

国立公害研究所 正員 大坪 国順
国立公害研究所 正員 村岡 浩爾

表 - 1

No.	Type	Material	d(mm)	σ	w_0 (cm/s)
1	Sphere	bead	3.7	2.48	42.9
2			5.1		47.6
3			7.0		55.3
4			10.8		68.8
5		acryl	3.0	1.18	10.4
6			6.2		17.9
7			9.4		23.0
8			12.7		27.1
9		steel	3.0	7.30	81.1
10			5.0		103.5
11		rubber	24.8	1.55	52.7
12	Golf Ball		42.0	1.24	38.1

1. まえがき 液体中を沈降する粒子は、粒子レイノルズ数がある程度大きくなれば、落下方向に対して直角方向の力を受けることが知られている。そのために粒子は目標とする位置のまわりにある分布をもって到達する。粒子の横ゆれ運動を決定論的に記述するのは困難であるので、統計的な性質の解明が重要となる。粒子の横ゆれを規定する要素として、横ゆれの時間間隔と横ゆれの大きさが考えられるが、今回は主に前者の横ゆれの時間間隔について検討しきものである。

2. 実験要素および方法 対象とした粒子は球形粒子で、沈降する粒子をストロボ撮影し、その運動軌跡から横ゆれの時間間隔を読み取る。表-1に実験要素を示す。表-1において d : 粒径, σ : 粒子の比重, w_0 : 沈降速度である。これと併行して、可視化法によって、粒子後部に形成される渦管の運動特性や渦管運動と粒子の横ゆれとの関係を検討しき。渦管可視化に用いた粒子は、四塩化炭素とキシレンの混合液が水中で球形になる性質を利用して、この混合液にメチレンブルーを混入しきものである。

3. 実験結果と考察 可視化によって次のことが明らかになった。

1). 粒子後方に形成される渦管は粒子の片側から離れて vortex-loop となる。2). 渦管は粒子後部の対称の関係にある2本から交互に離れる。3). vortex-loop の形成時に粒子の横ゆれが起こり、横ゆれの方法は vortex-loop が形成される側と反対側となる。4). 粒子は vortex-loop の形成時に必ずしも横ゆれしない。図-1は渦管の発生に関するストローハル数(St_v)と粒子レイノルズ数(Re)との関係を示しきものである。渦管の発生周期は2つの渦管が発生する時間間隔で定義しき。図-1において Achenbach ($Re < 4 \times 10^4$ の場合), Magarvey et al, 著者らの結果は固定球ではなく移動球に関して得られきものである。 St_v は $Re < 10^4$ 以下では Re の関数となり, $Re > 10^4$ ではほぼ一定値をとる。 $Re \approx 5 \times 10^3$ の付近で St_v が不連続的に変化する原因は明らかではなく今後検討されるべき問題である。

図-2は球粒子の横ゆれに関するストローハル数(St_p)と Re との関係を示しきものである。比較のため、液体粒子に対して St_v と St_p の両者を併示してある。 Re の増加と共に $St_v > St_p$ の関係が現われている。固体粒子に関しては St_v を測定してはいないが、図-1の St_v と比較すると、今回の実験の範囲では St_p は St_v に比して1オーダー小さい値となった。この傾向は粒子の比重が大きいほど顕著である。図-1と図-2の関係から、粒子の横ゆれは、 $Re > 10^3$ においては渦管の発生に追随してはいないと考えられる。表-2は球粒子の横ゆれの運動形態を分類しきものである。表中、「Wave-motions」は横ゆれが左右交互に起こる場合、「Front」は wave motion が正面のみ、「Side」は側面のみ、「Both」は両面に観察される場合を意味する。また、「Plane rotation」は wave motion の起こる

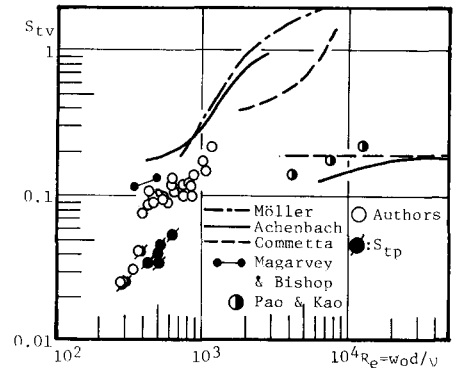


図 - 1

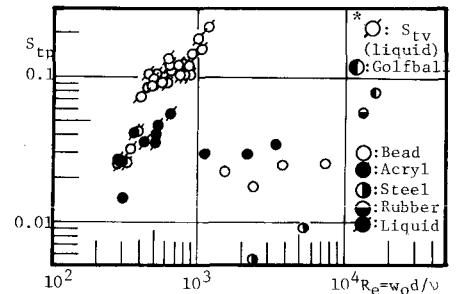


図 - 2

表 - 2

(%)

Case	Material	Wave-motion	Front	Side	Both	Plane-rotate.	Spiral
1	B-3.7	36.4					
2	B-5.1	76.0	29.0	6.0	18.0	16.0	7.0
3	B-7.0	94.4	16.0	6.4	49.6	8.8	13.6
4	B-10.7	85.6	30.4	16.0	23.2	12.0	4.0
5	A-3.0	28.8					
6	A-6.2	88.8	12.8	10.4	56.8	4.8	4.0
7	A-9.4	82.4	28.8	19.2	16.0	9.6	8.8
8	A-12.6	100	23.0	16.0	45.6	5.6	9.6
9	S-3.0	24.0					
10	S-5.0	72.8	34.4	11.2	21.6	3.2	2.4
11	R-24.8	99.2	11.0	8.8	43.2	7.2	30.4

表 - 3

(%)

	d (mm)	N	I	II	III	IV	V	VI	VII	R_e
Acryl	12.7	69	68.1(47.8)	10.1(1.50)	8.70	4.35	1.50	4.35	3.0	3.6
Bead	10.8	62	43.5(17.7)	19.4(12.9)	11.3	4.80	9.68	6.45	4.84	7.8
Rubber	24.8	100	27.0(21.0)	31.0(23.0)	25.0	0.0	3.0	6.0	8.0	11.6
Golf Ball	42.0	28	14.3(10.7)	21.4(14.3)	32.1	7.10	0.0	7.10	17.9	16.0

N: number of data, R_e : Reynolds number ($\times 10^3$)

面が鉛直軸周りに回転した場合、「Spiral」はらせん運動が起こる場合である。表-2から、球粒子の場合の横ゆれは二次元的なwave motionが主要な形態であることがわかる。また、横ゆれの時間間隔とゆれの大きさの両方にはかなり強い相関が認められ、次降に伴う横ゆれ運動は全くランダムな運動ではないことが明らかになった。表-3は次降粒子の横ゆれ運動と粒子の回転運動との関係を7つの形態に分類し、各形態の占める割合を百分率で示したものである。7つの形態の説明は表-3の下にまとめて示す。写真-1はType-Iに分類される運動軌跡の一例であり、図-3は横ゆれと回転の関係を模式的に表わしたものである。この横ゆれ運動は二次元的であり、回転方向と横ゆれ方向との関係はマグナス効果で説明されるものと合致する。状態1, 2, 3は回転と横ゆれが停止する時点であり、これらの点を結んで回転と横ゆれの方が転換する。1回の横ゆれにおいて、ゆれの大きさは粒径の1.5〜3倍程度であり、回転角は $45^\circ \sim 90^\circ$ の範囲であって、回転角が大きいほど横ゆれの大きさも増加する傾向がある。Type-IIの形態も二次元的な横ゆれとして主要なものである。回転に伴わない横ゆれが生じ、変位幅はType-Iと同程度で、規則性は他に比して高い。横ゆれ周期も他の形態に比して小さく、Stの値はゴム球で0.66、ゴルフ球で0.92と、それぞれ全形態による平均値0.55、0.80に比して大きくなるが、渦管の発生したStと比較すれば1/2以下の値である。Type-IVは回転として振りのみが存在する場合である。振りとは図-3の座標系におけるZ軸周りの回転を表わす。振りの程度は1/N/m (N:回転数)程度であるが、減衰しにくい性質があり、落下中に回転方向が変わることが多い。振りが存在すると横ゆれ運動は二次元的なものとなる。表-3において、Type-IおよびType-IIの値は振りが共存した場合も含んだ値で、()内の値は振りのない場合である。Type-Vは横ゆれ方向と回転方向の関係がType-Iと異なる場合であり、振りや回転なしの横ゆれの影響が与えられる。表-3から、粒子レイノルズ数が小さいほどType-Iの形態が支配的であること、粒子レイノルズ数が大きくなるとType-II, Type-IIIの形態が増加することがわかる。実際、アクリル球の場合、落下時に回転を与えても落下と共に回転が減衰し、運動はType-VからType-Iに移行することが確認された。運動軌跡から総合的に言えることは、粒子の回転速度はどの方向も1回転/秒以下と小さいにもかかわらず横ゆれ運動と密接な関係があること、粒子レイノルズ数が大きいほど振りの減衰が少なく横ゆれが二次元的になることである。横ゆれ運動の主要な形態が粒子レイノルズ数によって異なることは興味深い事実であるが、その2つの形態を流体力学的に十分に説明するに到っていない。今後の課題として残された。

- Type-I : 回転の反復と横ゆれが同期した運動
 Type-II : 回転を伴わない（振りを除く）横ゆれ運動
 Type-III: Type-I と Type-II の両者が存在する場合
 Type-IV : 振りのみによる横ゆれ運動
 Type-V : 一定方向の回転による横方向変位
 Type-VI : 回転方向と横ゆれ方向の関係が Type-Iと反対
 Type-VII: 回転と振りが同時に存在する場合

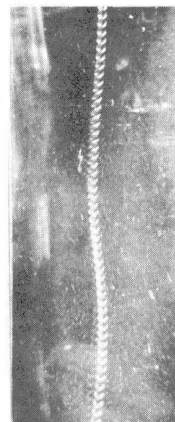


写真 - 1

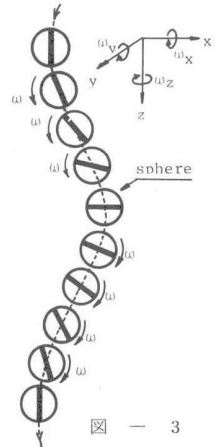


図 - 3