

第 部門 土石流における相変化と土砂輸送能力の関係

立命館大学大学院 学生員 樋田 祥久 立命館大学理工学部 フェロー 江頭 進治
 立命館大学理工学部 正会員 伊藤 隆郭 立命館大学防災システム
 研究センター研究員 正会員 磯部 智彦

はじめに 砂粒子が層流流動することを想定した江頭らの構成則を用いると、土石流から掃流砂流にまたがる広い流れの領域における流れの特性値が概ね説明できることが明らかになっている¹⁾。また、砂粒子が層流流動する時には、土砂輸送濃度は平衡勾配に対して一意的に定められることも示されている。一方、微細砂を用いた実験によると、砂粒子径の減少に伴い、平衡勾配は小さくなることが指摘されている²⁾。さらに、現地および水路実験のデータを整理した研究^{3),4)}においては、水深粒径比（相対水深）が大きくなると流速係数が粗面上の清水乱流のそれに近づくことが示されている。これらの研究結果は、流れの規模が大きくなると流れの一部に乱流層が形成され、砂粒子の運動が液相として評価されること、すなわち、相変化を生じている⁵⁾ことを示唆している。そこで、本研究では流れの規模を変化させて、相変化と土砂輸送能力の関係について実験的に検討する。

水路実験 実験では、図-1のような幅 5.0cm 長さ 12.0m の可変勾配式矩形断面水路を用いる。水路床には実験で用いる砂を貼り付けてある。水路下流端より 8.0m の位置の混合タンクで砂と水を混合し、水路に定常に流下させる。水路下流端に高さ 10cm の堰を設置し、水路内に移動床流れを形成させている。移動床区間は、下流端から 5.0m~7.0m の区間で十分長く形成されている。なお、実験に用いた材料はほぼ一様な砂で次のようである。粒径 $d=0.0292\text{cm}$ 、内部摩擦角 $\phi_s=38.3^\circ$ 、粒子比重 $\gamma_s=2.65$ 、静止堆積濃度 $c_{*s}=0.537$ 。実験では、混合物の単位幅流量 q_m を 10, 30, 50, 100, 200 (cm^2/s) と変化させることによって流れの規模が土砂輸送能力に与える影響をみる。測定項目は混合物の流量、流砂量、平衡勾配、水深および流速であり、流れが平衡状態に達した時点で測定する。流量、流砂量は水路下流端で測定し、平衡勾配は水路側壁から測定される水位、河床位より求めている。流速分布と水深は水路下流端 65cm の設置したハイスピードビデオカメラの画像解析により測定している。流速分布は、混合物の流量を用いて補正されている。表-1 は実験条件の一部を示したものである。ここに、 d は砂の粒径、 ϕ_s は河床の平衡勾配、 q_m は混合物の単位幅流量、 h_t は全流動深、 c_f は輸送濃度、 u は摩擦速度 ($=\sqrt{gh_t \sin \theta}$)、 w_0 は無次元掃流力、 w_0 は清水における砂の沈降速度の実測値、 R_{e*} は粒子レイノルズ数、 F_r はフルード数、 R_e はレイノルズ数、 T は水温である。

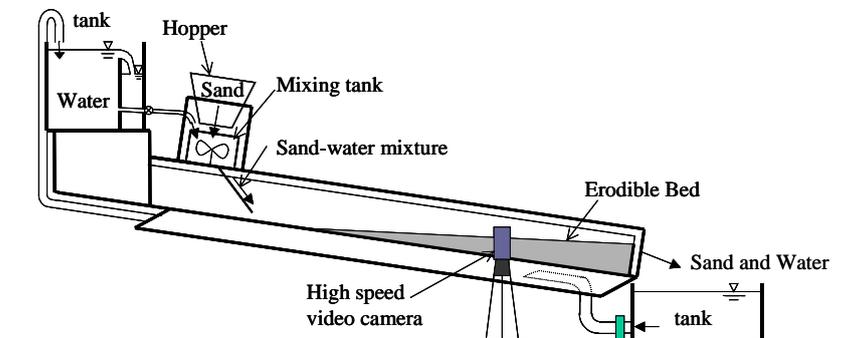


図 - 1 実験装置

相変化と土砂輸送能力 図-2 は平衡勾配 ϕ_s と輸送濃度 c_f に関する実験データである。この図には単位幅流量 q_m がほぼ 10, 30, 50, 100, 200 (cm^2/s) の実験値がプロットされている。また、江頭らの構成則を用いて得られた計算値¹⁾（以下、厳密解）も掲載している。この図を見ると、 $q_m = 10$ (cm^2/s) のデータは厳密解と一致しており粒子が層流流動していることが分かる。一方、 $q_m > 10$ (cm^2/s) となると、厳密解とのズレが生じると共に、

表 - 1 実験条件（一部）

Run	d (cm)	ϕ_s (deg.)	q_m (cm^2/s)	h_t (cm)	h_t/d	c_f	u (cm/s)	*	w_0 (cm/s)	w_0/u_τ	R_{e*}	F_r	R_e	T ()
003	0.0292	9.72	9.71	0.336	11.5	0.117	7.46	1.2	3.67	0.492	16.7	1.59	746	11
113	0.0292	9.75	29.8	0.539	18.4	0.176	9.45	1.93	3.67	0.388	19	2.41	2049	7.2
001	0.0292	9.49	49.8	0.87	29.8	0.189	11.9	2.98	3.67	0.31	39.4	1.96	5668	24
017	0.0292	9.83	102	1.19	40.9	0.257	14.1	4.31	3.67	0.26	27.5	2.5	6812	6.2
010	0.0292	10	216	1.6	54.8	0.27	16.5	5.87	3.67	0.22	34.2	3.41	15329	8.3

単位幅流量が大きくなるほど輸送濃度は増加している。すなわち、流量を増加させていくと土砂輸送能力が大きくなること分かる。なお、平衡勾配 θ_e が約 9° 以下の流れ領域においては、anti dune や chute & pool などの河床波が形成され、平衡勾配のデータが得られなかった。高濃度流れにおける河床波の発生・形成については、今後、検討する必要があると思われる。

次に、流速分布をみる。図-3は $\theta_e = 10^\circ$ で単位幅流量 q_m がほぼ 10, 30, 50, 100, 200 (cm^2/s) の流速分布である。また、図には厳密解も載せている。 $q_m = 10$ (cm^2/s) の流速分布は厳密解と一致しており粒子が層流流動していることが分かる。一方、 $q_m > 10$ (cm^2/s) のデータと厳密解との間にはズレが生じていると共に、そのズレは流量の増加に伴い大きくなっている。さらに、河床近傍の流速分布をみると、粒子の運動が層流である流速分布形に類似している。また、厳密解の分布形とも酷似している。一方、水面近傍においては、流速のばらつきがみられ、それが流量の増加に伴い大きくなっている。これは水面近傍に乱れの卓越する流れが生じていることを示すものである。これらのことから、流れの規模の増加に伴い、河床近傍（下層）では砂粒子が層流流動し、水面近傍（上層）では乱流が卓越し、流れ全体の中に一部乱流層を有する二層構造となっている。

図-2 と図-3 を総合すると、土砂輸送能力、すなわち、輸送濃度の増加は、水面近傍に形成される乱流層の形成により生じていることが分かる。これは、砂粒子の運動が固相のものから液相のものへと遷移する相変化が生じていることを示すものである。おわりに 相変化と土砂輸送能力の関係について実験的に検討した。土砂の輸送能力の増加は相変化が生じることで、砂粒子が層流流動する流れの一部に乱流流れが卓越する層が形成されることでもたらされる。その結果、下層では砂粒子が層流流動し、上層では乱流が卓越する二層構造となり、流れの規模が大きくなると上層の厚さが増加する。

参考文献 1)伊藤隆郭：土石流の構成則およびその適用に関する研究、立命館大学学位論文 2000年12月、2)江頭・佐藤・千代：砂粒子を高濃度に含む流れに及ぼす砂粒子径の影響、1994年 京大防災研究所年報 第37号 B-2 1994 pp.359-369、3)高橋保：土石流・泥流の流動機構、土砂移動現象に関するシンポジウム論文集、p39-55、1992、4)橋本ら：泥流の抵抗則に関する研究、水工学論文集、39、495-500、1995、5)伊藤隆郭・江頭進治：土石流の流れに及ぼす砂粒子径の影響、水工学論文集、49、895-900、2005

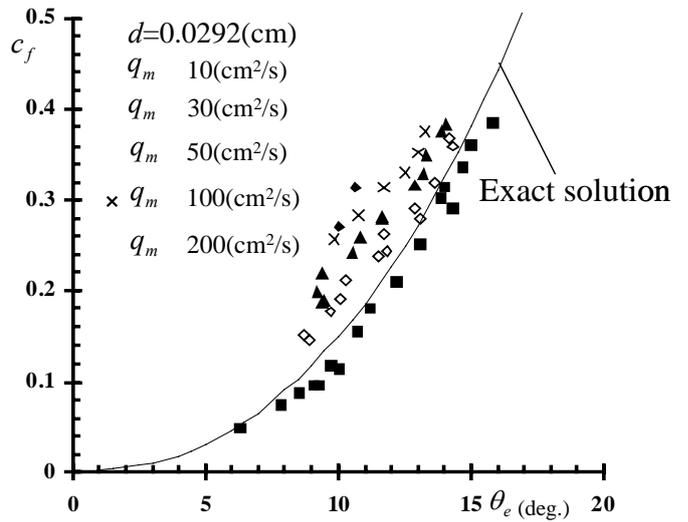


図 - 2 輸送濃度と平衡勾配

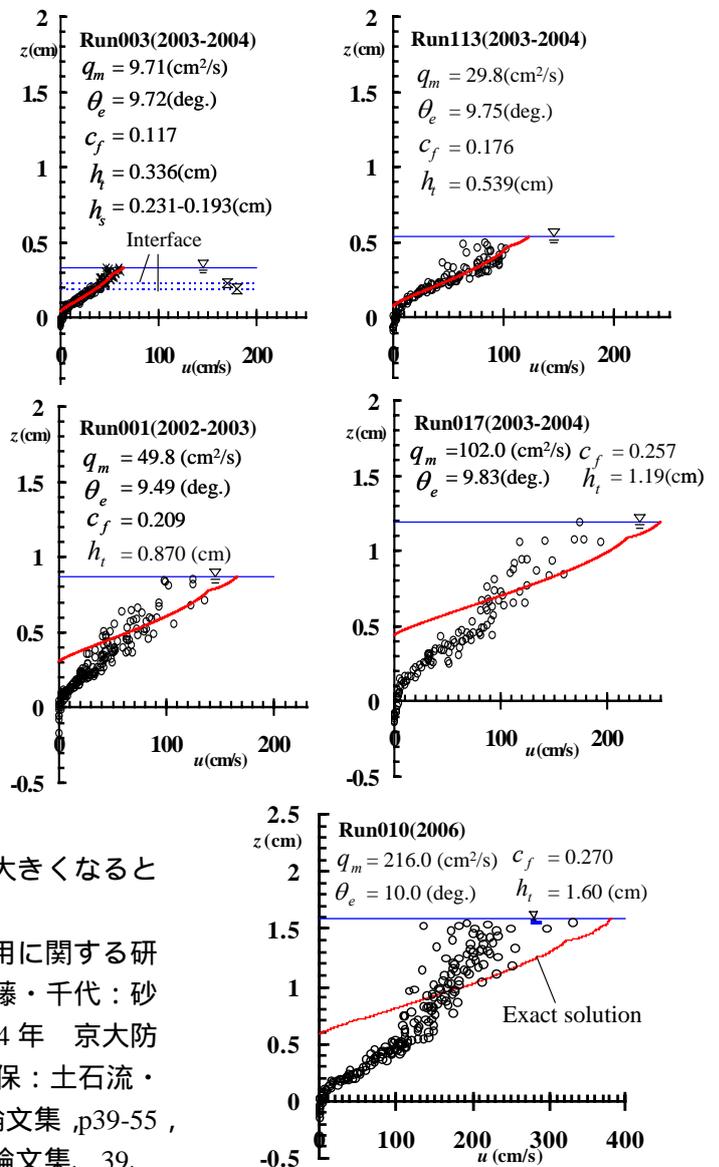


図 - 3 流速分布