

立命館大学大学院 学生員 伊藤隆郭
 立命館大学理工学部 正会員 江頭進治

1. はじめに 従来の土石流の構成則は、殆どが濃度場を一樣と仮定するか、若しくは、それに近い状態を想定して議論されてきた。そのため、濃度場の議論が明確に行えないことが問題になっている。ここでは、まず、江頭ら¹⁾の構成則に静的圧力 p_s の表示式を加え、それに基づいて、速度場と濃度場の支配方程式を導く。次に、固定床及び移動床に適用し、構成則の妥当性を検討している。

2. 支配方程式と応力モデル 非圧縮性連続体の2次元等流状態における運動量保存則は、江頭ら¹⁾によれば次式で与えられる。

$$p_s \tan \phi_s + \rho \left(f_f + f_g \right) d^2 \left(\partial u / \partial z \right)^2 = \int_z^h \rho \left\{ (\sigma / \rho - 1) c + 1 \right\} g \sin \theta dz \quad (1)$$

$$p_s + \rho f_{pd} d^2 \left(\partial u / \partial z \right)^2 = \int_z^h \rho (\sigma / \rho - 1) c g \cos \theta dz \quad (2)$$

$f_f = k_f (1 - c)^{2/3} c^{1/3}$ ²⁾, $f_g = k_g (1 - e^2) (\sigma / \rho) c^{1/3}$, $f_{pd} = k_g (\sigma / \rho) e^2 c^{1/3}$ である。式(1), (2)において未知のパラメータは u, c, p_s であり、方程式系を閉じるためには p_s に関する表示式が必要である。そこで、移動床流れでは、河床 $z = 0$ で $c = c_*$ であり、かつ、 $\partial u / \partial z = 0$ すなわち $p_d = 0$ であることに注意し、 p_s を次のように仮定する。

$$\frac{p_d}{p_s} = \alpha_1 \frac{c_* - c}{c_*} (= f(c)) \quad (3) \quad \text{ここに、} c_*: \text{砂粒子の静止堆積層の濃度、} \alpha_1: \text{経験的に定められるべき係数である}$$

が、定数である事が期待される。

3. 流速及び濃度の分布則 無次元量 $u' = u / \sqrt{gh}$, $z' = z / h$ を用いれば、式(1),(2),(3)を適用し、速度場と濃度場は次式で与えられる。

$$\frac{\partial u'}{\partial z'} = \frac{h}{d} \left[\frac{f(c)}{\{1 + f(c)\} f_{pd}} (\sigma / \rho - 1) \cos \theta \int_z^1 c dz' \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z'} = \frac{\left\{ f(\theta, \sigma / \rho, c, e) \right\}^2 \frac{(\sigma / \rho - 1) c}{\tan \theta} - f(\theta, \sigma / \rho, c, e)}{\left[\frac{2}{3} \frac{k_f \rho}{k_g e^2 \sigma (1 - c)^{1/3}} \frac{f(c)}{1 + f(c)} + \frac{1}{\{1 + f(c)\}^2} \left(\tan \phi_s - \frac{f_f + f_g}{f_{pd}} \right) \frac{\partial f(c)}{\partial c} \right] (z' - 1)} \quad (5)$$

ここに、 $f(\theta, \sigma / \rho, c, e) = \frac{\tan \phi_s}{1 + f(c)} + \frac{f_f + f_g}{f_{pd}} \frac{f(c)}{1 + f(c)} - \tan \theta$ である。式(4), (5)を連立して解くことにより、流速分布と濃度分布が導かれる。また、水流層も考慮に入れなければならない場合は次のように考える。濃度分布については、ある高さでの濃度が5%を下回った場合、それより鉛直上方の濃度は0%になると仮定する。流速分布については、放物線型の流速分布を仮定し、次式で与える。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{g \sin \theta (h - z)}{\varepsilon} \quad (6) \quad \text{ここに、} \varepsilon = \frac{1}{6} \kappa u_* h_w, \kappa: \text{カルマン定数、} u_* = \sqrt{gh_w \sin \theta}, h_w: \text{水流層の水深である。}$$

4. 固定床への適用例 図-1(a), (b), (c)は、江頭らの実験¹⁾に式(4),(5)を適用した結果である。尚、計算では $\phi_s = 38.5^\circ$, $e = 0.85$, $\alpha_1 = 0.5$, $k_g = 0.0828$ ¹⁾, $k_f = 0.52$,

$c_* = 0.6$ としている。計算結果は、勾配 $\theta = 18^\circ, 19^\circ, 22^\circ$ のものであるが、これらによれば、流動深、流速分布及び濃度分布は、かなり良く一致している。流動深に関し式(4), (5)は少し大きめの値を与えているが、これは、式(1)左辺の第2項の流動応力の表現がまだ十分でないことに起因しているものと推察される。

5. 移動床への適用例 図-2(a), (b), (c)は、江頭らの実験¹⁾に式(4), (5)を適用した結果である。計算のパラメータは、図-1の計算と同じである。計算結果は、勾配 $\theta = 5.1^\circ, 9.1^\circ, 13.1^\circ$ のものである。流速分布は、実験値とかなり良く一致している。また、図-2(a)に示す、水流層と移動砂層の流速分布において、両層の接続点で速度勾配が不連続になっている。これは、接続点近傍で両層における乱れの代表スケールの相違に起因している。次に、図-3に

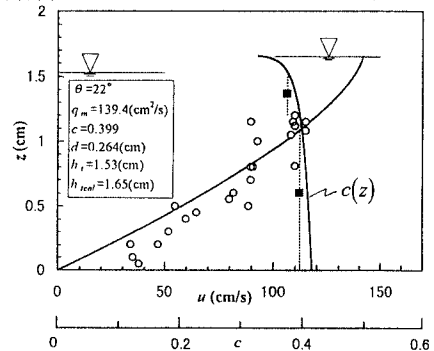


図-1(a) 固定床の流速・濃度分布

濃度と勾配の関係を示す。 c_t : 輸送濃度, c : 濃度であり, 実験値には江頭ら²⁾³⁾のものを用いている。これによると, 実験値は c_t と θ との関係を示すことを念頭におけば, 理論値は実験値を良く説明している。尚, 同図には, 次式で算定される濃度も示されている。

$$\theta_e = \arctan\left\{(\sigma/\rho-1)c \tan \phi_s / \left\{(\sigma/\rho-1)c + 1\right\}\right\} \quad (7)$$

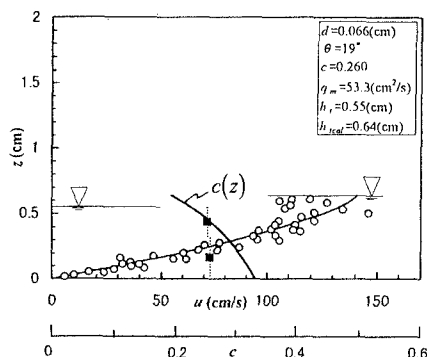


図-1(b) 固定床の流速・濃度分布

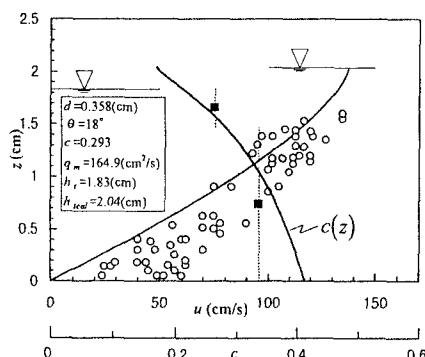


図-1(c) 固定床の流速・濃度分布

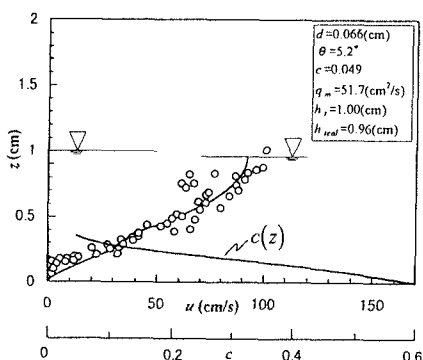


図-2(a) 移動床の流速・濃度分布

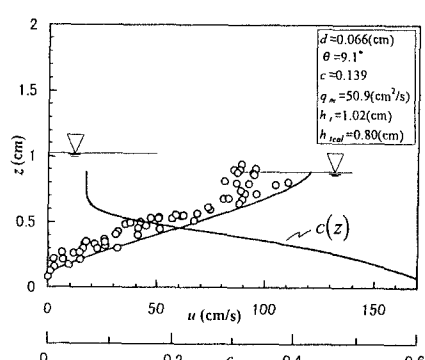


図-2(b) 移動床の流速・濃度分布

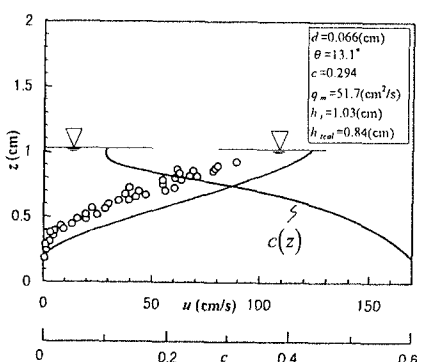
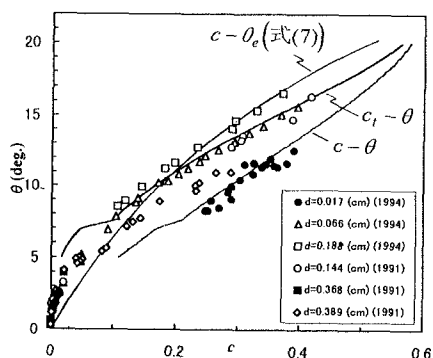


図-2(c) 移動床の流速・濃度分布


 図-3 $c_t - \theta$, $c - \theta$ の関係

6.おわりに 移動床の河床面 $z=0$ において速度勾配と濃度の満足すべき条件から, 静的圧力 p_s の表示式を提案し, それに基づき, 固定床及び移動床上における土石流の流速分布と濃度分布について検討した。全般に良好な結果が得られているが, p_s ばかりでなく流動応力の構造について, 今後さらなる検討が必要である。本研究は一部文部省科研費一般 C (代表江頭進治) の補助を受けている。ここに記して感謝いたします。

参考文献 1)江頭・芦田ら: 京大防災研年報, 第 32 号 B-2, 1989, pp.487-501, 2)江頭ら: 京大防災研年報, 第 37 号 B-2, 1994, pp.359-369, 3)江頭ら: 京大防災研年報, 第 34 号 B-2, 1991, pp.261-274