

流速と濃度の鉛直分布を考慮した土石流の 二層流解析に関する研究

A TWO LAYER FLOW ANALYSIS OF DEBRIS FLOW CONSIDERING VERTICAL DISTRIBUTION OF VELOCITY AND CONCENTRATION

高濱淳一郎¹・藤田裕一郎²・吉野弘祐³

Jun-ichiro TAKAHAMA, Yuichiro FUJITA and Kousuke YOSHINO

¹正会員 博士(工学) 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科(〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工博 岐阜大学教授 流域圏科学研究センター(〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

³学生員 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻(〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

Governing equations of debris flow include correction factors due to vertical distributions of velocity and sediment concentration which vary corresponding to bed slope. In this study, the correction factors in governing equations of a two layer model for debris flow proposed by the authors were examined under the equilibrium state of the flow over a wide range of bed slope. Numerical simulations were carried out on simple conditions to examine effects of the correction factors on erosion and deposition process of debris flows. The term of sediment flux in a mass conservation of the two layer model modified by the correction factor influences strongly on the erosion and deposition processes of debris flows.

Key Words : debris flow, two layer model, vertical profile of concentration, correction factor

1. はじめに

土石流から掃流状集合流動への遷移過程を解析するために、著者らは水流層と砂礫移動層とでは構成則が本質的に異なることに注目して、各層毎の支配方程式に基づいて解析する二層流モデルを提案している¹⁾。二層流モデルを土石流の侵食堆積実験と比較したところ、侵食堆積区間の全体的な傾向や最終堆積形状、土砂の到達距離に関する実験値を概ね説明できている²⁾。ここで、解析にあたっては、簡単のため砂礫移動層濃度を一様濃度で与えており、また流速や濃度が鉛直分布を持つことに起

因する分布補正係数をすべて1としている。このように、土石流の流動堆積過程を解析する際に砂礫の体積濃度を一様とすることは一般によく行われるが、移動床上の土石流の濃度は河床面から上方に向かって減少するような分布を有しているため、このことを解析に反映させる必要がある。本研究は流速と濃度の鉛直分布を持つことによる影響を二層流モデルに反映させて、その精度の向上を図ることを目的としている。まず、濃度を一様とした近似解と分布を考慮した厳密解や実験値と比較し、近似解の妥当性について検討する。ついで、濃度と流速の相関に関する補正係数等を算定し、それらを支配方程式に導入する方法について検討する。最後に、簡単な条件に対する数値シミュレーションを行って考察を加える。

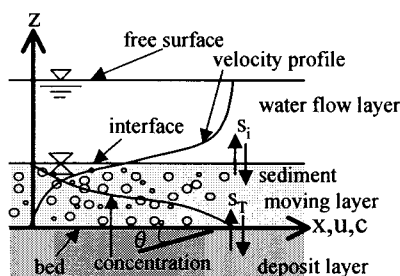


図-1 二層流モデルの模式図

2. 二層流モデルの支配方程式と補正係数

二層流モデルは図-1に示すように、流れを上層の水流層と下層の砂礫移動層とに分離し、両層のinterfaceに水流のフラックスを導入した次式に示す支配方程式^{1) 2)}を

用いている。

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial(v_w h_w)}{\partial x} = s_l \quad (1)$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial(v_s h_s)}{\partial x} = s_T - s_l \quad (2)$$

$$\frac{\partial(c_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma c_s v_s h_s)}{\partial x} = c_s s_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{s_T}{\cos \theta} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_w v_w h_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w \beta_w v_w^2 h_w)}{\partial x} - \rho_w s_l u_l \quad (5)$$

$$= \rho_w g h_w \sin \theta - \frac{\partial P_w}{\partial x} - p_l \frac{\partial h_s}{\partial x} - \tau_w$$

$$\frac{\partial(\rho_s \gamma v_s h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s \beta_s v_s^2 h_s)}{\partial x} + \rho_w s_l u_l \quad (6)$$

$$= \rho_s g h_s \sin \theta - \frac{\partial P_s}{\partial x} + p_l \frac{\partial h_s}{\partial x} + \tau_w - \tau_b$$

ここに、添え字の s , w はそれぞれ砂礫移動層と水流層の量を表す。 h は各層の流動層厚、 v は各層の平均流速、 c_s は砂礫移動層内の平均体積濃度であり、 c_s は堆積層濃度である。 s_T は侵食速度、 s_l は水流層が *interface* を通して単位時間あたり単位面積あたりに獲得する体積量である。 θ は河床勾配、 z_b は河床位、 ρ は各層の平均密度である。 u_l は *interface* における x 方向の流速であり、砂礫移動層の流速分布形を用いて平均流速との比から計算している。 g は重力加速度、 P は各層の側方に作用する圧力、 p_l は *interface* に作用する圧力、 τ_w は *interface* に作用するせん断応力、 τ_b は河床面せん断応力であり、次章で説明する。式(3),(5),(6)に現れる補正係数と形状係数はそれぞれ次式で定義される。

$$\gamma = \frac{\int_0^{h_s} c u dz}{c_s v_s h_s} \quad (7) \quad \gamma' = \frac{\int_0^{h_s} \rho_m u dz}{\rho_s v_s h_s} \quad (8)$$

$$\beta_s = \frac{\int_0^{h_s} \rho_m u^2 dz}{\rho_s v_s^2 h_s} \quad (9) \quad \beta_w = \frac{\int_0^{h_s} u^2 dz}{v_w^2 h_w} \quad (10)$$

ここに、 c, u, ρ_m はそれぞれ河床からの高さ z の位置における濃度、流速、密度で、 $\rho_m = (\sigma - \rho_w)c + \rho_w$ である。圧力 P_s の厳密な表現は次式で表される。

$$P_s = \rho_w (\sigma / \rho_w - 1) g h_s^2 \cos \theta \int_0^1 \left[\int_z^1 c dz' \right] dz' + \frac{1}{2} \rho_w g h_w (2h_w + h_s) \cos \theta \quad (11)$$

ここに、 $z' = z/h_s$ である。ここで、式(12)で定義される γ_p を導入すれば、 P_s は式(13)のように表される。

$$\gamma_p = \int_0^1 \left\{ \int_z^1 c dz' \right\} dz' / \int_0^1 \left\{ \int_z^1 c_s dz' \right\} dz' = 2 \int_0^1 \left\{ \int_z^1 c dz' \right\} dz' / c_s \quad (12)$$

$$P_s = \frac{1}{2} \gamma_p \rho_w (\sigma / \rho_w - 1) g c_s h_s^2 \cos \theta + \frac{1}{2} \rho_w g h_w (2h_w + h_s) \cos \theta \quad (13)$$

侵食速度 s_T は江頭らの侵食速度式⁴⁾を二層流に拡張して次式のように評価する。

$$s_T = v_l \tan(\theta - \theta_e) \quad (14)$$

ここに v_l は二層流全体の平均流速、 θ_e は全層平均濃度 c_l に対応する平衡勾配であり、全流動層厚を h_l とおけばそれぞれ以下のように与えられる。

$$v_l = v_s \frac{h_s}{h_l} + v_w \frac{h_w}{h_l} \quad (15)$$

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma / \rho_w - 1) c_l}{(\sigma / \rho_w - 1) c_l + 1} \tan \phi \quad (16)$$

$$c_l = c_s \frac{h_s}{h_l} \quad (17)$$

また、*interface* を通した水流のフラックス s_l は、砂礫移動層濃度 c_s を与えることで間接的に評価している。

3. 厳密解と近似解の特性比較

二層流モデルでは江頭らの構成則に砂礫移動層体積平均濃度を一樣とする近似解を適用している。そこで、平衡状態における濃度と流速の厳密解から、全層に占める砂礫移動層厚の比、砂礫移動層平均体積濃度、輸送濃度、流速係数、および各補正係数を計算し、近似解との比較を行って考察を加える。

砂礫移動層における江頭らの構成則⁵⁾を次式に示す。

$$\tau = \tau_y + \tau_f + \tau_d \quad (18)$$

$$p = p_w + p_s + p_d \quad (19)$$

$$\tau_y = p_s \tan \phi_s \quad (20)$$

$$\tau_f = \rho_w k_f \left\{ (1 - c)^{5/3} / c^{2/3} \right\} d^2 (\partial u / \partial z)^2 \quad (21)$$

$$\tau_d = k_d \sigma (1 - e^2) c^{1/3} d^2 (\partial u / \partial z)^2 \quad (22)$$

$$\partial p_w / \partial z = -\rho_w g \cos \theta \quad (23)$$

$$p_d = k_d \sigma e^2 c^{1/3} d^2 (\partial u / \partial z)^2 \quad (24)$$

$$p_s / (p_s + p_d) = (c / c_*)^{1/5} \quad (25)$$

ここに、 τ はせん断応力、 p は圧力で、 τ_y , τ_f , τ_d はそれぞれ降伏応力、間隙水の乱れによるせん断応力、粒子の非弾性衝突によるせん断応力であり、 p_w , p_s , p_d はそれぞれ間隙水圧、粒子骨格応力、粒子衝突による圧力である。 ϕ_s は粒子の内部摩擦角、 k_f , k_d は実験定数でそれぞれ、0.16~0.25, 0.0828、 d は粒径、 e は粒子の反発係数(0.85)である。江頭らの構成則を河床に適用すれば、平衡状態において次式が得られる。

$$c_l = \frac{\tan \theta}{(\sigma / \rho - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)} \quad (26)$$

江頭ら⁵⁾は水流層に対数則を適用し、その原点を *interface* の位置から、この濃度に相当する粒子間隙ス

	濃度分布		流速分布
	二層流状態	全層砂礫層状態	
厳密解	厳密解	厳密解	厳密解
近似解(a)	$c_s = \frac{c_*}{2}$	$c_s = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho_w - 1)(\tan \phi_s - \tan \theta)}$	一様濃度とし計算された流速分布
近似解(b)	三角形分布	台形分布	一様濃度とし計算された流速分布
近似解(c)	三角形分布	台形分布	三角・台形分布から計算された流速分布

表-1 近似解(a)~(c)の概要

ケール η_0 だけ下方にとり、 $h_s \leq z \leq h_s + h_w$ の範囲における流速分布を次式のように示している。

$$\frac{u_w}{u_{*w}} = \frac{u_l}{u_{*w}} + \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z - h_s + \eta_0}{\eta_0} \right) \quad (27)$$

ここに、 $u_{*w} = \sqrt{\tau_w / \rho_w}$ 、 κ はカルマン定数であり、 η_0 は次式で与えられる⁵⁾。

$$\eta_0 = \sqrt{k_f} \{ (1 - c_l) / c_l \}^{1/3} d \quad (28)$$

式(27)より、せん断応力 τ_w は次式で与えられる。

$$\tau_w = \rho_w f_w |v_w - u_l| (v_w - u_l) \quad (29)$$

$$\text{ここに、} f_w = \left[\frac{1}{\kappa} \left\{ \left(1 + \frac{\eta_0}{h_w} \right) \ln \left(1 + \frac{h_w}{\eta_0} \right) - 1 \right\} \right]^{-2} \quad (30)$$

本研究では、以前の近似解に導入していた近似と仮定¹⁾²⁾を以下のように若干修正する。

- ①砂礫移動層濃度は一様濃度 ($c_s = c_*/2$) とする¹⁾²⁾。
 - ②河床面では粒子衝突に伴う圧力を $p_d = 0$ とする¹⁾²⁾。
- これにより、平衡状態における河床面の応力は近似解と厳密解とで一致し、 c_l は近似解においても式(26)で与えられる。砂礫移動層内では p_d と p_s との比を一定¹⁾²⁾とせず式(25)で与え、砂礫移動層の流速分布を計算する。
- ③①によって計算される砂礫移動層厚が全流動層厚より大きくなるときは、流れの全層が砂礫移動層として取り扱う。このとき、 $c_s \geq c_*/2$ となる。

- ④ η_0 を与える濃度 c_l に砂礫移動層の平均濃度 c_s を用いていた¹⁾²⁾が、今回は $c_l = 0.05$ を用いた。

また、 $\kappa = 0.4$ とした流速係数の計算値は実験値に比べて過少となる。江頭ら⁵⁾は $\kappa = 0.2$ として厳密解を与えている。この点については議論が必要であるが、ここでは砂礫層の濃度分布による影響に着目しているため、以下の計算においても $\kappa = 0.2$ を採用した。同様に、 $\phi_s = 34^\circ$ ⁵⁾とし、堆積層濃度は $c_* = 0.6$ とした。以下に示す各係数のうち、相対水深 h_l/d に依存するのは輸送濃度 c_f 、流速係数 v/u_* 、および運動量補正係数 β_w のみである。また、上に示した近似解(a)他に、表-1に示す近似解(b)(c)を用いた。近似解(b)(c)は上方に向かって減少する土石流の濃度分布を模擬するために導入しており、どの程度の近似で厳密解を説明できるかについて調べることを目的としている。

(1) 平衡状態における砂礫移動層厚比

全流動層厚に対する砂礫移動層厚の比 h_s/h_l の近似解は次式で与えられる。

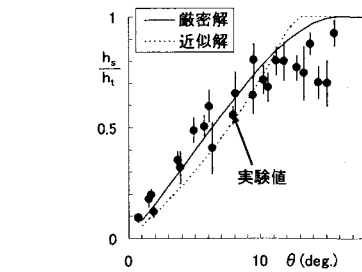


図-2 h_s/h_l における厳密解と近似解との比較

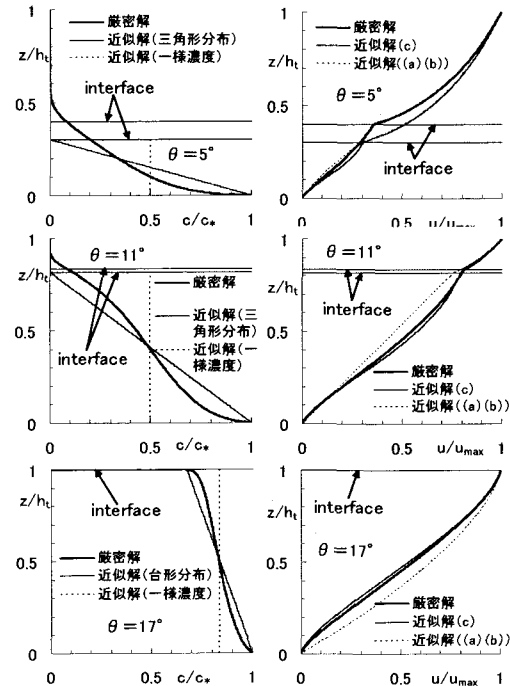


図-3 濃度分布に関する厳密解と近似解

図-4 流速分布に関する厳密解と近似解

$$\frac{h_s}{h_l} = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho_w - 1) c_s (\tan \phi_s - \tan \theta)} \quad (31)$$

式(31)において $h_s/h_l > 1$ となる場合は、砂礫移動層平均濃度 c_s に式(26)による c_l を与え、 $h_s/h_l = 1$ とする。図-2は厳密解および近似解による h_s/h_l と河床勾配との関係を江頭ら⁶⁾の実験値とともに示している。実験データには実験の性質上、かなりのばらつきが見られるが、 h_s/h_l の実験値は勾配の増加に伴って増加しており、計算値と同じ傾向を示している。しかしながら、その変化の傾向は実験値と厳密解は上に凸、一方、近似解ではほぼ直線であって、この相違は濃度を一様として計算しているためと思われる。このような違いはあるが、近似解によっても実験値を概ね説明できている。

(2) 濃度分布、および流速分布形

図-3には、河床勾配を 5° 、 11° および 17° とした場合の濃度分布に関する厳密解と近似解とが示されている。図中の近似解(一様濃度)は二層状態では $c_*/2$ である。細実線で示す近似解(三角形分布あるいは台形分布)では二層状態では図-3に示すような三角形分布とし、全層が

砂礫移動層の場合は台形分布とする。濃度分布の厳密解は緩勾配のときはおおむね下に凸の形状を示し、急勾配になるにつれて河床近傍で下に凸、流れの上層では上に凸の分布形へと変化している。図-4には図-3に対応する流速分布を表面流速で無次元化したものを示している。ここで、近似解における流速分布は次式で表される。

i) $G_{yk} \neq 0$

$$\frac{u}{\sqrt{gh_s}} = \frac{2}{3} \frac{h_s}{d} \frac{1}{f(c_s)^{1/2} G_{yk}} \left[(W + G_{yk})^{3/2} - \left\{ W + G_{yk} \left(1 - \frac{z}{h_s} \right) \right\}^{3/2} \right] \quad (32)$$

ii) $G_{yk} = 0$

$$\frac{u}{\sqrt{gh_s}} = \frac{h_s}{d} \left\{ \frac{W}{f(c_s)} \right\}^{1/2} \frac{z}{h_s} \quad (33)$$

$$\text{ここに, } W = \frac{\tau_w}{\rho_w g h_s} \quad (34)$$

$$G_{yk} = \{ (\sigma/\rho_w - 1) c_s + 1 \} \sin \theta \quad (35)$$

$$- (\sigma/\rho_w - 1) c_s \cos \theta (c/c_s)^{1/5} \tan \phi_s$$

$$f(c_s) = k_f \{ (1 - c_s)^{5/3} / c_s^{2/3} \} + k_g (\sigma/\rho_w) (1 - e^2) c_s^{1/3} \quad (36)$$

流速分布の厳密解は、河床近傍で上に凸でinterfaceに向かって、下に凸へと変化している。一方、近似解(a), (b)では勾配が増加するにつれて、順に上に凸、 $G_{yk} = 0$ となる 11° で直線、下に凸の分布形へと変化し、とくに流れの全層が砂礫移動層となる場合には、流速分布は $3/2$ 乗則に従う。近似解(c)に関しては厳密解と同様な逆s字分布が得られたが、その凹凸の程度は厳密解よりも大きい。interfaceの流速で無次元化したところ、厳密解では濃度の分布形の違いに比べて、砂礫移動層の流速分布形状の違いが顕著に見られなかった。

(3) 砂礫移動層平均濃度、および輸送濃度

図-5には、式(26)による全層平均体積濃度 c_t 、および砂礫移動層平均体積濃度 c_s に関する厳密解と近似解が示されている。砂礫移動層平均濃度の近似解は $h_s/h_t < 1$ の条件では $c_s = c_t/2$ となるが、 $h_s/h_t = 1$ となる領域では厳密解と一致する。図-6には $h_t/d = 10$ とした場合の砂礫の流量を全流量で除した輸送濃度に関する厳密解と近似解を江頭らの実験値⁵⁾とともに示してある。なお、図中には支配方程式を二層に分けず、河床から自由表面まで積分して得られる支配方程式を用いた場合の輸送濃度の近似解に相当する c_t も示してあり、とくに緩勾配領域において実験値を過大に評価している。一方、輸送濃度の実験値は厳密解によって非常によく表現されている。近似解(a)は $\theta = 9^\circ$ あたりから勾配の増加とともに実験値よりも若干大きくなっていくが、 $\theta = 12^\circ$ あたりを境にして再び厳密解と実験値に漸近し、 $\theta = 18^\circ$ では c_t とほぼ同じ値となっている。近似解(b)および(c)に関しても緩勾配領域では厳密解より若干小さいものの、近似解によって実験値を概ね説明できている。

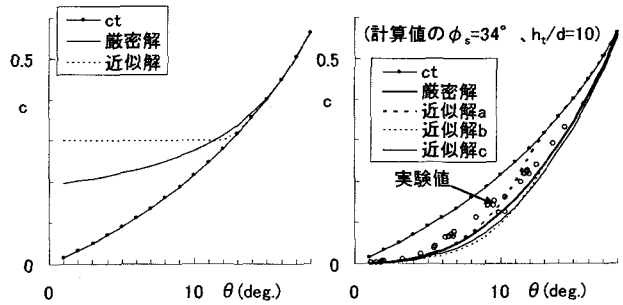


図-5 全層平均濃度と砂礫移動層平均濃度に関する厳密解と近似解

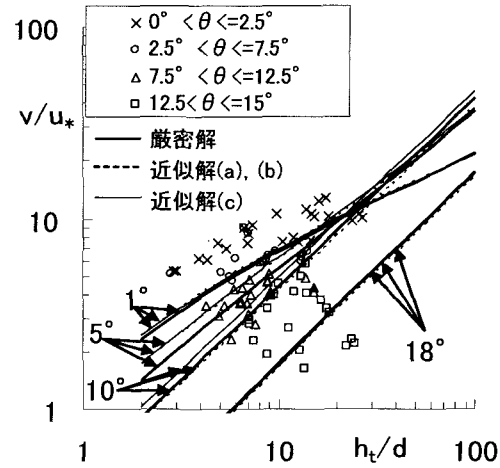


図-7 v/u_* に関する厳密解と近似解

(4) 流速係数

図-7には流速係数 v/u_* に関する近似解(a)(c)と厳密解を江頭らによる実験値⁵⁾とともに示しめしてある。 1° から 10° では、近似解、厳密解とも流速係数の増加率は勾配の緩いものほど小さい傾向にあつて、 h_t/d が20程度以上になると勾配に対する流速係数の大小関係が逆転しているが、実験値の範囲では計算値は勾配の減少とともに流速係数が増加しており、実験値と同じ傾向を示している。緩勾配では、近似解(a)(b)の流速係数が厳密解より大きい、急勾配では両者はほぼ一致する。近似解(c)は厳密解を非常によく表現できている。

(5) interfaceにおける流速と砂礫移動層平均流速との比

図-8には、 u_i/v_s に関する式(32)(33)による近似解と厳密解が示されている。流速分布が直線であれば、 $u_i/v_s = 2$ となるが、厳密解はそれを若干下回る程度であり、勾配の増加とともに u_i/v_s は緩やかに減少し、 $\theta = 15^\circ$ あたりでわずかに上に凸の分布形となっている。一方、近似解(a)(b)も勾配の増加とともに減少するものの、その減少率は厳密解より大きく、 $G_{yk} = 0$ となる $\theta = 11^\circ$ で $u_i/v_s = 2$ となり、全層が砂礫移動層となる $\theta = 13^\circ$ 以降では流速分布が $3/2$ 乗則に従うため一定値($u_i/v_s = 5/3$)となっている。一方、近似解(c)は $\theta = 9^\circ$ 付近では厳密解とほぼ一致しその後減少し、

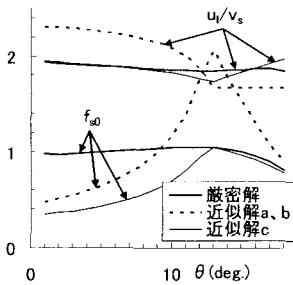


図-8 u_i/v_s , f_{s0} に関する厳密解と近似解

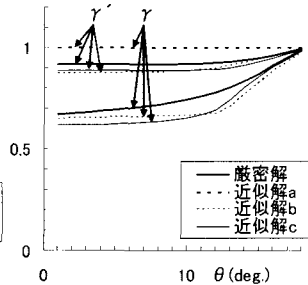


図-9 γ , γ' に関する厳密解と近似解

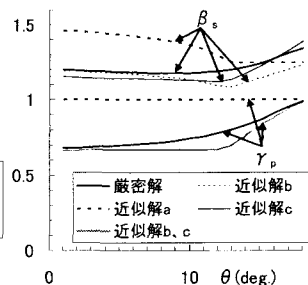


図-10 β_s , γ_p に関する厳密解と近似解

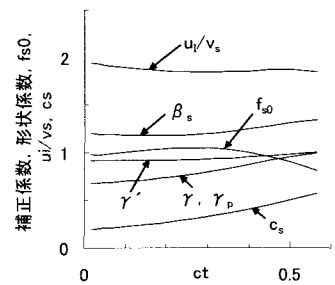


図-11 解析に用いた係数と全層平均濃度の関係

全層が砂礫移動層となる $\theta = 13^\circ$ を境に増加する。

とくに考慮する必要はないものと考えられる。

(6) 河床面せん断応力に用いる抵抗係数

二層流モデルでは、河床面せん断応力 τ_b を降伏応力と流動抵抗と和として評価しており、近似解では次式で与えられる。

$$\tau_b = (\sigma - \rho_w) f_s g h_s \left(\frac{c_s}{c_s} \right)^{1/5} \cos \theta \tan \phi_s + \rho_w f_{s0} \left(\frac{h_s}{d} \right)^{-2} |v_s| v_s \quad (37)$$

・) $G_{yk} \neq 0$

$$f_{s0} = \frac{W + G_{yk}}{\frac{4}{9} \frac{1}{f(c_s) G_{yk}^2} \left[(W + G_{yk})^2 + \frac{2}{5} \frac{1}{G_{yk}} \left\{ \frac{1}{2} - (W + G_{yk})^2 \right\} \right]} \quad (38)$$

・) $G_{yk} = 0$

$$f_s = 4f(c_s) \quad (39)$$

一方、厳密解では、 f_{s0} は次式で与えられる。

$$f_{s0} = \frac{1}{v_{se0}^2} \left\{ \left(\frac{h_w + \rho_s}{h_s + \rho_w} \right) \sin \theta - \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \cos \theta \left(\frac{c_s}{c_s} \right)^{1/5} \tan \phi_s \right\} \quad (40)$$

ここに、 $v_{se0} = (v_{se}/\sqrt{gh_s})(h_s/d)^{-1}$ で、 v_{se0} は厳密解による平衡状態での砂礫移動層平均流速 v_{se} を無次元化したものであり、 v_{se0} は h_t/d には依存しない。図-8によると厳密解の f_{s0} は河床勾配が 10° ぐらいまでは、勾配の増加とともにわずかに増加し、その後減少傾向に転じる。近似解(a)(b)(c)も上に凸の分布形となっているものの、その増減の程度は厳密解に比べてかなり大きい。

(7) 形状係数、運動量補正係数

図-9に形状係数 γ , γ' に関する厳密解と近似解との比較を示す。近似解(a)では、砂礫移動層濃度を一様としているため両者とも1となる。一方、厳密解では勾配とともに増加し、勾配が 18° となるところでほぼ1となる。

図-10には運動量補正係数 β_s , γ_p に関する厳密解と近似解を比較したものである。 β_s の厳密解、近似解(b)および(c)は1.2~1.3程度の値となっているが、近似解(a)に比べると勾配による変化は小さい。 γ_p の近似解(a)では、砂礫移動層濃度を一様としているため1となる。厳密解は γ , γ' と同様に勾配とともに増加し、勾配が 18° になるとほぼ1となる。 γ_p と γ の厳密解はほぼ同一の値になる。 β_w の値は厳密解、近似解ともにほぼ1に近く、

4. 流速と濃度の鉛直分布に基づく数値実験

前章で計算した各係数や変数を数値シミュレーションに導入する際に、これらを勾配の関数として与えることには問題がある。例えば、土石流が緩勾配区間に流入した直後では全層が砂礫移動層である状態もありうるからである。移動床上の平衡状態の土石流では河床面において外力と降伏応力ががつりあっていて、その条件は全層体積濃度 c_t に関する式(26)で表される。そこで、全層平均体積濃度に対する砂礫の濃度分布と流速分布が相似であるとして、各係数や変数を c_t の関数として与えて土石流の解析を行うことにする。このような取り扱いにより、せん断応力の補正を行わずとも u_i , f_{s0} を計算することができる。考慮した変数、および係数は、 c_s , β_s , γ , γ' , γ_p , u_i/v_s , および f_{s0} である。図-11に全層濃度と厳密解における各係数および変数との関係を示す。図-11は構成則と物性値によって一意的に決まる普遍的な関係である。なお、以前、近似解を用いた非定常解析において、降伏応力が外力を上回る場合は *interface* に作用するせん断応力を外力側に増加させて計算を行っていた¹⁾が、本研究では全層平均濃度 c_t に対応する平衡勾配 (式(16)) を用いて抵抗係数を計算する。これは、宮本⁷⁾らによる平衡状態における河床面での外力と降伏応力との釣り合い式を用いた抵抗係数の評価法と等価である。数値実験には勾配変化点を有する飽和移動床直線水路を用いた。上流側初期河床勾配を 15° 、下流側勾配を 4° とし、上下流とも水平長を2.5mとした。上流から土石流を定常供給し、その体積濃度は上流勾配に対する平衡濃度を与えた。図-12は勾配変化点上流側での全流動層と濃度の縦断変化に関する計算結果を示している。図中の横軸は初期河床にそって設定しており、勾配変化点を原点として下流側を正としている。厳密解による補正係数を考慮すると、上流端での体積濃度が平衡濃度であっても侵食が生じていることがわかる。これは、砂礫体積フラックスに関する形状係数 γ を導入したことにより輸送濃度が体積濃度より低くなるため、全層が砂礫移動層であっても、図-13の右図に示したように

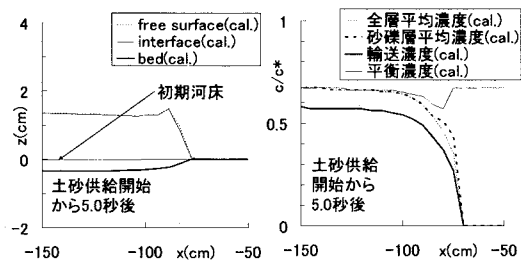


図-12 厳密解による補正係数を考慮した数値実験結果

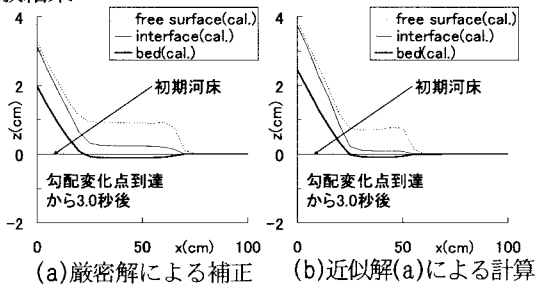


図-13 厳密解による補正係数を考慮した数値実験結果と近似解(a)による計算結果との比較

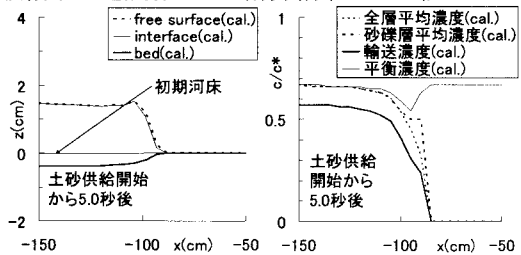


図-14 近似解(b)による補正係数を考慮した数値実験結果

フロント部での体積濃度が上流端の濃度より低くなることによるものである。また、濃度分布を考慮しない近似解(a)による計算結果と比較して流下速度が大きくなる結果が得られた。図-13は厳密解による補正係数を考慮した計算結果と近似解(a)による計算結果を比較したものである。両図とも勾配変化点到達時より3秒後の縦断分布を示しており、横軸は下流水路初期河床にそって設定している。図-13から砂礫移動層濃度に厳密解に基づく補正を導入したことが砂礫移動層厚の評価に反映され、近似解に比べて砂礫移動層が厚くなっている。ここで、鉛直分布を考慮する変数として c_s と γ のみを用いて計算すると、すべて考慮した場合に比べて流下速度が若干低くなるが、侵食堆積の傾向は同じであった。このことより、土石流の侵食堆積過程は砂礫体積フラックスに関係する c_s と γ の影響を受けていることがわかる。図-7によると $\theta = 5^\circ$ あたりでは近似解(a)の流速係数が厳密解より大きい、図-13では近似解の流下速度が厳密解より小さくなっている。この点については非定常状態における支配方程式の各項を調べる必要がある。図-14は近似解(b)による補正係数を考慮した数値実験結果であり、流下速度、侵食体積現象とも厳密解の数値計算結果と非常に近い結果が得られている。近似解(b)では補正係数

を解析的に導入できるため厳密解に近い計算結果を簡便に得られる。

5. おわりに

二層流モデルに流速と濃度が鉛直分布をもつことによる影響を反映させる方法について検討した。まず、砂礫移動層濃度を一様とした近似解(a)を厳密解や実験値と比較したところ、近似解(a)による砂礫移動層厚比 h_s/h_t 、輸送濃度や流速係数については実験値を概ね説明できていることが確認された。また、濃度分布を三角形あるいは台形で近似した近似解(b)(c)によって厳密解の輸送濃度、流速係数までもが非常に良く表現されている。ついで、二層流モデルに流速と濃度の鉛直分布を考慮する方法として、平衡状態における濃度分布の厳密解に基づいて、砂礫移動層濃度や各補正係数を全層平均濃度によって与える方法を示した。最後に簡単な条件で土石流の堆積に関する数値実験を行って、近似解による計算結果と比較した。比較の結果、土石流の侵食堆積過程は、土石流の砂礫体積フラックスに関する形状係数 γ や砂礫移動層平均濃度 c_s の影響を強く受けていることが示された。今後、移動床上における侵食堆積現象に関する実験を行って補正係数を導入した計算結果の妥当性を検討し、広い条件に対して、濃度分布による影響を把握して、現地への適用を図りたい。

参考文献

- 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘：土石流から掃流状集合流動へ遷移する流れの解析法に関する研究，水工学論文集，第44巻，pp.683-686，2000。
- 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘・蜂谷圭：土石流の堆積侵食過程に関する実験と二層流モデルによる解析，水工学論文集，第46巻，pp.677-682，2002。
- 江頭進治・本田尚正・高濱淳一郎・伊藤隆郭・有村真一：土石流の再現および構造物等による土砂流出について，1999年6月西日本の梅雨前線豪雨による災害に関する調査研究，平成11年度科学研究補助金（特別研究促進費）（1），研究代表者 福岡捷二，研究成果報告書，pp.83-102，2000。
- 江頭進治・芦田和男・佐々木浩：土石流の流動機構，第32回水理講演会論文集，pp.485-490，1988。
- 江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解釈：水工学論文集，第41巻，pp.789-794，1997。
- 江頭進治・芦田和男・高濱淳一郎・田野中新：エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル，京都大学防災研究所年報，第33号B-2，pp.293-306，1990。
- 宮本邦明・伊藤隆郭：支配方程式に侵食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション手法，砂防学会誌，Vol.55，No.2，pp.24-35，2002。

(2003.9.30受付)