



## カプセル流体輸送に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-11-01 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 柳井田, 勝哉, 藤沢, 正一郎 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24729/00008143">https://doi.org/10.24729/00008143</a>

# カプセル流体輸送に関する研究\*

## On the Pipeline Flow of Capsules

柳井田 勝 哉\*\*, 藤 沢 正一郎\*\*

Katsuya YANAIDA\*\*\* and Shoichiro FUJISAWA\*\*\*

(昭和49年9月5日 受理)

### Summary

This report is concerned with the effects of capsule/pipe diameter ratio, capsule length/diameter ratio and capsule specific gravity on the drag coefficient of capsule.

A drag coefficient of capsule can be theoretically and experimentally expressed by a function of  $\bar{l}/(1/\bar{d}-1)^2 \cdot R_e$ , where  $\bar{l}$  is the capsule length/diameter ratio,  $\bar{d}$  the capsule/pipe diameter ratio and Reynolds number  $R_e$ ;  $R_e = U_m d / \nu$ , in which  $U_m$  is the mean fluid velocity at the leading edge of capsule,  $d$  the diameter of capsule and  $\nu$  the kinematic viscosity of the fluid.

### 1. 結 言

最近新らしい輸送手段としてカプセル流体輸送が種々の分野<sup>1)2)</sup>で脚光をあびてきており、研究面でも水平および傾斜管における流れに関する解析<sup>3)~9)</sup>および実験の<sup>10)~13)</sup>成果が多数知見されるが、いまだにカプセル流体輸送の設計基準となるものが明確にされていない。本報は危険物などのカプセル流体輸送を目的とする研究であり、まず流体中におけるカプセルの安定性が問題となる。カプセルの安定性に関与する因子として、カプセルの形状、カプセルの寸法、カプセルの比重およびカプセルの粗さなどが考えられる。したがって、これらの問題を検討するために基準となる特性を求めておく必要がある。そこで、本報では助走区間を考慮して2重管内の流れに関する解析を行なって、垂直管内に浮遊静止しているカプセルの抵抗係数に関する一般式を求め、かつこれとカプセル長さ、カプセル径およびカプセル比重などとの関係式を実験によって明らかにした。

### 2. 記 号

$B$ ; 浮力

$C_d$ ; 抵抗係数

$\bar{d}$ ;  $d/D$

$D$ ; 管内径

$d$ ; カプセルの外径

$g$ ; 重力加速度

$h$ ; カプセルと管内壁とによるすきま

$l$ ; カプセルの長さ

$\bar{l}$ ;  $l/d$

$P$ ; 圧力

$P_0$ ; カプセル前方の圧力

$P_1$ ; カプセル前縁での圧力

\*日本機械学会，精機学会北陸信越支部長野地方講演会発表（昭49—10）

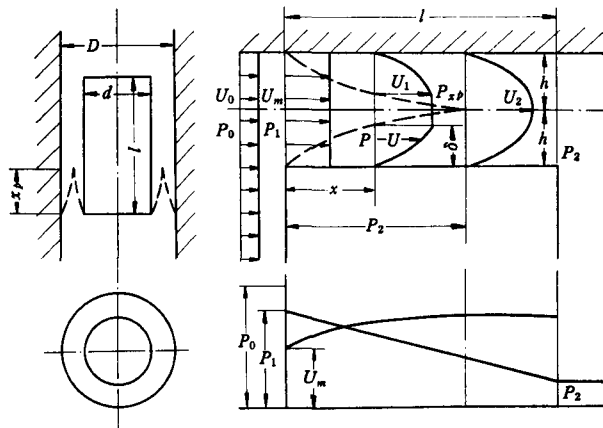
\*\*機械工学科

\*\*\*Department of Mechanical Engineering

- |                            |                              |
|----------------------------|------------------------------|
| $P_2$ ; カプセル後縁での圧力         | $x_p$ ; $x_p/d$              |
| $P_{x_p}$ ; 境界層の重なる点の圧力    | $y$ ; 流れ方向に垂直な座標             |
| $Q$ ; 流量                   | $\Gamma$ ; 摩擦力の無次元量          |
| $R$ ; レイノルズ数 $U_m l/\nu$   | $\gamma_w$ ; 水の比重量           |
| $R_e$ ; レイノルズ数 $U_m d/\nu$ | $\delta$ ; 境界層の厚さ            |
| $R_f$ ; レイノルズ数 $U_m h/\nu$ | $\zeta$ ; 圧力損失係数             |
| $U$ ; 境界層内の流速              | $\eta$ ; 境界層の無次元幅 $\delta/h$ |
| $U_0$ ; カプセル前方の流速          | $\alpha$ ; 圧力変化の無次元量         |
| $U_m$ ; カプセル前縁での一様流速       | $\mu$ ; 流体の粘性                |
| $U_1$ ; $x$ 断面の主流速         | $\nu$ ; 動粘性係数                |
| $U_2$ ; 境界層が重なる場合の最大流速     | $\rho$ ; 流体の密度               |
| $W$ ; カプセルの重量              | $\bar{\rho}_c$ ; カプセルの比重     |
| $x$ ; 流れ方向の座標              | $\xi$ ; 係数 $(1-\bar{d}^2)^2$ |
| $x/d$                      | $\tau$ ; セン断応力               |
| $x_p$ ; 境界層の重なる点の座標        | $\phi$ ; 流速の無次元量 $U_1/U_m$   |

### 3. 基礎式

カプセルと管壁の間の流れを解析するため 図・1 のようなモデルを考える。図に示されているようにカプセルは垂直な管内に浮遊静止し、カプセル前縁で縮流現象は現われないものと仮定する。  $x$  での境界層の厚さを  $\delta$  とすれば、  $x_p$  においては管壁に発達した境界層とカプセルの周りの境界層が重なるものとする。境界層の助走区間を含む流れでは、レイノルズ数  $R = U_m l/\nu < 5 \times 10^5$  で層流である。流体中でカプセルが浮遊静止しているときは、カプセル前後の圧力差にもとづく力、カプセル表面の摩擦力、浮力、カプセルにはたらく重力などの諸力が釣り合い、次式がえられる。



図・1 カプセル流れのモデル

$$W - B = (P_0 - P_2) \frac{\pi}{4} d^2 + \int_0^l \tau \pi d dx \quad \dots\dots\dots (1)$$

浮遊速度および抵抗係数についてはそれぞれ次式のように定義する。

$$U_m = \frac{Q}{\frac{\pi}{2} D^2 (1 - \bar{d}^2)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_d = \frac{W - B}{\frac{\rho}{2} U_m^2 \cdot \frac{\pi}{4} d^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(1) 式の右辺について、流れの解析を行なうためには二つの領域に分けて考える。すなわち、境界層が重ならない領域 ( $x < x_p$ ) と境界層の重なる領域 ( $x > x_p$ ) とについて検討する。

3.1 境界層が重ならない場合 ( $x < x_p$ )

図・1を参照して流れの方程式として次のように連続の式および運動量の方程式が示される。

$$\pi d \int_0^{\delta} \rho U dy + \pi (d+4h) \int_0^{\delta} \rho U dy + \pi (d+2h) (2h-2\delta) \rho U_1 = \pi \{2h(d+2h)\} \rho U_m \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{d}{dx} \left\{ \pi d \int_0^{\delta} \rho U^2 dy + \pi (d+4h) \int_0^{\delta} \rho U^2 dy + \pi (d+2h) (2h-2\delta) \rho U_1^2 \right\} = -\pi (d+2h) \cdot 2h \cdot \frac{dP}{dx} - \tau \{ \pi d + \pi (d+4h) \} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

$$\tau = \mu \left( \frac{dU_1}{dy} \right)_{y=0} = \mu \frac{2U_1}{\delta}, \quad \frac{dP}{dx} = -\rho U_1 \frac{dU_1}{dx}$$

圧力 P は y 方向に一定とすれば、

$$P = P_1 + \frac{\rho}{2} U_m^2 - \frac{\rho}{2} U_1^2 = P_0 + \frac{\rho}{2} U_0^2 - \frac{\rho}{2} U_1^2 \dots\dots\dots (6)$$

境界層内の速度分布は次式で仮定する。

$$\frac{U}{U_1} = 2 \left( \frac{y}{\delta} \right) - \left( \frac{y}{\delta} \right)^2 \dots\dots\dots (7)$$

(7) 式を (4) 式に導入すると次式がえられる。

$$\frac{U_1}{U_m} = \frac{1}{\left\{ 1 - \frac{1}{3} \left( \frac{\delta}{h} \right) \right\}} \dots\dots\dots (8)$$

さらに (8) 式は次のかきかえられる。

$$\phi = \frac{1}{\left( 1 - \frac{\eta}{3} \right)} \dots\dots\dots (9)$$

次に (5) 式を積分すれば次のような式がえられる。

$$\frac{x}{h \cdot R_f} = 2.7\phi - 4.8 \ln \phi - \frac{2.1}{\phi} - 0.6 \dots\dots\dots (10)$$

(10) 式について数値計算すると表・1のように示される。

カプセルと管壁の境界層が重なるのは、 $\delta = h$  のときであり、ここでは (9) 式により  $\phi =$

表1 数値計算

$\phi$	$x/h \cdot R_f$	$\phi$	$x/h \cdot R_f$	$\phi$	$x/h \cdot R_f$	$\phi$	$x/h \cdot R_f$	$\phi$	$x/h \cdot R_f$
1.01	0.0000	1.11	0.0041	1.21	0.0164	1.31	0.0378	1.41	0.0684
1.02	0.0001	1.12	0.0050	1.22	0.0182	1.32	0.0404	1.42	0.0719
1.03	0.0002	1.13	0.0059	1.23	0.0200	1.33	0.0431	1.43	0.0756
1.04	0.0005	1.14	0.0069	1.24	0.0219	1.34	0.0460	1.44	0.0793
1.05	0.0008	1.15	0.0080	1.25	0.0239	1.35	0.0489	1.45	0.0832
1.06	0.0011	1.16	0.0092	1.26	0.0259	1.36	0.0519	1.46	0.0871
1.07	0.0016	1.17	0.0105	1.27	0.0281	1.37	0.0550	1.47	0.0911
1.08	0.0021	1.18	0.0118	1.28	0.0304	1.38	0.0582	1.48	0.0952
1.09	0.0027	1.19	0.0133	1.29	0.0328	1.39	0.0615	1.49	0.0994
1.10	0.0034	1.20	0.0148	1.30	0.0352	1.40	0.0649	1.50	0.1037

1.5 となる。カプセルの前縁すなわち、 $x=0$  からこの点までの距離、 $x_p$  は (10) 式により求めることができ、次の式で与えられる。

$$\frac{x_p}{hR_f} = 0.1037 \quad \dots\dots\dots(11)$$

すなわち、(11) 式において  $R_f = \frac{U_m h}{\nu}$ 、 $h = 0.25D(1-\bar{d})$  を代入すると、これらに対して  $x_p$  が求められる。

カプセル前縁から  $x$  の距離までの圧力変化を無次元量  $\kappa$  で表わすと、( ) 式から次式のように示される。

$$\kappa = \frac{P_0 - P}{\frac{1}{2} \rho U_m^2} = \frac{P_0 - P_1}{\frac{1}{2} \rho U_m^2} + \frac{P_1 - P}{\frac{1}{2} \rho U_m^2} = (1 - \xi) + (\phi^2 - 1) \quad \dots\dots\dots(12)$$

(12) 式から  $\kappa$  は  $x/h \cdot R_f$  の関数であることがわかる。

次にカプセルはその表面にせん断応力をうけ、 $x=0$  から  $x$  までのカプセルに加わる摩擦力を無次元量で示すと次のようになる。

$$\Gamma = \frac{\int_0^x \tau \pi d dx}{\frac{\rho}{2} U_m^2 \cdot \frac{\pi}{4} d^2} = \frac{16}{3} \cdot \frac{\phi^2}{(\phi-1)} \cdot \frac{h}{d} \cdot \frac{x}{h \cdot R_f} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここで

$$\frac{x}{h \cdot R_f} = 2.7\phi - 4.8 \ln \phi - \frac{2.1}{\phi} - 0.6$$

したがって、(12) 式および (13) 式によりカプセルの抵抗係数は次のように求められる。

$$C_d = (1 - \xi) + (\phi^2 - 1) + \frac{16}{3} \cdot \frac{\phi^2}{(\phi-1)} \cdot \frac{h}{d} \cdot \frac{x}{h \cdot R_f} \quad \dots\dots\dots(14)$$

さらに (14) 式を一般式にかきかえると次式のように表わされる。

$$C_d = (1 - \xi) + (\phi^2 - 1) + 21.33 \frac{\phi^2}{(\phi-1)} \cdot (1/\bar{d} - 1) \cdot \frac{\Gamma}{(1/\bar{d} - 1)^2 \cdot R_e} \quad \dots\dots\dots(15)$$

(15) 式から、抵抗係数  $C_d$  は  $\Gamma / (1/\bar{d} - 1)^2 \cdot R_e$  および  $\bar{d}$  のみの関数で表わされることがわかる。

### 3.2 境界層が重なる場合 ( $x > x_p$ )

カプセルの周りの境界層と管壁の境界層が重なった後は流れに垂直な断面で速度分布は不変であり速度の最大値、 $U_2 = (3/2) U_m$  である。またカプセルの表面にはたらくせん断応力は次式で示される。

$$\tau = 2\mu \frac{U_2}{h} = \left( \frac{\rho U_m^2}{2} \right) \cdot \left( \frac{6}{R_f} \right) \quad \dots\dots\dots(16)$$

この領域では流れ方向の圧力変化は一定であり、境界層が重なった点からカプセル後縁までの圧力降下は 図・1 から次式で示される。

$$P_{x_p} - P_2 = \frac{(l - x_p) \cdot \tau}{h} \quad \dots\dots\dots(17)$$

(17) 式に (16) 式を導入すると、圧力変化の無次元量  $\kappa$  が次式で表わされる。

$$\kappa = \frac{P_{x_p} - P_2}{\frac{\rho}{2} U_m^2} = \frac{6(l - x_p)}{h \cdot R_f} \quad \dots\dots\dots(18)$$

境界層が重なる点、 $x = x_p$  では、 $\phi = 1.5$  となるので  $\Gamma = 2.49h/d$ 、 $\kappa = (1 - \xi) + 1.25$  となり、

カプセルの抵抗係数  $C_d$  は次式のように求められる。

$$C_d = (1 - \xi) + 1.25 + 2.49 \frac{h}{d} + \frac{6(l - x_p)}{h \cdot R_f} \quad \dots\dots\dots (19)$$

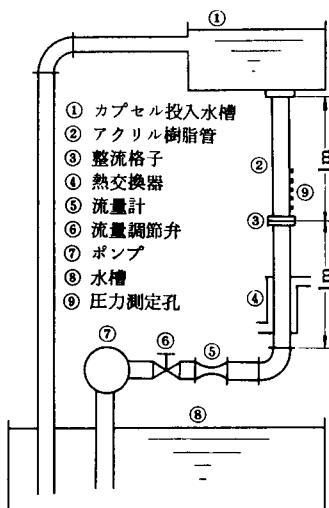
さらに (19) 式を一般式にかきかえると次のようになる。

$$C_d = (1 - \xi) + 1.25 + 0.6225(1/\bar{d} - 1) + \frac{96(\bar{I} - \bar{x}_p)}{(1/\bar{d} - 1)^2 \cdot R_e} \quad \dots\dots\dots (20)$$

(15) 式と同様に境界層が重なる場合でも抵抗係数  $C_d$  は  $(\bar{I} - \bar{x}_p)/(1/\bar{d} - 1)^2 \cdot R_e$  および  $\bar{d}$  の関数となる。浮遊速度  $U_m$  は (3) 式に (14) 式あるいは (15) 式および (19) 式あるいは (20) 式を導入すると求められる。

#### 4. 実験装置および方法

本報では作動流体として水を用いた。装置全体を 図・2 に示す。カプセルは圧力測定孔をもつ垂直管内に投入され、常温の水を上向きに流し、弁を調節してカプセルを浮遊静止する。このときの流量より浮遊速度を求め、さらにカプセルの抵抗係数を求めた。



図・2 装置の全体図

カプセル周りの圧力変化を管壁の測定孔より液柱計に指示された読みで測定した。今回は中実円柱形のカプセルを用い、これらの諸元は 表・2 に示してある。

#### 5. 実験結果と考察

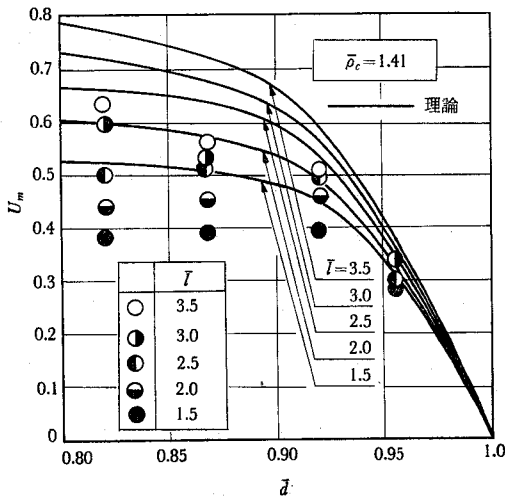
##### 5.1 浮遊速度について

(2) 式で定義される浮遊速度  $U_m$  を一様浮遊状態での  $Q$  より求めて、各々の因子との関係を示すと 図・3、図・4 および 図・5 のようになる。

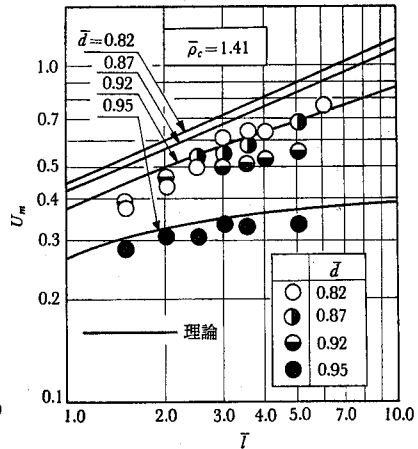
図・3 には、パラメータに  $\bar{I}$  をとり  $U_m$  と  $\bar{d}$  との関係を示している。 $\bar{d}$  が小さい方では不安定な浮遊静止状態がみられるが、 $\bar{d}$  が大きくなると比較的安定した状態を示していることが図からわかる。図・4 にパラメータ  $\bar{d}$  をとり、 $U_m$  と  $\bar{I}$  の関係を示すと、 $\bar{d}=0.95$  ではかなり良く安定して、理論値と似た傾向が表わされる。 $\bar{d}$  の小さい範囲では、せん断流の中で

表2 カプセル及び管の諸元

種類	比重	カプセル径 mm	カプセル長さ (直径比) $\bar{l}$	相対粗度 $k/d$	管内径及び粗度
アクリル樹脂系	1.15	41.0	1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 5.0 6.0	$0.104 \times 10^{-3}$	アクリルパイプ $D=50.0$ mm $k/D=0.022 \times 10^{-3}$
		45.0	1.5 2.0 2.5 3.0 4.0	$0.094 \times 10^{-3}$	
		47.7	1.5 2.0 2.5 3.0 4.0 4.5	$0.089 \times 10^{-3}$	
	1.19	41.3	1.5 2.0 2.5 3.5 4.0 6.0	$0.034 \times 10^{-3}$	
		45.3	1.5 2.0 2.5 3.0 4.0 4.7	$0.031 \times 10^{-3}$	
	1.41	41.0	1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 6.0	$0.021 \times 10^{-3}$	
43.4		1.5 2.0 3.0 3.5 4.0 5.0	$0.046 \times 10^{-3}$		
46.0		1.5 2.5 3.0 3.5 4.0 5.0	$0.043 \times 10^{-3}$		
47.7		1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 5.0	$0.042 \times 10^{-3}$		
アルミニウム	2.70	45.0	1.5 2.0 2.5 3.0 4.0 5.0	$0.267 \times 10^{-3}$	
		47.0	1.5 2.0 2.5 3.0	$0.255 \times 10^{-3}$	
		48.0	1.5 2.0 3.0 4.0	$0.250 \times 10^{-3}$	
鉄	7.80	45.0	1.5 2.0 3.0 4.0	$0.104 \times 10^{-3}$	
		47.0	1.5 2.0	$0.100 \times 10^{-3}$	
		48.0	1.5 2.0 3.0	$0.098 \times 10^{-3}$	



図・3  $U_m$  と  $\bar{d}$  との関係

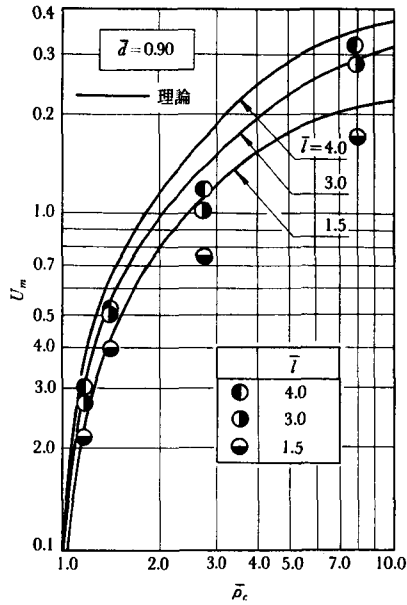


図・4  $U_m$  と  $\bar{l}$  との関係

カプセルが回転を生じている不安定現象がみられた。このような現象は  $\bar{l}$  が小さいほど顕著に現われる。

図・3および図・4では、 $\bar{\rho}_c=1.41$ 一定で  $\bar{d}$ ,  $\bar{l}$  と  $U_m$  との関係を見たが、図・5では、 $\bar{d}=0.90$ 一定として、パラメータを  $\bar{l}$  にとり  $\bar{\rho}_c$  と  $U_m$  との関係を示している。図・5においては、カプセル比重が作動流体である水のものに近いと比較的安定している状態がみられる。

カプセル比重がそれより大きくなると理論値よりかけ離れて、流れに乱れが生じていることが推論される。たとえば、カプセル前縁で縮流現象、カプセル後縁で後流の発生などが考えら



図・5  $U_m$  と  $\bar{\rho}_c$  との関係

れる。これらの現象は今後の研究課題として注目される。

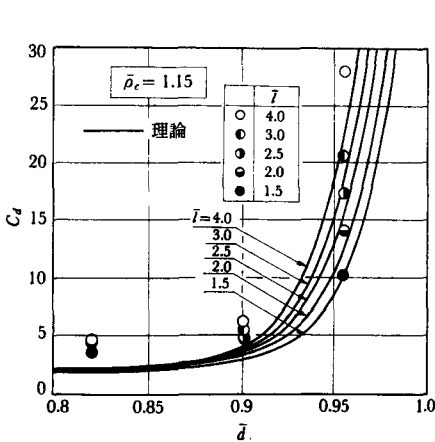
5.2 カプセル抵抗係数について

浮遊速度が求められると、(3)式によってカプセル抵抗係数が実験的に求められる。

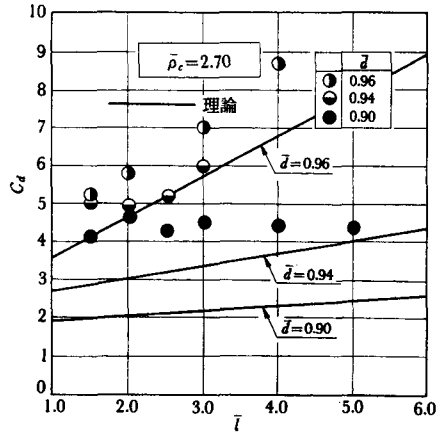
図・6に  $\bar{\rho}_c=1.15$  一定の場合について、 $C_d$  と  $\bar{d}$  との関係を  $\bar{I}$  をパラメータにとって示している。

カプセル比重の小さい場合には図・5に示されているようになんかなり安定しているが、 $\bar{d}$  の小さい領域ではこれと矛盾した傾向を示している。

カプセル比重が大きくなると、 $\bar{d}$  の影響が大きくなって、 $\bar{d}=0.96$  でやや安定した浮遊静止状態が図・7に示されている。 $\bar{d}$  が小さいと、ほとんど不安定状態とみてよい。



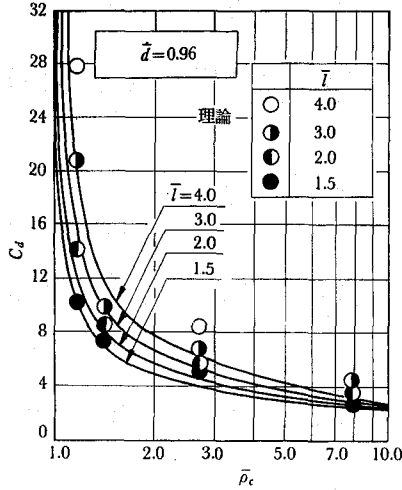
図・6  $C_d$  と  $\bar{d}$  との関係



図・7  $C_d$  と  $\bar{I}$  との関係



図・8には、 $\bar{d}=0.96$ 一定でパラメータを $\bar{I}$ とし、 $C_d$ と $\bar{\rho}_c$ との関係を示している。カプセル比重の小さい領域では $\bar{I}$ の影響が抵抗係数に大きく現われているが、一方カプセル比重が大きくなると、 $\bar{I}$ の影響が少ないことがわかる。



図・8  $C_d$  と  $\bar{\rho}_c$  との関係

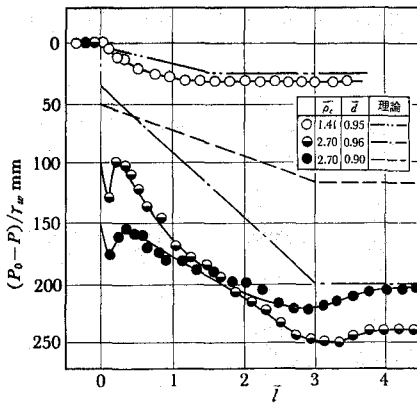
### 5.3 理論と実験との比較

浮遊速度および抵抗係数に関する実験結果より、理論値との比較によって理論の修正を行なう。

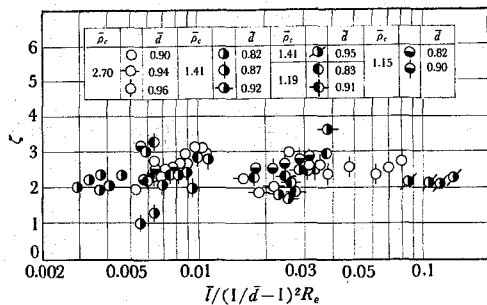
理論においては、カプセル前縁での縮流現象を無視しているが、図・9に示されるように、カプセル前縁における圧力変化に縮流現象のあることがみられる。

図・9には、カプセル3種類の実験例を示しているが、このようにカプセルの各因子によって圧力変化がみられることから、カプセルの安定性を検討するための基本的な資料がえられる。

図・10には、縮流現象による流れの圧力損失係数を、図・9に示される関係から各種カプセル



図・9 カプセル周りの圧力変化



図・10 圧力損失係数

ルについて求め、その結果を示している。

図・10に示される圧力損失係数  $\zeta$  と特性数  $I/(1/\bar{d}-1)^2 \cdot R_e$  との関係から、本実験の範囲内では、 $\zeta = (2.0 \sim 2.5)$  が与えられる。したがって、(14) 式、(15) 式、(19) 式および (20) 式は次のように修正される。

$$i) \quad x < x_p, \quad C_d = \zeta(1 - \xi) + (\phi^2 - 1) + \frac{16}{3} \cdot \frac{\phi^2}{(\phi - 1)} \cdot \frac{h}{\bar{d}} \cdot \frac{x}{hR_f} \quad \dots\dots\dots (21)$$

あるいは、

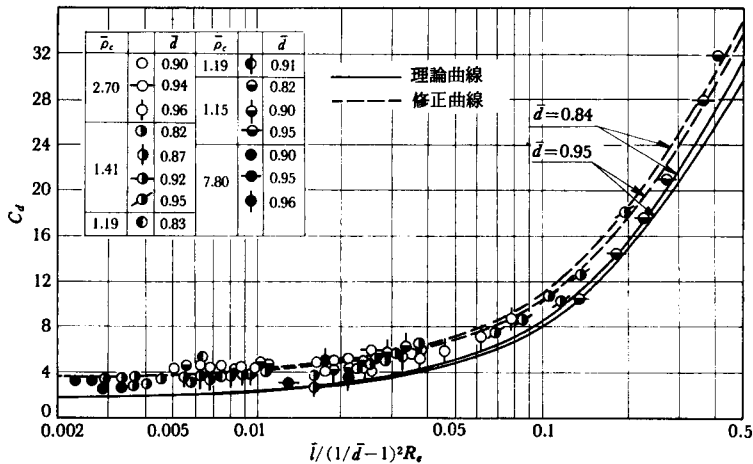
$$C_d = \zeta(1 + \xi) + (\phi^2 - 1) + 21.33 \frac{\phi^2}{(\phi - 1)} \cdot (1/\bar{d} - 1) \cdot \frac{I}{(1/\bar{d} - 1)^2 R_e} \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$ii) \quad x > x_p, \quad C_d = \zeta(1 - \xi) + 1.25 + 2.49 \cdot \frac{h}{\bar{d}} + \frac{6(l - x_p)}{h \cdot R_f} \quad \dots\dots\dots (23)$$

あるいは、

$$C_d = \zeta(1 - \xi) + 1.25 + 0.6225(1/\bar{d} - 1) + \frac{96(I - \bar{x}_p)}{(1/\bar{d} - 1)^2 \cdot R_e} \quad \dots\dots\dots (24)$$

これらの式に本実験でえられた  $\zeta$  の値を導入して、カプセル抵抗係数  $C_d$  と特性数  $I/(1/\bar{d}-1)^2 \cdot R_e$  との関係を示すと 図・11 のようになる。



図・11 カプセル抵抗係数と特性数

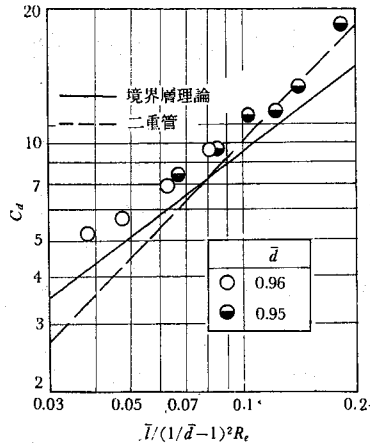
カプセル抵抗係数  $C_d$  は  $I/(1/\bar{d}-1)^2 \cdot R_e$  および  $\bar{d}$  のみの関数であることをすでに明らかにしているが、本実験の範囲内では  $\bar{d}$  により  $C_d$  はあまり変化しないことが 図・11 からわかる。むしろカプセル形状による圧力損失係数  $\zeta$  が  $C_d$  に大きく影響しているようである。

図・12には2重管内流れの解析<sup>14)</sup>と助走区間を考慮した本報による解析の結果を比較して示している。図から、助走区間を考慮した2重管流れの解析に実験結果と対応性のあることが考えられる。

## 6. 結 論

以上の結果を要約すると次のとおりである。

- 1) カプセル比重の小さい領域では、 $\bar{d}=0.95$  あたりで  $I$  によらず安定であること、



図・12 カプセル抵抗係数の解析方法

- 2) カプセル比重の小さい領域では、 $\bar{d}$ ,  $l$  が小さいと不安定であること、
- 3) カプセル比重の大きい領域では、 $\bar{d}$  の影響が大きく安定性に現われること、
- 4) カプセルの安定性はカプセル前縁の縮流あるいはカプセル後縁の後流の影響をうけること、
- 5) カプセルの抵抗係数が特性数  $l/(1/\bar{d}-1)^2 R_e$  で表わされること、
- 6) 助走区間を考慮した解析の妥当性が今後の本研究に指針を与えたこと、今後の研究課題として、カプセル抵抗係数におよぼすカプセル粗さの問題、カプセル後流の問題、カプセル偏心と位置制御の問題など基礎的なものが残されており、次回にこれらについては報告する予定である。

## 謝 辞

かって、固体の水力輸送に関して指導を賜った東北大学工学部川島俊夫教授ならびに本研究に協力頂いている本学の杉野英太郎教授に謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) Hodgson, G.W. and Charles, M.E. "The Concept of Capsule Pipelining". Can. J. Ch. Eng. 42, 43-45, 1963.
- 2) Govir, G.N. and Aziz, K. "The Flow of Complex Mixtures in Pipes". 712-757, VNR, 1972.
- 3) Kruyer, J., Redberger, P.J. and Ellis, H.S. "The Pipeline Flow of Capsules". J. Fluid Mech, 30-3, 513-531, 1967.
- 4) Lazarus, J.H. and Kilner, F.A. "Incipient Motion of Solid Capsules in Pipelines". Paper C3 Proceedings Hydrotransport 1, BHRA, 1970.
- 5) Carstens, M.R. "Analysis of a Low-Speed Capsule-Transport Pipeline". Paper C4 Proceedings Hydrotransport 1, BHRA, 1970.
- 6) Vardy, A.B., Bloor, M. and Fox, J.A. "Capsular Flow in Pipeline". J. Fluid Mech, 56-1, 49-59, 1972.
- 7) Duckworth, R.A. and Singh, G. "An analytical Treatment of the Flow through an annular Channel". Paper F5 Proceedings Hydrotransport 2, BHRA, 1972.

- 8) Duckworth, R.A. and Singh, G. "An analytical Treatment of the Flow through annular Chnnel". Paper G2 Proceedings Hydrotransport 3, BHRA, 1974.
- 9) Lazarus, J.H. "Power Optimisation of Hydraulic Transportation of Solid Capsules". Paper G4 Proceedings Hydrotransport 3, BHRA, 1974.
- 10) Kruyer, J. "Low Pressure Gradients in Capsule Pipelines". Paper F2 Proceedings Hydrotransport 2, BHRA, 1972.
- 11) Jensen, E.J. "Capsule Pipelining-the System and its Potential". Paper G1 Proceedings Hydrotransport 3, BHRA, 1974.
- 12) Ellis, H.S. "The Effect of the Density of cylindrical Capsules on the Pressure Gradients in Capsule Pipelines". Paper G3 Proceedings Hydrotransport 3, BHRA, 1974.
- 13) Kruyer, J. "Friction and Surface Roughness Effects in Capsule Pipelines" Paper G5 Proceedings Hydrotransport 3, BHRA, 1974.
- 14) Yuan, S.W. "Foundation of Fluid Mechanics". 269-271, Prentice-Hall, 1967.