

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 555 June 1986

円筒型カプセルの抗力係数および傾斜管内流動特性

浜 田 賢 二
岡 山 義 邦
釜 場 和 宏
中 村 裕 二

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 供試カプセルおよび実験装置	4
2.1 供試カプセル	4
2.2 実験装置	5
3. 実験方法および実験条件	8
3.1 実験方法	8
3.2 実験条件	9
4. 実験結果	10
4.1 カプセルの抗力係数および初動流速	10
4.2 カプセルの加速特性	13
4.3 カプセルの定常走行特性	18
5. まとめ	29
6. あとがき	30
参考文献	30
記号一覧表	30

Coefficient of Drag and Flow Characteristics of Cylindrical Capsules in Inclined Pipes

Kenji HAMADA*
Yoshikuni OKAYAMA**
Kazuhiro UKEBA***
Yuji NAKAMURA***

Synopsis

The transportation system by hydraulic capsule would be applied in the port and harbour area because it has some advantages in the environmental preservation and saving energy. Therefore, fundamental experiments of cylindrical capsules were conducted to investigate the coefficient of drag and flow characteristics in the pipeline.

The following main conclusions were obtained through this study.

- (1) With the increase of the ratio of capsule and pipe diameters, the coefficient of drag of cylindrical capsule in the pipe increases rapidly and has the tendency of having little concern with the eccentricity.
- (2) As to the acceleration of capsule, the capsule velocity usually reaches at the final constant value in a short time. On the other hand, the differential pressure of the pipeline vibrates greatly and it takes relatively long time to diminish.
- (3) It is possible to predict the minimum capsule velocity, in which no lift force acts on capsule, using the coefficient of drag of capsule and the coefficient of moving friction between capsule and pipe.

* Senior Reserach Engineer, Machinery Division

** Chief of Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division

*** Member of Hydraulic Transportation Laboratory, Machinery Division

円筒型カプセルの抗力係数および傾斜管内流動特性

浜田賢二*

岡山義邦**

笠場和宏***

中村裕二***

要 旨

カプセル輸送は、パイプラインによる固体の輸送法の一つであり、環境保全、省エネルギー等の観点から今後種々の応用が期待されている。港湾分野でも、埋立土砂の採取地から埋立地までの直接輸送、人工島と陸上ターミナル間での各種物資の輸送、増大する廃棄物の埋立地や大水深処理場への直接輸送等への応用が考えられる。この分野ではさらに、被輸送物の前後処理が容易なことや、コンテナ輸送と同様にカプセルによる被輸送物の規格化等の品質管理やハンドリング面での利点、あるいは陸海接点での積換え設備の省略といった流通機構の簡素化も期待できよう。

カプセル輸送は空気式と水方式に大別されるが、大量の用水の確保が容易なことや、パイプライン内外の圧力差に対する配慮が少ないことなどから、水方式が有利と考えられる。しかしながら水方式は、その歴史が比較的新しいこと、取扱いが面倒なこと、またカプセル周囲流れの解析が困難なことなどから、実用化に際してのデータの蓄積は十分とはいえない状況である。

以上のような背景から、水方式カプセル輸送の基礎的研究として、パイプライン(内径 100 mm)中での円筒型カプセルの抗力直接測定実験、カプセル初動に必要な流体の流速、いわゆる初動流速の測定、さらに水平流れ、上昇流れ、下降流れにおけるカプセル流送実験を行い、寸法、比重の異なる各種単カプセルの流動特性を調べた。結果を要約すると以下のとおりである。

パイプライン中でのカプセルの抗力係数は、カプセルとパイプの直径比の増大に伴って急激に増大し、かつカプセルの偏心量の影響が小さくなる。またこの抗力係数は、カプセル初動時にはカプセルと管壁との静止摩擦係数と対応づけられる。

カプセル加速特性のうち、カプセル平均加速度は、流体流速の増加に伴って指数関数的に増大するが、総じて加速時間は比較的短い。しかしながら、カプセル流送区間の圧力損失、すなわち差圧は、流送条件によって流体過渡現象として理解される振動状態を明確に示し、この減衰にはカプセル加速終了後も相当の時間を要する。

カプセル定常走行状態においては、カプセル速度はカプセルの抗力係数とカプセル、管壁間の動摩擦によって決定されるが、流体流速の増加に伴って、カプセルに作用する揚力の増加等によってカプセル速度は流体流速に近づき、場合によっては流体平均流速を上回ることもある。

輸送動力を算定するためのカプセルによる圧力損失と流送条件の関係は、周囲流れの差異、上記揚力効果等の影響により変動が比較的大きいが、各カプセルごとにはかなりの相関関係が見られる。

* 機材部 主任研究官(水力浚渫担当)

** 機材部 流体輸送研究室長

*** 機材部 流体輸送研究室

1. まえがき

パイプラインによる固体の輸送方法としては、スラリー輸送、粉体の空気輸送、カプセル輸送等があり、これらに共通する長所として以下の事項が挙げられる。すなわち、パイプラインによって外部と遮断されているため公害問題が少ないこと、全天候型であるため年間稼働率を高め、大量の物資を効率的に輸送できること、自動化、省力化が容易なこと、トラック輸送などと異なり他の輸送系の影響をほとんど受けないことなどである。カプセル輸送についてはこれらのうち、パイプライン、カプセルと二重に保護しているため、外部への汚染の可能性が極めて低いこと、省エネルギーの観点からは流体の圧力エネルギーを利用するため消費電力が少ないことなどが強調されよう。粉体の空気輸送分野でも、輸送効率向上の観点から、空気の圧力エネルギーを利用するプラグフロー法が約10年前に開発され、実用化もされている。¹⁾

カプセル輸送の短所としては、初期の設備投資が高くなること、システムが複雑になること、カプセルの構造、耐久性に十分配慮する必要があること、使用実績が少ないことなどが挙げられる。

カプセル輸送は、搬送流体によって空気式と水力式に大別される。空気式は取扱いが容易なため、各国で種々の研究、開発が行われ、郵便局間の郵便物輸送、骨材の輸送、石灰石の輸送²⁾等において実用化されている例もある。空気式の場合には、カプセルと管壁との摩擦力と騒音を低減させるため、カプセル前後に車輪を装備するのが一般的である。

一方水力式は、空気式に比べて、カプセルに大きな浮力を与えて摩擦抵抗を減少できること、輸送速度を小さくすることが可能なために輸送動力を軽減できること、さらに流体の潤滑作用や揚力効果が考えられるため、車輪を装備しない場合でも摩擦抵抗の減少、騒音の低減、カプセルやパイプラインの摩耗減少が期待される。しかしながら水力式は一般的にカプセルを水密構造にする必要があること、大量の水を使用するために取扱いが面倒なこと、通常カプセルは偏心状態で走行する 경우가多く、周囲流れの解析が困難である等の問題点がある。したがってその研究、開発の歴史も比較的新しく、1960年ごろから行われたカナダのRCA (Research Council of Alberta) の一連の実験が本格的な研究の始まりとされている。その後各地で種々の基礎的研究やテストプラント等による比較的大規模な実験も行われてはいるが、実用化に際してのデータの集積は十分とはいえないのが現状である。

港湾分野においても、カプセル輸送は新しい輸送手段として有用であろう。前記環境保全、エネルギー効率等の観点からのみならず、海陸境界点での物資の積換え機構を省略できる利点もある。特に水力式は、大きな制限となる多量の用水の心配がないことや海中パイプライン内外の圧力差に対する配慮が少なくすむことなどから有望であろう。人工島造成用土砂の採取地から埋立地への直接輸送、人工島と陸上ターミナル間の各種物資の輸送、増大する廃棄物の埋立地や大水深処理地点までの直接輸送等への適用も十分検討に値しよう。

以上のような観点から、水力式カプセル輸送の基礎的研究の一環として、まず円筒型カプセルのパイプライン中での抗力係数を調べた。抗力係数はこれまでに垂直管におけるカプセルの浮遊静止実験から求めている例があるが、この方法では偏心の影響を確認するのが困難である。したがってここでは、カプセルをパイプ内の定位置に保持し、抗力を直接測定する方法を採用した。続いてカプセルの初動実験、さらに水平管を含む傾斜ライン中でのカプセル流送実験を行い、初動、加速、定速走行に至るカプセルの流動特性を調べた。またカプセルと管壁間の静止摩擦係数および動摩擦係数も直接測定し、走行特性との関係を調べた。

本報告は、これら一連の実験結果をとりまとめたものである。

2. 供試カプセルおよび実験装置

2.1 供試カプセル

供試カプセルの基本形状は円筒型であり、材質はアクリル樹脂である。今回の一連の抗力測定実験、初動実験、流送実験すべてについて、直径5種、長さ比2種、計10種の寸法のカプセルを使用した。長さ比とはカプセル長さをカプセル直径で除した値を意味する。また直径比とはカプセル直径をパイプ内径(今回の実験ではすべて100mm)で除した値であり k で表すものとする。供試カプセルの基本寸法を表-1に示す。

表-1 カプセル寸法一覧表

カプセル外径 d [mm]	直径比 d/D	$L_c/d=2$	$L_c/d=6$
		L_c [mm]	L_c [mm]
50	0.5	100	300
70	0.7	140	420
80	0.8	160	480
90	0.9	180	540
95	0.95	190	570

実用に際しては、 k は0.9前後が適切であろうといわれているが、ここでは基礎的研究の一環であること、また同一カプセルを種々のパイプラインで使用する場合等を想定して0.5～0.95とした。カプセル長さは、下限は積込み効率等から、また上限は管路の曲がり等から制約され、長さ比が2～6程度が現実的であるという意見が多い。したがってここでは、種々のカプセル長さに対して内挿可能な想定の下に、カプセル長さ比として2、6を採用した。

一方カプセル比重としては1.38と2.45の2種とした。前者は乾燥状態の細砂をカプセル内にゆるく詰めた状態であり、後者は直径12.8mmの鋼球をゆるく詰めた状態である。

なお、供試カプセル前後面には、直径40mm、厚さ6mmのふたがあり、ここから砂や鋼球の出し入れを行う。

2.2 実験装置

(1) カプセル抗力測定装置

カプセル抗力測定装置の構造を図-1に示す。透明アクリルパイプ（内径100mm）内の抗力測定用カプセルは、1対のM4ボルトを介してパイプ外部に位置する水平軸と結合されている。この軸はボールプッシュによって鉛直方向には動かないが水平方向には滑らかに動く。この動きを防水型ストレインゲージを接着したステンレス板で止め、このときの制止力、すなわちカプセル抗力を測定する構造となっている。

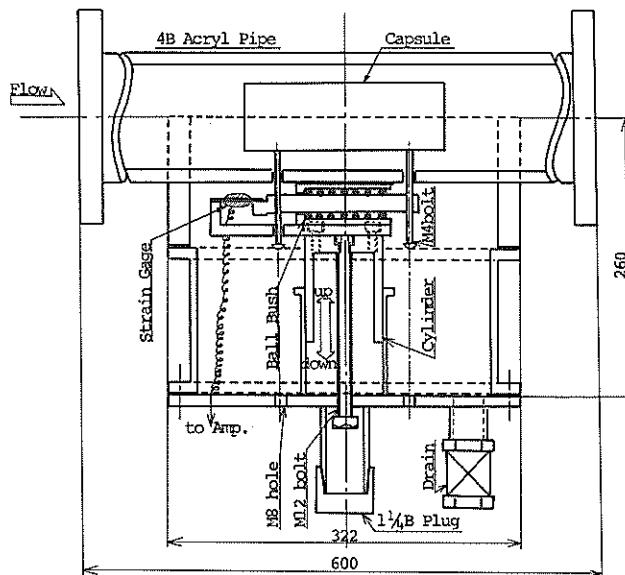


図-1 カプセル抗力測定装置

また、これら水平軸、ボールプッシュ、ゲージ板部は、1対のシリンダによって全体のフレームと結合されている。したがって図-1中のM12ボルトを回転させることにより、パイプライン内での鉛直方向のカプセル位置の調整、すなわち偏心率の設定が可能となる。偏心率の定義については後述する。

なお、全体のフレーム内部は水密構造となっており、実験中内部は満水状態となっている。

(2) 初動流速測定管

初動流速測定管は、図-2に示す構造となっており、カプセル初動時のカプセルの動きを管底部のM3ボルトにて止め、このときの流量、カプセル周囲の圧力分布を測定するものである。

(3) カプセル流送実験装置

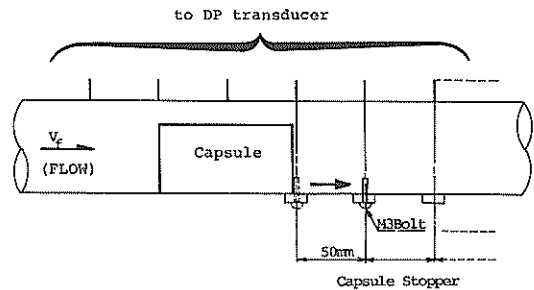


図-2 初動流速測定概略図

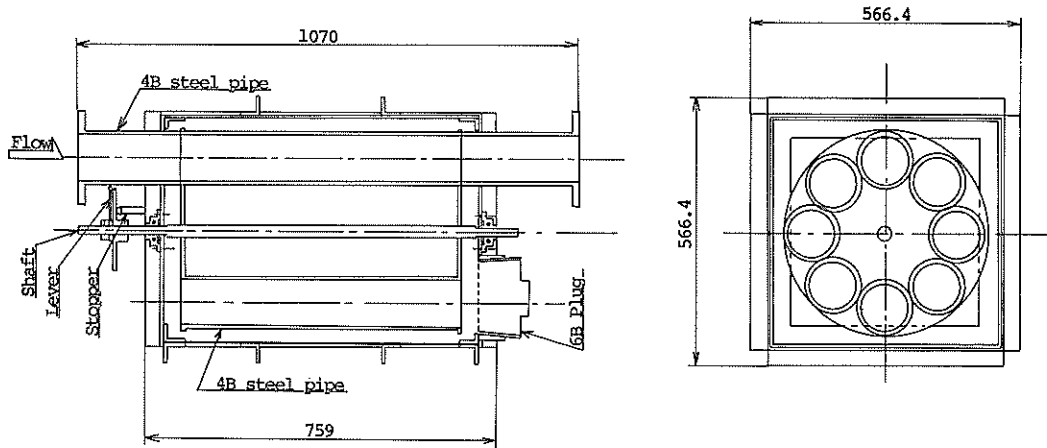


図-3 カプセル供給装置

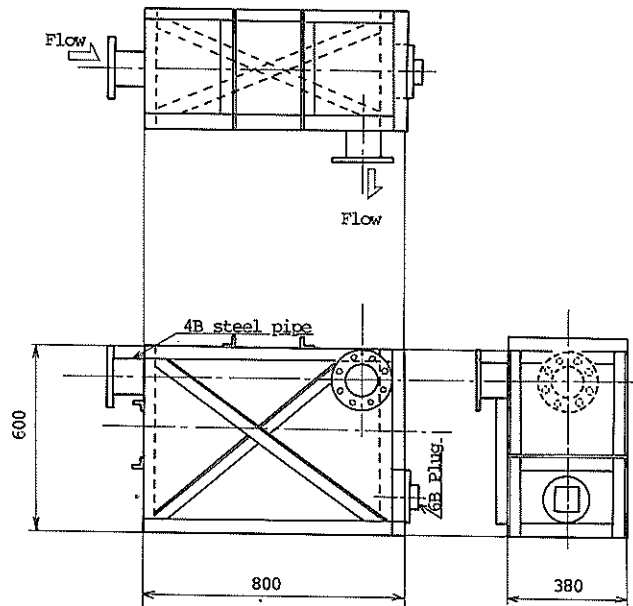


図-4 カプセル回収器

パイプラインへのカプセル供給装置およびパイプラインからのカプセル回収器をそれぞれ図-3, 4 および写真-1, 2 に示す。カプセル供給装置は、円周方向に配置された8本の鉄パイプを有する回転部と、これら全体を収めるボックス部から構成されている。回転部の各パイプ内にはカプセルが挿入され、回転によって流送ラインにカプセルが供給されてゆくものである。回転レバーは手動によって操作される。ボックスには、カプセルの挿入

孔があるが、実験中この部分は6Bプラグにて閉鎖されており、かつボックス内は満水状態である。

カプセル回収器は、回収器内における流路の拡大による流体流速の低下と、ボックス端面への衝突によってカプセルの減速、停止を行うものである。これによってカプセルは、回収器入口直前まで定常走行状態を維持しているものと考えられる。なお、ボックス内部には、クッション材を張り付けてある。

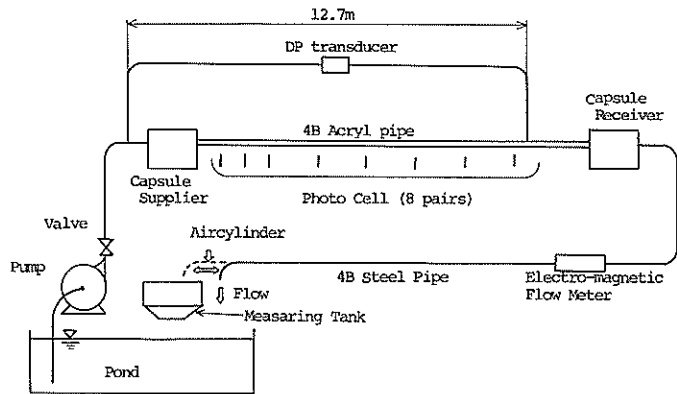


図-5 カプセル流送実験装置配置図

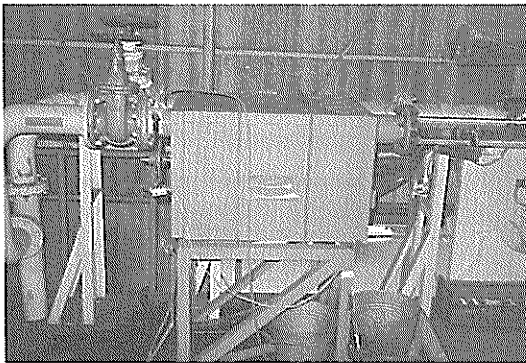


写真-1 カプセル供給装置

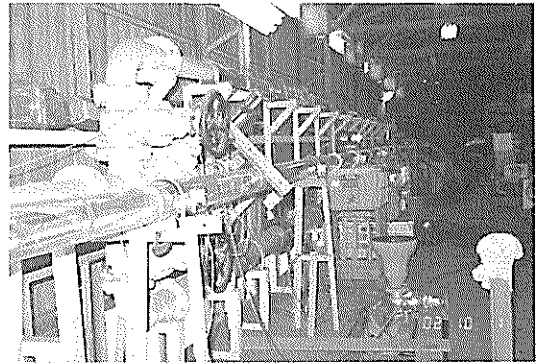


写真-3 水平管路 ($\theta = 0^\circ$)

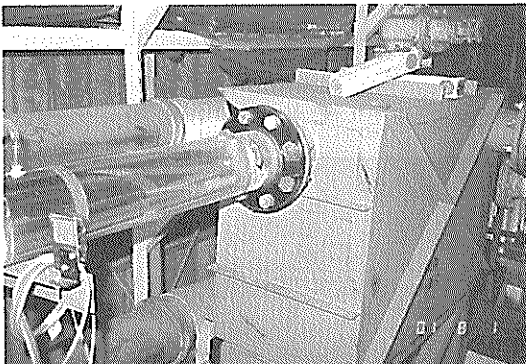


写真-2 カプセル回収器

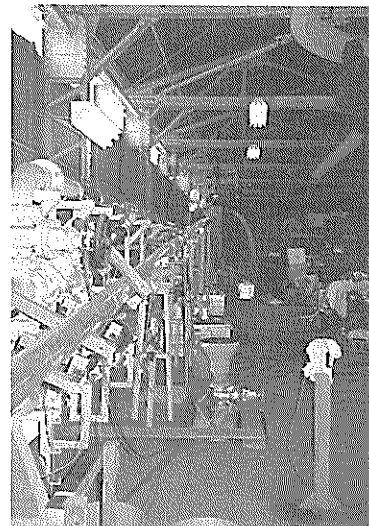


写真-4 上昇管路 ($\theta = 5.7^\circ$)

上記カプセル供給装置および回収器を含む全流送ラインの配置図を図-5に示す。供給装置から回収器に至るラインは約13.5mの透明アクリルパイプから成り、その傾きにより、水平流れ、上昇流れ、下降流れとなる。今回の流送実験では、管路の傾斜角 θ として、 0° と $\pm 5^\circ$ 前後の計3種を目標としたが、種々の支持装置や実験室の

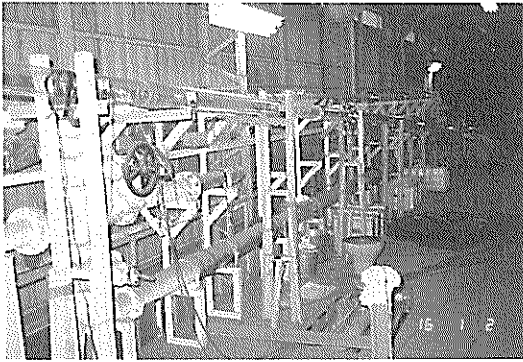


写真-5 下降管路 ($\theta = -3.7^\circ$)

空間的制限などから、 0° 、 5.7° 、 -3.7° の計3種とした。これら3種の勾配の亚克力管路の状況を写真-3~5に示す。また亚克力管路の長手方向には、カプセル位置検出用の光電管が8対設置されている。管路の圧力損失は、カプセル供給器入口部と、入口部から12.7m地点での差圧計測によって求めるようになっている。

図-5における他のラインはすべて鉄パイプで構成されており、電磁流量計も挿入されている。

なお、上記実験管路に装備されているうず巻ポンプの主要目は以下のとおりである。

- 口径；150 mm（吸入側）× 125 mm（吐出側）
- 揚程×流量；15 m × $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$ （1,200 rpm）
- モータ；ECカップリング型可変速モータ，22 kW

3. 実験方法および実験条件

3.1 実験方法

(1) カプセル抗力測定実験

実験は次の順序で行った。まずカプセルを抗力測定装置内の定位置に置き、2本のM4ボルトにて抗力検出部と結合する。次にこの抗力検出部を支えるシリンダ部を鉛直上方に移動させ、パイプ中心とカプセル中心が一致する所に固定する。この状態で抗力測定装置全体をパイプラインに組み込む。その後ポンプを作動させ、種々の流速、カプセル偏心率について抗力を測定する。偏心率の変更は、シリンダ部からの漏れがほとんどないため、送水状態でも可能であった。

以上の測定を表-1に示した各カプセルについて行う。抗力測定状態の例を写真-6, 7に示す。

(2) カプセル初動流速測定実験

カプセル初動流速は、以下の要領で測定した。カプセルを図-2に示した初動流速測定管の最初のストップ位置にセットし、パイプライン内を満水状態にする。次に

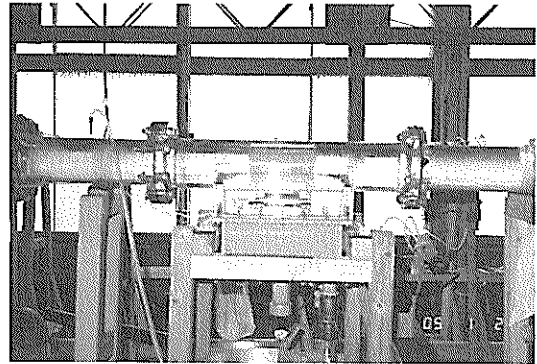


写真-6 抗力測定状況 (1)

CAP. No. 5, $d \times L_c = 80 \times 160$ (mm)
 $\varepsilon = 0$, $V_f = 64.7$ (cm/s)

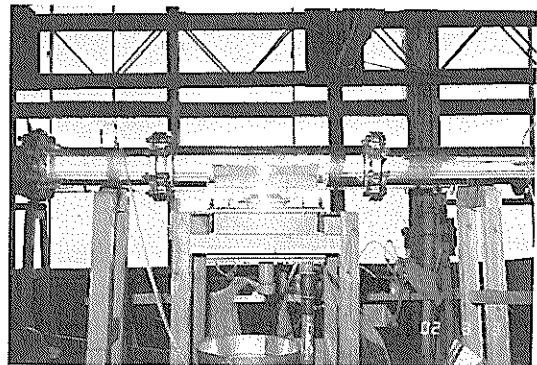


写真-7 抗力測定状況 (2)

CAP. No. 2, $d \times L_c = 50 \times 300$ (mm)
 $\varepsilon = 0.35$, $V_f = 110$ (cm/s)

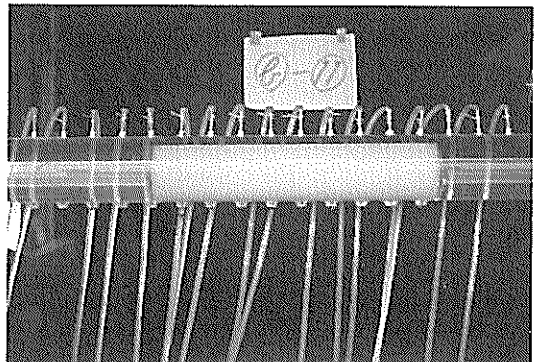


写真-8 初動流速測定例

CAP. No. 6, $d \times L_c = 80 \times 480$ (mm)
 $V_{f0} = 64.8$ (cm/s)

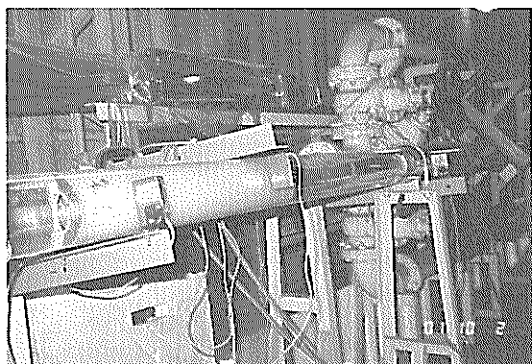


写真-9 カプセル流送実験例 (1)
 $\theta = 0^\circ$, $\rho_c = 2.45$, $V_f = 1$ (m/s)
 CAP.No. 10, $d \times L_c = 95 \times 570$ (mm)

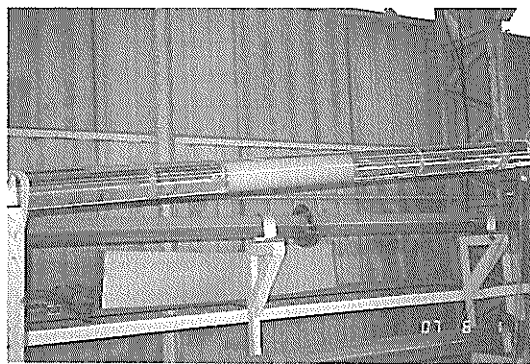


写真-10 カプセル流送実験例 (2)
 $\theta = 5.7^\circ$, $\rho_c = 1.38$, $V_f = 0.5$ (m/s)
 CAP.No. 6, $d \times L_c = 80 \times 480$ (mm)

ストップを除去し、管内流速を徐々に上げてゆく。カプセルが動き始めたとき流速を固定し、計量槽で流量を、また差圧計でカプセル周囲の圧力分布を計測する。このときカプセルは、次のストップによって停止状態にある。

以上の操作を寸法、比重の異なる各カプセルについて実施する。測定状態の例を写真-8に示す。

(3) カプセル流送実験

カプセル流送実験は、以下の手順で行った。まずカプセル供給装置の回転部に7本のカプセルを挿入し、6Bプラグにより挿入孔を封鎖する。供給装置内を満水状態にした後ポンプを起動し、所定の管内流速で送水運転を行う。測定準備完了後、回転レバーによって回転部を45°回転させ、カプセルを流送ラインに供給し、差圧、カプセル位置の計測、写真撮影等を行う。7本のカプセルを供給、計測した後ポンプを停止し、カプセルを回収する。

上記の手順を、種々のカプセル寸法、比重、管路傾斜角について繰り返す。3種の傾斜管路におけるカプセル走行状態の例を写真-9, 10, 11にそれぞれ示す。なお、カプセル供給装置、回収器とも全体の傾斜角は、パイプラインの傾斜角と同一である。

3.2 実験条件

(1) 抗力測定実験

抗力測定実験において設定したカプセルの偏心率 ε は、図-6に示すように、パイプライン中心とカプセル中心間距離 d_c をパイプ半径 R で除した値である。すなわちここでは次式で定義される。

$$\varepsilon \equiv \frac{d_c}{R} \quad (1)$$

本実験では、直径の異なる各カプセルについて、 ε が



写真-11 カプセル流送実験例 (3)
 $\theta = 3.7^\circ$, $\rho_c = 1.38$, $V_f = 0.5$ (m/s)
 CAP.No. 7, $d \times L_c = 90 \times 180$ (mm)

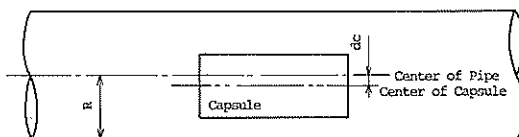


図-6 偏心状態のカプセル

0の場合と、カプセルが着底した状態を表す ε の最大値を3等分した2点の ε の場合を採用した。これら3種の ε の値、このときのカプセル、パイプ中心間距離およびカプセル下端、パイプ壁面間距離を表-2に示す。

(2) 初動流速測定実験

初動流速測定実験は、水平管路($\theta = 0^\circ$)のみで行い、カプセル比重 ρ_c は1.38, 2.45の2種について行った。

(3) カプセル流送実験

表-2 偏心率 ϵ と各種距離

d (mm)	ϵ	カプセル, バイブ中 心間距離 (mm)	カプセル, 管底間 距離 (mm)
50	0	0	25.0
	0.175	8.75	16.3
	0.35	17.5	7.5
70	0	0	15.0
	0.105	5.25	9.75
	0.21	10.5	4.5
80	0	0	10.0
	0.07	3.5	6.5
	0.14	7.0	3.0
90	0	0	5.0
	0.035	1.75	3.25
	0.07	3.5	1.5
95	0	0	2.5
	0.018	0.88	1.6
	0.035	1.75	0.75

カプセル流送実験は、表-1に示した10種の寸法のカプセルについて ρ_c を1.38と2.45の2種に設定し、3種の管路傾斜角 ($\theta = 0^\circ, 5.7^\circ, -3.7^\circ$) について行った。水力式カプセル輸送の特に有利な点は、前述のように流体流速を低くして消費動力を少なくできることであり、流体流速として1.5~2.0 m/s程度の値が想定される場合が少なくない。したがってここではパイプライン内の平均流体流速 V_f の値として、その最大値を2.0 m/sとし、0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/sの4種とすることを原則とした。ただしこれら4種の流速の中には、カプセル寸法, 比重, バイプライン傾斜角等の条件の差によってカプセルが走行しない場合がある。

上記流送実験条件の一覧表を表-3に示す。表中『-』は、初動流速の観点から実験を行わなかったこと、また

『×』は、初動流速の観点からはカプセルが走行する可能があったが、供給装置内が鉄パイプであることや、管路の勾配等の影響により、実験を試みたがカプセルが走行しなかったことを表す。

4. 実験結果

4.1 カプセルの抗力係数および初動流速

パイプ内を密度 ρ_w の流体が平均流速 V_f で流れているとき、静止カプセルが流体から受ける全抵抗力を F 、カプセル断面積を A_c とすると、抗力係数 C_d は次式で表される。

$$C_d = \frac{F}{\frac{\rho_w}{2} A_c V_f^2} \quad (2)$$

表-3 カプセル流送実験条件一覧表

カプセル 番号, 寸法	傾斜角 流速 V_f 比重 ρ_c		$\theta = 0^\circ$								$\theta = 5.7^\circ$								$\theta = -3.7^\circ$								
			0.5		1.0		1.5		2.0		0.5		1.0		1.5		2.0		0.5		1.0		1.5		2.0		
	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	1.38	2.45	
1 (50 × 100)	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2 (50 × 300)	-	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○
3 (70 × 140)	○	-	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4 (70 × 420)	×	-	○	×	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5 (80 × 160)	○	×	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6 (80 × 480)	○	-	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7 (90 × 180)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8 (90 × 540)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9 (95 × 190)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10 (95 × 570)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○: 実験実施, -: 実験不実施, ×: カプセル流送不能

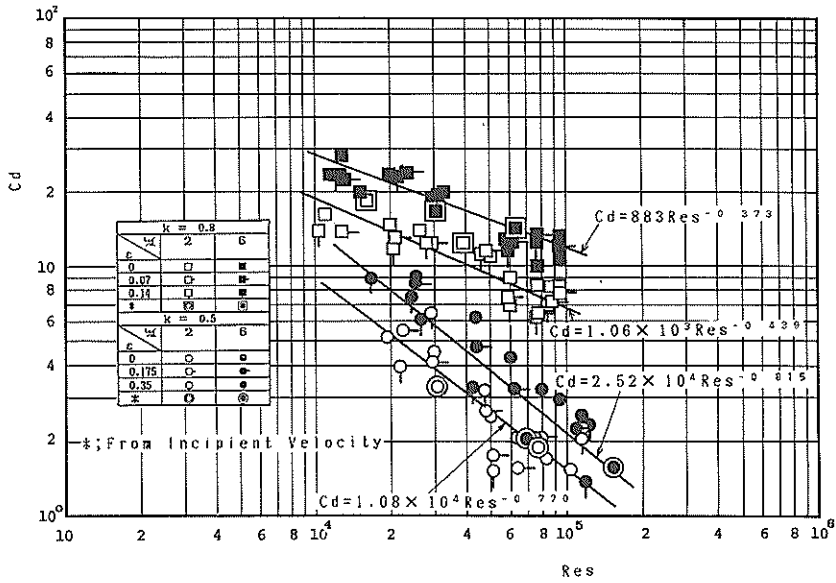


図-7 C_d と Re_s の関係 ($k = 0.5, 0.8$)

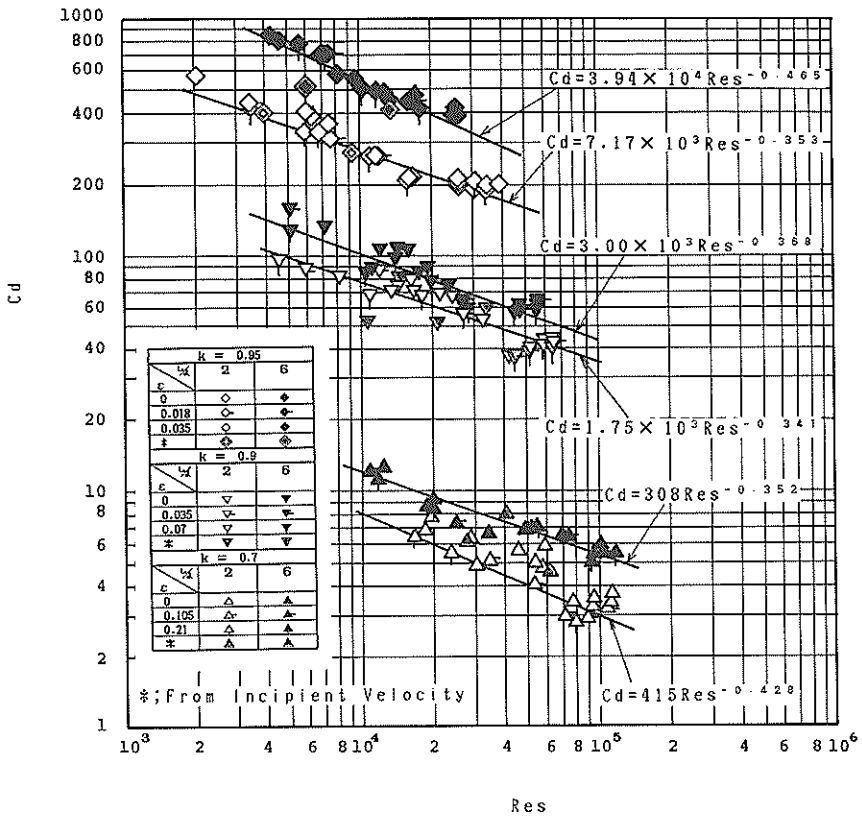


図-8 C_d と Re_s の関係 ($k = 0.7, 0.9, 0.95$)

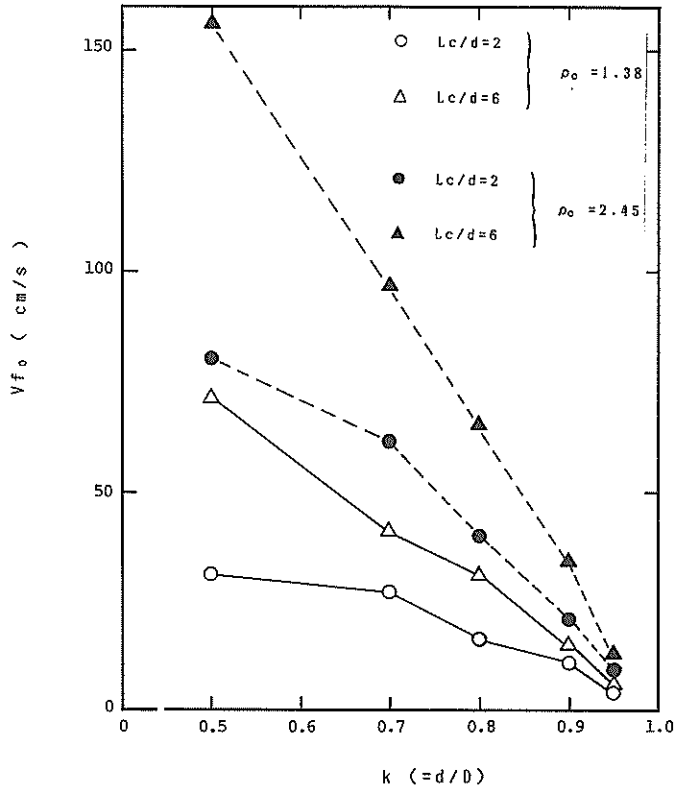


図-9 初動流速と k の関係

また管路レイノルズ数 R_{es} として

$$R_{es} = \frac{V_f D}{\nu} \quad (3)$$

を定義する。ただし、 D はパイプ内径、 ν は流体の動粘性係数である。

今回の抗力測定実験から得られた C_d と R_{es} の関係を、カプセル直径比と長さ比をパラメータとして図-7, 8 に示す。

図より C_d は、 k の増加に対して急激に増大するが、同一 k におけるカプセル長さの影響は比較的少ない。これはカプセル長さ比が小さい場合には、全抗力に占めるカプセル前後面の圧力抵抗の割合が相当大きいことを意味している。また k が 0.7 以上になると、 R_{es} 増加に対する C_d の減少割合、すなわち勾配は k やカプセル長さ比の違いによらず同程度となっている。さらに k が 0.7 以下では偏心率が大きいほど C_d は小さいが、 k が 0.8 以上になると偏心率の C_d へ影響が明確でなくなる傾向がある。

なお、境界のない一様流中における円筒型物体の抗力

係数は長さ比が 2 のとき 0.85、長さ比が 7 のとき 0.99 程度とされている。³⁾

一方水平管において完全偏心状態のカプセルが動き始めるときの流体流速、すなわち初動流速 V_{f0} と k の関係は図-9 のようになる。図より、 k が 0.5 の場合はやや例外的ではあるが、同一比重、同一長さ比のカプセルについては、 k の増加に対して V_{f0} はほぼ直線的に減少し、すべて $k = 1.0$, $V_{f0} = 0$ の点に収束してゆくようすがわかる。各カプセルにおける 2 種の比重についての初動流速は表-4 に示してある。

次にカプセルの初動流速から、完全偏心状態における抗力計数を求めてみよう。初動時には、カプセルに作用する流体の推力とカプセル、管壁間の静止摩擦力が釣り合うことより

$$C_d = \frac{2L_c (\gamma_c - \gamma_w) \mu_s}{\rho_w V_{f0}^2} \quad (4)$$

となる。ただし、 L_c はカプセル長さ、 γ_c はカプセル比重量、 γ_w は水の比重量、 μ_s はカプセル、管壁間の静止

表-4 初動流速, 抗力係数一覧表

カプセル番号	$d \times L_c$ [mm]	$\rho_c = 1.38$			$\rho_c = 2.45$		
		V_{f0} [cm/s]	$R_{cs}(\times 10^4)$	C_d	V_{f0} [cm/s]	$R_{cs}(\times 10^4)$	C_d
1	50 × 100	31.4	3.11	3.29	80.1	7.93	1.94
2	50 × 300	71.3	7.06	2.00	157	15.5	1.54
3	70 × 140	27.3	2.71	6.05	61.3	6.07	4.70
4	70 × 420	41.2	4.08	8.14	96.9	9.60	5.61
5	80 × 160	16.5	1.64	19.2	40.3	3.99	12.5
6	80 × 480	31.0	3.07	16.8	65.3	6.46	14.2
7	90 × 180	10.8	1.07	51.7	21.0	2.08	51.5
8	90 × 540	15.0	1.49	80.3	34.2	3.38	58.2
9	95 × 190	4.0	0.40	391	9.4	0.93	270
10	95 × 570	6.1	0.60	504	13.4	1.33	399

摩擦係数を表す。

今回用いたアクリルパイプとカプセル間の μ_s は次の方法で測定した。水を満たしたアクリルパイプにカプセルを入れ、これを徐々に傾斜させてゆき、カプセルが動き始めたときのパイプ角度を測定する。 μ_s はカプセル寸法、重量に関係なく、この角度の正接として与えられる。測定の結果、この角度として 23.8° 、したがって $\mu_s = 0.442$ が得られた。

(4)式から得られた抗力係数は、表-4および図-7, 8(二重印)にも併記してある。図-7, 8より、初動流速から求めた C_d と、偏心時の抗力測定結果から得られた C_d は比較的良好一致し、実用上は同一に評価してもよいであろう。このような観点から、偏心時および初動時の抗力係数を B_1, B_2 を定数として

$$C_d = B_1 R_{cs} B_2 \quad (5)$$

と表せば、図-7, 8より各カプセルに対する B_1, B_2 と

表-5 カプセル偏心時抗力係数定数

カプセル番号, 寸法	B_1	B_2
1 (50 × 100)	1.08×10^4	-0.770
2 (50 × 300)	2.52×10^4	-0.815
3 (70 × 140)	415	-0.428
4 (70 × 420)	308	-0.352
5 (80 × 160)	1.06×10^3	-0.439
6 (80 × 480)	883	-0.373
7 (90 × 180)	1.75×10^3	-0.341
8 (90 × 540)	3.0×10^3	-0.368
9 (95 × 190)	7.17×10^3	-0.353
10 (95 × 570)	3.94×10^4	-0.465

して表-5に示す値が得られる。

したがって、カプセルの寸法、比重およびカプセルと管壁間の静止摩擦係数が与えられた場合には、カプセルを動かすのに必要な流体流速を、図-7, 8あるいは(4), (5)式を用いて推定することができよう。

一方、静止カプセル周囲の圧力降下の状況は、図-10のようになる。カプセル入口部で急縮流による損失と流速増加のために大幅に圧力が下がる。環状部ではカプセル長さ比例した圧力降下となり、出口部では流路急拡大による損失はあるが、一般的には流速減少によっていくぶん静圧は上昇する。その後はパイプ壁面と流体間の摩擦によって管路長さに比例した圧力降下となる。

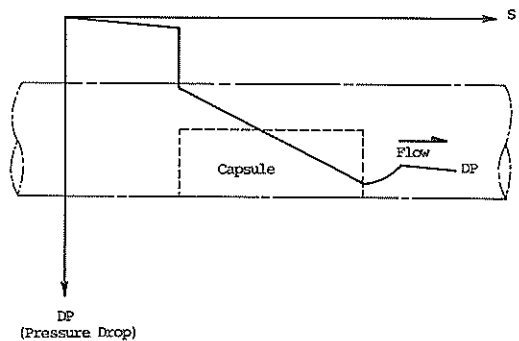


図-10 カプセル周囲圧力降下概略図

4.2 カプセルの加速特性

カプセルの管軸方向の位置 S の時間的变化例を、 θ, ρ_c, V_f 等を変えて図-11~16に示す。図中『○』印は、前述の光電管によって得られた値である。光電管の設置間隔は、上流側ほど小さくしてある。

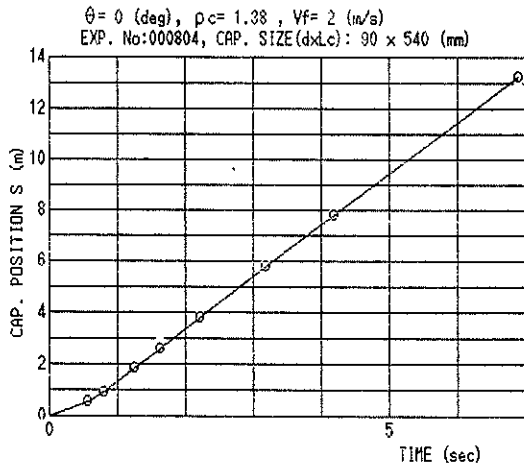


図-11 カプセル位置の時間的变化例 (1)

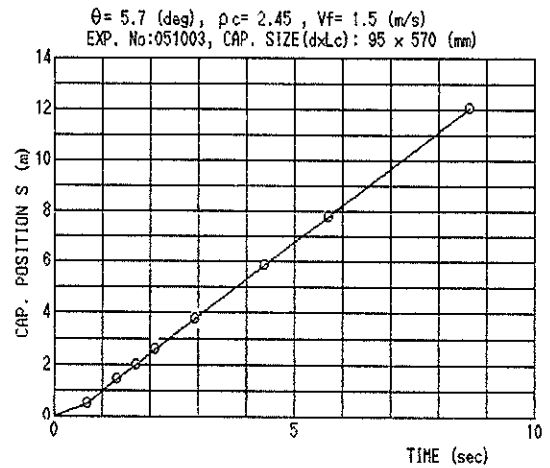


図-14 カプセル位置の時間的变化例 (4)

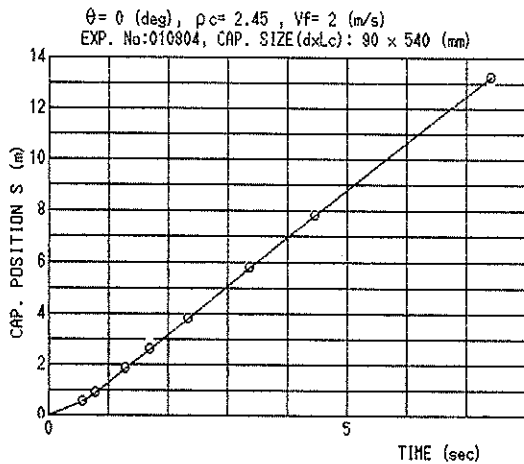


図-12 カプセル位置の時間的变化例 (2)

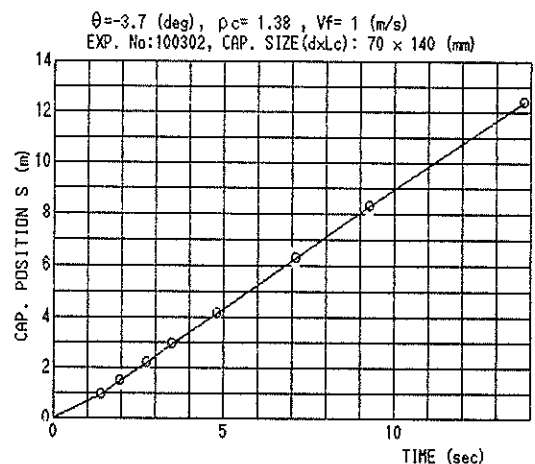


図-15 カプセル位置の時間的变化例 (5)

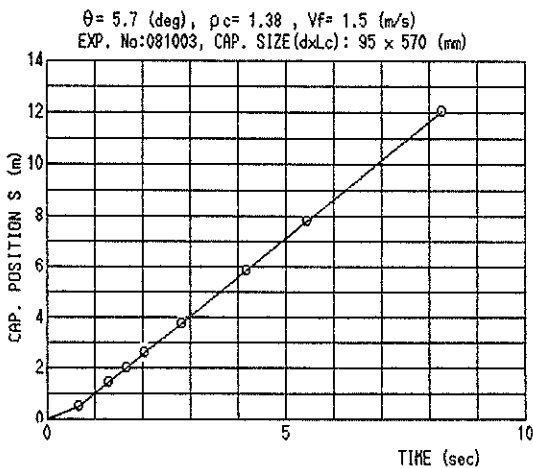


図-13 カプセル位置の時間的变化例 (3)

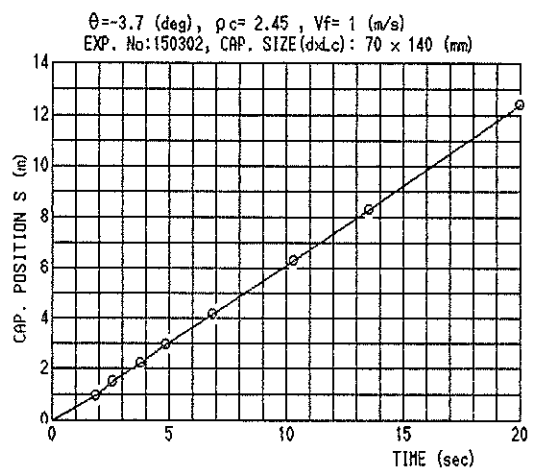


図-16 カプセル位置の時間的变化例 (6)

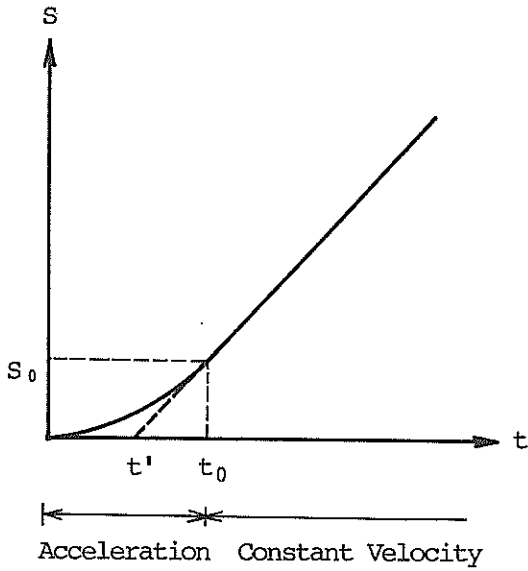


図-17 カプセル走行特性概略図

図-11～16からわかるように、総じてカプセルは比較的短時間の間に加速して定常走行状態に移る。このような比較的短時間の加速度運動に対しては、平均加速度を用いて運動を記述したほうが理解が容易となろう。

平均加速度を用いてカプセルの運動を略記すると図-17のようになる。图中、 t_0 と S_0 はそれぞれ加速時間および加速距離を表す。今、カプセルの平均加速度を α_c とすると、時刻 t におけるカプセル位置 S は、

$$S = \frac{1}{2} \alpha_c t^2 \quad (0 \leq t \leq t_0) \quad (6)$$

$$S = \frac{1}{2} \alpha_c t_0^2 + V_c (t - t_0) \quad (t_0 < t) \quad (7)$$

となる。ただし V_c は定常走行状態のカプセル速度を表す。図-17において定常走行状態を表す直線部と t 軸との交点における t' と t_0 の間には

$$t_0 = 2t' \quad (8)$$

の関係があり、ゆえに

$$\alpha_c = \frac{V_c}{2t'} \quad (9)$$

となる。今回の光電管による測定結果においては、 t_0 を直接定めることが困難であるため、上記(9)式により平均加速度 α_c を求めた。 $\theta = 0^\circ, 5.7^\circ, -3.7^\circ$ における α_c の V_f の関係を図-18～20に示す。

図より総じて α_c は V_f の増加に対して指数関数的に増

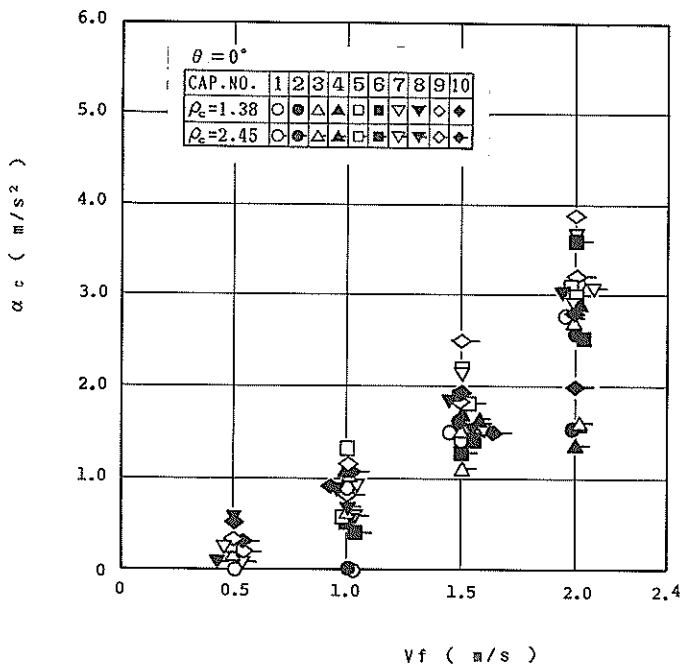


図-18 α_c と V_f の関係 ($\theta = 0^\circ$)

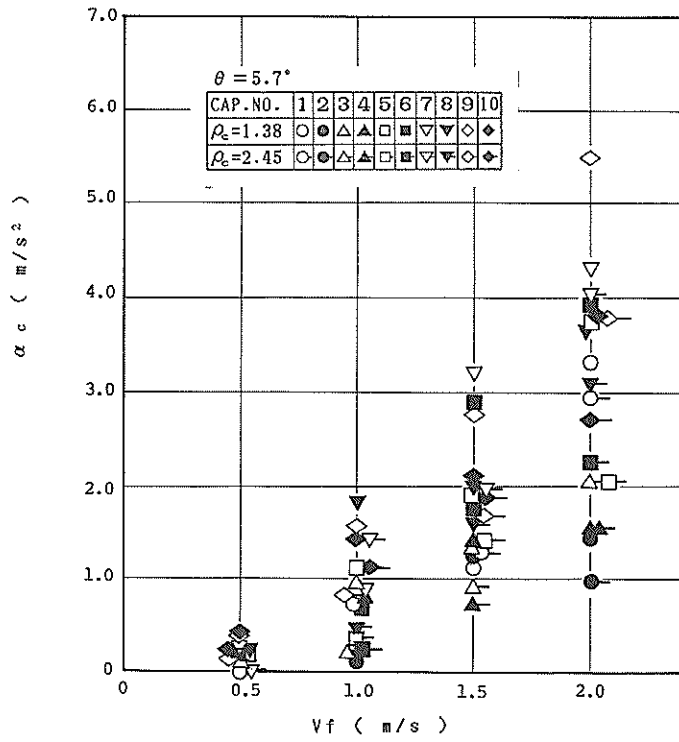


図-19 α_c と V_f の関係 ($\theta = 5.7^\circ$)

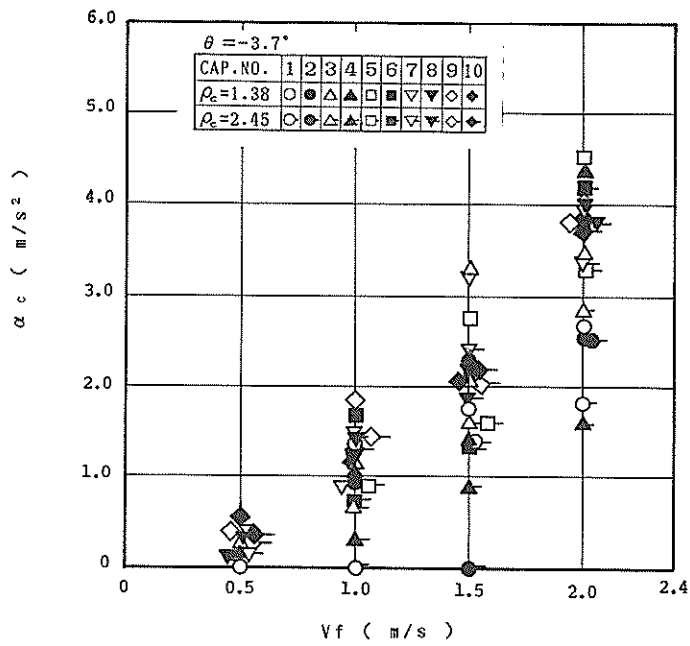


図-20 α_c と V_f の関係 ($\theta = -3.7^\circ$)

加しており、また ρ_c や θ の増加に伴って小さくなっていく。また k が大きくなるほど、 L_c が小さくなるほど α_c は大きくなる傾向がある。

一方カプセル供給時におけるパイプラインの圧力損失、すなわち差圧の時間的变化例を、図-21~26に示す。これらの θ 、 ρ_c 等の実験条件は、前出の図-11~16に順番に対応している。

図から明らかのように、カプセル供給時のパイプラインの差圧は、流体過渡現象として理解される周期的変動パターンを示している。このような圧力変動の典型的な例としては水撃現象を挙げることができる。⁴⁾ この圧力変動は、図-21~26に見られるようにカプセル比重、流体流速等の差異によって非対称的であったり、不規則であったりするが、これらの変動が減衰して定常状態に落

ち着くまでには、カプセル速度が定常に達した後もかなりの時間を要することがわかる。

水力式カプセル輸送の実用化に際しては、輸送効率を向上させるためにカプセルを連続してパイプラインに供給し、搬送流体の割合を減少させることが特に重要である。パイプライン全体に占めるカプセルの割合、すなわち管路占有率は、パイプライン中に存在するカプセルの長さの合計値をパイプライン長さで除した値として表示される場合が多いが、この値が0.5以上になれば輸送効率が急激に向上するという試算もある。⁵⁾

常識的に考えても、水力式の場合には、搬送流体の輸送量を可能な限り減らして消費動力の低減を計るべきであることが理解されよう。しかしながらこのように短時間に連続してカプセルをパイプラインに供給する場合に

$\theta = 0$ (deg), $\rho_c = 1.38$, $VF = 2$ (m/s)
EXP. No:000804, CAP. SIZE(dxLc): 90 x 540 (mm)

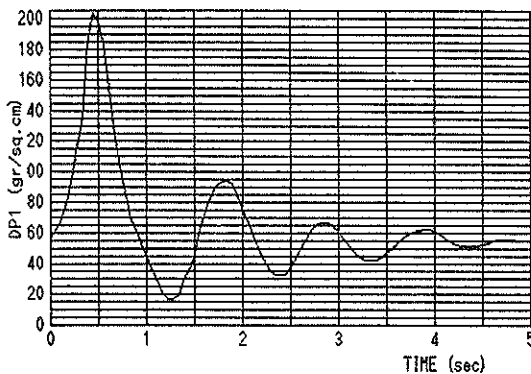


図-21 差圧の時間的变化例 (1)

$\theta = 0$ (deg), $\rho_c = 2.45$, $VF = 2$ (m/s)
EXP. No:010804, CAP. SIZE(dxLc): 90 x 540 (mm)

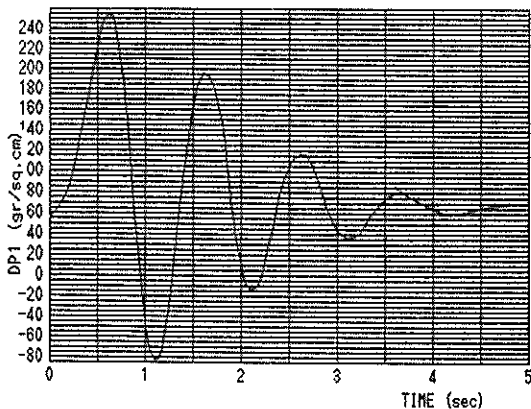


図-22 差圧の時間的变化例 (2)

$\theta = 5.7$ (deg), $\rho_c = 1.38$, $VF = 1.5$ (m/s)
EXP. No:081003, CAP. SIZE(dxLc): 95 x 570 (mm)

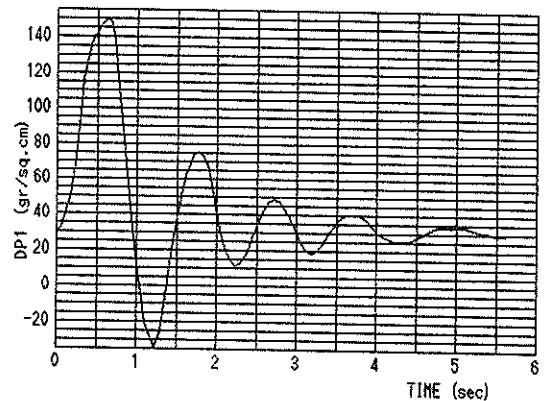


図-23 差圧の時間的变化例 (3)

$\theta = 5.7$ (deg), $\rho_c = 2.45$, $VF = 1.5$ (m/s)
EXP. No:051003, CAP. SIZE(dxLc): 95 x 570 (mm)

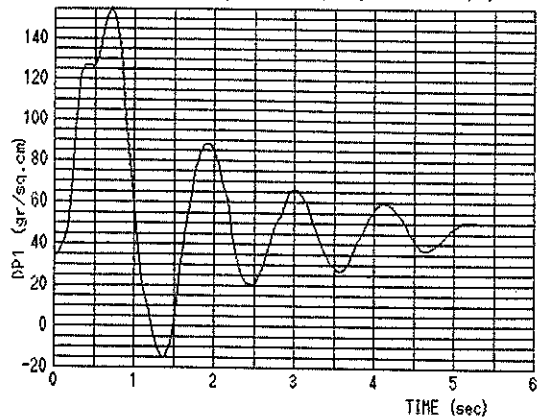


図-24 差圧の時間的变化例 (4)

$\theta = -3.7$ (deg), $\rho_c = 1.38$, $V_f = 1$ (m/s)
 EXP. No: 100302, CAP. SIZE(dxLc): 70 x 140 (mm)

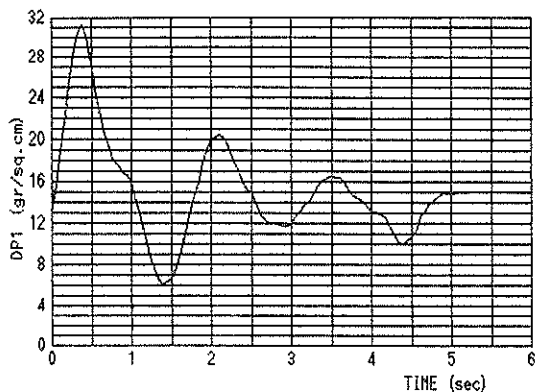


図-25 差圧の時間的変化例 (5)

$\theta = -3.7$ (deg), $\rho_c = 2.45$, $V_f = 1$ (m/s)
 EXP. No: 150302, CAP. SIZE(dxLc): 70 x 140 (mm)

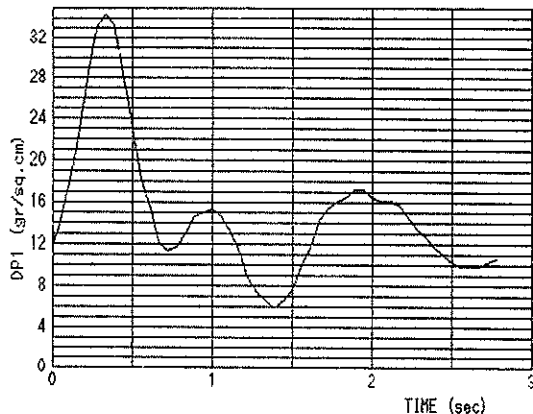


図-26 差圧の時間的変化例 (6)

は、上記のように過渡応答中の流体流れの中にカプセルを供給するケースが多いと考えられる。ポンプの特性によっては、過渡応答中は一時的に流量が低下することも予想される。したがって水方式カプセル輸送の実用化に際しては、連続式カプセルの流動特性、さらに近接したカプセル相互間の干渉の影響についても調べておく必要がある。

ろう。

4.3 カプセルの定常走行特性

(1) 速度特性

前述のようにパイプラインに供給されたカプセルは、比較的短時間に加速され、定常走行速度 V_c に達する。また今回の実験における流体流速は、カプセル供給時に一

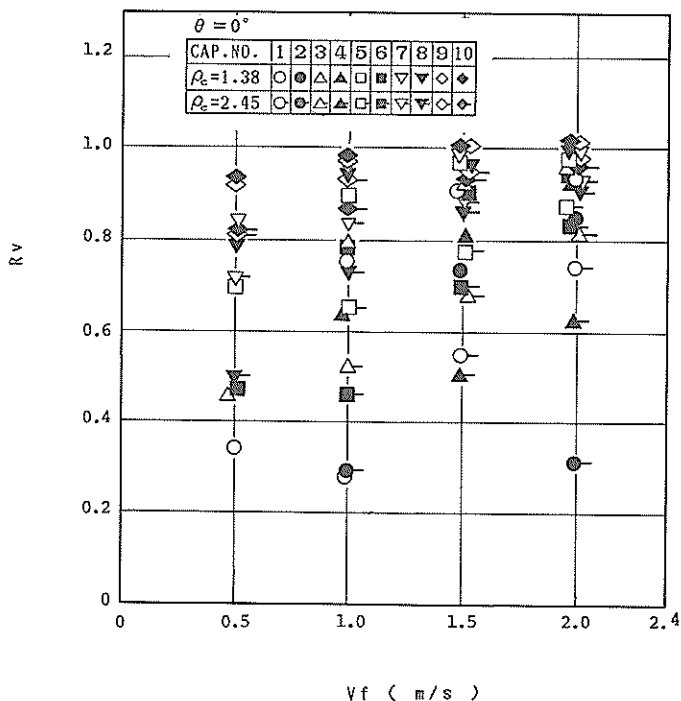


図-27 R_v と V_f の関係 ($\theta = 0^\circ$)

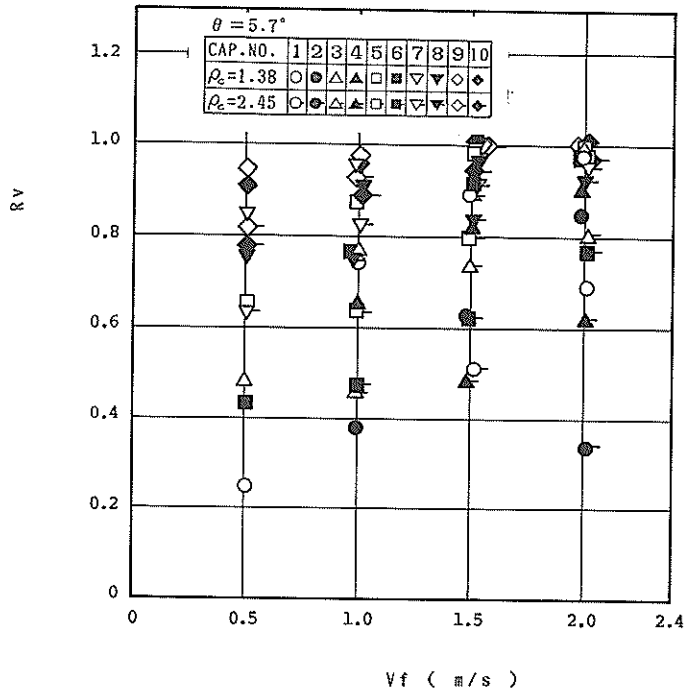


図-28 R_v と V_f の関係 ($\theta = 5.7^\circ$)

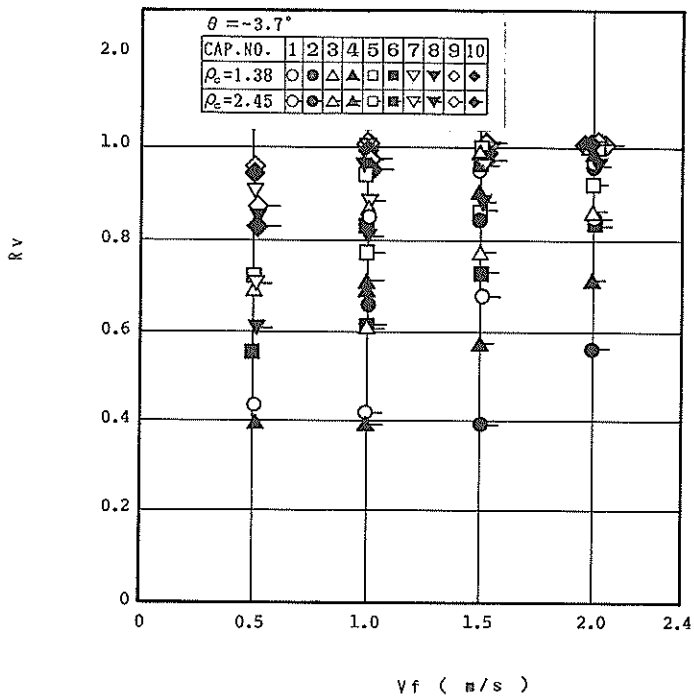


図-29 R_v と V_f の関係 ($\theta = -3.7^\circ$)

時的にいっぶん低下するが、定常走行時には初期の設定流速まで回復する。この定常走行状態におけるカプセル速度 V_c の流体平均流速 V_f に対する比を R_0 とし、 V_f に対してプロットすると3種の θ に対して図-27 ~ 29 のようになる。

図より、 R_0 は V_f の増加に伴って増大し、 k の大きいカプセルについては1以上になる場合がある。この傾向は他の実験結果においてもしばしば現れており、流体の流速分布のうち、管軸中心付近の高速部がカプセルに強く作用するためと説明されている。 θ が -3.7° の場合には、 V_f が 1m/s の場合にもこの現象が見られる。また概して同一の k に対してはカプセル長さ比が小さいほど R_0 は大きく、一方 θ に関しては、 5.7° ; 0° ; -3.7° の順に R_0 は大きくなるが、総じて V_f が増加するにつれてこれらの差は小さくなる傾向にある。

次に寸法、比重の異なる個々のカプセルの運動について考察してみるが、この場合カプセルと管壁間の動摩擦係数が問題となる。水中でしゅう動する物体には動摩擦力の他に流体からの抗力も作用し、これは通常無視できない場合が多い。したがって、ここでは以下の方法でカプセルと管壁間の動摩擦係数 μ_m を求めた。

図-30 に示すように、下端を閉じた傾斜パイプ中に水を満たし、この中をカプセルが自重による力のみで走行している場合を考える。パイプ下端は閉じているため、カプセル降下につれて環状部にはカプセル進行方向と逆向きの流れが生じる。この環状部流れによるパイプ内壁部での摩擦応力を τ_w 、カプセル側面での同応力を τ_c とする。またカプセル前後端面間の圧力抵抗を D_p とし、 W_c 、 W_b をそれぞれカプセル重量およびカプセルに作用する浮力とすれば、長さ L の区間 1, 2 における圧力 p_1 、 p_2 とこれらの間には、

$$\frac{\pi}{4} D^2 (p_1 - p_2) + \tau_w \pi D L_c + (\tau_c \pi d L_c + D_p) + \frac{\pi}{4} (D^2 L - d^2 L_c) \rho_w \sin \theta = 0 \quad (10)$$

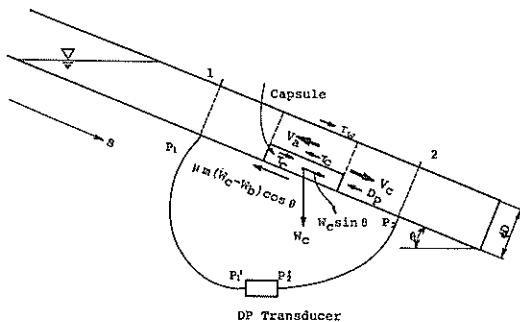


図-30 傾斜管内カプセル自由走行状態

の関係が成立する。(10) 式の左辺第三項 ($\tau_c \pi d L_c + D_p$) はカプセルが流体から受ける全抗力であり、これを D_T で表すとカプセルの運動方程式は

$$\frac{W_c}{g} \ddot{S} = W_c \sin \theta - \mu_m (W_c - W_b) \cos \theta - D_T \quad (11)$$

となり、定常走行状態では $\ddot{S} = 0$ とおいて

$$\mu_m = \frac{W_c \sin \theta - D_T}{(W_c - W_b) \cos \theta} \quad (12)$$

となる。(10) 式を変形し、さらに区間 1, 2 の圧力差 ($p_1 - p_2$) を差圧計部における圧力差 ($p'_1 - p'_2$) を用いて整理すると

$$D_T = \frac{\pi}{4} D^2 \{ (p'_2 - p'_1) + k^2 L_c \tau_w \sin \theta \} - \tau_w \pi D L_c \quad (13)$$

となる。(13) 式における右辺第二項は、 τ_w が小さい場合には無視でき、 D_T は ($p'_2 - p'_1$) の測定によって求められると予想されるが、これに関するチェックを行ってみよう。Lazarusによれば、カプセル偏心停止状態における環状部の圧力損失 h_{af} は、

$$h_{af} = \Delta h_a + \Delta h_f \quad (14)$$

と表示され、このうち Δh_a に関して

$$\Delta h_a = \frac{0.239 L_c}{\left(\frac{V_c}{V}\right)^{0.25} (D-d)^{1.25}} \cdot \frac{V_c^2}{2g} \quad (15)$$

という実験式を得ている⁶⁾。(14) 式における Δh_f はカプセルが存在しない場合の長さ L_c の区間での圧力損失を意味し、ワイスバツハ・ダーシの公式等から求められる。ここで簡単のため、環状部のパイプ内壁およびカプセル外周上の平均摩擦応力として $\bar{\tau}$ を導入し、環状部の流体に作用する圧力差と全壁面摩擦応力とのつり合より $\bar{\tau}$ を求め、さらにこれからパイプ内壁面上での全摩擦力を求めると

$$\bar{\tau} \pi D L_c = \frac{\pi}{4} D^2 (1-k) h_{af} \rho_w \quad (16)$$

となる。なお、このように環状部全体に対して平均摩擦応力を導入する例は他の文献にも見られる⁷⁾。

(13)、(16) 式を (12) 式に代入して

$$\mu_m = \frac{W_c \sin \theta - \left[\frac{\pi}{4} D^2 \{ (p'_2 - p'_1) + k^2 L_c \tau_w \sin \theta \} - (1-k) \tau_w h_{af} \right]}{(W_c - W_b) \cos \theta} \quad (17)$$

を得る。差圧計測 (17) 式による μ_m を図-31 に示す。

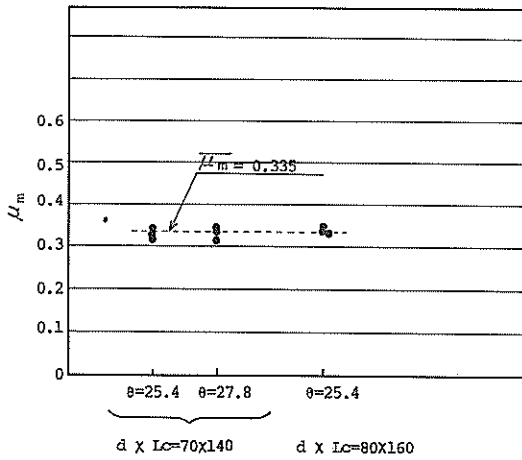


図-31 カプセル、パイプ壁面間の動摩擦係数

今回は測定結果の単純平均値から $\mu_m = 0.335$ とした。

種々の設計等においては動摩擦係数として $0.2 \sim 0.25$ がしばしば用いられるが、これは現実に存在する幅広い範囲を必ずしも代表するものではなく、事実 0.33 程度の動摩擦係数を推定している例もある⁸⁾。

なお、今回は図-30に示す測定において V_0 が比較的小さくなるようにカプセル寸法を選定したため、(17)式右辺分子()内第二項の μ_m におよぼす影響は 0.6% 程度であった。

次に図-32を参照して、パイプ内を流送されているカプセルについて考えてみよう。図はパイプ角度 θ の上昇流れを表し、また図中 C_l は揚力係数と定義する。カプセルの運動方程式は抗力係数等を用いて

$$\frac{W_c}{g} \ddot{S} = C_d \frac{\rho_w A_c}{2} (V_f - V_c)^2 - (W_c - W_b) \sin \theta - (W_c - W_b) (1 - C_l) \cos \theta \quad (18)$$

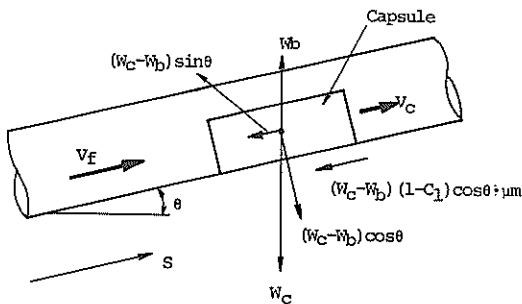


図-32 走行カプセルに作用する力

となる。定常走行時には $\ddot{S} = 0$ とし、また揚力効果を無視した場合には

$$C_d \frac{\rho_w A_c}{2} (V_f - V_c)^2 = (W_c - W_b) (\mu_m \cos \theta + \sin \theta) \quad (19)$$

となる。上式における C_d に(5)式を応用するために、(5)式における R_{e_s} を

$$R_{e_s} = \frac{(V_f - V_c) D}{\nu} \quad (20)$$

に変えて θ , W_c , A_c 等を(19)式に代入してカプセルと流体の相対速度を求める。カプセルに揚力等の作用がなく、カプセル管壁間の摩擦力が一定ならば、相対速度は V_f に無関係に一定となるであろう。

以上のような観点の下に、(19)式による相対速度の計算値と、実測した V_f と V_c の関係例を図-33~38に示す。これらの図より、計算値と実測値は V_f の相当な範囲でよく一致し、カプセル条件や流送条件の差異が揚力効果に及ぼす影響が理解されよう。このように(19)式は、カプセル条件、流送条件が与えられた場合、輸送能力に直結するカプセル速度の最低値を求める場合等への応用

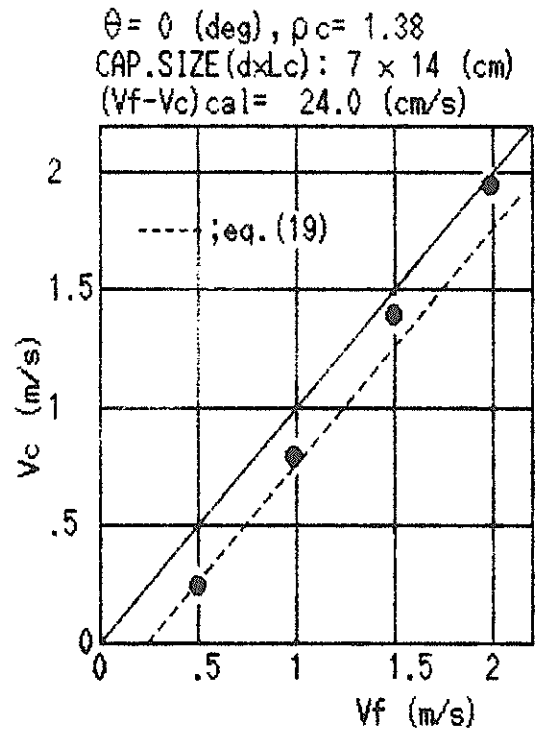


図-33 V_c と V_f の関係例 (1)

$\theta = 0$ (deg), $\rho_c = 2.45$
 CAP.SIZE(dxLc): 9 x 54 (cm)
 (Vf-Vc)cal= 25.8 (cm/s)

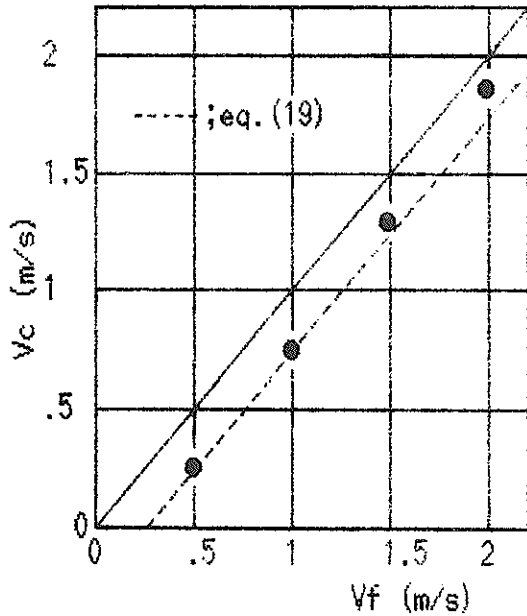


図-34 V_c と V_f の関係例 (2)

$\theta = 5.7$ (deg), $\rho_c = 2.45$
 CAP.SIZE(dxLc): 5 x 10 (cm)
 (Vf-Vc)cal= 70.5 (cm/s)

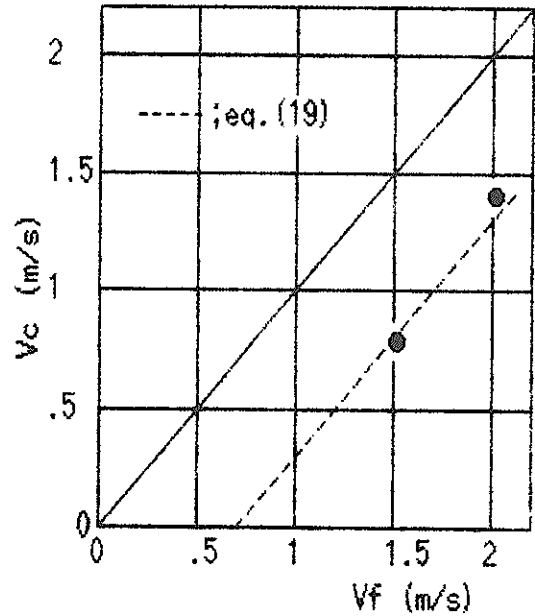


図-36 V_c と V_f の関係例 (4)

$\theta = 5.7$ (deg), $\rho_c = 1.38$
 CAP.SIZE(dxLc): 8 x 48 (cm)
 (Vf-Vc)cal= 26.5 (cm/s)

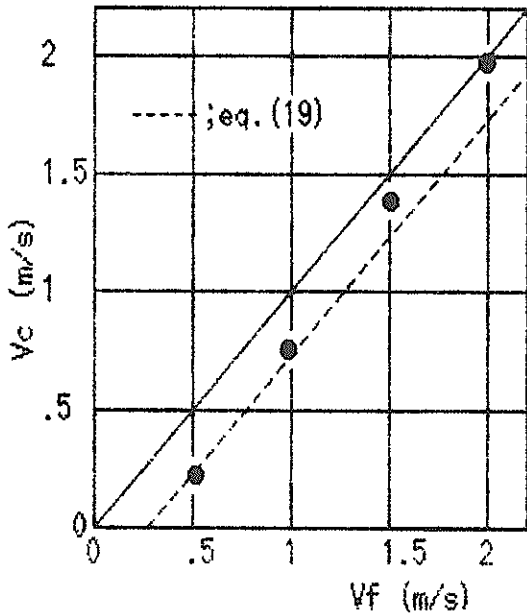


図-35 V_c と V_f の関係例 (3)

$\theta = -3.7$ (deg), $\rho_c = 1.38$
 CAP.SIZE(dxLc): 9.5 x 19 (cm)
 (Vf-Vc)cal= 2.6 (cm/s)

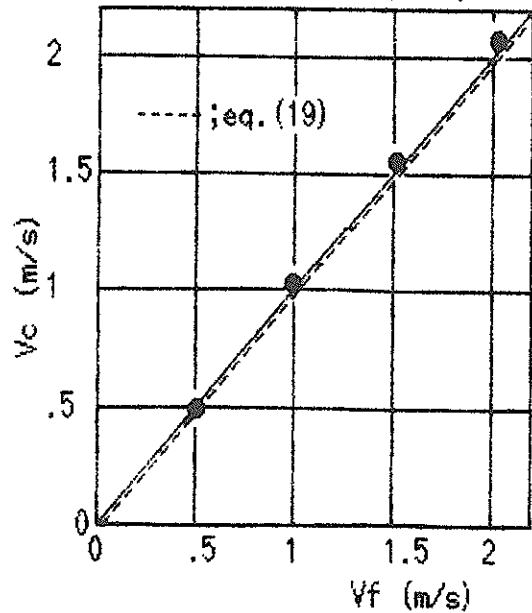


図-37 V_c と V_f の関係例 (5)

$\theta = -3.7$ (deg), $\rho_c = 2.45$
 CAP.SIZE(dxLc): 7×42 (cm)
 $(V_f - V_c)_{cal} = 68.1$ (cm/s)

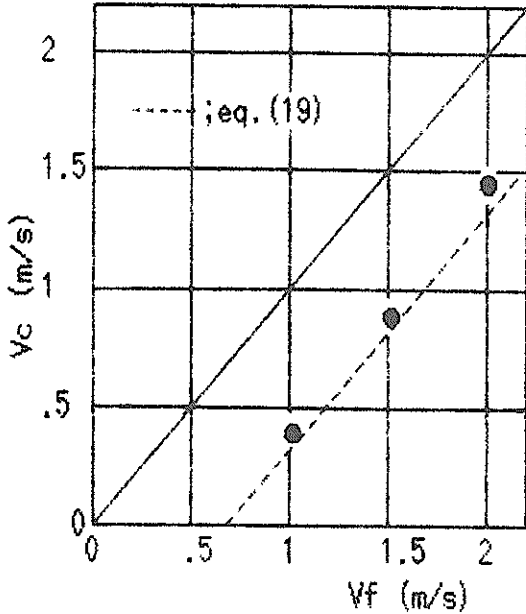


図-38 V_c と V_f の関係例 (6)

が考えられる。

詳細に考慮すれば、カプセルと管壁間の摩擦力の減少は、揚力によるパイプ壁面垂直抗力の減少ばかりでなく、カプセルと管壁間の流体潤滑作用の変化も考えられるであろう。

上記揚力作用は流体流速の増加に伴って増大し、ついにはカプセルは管底を離れて浮遊流れとなり、さらに流速が増加すれば、カプセルはパイプと同心状態で流れるといわれている。カプセルが管底を離れる現象は Liddle によって Lift-off (離昇) として提示された⁹⁾。それによれば、流体流速がある値を越えればカプセルは明確なノーズアップを示し、このときの値を Lift-off Velocity (離昇速度) と表した。Liddle の実験データは小規模でかつ条件もかなり限定されていたため、その後 Ellis らもこの種の実験を行っている。離昇に関する実験並びに解析には困難な事項も多く、詳細な評価は今後の研究に待つ所が多い。事実 Ellis による実験結果は、必ずしも Liddle の結果と一致しているわけではない¹⁰⁾。

今回の実験結果においては明確な離昇現象を確認するには至らなかったが、前記速度特性および後述の圧力損失特性から、相当な揚力作用は確認された。したがって

カプセル離昇により確かにカプセル速度の増大や圧力損失低減等の効果は大きい、現実的には必ずしも明確にこのような離床状態で流送する必要はないと思われる。

(2) 圧力損失特性

輸送動力の算定に直結する圧力損失は、カプセル輸送の場合、カプセル単位長さ当たりの圧力損失 $(\Delta p/L)_c$ として、

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_c = \frac{\Delta p - L \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_l}{L_c} + \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_l \quad (21)$$

と表される。ただし、 Δp は圧力損失区間長さ L における全圧力損失、 $(\Delta p/L)_l$ は、流体のみが流れている場合の単位長さ当たりの圧力損失である。また圧力損失比 R_p として次式を定義する。

$$R_p = \frac{(\Delta p/L)_c}{(\Delta p/L)_l} \quad (22)$$

図-39~41に $(\Delta p/L)_c$ と V_f の関係を、そして図-42~44に R_p と V_f の関係を3種の θ についてそれぞれ示す。

図-39~41より、 $(\Delta p/L)_c$ は全般的に k が大きいほど大きく、また V_f の増減に対する変動幅は小さい。これはカプセル存在による圧力増加が V_f の影響が小さいことや (21) 式右辺第二項は V_f のほぼ二乗に比例して増大するが、前記揚力効果等による摩擦抵抗の減少も大きくなっていくためと考えられる。また $(\Delta p/L)_c$ は、 θ が 0° と 5.7° の場合にはあまり差がないが、これらに比べると θ が -3.7° の場合は総じて低い傾向がうかがえる。

一方図-42~44より、 R_p は総じて k の大小関係と R_p の大小関係は一致し、また V_f の増加に対して急激に減少する傾向がある。 V_f が 2m/s の場合には、3種の θ に対してほとんど10以下の値となっている。これは前述のようにカプセル存在に伴う付加圧力損失は、 V_f の増加に対する変化が少ないのに対して、流体のみ流れた場合の圧力損失が V_f の増加に伴って急激に増大するためと考えられる。また $(\Delta p/L)_c$ の場合と同様に、 R_p も θ が -3.7° の場合が他の二者に比べて全体的に低い傾向が見られる。

$(\Delta p/L)_c$ の評価の別の方法として Ellis らは、当初環状部での流れに着目し、種々の実験データから修正レイノルズ数として

$$Re_1 = \frac{(D-d)(V_a - 0.35V_c)}{\nu} \quad (23)$$

を導入し、これと $(\Delta p/L)_c$ の関係を Fanning の摩擦損失公式と同様の方法で求めた¹¹⁾。彼らはその後さらに多くの実験を行い、また環状部に対して圧力速度とし

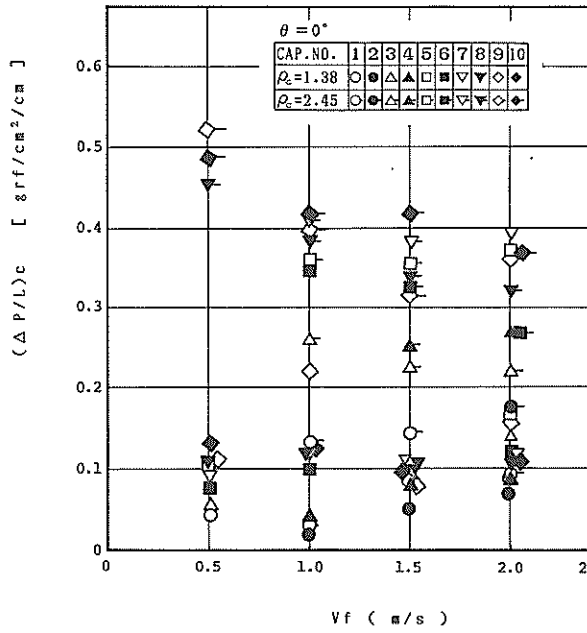


図-39 $(\Delta P/L)_c$ と V_f の関係 ($\theta = 0^\circ$)

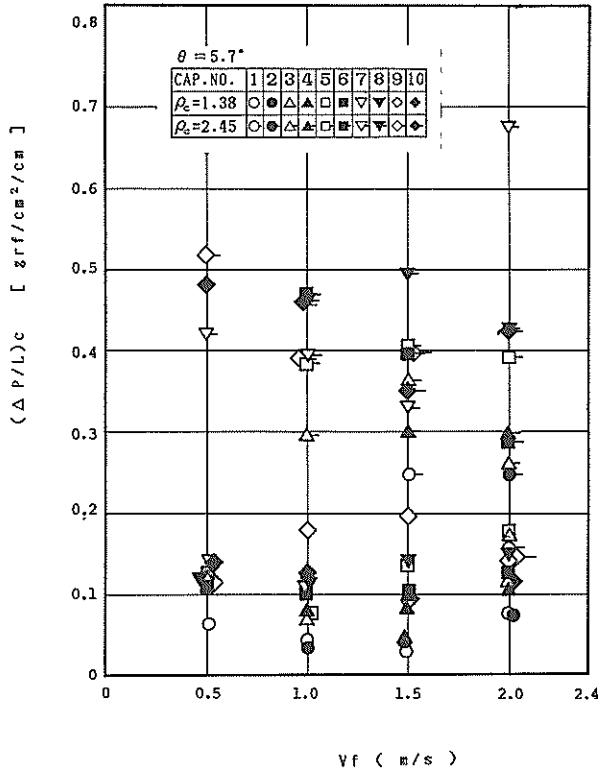


図-40 $(\Delta P/L)_c$ と V_f の関係 ($\theta = 5.7^\circ$)

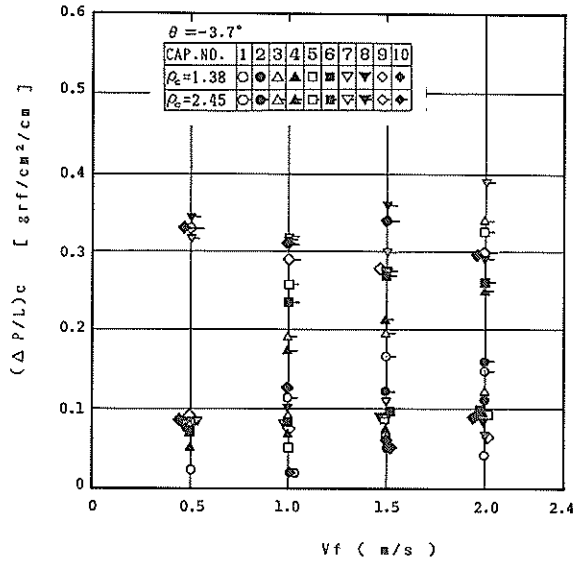


図-41 $(\Delta P/L)_c$ と V_f の関係 ($\theta = -3.7^\circ$)

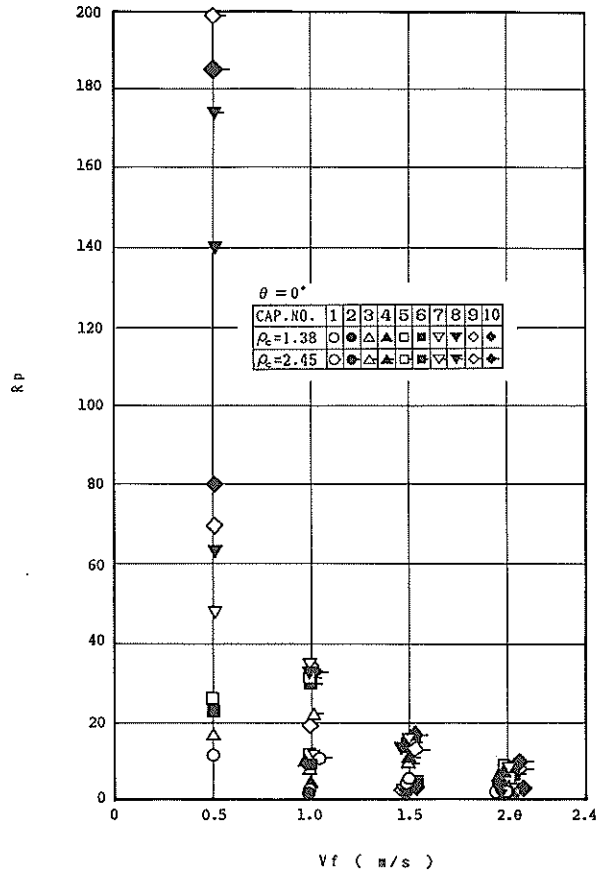


図-42 R_p と V_f の関係 ($\theta = 0^\circ$)

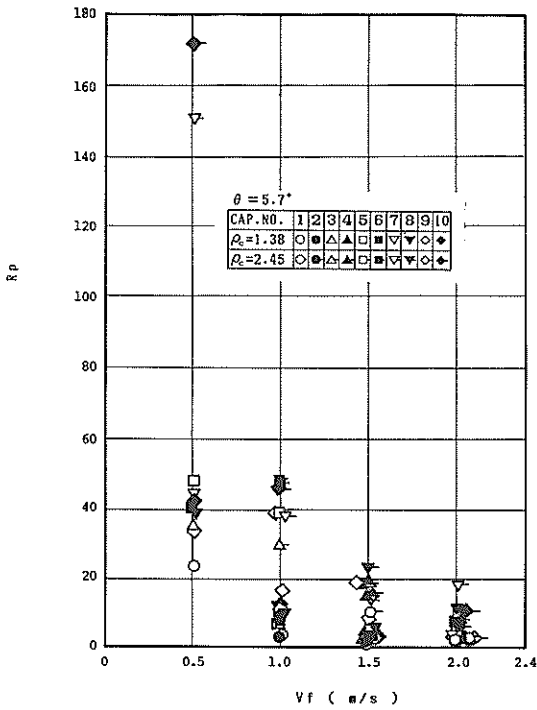


図-43 R_p と V_f の関係 ($\theta = 5.7^\circ$)

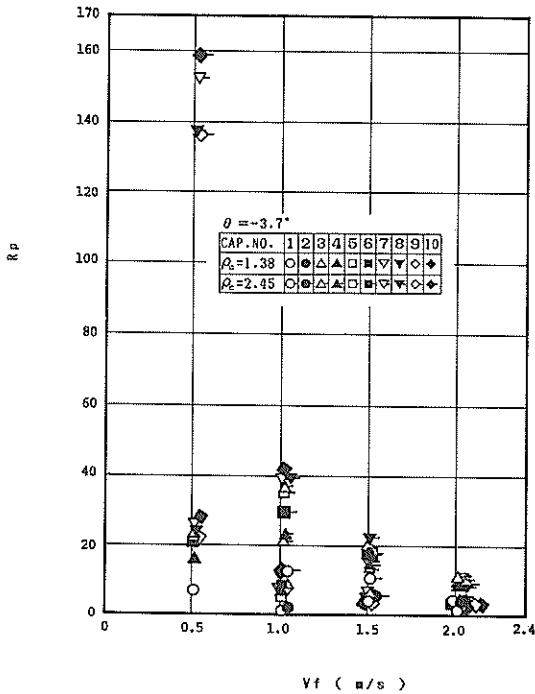


図-44 R_p と V_f の関係 ($\theta = -3.7^\circ$)

$$V_p = \frac{V_b - kV_c}{1 - k^2} \quad (24)$$

τ を入れ、これと $(d\dot{p}/L)_c$ の関係を Fanning の摩擦損失係数と同様の摩擦損失係数 f_c で結びつけ、

$$\left(\frac{d\dot{p}}{L}\right)_c = 2f_c \rho \frac{(V_b - kV_c)^2}{(1 - k^2)^2} \frac{1}{D - d} \quad (25)$$

とし、さらに (23) 式にかわるレイノルズ数として

$$R_{ec} = \frac{(V_b - kV_c)(D - d)}{\nu(1 - k^2)} \quad (26)$$

と再修正して実験データを再整理した¹²⁾。ただし V_b は管路平均流速である。その結果、種々の実験データに対して

$$f_c R_{ec}^{0.25} = 0.079 \quad (27)$$

となることを示した。

しかしながら、Ellis らが (27) 式を求めた実験データは、 k が大きく、かつ L_c が比較的に長い場合のものであり、 k が比較的小さい場合や L_c が小さい場合には、カプセル周囲の流れが相当複雑になることなどにより、必ずしもすべてのカプセルについて適用できるものではないと考えられる。

事実、今回の実験データは k の幅が広く、また L_c の小さいカプセルも含むため、上記 f_c と R_{ec} の関係をすべて統一した関係を見出すのは困難である。しかしながら、寸法の異なる各カプセルについては f_c と R_{ec} の間にかなりの相関関係が認められる。各カプセルに対する f_c と R_{ec} の関係を図-45~49 に示す。

図より k が 0.7 以上の場合の f_c と R_{ec} の間には、今回の実験範囲における θ と ρ_c の影響は見られず、統一して関係づけられよう。 f_c と R_{ec} について

$$f_c = C_3 R_{ec}^{C_4} \quad (28)$$

の関係を想定し、各カプセルについて最小二乗法によって C_3 、 C_4 を求めると表-6 のようになる。なお、図-46~49 については (28) 式も併記してある。また $k = 0.9$ の場合の図-48 には、Ellis らによる (27) 式および Tiedt が、 k が大きくかつ完全偏心状態の停止カプセルについて求めた $f_c \cdot R_{ec}^{0.25} = 0.05$ の関係式も併記してある。Ellis らの実験条件にはほぼ概当する $k = 0.9$ 、 $L_c/d = 6$ の場合には (28) 式と (27) 式は相当接近している。

上述のようにカプセルによる圧力損失は、カプセル寸法や形状等の変化による周囲流れの差異、また流送条件の違いに伴う揚力効果の相違等により相当変動する。し

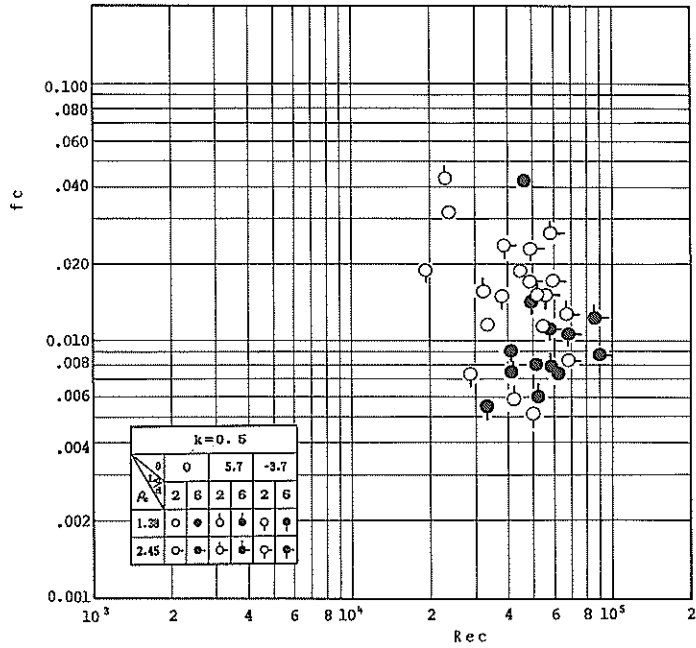


図-45 f_c と Re_c の関係 ($k = 0.5$)

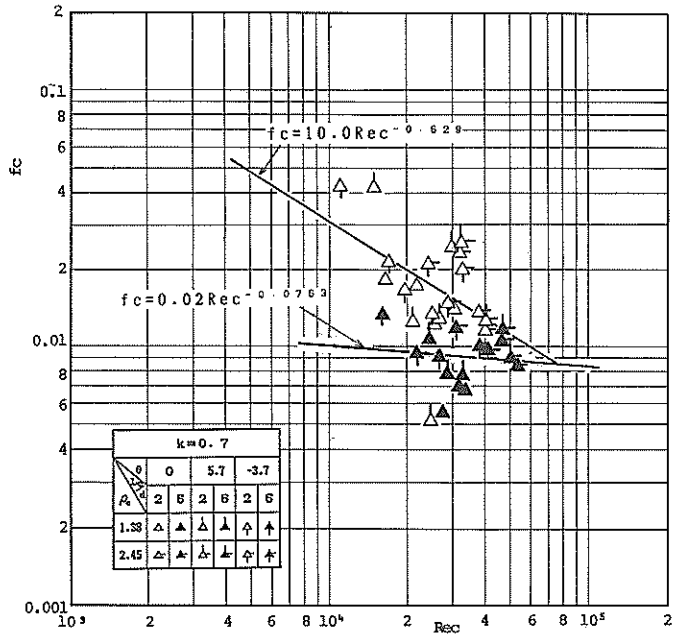


図-46 f_c と Re_c の関係 ($k = 0.7$)

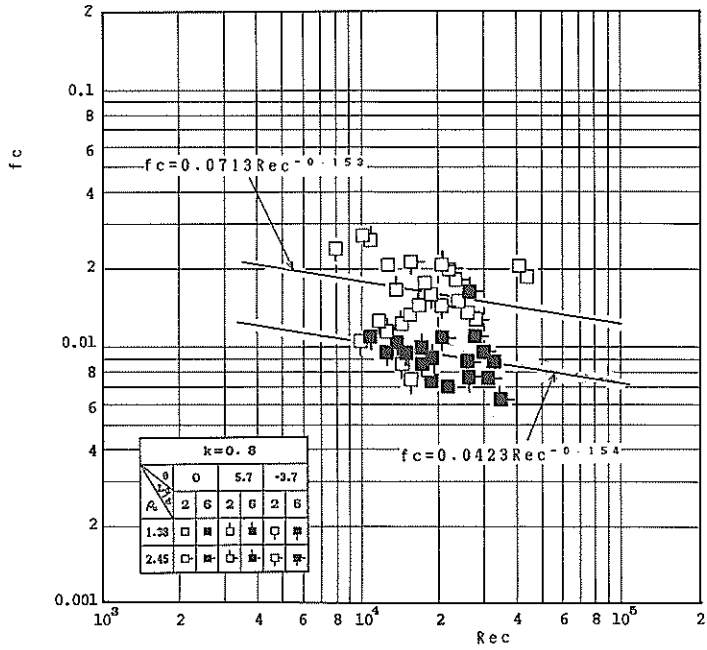


図-47 f_c と Re_c の関係 ($k=0.8$)

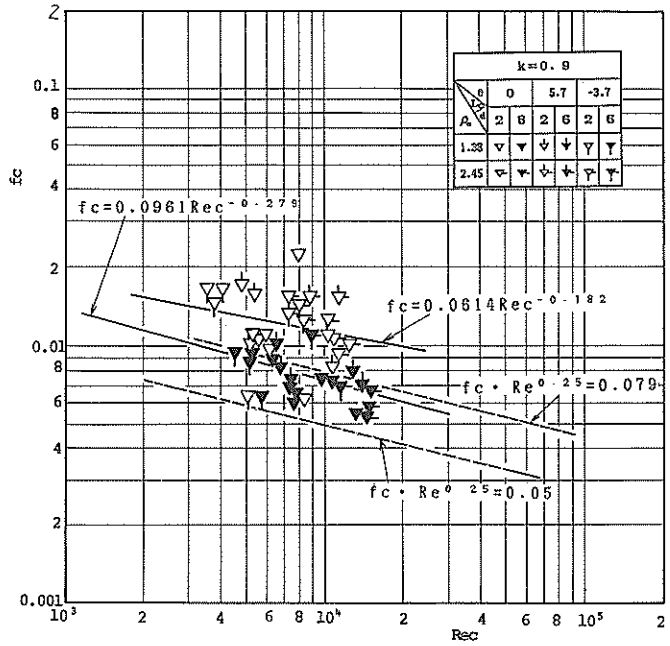


図-48 f_c と Re_c の関係 ($k=0.9$)

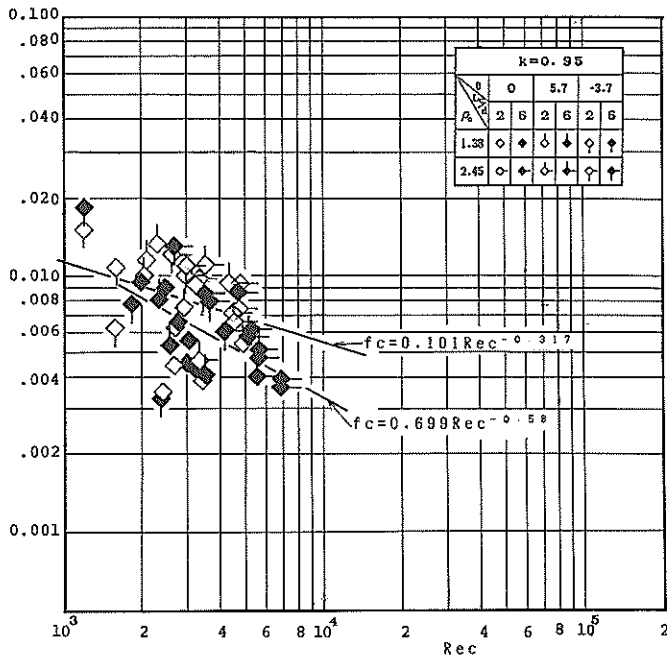


図-49 f_c と Rec の関係 ($k = 0.95$)

表-6 摩擦損失係数算定用定数

カプセル番号, 寸法	C_3	C_4
3 (70 × 140)	10.0	-0.629
4 (70 × 420)	0.02	-0.0763
5 (80 × 160)	0.0713	-0.153
6 (80 × 480)	0.0423	-0.154
7 (90 × 180)	0.0614	-0.182
8 (90 × 540)	0.0961	-0.279
9 (95 × 190)	0.101	-0.317
10 (95 × 570)	0.699	-0.58

たがって (27) 式や (28) 式を用いてカプセル輸送時の消費動力等を算定する場合には、カプセル条件、流送条件を明確にしておく必要がある。

5. まとめ

環境保全や省エネルギー等の観点から、港湾分野においても応用が考えられる水力式カプセル輸送について種々の実験を行い、円筒型単カプセルの初動から加速、そして定常走行に至る流動特性を調べた。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) パイプによって周囲流れが拘束された場合の円筒型カプセルの抗力係数 C_d は、カプセルとパイプの直径

比 k の増加に伴って急激に増大し、 k が 0.8 以上になると、 C_d におよぼすカプセル偏心率の影響は実質的に見い出せなくなる。また k が 0.7 以上の場合には、管路レイノルズ数の増減に対する C_d の増減割合、すなわち勾配は、カプセル寸法の差にかかわらず同程度となる。

(2) 水平管において管底に静止しているカプセルが動き始めるときの流体加速、すなわち初動流速 V_{j0} は、同一比重、同一長さ比のカプセルにおいては k の増加に対してほぼ直線的に減少し、すべて $k = 1, V_{j0} = 0$ の点に収束してゆく。

また初動流速とカプセル、管壁間の静止摩擦力から求めたカプセルの抗力係数は、抗力の直接測定から得られた場合と一致し、条件の異なる種々のカプセルについても初動流速を推定することができよう。

(3) 流体が定常状態で流れている管路中へカプセルを供給する場合、カプセルは実質的に比較的短時間で加速され定速走行に至る。これに対して流送区間の圧力変動は、カプセル供給によって大きく変動し、急上昇の反動として場合によっては負になることもある。しかもこの変動は、カプセルが実質的に定速走行に達した後も存在し、減衰して定常状態に至るまでには相当の時間を要する。したがって輸送効率向上のために短時間に連続して管路にカプセルを供給する場合には、

過渡応答特性についても把握しておく必要がある。

(4) 走行中のカプセルは、流体からの揚力効果や潤滑作用によってカプセル、パイプ壁面間の摩擦抵抗が減少し、流体流速の増大に伴ってカプセル速度は流体平均流速に近づき、場合によってはこれを越えた値となる。

定速走行中のカプセル速度は上記揚力効果等の影響を受けるが、その下限の推定は可能であり、それには前記カプセルのパイプ内での抗力係数とカプセル、パイプ壁面間の動摩擦係数を用いればよい。

(5) 輸送動力算定に直結する、定速走行中のカプセルによる圧力損失は、個々のカプセルについては流送条件とかなり相関関係があるが、周囲流れの相違等によるカプセル条件の影響が大きい。したがってこの値を推定する場合には、条件のよく合致したデータを使用することが肝要である。

6. あとがき

港湾分野においても、今後応用されてゆく可能性を有する水力式カプセル輸送について、パイプ中におけるカプセルの抗力測定および傾斜管路での流送実験を行った。その結果、単カプセルの初動、加速、定速走行に至る流動特性については、定量的にも相当評価できるようになった。また流体からカプセルに作用する揚力効果も確認され、これらはさらに明確な離昇現象へと発展してゆくものと考えられる。より詳細にカプセルの流動特性を決定する場合には、これら揚力、離昇についてもさらに研究を深めてゆく必要があるが、この作用がカプセル速度や輸送効率の増加、あるいは摩擦や騒音の低減等の望ましい効果に結びつくことは疑問の余地のないところであろう。

これに対して実用化に際して問題となるのは、輸送能率向上のために短時間に連続してカプセルをパイプライン内に供給する場合である。このような状況での流体は過渡応答状態にあるものと考えられ、また接近したカプセル相互の干渉も予想され、カプセルの流動特性も複雑に変動するものと考えられる。これらについても早期にデータが蓄積され、水力式カプセル輸送が港湾分野においても実現することを希望するものである。

(1986年3月31日受付)

参考文献

- 坂下撰：空気輸送システムの選定と配管設計，配管技術，日本工業出版，1978年12月
- 小杉佐内：カプセル輸送パイプラインによる石灰石輸送，配管技術，日本工業出版，1984年10月
- 機械工学便覧，第8編水力学および流体力学，日本機械学会編
- 横山重吉：水撃入門，日新出版，昭和54年10月
- 坂本正克他3名：水力式カプセル輸送の輸送エネルギーに関する考察，日本鉱業会誌/92, 1062('76-8)，日本鉱業会
- J.H.Lazarus, F.A.Kilner: INCIPIENT MOTION OF SOLID CAPSULES IN PIPELINES, *HYDROTRANSPORT* 1, PAPER C1, BHRA, 1970
- J.Kruyer: FRICTION AND SURFACE ROUGHNESS EFFECTS IN CAPSULE PIPELINES, *HYDROTRANSPORT* 3, PAPER G5, BHRA, 1974
- J.Kruyer, L.M.White: HYDRODYNAMICS FOR THE DESIGN OF A CAPSULE PIPELINE, *HYDROTRANSPORT* 4, PAPER C2, BHRA, 1976
- G.W.GOVIER, K.AZIZ: The Flow of Complex Mixtures in Pipe, VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY
- H.S.Ellis: AN ANALYSIS OF THE LIFT-OFF OF PIPELINE CAPSULES, *HYDROTRANSPORT* 4, PAPER C1, BHRA, 1976
- H.S.Ellis, J.Kruyer: THE PIPELINE FLOW OF CAPSULES, PART 10 EMPIRICAL PRESSURE AND VELOCITY CORRELATIONS FOR CYLINDRICAL CAPSULES CONVEYED IN PIPELINES UP TO 4 INCHES IN DIAMETER, *HYDROTRANSPORT* 1, PAPER C2, BHRA, 1970
- JAN KRUYER, H.S.Ellis: Predicting the Required Throughput from the Capsule Velocity and Capsule Pressure Gradient in Capsule Pipelines, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 52, April 1974

記号一覧表

A	パイプ断面積	[cm ²]
A_c	カプセル断面積	[cm ²]
B_1, B_2	実験定数	[-]
C_1, C_2	実験定数	[-]
C_d	カプセル抗力係数	[-]
C_f	カプセル揚力係数	[-]
D	パイプ内径	[mm]
D_p	カプセル前後面間の圧力抵抗	[grf]
$DP1$	パイプライン圧力損失	[grf/cm ²]
D_T	カプセル全抵抗	[grf]
d	カプセル外径	[mm]
d_c	カプセル，パイプ中心間距離	[mm]
F	カプセル抗力	[grf]
f_c	摩擦損失係数	[-]
g	重力加速度	[cm/s ²]
h_{af}	環状部全圧力損失	[grf/cm ²]

Δh_o ; 環状部付加圧力損失	[grf/cm ²]	V_b ; 管路平均流速	[m/s]
Δh_f ; カプセルがない場合の圧力損失	[grf/cm ²]	V_c ; カプセル流速	[m/s]
k ; カプセル, パイプ直径比	[-]	V_f ; 流体流速	[m/s]
L ; 圧力損失計測区間長	[m]	V_{fo} ; 初動流速	[m/s]
L_c ; カプセル長さ	[mm]	W_b ; カプセルに作用する浮力	[grf]
p ; 圧力	[grf/cm ²]	W_c ; カプセル重量	[grf]
$(\Delta P/L)_c$; カプセル圧力損失	[grf/cm ² /cm]	α_c ; カプセル平均加速度	[cm/s ²]
$(\Delta P/L)_f$; 流体の圧力損失	[grs/cm ² /cm]	τ_c ; カプセル比重量	[grf/cm ³]
R ; パイプ半径	[mm]	τ_w ; 水の比重量	[grf/cm ³]
R_{e1} ; 修正レイノルズ数	[-]	ϵ ; カプセル偏心率	[-]
R_{e2} ; 修正レイノルズ数	[-]	θ ; パイプライン傾斜角	[-]
R_{es} ; パイプラインレイノルズ数	[-]	μ_m ; カプセル, パイプ間動摩擦係数	[-]
R_{em} ; カプセル走行時レイノルズ数	[-]	μ_s ; カプセル, パイプ間静止摩擦係数	[-]
R_p ; 圧力比	[-]	ν ; 水の動粘性係数	[cm ² /s]
R_v ; カプセル, 流体速度比	[-]	ρ_c ; カプセル比重	[-]
S ; 管軸方向距離	[m]	ρ_w ; 水の密度	[grf·s ² /cm ⁴]
t ; 経過時間	[s]	τ_c ; カプセル壁面摩擦応力	[grf/cm ²]
t_0 ; 加速時間	[s]	τ_w ; パイプ壁面摩擦応力	[grf/cm ²]
V_a ; 環状部流速	[m/s]		

港湾技研資料 No. 555

1986.6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 阿部写真印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.