

急勾配水路における集合流動に関する実験的研究

Experimental Study of the particle flow in a steep channel

早稲田大学理工学部 学生員 ○阿部 達也
早稲田大学理工学部 正 員 吉川 秀夫
早稲田大学理工学部 学生員 佐藤 修
早稲田大学理工学部 学生員 水野 義之

1. はじめに

急勾配斜面上の土砂堆積層に、その浸透能を上まわる水を供給すると表面流が生じ、それと同時に土砂の集合流動化現象が発生する。¹⁾又、その斜面勾配や給水条件などによっては、土砂の段波を生ずる事が知られている。このような現象は、大きな災害をもたらす土石流現象に通ずるものであり、これまでに数多くの研究がなされている。しかしながら、土石流の発生限界条件や土石流段波の特性などに主眼を置いた研究が多いといえよう。本研究は、基本的な集合流動現象について実験を行ない、考察したものである。具体的には勾配が1/20 から3/10 の範囲、つまり、土砂の運搬形式が掃流状態から集合流動状態までの範囲の実験を行ない、動的平衡時における流砂量や集合流動土砂層の流速分布、濃度分布状態を実験的に検討した。

2. 実験の概要

2-1 実験装置及び河床材料

幅5cm長さ2mのアクリル製長方形断面水路A、幅0.5cm長さ2mの幅が極端に狭いアクリル製水路Bの2種類の変勾配水路を用いて実験を行なった。上述したように、集合流動の基本的特性を知るために、使用した河床材料は、ほぼ球形で径 $d \div 0.2\text{ cm}$ のガラスビーズ(比重2.50、内部摩擦角 $\phi = 40.8^\circ$ 粘着力=0 定水位透水試験から透水係数 $= 2.35\text{ cm/s}$)を用いた。

2-2 実験方法

水路内に、あらかじめ、厚さD(水路A 5.5cm B 10cm 堆積層のビーズ体積濃度 $C_* \div 0.60$)にビーズを敷きならし、水路上流端から給水を行ない、ビーズの流動を発生させ、同時に元河床勾配を維持するようにビーズを供給した。ほぼ動的平衡状態とみなされた時に、側面からビデオカメラ、モータードライブ付カメラで撮影を行ない、流動状況を調べた。一方、下流端で流送されたビーズと水を、ある時間毎に採取し、ビーズ量、流水量を測定し動的平衡であったかをチェックした。

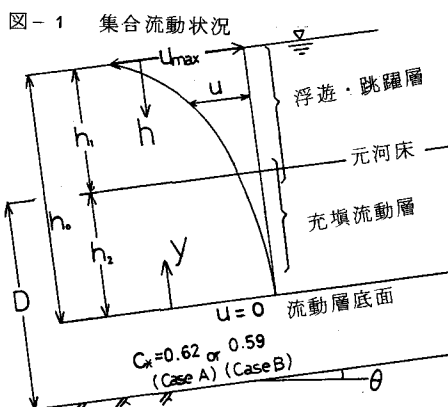
2-3 実験諸量と概況

実験諸量を表-1に示す。水路Aを用いた実験をCase Aとし、幅5cmという普通的水路における集合流動の一般的情况を知る事を目的とした。一方、幅0.5cmという特殊な水路Bを用いた実験をCase Bとした。これは、水路Aを用いた場合、水路幅が厚いため、相当な速さで流動する水面付近の粒子をとらえる事がビデオ撮影で困難であったため、それを得る目的と、さらに重要な課題として、これまでの研究においては、集合流動する流れ方向に対して、垂直方向の土砂の濃度分布が得られておらず、水路下流端から流出する土砂の平均濃度で問題を処理しているため、この濃度分布を得る事を目的として、ビーズ粒子2.5粒径分の幅0.5cmの水路Bを用いるものである。又、この時、

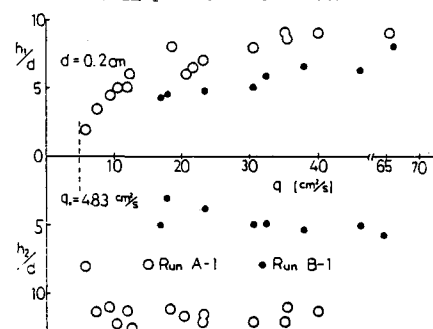
表-1 実験諸量

Case	勾配 I	Run	単位幅流水量 cm ² /s	流送形態
Case (A) 水路A	1/5	A-1 ①-②	5.68 ~ 65.6	集合流動
	1/10	A-2 ①-②	6.47 ~ 10.3	掃流(交互砂洲を形成)
		A-2 ③-⑩	13.9 ~ 120	掃流 (flat bed)
	1/20	A-3 ①-⑥	19.3 ~ 166	掃流 (flat bed)
Case (B) 水路B	3/10	B-1 ①-⑭	12.0 ~ 73.1	集合流動的
	1/5	B-2 ①-⑮	24.0 ~ 81.4	やや集合流動的
	1/10	B-3 ①-⑦	27.0 ~ 123	掃流

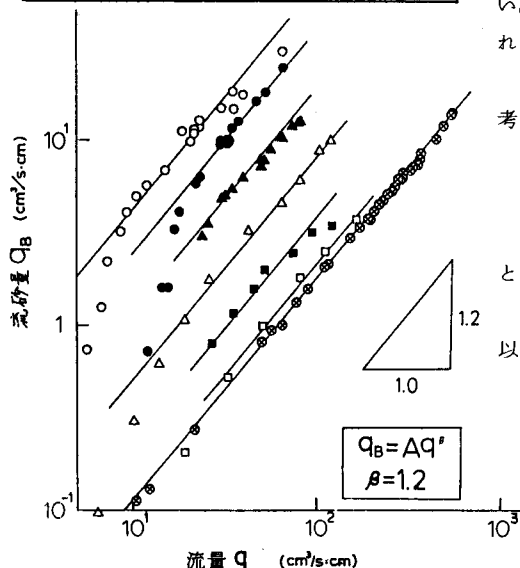
実験の結果、集合流動の概況 (Case A-1、B-1) は、図-1 のようになった。水面付近までビーズ粒子は存在し、流水のみの層、表面流²⁾の層を区別する事はできず、(但し、より緩い勾配では区別できた。) ビーズ粒子が流水によって、跳躍しながら流送されたり、水面付近まで跳ね上げられ、浮遊状態的に流下する浮遊・跳躍層と、ビーズ粒子が密に詰って集合流動を起している充填流動層とに大別できた。単位幅当りの流量 q と元河床から水面までの距離 h_1 、流動層底面までの距離 h_2 との関係を図-2 に示す。流量が大きくなっても、 h_1 、 h_2 の値はあまり増加していない事がわかる。



単位幅あたりの流砂量 q_B と流量 q との関係を実験結果から求めると、掃流状態から集合流動状態の範囲まで、図-3のように勾配別に分類される事が明らかである。しかし、流量が少ない領域では同図中の直線からはずれる。CaseA-2の場合では、交互砂洲を形成している事から、流送形態がやや異なっているためと考えられる。さらに、集合流動を生じたCaseA-1



Case	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	角田 ⁴⁾
I	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{21}$
A(10 ³)	27.0	3.21	0.84	15.5	7.60	1.52	0.72
記号	○	△	□	●	▲	■	⊗



石川が示した掃流力が十分に大きな領域での流砂量式の考えによると

$$\frac{q_B}{1+\alpha} = K \tau_*^a \quad a = 1 \sim 2 \quad (1)$$

$$\tau_* = u_*^2 / (\sigma / \rho - 1) g d \quad u_* = \sqrt{g h l e} \quad (2)$$

$$q = h^{5/3} I e^{1/2} / n \quad (3)$$
$$q_B = \alpha \cdot q^\beta \cdot I^r \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{K \cdot d \cdot g^{\frac{2a+1}{2}} \cdot n^{\frac{3(2a+1)}{10}}}{\{(\sigma/\rho-1) \cdot g \cdot d\}^m} \quad (5)$$

$$\beta = 3(2a+1)/10 \quad r = 7(2a+1)/10 \quad (6)$$

ここで u_* : 摩擦速度 d : 平均粒径 h : 水深
 K, a : 定数 Ie : エネルギー勾配
 n : Manningの粗度係数 τ_* : 無次元掃流力
 σ, ρ : 砂, 水の密度 g : 重力加速度

角田らは、場所的・時間的に動的平衡である場合の $1/60$
 $\sim 1/100$ の勾配範囲の流砂量式を、(4)式の形式を用いて、

$$q_B = \alpha q^{1.20} I^{1.60} \quad (7)$$

と示した。(但し、河床材料は比重 2.66 $d=1.16$ mm の一様粒径の相馬砂 図-3 に一例を示す。) 本実験では、図-3 のように、集合流動の勾配範囲まで $\beta = 1.20$ という値があらはれることが確認された。しかし、 r の値は、データ数が少ないため定かではなく、 $1.6 \sim 2.5$ ぐらいを示した。おそらく、 r は流砂形態によって大きく変化する乗数と考えられる³⁾。又、 α の値は、河床の性質を示す n や $d \cdot (\sigma/\rho - 1)$ を含むことから、集合流動状態の場合は、堆積層土砂の内部摩擦角 ϕ が関係すると推定できる。ちなみに、水山の提示した $1/20 < \text{勾配} I < 1/4$ における掃流状土石流の流砂量実験式は、(4)式と同形式であり、 $\alpha=5.5$ $\beta=1.0$ $r=2.0$ である。

以上より、集合流動を生じている場合の流砂量と流量の関

図-4 流量 q と流砂量 q_B の関係
 (Case A-1)

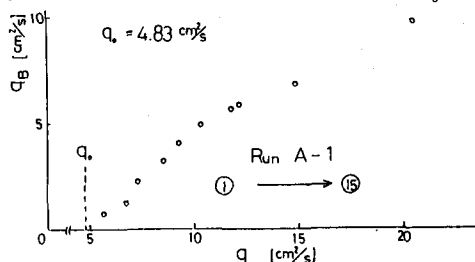
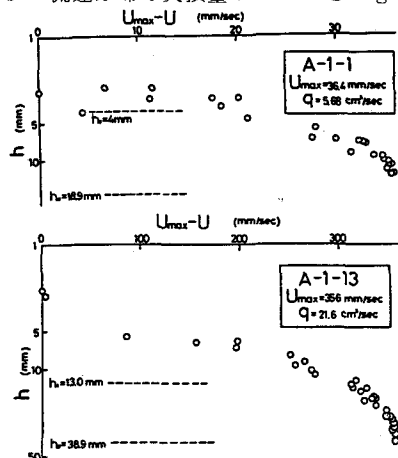


図-5 流速分布 (欠損量 $U_{max}-U$ と $\log h$)



係を各勾配において、今のところ、次の(8)式で表わすと、

$$q_B = A q^\beta \quad \beta = 1.20 \quad A: \text{定数} \quad (8)$$

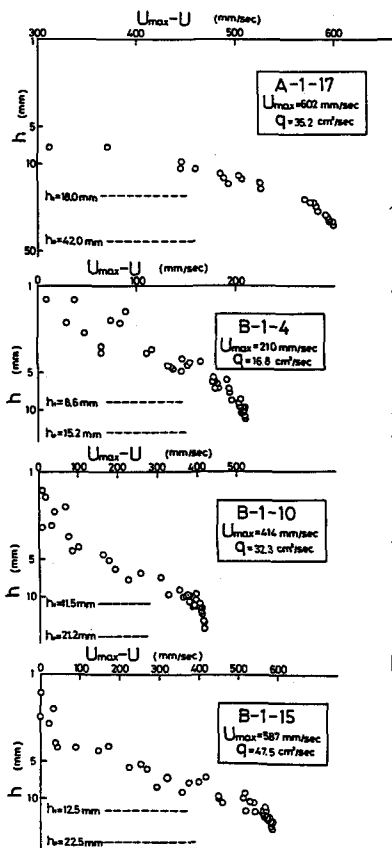
$$\bar{c} = \frac{q_B}{q_B + q} = \frac{1}{A^{-1} \cdot q^{1-\beta} + 1} \quad (9)$$

流動する土砂の平均体積濃度 $\bar{c}$ は、(9)式となる。 $\bar{c}$ の値は各勾配に対して決まる定数 A で、ほぼ定まるが、 $\beta = 1.20 > 1.0$ より、流量 q の増加とともに、 $\bar{c}$ も若干増加して行くことがわかる。

4. 集合流動層内の流速分布等について

ビーズ粒子の流速分布について検討する。まず、速度欠損量 $U_{max}-u$ (U_{max} : 水面付近のビーズ or トレーサの最大速度、 u : ある位置におけるビーズ粒子速度) と水面からの距離 h との関係は、図-5 となる。明らかに、元河床付近を境に流速分布が異なる。水路 B は、側壁の拘束があるため元河床より下の速度分布に影響している事がわかり、かなり粒子速度はおさえられている。したがって、水路 A (case A-1) について、元河床より下の充填流動層の流速分布を水路 B (case B-1) について、浮遊・跳躍層の流速分布を以下において調べる。

図-5 流速分布 (欠損量 $U_{max}-U$ と $\log h$)



(1) 充填流動層内の流速分布

元河床より下は、ほぼ密にビーズ粒子が詰まっており、粒子速度も比較的遅いので、土質力学的に考え、流水の影響を無視して、静的な力のつりあい条件を^{1) 5)}あてはめると、図-6 (a) となる。ここで、

$$\text{せん断抵抗力 } \tau_L = g \cos \theta \left[\int_0^h c dh (\sigma - \rho) \right] \tan \phi \quad (9)$$

$$\text{せん断力 } \tau = g \sin \theta \left[\int_0^h c dh (\sigma - \rho) + h \rho \right] \quad (10)$$

$$\text{作用しているせん断力 } \tau_\theta = \tau - \tau_L \quad (11)$$

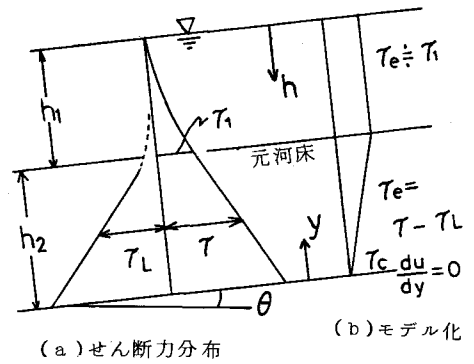
であり、 c は h におけるビーズ粒子の体積濃度である。 $h = h_0$ で、 $\tau = \tau_L$ 、 h_2 の範囲では、 $\tau > \tau_L$ であり、深さ方向に直線分布すると考えると、 τ_θ は図-6 (b) のように、流動層底面から元河床まで直線分布し、 $h = h_1$ で、 $\tau_\theta = \tau_1$ (τ_1 : 元河床におけるせん断力) であるとモデル化できる。ここで、 h に代えて流動層底面からの距離 y を用いると、

$$\tau_\theta = \frac{\tau_1}{h_2} y \quad (12)$$

$$\tau_1 = g h_1 \sin \theta [\bar{c}_1 (\sigma - \rho) + \rho] \quad (13)$$

となる。ここで、 $\bar{c}_1$ は元河床より上のビーズ粒子の平均体積濃度とする。

図-6 せん断力分布について



(a) せん断力分布

(b) モデル化

図-7 流速分布 ($\log u$ と $\log y$)

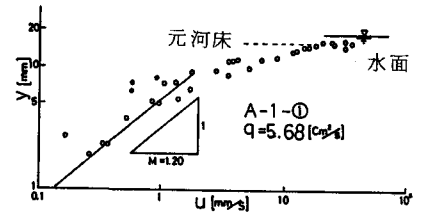
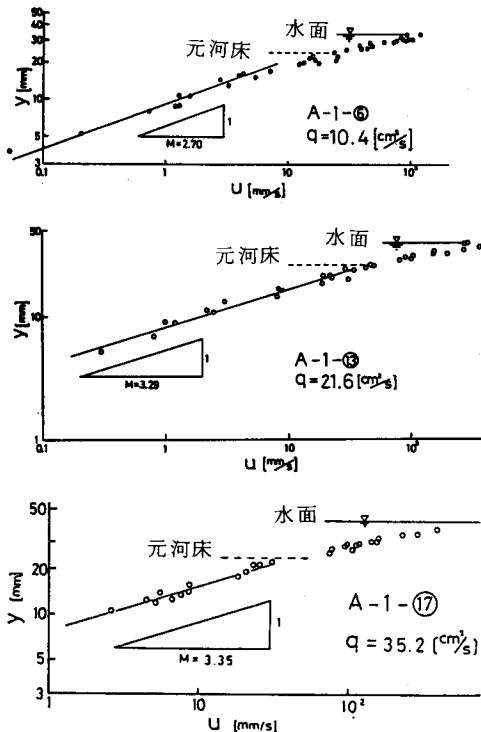


図-7 流速分布 ($\log u$ と $\log y$)



一般に、せん断力 τ とひずみ速度 du/dy の関係は、

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^m \quad \mu: \text{粘性係数} \quad m: \text{ベキ指数} \quad (14)$$

である。(12) (14) 式より、 $y=0$ で $\tau=0$ という条件を付すと

$$u = \left(\frac{\tau_1}{\mu h_2} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{m}{1+m} y^M \quad M = \frac{m+1}{m} \quad (15)$$

$$\begin{array}{ll} m < 1 & u \propto y^M \quad M > 2 \quad \text{擬塑性流動} \\ m = 1 & u \propto y^M \quad M = 2 \quad \text{ニュートン流動} \\ m > 1 & u \propto y^M \quad M < 2 \quad \text{ダイラタント流動} \end{array}$$

y と粒子速度 u の関係を調べた図が、図-7 である。 y の増加にともない、除々に傾き M は大きくなる。おおよそ M の値を定めると、 $M \div 1 \sim 4$ となる。つまり、ダイラタント流動～擬塑性流動までの流動特性を見掛け上示している。大田⁽⁵⁾⁽¹⁾⁽²⁾が提案している、 $m=2$ $M=3/2$ という、ダイラタント流動とは異なる実験結果となった。著者らは、 $m=1$ のニュートンの流動法則で、土砂濃度 c と粘性係数 μ が対応しているとし、集合流動現象をとらえられると考えている。

$$\tau_\theta = \mu_a \frac{du}{dy} \quad (16)$$

と考え、各 y において、(12) (13) 式から τ_θ を求め、実験から得た流速分布より du/dy を求め、(16) 式を用いて、見掛

けの粘性係数 μ_a を求めると図-8 が得られる。同図より、 y の値が小さいほど、つまり、流動層の下の方ほど、 μ_a が大きく変形しにくくなっていることがわかる。さらに、 y におけるビーズ粒子濃度 C が、 μ_a と一義的な対応を示していると考えられる。しかし、現在のところは正確な C の値が、求まっていない。これは、今後の課題とされる。

(2) 浮遊・跳躍層内の流速分布

元河床よりも上の領域は、流水の影響により、粒子速度が下の層よりも相当速く、粒子の上下方向の移動も激しい。ビーズ粒子の濃度分布を、図-9 に示す。おおよその状態がつかめ、水面付近ではかなり疎になっている。したがって、この領域を土質力学的に説明する事は当然できない。一方、粒子の流速分布は、粒子が激しく saltation しているため、厳密なものとは得られないが、図-10 より、水面から元河床まで、直線分布と仮定してもよいといえる。つまり、 du/dy は一定とみなすわけであり、浮遊・跳躍層内のせん断力 τ_0 は一定で、 τ_0 と考えられ、図-6 (b) のように、モデル化できる。実際には、流れの中で、ほぼ一定の τ_0 に対応して粒子の濃度分布が、定まっていると推測される。

ここで、前述の (16) 式と同様に、

図-8 充填流動層内の見掛けの粘性

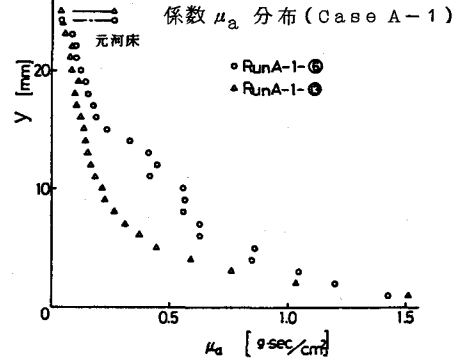


図-9 ビーズ粒子の濃度分布 (Case B-1)

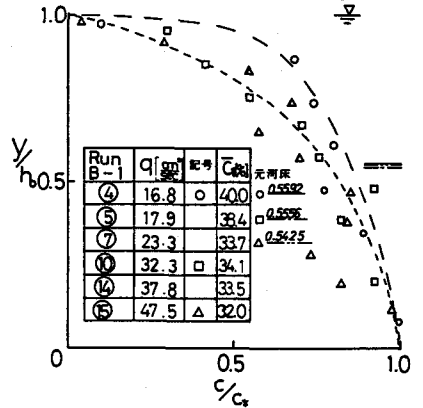
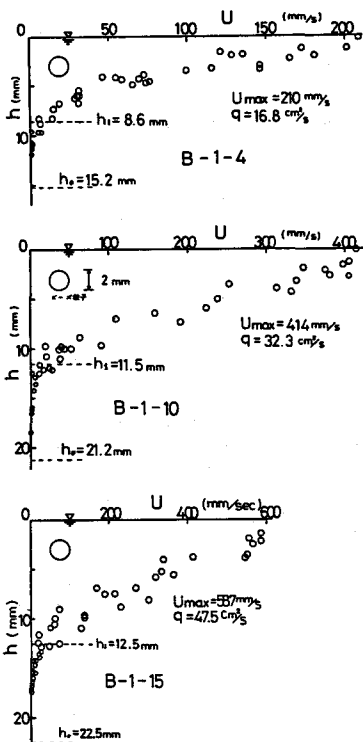


図-10 流速分布 (u と h)



$$\tau_0 = \mu_a \left(\frac{du}{dy} \right) = \mu_a \frac{U_{max}}{h_1} \quad (17)$$

と考え、 $U_{max} h_1$ の実験測定値を代入して、見掛けの粘性係数 μ_a を求め、流量 q との関係求めた図が、図-11 である。 μ_a の値は、 $0.01 \sim 0.02 \text{ g sec/cm}^2$ の範囲で流量 q の増加にともない、 μ_a は減少する傾向があり、ビーズ粒子がより流れやすくなっている目安となる。

5. おわりに

以上、本実験結果から、動的平衡の場合の急勾配水路における集合流動について、次の事が明らかになった。

- ① 同一勾配において、流量の少ない範囲とある程度多い範囲では、流動状態が異なる。後者は、流水の影響が、大きい場合である。
- ② 集合流動流砂量は、流量がある程度多くなると、各勾配ごとに、(8)式で表わされる。
- ③ 平均土砂濃度は、(8)式から求め、流量の増加にともない、徐々に増加するが、各勾配ごとに定まる定数 A の値でほぼ決まる。

- ④ 集合流動層では、水面に近いほど流水の影響を受ける。
 しかし、その特性から便宜的に二層に大別できる。
- ⑤ 一般に砂粒子の集合流動は、ダイラタント流動とされているが、再考の余地がある。

本研究は、集合流動の現象を実験的に追ったにすぎないので、今後は、集合流動機構を解明する努力が必要である。この時、ニュートンの流動法則を適応し、粒子の空隙率と粘性係数が対応するものと考え、集合流動を説明する事がより妥当であると思われる。

最後に、実験に協力していただいた本学学生 橋本 進君
 田中 等君に感謝致します。

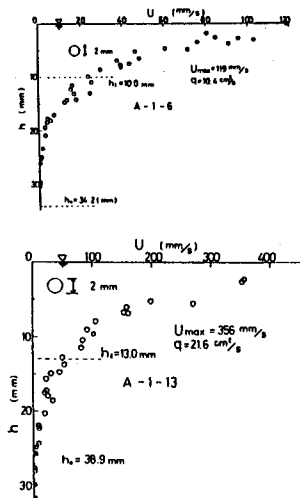
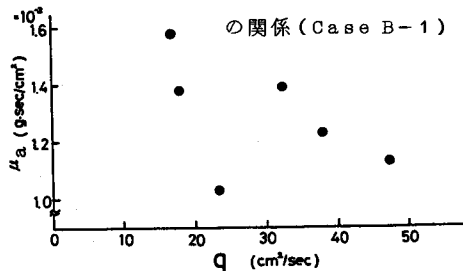


図-11 流量 q と見掛けの粘性係数 μ_a



参考文献

- 1) 高橋 保：土石流の発生と流動に関する研究、京大防災研年報第20号 B-2 S52. 4
- 2) 水山高久：土石流から掃流に変化する勾配での流砂量、新砂防116号 S55. 8
- 3) 石川忠晴：ダム建設等による大規模な河床変動の新計算法、土木技術資料 S55. 3
- 4) 角田学他：射流領域におけるダム堆砂について、第25回水理講演会論文集 S56.
- 5) 大同淳之：急こう配上の多量の砂れきを含む流れの流動特性、第18回水理講演会論文集 S49.
- 6) 大同淳之：堆積物の集合流動の発生限界、第17回水理講演会論文集 S48.