

水路床上を転動する固体粒子の移動速度

The Speeds of Solid Grains, Rolling along a Smooth Bed, in Turbulent Flow

池田 宏*・小野有五*・泉 耕二*・川又良一*

Hiroshi IKEDA, Yugo ONO, Kouji IZUMI and Ryoichi KAWAMATA

I まえがき

掃流砂現象に関する最近の研究では、信頼に足る流砂量式の確立をめざして、砂床形の効果や混合効果が注目されているが、また同時に、砂粒子の移動機構も究明されつつある。ことに、流砂の量を問題にする際には、個々の粒子の移動速度が重要な点となる。なぜなら、DuBoys (1879) にしろ、Kalinske (1939) にしろ、従来の掃流砂量式の多くは、単位幅あたりの掃流砂量を、移動している粒子の水路単位面積あたりの重量と、その移動速度との積として導いているからである。

Bagnold (1973) は、平滑床上の躍動粒子の(平均)移動速度は、その粒子の周囲の流速とある大きさの遅れ(相対速度)をもつが、この相対速度を、その粒子の静水中での終末沈降速度に等しいと仮定して、掃流砂量式を導いた。すなわち、Bagnold は、水中を重力によって下方へ沈降(移動)していく粒子は、その粒子に働く流体力と水中重量とが平衡している時に、終末速度に達するが、粒子が水平方向に動かされている時にも、定常的な躍動をしている場合には、その粒子に作用する流体力とその粒子の移動を止めるように働く接線応力($F=W'\tan\alpha$ 、ここで W' : 粒子の水中重量、 $\tan\alpha$: 摩擦係数)とは釣り合っていると考え、 $\tan\alpha \approx 1$ とみなせるとしたのである。

一様流中での球形粒子の運動は、かなりの精度で予測しうるようになっているにもかかわらず、

*筑波大学水理実験センター

開水路床上での固体粒子の移動速度について、十分な知識を我々は持っていない。Parsons (1972) は、滑面上の砂粒およびガラス粒の移動速度を層流中で調べたが、水深が1~3mmといった浅い流れで、粒径も0.01~0.02mm(ガラス粒で0.25~0.85mm)と小さく、一般の乱流中での掃流砂現象からみれば、特殊な条件下を対象としている。

そこで、我々は乱流中での固体粒子の移動速度を調べることにした。Bagnoldの仮定の妥当性を検討することがひとつの動機であった。

II 実験方法

1) 実験方法と実験条件

筑波大学水理実験センターに新設された大型水路(幅4m、長さ160m、深さ2m、水路床勾配100分の1固定、銅板ペンキ塗り)を使用し、その水路のほぼ中央部において種々の計測を行なった。

実験条件としては、単位幅あたり給水量 q を、 $4\text{ l/sec}\cdot\text{m}$ から、8, 16, 32, 64, 128, 256 $\text{l/sec}\cdot\text{m}$ および $400\text{ l/sec}\cdot\text{m}$ の8通りに変え、8つの RUN とした(第1表)。表面流速 V_s はパンチ屑を用いた浮子法により、また平均流速 V_m は水性ペイント(赤または黄)による色素流下法による3回以上の測定結果から求めた。水深 D は、 $D=q/V_m$ として求めたが、いずれの RUN の流れもフルード数が1より大きな射流であっ

第1表 実験条件

Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8
単位幅流量, q ($m^3/sec \cdot m$)	0.004	0.008	0.016	0.032	0.064	0.128	0.256	0.400
水温, T_w ($^{\circ}C$)	24.5	24.0	22.4	22.0	23.0	23.0	23.7	23.2
表面流速, V_s (m/sec)	0.580	0.755	0.954	1.26	1.61	2.08	2.65	3.27
平均流速, V_m (m/sec)	0.477	0.639	0.839	1.13	1.45	1.89	2.47	2.98
水深, $D=q/V_m$ (mm)	8.39	12.6	19.1	28.4	44.2	67.7	104	134

た。

なお、流速の垂直分布は、対数分布則にのりとして、床面から D (表面) および $0.4D$ の高さでの流速として、それぞれ V_s および V_m の値を採用して各 RUN の流速の垂直分布を求めたが、この分布は、すでにピトー管を用いて得られている流速分布の傾向ときわめて良い一致を示した。

2) テスト粒子

使用したテスト粒子を第2表に示す。これら各粒子を流水中に投げ、助走区間を設け、定常になった後、5~20m区間の通過時間をストップウオッチを用いて3回以上測定して、その移動速度を

第2表 テスト粒子

形状	材質	比重 (σ/ρ)	径 (mm)	種類数
球	鋼	7.8	2.0~51	14
ク	ガラス	2.5	2.4~30	12
円柱	塩ビ	1.8	18~60	5
ク	デルリン*	1.4	3.0~30	11**
立方体	コンクリート	2.0	10~70	6

*プラスチックの一種

**径の1, 2, 4倍の長さの粒子を用いたので、全部では33種

求めた。結果を第3表に示す。

第3表 テスト粒子の平均移動速度 (m/sec)

第3・1表 鋼球 $\sigma/\rho=7.8$

Run No. 径 (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8
50.8	—	0.512	0.735	0.993	1.31	1.65	1.93	2.44
30.2	0.386	0.510	0.742	1.01	1.28	1.58	1.81	2.03
25.4	0.379	0.546	0.756	0.992	1.23	1.48	1.84	—
22.2	0.356	0.523	0.751	1.02	1.16	1.50	1.78	2.11
19.1	0.361	0.538	0.756	0.911	1.16	1.38	1.76	2.02
16.0	0.373	0.538	0.724	0.900	1.13	1.38	1.75	1.88
13.0	0.370	0.563	0.676	0.866	1.06	1.32	1.68	—
10.0	0.396	0.524	0.649	0.826	1.02	1.31	1.66	1.81
8.0	0.396	0.485	0.618	0.803	1.01	1.25	1.53	1.72
6.0	0.366	0.470	0.572	0.752	0.935	1.21	—	1.72
5.0	0.352	0.438	0.562	—	0.883	1.15	—	1.74
4.0	0.340	0.432	0.538	0.701	0.861	1.15	—	—
3.0	0.314	0.405	0.518	0.709	0.885	1.17	—	—
2.0	0.289	0.344	0.467	0.617	—	1.09	—	—

第3・2表 ガラス球 $\sigma/\rho=2.5$

Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8
径 (mm)								
30.0±0.5	0.386	0.561	0.795	1.04	1.25	1.55	1.96	2.22
25.0±0.5	0.391	0.566	0.799	1.01	1.25	1.51	1.96	2.16
20.0±0.5	0.398	0.566	0.769	0.953	1.22	1.51	1.83	2.11
17.0±0.5	0.403	0.568	0.756	0.939	1.17	1.47	1.87	2.11
16.0±0.5	0.399	0.566	0.765	0.900	1.15	1.45	1.86	2.08
10.0±0.5	0.409	0.522	0.693	0.873	1.09	1.37	1.67	2.11
8.0±1.0	0.408	0.528	0.680	0.849	1.09	1.44	1.75	1.94
5.61~6.68	0.390	0.498	0.629	0.816	1.07	1.38	1.75	1.83
4.69~5.61	0.377	0.467	0.613	0.796	1.03	—	1.88	—
3.96~4.69	0.369	0.455	0.568	—	0.938	—	—	—
2.79~3.96	0.352	0.457	0.604	0.743	0.987	1.32	1.48	—
1.98~2.79	0.338	0.435	0.557	0.744	0.958	1.30	1.60	—
0.99~1.98	0.311	—	—	—	—	—	—	—

第3・3表 塩ビ円柱 $\rho/\sigma=1.8$

Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8
径(mm)×長さ(mm)								
60×240	0.381	0.516	0.747	1.00	1.30	1.67	2.10	2.30
60×120	0.354	0.498	0.708	0.965	1.28	1.69	2.01	2.34
60×60	0.330	0.472	0.663	0.903	1.24	1.66	2.05	2.26
51×30	0.270	—	—	0.789	1.28	1.57	1.95	2.24
51×15	—	—	—	—	1.27	1.51	2.01	2.30
38×150	0.365	0.526	0.763	1.00	1.31	—	1.94	2.18
38×77	0.354	0.534	—	1.01	1.29	1.56	1.98	2.27
38×38	0.324	0.497	—	0.970	1.29	1.55	2.00	2.31
31×19	—	—	—	—	1.20	1.45	—	2.15
31×10	—	—	—	—	1.15	1.42	—	2.07
18×75	0.385	0.551	0.764	0.943	1.17	1.44	1.75	2.04
18×36	0.360	0.574	0.758	0.968	1.17	1.41	1.82	2.20
18×18	—	0.380	0.722	0.950	1.15	1.49	—	2.18
18×9	—	0.353	—	0.947	1.16	1.46	—	2.18

第3・4表 デルリン円柱 $\sigma/\rho=1.4$

Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8
径(mm)×長さ(mm)								
30×120	0.377	0.533	0.752	1.03	1.31	1.47	1.96	2.37
30×60	0.361	0.527	0.752	1.02	1.29	1.62	2.05	2.31
30×30	0.343	0.509	0.640	1.01	1.30	1.56	2.03	2.34

25×100	0.390	0.548	0.771	1.02	1.24	1.45	2.01	2.18
25× 50	0.364	0.533	0.758	1.01	1.25	1.60	2.03	2.45
25× 25	0.355	0.524	0.758	1.01	1.27	1.61	1.99	2.29
20× 80	0.379	0.561	0.773	0.991	1.15	1.54	1.93	2.15
20× 40	0.373	0.549	0.759	0.984	1.28	1.54	2.01	2.22
20× 20	0.351	0.498	0.757	1.02	1.25	1.54	—	2.17
15.5× 64	0.398	0.568	0.771	0.943	1.17	1.44	1.94	2.25
15.5× 32	0.384	0.541	0.761	0.954	1.22	1.49	1.94	2.15
15.5× 16	0.346	0.549	0.764	0.974	1.21	1.58	1.88	2.17
13× 52	0.410	0.577	0.765	0.875	1.17	1.49	—	2.25
13× 26	0.392	0.556	0.750	0.938	1.18	1.50	—	2.24
13× 13	0.358	0.573	0.771	0.934	1.19	1.49	—	2.18
10× 40	0.412	0.576	0.734	0.854	1.14	1.40	—	2.06
10× 20	0.394	0.558	0.717	0.909	1.17	1.47	—	2.11
10× 10	0.392	0.554	0.750	0.921	1.16	1.45	—	2.00
8× 32	0.437	0.540	0.683	0.835	1.06	1.39	—	2.13
8× 16	0.403	0.543	0.690	0.884	1.11	1.42	—	2.11
8× 8	0.408	0.540	0.709	0.882	1.10	1.40	—	2.00
6× 24	0.421	0.452	0.613	0.825	1.11	1.36	—	2.02
6× 12	0.416	0.531	0.683	0.870	1.12	1.41	—	2.02
6× 6	0.413	0.522	0.683	0.860	1.08	1.42	—	2.04
5× 20	0.407	0.466	0.621	0.812	1.08	1.10	—	2.00
5× 10	0.404	0.518	0.639	0.847	1.09	1.43	—	2.06
5× 5	0.412	0.514	0.602	0.857	1.03	1.39	—	1.94
4× 16	0.337	0.442	0.613	0.781	1.06	1.32	—	2.08
4× 8	0.403	0.504	0.667	0.860	1.06	1.38	—	2.02
4× 4	0.408	0.533	0.661	0.842	1.04	1.37	—	1.98
3× 12	0.341	0.438	0.617	0.800	1.06	1.34	—	—
3× 6	0.391	0.504	0.648	0.794	1.08	1.38	—	—
3× 3	0.395	0.489	0.641	0.847	1.10	1.42	—	—

第3・5表 コンクリート立方体 $\sigma/\rho=2.0$

Run No.	1	2	3	4	5	6	7	8
1辺 (mm)								
70		動				1.19	1.82	2.05
60		か			0.780	1.40	1.85	2.21
40		ず		0.497	0.995	1.42	1.92	2.13
30				0.694	1.02	1.42	1.90	2.17
20			0.493	0.760	1.06	1.42	1.76	2.22
10		0.379	—	0.866	1.14	1.49	1.80	—

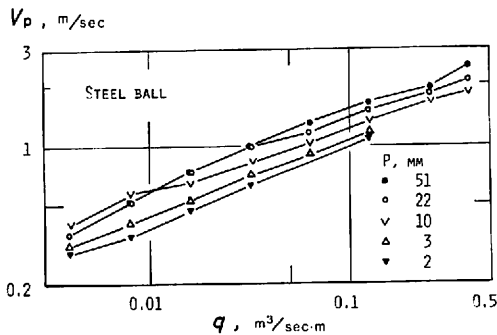
III 実験結果

1) テスト粒子の移動様式

テスト粒子は、小水深の RUN の場合、立方体のものが滑動したこと、円柱のうち、とくに長さの長いものが流向に長軸をもって滑動する場合があった以外、大部分は、(球の場合は当然のことながら) 転動した。ただし、床面に接していたか、多少なりとも躍動ないし浮遊していたかは不明であった。それゆえ厳密には、床面ごく近くを回転しつつ移動したというべきであろうか。この点に関しての直接的な観察は行えなかったが、後述するように、各テスト粒子の移動速度から、比重の小さなガラスやデルリンの小粒子は、とくに大水深の RUN では躍動ないし浮遊したと推察された。

2) テスト粒子の移動速度

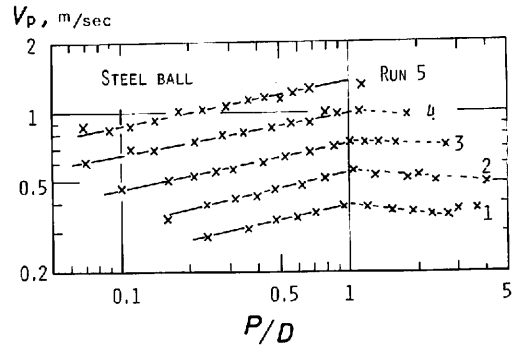
各テスト粒子の移動速度が、RUN 毎にどのように変化するかを、鋼球の場合を例に、第1図に、粒径をパラメーターに示した。これと酷似した関係が他の材質についても得られた。これより、各テスト粒子の移動速度は、単位幅流量の増すほど(水深ないし流速の大なるほど)大きくなること、また、同一 RUN では、粒径の大なるほどその移動速度は大きいこと、すなわち、頭初の予想に反して、大粒子ほど移動速度が大きいことが判った。



第1図 単位幅流量 (q) と鋼球の移動速度 (V_p) の関係

3) 移動速度が最大となる粒径

大粒子ほど移動速度が大きくなるとはいえ、粒径が水深よりはるかに大きくなった時にはもはや移動速度は増大しないと考えられるので、どのような大きさの粒子が、最大移動速度をもつかを調べた。第2図に鋼球の場合を示す。これは、同一



第2図 粒径・水深比 (P/D) と鋼球の移動速度 (V_p) の関係

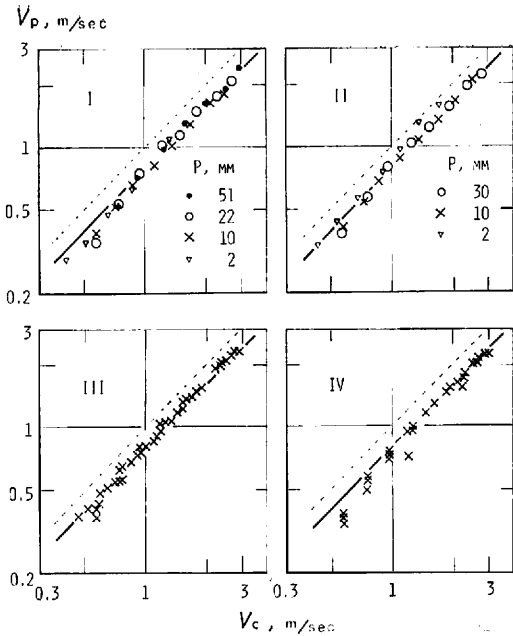
RUN において、粒径によって、その移動速度がどのように変化するかをみたもので、これから明らかのように、 $P/D=1$ すなわち $P=D$ となる粒子が最大移動速度をもつ。

4) 粒子の移動速度 V_p と流速 V_c との関係

上述のことから、粒子の移動速度 V_p は、その粒子の周囲の流速 V_c と密接な関係があると考えられる。ここでは、移動粒子の周囲の流速を床面からの高さ P での流速で近似させ、それと移動速度との関係を、材質(比重)と粒径をパラメーターとして第3図に示した。粒子の周囲の流速として、たとえば水中での転動粒子に対する作用点を求めて、その高さでの流速を求めるべきということも考えられるが、それ自体困難であるし、たとえそうしたとしても、それはここで採用した高さ P での流速で近似しうるものと考えられたからである。但し、高さ P での流速は、前述のようにして求めた流速の垂直分布図から読みとった値である。

$P > D$ の時、すなわち、粒子が水面上に突出している時は、 V_c に対し V_p が過少であること、

IV 考 察



第3図 床面から粒径 (P) の高さでの流速 (V_c) と粒子の移動速度 (V_p) の関係
 I : 鋼球, II : ガラス球, III : 塩ビ円柱, IV : デルリン円柱

またとくにその状態では、円柱の場合、短柱ほど V_p が小さくなるという傾向が認められる。

$P < D$ の時、 V_c と V_p の関係には、粒径 P と比重 σ/ρ の効果がほとんど表われず、しかも、 $P > D$ の場合に円柱の移動速度に認められたような形状 (長さ) の効果も、ほとんど表われなくなり、 V_c と V_p の関係は次式で表わされることが判った。

$$V_p = aV_c$$

$$a = 0.8 \sim 0.9$$

このように、この実験範囲内では、粒子の比重のちがいが水中での移動速度にほとんど影響しないことは予想外のことであった。

$V_c - V_p$ を粒子とその周囲の流水との相対速度 V_{slip} に近似させると、 $V_{slip} = V_c - V_p = 0.1 \sim 0.2 \cdot V_c$ ということになるから、 V_{slip} は P や σ/ρ によらず、もっぱらその粒子の周囲での流速のみによって決定されているということになる。

水中重量で 4.5 倍の差のある鋼球とガラス球、および形状は違うとはいえ 27 倍もの差のある鋼球とデルリン円柱とで、同一径なら、水中での移動速度がなぜ同じなのか、また、それだけでなく、同一 RUN では、 V_{slip} が粒径にかかわらずほぼ一定値をとり、しかも q, D, V 大なる RUN ほど V_{slip} が增大するのはなぜなのか、という点に注目して、粒子の移動速度を決める機構について、粒子に働く力に関して考察した。

1) 相対速度 V_{slip} の意味

テスト粒子は、その周囲の流れと遅れ—相対速度—をなぜ有するのか。それは、粒子の移動を妨げようとする抵抗力が存在するからにほかならない。すなわち、水流中を粒子が定常的に移動している時には、粒子は、その移動を止めようとする力に打ち勝つに必要な接線力を得るために、流水と相対速度をもつのであると考えられる。いかえれば、 V_{slip} の大きさは、粒子の移動に対する抵抗の大きさを示していることになる。

2) 粒子を前進させる力

水中を定常的に移動している粒子には、その粒子を前進させようとする力として、1) 粒子に作用する重力にもとづく力、2) 流水と相対速度をもつことによって生ずる抗力 F_D が考えられる。一様流中では、

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{slip}^2 \cdot A_1$$

ここで、 F_D : 抗力

C_D : 抗力係数

ρ : 流体の密度

V_{slip} : 流体と固体粒子との相対速度

A_1 : 粒子の投影断面積

この実験の場合、流速は一様分布をしていないことから、 F_D は厳密には上式で表わせまいが、一応 $F_D \propto C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{slip}^2 \cdot A_1$ 、とおくことにする。

3) 移動粒子に加わる抵抗力

粒子の移動を止めようとする力は、床面と粒子

の摩擦力 K が考えられる。

$K = kW'$ ここで K : (ころがり) 摩擦力

k : 摩擦係数

W' : 粒子の水中重量

定常状態では、一般に、粒子を前進させようとする力が、このころがり摩擦力と釣り合っているものと考えられるが、すでに明らかなように、 V_{slip} は、同一粒子の場合、その移動速度が大きいほど大きい。すなわち、抵抗力が増すという事実を、ころがり摩擦力によってだけでは説明しえない。なぜなら、速度勾配のある水流中の粒子には、粒子の上方と下方とでの圧力差による揚力が粒子に働くこと、しかも、粒子が回転している時には、Magnus 効果による力 (Magnus force) が粒子に働くが、この場合、それは上向きに揚力として働くことから、粒子の移動速度が大きいほどころがり摩擦力は小さくなることはあれ、大きくなることは考えられないからである。それゆえ、 V_p 大ほど V_{slip} が大きくなる原因は、床面と粒子とのころがり摩擦力以外に求められるべきである。

4) 回転粒子の受ける粘性抵抗^{注2)}

粒子は床面上を回転している。それは、速度勾配のある水流中で、粒子の上面と下面とでの速度差に起因する。粘性のある流体中で、円柱であれ球であれ、ある物体を回転させれば、その物体には、その回転を妨げようとする力が働く。この力は、固体粒子 (厳密に言えば固体粒子表面に付着した流体) とその周囲の流体との間で生ずる内部 (粘性) せん断力である。

流体の粘性にもとづく、この力 F_r は、流体微小部分の変形速度に比例するものであり、次式で表わされる。

$$F_r = \tau \cdot A_2 = \mu \cdot \omega \cdot A_2$$

ここで、 F_r : 粘性せん断力

τ : 単位表面積あたりの粘性せん断力

A_2 : 粒子の表面積

μ : 流体の粘性係数

ω : 粒子の回転角速度

5) 粒子の回転角速度 ω

もし粒子が床面上をすべらずに移動 (完全転

動) するならば、いいかえれば床面との摩擦力が十分に大きいならば、粒子の回転角速度 ω は、

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{V_p}{\pi P}$$

とおいてよいわけであるが、実際にはすべりつつ転動していると観察されたので、この点を考慮する。すべりを考えれば、粒子の回転速度は、結局、その粒子が移動している位置 (高さ) での速度勾配 dv/dy に比例するとするのが妥当であろう。

流速が直線的な分布をしている場合、すなわち、 dv/dy が一定の時には、問題は簡単であるが、実際には、流速は対数分布をしているのであるから単純ではない。ここでは、速度勾配が床面で最大、水面で 0 より、床面上 y の高さでの速度勾配を、次式で表わす。

$$\frac{dv}{dy} = \tau_0(1-y/D)/\mu$$

ここで τ_0 : 底面せん断力、 y : 床面からの高さ、 D : 水深

この結果、次式が得られる。

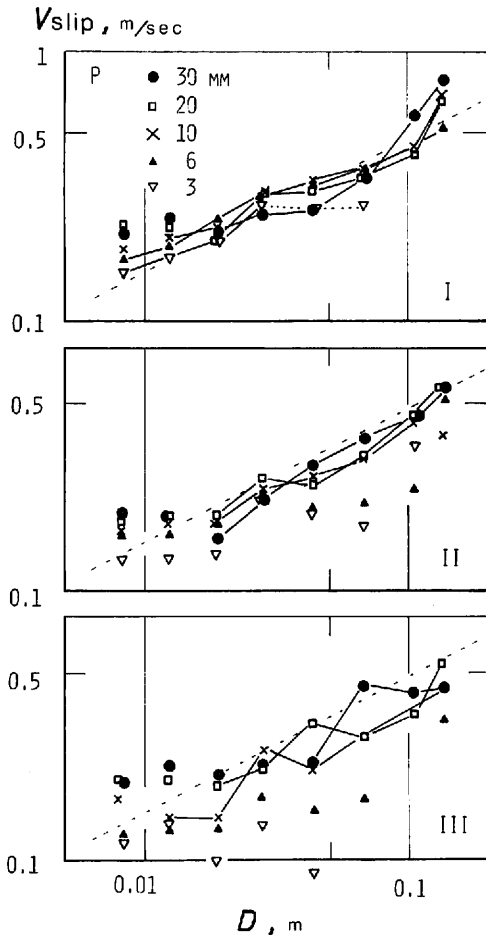
$$\begin{aligned} F_r &= \mu \cdot \omega A_2 \propto \mu \cdot \tau_0 \left(1 - \frac{y}{D}\right) / \mu \cdot A_2 \\ &= \tau_0 \left(1 - \frac{y}{D}\right) \cdot A_2 \end{aligned}$$

6) 粒子に働く力の釣り合い

粒子の移動が定常状態にある時、その粒子に作用する力によるモーメントの合計はゼロのはずである。粒子に働く重力にもとづく力は、ころがり摩擦力と相殺しあうので、抗力 F_D と粘性せん断力 F_r との釣り合いを調べる。

C_D は、一様流中では、球・円柱ともに、今回の実験範囲 ($Re = U_* P/\nu$ が $4 \times 10^2 \sim 3 \times 10^4$) では、ほぼ一定 ($1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ の間がほんのわずかに小さい) である。それゆえ、 $F_D \propto V_{slip}^2 \cdot A_1$ とおく。

また、 $\left(1 - \frac{y}{D}\right)$ の値については、速度勾配が床面付近できわめて大きいことを考えれば、 $1 - y/D \approx 1$ とおいてよいと思われるので、 $F_r \propto \tau_0 \cdot A_2$ となり、この実験の場合、勾配 S は 1/100



第4図 水深 (D) と粒子と流水との相対速度 ($V_{slip} = V_c - V_p$) の関係、床面上を転動している場合のプロットを線で結んだ
 I: 鋼球, II: ガラス球, III: デルリン円柱

と一定であるから、 $F_D \propto D \cdot A_2$ とおける。

ここで、もし、 $F_D = F_T$ となっているならば、 $V_{slip}^2 \cdot A_1 \propto D \cdot A_2$ 。但し、 A_1, A_2 は、球の場合それぞれ $\frac{1}{4}\pi P^2, \pi P^2$ 、円柱の場合、単位長さあたり、 $P \cdot 1, \pi P$ より、粒径 P の効果は消失して、粒径 P によらず、しかも比重 σ/ρ によらず、 $V_{slip}^2 \propto D, V_{slip} \propto D^{1/2}$ という関係が期待される。

第4図に、 P と σ/ρ をパラメーターとして、 V_{slip} と D の関係を示した。これにみられるよう

に、 D が小さい範囲で $P > D$ となる場合、 V_{slip} が過大にでること、および鋼球の $P < 3$ mm、デルリン円柱・ガラス球の $P < 8$ mm を除けば、すなわち、床面上を転動する粒子については、 $\sigma/\rho, P$ にかかわらず、 $V_{slip} \propto D^{1/2}$ の関係が成立することがわかる。

鋼球の $P < 3$ mm、デルリン円柱およびガラス球の $P < 8$ mm では、 D 大の時、 V_{slip} がきわめて小さくなり、一般的傾向からはずれる。これは、この範囲で、粒子の運動様式が変化したことを示す。といっても、 V_{slip} が小さくなったのは、転動していた粒子が躍動ないし浮遊した結果、床面との摩擦抵抗が小さく、あるいは、なくなったからであるとは簡単に決められない。浮遊して、粒子が上方の速度勾配の小さい所を動けば、粒子の回転角速度が減少し、 V_{slip} が小さくなることもありえようし、それ以上に、実際には、粒子が浮遊して、より大きな V の所を移動しているのに、高さ $y=P$ での流速を V_c として $V_{slip} = V_c - V_p$ を求めたために、 V_{slip} が見掛上小さくでているのだと考えられる。粒子がわずかにその径の2~3倍の高さにまで浮遊しているとすれば、このような説明が量的にも十分可能である。

今回の実験では、各粒子の軌跡や回転速度などの観測がなされなかったために、粒子の運動様式によって V_{slip} が変化するのではないかという点は検討しえなかった。

V 結 び

以上、水路床上での粒子の転動速度について調べた結果を述べた。床面上を転動する粒子は、自身が回転することによって受ける粘性せん断力に打ち勝って運動し続けるのに必要な流体力を得るために、水流と等速では動かず、ある大きさの遅れ(相対速度)をもつのであると考えることによって、同一の水流下では、 σ/ρ によらず、 P によらず V_{slip} はほぼ一定値をとること、さらに速度勾配の大きな水流下ほど V_{slip} は大きくなるという実験事実の一応の説明がなされた。

この結果、同一の水流下では、流速の大きな高

い所を流送される大粒子ほど移動速度が大きくなることも、さらには、比重の効果があらわれないことも理解された。この実験結果からは、 V_{slip} が常にその粒子の水中での沈降速度になるとすることは、滑面水路床上では不適當であるといえよう。

本研究を行なうにあたり、御指導をいただいた井口正男教授に心より感謝いたします。また実験を手伝っていただいた小島豊盛技官、研究生の池田一雄、張昊両君、院生の一守祐司君および伊勢屋ふじこさん、学群学生の正木智幸君（いずれも筑波大）に厚く御礼を申し上げます。

注

1) $0.4D$ の高さでの流速として V_m を採用した理由。流速 v が床面からの高さ y の関数として、 $v=lny$ の形で与えられているとして、平均流速を与える高さ Y を求めるためには、まず高さ 0 の床面から、高さ D の水面までの平均流速 V_m を求めればよい。

$$V_m = \frac{1}{D-0} \int_0^D lny \cdot dy = \frac{1}{D} [ylny - y]_0^D$$

$$= lnD - 1 = ln \frac{D}{e}$$

これが $V_m = lnY$ と等しいことから、 $Y = D/e = 0.368D \approx 0.4D$

2) 本稿脱稿後、中川ら(1979)の論文が発表された。そこでは、床面上を転動する粒子に使用する流体力の特徴について、実験による直接測定を含めて詳細な検討がなされている。この中で、粒子に作用する流体力として、本報告で重視した転動粒子に対する流体の抵抗モーメントが注目されている。

文 献

- 中川博次・辻本哲郎・細川泰廣(1979)：床面に沿って転動する粒子の運動と流体力について。
土木学会第23回水理講演会論文集，323-330。
- Bagnold, R. A. (1973) : The nature of saltation and of bed-load transport in water. *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, **332**, 473-504.
- Parsons, D. A. (1972) : The speeds of sand grains in laminar flow over a smooth bed. Shen, H. W. edited. *Sedimentation. Symposium to honor professor H. A. Einstein*, 1, 1-25.