第Ⅱ部門　　　　**流砂を伴う流れの抵抗則**

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
鳥取大学・地域共同研究センター　正会員　　宮本邦明

1. はじめに

勾配が 15° 以上の移動床開水路上で砂粒子と水の混合物を供給して土石流を形成している状態を想定する。このとき、粒子濃度は鉛直方向には一様ではないが、粒子は水面まで分散した状態で流れる。この状態から勾配を下げて 10° 程度にすると、表面付近には粒子は存在しない水だけの流れの層が形成され、その下方では水と粒子の混合物の流れが形成されるはずである。このような流れは、掃流状集合流動、あるいは、土砂流と呼ばれている。更に、勾配を下げて 2～3° 程度にすると、粒子を含まない水だけの流れの厚さは更に増加し、粒子の流れの厚さは減少する。このような流れは、一般の掃流砂を伴う流れである。このような三種類の流れにおいて、粒子流動層の運動についてみれば、力学的な機構には本質的な違いはないことが予想できる。本研究では、このような観点から流砂を伴う流れの抵抗則について検討する。

2. 既往の研究

高橋は[1),2)]、土石流について河床での流れ方向と垂直方向に関する力の釣り合いから、断面平均濃度c_∞、流速分布、流速係数を導いた。また、集合流動については、粒子層の濃度が土石流発生限界勾配に対する濃度であるとし、それが勾配に依らず一定であると仮定して、流速係数を求めた。椿・橋本ら[3)]は、土石流について粒子間の衝突面あるいは接触面に作用する力を詳細に調べることによって応力モデルを構成し、流速係数を導いた。また、集合流動について、橋本・平野ら[4)]は、粒子層に対しては土石流に対する式を準用し、粒子層の平均濃度を無次元掃流力、勾配、粒子層厚と全水深との比の関数として表現し、粒子層厚と全水深との比は実験式で与えた。これにより流速係数を求めた。また、掃流砂については、Du boys[5)]の掃流砂量式の研究を端緒として数多くの研究がされてきた。砂粒子の移動モデルは様々であるにしても、流れは清水流の粗面上の対数則を基準としていることが多いため、抵抗の評価は、相当粗度k_s、もしくは普遍定数A_rの変化に帰着している。これらの研究によれば、流砂を伴う流れの抵抗は清水のものより増加しているようである。

3. 支配方程式と流れの抵抗則

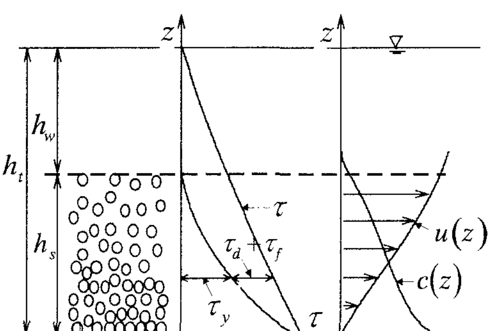
非圧縮性連続体の 2 次元等流状態における運動量保存則は、**図－1** を参照し、土石流に関する構成則を用いれば、次式で与えられる[6)]。

x 方向：
$$p_s \tan\phi_s + \rho f_d d^2\left(\partial u/\partial z\right)^2 + \rho f_f d^2\left(\partial u/\partial z\right)^2 = \int_z^{h_t} \rho\left\{\left(\sigma/\rho-1\right)c+1\right\} g\sin\theta\, dz \qquad (1)$$

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

$f_d = k_d\left(1-e^2\right)\left(\sigma/\rho\right)c^{1/3}$,　$f_f = k_f\left(1-c\right)^{5/3}c^{-2/3}$,

$f_{pd} = k_d\left(\sigma/\rho\right)e^2c^{1/3}$である。ここに、$\phi_s$: 砂粒子の内部摩擦角、$\theta$: 水平とのなす角、$\rho$: 水の密度、$\sigma$: 砂粒子の密度、$c$: 砂粒子の体積濃度、$d$: 砂粒子径、$e$: 反発係数、$g$: 重力加速度、$h_t$: 全水深、$k_f, k_d$: 実験定数でそれぞれ0.16、0.0828のようである[6)]。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て、次式を想定する[6)]。$p_s/\left(p_s+p_d\right) = f\left(c\right) = \left(c/c_*\right)^{1/n}$　(3)　ここに、c_*: 砂粒子の静止堆積層の濃度、n: 経験係数である。式(1),(2)および(3)より数値的に流速分布と濃度分布が求められる[6)]。更に、求められた流速分布を抵抗則の形で表せば、次のようである。



図－1　流れのモデル

$v/u_* = \left[\int_0^{h_t} u dz \Big/ h_t\right] \Big/ \sqrt{g h_t \sin\theta}$　(4)　**図－2(a)**、**(b)**、**(c)**は、それぞれ土石流、集合流動および掃流砂を伴

Takahiro ITOH, Shinji EGASHIRA, Kuniaki MIYAMOTO

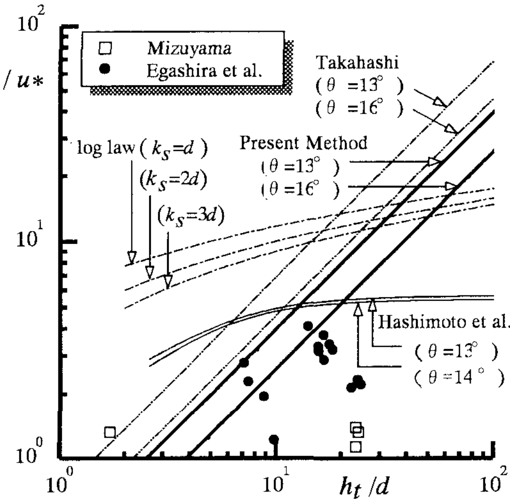
う流れに関する実験値[7),8),9),10),11)]と式(4)の結果を比較したものである。比較のため粗面固定床における対数則（対数則、ただし、k_sは相当粗度）と各研究者の抵抗則も載せている。**図(a)**についてみる。実験値にはh_t/dが過大に評価されることがあることを考慮すると、実験値、理論値とも同様の傾向が得られている。**図(b)**においては、実験値にはかなりのばらつきはあるものの、両者は良い一致をみている。**図(c)**では、理論値として、$\theta = 1.0°$および$c_t = 0.0$（掃流力が掃流砂の移動限界に等しい場合）の線[6)]が描かれている。これに対し、実験値は$k_s = 2d$の対数則と$c_t = 0.0$で表される線の間に点在している。

次に、各研究者の抵抗則についてみる。**図(a)**においては、高橋の抵抗則は、小さめの値になっており、橋本らのものは、h_t/dが10.0を越えると、v/u_*がほぼ一定になる。**図(b)**では、高橋のものは、勾配の減少に伴い抵抗が増加する結果を与える。橋本らのものは、h_t/dが10.0以下で実験値の傾向は表しているが、h_t/dが10.0を越えると、v/u_*はほぼ一定になる。**図(c)**では、対数則を規準として議論された関根ら[12)]の結果は、流砂の存在によって流れの抵抗は若干増加するが、実験値より若干小さめに出ている。一方、高濃度の流れから掃流砂の流れの抵抗をみた橋本らのものは、$k_s \approx 2d$程度の対数則とほぼ類似した傾向を示している。しかし、h_t/dが小さくなると、過大な抵抗を与える。高橋の集合流動の抵抗則を掃流砂に適用すると、流れの抵抗はかなり過大になる。

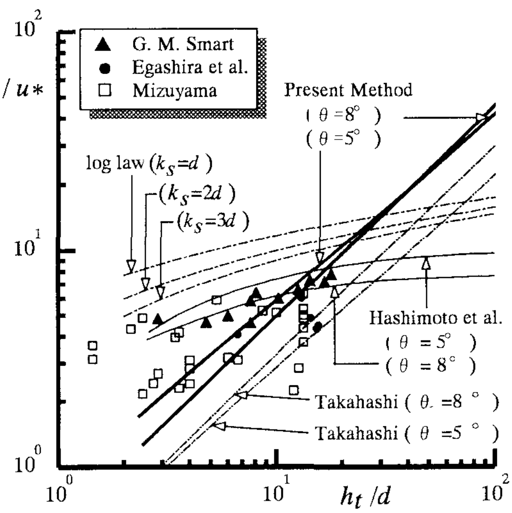
4. おわりに

流砂を伴う流れの抵抗について、江頭らの式[6)]を適用し、既往の研究や実験値と比較しながら検討した。今後に検討すべき課題はあるものの、本研究によって、土石流から掃流砂の範疇にあるの流れの抵抗は、一つの力学機構で表現できる可能性が示唆された。

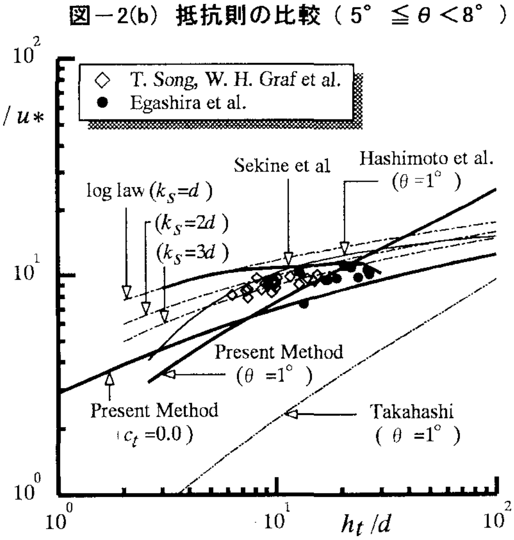
参考文献 1)高橋保：京大防災研年報、20B-2、pp.405-435、1977、2)高橋保：京大防災研年報、25B-2、pp.327-348、1982、3)椿ら：土木学会論文報告集、317、1982、pp.79-91、4)橋本ら：土木学会論文集、545/II-36、pp.33-42、1996、5)吉川秀夫：流砂の水理学、1985、丸善、6)江頭ら：水工学論文集、41巻、1997(投稿中)、7)江頭ら：京大防災研年報、33B-2、pp.293-306、1990、8)江頭ら：京大防災研年報、34B-2、pp.261-274、1991、9)Song, T. et al.: Jour. of Hydraulic Res., Vol.32, No.6, pp.861-876, 1994, 10)Smart, G. M.: Jour. Hydr. Eng. ASCE, Vol.110, HY3, pp.267-276, 1984, 11)水山高久：新砂防、116、pp.1-6、1980、12)Sekine, M. et al.: Jour. Hydr. Eng. ASCE, Vol.118, No.4, pp.536-558, 1992.



図－2(a) 抵抗則の比較（ $\theta \geqq 13°$ ）



図－2(b) 抵抗則の比較（ $5° \leqq \theta < 8°$ ）



図－2(c) 抵抗則の比較（ $0° \leqq \theta < 1°$ ）