

1.はじめに：水に多量の土砂を含む流れの流動機構についていくらかの事が明らかにされている。粒子が比較的大きく濃度が高い場合にはダイラタント流体モデルが、また粒子が小さく高濃度の場合にはビンガム流体モデルがそれぞれ適用できることが明らかにされている。またいずれの場合も濃度が非常に低くなればニュートン流体とみなすことができよう。しかしどの程度の粒径からダイラタントからビンガムへ、またどのような濃度からニュートン流体として扱うことができるかなどはまだ十分明らかでない。が、高濃度であるならば、 $d=0.17\text{mm}$ 程度までほぼダイラタント流体的であることを明らかにした¹⁾。またこの粒径における濃度変化による流動機構の変化の特徴も示したが、従来のモデルでは一貫して説明することができない。ここでは新たにモデルを示すとともに実験結果との比較を考察する。

2.流動理論：水の中に粒子を多く含む場合、粒子どうしの衝突による運動量の伝達と、粒子及び流体の一同が移動することによ、て生じる運動量の交換とが考えられ、せん断力は、

$$\tau = a_i \sin \alpha \cdot (\lambda d)^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 + (1-c) \rho_f l_f^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 + c \rho_p l_p^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \quad \dots (1)$$

と表わせる。ここに、 ρ_f, ρ_p ：水及び粒子の密度、 d ：粒径、 α ：粒子どうしの衝突角、 c ：粒子の容積濃度、 l_f, l_p ：流体及び粒子の混合距離、 $\lambda = \frac{1}{\lambda_0} \frac{c}{1-c}$ ：線濃度、 a_i ：定数。式(1)の右辺第一項は Reynolds による粒子どうしの衝突による応力の効果であり、第二、第三項は流体及び粒子の一同が移動することによ、て生じる応力の項である。いま比較的粒子が小さく $l_p = l_f$ となるような流体を考えると式(1)は、 $\tau = a_i \sin \alpha \cdot (\lambda d)^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 + \rho_m l^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$ 、 $\rho_m = (1-c)\rho_f + c\rho_p$ と表わすことができる。開水路において水深方向に土砂濃度が一定であるとするならば、せん断力は

$$\tau = g \rho_m \sin \theta (h-y) \quad \dots (3) \quad \text{とすることをできる。ここに、} g: \text{重力加速度、} \theta: \text{水路向}$$

配、 h ：水深である。式(2)と式(3)がなり合、といるとし、混合距離を $l = ky$ $\dots (4)$ と仮定し、

$1 \gg \frac{y}{h}$ なる近似を行ない、これを解くと、

$$u = \frac{u_0}{k} \ln \left| 2ky + 2\sqrt{k\{ky^2 + a_i \sin \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right) (\lambda d)^2\}} \right| + A. \quad \dots (5)$$

となる。ここに、 A_0 ：積分定数、 $u_0 = \sqrt{2h \sin \theta}$ 。そして境界条件として、 $y = y_0$ で $u = 0$ とすると、

$$\frac{u}{u_0} = \frac{1}{k} \ln \left| \frac{2ky + 2\sqrt{k\{ky^2 + a_i \sin \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right) (\lambda d)^2\}}}{2ky_0 + 2\sqrt{k\{ky_0^2 + a_i \sin \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right) (\lambda d)^2\}}} \right| \quad \dots (6)$$

となる。ところで式(6)は $c \rightarrow 0$ 、すなわち $\lambda \rightarrow 0$ において清水における理論と適合しなければならぬ。したが、て壁面が滑らかな場合について考えると、清水において y_0 は壁面のせん断力 τ_0 、流体の密度および動粘性係数 ν の関数であることが明らかにされており、 $y_0 = \frac{a \nu}{u_*}$ 、 $a = 9.025$ $\dots (7)$ とすることができる。よ、て河床が滑らかな場合の流速分布式は次式のように表わせる。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{\frac{y}{h} + \sqrt{\left(\frac{y}{h}\right)^2 + \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\rho_m}\right) \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right) \left(\frac{d}{h}\right)^2}}{\frac{a}{R_*} + \sqrt{\left(\frac{a}{R_*}\right)^2 + \lambda^2 \left(\frac{a_i \sin \alpha}{\rho_m}\right) \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right) \left(\frac{d}{h}\right)^2}}, \quad R_* = \frac{u_* h}{\nu} \quad \dots (8)$$

ここで、 K はカルマン定数であるが、乱流構造が粒子を浮遊させる仕事の外に乱れエネルギーの効果も考慮したものである。土砂濃度を一定とすると次のように表わせる。

$$\frac{K_0}{K} = \frac{(1 + \alpha'c)}{2} \left[1 + \{ 1 + 4BK_0(1 + \alpha'c)S_1 \}^{1/2} \right], \quad S_1 = \frac{g(\gamma - 1)\omega_0}{u_*^3} \frac{(h - \delta)}{h/\delta} \dots (9)$$

ここに、 $\alpha' = 2$, $B = 13$ で定数。 K_0 : 清水のカルマン定数、 δ : 粘性層厚、 ω_0 : 粒子の水中沈降速度、 $\gamma = \rho_s/\rho$ 。河床が水理的に粗い場合や遷移的な場合の議論はここでは割愛する。

3. 実験及び考察

a) 実験: 土砂流の実験は粒径 $d = 0.17\text{mm}$ 、密度 $\rho_s = 2.62\text{g/cm}^3$ の土砂を用いた。実験水路は長さ 12m 、幅 $12.5 \sim 15\text{cm}$ 、水路床は上流側は粗度つき、下

流側 6m はペンキ仕上げ、両側面アクリルの水路である。上流側 6m に実験砂を混濁状態に敷き上流端より清水を給水し土砂流を発生させた。濃度は水路中央部より給水することによりコントロールした。流速分布の測定は下流端 $2 \sim 3\text{m}$ 上流にて行な

b) 考察: 土砂粒径が比較的大きく、高濃度の流れについては粒子どうしの衝突が支配的であるとするダイヤラント流体モデルがよく適応することが明らかにされており、例えば

次式のように表わせる⁴⁾

$$u = \frac{2}{3d} \left\{ \frac{g \sin \theta}{\alpha' \sin \alpha} \left[c + (1-c) \frac{\rho}{\rho_s} \right] \right\}^{1/2} \left[\left(\frac{u}{u_*} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left[h^{3/2} - (h - \delta)^{3/2} \right] \dots (10)$$

図-1は水路勾配 22° 、土砂濃度の 0.33 の実験値及び理論値である。図中のダイヤラントとして示した実線は式(10)による。これは $Byrd$ が示した $\alpha_1 = 0.042$ の係数で実験値と比較的よく一致しており、粒子どうしの衝突による効果が大きいことがうかがえる。また、LOG.として示した実線は滑面乱流の対数則の式であり、 $K = 0.4$, $K = 0.192$ は清水及び浮遊砂とした場合のカルマン定数によるものである。Eq.(8)で示した実線は式(8)による。図-2は水路勾配 11° 、土砂濃度の 0.12 の実験値及び理論値である。ダイヤラントモデルによる理論値と実験値とが大きくずれており、この程度の濃度では粒子どうしの衝突による効果が小さくなることを示していると思われる。また対数則による場合、流速分布型は類似しているが絶対値が必ずしもよい一致ではない。一方式(8)は実験値とよく一致を示している。今後さらに本モデルの適応性を検討して行きたい。

謝辞: 本実験を遂行中に東京理科大学防災研究所、芦田和男教授、高橋俊教授の御助言をいただいた。これはこの論文に参考文献として引用した。参考文献 1) 新井, 芦田, 高橋, 水防自然災害科学誌 11(1) 1971, 2) 日野, 水防論集 No.92, 1974, 3) 新井, 芦田, 高橋, 水防自然災害科学誌 11(1) 1971, 4) 新井, 芦田, 高橋, 水防自然災害科学誌 11(1) 1971

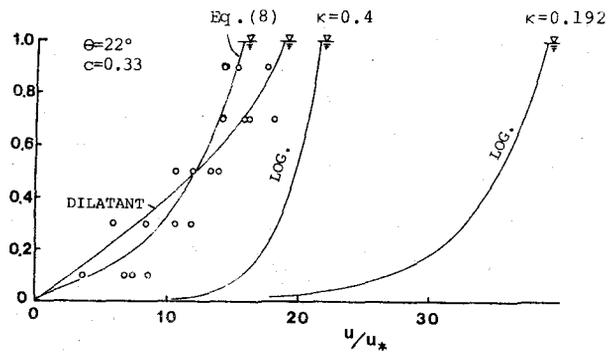


図-1

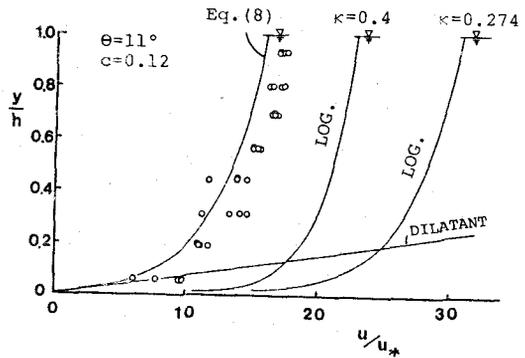


図-2