

# 気液二相流における粘性摩擦損失について

日大生産工(院) 山田 泰正 日大生産工(院) 後藤 吉範  
日大生産工 遠藤 茂勝

## 1. はじめに

海域や湖沼からの回収物の中でも海域に流出し粘度を増した重油や、淡水域で高濃度に藻類が混じった液体などは、流動性が高いことから圧縮空気を用いた管路輸送の試みがなされている。これら輸送媒体は圧縮空気と同時に管路内に混入しスラグ流として輸送することが可能である。

気液スラグ流はもっとも一般的な気液二相流の流動様式であり、スラグ流は気相と液相が交互に流れる間欠流となって流動し、原子力プラントといった大規模な設備から圧縮式空調機のような小規模な設備に至るまで幅広く見られる現象である。先述した輸送を実現するためには長距離における現象の把握が必要となるが、実験の観察によりスラグ流の速度が出口に近づくほど加速されるといった特徴の流れである。これまでの気液二相流の研究は工場内の限られた短距離の輸送を想定した研究が多く、土木工事に対応するような長距離輸送の研究は極めて少ない。水平気液スラグ流の既往の研究として Taitel and Barnea (1998)や小川ら(2003)によってスラグ流の速度増加は空気の圧縮性に起因することが明らかとなっているが、このような気相の効果についてはあまり明らかになっていない。本研究は長距離管路輸送に必要なエネルギーを推算するためにスラグ流の流動中の各種損失の評価を行い、本論においては短距離と長距離の管路における損失の主要な部分を占める管低部の液膜部がスラグ内部に取り込みスラグ流速度に加速する際の加速損失を明らかにすることを目的とし長距離スラグ輸送の基礎的な研究として、清水と圧縮空気を用いた実験をもとに検討を行った。

## 2. 気液二相流の研究

水平スラグ流の重要な論文としては Dukler and Hubbard (1968)(1975)によって提示された。これは Kordyban (1961)におけるスラグ流モデルを発展させた形であり、管の底面に液相部より流速の小さい液膜部が液相部によって吸収され、液膜部の後端から前端において吸収した同じ量を排出するモデルとした。また、この液膜部は液相部に吸収されるときに加速されるために液相部先端部において加速損失が生じると示されている。実験は管径 3.8cm 全長 19.5m(L/d = 513.2)で行われ、自身の理論との対比も行われている。その後この Dukler and Hubbard のスラグ流モデルを採用し実験的また理論的に検討したものが多数発表されている。このモデルにおいて、スラグ流速度  $V_s$  は容積流束  $J_T$  に線形的に比例する式

$$V_s = C_2 J_T \quad (1)$$

が定義され、この式における係数  $C_2$  は Dukler and Hubbard (1975) は  $C_2 = 1.2$ 、Gregory and Scott (1969)は  $C_2 = 1.35$  と示している。

しかし Zuber and Findlay (1965)は水平管において静水圧力を考慮したドリフト速度  $V_d$  を示し、スラグ流速度を推算する式を次のように示した。

$$V_s = C_2 J_T + V_d \quad (2)$$

これにより Benjamin (1968)は、ドリフト速度  $V_d = 0.542\sqrt{gd}$  と示し、Aziz et al. (1974)による管径 2.58cm 全長 24.15m(L/d = 936.0)の実験によりドリフト速度の存在が認められている。このことから、Nicolson et al. (1978)によって式(2)を採用した Dukler and Hubbard(1975) のスラグ流モデルは改訂され、さらに Taitel and Barnea (1990)によって、垂直管水平管および傾斜管の気液スラグ流モデル

---

Viscous Frictional Loss in Two Phase Gas-Liquid Flow

Yasumasa YAMADA, Yoshinori GOTO, Shigekatsu ENDO

として一般的にまとめられた。最近の論文としては Marruaz et al. (2001)が管径 15.24cm 全長 200m (L/d = 1312.0) の大口径の実験によるスラグ流速度と係数  $C_2$  の検討や、Rosa (2004)が管径 26mm 全長 23.4m (L/d = 900)の実験を行いスラグ流速度や圧力について検討を行っている。

しかし、どの論文においても短距離による実験のため、長距離管路におけるスラグ流速度が気相の膨張により加速され、距離によって変化するということが述べられていない。このため本研究において、短距離と長距離による流動特性の違いについて検討を行った。

### 3. 実験概要

実験装置は Fig-1 に示すような管径  $d = 38\text{mm}$  の透明管路を用いて、全長を変化させて実験を行った。気相である圧縮空気はエアードライヤーによって水分を除去された後、空気流量計を通り、管路内に供給される。また、液相である清水はタンクから水流量計を通り、供給される。気相と液相は同時に、また連続的に管路内に供給されスラグ流を発生させている。各測定点において管路上部に圧力計を設置した。

スラグ流は速度が速いために、いままでスラグ速度など目視による明確な測定が困難であった。このため本研究において Fig-2 に示す光透過量測定器を考案した。この装置は管の側面と上部に透明なアクリル板を設置し、管の中央の高さにおいて LED とその向かいに受光部であるセンサーを取り付けられている。液相は青色に着色されており液相部がセンサーの前を通過すると LED の光の透過量が減少するためにスラグの通過した時間が分かる。また、1m 離れた場所にも同じように LED とセンサーを設置しているため、この2対の時間差により測定ができる。この装置を用いてスラグ流速度、液相の間隔であるスラグ通過周期、及び液相長、気相長をサンプリング周波数 2000Hz にて測定を行った。

実験条件は Table-1,2 に示す気液流量の条件を 30 条件、全長による条件 6 条件にて行った。Table-1 における気相および液相の流量は Fr 数によって示し、式(3)によって求めた。

$$J_G = \frac{Qa}{A}, J_L = \frac{Qw}{A} \quad Fr_G = \frac{J_G}{\sqrt{gd}}, Fr_L = \frac{J_L}{\sqrt{gd}} \quad (3)$$

測定点は光透過量測定器による測定は各 6 地点 ( $P_1 \sim P_6$  に対応) において、圧力の測定は各 7 地点 ( $P_0 \sim P_6$  に対応) において測定を行った。

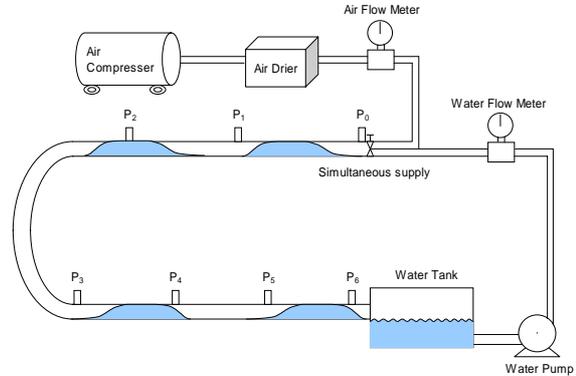


Fig.1 実験概要図

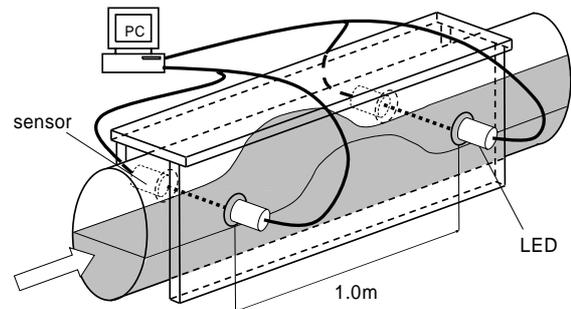


Fig.2 光透過量測定器概要図

Table 1 気液流量による実験条件

$Fr_G / Fr_L$	液相 $Fr_L$						
	0.29	0.48	0.67	0.87	1.06	1.25	
気相 $Fr_G$	0.96	3.33	2.00	1.43	1.11	0.91	0.77
	1.44	5.00	3.00	2.14	1.67	1.36	1.15
	2.41	8.33	5.00	3.57	2.78	2.27	1.92
	3.37	11.67	7.00	5.00	3.89	3.18	2.69
	4.33	15.00	9.00	6.43	5.00	4.09	3.46

Table 2 管路全長による実験条件

全長 L (m)	L / d	測定点 l / 全長 L						
		0.000	0.143	0.286	0.429	0.571	0.714	0.857
70.0	1842.1	0.000	0.143	0.286	0.429	0.571	0.714	0.857
150.0	3947.4	0.000	0.133	0.333	0.533	0.667	0.800	0.933
310.0	8157.9	0.000	0.161	0.323	0.484	0.645	0.806	0.968
460.0	12105.3	0.000	0.109	0.217	0.435	0.543	0.761	0.978
620.0	16315.8	0.000	0.081	0.242	0.403	0.565	0.726	0.887
		0.000	0.161	0.323	0.484	0.645	0.806	0.968

#### 4. 実験結果および考察

長距離管路の気液スラグ流では流動に伴い気相の膨張により速度や管内圧力の変動がある。そのためスラグ流の基本的な流動特性について実験結果をもとに検討を行った。スラグ流速をある気液の条件で管路全長を変化させた場合について示したものが Fig.3 である。この図は横軸に各測定点と全長との比である  $l/L$ 、縦軸にスラグ流速  $V_s$  をとり、すべての全長の条件について示してある。全長が短い条件において出口に行くほど  $V_s$  の増加が緩やかなのに対し、全長が長い条件において、初速度が遅く出口に行くほど速度増加が顕著になることがわかる。これは入口付近の圧縮空気は全長が長いほど圧縮され、出口に行くほど膨張するためであると考えられる。

その気相の膨張について横軸に  $l/L$ 、縦軸に入り口付近の気相長と各地点の気相長の比  $l_a/l_{a0}$  について Fig.4 に示し検討を行った。この結果として、全長が短い条件において出口付近の  $l_a/l_{a0}$  が 1.3 なのに対し、全長が長い条件においては 2.1 となった。このことから、全長が長くなると出口付近における気相の膨張が顕著となり、スラグ流速の増加に寄与していることが明らかとなった。

次に管内の圧力について管路全長を変化させた場合について示したものが Fig.5 であり、横軸に  $l/L$ 、縦軸に管内圧力の無次元量を取り、ある気液の条件において、全長が異なる条件について示した。この図よりすべての全長の条件において出口に近づくほど圧力は低下し、また出口付近において急激に圧力低下が見られる。また、全長が長くなると入り口付近における初期圧力が増加することがわかる。また Fig.5 における横軸を出口からの距離をとり示したものが Fig.6 であるが、この結果から、気液流量が同じであれば全長が異なっても同じ曲線上に乗ることがわかった。スラグの個数が増加すると、液相における粘性摩擦などの抵抗により初期圧力が増加するが、上記の結果から、管路内におけるスラグ個数が全長によって比例して増加しているため同じ曲線上に乗るものではないかと考えられる。さらに、どの全長の条件においても、この曲線を延長することによって初期圧力が予測可

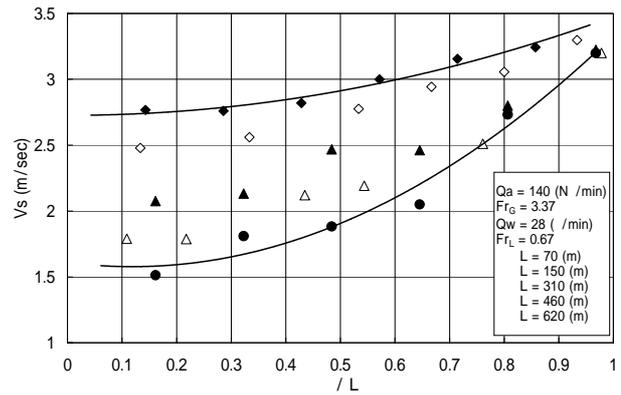


Fig.3 距離とスラグ流速の関係

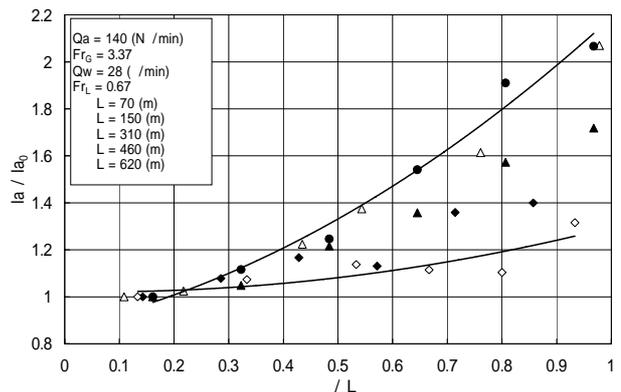


Fig.4 距離と気相長の関係

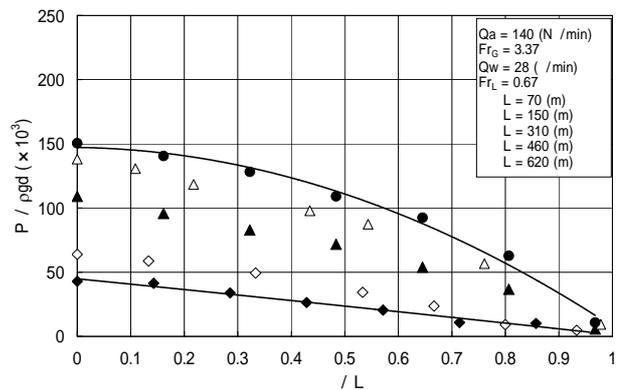


Fig.5 距離と圧力の関係

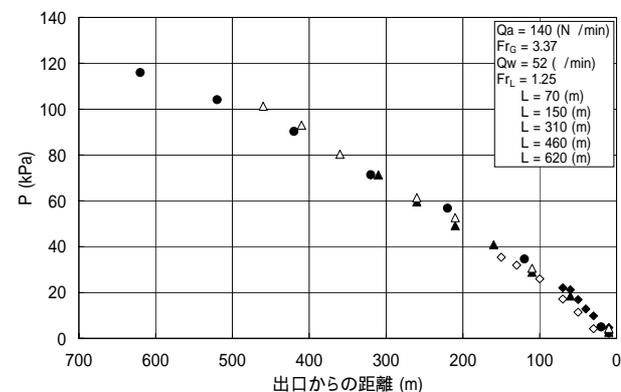


Fig.6 出口から距離と圧力の関係

能であることが考えられる。

次に実験結果とスラグ流モデルとの関連について検討を行った。実験結果より管内圧力

の減少割合がかなり大きく、その原因が粘性摩擦だけでは考えられにくく、また実験の観察より液相スラグ先端部において、管路底部の液相をスラグに取り込みスラグ流速まで加速されるための損失が大きいことが考えられる。ここでは、Taitel and Barnea (1990)が示したスラグ流モデルを用いて検討を行う。

このスラグ流モデルは Dukler and Hubbard (1975)が提案したスラグ流モデルを改定したもので、液相スラグ先端部から管路底部に存在する液膜部の液体を取り込み、取り込んだ量と同量の液体をスラグ後部から排出し、液膜部の液体は液相スラグに取り込まれるときに加速され、この加速による圧力損失が生じるというものである。また気相部においては圧力損失が生じないとされている。

Taitel and Barnea (1990)は、気液のスラグにおける圧力損失は以下のように示している。

$$\Delta P_u = \frac{\tau_s \pi D}{A} l_s + \Delta P_{mix} \quad (4)$$

ここで  $\tau_s$ : 液相スラグ部のせん断応力

$A$ : 管断面積  $l_s$ : 液相スラグ長

上式(4)の第1項目は液相スラグ部における摩擦損失であり、第2項目は液膜部が液相スラグ部に取り込まれている加速損失で以下のように示される。

$$\begin{aligned} A\Delta P_{mix} = & \rho_L g \int_0^{h_{fe}} (h_{fe} - y) b dy - \rho_L \int_0^{h_s} (h_s - y) b dy \\ & + \rho_L R_s A (V_s - J_T) (J_T - V_{fe}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $h_{fe}$ : 液膜部高  $h_s$ : 液相スラグ部高

$R_s$ : 液相スラグ部液体ポイド率

$V_{fe}$ : 液膜部流速  $J_T$ : 容積流束

この式(4)(5)に実験値を用いて液相スラグ部の圧力損失を求めた。また、この圧力損失はスラグ1個の損失であるので、スラグ個数を求め各区間における圧力損失とした。

各区間における流動損失を推算し  $l/L$  と各圧力割合を示したものが、全長が短い条件が Fig.7、全長が長い条件が Fig.8 である。この結果からスラグ流動中における損失は加速損失と粘性摩擦損失であり、その割合は全長や気液の条件により異なるが約 1:1 程度となっていることが分かった。このように、気液二相流における主要な圧力損失は粘性摩擦損失ではなく、管路内におけるスラグ流速は出

口に向かうに従い加速されるが、それに伴い気泡がスラグ内部に取り込まれるため、粘性摩擦が増大しにくいためと考えられる。

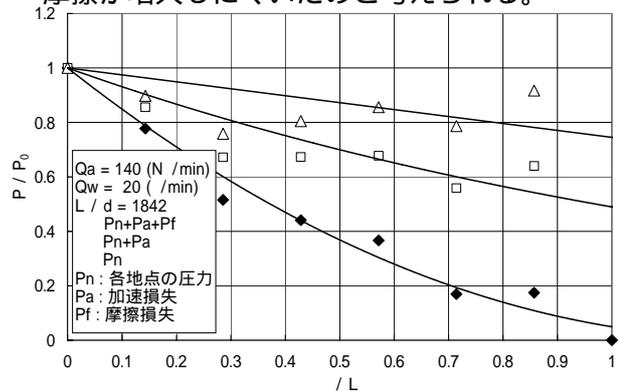


Fig.7 流動距離と圧力損失

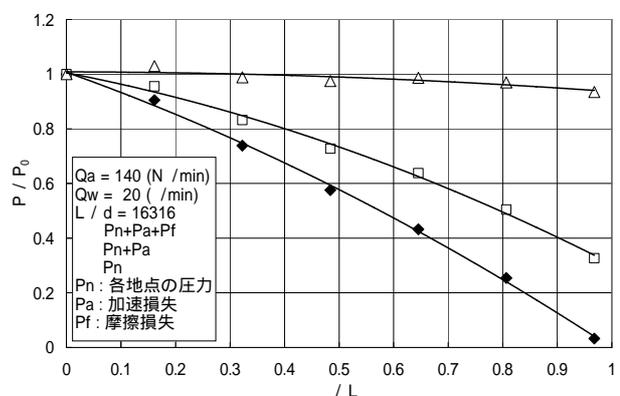


Fig.8 流動距離と圧力損失

## 5. まとめ

スラグ流は出口に行くほど気相の膨張により速度が増加し、全長が短い場合においては速度の増加が小さくなり見た目一定となる。

加速損失と粘性摩擦損失を推算した結果、両損失と各地点の圧力との合計は入口付近の圧力となり、流動による損失はこの2つの損失であることが推測される。

### 参考文献

- 1) 山田泰正、落合実、遠藤茂勝 (2006) : 遷移流動を伴う気液スラグ流における加速損失について、土木学会海岸工学論文集、Vol.51
- 2) 小川元、遠藤茂勝 (2003) : スラグ流の発生メカニズムと流動解析、流体力の評価とその応用に関する研究論文集、土木学会、Vol.2、pp.77-82.
- 3) Y. Taitel and D.Barnea (1990): Two-Phase Slug Flow, Advances in heat transfer, Vol.20, pp.83-132
- 4) Y. Taitel and D.Barnea (1998): Effect of Gas Compressibility on a Slug Tracking Model, Chem. Eng. Sci., Vol.53, pp.2089- 2097.