

国立公害研究所 (正) 〇 文 坪 国 順
京都大学 工学部 (正) 中 川 博 次
臨海工本 K・K (正) 池 添 俊 夫

1. まえがき 本研究は静水中および流水中と比較的粒径の大きい粒子が単一もしくは複数で落下する場合の床面における分布特性や落下中の粒子の挙動を実験的に検討し、その粒子の挙動に対する簡単なモデル化を行ない、実験結果を定性的に説明しものである。

2. 実験条件および実験方法 床面における粒子の分布特性を検討するため、採砂箱によって区分する方法と粒子をストロボ撮影する方法とを用いた。実験に用いた粒子は直径5mmと7mmのビーズ(B-5, B-7)、平均粒径4.5mmの砂粒(G)、直径5mmの鉄球(I-5)である。ストロボ撮影の場合の水理条件を表-1に示す。この場合はピンセット単一投下のみである。採砂箱を用いる場合、水理条件は水深Hを20, 25, 50 (cm)の3種類、断面平均流速 u_0 を0, 10.0, 15.2, 25.3 (cm/s)の4種類変え系統的な実験を行なった。投下方法はピンセット単一投下とバケット投下(一度に落下する個数を主に100)の2種類である。

3. 粒子の沈降速度と抗力係数 静水中の粒子の沈降速度 W_0 はB-5で49.7 cm/s, B-7で56.6 cm/s, Gで32.6 cm/s, I-5で105.8 cm/sである。表-1の流水中の粒子の沈降速度 W と W_0 の比を示す。 W/W_0 は u_0 が大きくなるにつれて減少する傾向が認められた。表-1の C_D は W から逆算した抗力係数であり、静水中では、球の0.38, 砂粒の0.90の結果が得られた。

4. 粒子の分布特性 粒子の床面での分布は正規分布に見られることがわかった。以下の議論では正規分布とみなした場合の値を採用し、サミュンズを用いて表わすことにする。

4-1. 平均流下距離 $\bar{X}_n$ の特性 $\bar{X}_n$ は粒子の投下方法や落下個数にあり影響を及ぼす。 $\bar{X}_n/d = (u/w_0)(H/d) - (1)$ の関係が認められた。図-1はストロボ撮影の場合の結果であるが、式(1)が成立し、落下粒子は平均的に中ば水流と同じ速度で流れ方向に流下していることがわかる。

4-2. 標準偏差 σ_{Xn} の特性 σ_{Xn} は投下方法や粒子の種類によって異なる特性を示す。ピンセットによる単一投下の場合、 σ_{Xn} と u/w_0 , H/d との間には次のような関係が認められた。鉄球の場合には、 $\sigma_{Xn}/d = \alpha_1 (u/w_0 \cdot H/d)^{1/2} - (2)$, 砂粒の場合には $\sigma_{Xn}/d = (u/w_0)^{1/2} (H/d)^{1/2} - (3)$, (α_1, α_2 : 定数)である。バケット投下(100)の場合には図-2に示すように、ビーズの場合には $\sigma_{Xn}/d = \alpha_3 (u/w_0 \cdot H/d)^{1/2} - (4)$, 砂粒の場合には $\sigma_{Xn}/d = \alpha_4 (u/w_0 \cdot H/d)^{1/2} - (5)$, (α_3, α_4 : 定数)の関係が認められた。図-3および図-4はストロボ撮影による場合の落下中の粒子の σ_{Xn} の特性を示すもので、ピンセット単一投下の場合、関係式(2)及び(3)が成立していることが認められる。

表-1

Run	u_0 (cm/s)	H(cm)	d(mm)	N	w_f/w_0	C_D
F-1	10.0	20.0	Bead 5.0	15	0.91	0.45
F-2	15.2				0.90	0.46
F-3	25.3				0.91	0.45
F-4	10.0	50.0		150	0.91	0.45
F-5	15.2				0.90	0.45
F-6	25.3				0.89	0.47
F-7	10.0	20.0	Grav. 4.5	15	0.92	1.02
F-8	15.2				0.96	0.94
F-9	25.3				0.94	1.00
F-10	10.0	50.0		130	0.97	0.95
F-11	15.2				0.95	0.98
F-12	25.3				0.95	0.99
F-13	25.3	50.0	B-7	130	0.95	0.44
F-14	25.3	50.0	I-5	20	0.91	0.47

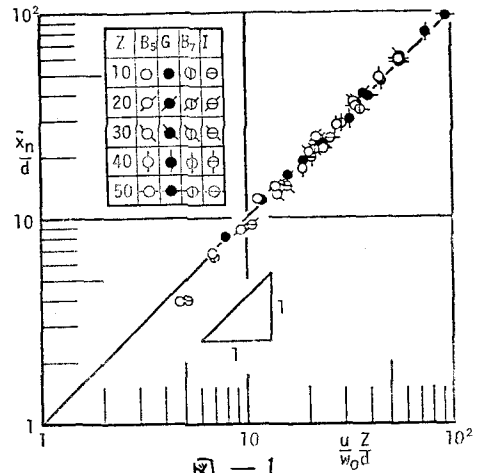


図-1

Dumped by BUCKET

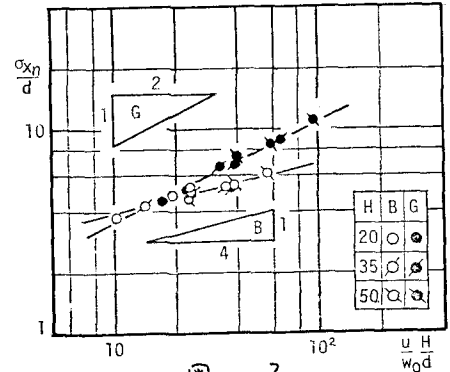


図-2

5. 分布特性に関する理論的考察

ストロボ撮影によって得られる落下粒子の軌跡を参考に、粒子の落下挙動を図-5のように模式化し、印の実は何らかの影響で軌跡の方向が変化し去る。粒子が変曲点*i*-1 から*i*まで移動する要する時間 $T_i = h_i/u_T$ で与えられる。また、4-1で述べた結果から、粒子は鉛直に*h_i*落下する間に流れ方向に平均的に $u h_i/u_T$ 流下する。しかし、実際には後流渦等の影響でバラツキが生じる。そのバラツキを ΔX_i とし、 ΔX_i は次式で与えられる。 $\Delta X_i = X_i - u h_i/u_T$ (6)。よって1つの粒子が水面から鉛直に*h*落下し、時の流下距離 $X(z)$ は次式で与えられる。 $X(z) = \sum_{i=1}^{N(z)} X_i = u \cdot \frac{z}{w_0} + \sum_{i=1}^{N(z)} \Delta X_i$ (7)。ここで $N(z)$ は粒子が*z* まで落下する間にやる回数であり、 $z = u h_i/u_T$ である。いま $\Delta X = \sum_{i=1}^{N(z)} \Delta X_i$ とすると、 $X(z)$ の平均値および分散は次のように表わされる。

$$\text{平均値: } E\{X(z)\} = E\{u \cdot \frac{z}{w_0}\} + E\{\Delta X\} \quad (8)$$

$$\text{分散: } V\{X(z)\} = E\{X^2(z)\} - E^2\{X(z)\} \\ = E\{(u \cdot \frac{z}{w_0})^2 + 2(u \cdot \frac{z}{w_0}) \Delta X + \Delta X^2\} - E^2\{X(z)\} \quad (9)$$

$X(z)$ の平均値、および分散の特性を明らかにするためには ΔX の統計的性質を明らかにする必要がある。 $N(z)$ の ΔX_i は独立な確率変数であるので ΔX は複合過程となる。粒子の軌跡にもたて ΔX_i に対して2つの仮定を設ける。① 粒子のゆれとして ΔX_i は正負と ΔX_i が正負が交互に起こる。② 各々のゆれの大きさは互に独立である。この仮定をもち、ゆれは正負が交互に起こって一乗累と見なす。一乗累のゆれの大きさを z_i とし、 $z_i = z_i^+ - z_i^-$ (z_i^+ : 正方向のゆれ, z_i^- : 負方向のゆれ) で表わされる。図-6に z_i^+, z_i^- の分布の一例を示す。 z_i^+ と z_i^- はほぼ同じ分布形をもつと見られる。よって $E\{z_i\} = E\{z_i^+\} - E\{z_i^-\} = 0$ (10), $V\{z_i\} = V\{z_i^+\} + V\{z_i^-\} = 2V\{z_i^+\}$ (11) となる。一方、 T_i が独立の変数であるとして、 $N(z)$ が再生過程である。再生過程の理論によれば $z \rightarrow \infty$ (or $z \rightarrow 0$) において、 $E\{N(z)\} = z/E\{T_i\}$ となる。また、 $N(z)$ の分布が正規分布となることが知られている。図-7は $N(z)$ の分布の一例である。仮定により一乗累のゆれの発生回数 $N(z)$ は $N(z) = z/T_i$ であるので、 $E\{N(z)\} = \beta z$ ($z \rightarrow \infty$) (12) となる。ここで β : 定数。以上の結果から ΔX の平均値、分散は次のように表わされる。

$$\text{平均値: } E\{\Delta X\} = E\{N(z)\} \cdot E\{z_i\} = 0 \quad (E\{z_i\} = 0) \quad (13)$$

$$\text{分散: } V\{\Delta X\} = E\{\Delta X^2\} - E^2\{\Delta X\} = E\{N(z)\} V\{z_i\} = \beta V\{z_i\} z \quad (14)$$

いま、球の様に個々の粒子の w_0 が等しいと見られる場合には u 及び h が定数と見られるので

$$X(z) \text{ の平均値と分散は式(13), 式(14)を代入して次のようになる。平均値: } E\{X(z)\} = u \cdot \frac{z}{w_0}, \text{ 分散: } V\{X(z)\} = V\{\Delta X\} = \beta V\{z_i\} z \text{ である。}$$

これらの関係式をバレンセット単一投下の際の実験結果を説明している。 $E\{N(z)\}$ は後

流渦と深い関係があらわされる。表-2は各実験ケースにおける $\bar{N}(z)$ の値と

相値から求めたストロハル数を示したものである。 $N(z)$ は T_i と密接な

関係をもっているが、 T_i と X_i の統計的性質の解明が今後の課題である。

また、ここでは説明は省略し、砂粒についての分布特性やバケット投下の

場合の分布特性も上述の考え方を延長すれば可能である。

参考文献: 池澤俊夫: 昭和53年度京大工学部卒業研究

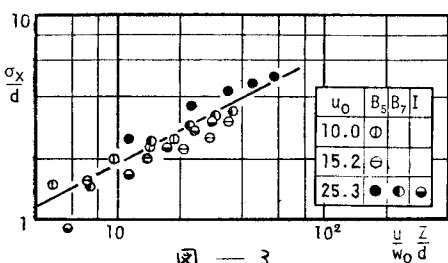


図-3

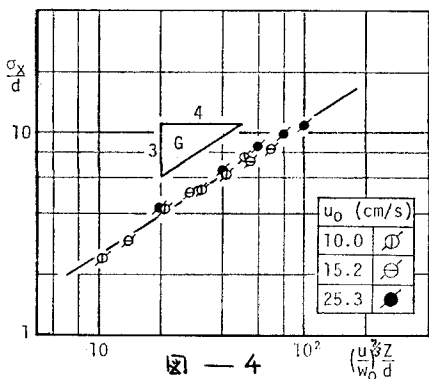


図-4

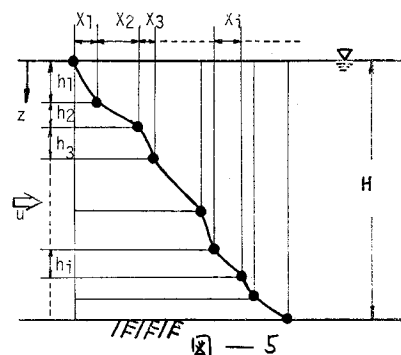


図-5

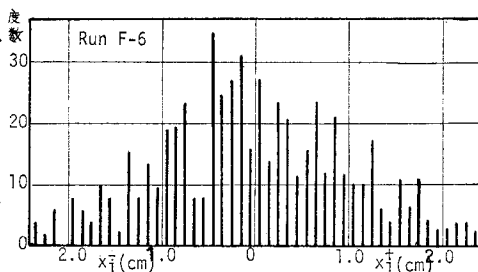


図-6

表-2

Run	Particle	$\bar{N}_1$	St	Re
F-4	B-5	2.45	.025	2260
F-5	B-5	2.48	.025	2250
F-6	B-5	2.52	.025	2220
F-10	G	3.44	.03	1430
F-11	G	2.82	.026	1410
F-12	G	3.26	.028	1390
F-13	B-7	1.99	.028	3790
F-14	I-5	1.57	.016	4840

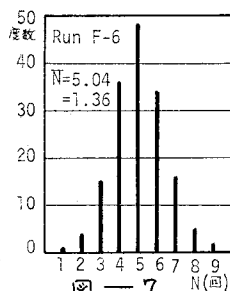


図-7