

気液管内流中の圧力損失と流況について

STUDY ON FLOW PATTERN BASED ON PRESSURE LOSS IN THE AIR-LIQUID TWO PHASE PIPE FLOW

山田泰正¹・小川元²・落合実³・遠藤茂勝⁴

Yasumasa YAMADA, Hajime OGAWA, Minoru OCHIAI and Shigekatsu ENDO

¹ 学生会員 工修 日本大学大学院生産工学研究科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

² 正会員 工博 佐伯建設工業(株) 建設本部技術部 (〒101-8632 東京都千代田区東神田 1-7-8)

³ 正会員 工博 日本大学助教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

⁴ フェロー会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

It is possible to transport the conveyance of mixture fluids such as emulsified oil, high viscosity solution, and the liquid including algae by using compressed air. The flow pattern in a pipe line of the transportation become air-liquid two phase flow especially slug flow. However, when a pipe line length was short, slug velocity did not change and it became clear that slug velocity is increase became the pipe length get longer. The increase of slug velocity is a thing by a pressure drop, which is expansion of compressed air, but does not became clear about an effect of the air with a few studies for long pipe line. We examined the effect of pressure of compressed air in long distance conveyance and examined that is increase of slug velocity due to the expansion of air and pressure drop concerning flow pattern. As the conclusion of this paper shows the results of experiments which was carried out in a 38mm diameter horizontal pipe with 600m long. The main pressure drop was substantiated by measurements of wall pressure using high frequency pressure transducers and observations of slow moving liquid in the film ahead of slug flow. This investigation shows two contributions to the pressure drop across a slug. The first is the pressure drop that results from the acceleration of the slow moving liquid film to slug velocity. Another is the pressure drop is required to overcome wall shear in the back section of the slug.

Key Words: Air-liquid two-phase flow, horizontal pipe, acceleration loss, slug velocity, liquid film

1. はじめに

海洋や湖沼水域における油やアオコなどの浮遊物は地上へ輸送し処理を行わなければならないが、この浮遊物の輸送方法として、圧縮空気をういた混気輸送が新たに注目されている。この混気輸送の特徴としてエマルジョン化した高粘度油や藻類などを大量に含む液体などを輸送する手段として有効であり、また輸送後の気相との分離が容易であることが挙げられる。この混気輸送のメリットとしては、海水と混合状態にあるエマルジョン化油の輸送だけでなく、群体藻類の輸送中における高速攪乱流の崩壊作用が期待できる。さらに、粘性抵抗を低減し高速での輸送が可能であるので、浚渫土砂の侵食海岸への土砂輸送による海岸環境維持への応用等にも期待できる。混気輸送の流動様式は、輸送媒体である液相に圧縮

空気である気相を同時に管路内に供給することにより、スラグ流が発生し、管路内を流動する。混気輸送の特徴として海上地上問わず3~5kmの長距離、また少スペースの輸送が実現できる。しかし、このような長距離輸送を行う際の研究例が少なく経験的に施工が行われている。長距離輸送では流動過程において気相の圧縮性が著しく寄与し、管路長が短いときにはスラグ流速は一定であるが、管路長が長くなるほど速度増加が著しくなり輸送効率が良いことが明らかとなっている¹⁾。スラグ流速の増加は気相の膨脹効果によるものであるが²⁾、このような気相の効果については明らかになっていない。本研究においてこれらの特性を明らかにするために清水によるスラグ流の実験を行い、気相の効果による速度上昇とエネルギー損失による圧力低下の要因となる各種損失の評価を行うことを目的とした。

2. 実験概要

これまでのスラグ流に関する可視化実験として管径 32mm と 38mm で管路延長 50.0m および 150.0m の透明ビニール管路を用いた実験を行い、スラグの発生、成長、流動、崩壊の過程などの流動メカニズムや流動過程における速度変化、圧力降下など流動特性について検討を行ってきた³⁾。しかし、スラグ流速の増加が大きくなるなど管路総延長が管路内の現象を著しく支配することや実用的な観点から長距離輸送を考慮し、管路全長 600.0m についても検討を行った。

実験装置は図-1 に示すとおり管路全長 $L=600.0\text{m}$ 、管径 $D=38\text{mm}$ の透明管路を用いた。気相である圧縮空気はエアコンプレッサーからエアードライヤーによって水分を除去し空気流量計を通して検定され管内に供給される。また、液相はタンクからポンプによって供給され流量計を通し管内へ供給される。液相には清水を使用し、気相、液相ともに連続的に供給し両相の合流地点にて混相流となる。測定は各地点 I において管内圧力、スラグ流動速度、スラグ通過周期について行った。管内圧力は管内上部に取り付けた圧力計によって計測されデジタルデータとしてパソコンに収録される。スラグ流速は、液相先端部における 10m 区間の平均速度であり、スラグ通過周期は各測定地点における液相先端部の通過時間の間隔で、速度および周期は目視によって測定した。測定地点は管内圧力について 6 地点 ($I/L = 0, 0.167, 0.333, 0.500, 0.667, 0.833$)、速度および周期について 5 地点 ($I/L = 0.167, 0.333, 0.500, 0.667, 0.833$) において行った。表-1 は実験条件であり、0, 1 気圧時の気相流量 Q_a (NI/min: normal liter per minute) および液相流量 Q_w を示したもので 表中の数値は Q_a/Q_w であり 72 条件について実験を行った。

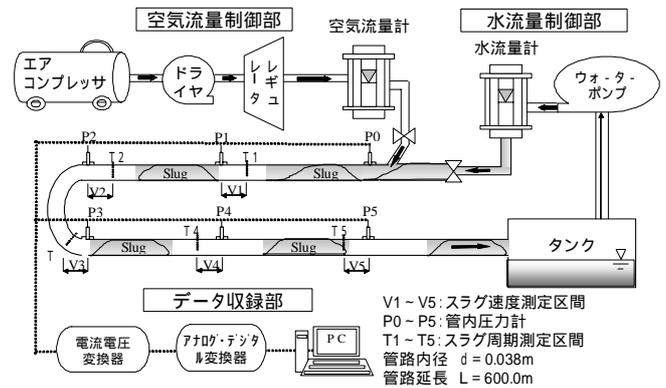


図-1 実験装置概略図

表-1 実験条件一覧表

Q_a/Q_w	Q_w (l/min)						
	12	20	28	36	44	52	
Q_a (NI/min)	60	5.00	3.00	2.14	1.67	1.36	1.15
	80	6.67	4.00	2.86	2.22	1.82	1.54
	100	8.33	5.00	3.57	2.78	2.27	1.92
	120	10.00	6.00	4.29	3.33	2.73	2.31
	140	11.67	7.00	5.00	3.89	3.18	2.69
	160	13.33	8.00	5.71	4.44	3.64	3.08
	180	15.00	9.00	6.43	5.00	4.09	3.46
	200	16.67	10.00	7.14	5.56	4.55	3.85
	220	18.33	11.00	7.86	6.11	5.00	4.23
	240	20.00	12.00	8.57	6.67	5.45	4.62
	260	21.67	13.00	9.29	7.22	5.91	5.00
	280	23.33	14.00	10.00	7.78	6.36	5.38

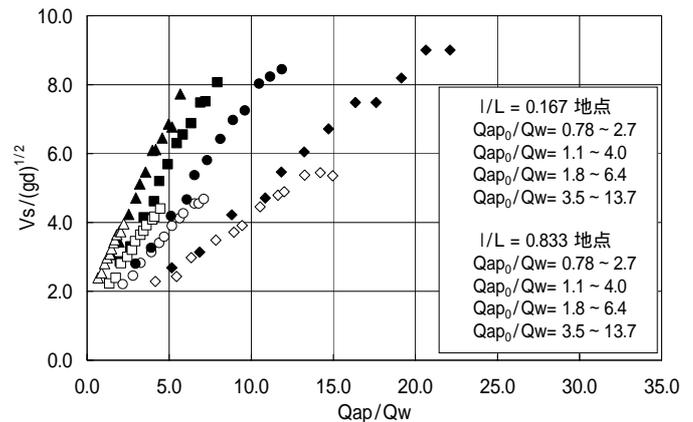


図-2 液相流量とスラグ流速

3. 実験結果および考察

(1) スラグ流速及び管内圧力

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う。気相は圧力により体積が変化するので、気相の圧縮性を考慮した気相流量を Q_{ap} とし、0m 地点における気相流量を Q_{ap0} とした。

実験結果よりスラグ流速について示したものが図-2 である。これは横軸に気液流量比 Q_{ap}/Q_w をとり、縦軸にスラグ流速の無次元量 V_s/\sqrt{gd} をとり、測定点 I/L について 0.167 と 0.833 の 2 地点について示したものである。図中の数値は圧力を考慮した空気量を示している。また、白印は $I/L=0.167$ の結果であり、黒印は $I/L=0.833$ の結果である。これより、黒印で示したところは白印と比べ流量比の範囲が大きくなっており、また流動距離が長くなると速度が増加していることが分かる。

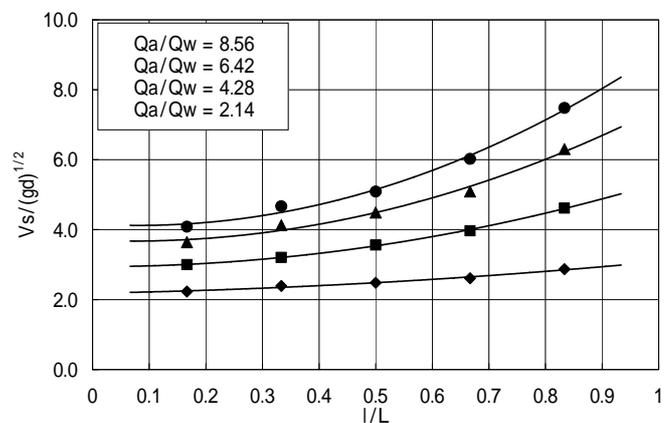


図-3 流動距離とスラグ流速

次に流動距離によるスラグ流速について検討を行ったものが図-3である。これは横軸に l/L 、縦軸に Vs/\sqrt{gd} をとり地点によるスラグ流速の傾向を示したものである。図より Qa/Qw が小さい場合($Qa/Qw=2.14$)はほぼ直線的に速度が増加しているのに対し、 Qa/Qw が大きい場合には指数関数的に速度が増加していることが分かる。このように Qa/Qw が小さい条件では気相流量が少ないために気相の膨張による加速が小さく、 Qa/Qw が大きい条件では著しくなるためと考えられる。そして気相の割合が多い場合でも流動距離が短い地点において気相の膨張の影響が小さく、流動距離が進んだ $l/L=0.5$ 付近から気相の膨張の影響が大きくなるため速度が加速されるものと考えられ、またこの加速は短距離管路において見ることはできず管路長を長くすると速度増加が著しくなる¹⁾。

スラグ流の流動は気相の圧縮性が駆動力となっているものと考えられるので、管内圧力特性について検討を行う。管内圧力について気液流量との関係を示したものが図-4である。この図は横軸に Qap/Qw 、縦軸に管内圧力の無次元量 $P/\rho g d$ をとり l/L を0.167と0.833の2地点について示したものである。これより流動距離が短い所ではすべての条件において圧力が高く流動距離が長くなると圧力が低くなることが分かる。また、 $l/L=0.167$ において、液相流量が多いと Qap/Qw が増加するにつれ管内圧力は増加しやすい。これは液相流量がおおいために液相を流動させる初期圧力が高くなっているためである。

次にこの流動距離に対して管内圧力の減少について横軸に l/L 、縦軸に $P/\rho g d$ をとり示したものが図-5である。図よりいずれの条件もスラグ発生地点において圧力が高く、出口に近づくにつれ圧力が減少する。これはスラグ流の流動過程において粘性摩擦や加速損失によるエネルギー損失のために圧力が低下するものと考えられる。また、 $l/L=0.5$ 付近において、圧力の減少傾向が変化し、急な圧力低下が起こる。圧力と前述の速度の結果から考慮すると $l/L=0.5$ 付近において気相の膨張が著しくなることが明らかとなった。

(2) 容積流束とスラグ流速

スラグ流速の増加は気相の膨張が要因となっているものと考えられるので、気相の膨張性を考慮した見かけ上の速度である容積流束とスラグ流速について検討を行った。容積流束 J_v は管内圧力を考慮し気液流量を管路の断面積で除したものである。この容積流束 J_v とスラグ流速 Vs について示したものが図-6である。横軸にスラグ発生地点における容積流束 J_{T0} 、縦軸に各測定地点におけるスラグ流速 Vsn をとり、すべての気液条件について示したものである。この結果から J_{T0} と Vsn の関係は気液の流量にかかわらず、すべての条件において地点ごとに直線的な傾向を示し、地点が変わることによってその勾配が変わってくるのがわかる。そこでこの直線の傾きで J_{T0} と Vsn との比である C_2 および気相の膨張を考

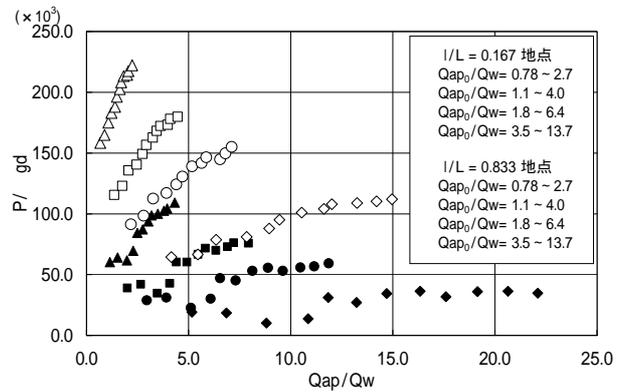


図-4 液相流量と管内圧力

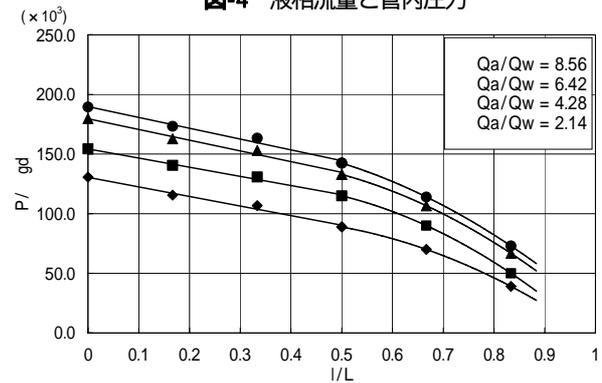


図-5 流動距離と管内圧力

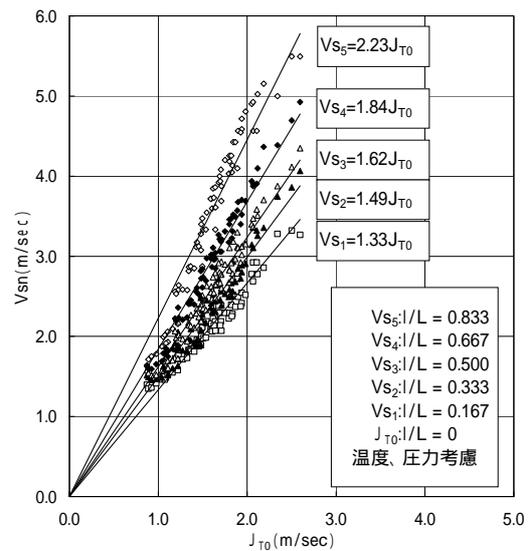


図-6 初期容積流束とスラグ流速

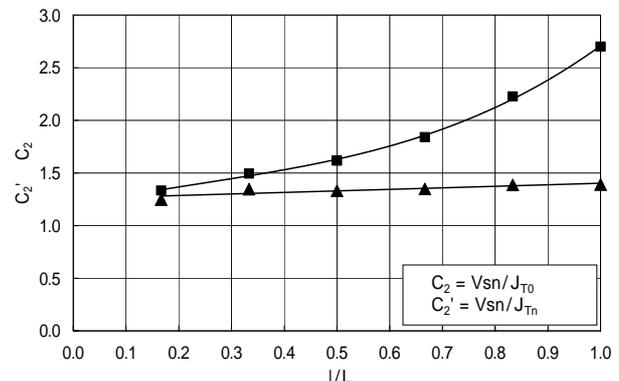


図-7 流動距離と C_2

慮した各地点における容積流束 J_n とスラグ流速度 V_{sn} との比である C_2' について示したものが図-7である。このように C_2' は流動距離が進むと増加し、 C_2' はどの地点においてもある一定値となることが分かった。この結果から、スラグ流は容積流束よりも速い速度で下流へ流動し気相の膨張がスラグの速度増加に寄与するものと考えられる。また C_2' が平均的に 1.35 であることから気相の膨張は速度増加に対してほぼ一定に寄与していることが明らかとなった。

(3) 圧力低下と加速損失

スラグ流のような間欠流では単相流と同一に取扱うことができないが、ボイド率の低い場合において単相流として扱うことができるので見かけ上の圧力変化について検討した。実験の結果から流動距離に対する管内圧力の減少の割合が著しく大きく、その原因が粘性摩擦だけとしては大きすぎると考えられることと、また液相スラグ先端において管路底部の液相は、スラグに取り込まれて加速されるための著しい損失があると考えられるので各地点の管内圧力と液相の加速に必要な圧力を推算するために、Hubbard が提案したスラグ流モデル⁴⁾⁵⁾に基づき加速損失の検討を行った。

Hubbard のスラグ流モデルは scooping model と呼ばれ、図-8 に示すような、液相スラグ先端から液相スラグより流速の小さい管路の底部に存在する液膜部の液体を取り込み、スラグ後端からは先端で取り込んだ量と同量の液体を後方の液膜部へ排出し、かつ液相スラグは前方の大気泡の一部を小気泡として巻き込み吸収して後方より排出されるモデルである。これにより、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、この加速のためにスラグ先端部で圧力損失が生じる。大気泡部においては気相のみなのでほとんど損失がないため圧力は一定と考えられ、また液相スラグ部には摩擦損失が生じるので圧力分布は図-9 のようになる。

加速損失に関わる液膜部の取り込み量 m は、液相スラグ先端の移動速度 V_s から、液膜部の流速 V_{fe} を考慮した以下の式で表すことができる。

$$m = \rho_L A R_{fe} (V_s - V_{fe}) \quad (1)$$

ここで、
 ρ_L : 液相の密度
 A : 管路の断面積
 R_{fe} : 液膜部のボイド率
 また、 R_{fe} は以下のように示される。

$$R_{fe} = \frac{A_{fe}}{A} = \frac{\theta - \sin \theta}{\pi} \quad (2)$$

ここで、
 A_{fe} : 液膜部の断面積
 A : 管路の断面積
 θ : 図-10 に示す液膜部の円弧の角度

図-9 から液相スラグ部の全圧力損失は (3) 式となる。

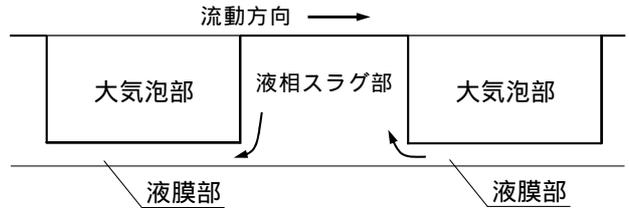


図-8 Hubbard's scooping model

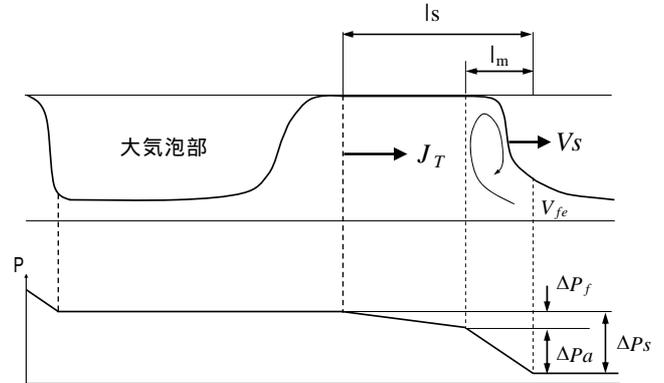


図-9 液相内における圧力分布図

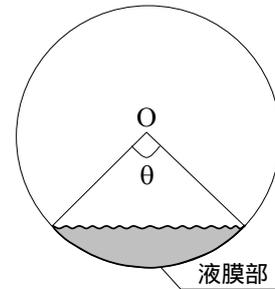


図-10 液膜部と円弧の角度

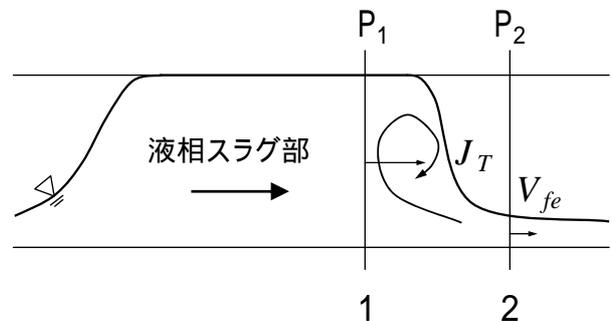


図-11 加速損失算出に適用した監査面

$$\Delta P_s = \Delta P_a + \Delta P_f \quad (3)$$

ここで、
 ΔP_s : 液相スラグ部の全損失
 ΔP_a : スラグ部先端における加速損失
 ΔP_f : 液相スラグ部の摩擦損失

この加速損失 ΔP_a は図-11 に示すように監査面 1 における圧力を P_1 、監査面 2 における圧力を P_2 とすると、運動量の式から、以下のように表すことができる。

$$(P_1 - P_2)A = m(J_T - V_{fe})$$

$$\Delta Pa = \frac{m}{A} (J_T - V_{fe}) \quad (4)$$

実験の観察において液膜部はほとんど流動していなかったことから液膜部の流速 V_{fe} を近似的に0と置くこととした。そしてこの加速損失はスラグ一個についてのものであるため、以下の式によってスラグ個数の推算を行い、100m 区間の加速損失を求めた。

$$\text{スラグユニット長 } \ell u = V_s \times T$$

$$\text{100m 区間の加速損失} = \Delta Pa \times 100 / \ell u \quad (5)$$

式(5)で求められた加速損失をもとめ、横軸に l/L 、縦軸に供給口付近の管内圧力 P_0 と各地点の圧力とスラグを流動させることによる圧力損失 P_v および加速損失 P_a を示したものが図-12(a)(b)(c)(d)である。図-12(a)(b)は $Q_a/Q_w=2.14, 1.67$ について、また図-12(c)(d)は $Q_a/Q_w=5.71, 4.44$ について示している。図中の P_i は各地点の管内圧力、 P_v は各地点におけるスラグの加速に必要な圧力、 P_a は各地点での液膜部の加速損失である。この結果より流動距離が進むと加速損失の割合が増加し、図-12(a)(b)の比較より液相流量を増加させると加速損失も増加することが分かる。これは、出口に近づくにつれてスラグ流速が増加するので、加速損失が増加したものと考えられ、また液相流量を増加させると通過周期が短くなり、スラグ個数が増加するために損失が増加するものと考えられる。

一般に混相流において粘性摩擦損失の割合は小さいものと考えられている。また、式(3)から液相スラグ部の圧力損失は加速損失と粘性摩擦損失の合計であるので、供給口付近の管内圧力 P_0 から各地点の管内圧力 P_i と加速損失 P_a を引いた残存圧力について検討を行った。このことについて横軸に Q_{ap}/Q_w 、縦軸に各供給口付近の管内圧力 P_0 に対する各地点の管内圧力 P_i と加速損失 P_a の合計の比をとり、液相流量をパラメータとして示したものが、図-13(a)(b)(c)である。それぞれ流動距離 $l/L = 0.333, 0.500, 0.833$ の各地点について示している。

流動距離が短い(a)について、すべての Q_a/Q_w において管内圧力 P_i と加速損失 P_a を合計した圧力が平均して80%程度となり、これらを差し引いた粘性摩擦分の圧力は10%程度でほぼ一定となっている。これは、まだスラグが発生してから流動距離が短いために気相が液相のほとんどを吹き飛ばしてしまうために液膜部が生じにくく、液膜部に相当する量が少ない。このために液膜部を巻き上げる量が少ないために加速損失も少ない。また、粘性摩擦も低いために管内圧力が大部分となっている。

流動距離の長い、出口付近である $l/L = 0.833$ について、 Q_{ap}/Q_w が小さい場合において粘性摩擦分の圧力が約10~20%程度となっている。この圧力すべてが粘性摩擦損失と考えると Q_{ap}/Q_w が多くなるに伴い流動速度が増大するので損失が少なくなるのは説明しにくい。しかし、スラグ流は壁面との境界に気泡があるためこの境に気泡

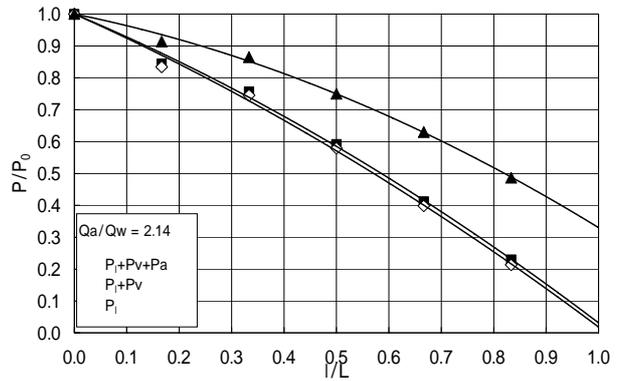


図-12(a) 流動距離と圧力低下

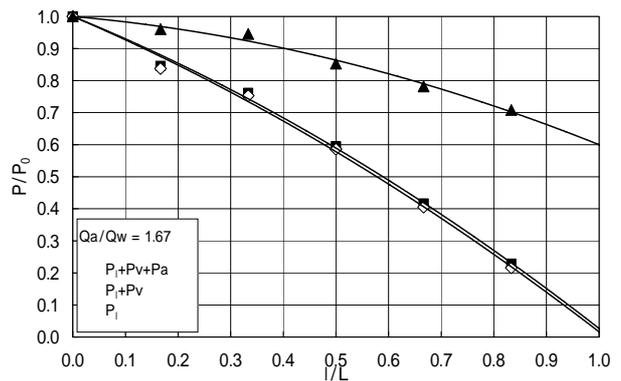


図-12(b) 流動距離と圧力低下

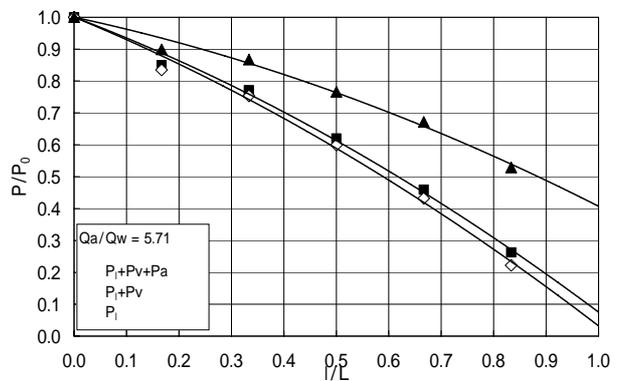


図-12(c) 流動距離と圧力低下

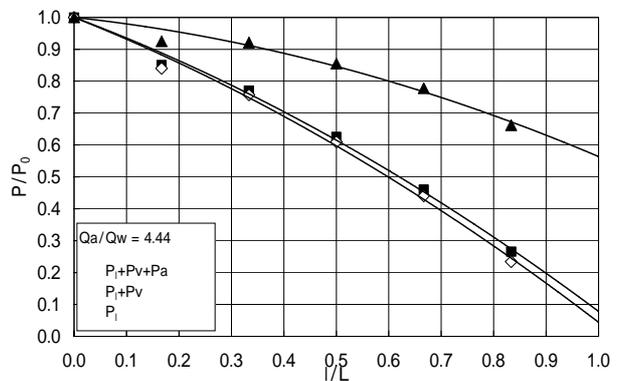


図-12(d) 流動距離と圧力低下

が入り込むことが確認されていることから気相が抜けやすくなり、圧力低下が生じるものと考えられる。また、液相流量の少ない場合において 50%程度が粘性摩擦であるとは考えにくいので、粘性摩擦損失が 10%~20%程度と仮定すると、粘性摩擦損失を差し引いた圧力が 30%~40%となる。これは供給口付近において発生した液相スラグは気相である圧縮空気によって流動し、流動距離が進むと気相の膨張によって液相が加速され、このために液相の流動は乱され、スラグ内部にわずかな隙間が発生し気相がこの隙間を通過するために急激な圧力低下をまねき、気相がスラグ中を抜けるためと推測される。出口付近まで進むとさらに液相が加速されるためこの乱れが顕著に現れ、長さの短い液相スラグでは気相混入によって崩壊しやすくなる。

$l/L=0$ において混合状態で供給した気相と液相は分離流となっているが、液相の水面上昇により液相表面に波が発生し、気相の通過断面積が閉塞することによりスラグ流が発生する。スラグ流は液相が流動するときに管路底部にあった液膜部を巻き込んで流動し、同時に気泡を巻き込むためスラグ上部に気泡が混入している流れとなる。流動距離が短いところでは液膜部に相当する量が少なく加速損失も少ない。また気泡を巻き込む量が少ないために液相内に気泡混入が少ない。しかし、流動距離が進むと液膜部の量が増え液相を乱し、気泡を多く巻き込むために液相中の気相と連続して気相が液相の中を通り抜けるような現象が起きる。このために長さの短い液相は崩壊を起こし、管底部に堆積するために液膜部の量をさらに増やしスラグの巻き込む量が増え加速損失が増大する。また、 Q_{ap}/Q_w が大きいところでは崩壊がさらに顕著に現れ、加速損失が増大するものと考えられる。

4. まとめ

本研究による結果をまとめると以下ようになる。

- (1) スラグ流は流動距離が進むと管内圧力が低下し、速度が増加する。このことから、気相の膨張がスラグ流速を増加させるものと考えられる。
- (2) 各地点のスラグ流速と容積流束との関係は、気相の膨張のためスラグ流速は増大し、その割合はスラグ発生地点を基準とすると容積流束の 3 倍近くになる。しかし圧力を考慮した容積流束とスラグ流速との比は平均で 1.35 とほぼ一定値となり、気相の膨張による効果がスラグ流速に反映される。
- (3) Hubbard モデルの適用により液膜部の取り込みによる加速損失は評価できる。加速損失が占める割合は液相流量が増えると全圧力損失に占める割合は大きいことが明らかとなり、液相流量が少ない場合については気相が液相部を通過しやすくなるため、気相の圧力低下が顕著となる。このように気液流量や流動距離によるスラグ流の流況変化が推測される。

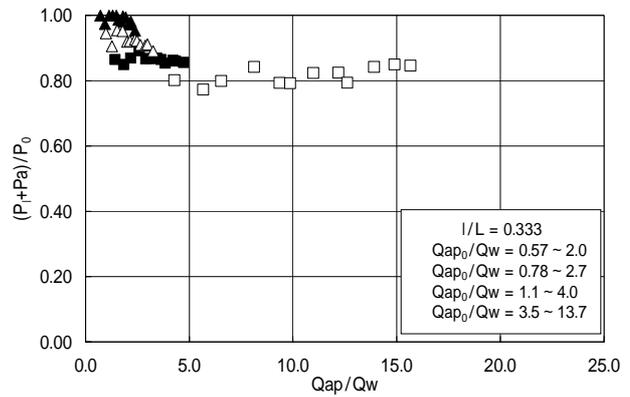


図-13(a) 流動距離と圧力割合

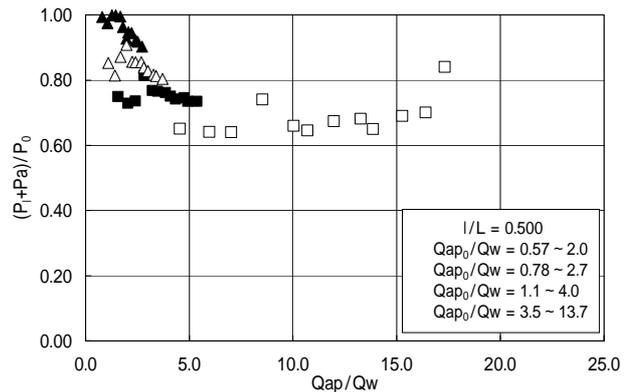


図-13(b) 流動距離と圧力割合

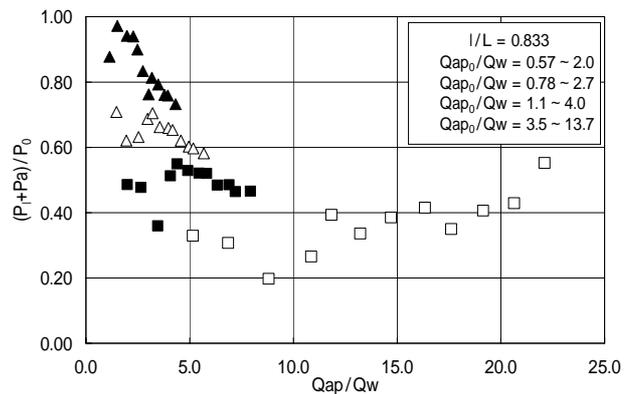


図-13(c) 流動距離と圧力割合

参考文献

- 1) 小川元, 遠藤茂勝: 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, pp77~82, 2003.
- 2) 小川元, 落合実, 北澤賢次, 遠藤茂勝: 気液スラグ流の流動特性と圧力損失, 土木学会水工学論文集, Vol. 48, 2004.
- 3) 鈴木理仁, 落合実, 遠藤茂勝: 混気圧送における液相スラグの生成流動に関する研究, 土木学会海洋開発論文集, Vol. 15, pp.421~426, 1999.
- 4) Dukler, A.E. and Hubbard, M.G., A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes, Ind. Eng. Chem., Fundum., Vol. 14, No. 4, pp337-346, 1975
- 5) 日本機械学会編: 気液二相流ハンドブック, コロナ社, pp260-268, 1989.

(2005.9.30 受付)