

流砂量に及ぼす砂粒子径の影響

INFLUENCE OF GRAIN SIZE ON SEDIMENT DISCHARGE RATE

伊藤隆郭¹・江頭進治²

Takahiro ITOH and Shinji EGASHIRA

¹学生会員 工修 立命館大学院 総合理工学専攻(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Bed-load formulas that have been proposed are roughly classified into two types. One predicts the bed load rate proportional to $\tau_*^{3/2}$ and the other calculates it proportional to $\tau_*^{5/2}$, in which τ_* is the non-dimensional bed shear stress. The present study describes the influence of grain size on bed load-rate, based on Egashira et al.'s constitutive relations of debris flows as well as on flume data. The results show the thickness and average velocity of bed-load layer are proportional to τ_* and $\tau_*^{3/2}$, respectively, and suggest that the formula which is a $\tau_*^{5/2}$ -type is much reasonable from a view point of sediment dynamics.

Key Words : bed-load formula, grain size effect, thickness of bed-load layer, velocity of bed-load layer

1. 緒言

流砂量式に関する研究は、移動床水理学の根幹をなす部分であって、古くから研究成果が蓄積されている⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。これらのうち、掃流砂量式の関数形についてみると、無次元流砂量が無次元掃流力 τ_* の1.5乗に比例するものとそれ以外のものに分けられる。それ以外のものとして、篠原・椿式⁽⁹⁾の τ_* の2.3乗則のものやBrown式⁽¹⁰⁾、江頭ら^{(11), (12)}、およびGrafら⁽¹³⁾の2.5乗型のものがある。

最近では、殆どの場合、1.5乗型のものが水理実験や実用に供されており、特に、定常場の流砂量式に関する研究には区切りがついたようにも見える。しかしながら、無次元掃流力の小さいところの実験データを用いて1.5乗型の流砂量式が同定される場合には、 τ_* が0.1から0.5辺りの流砂量を過大に与えてしまう欠点がある。

こうした中で、Grafら⁽¹³⁾は、 τ_* が0.0685以上の領域で τ_* の2.5乗の経験則を提案している。これを、経験則の一つとして片付けてしまうと、問題の本質が見えなくなる可能性がある。すなわち、これは、流砂量に対する砂粒子移動限界の影響でなく、粒子移動層における砂粒子の移動速度などを通して砂粒子径が流砂量に影響を及ぼしていることを示唆している。そこで、本研究は、 τ_* の比較的大きい領域において、流砂に関する詳細な実験を行い、先の江頭ら^{(11), (12)}の研究を基礎として、また、多くの研究者の実験データに基づいて、流砂量に関する粒子径の影響を明らかにしようとするものである。

2. 砂粒子径の影響

定常・等流状態の一次元流れを対象とすると、図-1を参照すれば、流砂量 q_b は、次式で定義される。

$$q_b = \int_0^{h_t} c u dz = \int_0^{h_t} c u dz \quad (1)$$

ここに、 c は、砂粒子の体積濃度、 u は流速、 h_t は流動深、 h_s は粒子移動層の厚さである。式(1)において、粒子移動層の平均濃度(代表濃度) c_s および平均速度(代表速度) u_s を用いれば、流砂量は、次式のように近似される。

$$q_b = c_s h_s u_s \quad (2)$$

式(2)において、 $c_s h_s$ は単位面積あたりの砂粒子の移動体積を表す。

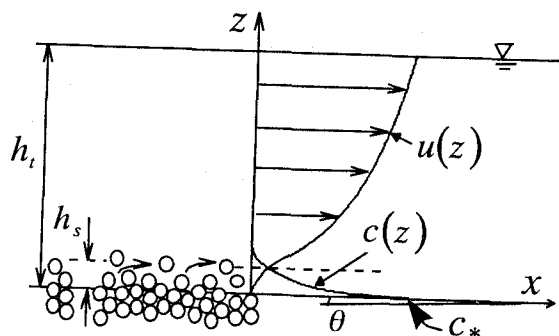


図-1 流れのモデル

図-1を参照して、力学的エネルギー保存則および運動量保存則をそれぞれ $z = z \sim h_s$ および $z = z \sim h_t$ に渡って積分すれば、それぞれ次式が得られる。

(エネルギー保存則)

$$0 = \int_z^{h_s} \rho_m g u \sin \theta dz + [\tau u]_z^{h_s} - \int_z^{h_s} \Phi dz \quad (3)$$

(運動量保存則)

$$\tau = \int_z^{h_s} \rho_m g \sin \theta dz \quad (4)$$

$$p = \int_z^{h_s} (\sigma - \rho) c g \cos \theta dz \quad (5)$$

ここに、 ρ_m は混合物の密度で、 σ を砂粒子の密度、 ρ を流体の密度とすれば、 $\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$ 、 g は重力加速度、 τ はせん断応力、 p は砂粒子の接触および衝突に伴う圧力、 θ は河床と水平とのなす角度、 Φ はエネルギー散逸率 ($= \tau \partial u / \partial z$) である。

(1) 1.5乗型流砂量式の課題

$q_{b*} \propto \tau_*^{1.5}$ 型の流砂量式の導出過程を大まかに振り返ってみよう。例えば、Bagnold¹⁴⁾の研究を参考にとすると、粒子移動層の速度および移動体積は、次のようになる。

移動体積は、連続体によって、河床 $z = 0$ における力の釣り合いを次式のように評価している。

$$\tau_G + \tau_c = \tau_b \quad (6)$$

$$p(0) = (\sigma - \rho) c_s g h_s \quad (7)$$

$$\tau_G = \mu_f p(0) \quad (8)$$

ここに、 τ_G は粒子衝突により生じるせん断力、 τ_c は限界掃流力、 p は圧力、 μ_f は砂粒子の動摩擦係数である。式(6)、(7)および(8)を用いると次式が得られる。

$$\frac{c_s h_s}{d} = \frac{1}{\mu_f} (\tau_* - \tau_{c*}) \quad (9)$$

ここに、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{c*} は無次元限界掃流力、 d は砂粒子径である。

移動速度は、砂粒子の運動を質点系によって評価することによって、概ね次式のような関係が得られている。

$$u_s = A_r u_{\tau} (1 - u_{\tau c} / u_{\tau}) \quad (10)$$

ここに、 A_r は対数型の流速分布の普遍定数、 u_{τ} は摩擦速度、 $u_{\tau c}$ は限界摩擦速度である。式(2)、(9)および(10)より、流砂量は次式のように求められている。

$$q_{b*} = k \tau_*^{3/2} (1 - \tau_{c*} / \tau_*) (1 - \sqrt{\tau_{c*} / \tau_*}) \quad (11)$$

ここに、 k は定数、 $q_{b*} = q_b / \sqrt{(\sigma / \rho - 1) g d^3}$ である。

以上の議論では、式(9)および式(10)を導く過程において、異なった力学システムが用いられており、力学的には不合理な面がみえる。

ついで、エネルギー保存則モデルと呼ばれている

Bagnoldの流砂量式¹⁵⁾についてみる。Bagnoldは、掃流砂のなす仕事 W_b を流水のなす仕事 E_p と仕事効率 e_b との積で表した。

$$W_b = E_p \times e_b \quad (12)$$

$W_b = p u_s \tan \alpha$ 、 $E_p = \tau_b U$ 、 $p = (\sigma - \rho) c_s g h_s$ 、ここに、 p は圧力、 α は砂粒子の動摩擦角、 U は水流の平均流速、 τ_b は $z = h_s$ におけるせん断力である。なお、 E_p をstream powerと定義している。まず、 $z = h_s$ における流水のせん断力 τ_w を式(13)のように仮定し、その位置における流水の速度 u_w を用いて、流水が流砂になす仕事を $\tau_w u_w$ とした。さらに、 $\tau_w u_w$ に仕事効率 e_b を乗じたものが流砂のなす仕事 W_b に等しいとして、式(14)のように表している。

$$\tau_w \propto \tau_b - \tau_c \quad (13)$$

$$W_b = E_p e_b = \tau_w u_w e_b = (\tau_b - \tau_c) u_w e_b \quad (14)$$

$u_w = k u_{\tau}$ として、式(12)と式(14)より、次式を得ている。

$$q_{b*} = j \tau_*^{3/2} (1 - \tau_{c*} / \tau_*) \quad (15)$$

ここに、 $j = k e_b / \tan \alpha$ である。

自明のことではあるが、式(11)や式(15)によれば、流砂量に対する粒子径の影響は、粒子径による移動限界掃流力の違いのみによって現れることになる。

(2) エネルギー保存則からみた粒子径の影響

まず、Bagnoldによる式(12)から式(15)の誘導過程をエネルギー保存則に基づいてみてみよう。Bagnoldの議論に合わせるため、式(3)において $\sin \theta \approx 0$ として、 $z = 0$ とおくと、 $u|_{z=0} = 0$ であるので、式(3)は次式のようになる。

$$\tau_b u_s = \int_0^{h_s} \Phi dz \quad (16)$$

上式は、粒子移動層の上面における流水の仕事が、粒子移動層内で消費されることを意味している。しかし、式(12)から式(15)の展開においては、検査体積が漠然としており、しかも、供給エネルギー $\tau_b u_s$ が $(\tau_b - \tau_c) u_w e_b$ のように変換されている上に、仕事効率 e_b について議論されていないので、粒子移動層内のエネルギー散逸の構造は不明である。

粒子移動層内におけるエネルギー消費は、粒子の接触、衝突および流水のせん断によって起こるはずである。したがって、消費の構造は、粒子移動層の粒子径や粒子間隙の空間スケールに依存するはずである。このことは、粒子移動層の内部におけるエネルギー消費の構造あるいは応力構造を指定すると、粒子移動層における流速分布や粒子濃度分布が定められることを意味している。

粒子移動層における応力構造の与え方には、任意性が残されているが、ここでは、土石流の構成則を適用し

た例を示す。構成則として、高橋^{16), 17)}、椿・橋本¹⁸⁾あるいは江頭^{19), 20)}のものを適用できるが、いずれを用いても、同じ型の流砂量式が得られる。ここでは、江頭らの構成則を用いて得られる結果^{11), 12), 21)}を示そう。これによれば、粒子移動層の移動速度、移動層厚および流砂量は、それぞれ次式のように求められている^{11), 21)}。

$$\frac{\bar{u}_s}{u_\tau} = \frac{4}{15} \frac{K_1 K_2}{\sqrt{f_d + f_f}} \tau_* \quad (17)$$

$$\frac{c_s h_s}{d} = K_1 \tau_* \quad (18)$$

$$q_b = \frac{4}{15} \frac{K_1^2 K_2}{\sqrt{f_d + f_f}} \tau_*^{5/2} \quad (19)$$

$$K_1 = \left[\cos \theta \left\{ (c_s/c_s)^{1/5} \tan \phi_s - \tan \theta \right\} \right]^{-1}$$

$$K_2 = \frac{1}{c_s} \left[1 - \frac{h_s}{h_i} \right]^{1/2}, \quad \bar{u}_s = \frac{1}{h_s} \int_0^{h_s} u dz$$

$$\frac{h_s}{h_i} = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1) c_s (c_s/c_s)^{1/5} \tan \phi_s - \tan \theta} \cdot \frac{1}{1}$$

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

ここに、 k_d および k_f は実験定数、 e は反発係数、 c_s は静止堆積濃度、 ϕ_s は砂粒子の内部摩擦角である。

式(17)から式(19)を参照すれば明らかなように、粒子移動層の平均移動速度 $\bar{u}_s$ は、移動層厚 h_s の関数であるとともに、 $\tau_*^{3/2}$ に比例している。さらに、移動体積 $c_s h_s$ は式(9)あるいは式(18)に示されるように、 τ_* に比例しているので、流砂量は2.5乗型のものになり、流砂量に対する粒径の影響が陽に現れる関数形である。

また、検査体積内部の応力構造が、 $(\partial u / \partial z)^2$ に比例するような関数形で与えられると、粒子移動層の平均流速 u_s は移動層厚 h_s の1.5乗に比例するので、 τ_* の1.5乗に比例し、流砂量は2.5乗型のものになる。また、応力構造が、 $\partial u / \partial z$ に比例するように与えられると、粒子移動層の平均流速 u_s は移動層厚 h_s の1乗に比例するので、 τ_* に比例し、流砂量は2乗型のものになる。

以上、(1)および(2)の議論から、流砂量が無次元掃流力の1.5乗に比例する関数形と2.5乗に比例するものとの違いは、粒子移動層内部において、エネルギー散逸構造、もしくは、応力構造が規定されているか否かにある。2.5乗型の流砂量式に従えば、粒子径の影響は、粒子移動層の平均速度を通じて表現され、粒子の移動限界掃流力が無視できる領域においても、流砂量に及ぼす粒径効果が現れる。そこで、次章においては、実験データを用いて、粒子移動層の速度、移動層厚および流砂量について検討する。

3. 流砂量に関する実験データの解析

流砂量に及ぼす粒子径の影響を見るために、粒子移動層の平均速度、粒子移動体積および流砂量に関する実験データを解析する。図-2 (a)および図-2 (b)は、著者らによって掃流力の大きな領域において得られた流砂量に関する実験値と他の研究者によって得られた実験値^{4), 11), 22)-26)}から求めた q_b と摩擦速度 u_τ の関係である。実験データは、粒子径をパラメータにして示している。図-2 (b)は、掃流力の大きい領域における流砂量に関する実験値の傾向を見やすくするため、 $q_b \geq 5.0 (\text{cm}^2/\text{s})$, $u_\tau \geq 10 (\text{cm/s})$ の領域を拡大した図である。図-3は、実験値^{11), 22)}による無次元掃流力 τ_* と移動層厚 h_s/d の関係である。図-4は著者らによって得られた実験データを用いて得られた無次元掃流力 τ_* と無次元移動速度 $u_s/\sqrt{gd}$ との関係である。粒子移動層の平均速度は、粒子径と重力加速度を用いて基準化している。なお、砂粒子の移動層における平均移動速度を直接的に得ることは困難であるので、ここでは、流速分布と粒子移動層厚に関する実験データを用いて求めている。なお、図-3および図-4のデータは、河床勾配をパラメータにして示し、図には比較のため式(9)、(18)および式(10)、(17)をそれぞれ掲載している。計算において、式に含まれるパラメータについては、次のような値が用いられている。 $c_s = c_s/2$, $c_s = 0.52$, $\mu_f = 0.675$, $\tau_{*c} = 0.05$, $A_r = 8.5$, $k_d = 0.0828$, $k_f = 0.16$, $e = 0.85$, $\phi_s = 34.0 (\text{deg.})$ 。図-5は、無次元掃流力と無次元流砂量の関係である。図には、比較のため実験データ、式(19)および幾つかの流砂量式を示している。なお、実験データは、図-2に掲載したものと同一のものである。

まず、図-2 (a)および図-2 (b)を用いて流砂量についてみる。これによれば、掃流力の小さい領域においては、砂粒子の移動限界掃流力の影響を受け、流砂量に対する粒径効果が現れている。さらに、掃流力の大きい領域についてみると、掃流力の小さい領域と同様に流砂量に対する粒径効果が明瞭に現れている。例えば、図-2 (b)において、 $u_\tau \approx 22 (\text{cm/s})$ における $d = 0.218 (\text{cm})$ および $1.05 (\text{cm})$ の流砂量を比較すると、3~4倍程度の違いが見られる。

次に、図-3を用いて粒子移動体積(移動層厚)についてみる。これによれば、移動層厚は τ_* の1乗に比例しており、式(9)、(18)と同様の傾向である。 τ_* が0.1よりも小さい領域を除けば、式(9)、(18)と実験データは、良く一致している。すなわち、式(18)および実験データの移動層厚はともに τ_* の小さい領域から大きい領域にまたがって、 τ_* に対して連続的に変化していることが分かる。

ついで、図-4を用いて粒子移動層の平均速度についてみる。河床勾配 $\theta \leq 3.0^\circ$ のデータが少なく、デー

タが若干ばらついてはいるが、 $\theta \geq 3.0^\circ$ のデータを勾配ごとにみると粒子移動層の平均速度は、概ね τ_* の1乗から1.5乗に比例している。これは、式(17)の妥当性、すなわち、流砂量に対する粒子径の影響は、粒子移動

層の平均流速を介しても現れることを示唆する結果である。

最後に、図-5を用いて、流砂量に関する実験データと幾つかの流砂量関数を比較する。なお、ここでは比較

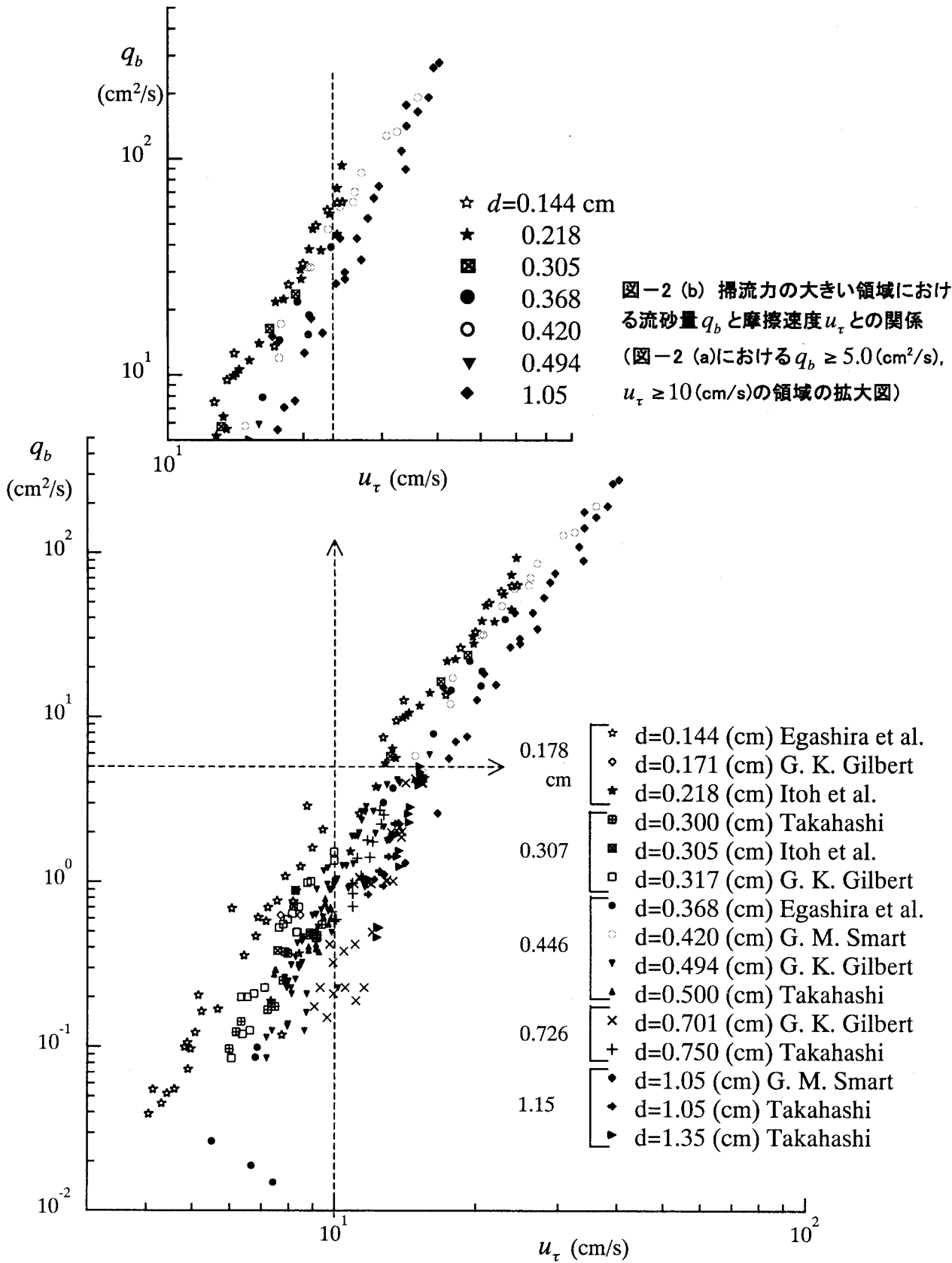


図-2 (a) 流砂量 q_b と摩擦速度 u_τ との関係

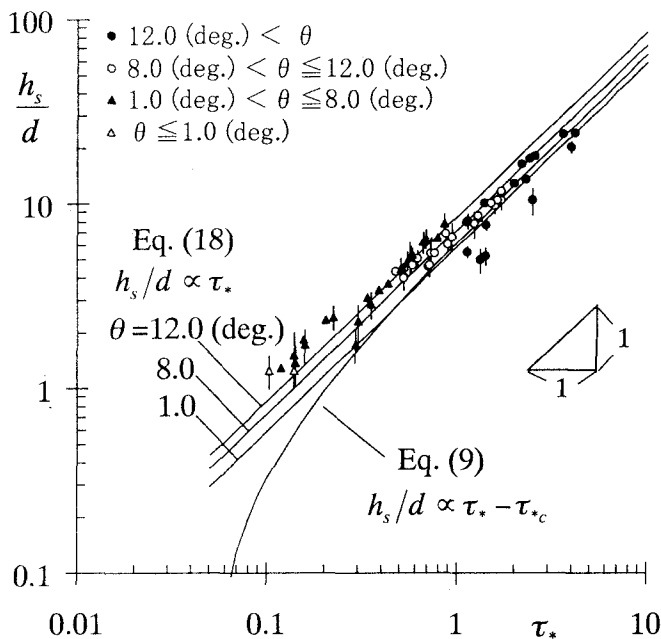


図-3 無次元掃流力と移動層厚の関係

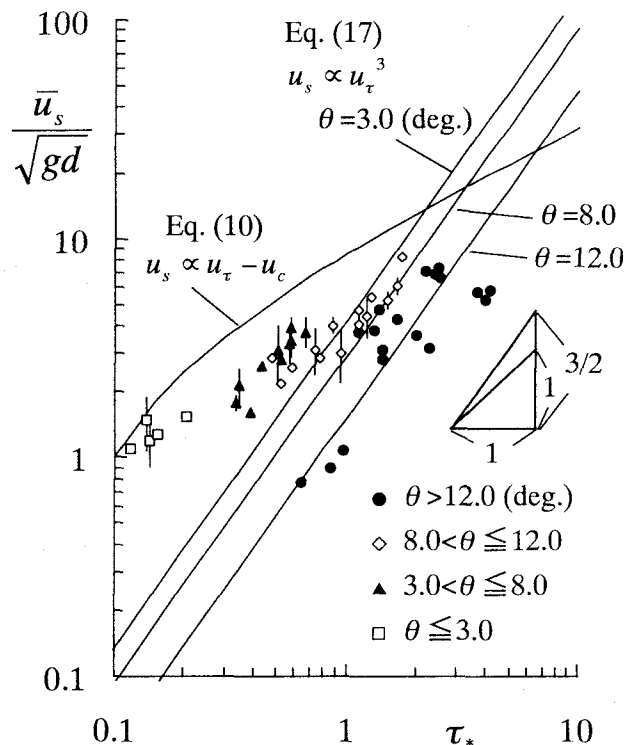


図-4 無次元掃流力と平均移動速度の関係

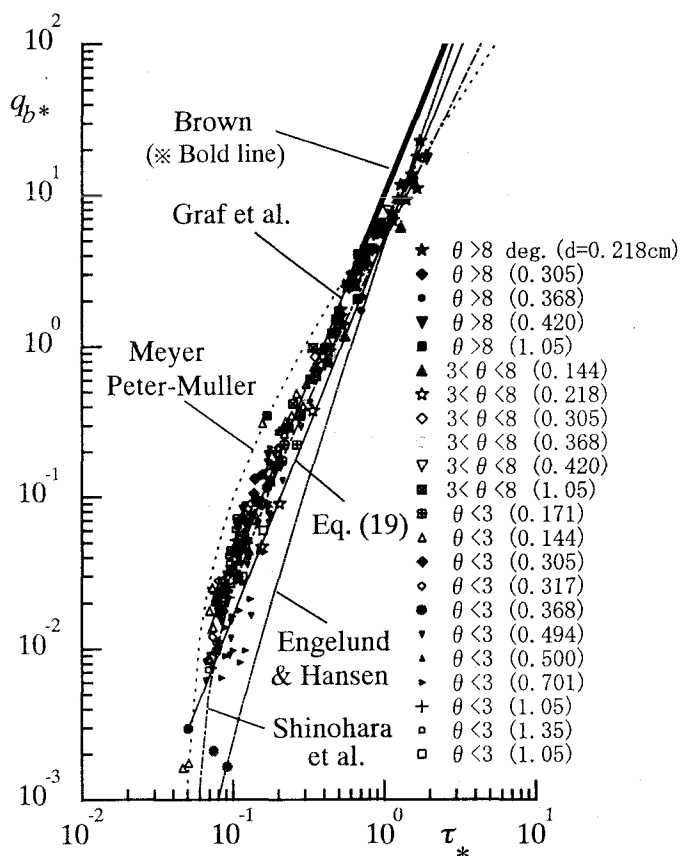


図-5 無次元掃流力と無次元流砂量の関係

のために、1.5乗型のMeyer Peter & Müller式²⁾、2.3乗型の篠原・椿式⁹⁾、2.5乗型のBrown式($\tau_* \geq 0.6$)¹⁰⁾、Engelund & Hansen式²⁶⁾およびGraf & Suszka式¹³⁾を掲載し、式(19)も載せている。また、実験データにおいて、 τ_* が1~2を越えると、流動している層と静止している層との境界近傍に流速の小さい領域が鉛直下方に伸びてしまう現象(クリープ)が発生することがある。このとき、流

動深が大きく判定され、 τ_* が過大に評価されてしまうため、図中のデータが右方向にずれてしまい、データが横倒れする可能性がある。そこで、このようなデータは掲載していない。実験データとMeyer Peter & Müller式を比較する。粒子の移動限界掃流力近傍においては、実験値の傾向を良く表すが、 τ_* が0.1~0.5の領域においては、若干流砂量が大きめに見積もられ、 τ_* が1.5よりも大きい領域においては、逆に、流砂量が小さく見積もられている。次に、Brown式およびGrafらの式についてみると、 τ_* が0.1以上の広い領域において、実験データと良く一致している。式(19)は、この2つの経験則の結果と類似している。

図-2から図-5の結果を総合すると、流砂量に対する粒径効果は、砂粒子の移動限界の影響ばかりではなく、粒子移動層の流速を介しても影響を受けていることを示している。さらに、流砂量が2~2.5乗型の関数形のもの、流砂量に及ぼす粒子径の影響を容易に表現できることが分かる。

4. 結語

流砂量に及ぼす砂粒子径の影響について検討するため、実験データを用いて解析を行うと共に、粒子径の影響を表現できるための流砂量式の構造について検討した。本研究によって得られた知見は次のようである。

(1)実験データを用いて流砂量に対する粒径効果について検討したところ、掃流力の大小に関わらず、粒子径の影響が現れることが確認された。さらに、粒子移動体積と粒子移動層の流速の各々について、実験データを解析したところ、粒子移動体積は無次元掃流力の1乗に

比例し、粒子移動層の速度は、概ね無次元掃流力の1乗から1.5乗程度に比例することが認められた。以上の実験データの結果は、流砂量が、砂粒子の移動限界の影響ばかりではなく、粒子移動層の流速を通じて影響を受けていること、すなわち、粒子移動層内部における応力構造にも支配されていることを示している。

(2)検査体積を粒子移動層に設定すると、粒子移動層の内部におけるエネルギー消費は、例えば、粒子の接触、衝突および流水のせん断と云った要因で生じる。これらのエネルギー消費の構造は、粒子移動層の粒子径や粒子間隙の空間スケールに依存するはずである。これは、応力構造を指定すると、粒子移動層における流速分布や粒子濃度分布が定められることを意味している。このとき、粒子移動体積(層厚)は、無次元掃流力の1乗に比例する。さらに、せん断応力がひずみ速度の1乗に比例する関係が与えられれば、粒子移動層の平均速度は無次元掃流力の1乗に比例し、流砂量は、2乗型の関数形になる。また、せん断応力がひずみ速度の2乗に比例するものが与えられると、平均移動速度は無次元掃流力の1.5乗に比例し、流砂量は、2.5乗型の関数形になる。これらの流砂量式によれば、流砂量に対する粒子径の影響を容易に評価できる。事実、数多くの実験データの傾向をよく説明するものである。

(3)検査体積を粒子移動層に設定して、内部の応力構造を指定することによって導かれる流砂量は、2~2.5乗型のものとなり、流砂量に及ぼす粒子径の影響が陽に現れる。篠原・椿式、Brown式およびGrafらの経験則は、ある意味、流砂量式の一つとして扱われていたように思われるが、先の(2)のような立場から見ると、これらの経験則の示している意味は、結果的に非常に興味深いものである。

謝辞:本研究は、一部、文部省学術フロンティア事業および文部省科学研究費特別研究員奨励費(伊藤隆郭)の補助を受けて進めているものである。また、立命館大学大学院 平山清志君、鶴飼宜行君、同大学理工学部内海敦郎君、濱口裕介君および波多野大輔君には、実験およびそのデータ整理に御協力いただいた。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) Du Boys, M. P. : Le Rhone et les rivières a lit affouillable, *Annales des Ponts et Chaussées*, Series 5, 18, 141-195, 1879.
- 2) Meyer-Peter, E. and Müller, R. : Formulas for bed-load transport, *Proc. 2nd IAHR Meeting*, Stockholm, 39-64, 1948.
- 3) Einstein, H. A. : The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, *Tech. Bull.*, No. 1026, USDA, Soil Conservation Service, 1-70, 1950.
- 4) Gilbert, G. K. : The transportation of debris by running water, *USGS Prof. Paper*, 86, 1914.
- 5) 芦田和男・道上正規:移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, *土木学会論文報告集*, 206, 59-69, 1972.
- 6) 中川博次・辻本哲郎:掃流粒子のsaltationの確率過程論的解析, *土木学会論文集*, No. 345, 83-90, 1984.
- 7) 関根正人・小川田大吉・佐竹宣憲:Bed Material Loadの流

送機構に関する研究, *土木学会論文集*, 545/II-36, 23-32, 1996.

- 8) 後藤仁志・酒井哲郎:表層せん断を受ける砂層の動的挙動の数値解析, *土木学会論文集*, No. 521/II-32, 101-112, 1995.
- 9) Shinohara, K. and T. Tsubaki: On the characteristics of sand waves formed upon the beds of open channels and rivers, *Reports of Res. Inst. Appl. Mech.*, Kyushu Univ., Vol. VII, No. 25, 1959.
- 10) Brown, C. B. : *Engineering Hydraulics*, edited by H. Rouse, John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y., 1950.
- 11) 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, *京大防災研年報*, 33B-2, 293-306, 1990.
- 12) 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*, 41巻, 789-794, 1997.
- 13) Graf, W. H. and L. Suszka: Sediment transport in steep channel, *Jour. Hydrosience and Hydr. Eng.*, JSCE, 5(1), 11-26, 1987.
- 14) Bagnold, R. A. : The flow of cohesionless grains in fluids, *Philosophical Trans.*, Royal Soc. of London, Vol. 249, 235-297, 1957.
- 15) Bagnold, R. A. : An approach to the sediment transport problem from general physics, *USGS Prof. Paper*, 422-J, 1-37, 1966.
- 16) 高橋 保:土石流の発生と流動に関する研究, *京大防災研年報*, 20B-2, 405-435, 1977.
- 17) 高橋 保・里深好文・千代啓三:土石流の慣性領域での流動則, *京大防災研年報*, 39B-2, 333-346, 1996.
- 18) 椿 東一郎・橋本晴行・末次忠司:土石流における粒子間応力と流動特性, *土木学会論文報告集*, 317, 79-91, 1982.
- 19) 江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高濱淳一郎:土石流の構成則に関する研究, *京大防災研年報*, 32B-2, 487-501, 1989.
- 20) Egashira, S., K. Miyamoto and T. Itoh : Constitutive equations of debris flow and their applicability, 1st Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, 340-349, 1997.
- 21) 江頭進治:講座「流砂および流砂を伴う流れの力学」(3. 掃流砂の力学), *混相流*, 11巻, No.4, 388-393, 1997.
- 22) 江頭進治・芦田和男・田野中新・高橋徹也:連続体手法による掃流砂量式に関する研究, *京大防災研年報*, 34B-2, 261-274, 1991.
- 23) Smart, G. M. : Sediment transport formula for steep channels, *Jour. of Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 110, No. 3, 267-276, 1984.
- 24) 伊藤隆郭・江頭進治・宮本邦明:土石流の固定床から移動床流れへの遷移課程に関する研究, *水工学論文集*, 43巻, 635-640, 1999.
- 25) 高橋正佑:河床れきの流送に関する実験的研究, *新砂防*, Vol. 60, 5-14, 1966.
- 26) Engelund, F. and E. Hansen: A monograph on sediment transport in alluvial streams, *Technik Forlag*, Copenhagen, 1-62, 1967.

(2000.10.2 受付)