

固体粒子を高濃度に含む流れに及ぼす固体粒子径の影響

立命館大学理工学部

正会員 ○ 伊藤隆郭*

立命館大学理工学部

正会員 江頭進治*

パシフィックコンサルタンツ(株)

正会員 内海敦郎**

立命館大学大学院

学生員 黒田尚吾*

1. はじめに 水に粗粒子を高濃度を含む流れを土石流と呼ぶことにすると、これについての研究は数多く行われており、例えば、江頭らの研究によると、土石流から掃流砂流にまたがる広い領域の流れをほぼ統一的に説明できる段階にきている¹⁾。この種の流れにおいては、水路実験による実験データも蓄積されているが、全水深と粒子径の比である相対水深から見ると、 10^0 から 10^1 のオーダーの流れである。ところが、現地における土石流観測や微細粒子を用いた水路実験によって得られたデータによると、先に述べた土石流の流れとは流れの構造が異なる流れが形成されることが指摘されている²⁾⁻⁵⁾。例えば、この種の流れは高橋らによると相対水深が 30 を越えるような領域において形成されるものと言われており、「泥流型土石流」とよばれている。ところが、相対水深が大きい流れにおける実験においては、主に固定床流れを対象とすることが多く、壁面乱流の影響が卓越するため、流れの構造を更に議論する上で困難な状況にあるものと推察される。本研究においては、流れの規模（相対水深）の違いに伴う流れの構造の変化に着目して移動床の水路実験を行い、得られたデータについて報告する。

2. 水路実験 実験には長さ 12 m、幅 5 cm の可変勾配式矩形断面水路を用いている。上流より定常的に給水および給砂を行い、定常状態の移動床上の土石流を形成させている。なお、使用珪砂（6 号砂）の粒度分布はほぼ一様であり、材料特性は次のようである。 $d_{50} = 0.0292$ (cm), $\phi_s = 38.3^\circ$, $c_* = 0.537$, $\sigma/\rho = 2.65$ 。ここに、 d_{50} : 50% 粒径, ϕ_s : 内部摩擦角の実測平均値, c_* : 静止堆積濃度, σ/ρ : 固体粒子の比重, σ : 砂粒子の密度, ρ : 水の密度である。

実験においては、砂粒子と水の混合物の流量 q_m を 9.0, 28.0, および 55.0 (cm^2/s) のように変化させて、流れの規模に及ぼす砂粒子径の影響について検討している。なお、給砂においては、砂粒子径が小さく水との混合が困難であるため、給砂位置（下流端から 6.5 m 地点）において、ミキサーを用いて水とホッパー

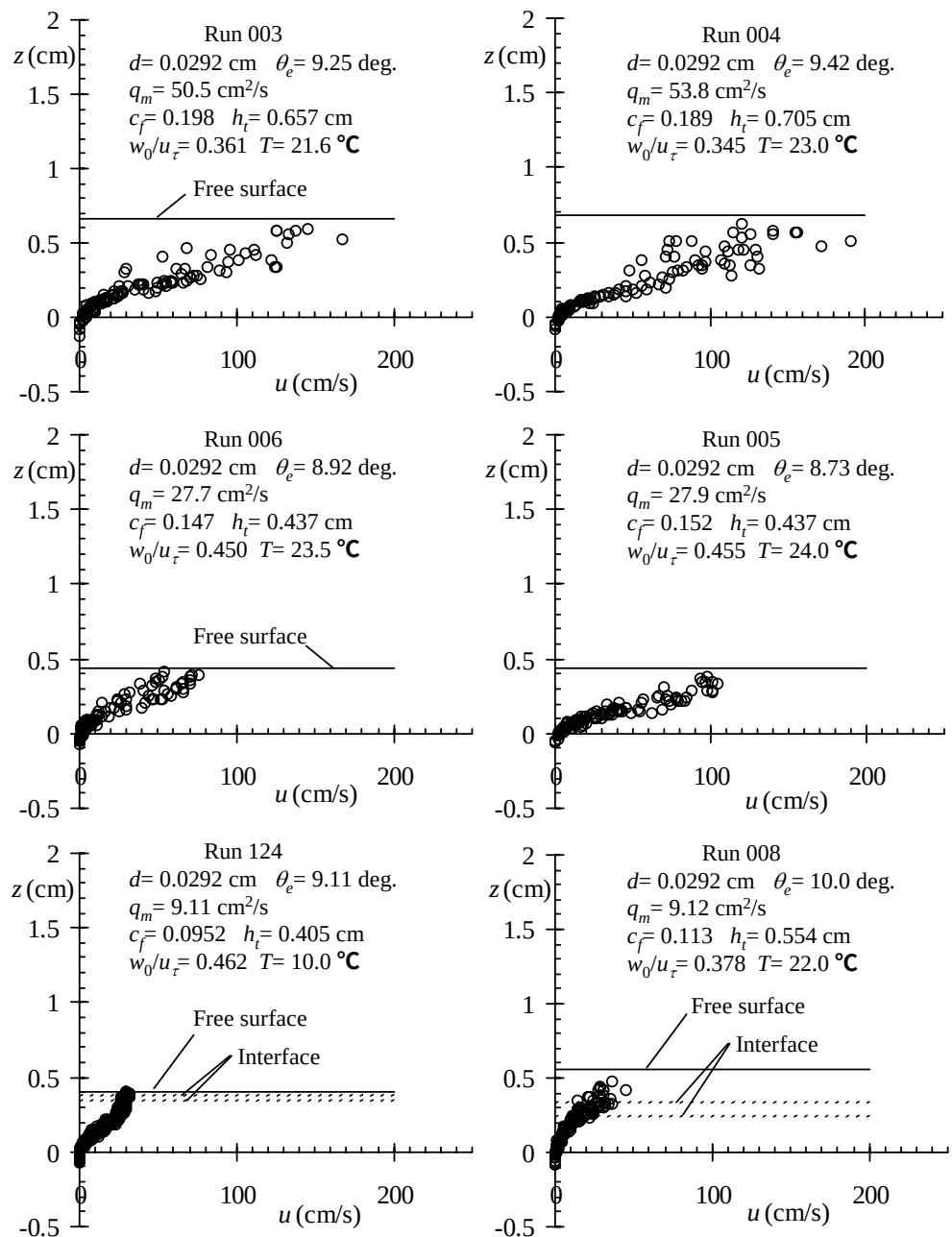


図-1 流速分布

Key Words : sediment size, bed load, debris flow, constitutive equations

* 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 Phone. 077-561-2732 FAX 077-561-2667

** 〒535-0011 大阪市淀川区西中島 4-3-24 Phone. 06-6390-8450 FAX 06-6302-8400

から供給される砂粒子を混合させて水路に混合物を供給している。移動床は、下級端から 5.0 m の区間において形成されており、移動層区間が十分長く確保されている。測定項目は次のようである。下流端から 0.65 m 地点において高速ビデオカメラを用いて、側壁から撮影された画像データを用いて砂粒子の流速、水深を計測し、下流端では、バケツにより流量・流砂量を計測し、側壁から観測される水位および河床位を用いて平衡勾配を測定している。

図-1 は、ほぼ同一勾配（約 9.0° ）における流速分布の実験データの一例である。ここに、 h_t ：流動深、 θ_e ：平衡勾配、 c_f ：輸送濃度、 T ：水温である。なお、図には沈降速度 w_0 と摩擦速度 u_τ の比の分布を示している。 w_0 には実測値を用い、摩擦速度は $u_\tau = \sqrt{gh_t \sin \theta}$ である。いずれのケースにおいても、 $w_0/u_\tau \leq 1$ の領域にあり、砂粒子の浮遊が卓越するような領域にある。流速分布を見ると、いずれのデータにおいても、河床近傍においては移動床の流れにおいて特徴的な上に凸の流速分布形がみられ、局所流速の変動が小さいようである。一方、自由水面近傍においては、流量の増加に伴い水面近傍に局所流速の変動が大きくなっている様子が分かる。これは、自由水面近傍では水深規模の乱れが卓越する流れが形成されると共に、河床近傍においては、粗粒子と水との混合物の流れに類似した流れ、すなわち、砂粒子が層流的に流動するような流れが形成されていることを示唆するものである。

また、 $q_m \approx 9.0$ (cm^2/s)のデータにおいて、勾配が 12° 程度よりも小さいデータにおいては、水面近傍に清水流の層が形成されている。これは、粗粒子と水との混合物においてみられる流れと非常に類似している。ところが、 $q_m \approx 28.0$ および 55.0 (cm^2/s)のデータにおいては、勾配が 12° 程度よりも小さい場合においても、砂粒子は全層にわたって分散している。以上から、流量の増加に伴い、砂粒子が層流的に流動する流れから、流れの一部に乱れの卓越するような領域が形成されるような流れへと遷移することが示唆される。

図-2 は平衡勾配 θ_e と輸送濃度 c_f の関係を示したものである。図には粒径 $d = 0.029$ (cm)のもの、過去に江頭らによって得られた粗粒子を伴う流れのデータ、および $d = 0.030$ (cm)の実験値^{6), 7)}も掲載している。粗粒子を伴う土石流のデータは流量 $q_m = 50 \sim 300$ (cm^2/s)の範囲で流れの規模を変化させて得られているデータであるが、この範囲においては、輸送濃度が勾配に対して一意的に定められている。これは、粒子が層流流動することを示している。これに対して $d = 0.029, 0.030$ (cm)の実験データについてみる。 $q_m \approx 9.0$ (cm^2/s)の実験値は、粗粒子のデータの傾向と非常に類似しており、砂粒子が層流流動することを示唆している。一方、 $q_m \approx 28.0$ (cm^2/s)、

および $q_m \approx 55.0$ (cm^2/s)の実験データを見ると、流量の増加に伴い、粗粒子を伴う土石流のデータ、および $q_m \approx 9.0$ (cm^2/s)の実験データよりも輸送濃度が増加している。

図-1 に示す流速分布のデータと**図-2** のデータを総合してみると、流量の増加に伴い自由水面近傍に形成される乱れの卓越する流れが輸送濃度を増加させる可能性を示唆している。江頭らによる以前の研究⁷⁾によれば、微細砂を伴う流れにおいては、粒子が層流流動が卓越する層が河床近傍に形成され、自由水面近傍においては乱流拡散が卓越する流れが形成されることが報告されている。本実験においても、これと非常に類似する結果が得られており、これについては、乱れの卓越する領域における粒子濃度の決定機構や流れのメカニズム（構成則）に関する検討を行うことによって、更に検討が必要である。

4.おわりに 流れの規模に及ぼす砂粒子径の影響について検討した。実験データによれば、流量が増加すると粗粒子を伴う土石流の流れに見られるような粒子が層流流動する流れとは若干異なる流れが形成される。それに伴い、輸送濃度が増加することが示唆された。ここでは、定性的な評価に留まっているが、流れの構造について更に詳細に検討するため、粒子濃度や圧力の鉛直分布に関するデータを蓄積することによって、更なる検討が必要である。

参考文献 1) 江頭ら：水工学論文集，41 巻，pp. 789-794，1997， 2) 高橋 保：土砂移動現象に関するシンポジウム論文集，pp. 39-55，1992， 3) 新井ら：土木学会論文集，No. 375，69-77，1986， 4) 橋本ら：水工学論文集，39 巻，pp. 495-500，1995， 5) (社)土木学会：蒲原沢土石流災害調査特別委員会報告書，1998， 6) 伊藤：立命館大学学位論文，2000， 7) 江頭ら：京大防災研年報，37B-2，pp. 359-369，1994。

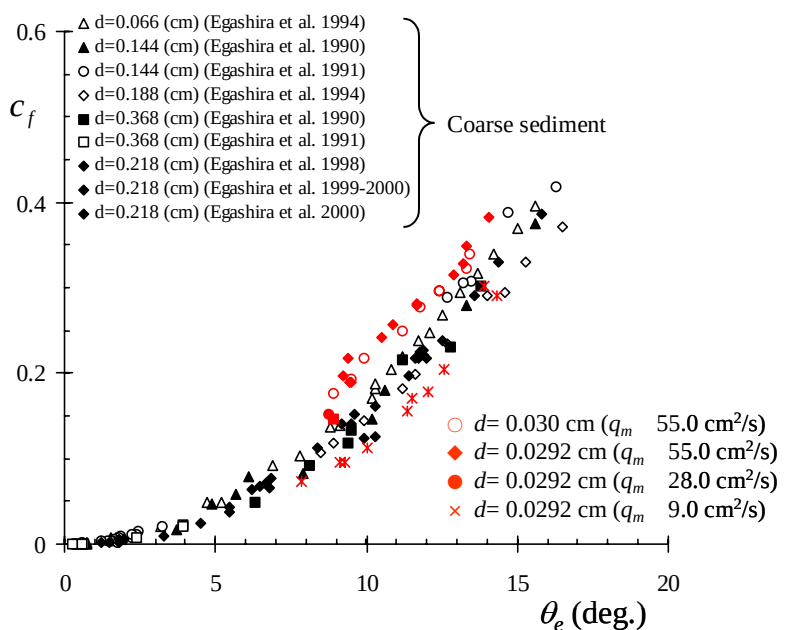


図-2 平衡勾配と輸送濃度の関係