

円管内における粒体の水力輸送について(第3報) : 球群の輸送される状態について

その他(別言語等) のタイトル	Study on Hydraulic Transportation of Solid Particles in a Pipe with Water Power (Part 3) : On the Flow Patterns of Sphere-Water Mixture in a Pipe
著者	奥田 教海, 羽染 一男, 一場 久美
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	6
号	3
ページ	885-895
発行年	1969-07-15
URL	http://hdl.handle.net/10258/3469

円管内における粒体の水力輸送について

第3報 球群の輸送される状態について

奥田 教海・羽染 一男・一場 久美

Study on Hydraulic Transportation of Solid Particles in a Pipe with Water Power

Part 3. On the Flow Patterns of Sphere-Water Mixture in a Pipe

Kyōkai Okuda, Kazuo Hazome and Hisayoshi Ichiba

Abstract

As the third report about the hydraulic transportation of solid particles, the authors present the experimental results on the flow patterns of sphere-water mixture in a pipe.

The test are carried out with the U-shaped 7.15 m long, horizontal water tunnel, having the transparent, 3 m long test section. The tested particles consist of four kinds of plastic spheres, of which densities change from 1.4 to 1.0. The photo-electric devices are used to measure the frequencies of moving spheres through the upper, middle and lower layers in the pipe cross section.

The main results of the tests are as follows:

a) The distributions of the sphere consistencies in the pipe cross section have the three patterns, i. e. the flows with "low, partially and widely" distributed spheres when water flow velocity increases.

b) The patterns of the flows can be classified according to the particle Froude numbers, the ratio of the sphere diameter d to the pipe diameter D and the ratio of the density of the spheres to that of water.

I. ま え が き

同題名の第2報に引続いて、本報告では球群の輸送される状態を調べた実験について報告する。水平円管内の流れによって粒群が輸送される時、各種要因によって輸送状態が如何に変化するかについては従来、管底流、部分流、均一流および集団流などの定性的な表わし方によって示されているのみで、流れの各種要因との関連は明示されていない。この実験では粒体を理想化して球に置き換え円管内を通過する球群の量を光電管により上、中および下層に分けて測定し、各層の頻度分布と流速の変化との関連を求め、上記の球群の輸送状態の変化を定量的に表わす一方法を提案し、併せて球群の運動機構を調べる上での基礎資料を得ようとするものである。

II. 実験装置と実験方法

1. 実験装置

実験装置全体を図-1 に示す。供試した球の材質は塩化ビニール (比重量 $\gamma_s=1.436 \text{ gr/cm}^3$), 埋込樹脂 ($\gamma_s=1.268$), ポリカーボネイト ($\gamma_s=1.197$) およびポリスチロール ($\gamma_s=1.052$) の4種で, 球径対管内径比を0.12~0.45程度に見込み, 球直径 d は6, 10, 14, 18, 22 mm ϕ の5種である。また球の個数は実際に用いられている管内体積濃度30%に相応する数を考慮して用意した。(6 mm ϕ ; 800個, 10 ϕ ; 180, 14 ϕ ; 70, 18 ϕ ; 35, 22 ϕ ; 25) 水の流速は0.2 m/secより0.2 m/sec刻みに2.8 m/secまでの12段階で行なった。実験装置の水平管は50 mm ϕ 管約17 mから成り, 観測部4 m間はメタアクリル樹脂管, 戻り管は塩化ビニール管である。水の経路は, 水槽, ポンプ, 流量計またはバイパス, 観測管路, 戻り管, 水槽である。観測管路の一部をメ

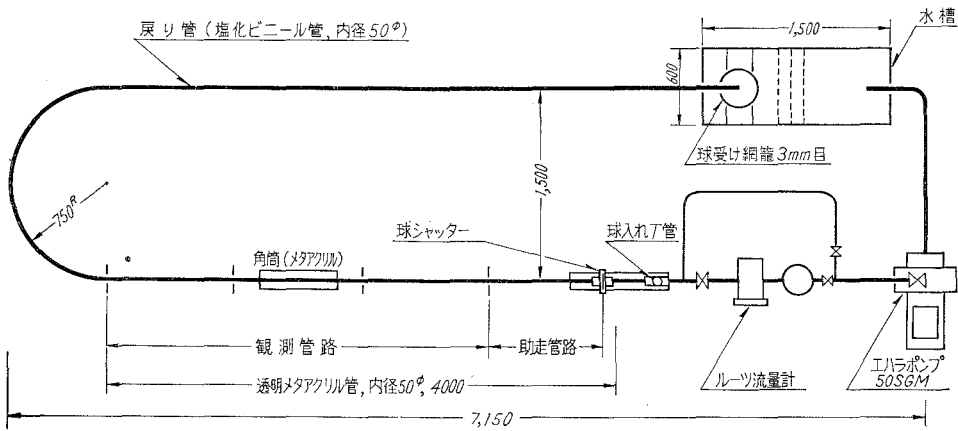


図-1 流体輸送長管路実験装置

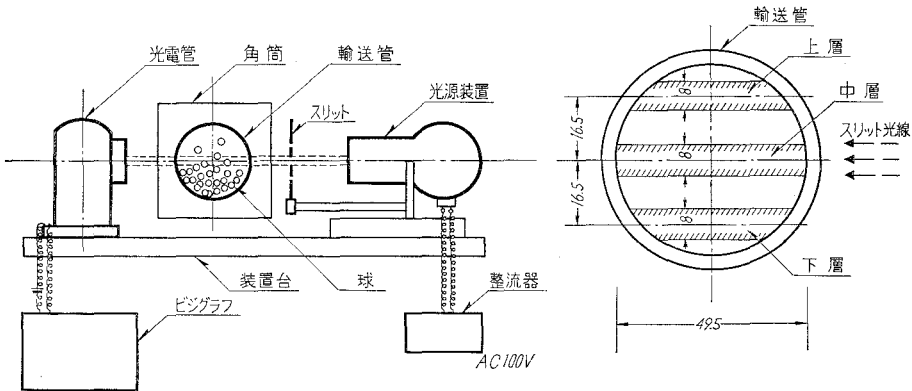


図-2 観測装置配置図

タクリル樹脂板製の角筒で囲み、角筒の中にも水を入れて管の曲面による光の屈折を防ぐ。戻り管出口には球を受取る網籠を設ける。観測装置は図-2に示してある。光源には100 V, 150 W 光源, 受感部には90 V 光電管(商品名マリス)をそれぞれ3基用い、受感光量の変化はFR-301 ビジグラフで記録する。

2. 実験方法

最初ルーツ流量計の上流側弁を全開にしておき、下流側弁を調節して目標流速になるようにする。この調節を行なった後、上流側弁を全閉にして、球入れ T 管より所定数の球を入れ上流側弁を全開にし球シャッタを開き、球群を水流で輸送する。流速、球径および球材質の各組合せについて各5回測定の実験を行なう。

観測および測定は、

(1) 光源、光電管および記録装置の組合せにより、光線帯内を球が通過するとき遮光することを利用し、管の上、中および下層を通過した球の比較的な頻度を測定する、

(2) 普通カメラおよび8 mm シネカメラにより、観測管路内の球群の輸送される状態を観測撮影する、

(3) 球群が管路内を3 m 輸送される時間をストップ・ウォッチまたはビジグラフと光電管で測定して球群の被輸送速度を求める、

の3項目とする。

以上の実験による1団の球群の中程の状態をもって、連続して球群が輸送されるときの状態に相応するものとの仮定をおき、実験結果をまとめる。球群の加速距離は、球比重量の小的时候き極めて短かいことが知られているが、本実験では、これをストロボライト用高照度照明装置を用いて球群を追跡し、観測部で速度が一定であることを確認した。流速はルーツ流量計により測定したが、これに重量法を併用した。

III. 管内頻度と輸送状態の定義

1. 管内頻度

前節で述べたように、観測区間を通過する球群が上、中および下層に如何に分布されるかを、遮光光量の比をもって測定したもので、管内を透過するスリット光線を遮ぎるものが全くない場合を頻度0%とする。また光を完全に遮ぎった場合を頻度100%とする。或る量の球が通過するときは、これらの中間の状態で、光線の一部が遮ぎられる。そこで上、中および下層のそれぞれについて、頻度100%の光量に対する各層の光量を百分率で表わし、

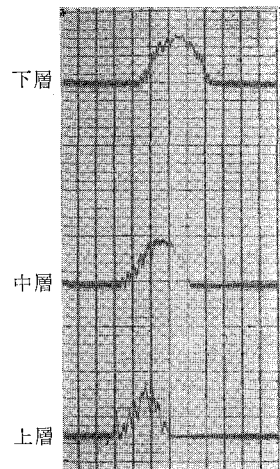


図-3 ビジグラフ観測記録例
(ポリスチロール球 $d=6\text{ mm}\phi$,
 $v_w=1.8\text{ m/sec}$)

3層の百分率の和を改めて100に置き換えて、それぞれの百分率を計算する。このようにすれば、輸送球群の管断面上での拡散された状態を知ることが出来る。この値(%)をもって管内頻度 P と呼ぶことにする。(一般に使われている管内濃度とは異なるものである。もし供給粒群の管内濃度の平均値がわかるならば、各層の管内濃度をこの管内頻度から求めることができる。) 図-3にはピジグラフの記録結果の一例を示す。

2. 輸 送 状 態

まえがきで述べた輸送の3状態、すなわち管底流、部分流および均一流をここで定量的に定義する。これはこの実験結果を考慮して定めたものであるが、説明の都合上、本節で述べることにする。

実験結果から見ると、直径一定の1つの球群は、いずれの場合も管内平均流速が低速から高速になるにつれて輸送状態が変化するが、ある流速以上になると各層の頻度はほぼ一定となる。そこで上記頻度の定義に基づいて、次のように球群の被輸送状態を定めた。

管底流 (flow with low distributed spheres, low flow); 中層における頻度が **20% 以下** の輸送状態、この場合の上層頻度は **0%** であり管閉塞につながる状態、

均一流 (flow with widely distributed spheres, wide flow); 上層における頻度が **10% 以上** の輸送状態、輸送上からは最も安定した状態、

部分流 (flow with partially distributed spheres, partial flow); 上の2つの流れの中間の輸送状態。

IV. 実 験 結 果

1. 管内平均流速 v_w および球群と水の速度比 v_s/v_w

図-4.1 から 図-4.4 に見られるように、球の比重 γ_s によってその様相は異なる。いずれも v_w の低い領域においては v_s/v_w が小さな値を示すとともに、球径 d が小なるものほどその値は小さくなる。またこの領域における v_s/v_w の分散域は同一流速に対して γ_s の小なるものほど狭くなり、かつ、その値も大きくなる。管内平均流速 v_w が増大するにつれて v_s/v_w は大きくなり、一定の最大値 0.9~1.0 に近づく。

高速領域においても、塩化ビニール球のように γ_s の大きい球は、球径による v_s/v_w の大小の順序は変わらないで、それぞれ一定値に近づく。球の γ_s が小さくなるにつれて、より低速領域で一定の速度比に達する傾向はあるが、球の大きさによる差は判然としなくなる。図-4.4 のポリスチロール球の場合は、10, 18 mm ϕ の場合を省略してあるが、これは両者とも図示の曲線とほぼ同様の傾向を示しつつ、これら曲線群中にプロットされる。図-5.1 から 図-5.4 は v_w をパラメータとして v_s/v_w を d/D によってまとめたものである。

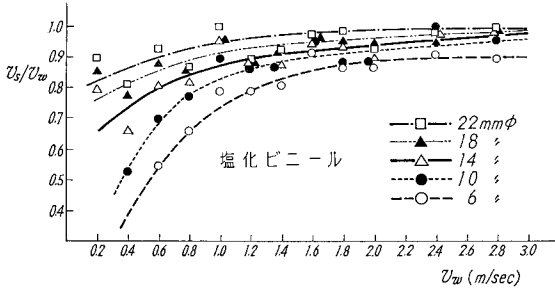


図-4.1

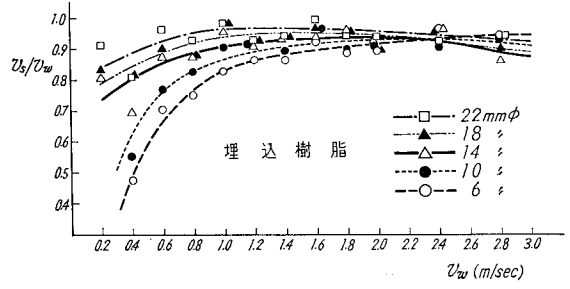


図-4.2

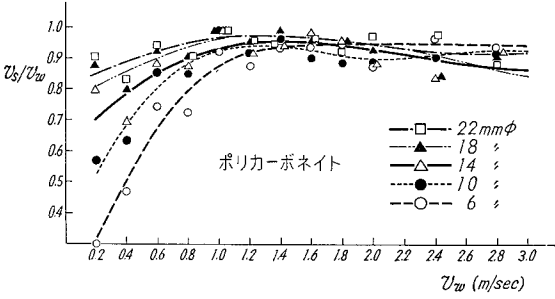


図-4.3

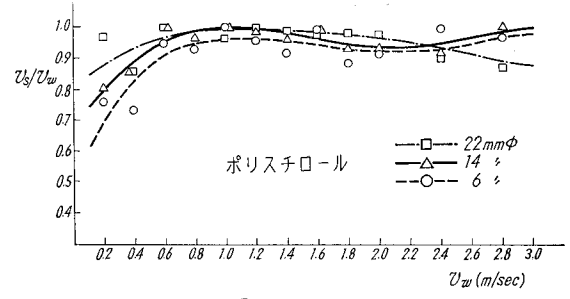


図-4.4

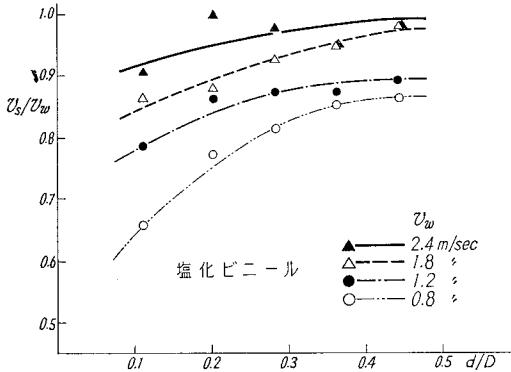


図-5.1

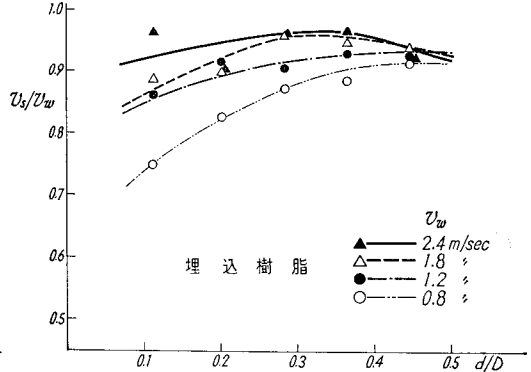


図-5.2

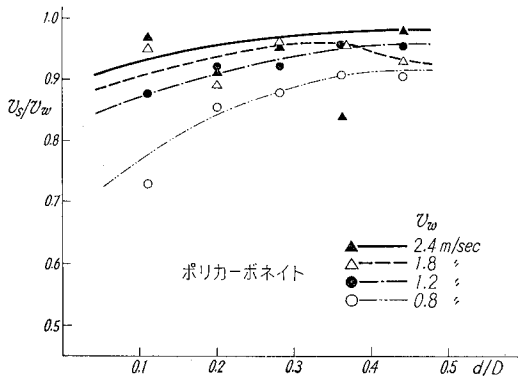


図-5.3

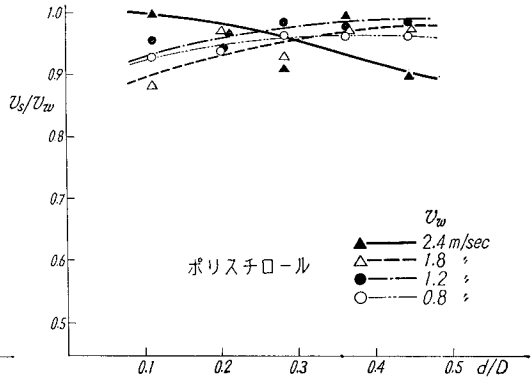


図-5.4

2. 輸送状態の分類および管内頻度とフルード数

図-6には球群の輸送状態の観測写真を図にして示してあり、先に定義された輸送の3状態が図中に例示されている。また図-7はその3状態の写真観測の実例である。

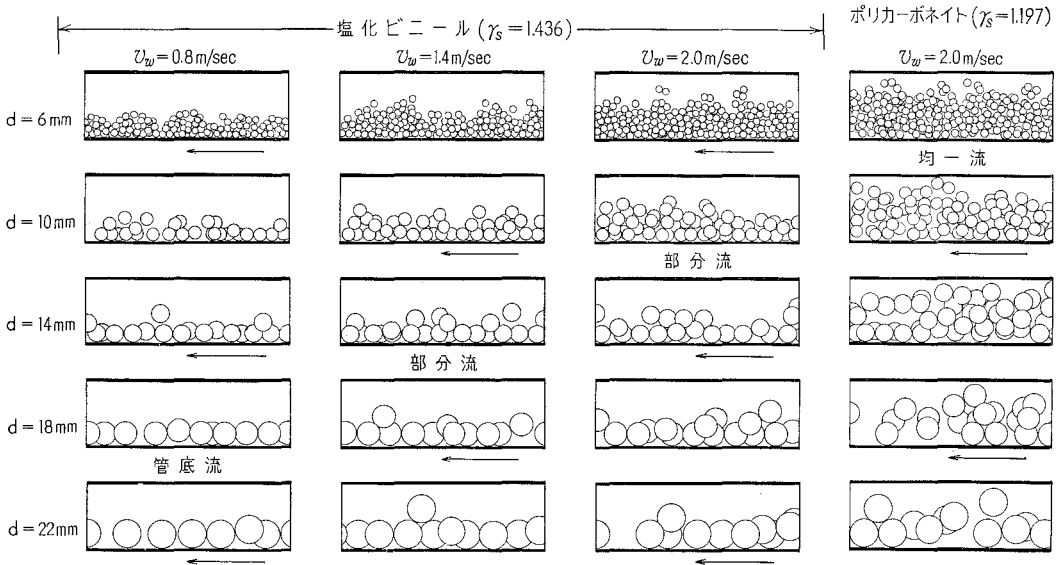


図-6 球群の輸送状態 (D=50 mmφ)

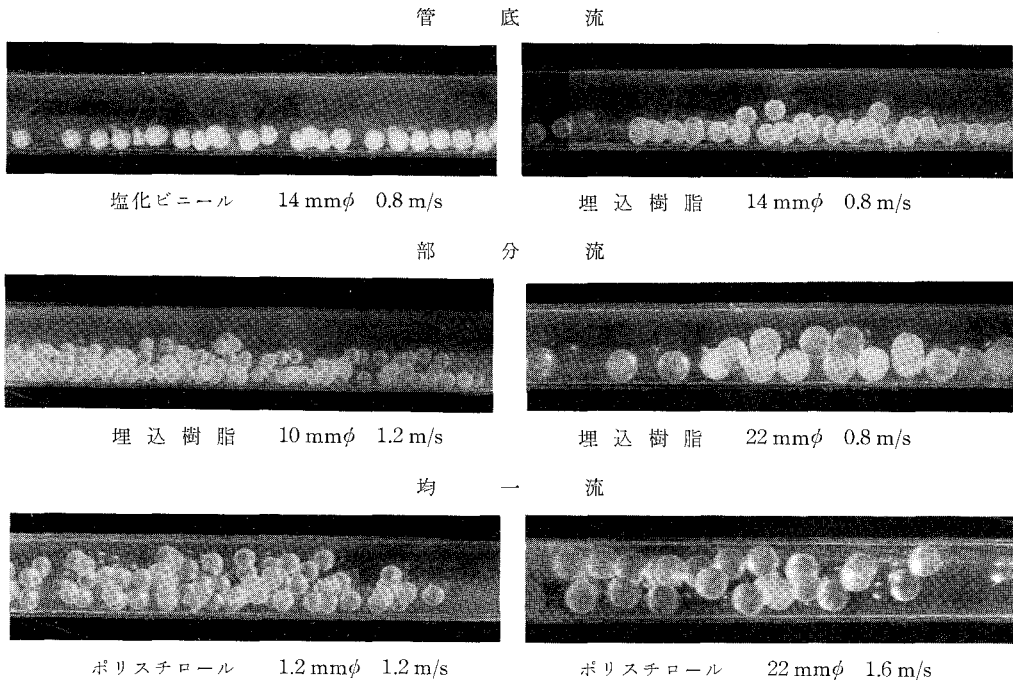


図-7 写真観測の実例

図-8.1から図-8.4までは10mmφ球の各材質につき、図-8.5から図-8.8までは埋込樹脂の各球直径につき、管内頻度P%と管内平均流速 v_w との関係を示してある。 v_w の増大とともに管底流より部分流、均一流へと移行することがわかる。 γ_s の小さなものほどその移行は

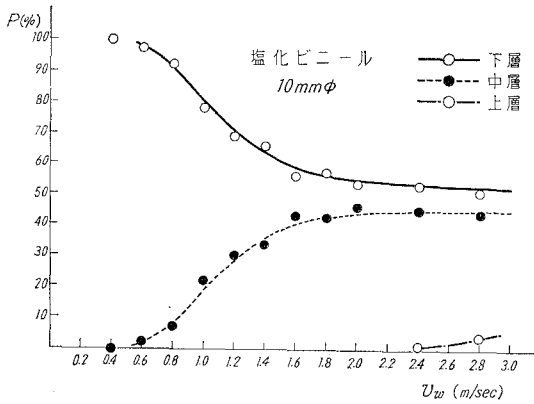


図-8.1

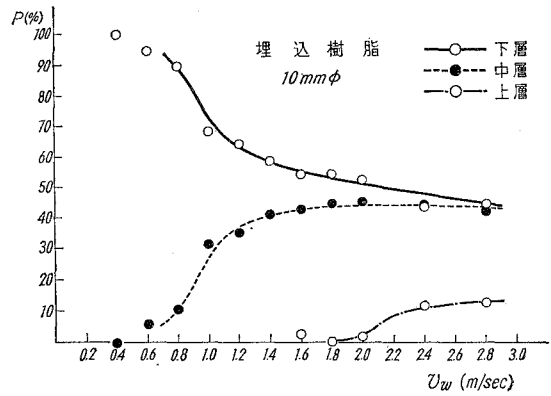


図-8.2

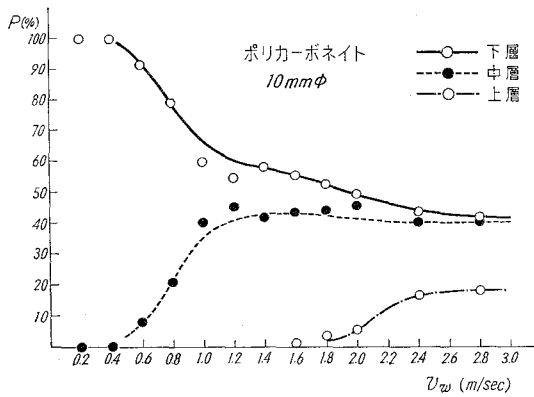


図-8.3

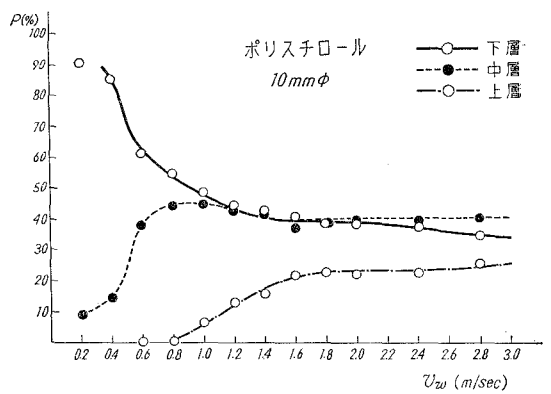


図-8.4

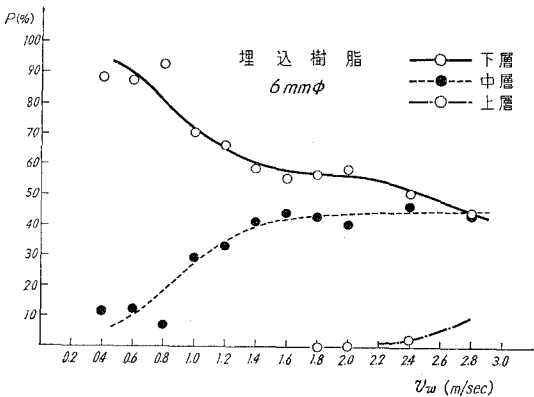


図-8.5

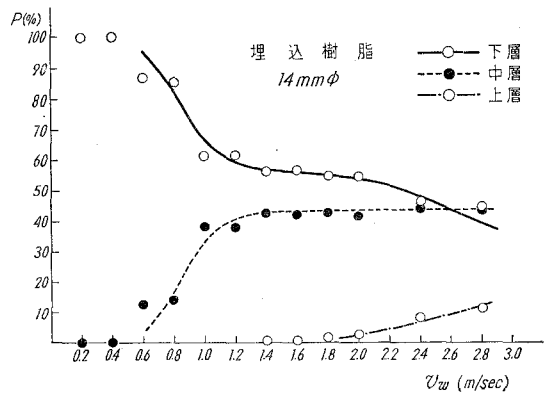


図-8.6

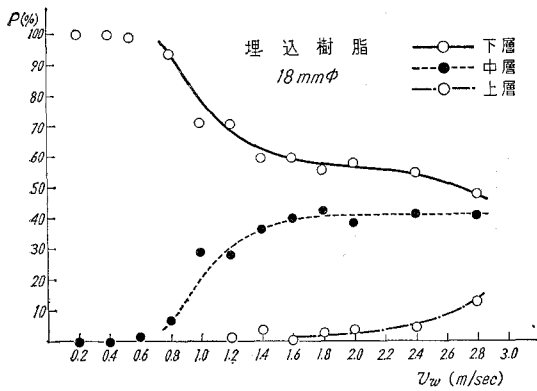


図-8.7

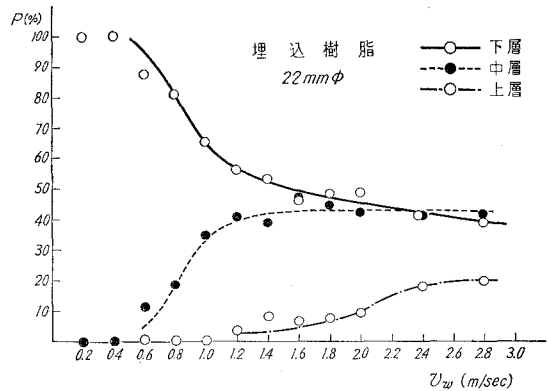


図-8.8

より低速領域で行なわれ、ある一定の頻度に近づく傾向がみられる。また同質球については d/D の大なるものほど、より低速領域で移行が行なわれることもわかる。これらの到達する一定の頻度は、上層 20~25%、中層 40~45%、下層 30~50% である。(管内頻度の定義には上層

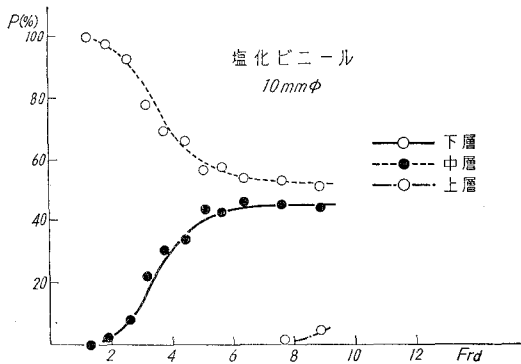


図-9.1

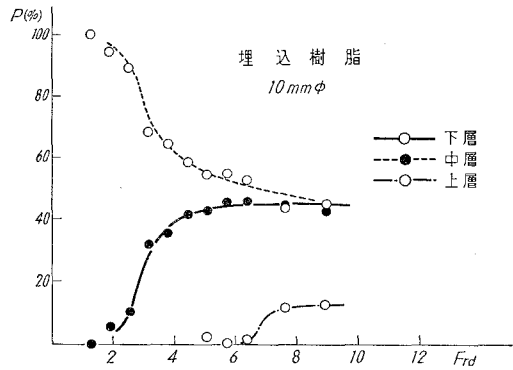


図-9.2

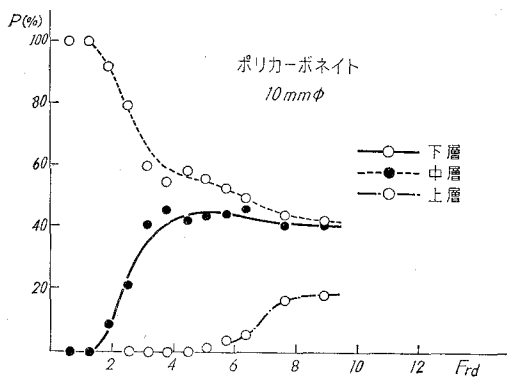


図-9.3

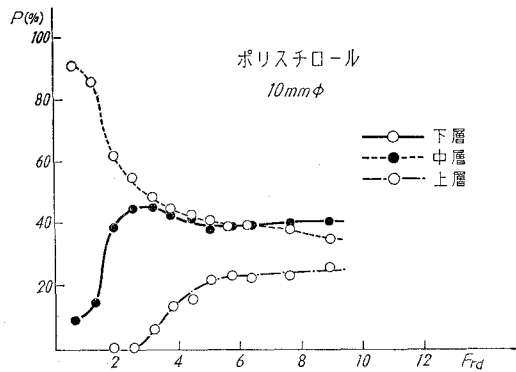


図-9.4

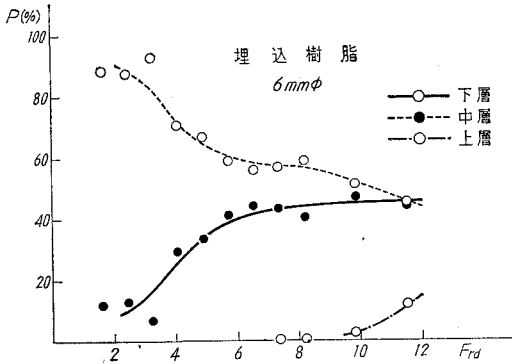


図-9.5

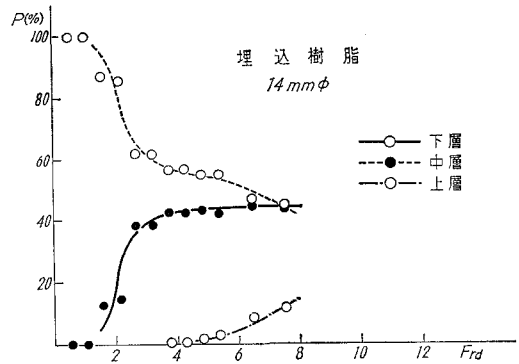


図-9.6

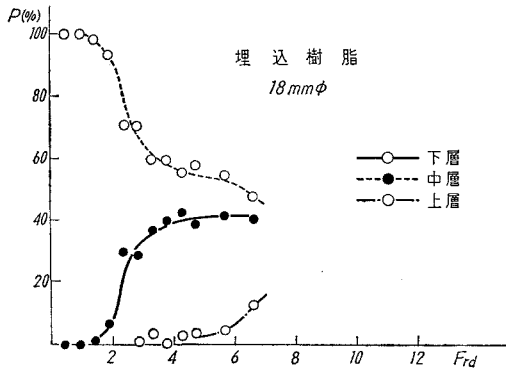


図-9.7

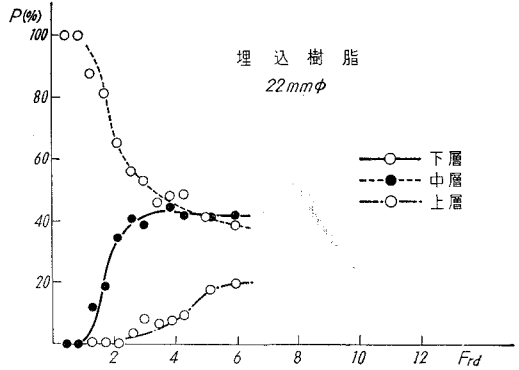


図-9.8

の20, 中層の40のそれぞれ1/2を用いた。) v_w が大きくなるにつれて, 上層頻度はある流速から急に増加するが, このときには既に中層頻度は一定の状態に達しており, あたかも上層頻度の増加分は下層頻度の減少となって現われているような形となり, 上層, 下層, 中層の順に頻度は大きくなっている。

これらの管内頻度 P と v_w の関係を, 管内頻度 P と球に関するフルード数 $F_{rd} = v_w / \sqrt{g \cdot d}$ でまとめてみると, 図-9.1から図-9.8のように表わされる。図-9.1から図-9.4までは10mmφ球の各材質につき, 図-9.5から図-9.8までは埋込樹脂の各球直径につき示してある。フルード数は次元解析などからも伺い知られるように, 混相流を取り扱う場合に, 粒子に関するフルード数 F_{rd} , または相対速度 $v_r = v_w - v_s$ を考慮したフルード数 $F'_{rd} = v_r / \sqrt{g \cdot d}$, あるいは管内流れのフルード数 $F_{rD} = v_w / \sqrt{g \cdot D}$ で整理すると都合がよいので使用する。

図-10および図-11は, d/D および γ_s/γ_w を2軸にとり, 他の軸に F_{rD} または F_{rd} をとって, それらの関係を表わしたもので, これら2図により球群輸送の3状態が立体的に明示されることがわかる。

以上のような方法によって球群の輸送状態を分類することができるので, 分類の一方法と

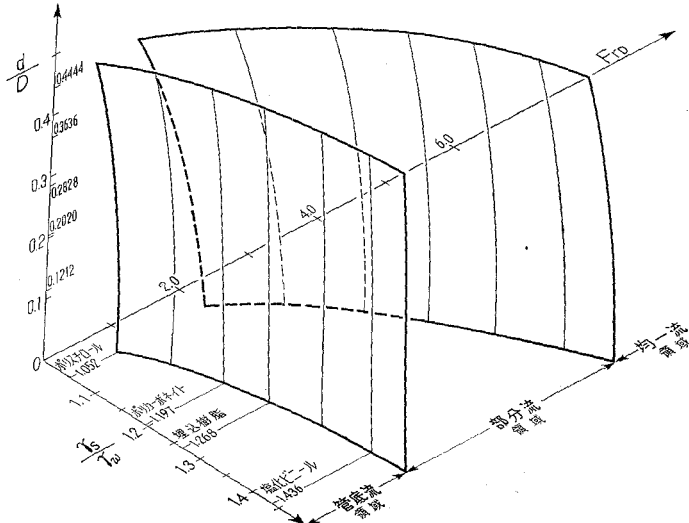


図-10

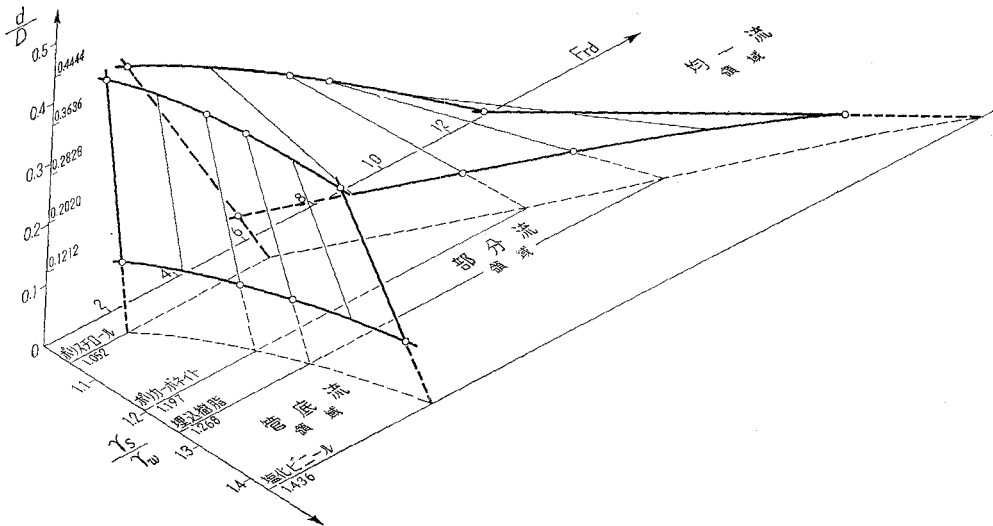


図-11

して提案するものである。

これらの図によって、 d/D の大なるほど、 γ_s/γ_w の小なるほど、 F_{rD} および F_{rA} の小さい領域で、管底流から部分流、均一流へと早く遷移することが直ちに理解される。

V. 考察とまとめ

1. 速度比 v_s/v_w について

本実験の範囲では、速度比 v_s/v_w は v_w の増加とともに増し、0.9~1.0 に漸近している。

一般には同一大きさの粒体については、 r_s の大なるものほど漸近速度比は 1.0 より離れて小となることが知られている。(たとえば、ずり(研)では $r_s=2.7$, $d=16.2\text{ mm}\phi$, $D=80.7\text{ mm}\phi$ のとき漸近速度比は 0.82 である⁵⁾。)しかし本実験のポリスチロールのように、 r_s が水に極めて接近して来ると、必ずしもそうではない。

本実験においては、球直径の大なるほど、すなわち d/D の大なるほど、また r_s の小なるほど、より小さな v_w の時に速度比 v_s/v_w は最大値 0.9~1.0 に到達する。

この速度比については、直径比で代表される阻害面積、管内主流、流れの乱れの大きさ、重力、管内粒子間の摩擦および衝突、粒子と管壁との摩擦および衝突などの諸因子のいずれが、輸送状態に対して支配的であるかによって変化するものであると考えられる。たとえば、 v_w の増大につれて v_s/v_w が大きくなることの説明は、低速領域での粒子の摩擦は管底部に対して大きくきいているが、 v_w の増加につれて下層頻度が減少し、この結果管底摩擦が減少し、管摩擦が全体として小さくなることで理解されよう。

2. 管内頻度について

フルード数 F_{rd} または F_{rn} が大きくなるにつれて、管内各層の頻度は一定値に近づき、中層において最も頻度が大きくなる。

3. 輸送状態の分類について

本実験の方法によれば、管内の球の頻度は特有の変化を示すので、これらを基にして、輸送状態の定量的分類が可能であることが明らかとなった。

VI. む す び

以上の実験によって、たとえば石炭の水力輸送を考えると、その粒子を球に理想化した場合の流れの様相の、基礎的な資料の一端が得られたものと考えることができる。

実験に協力頂いた本学流体工学実験室の海鉾武司、一条猛雄、魚住栄治、佐野正博の諸君および当時学生の林俊秀、越野和雄、橋本修、今泉善勝の諸君に心から謝意を表する。

(昭和 44 年 4 月 30 日受理)

文 献

- 1) Segré, G. & A. Silberberg: Jl. Fluid Mechanis, **14**, 115 (1962).
- 2) 奥田教海: 室蘭工業大学研究報告, **5**, 1 (昭 40-7).
- 3) 池森亀鶴: 日本機械学会誌, **66**, 537 (昭 38-10).
- 4) 上滝具貞・茂利英智: 日本機械学会論文集, **33**, 254 (昭 42-10).
- 5) 坂本正克: 日本機械学会講演論文集, No. 194 (昭 43-4).
- 6) 植松時雄ほか 3 名: 流体・固体輸送工学ハンドブック.