

立命館大学工学部 ○ 伊藤隆郭 立命館大学工学部 江頭進治 滋賀県 磯部智彦

1.はじめに 砂粒子が層流流動をするような水との混合物の流れを対象とすると、土石流から掃流砂流にまたがる流動形態の流れを力学的に統一して説明出来る段階にある<sup>1)</sup>。一方、現地の大規模な土石流の観測データや微細粒子を伴う流れに関する水路実験データによると、層流流動する固相の一部が相変化現象によって乱流化し、**図-1**に示すように、上層において流体相として挙動することが示唆されている<sup>2),3),4)</sup>。本研究では、土石流における相変化の影響について、移動床の実験データを用いて解析すると共に、江頭らの構成則を用いて定義される無次元パラメーターに着目して検討する。

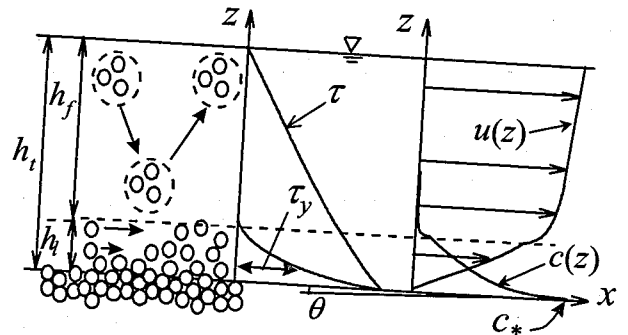


図-1 流れのモデル (二層モデル)

2.水路実験 実験に用いた水路は、幅 5.0 cm、長さ 12.0 m の矩形断面の開水路である。水路下流端より約 8.0 m の位置には給砂ホッパーが設置され、その直下の混合タンクで砂と水をミキサーによって十分に混合させて水路に混合物を供給している。水路下流端には高さ 10 cm の堰を設置し、上流端から砂と水との混合物を定常的に供給し、水路に移動床流れを形成させている。実験に用いた材料は、50%粒径  $d_{50} = 0.292$  mm のほぼ様な砂で、粒子比重  $\sigma/\rho = 2.65$ 、内部摩擦角  $\phi_s = 38.3^\circ$ 、静止堆積濃度  $c_s = 0.537$  である。この類の実験においては、粒子径を小さくする方法が予想されるが、このとき、粒子表面の化学的な力が卓越する。そこで、本実験においては、非粘着性が卓越する砂粒子を用い、混合物の単位幅流量  $q_m$  を 10, 30, 50, 100, 200  $\text{cm}^2/\text{s}$  のように変化させて、流れの規模を変化させた実験を行っている。また、移動床区間は、5.0 m ~ 7.0 m の区間において形成されており、 $h_t/L \ll w_0/u_t$  ( $L$  は移動床区間の長さ) の関係を満たすように十分長く確保されている。測定項目は、水路下流端での混合物の流量・流砂量、水深、流速、平衡勾配である。水路下流端より 65 cm の位置で水路側壁から高速ビデオカメラを用いて撮影された画像解析によって水深と流速分布が得られている。平衡勾配は、流れが平衡状態に達した時点で、水路側壁から水面および河床面に相当する部分から特定している。

3.平衡勾配と輸送濃度および流速分布 **図-2(a)~(d)**は、平衡勾配が約  $10^\circ$  における流速分布の実験データである。同図には、粒子が層流運動するものとして導かれた江頭らの構成則<sup>1),5)</sup>を用いて得られた計算値(以下、厳密解と呼ぶ。)が掲載されている。

**図-3**は平衡勾配  $\theta_e$  と輸送濃度  $c_f$  に関する実験データである。同図には、混合物の単位幅流量  $q_m$  がそれぞれ、10, 30, 50, 100  $\text{cm}^2/\text{s}$  程度の実験値、ならびに、厳密解も掲載されている。なお、**図-3**において、 $q_m$  が 30, 50, 100, 200  $\text{cm}^2/\text{s}$  程度の流れにおいては、平衡勾配が約  $9^\circ$  以下の領域で chute & pool の河床波が発生し、平坦河床のデータが掲載されていない。さて、図によると、 $q_m$  が 10  $\text{cm}^2/\text{s}$  のケースにおいては、実験データと厳密解はよく一致しており、砂粒子の運動が層流的なものであることを示している。これに対して、 $q_m$  が 10  $\text{cm}^2/\text{s}$  よりも大き

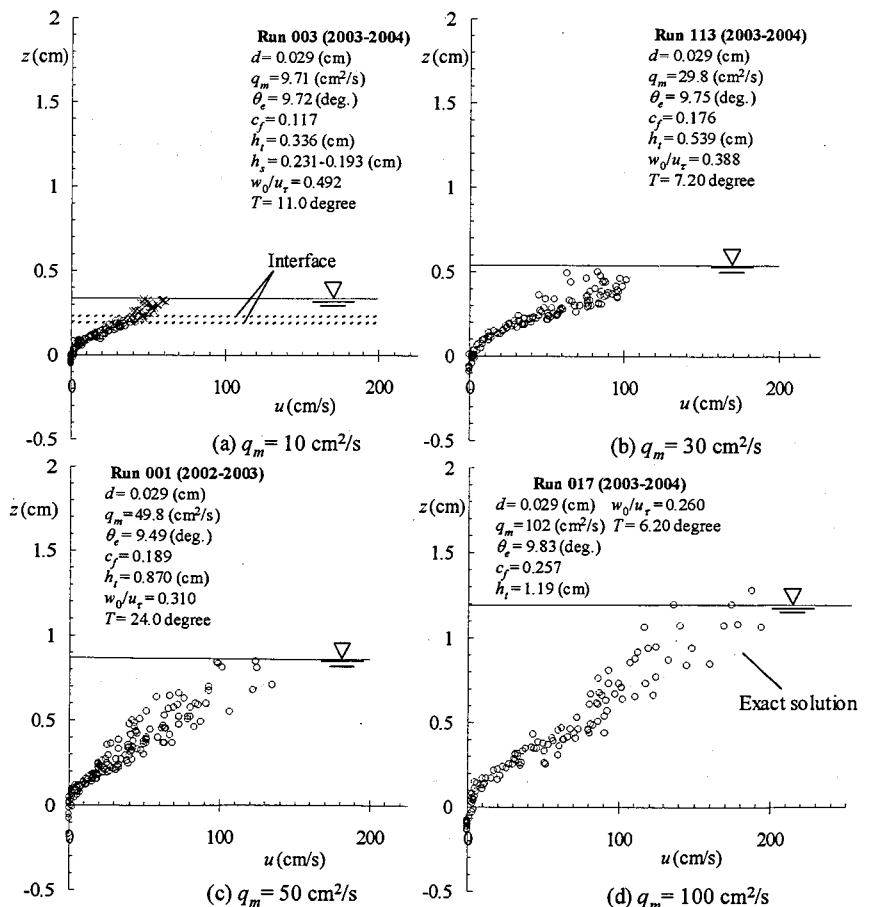


図-2 流速分布の比較

くると、**図-2**と**図-3**に示すように、粒子の層流運動を想定した厳密解は実験データと大きなズレを生じ、その大きさは流量の増加に伴い大きくなっている。さらに、**図-2**の流速分布をみると、流量の増加と共に自由水面近傍における流速の変動が大きくなっており、水深スケールの乱れが卓越する流れを呈することを伺わせる。一方、河床近傍においては、流速分布は上に凸の分布形を呈しており、粒子が層流運動をする移動床流れの分布形と同じである。これは、河床近傍の層（下層）においては、江頭らの研究<sup>1),5)</sup>に示すように、静的な降伏応力が卓越していると考えられる。結局、2層構造の流れが形成することを示している。

また、

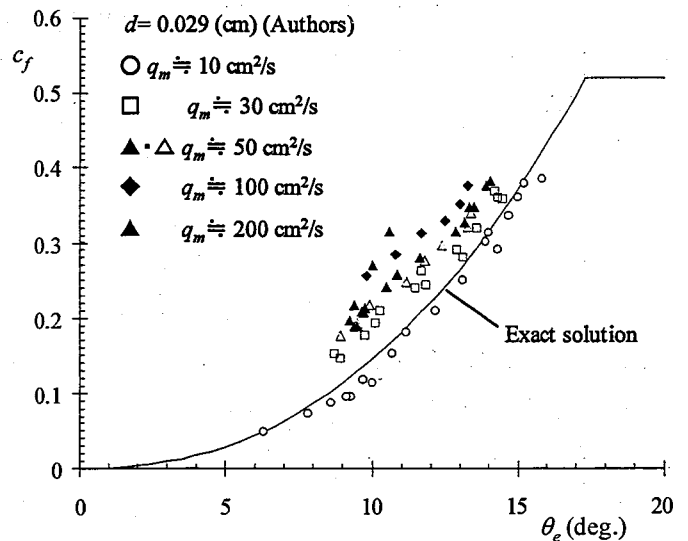
**4. 混合物の流れの無次元パラメータ** **図-1**に示すような流れを念頭において、2層モデル<sup>3)</sup>を用いて、平衡勾配比すなわち移動層厚比と流れの規模の関係について実験データを用いて解析する。なお、移動層厚比は、全水深に対する層流流動層の厚さの比を示している<sup>6)</sup>。

流れの無次元パラメータの取り扱い方の妥当性については、今後の議論の余地が残されているが、著者らの研究成果<sup>6)</sup>を用いる。一方、平衡勾配比  $\tan \theta_e / \tan \theta_{e0}$  は、**図-3**において、同一輸送濃度の時の  $q_m$  が  $10(\text{cm}^2/\text{s})$  の平衡勾配  $\tan \theta_{e0}$  に対する  $q_m$  が  $10(\text{cm}^2/\text{s})$  以外の平衡勾配  $\tan \theta_e$  の比を計算することによって求められる。

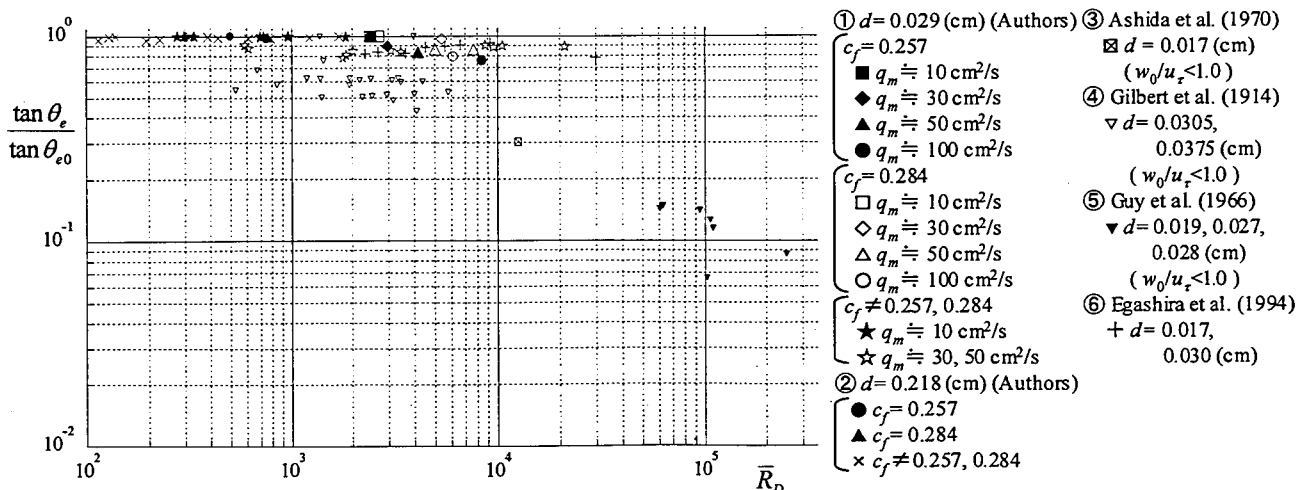
**図-4**は、無次元パラメータ  $\bar{R}_D$  と平衡勾配比の関係である。図には、ほぼ同一濃度 ( $c_f = 0.257, 0.284$ ) における実験値を載せている。比較のために、本研究で得られた  $c_f = 0.257, 0.284$  以外のデータ、粒子が層流流動をする粗粒子 ( $d = 0.218 \text{ cm}$ ) の実験データ<sup>5)</sup>、江頭らのデータ<sup>3)</sup>および平坦河床の浮遊砂流のデータ<sup>7-9)</sup>も載せている。また、 $\bar{R}_D$  の計算においては、断面平均濃度の代わりに輸送濃度を用いている。同図によると、データはかなりばらついているが、 $\bar{R}_D$  がほぼ  $4000 \sim 5000$  を越えると平衡勾配比は1より小さくなり、 $\bar{R}_D$  の増加に伴って平衡勾配比が単調に減少していることが分かる。なお、 $\bar{R}_D = 4000 \sim 5000$  の値を粒子濃度などを用いて  $h_t/d$  の値にすると  $27.9 \sim 31.3$  程度になり、高橋らが提案する泥流型と乱流型の土石流の境界値の  $h_t/d = 20$  程度に酷似した値となる。

**5. おわりに** 相変化現象について実験データをもとに検討した。平衡勾配と輸送濃度の関係、流速分布およびレイノルズ数と平衡勾配比の関係により、流れの規模が大きくなると相変化現象が生じ、層流層と乱流層からなる2層の流れになることが示され、その限界は  $\bar{R}_D = 4000 \sim 5000$  程度であることが示された。

**参考文献** 1) 江頭ら：水工学論文集，44，677-682，2000，2) 橋本ら：土木学会論文集，No.545，33-42，1996，3) 江頭ら：京大防災研年報，37B-2，359-369，1994，4) 高橋ら：砂防学会誌，Vol. 55，No. 3，33-42，2002，5) 伊藤：立命館大学学位論文，2000，6) 伊藤ら：水工学論文集，49(2)，895-900，2005，7) Gilbert, G. K.: USGS Prof. Paper, 86, 1914, 8) Guy, H. P., D. B. Simons and E. V. Richardson : Professional Paper 462-I, U. S. G. S., 1966, 9) 芦田ら：京大防災研年報，13B-2，233-242，1970。



**図-3** 平衡勾配と輸送濃度の関係



**図-4** 無次元パラメータと平衡勾配比の関係