

粒 状 体 の 流 動 機 構 に つ い て

The mechanism of granular mass flow

早稲田大学 大学院 学生員 川 端 淳 一
早稲田大学 理工学部 学生員 迫 田 浩 司
早稲田大学 理工学部 学生員 榎 永 善 文
早稲田大学 理工学部 正 員 吉 川 秀 夫

1 はじめに

本研究は粒状体の流動機構を解明するため、内力の変数が少ない粒子のみの流動、及び静水中の粒子の流動について実験を行ないその内部機構を調べようというものである。著者らは、¹⁾以前に流動中の空隙率に注目して若干の取扱いを行なったが、今回もその手法を元にさらに考察を進める。

2 実験の概要

2-1 実験装置及び実験材料

実験装置として図1に示す幅5 cm長さ2 mの亚克力製長方形断面水路A、及び図2に示す幅6 cm長さ2 mの密閉型亚克力製水路B、の2種類を用いた。水路Bは静水中の粒子流動を調べるために製作したもので、中に貯水できるようにしている。流動粒子として粒径0.5 cm、密度 2.5 g/cm^3 の均質なガラスビーズを用い、河床には流動粒子と同じガラスビーズを敷きつめたもの、粒径1.7 cmのビー玉を敷きつめたものの2種類を使った。

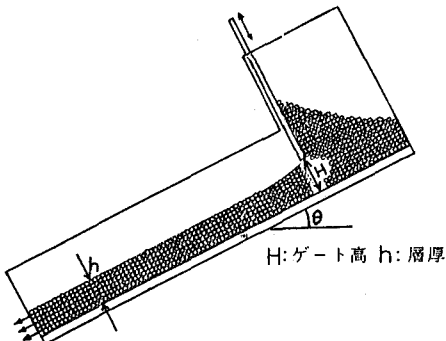


図 1 実験装置(実験Ⅰ)

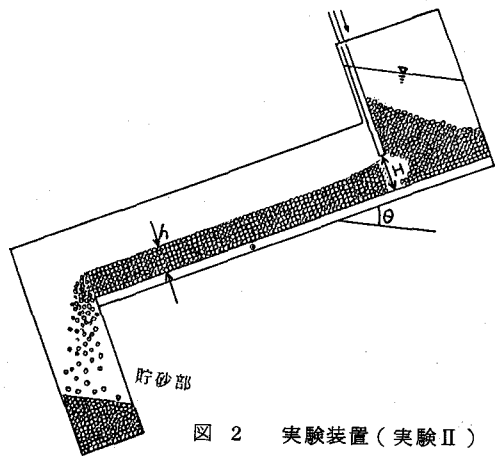


図 2 実験装置(実験Ⅱ)

2-2 実験方法

水路Aに粒径0.5 cmのガラスビーズを粗度として用いた場合を実験Ⅰ-1、粒径1.7 cmのビーズを用いた場合を実験Ⅰ-2、水路Bに粒径0.5 cmのガラスビーズを粗度として用いた場合を実験Ⅱとする。実験Ⅰ、実験Ⅱとも、上流端からガラスビーズを給砂し、水路の入口に設けたゲートを上下させることによって層厚を変化させた。流動が発生しほぼ定常状態と見なされた後、上流から約1.5 m下流地点の流動状況をビデオで追い流速分布を測定した。流砂量は水路Aについては下流端でビーズを直接採取することによって求め、水路Bについては貯砂部にビーズがたまる様子のある時間毎に記録し、別に静水中でガラスビーズが自然落下してたまった場合の濃度を測定しそれに乗じることによって求めた。

3 実験結果及び考察

実験諸量を表1に、ゲート高と流砂量の関係及びそれぞれの実験での代表的な流速分布を図3から図8に

表 1 実験諸量

		勾 配 (degree)	RUN		流速分布 形 状	case	ゲート高 (cm)	層 厚 (cm)	空 隙 率	最大流速 (cm/S)
I - 1	空 気 中 固定床 (ビーズ 0.5 cm)	27	a	1.2	直 線	I	4 ~4.5	3.5 ~4.25	0.76~0.85	112~120
				3~13	曲 線	II	5 ~10	4.25~6.25	0.32~0.42	46~ 68
		30	b	1~6	直 線	I	5.5 ~8	4.5 ~5.5	0.68~0.77	129~155
				7~10	曲 線	II	8 ~10	5.5 ~7	0.34~0.49	102~130
I - 2	空 気 中 固定床 (ビーズ 1.7 cm)	27	d	1~13	曲 線	II	4.5 ~10.5	3.85~5.98	0.38~0.45	7.8~28.3
				30	e	1~13	曲 線	II	4.5 ~10.5	3.78~6.69
		32	f	1		直 線	I	4.5	4.18	0.9
				2~13	曲 線	II	5 ~10.5	4.2 ~6.7	0.54~0.6	90~120
II	水 中 固定床(ビーズ 0.5 cm)	27	g	1~3	直 線	I'	4 ~15	2.55~5.0	0.30~0.46	23.5~40.1
				30	h	1.2	直 線	I'	4 ~10	2.5 ~2.8
		3	下向き曲線			III	15	3.39	0.52	68.6
		32	i	1~3	下向き曲線	III	4 ~15	2.6 ~3.2	0.52~0.83	71.5~93

示した。

3-1 実験 I の結果

流動状況ははっきりと 2 つの case に分けられた。すなわち勾配を急にし、あるいはゲートを下げ流砂量を減らしていくと、平均空隙率 E が大きくなり平均流速が増して流速分布は直線の形状を示す(これを case I とする)。一方勾配を緩くしあるいはゲートを上げて流砂量を増していくと、平均空隙率 E が小さくなり平均流速は減って流速分布は曲線形状となる(これを case II とする)。又図 3 に示されるように、流れが case I から case II に移るとゲート高と流砂量の関係の直線勾配も緩やかになる。

実験 I-1 と I-2 を比較すると、粗度の大きい I-2 の場合の方が流速が遅く流砂量も小さい。特に I-2 で、case I 流動は本実験の範囲で最も勾配が急でゲート高の低い RUN f-1 に限られた。

3-2 流動機構の

考察

case I 及び case II の流動機構について以下のような考察を行なった。

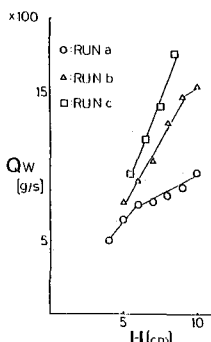


図 3 流砂-ゲート高(実験 I-1)

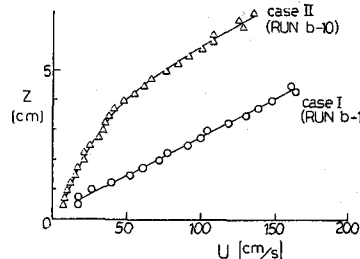


図 4 流速分布(実験 I-1)

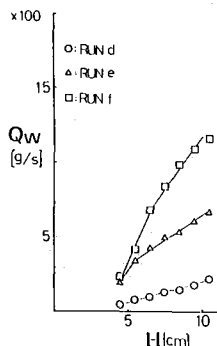


図 5 流砂-ゲート高(実験 I-2)

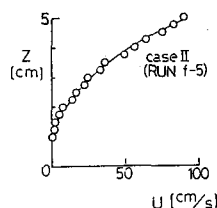


図 6 流速分布(実験 I-2)

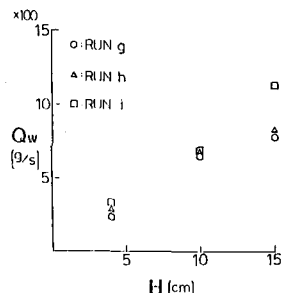


図 7 流砂-ゲート高(実験 II)

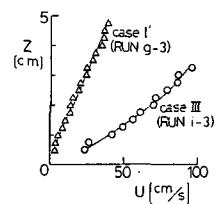


図 8 流速分布(実験 II)

まずCase IIについて考える。

粒状体内各層での流速はその層の重力の流下方向成分とその層に作用する抵抗力の比によって決まると考えられる。すなわち図9においてa層では

$$K_a = \frac{w \cdot \sin \theta}{q_{wa} \cdot \cos \theta \cdot \mu_a} \dots\dots\dots (1)$$

W：各層の重量 θ ：水路床勾配

q_{wa} ：a層から表層までの全重量

μ_a ：a層付近の動摩擦係数

b層では

$$K_b = \frac{w \cdot \sin \theta}{q_{wb} \cdot \cos \theta \cdot \mu_b} \dots\dots\dots (2)$$

q_{wb} ：b層から表層までの間の全重量

μ_b ：b層付近の動摩擦係数

で表される。 K_a 、 K_b の値が大きければ流速はより大きい値で平衡し、小さければ流速は小さくなる。今

$$K_a > K_b$$

であるからa層の粒子はb層の粒子よりも速い速度で流動することになる。粒状体では流速が速ければその乱れ成分も大きいと考えられるので、その結果空隙率もa層の方がb層より大きくなっていくだろう。すると μ_a の値が μ_b よりも小さくなり、 K_a の値がさらに増していく一方で K_b の値は小さくなっていく。こうしてa層とb層の間ではさらに流速に差ができる。こうした過程が流動層内全域で起きた結果生じたのが流速分布Case IIであると考えられる。

一方Case Iでは θ が大きいのか又は q_{wa} 、 q_{wb} が小さいので K_a 、 K_b ともに非常に大きな値となる。したがって流速の乱れ成分及び空隙率が全層にわたって大きく、あまり分布しない。このようにして平衡状態に達した結果生じたのが流速分布Case Iであり、これはCase IIにおける表層付近の流動状況に対応すると思われる。

以上の考察は図10に示す鉛直方向の流速の乱れ($\sqrt{V'^2}$)分布によく対応し、又この分布に対応するような空隙率分布が流動層内にあるものと思われる。

3-3 静水中の流動実験について

結果が図7、図8、及び、図11に示されている。今回の実験範囲内では実験IのCase IIに対応する場合は存在せず、Case Iのような流速分布(これをCase I'とする)や、勾配を急にしあるいは流砂量を少なくすると逆に集合流動に酷似した流速分布(これをCase IIIとする)が示された。この結果には静水中とはいえビーズの流動にともなって水自体が水路内で対流を起こしている影響が含まれると思われる。

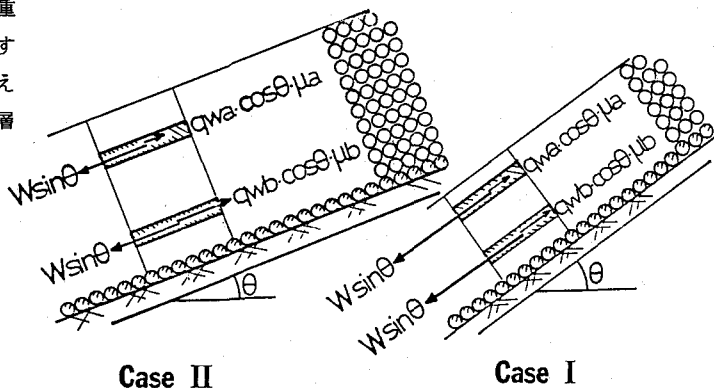


図9 実験Iの流動概況

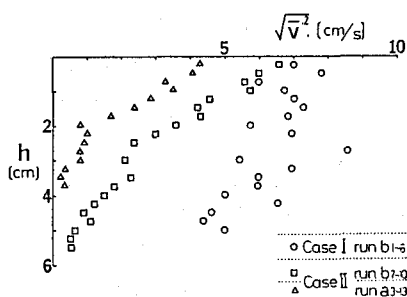


図10 $\sqrt{V'^2}$ 分布 (実験I-1)

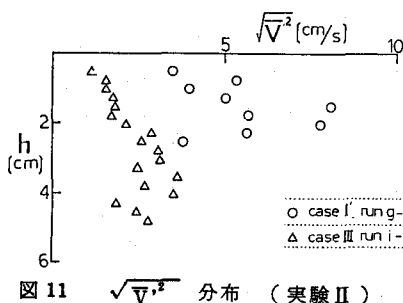


図11 $\sqrt{V'^2}$ 分布 (実験II)

又 3-2 で述べた考察をこの場合に適用すると、 μ の値が粒子間に存在する水によって非常に小さくなり又 q_w も浮力の影響で減るので、流速はさらに大きくなり（実際にはあまり実験 I と変わらないがこれは流体抵抗によると思われる。）空隙はさらに一様に分布すると思われる。

3-4 流動層内の空隙率分布の仮定（実験 I-1 について）

3-2 で述べた考察などから流動機構の解明には流動層中の空隙率の分布を明らかにすることが不可欠と考え、以下のような過程でその仮定を試みそれを利用して若干の考察を行なった。

まず流れ全体に着目しその空隙率が平均速度勾配と流れ方向の重力成分に関係するとして図 12, 図 13 を描き、それより次のような実験式を導いた。

$$\frac{U_{\max} - U_{\min}}{h} = N (E - E_0)^{0.6} I^{0.6} \dots\dots\dots (3)$$

$U_{\max}$: 最大流速 $U_{\min}$: 最小流速 h : 層厚

E : 平均空隙率 E_0 : 最小空隙率 (= 0.26)

I : ($= \sin \theta - \sin 23.5^\circ$, 23.5° : 流動発生の限界勾配)

次にこの式を図 14 に示すような方法で流れの各部に適用させそれぞれの平均空隙率 $E_1, E_2 \dots E_k \dots$ を得、さらにそれぞれの部分空隙率 $e_1, e_2, e_3 \dots e_k \dots$ を次式により算定する。

$$e_k = k E_k - (k - 1) E_{k-1} \dots\dots\dots (4)$$

この結果空隙率分布は各勾配と同様の傾向を示したので、各勾配ごとにまとめて表層からの距離 h の関数であらわしたのが図 15 である。この分布曲線を積分して求めた平均空隙率と実測値はほぼ一致し、又この分布は図 10 で示した流速の鉛直方向乱れ成分 ($\sqrt{V^2}$) 分布ともよく対応している。

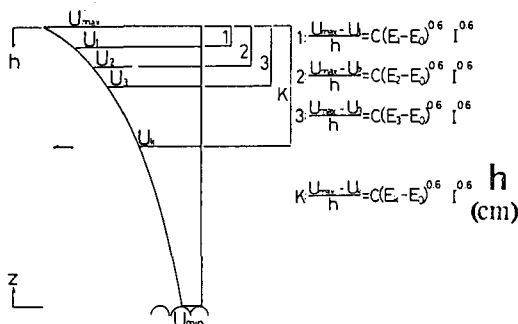


図 14. 空隙分布算定図

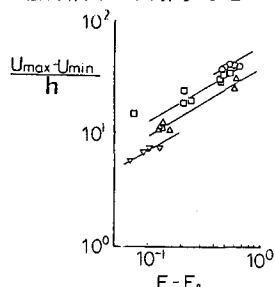


図 12 平均流速勾配と空隙率の関係

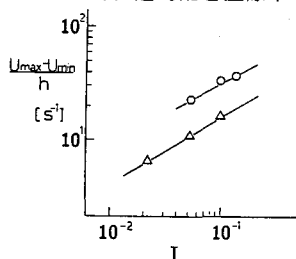


図 13 平均流速勾配と水路勾配の関係

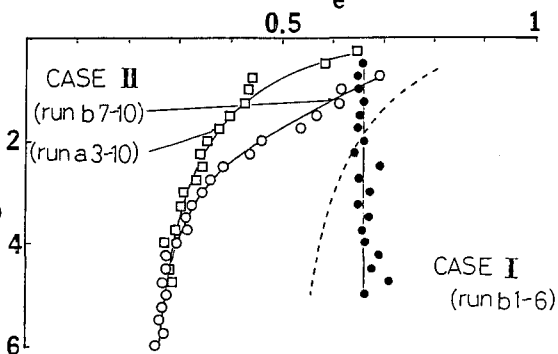


図 15 空隙率分布図

3-4 流速分布の理論的算定（実験 I-1 について）

ニュートン流体中の粒状体について R. A. Bagnold⁽²⁾ は次のような関係を導いた。

$$T = a \sigma (\lambda \cdot D)^2 (DU/DZ)^2 \sin \alpha \dots\dots\dots (5)$$

T : セン断力 a : 係数 D : 粒径 σ : 密度 α : 粒子どうしの衝突角

λ : 線濃度 ($= 1 / \{ (C_0/C)^{1/3} - 1 \}$) C : 濃度 ($C = 1 - e$)

C_0 : 最大濃度

本実験においてせん断力は次式で見積もる。

$$T = \sigma \cdot g \sin \theta \cdot h \cdot \frac{\int_0^h c(h)dh}{h} \tag{6}$$

h：流動層の表面からの距離 c(h)：濃度分布関数 (c(h)=1 - e(h))

したがって

$$\sigma g \sin \theta h \cdot \frac{\int_0^h c(h)dh}{h} = a \sin \alpha (\lambda(h) \cdot D)^2 (DU/Dh)^2 \tag{7}$$

$$(\lambda(h) = 1 / \{ (Co/c(h))^{1/3} - 1 \})$$

(7)式の両辺に図15で仮定した空隙率分布関数を代入すると、この関係が各RUNの各層で成り立っていることを示したのが図16である。図16より係数が決定できるので(7)式を変形した次式

$$DU/Dh = \left(\frac{\int_0^h c(h)dh}{a \cdot \sin \alpha} \right)^{1/2} \frac{1}{\lambda(h) D} (g \sin \theta)^{1/2} \tag{8}$$

に適当な初期条件を与えて積分すれば流速分布を得ることができる。こうして求めた流速分布と実測値を比較したのが図17～図19である。

両者はほぼ一致しBagnold の理論がこの粒子流に適用できるならば図15で仮定した空隙率はほぼ妥当であることが示された。ここで示されたCase IIの流速分布形状が実測値と多少異ったのは濃度の違いによる係数の変化が厳密に見積もれなかったことなどによると思われる。又Case Iの流速分布は仮定した空隙率分布が一定だったため、これに図10に示す鉛直方向の流速の乱れ ($\sqrt{V \cdot 2}$) 分布に合わせて多少補正 (図15中の点線に示す) して求めた。

4 おわりに

以上の結果から次のことが明らかになった。

- 。 粒子の流動には、空隙率、粒子間の摩擦係数などの違いによって、三つの異った流動機構が存在し、それぞれ流速分布形状が違う。
- 。 空気中の粒子流動についても、その空隙率分布を考慮すればダイラント流体モデルが適用できる。

今後の課題として次のようなことを明らかにする必要がある。

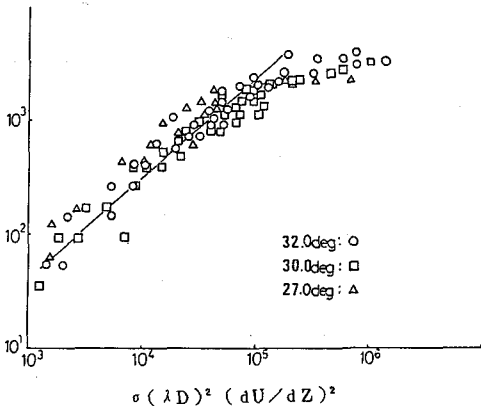


図 16 せん断力と $\sigma (\lambda D)^2 (dU/dZ)^2$ の関係

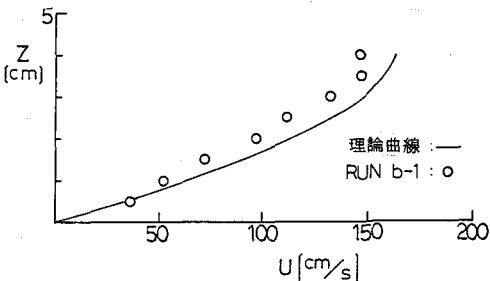


図 17 流速分布 (RUN b: Case I)

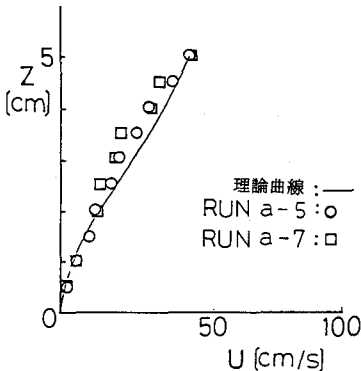


図 18 流速分布 (RUN a: Case II)

。 粒子流全体としての抵抗則を導き，流速公式等を明らかにする。

。 静水中実験も含めて，3-2で述べた考察を定量化してCase I, Case II, Case IIIの違いを数値であらわす。

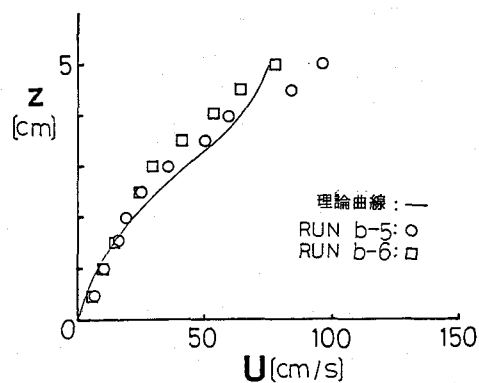


図 19 流速分布 (RUN b: Case II)

参考文献

- 1) 川端淳一：粒状体の集合流動機構について 第39回年次講演会
- 2) R.A.Bagnold : Experiment on a gravity-free dispersion of Large solid sheres in a Newtonian fluid under shear
- 3) 芦田和男, 高橋 保, 道上正規：河川の土砂災害と対策