \gamma=6, \theta=1.0, \sigma=0.1$).

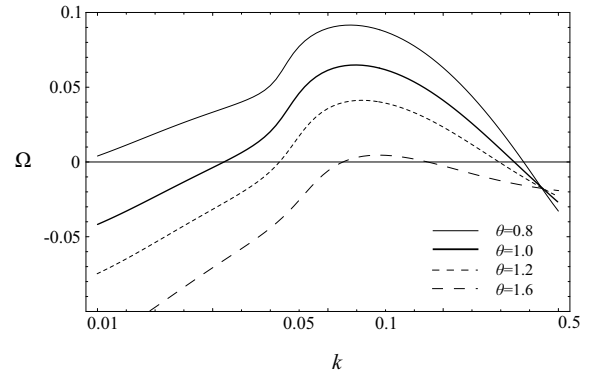


図-3 発達率 Ω の変化 ($\beta=10, \gamma=6, \sigma=0.1$).

とともに加速し、浮遊砂濃度を増加させることになった。また、層厚は流下とともに減少する傾向にあった。

2. 4 線形安定解析

前項の一次元基本解に対し、横断方向 (y 方向) に次のような擾乱を与える。

$$U = U_0(x) + aU_1(x)e^{\Omega t} \cos ky \quad (11a)$$

$$V = aV_1(x)e^{\Omega t} \sin ky \quad (11b)$$

$$C = C_0(x) + aC_1(x)e^{\Omega t} \cos ky \quad (11c)$$

$$h = h_0(x) + ah_1(x)e^{\Omega t} \cos ky \quad (11d)$$

$$\eta = \eta_0(x) + a\eta_1(x)e^{\Omega t} \cos ky \quad (11e)$$

ここで下付きの 0 は前項で求めた一次元基本解、 k は擾乱の波数である。また、 Ω は擾乱の発達率であり、この値が正となるときに乱泥流は擾乱に対して不安定であることを示している。

式 (11) 摂動に対応して U, V, C, h をそれぞれ摂動展開する。次にこれらの摂動を式 (1)-(5) の支配方程式に代入し、 $O(a)$ で整理することで摂動方程式を導く。そして Chebyshev 多項式展開を用いて Ω を固有値とする次の一般化固有値問題を構成する。

$$\mathbf{A}\vec{u} = \Omega\mathbf{B}\vec{u}$$

$$\vec{u} = [U_0, \dots, U_{N-1}, V_0, \dots, V_{N-1}, C_0, \dots, C_{N-1}, h_0, \dots, h_{N-1}, \eta_0, \dots, \eta_{N-1}]^T \quad (12)$$

式 (12) を解くことによって、発達率 Ω の値を得ることができる。

3. 結果と考察

図-3 に擾乱の波数による発達率 Ω の変化を示す。グラフは大陸棚の斜面形状の曲率 θ を 0.8~1.6 と変化させたケースについて表した。この結果によると、波数 k が約 0.04~0.4 の領域において発達率 Ω は正の値となり、流れ

は不安定となる。また、 k がこれより大きくなると Ω は負の値となり、流れは安定となる。そして波数 k が約 0.1 の点において、曲率 θ の値にかかわらず Ω の値が最大となるピークが存在する。つまり卓越波数が存在し、その値は 0.1 程度で流れはこの時最も不安定であるという結果が得られた。波長の次元量 $\tilde{\lambda}$ と波数 k には次の関係がある。

$$\tilde{\lambda} = \frac{2\pi\tilde{H}_c}{cDk} \quad (13)$$

この式から波長が原点における層厚の約 1500 倍の擾乱が発達することが分かる。乱泥流の層厚は 10cm~1m のオーダーであることが分かっているので、大陸棚上において海底渓谷は斜面の形状にかかわらず、150~1500m の間隔で形成されるという結果が得られた。

4. 結論

乱泥流による大陸棚上の海底渓谷形成機構について、斜面形状の曲率を変えたケースについて結果を示すことによって理論を任意形状に拡大させた。また、解析において乱泥流の上層からの水の連行を考慮に入れた。その結果、斜面形状にかかわらず波数が 0.1 程度のときに擾乱の発達率にはピークが存在することが明らかになった。そしてこのことから大陸棚上において渓谷は 150~1500m の間隔で形成されるという結果が得られた。

参考文献

- 1) Garcia, M. and Parker, G.: Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current, *J. Geophys. Res.*, Vol. 98, No. C3, pp. 4793–4807, 1993.
- 2) Ikeda, S., Izumi, N., and Ito, R.: Effects of pile dikes on flow retardation and sediment transport, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 117, No. 11, pp. 1459–1478, 1992.