

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

山田泰正¹・落合 実²・遠藤茂勝³

海域や湖沼からの回収物の中でも、比較的含水比が高い海底汚泥などの微粒子と水の混合物や、海域に流出し粘度を増した重油や、淡水域で藻類が混じった高濃度の液体などは、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。これは輸送媒体と圧縮空気を同時に管路内に混入しスラグ流として輸送する。しかし、これまでの研究は工場内の限られた区間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。本研究では、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った。特に損失の主要な部分を占める管底部の液膜部をスラグ内部に取り込みスラグ流速に加速する際の加速損失を明らかにした。

1. はじめに

気液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。また、空気と輸送媒体の分離が容易であるほか、管路内での粘性摩擦の低減効果によって、低圧力で高速な輸送が可能などの利点があり、エマルジョン化した重油や、海洋や湖沼における浮遊物や底泥の輸送手段としても注目されている。

スラグ流は出口に近づくほど加速されるという特徴を持つ流れで、既往の研究として Taitel・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にされているが、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おうとするもので、損失の主要な部分を占めると考えられる管底部の液膜部の取り込みによる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結果をもとに検討を行った。

2. 実験概要

実験装置は図-1に示す管路全長 $L=600.0$ m、管径 $d=38$ mm の透明管路を用いた。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し空気流量計で検定され管内に供給される。また、液相は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、液相ともに管路内に同時に供給しスラグ流を発生させた。測定は管内圧力、スラグ流動速度、スラグ通過周期について行った。管内圧力は管上部に取りつけた圧力計によって計測されパソコンに収録される。

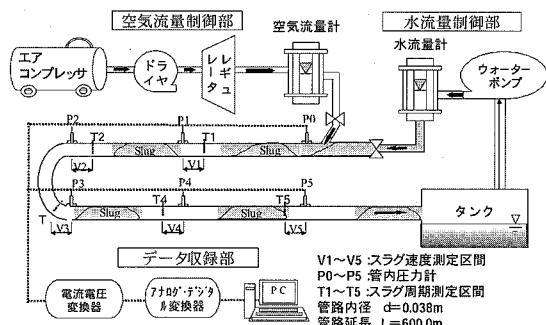


図-1 スラグ流実験装置

スラグ流速は、液相先端部の平均速度であり、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ある。速度および周期は図-2に示すようなLEDを用いた光透過量測定装置を考案し測定を行った。測定地点 l は管内圧力について6地点 $P_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ (それぞれ $l/L=0, 0.167, 0.333, 0.500, 0.667, 0.833$ に対応)、速度および周期については気液の混合地点 P_0 を除いた上記の5地点の上流において測定した。表-1は実験条件を示したもので実験条件としての気相フルード数 Fr_c 液相フルード数 Fr_L は以下のように求められる。

$$J_c = \frac{Q_a}{A}, J_L = \frac{Q_w}{A} \quad Fr_c = \frac{J_c}{\sqrt{gd}}, Fr_L = \frac{J_L}{\sqrt{gd}} \quad (1)$$

ここで、 Q_a は 0°C 、1気圧状態の気相流量、 Q_w は液相流量、 A は管路断面積、 J_c は気相容積流速、 J_L は液相容積流速である。表中の数値は気液流量比 Q_a/Q_w を示し、72通りの実験を行った。

3. 実験結果及び考察

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。まず、スラグ流速についての結果を示したものが図-3である。横軸に示した気液流量比 Q_a/Q_w はス

1 学生会員 修(工) 日本大学大学院生産工学研究科土木工学専攻
2 正会員 博(工) 日本大学生産工学部土木工学科
3 フェロー 工博 日本大学生産工学部土木工学科

ラグ流動による圧力低下に伴う気相の膨張を考慮した気相流量 Q_{ap} と液相流量 Q_w との比で示し縦軸にはスラグ流速 V_s の無次元量をとって示した。図には P_1 (白印) と P_5 (黒印) の2地点 (それぞれ $\ell/L=0.167$, 0.833) の結果を同時に示してある。この結果は液相流量を一定とし気相流量を変化させたものでスラグ発生地点に近い P_1 地点では液相流量が少ない $Fr_L=0.29$ (◇印) では気相の変化に対して膨張が著しくスラグ流速も増大しているが、液相流量が多い $Fr_L=1.06$ (△印) では気相の変化に対して膨張量が少なくスラグ流の速度があまり増加せず Fr_L の違いによる速度差が明確に示されている。しかし、 P_5 地点を通過するスラグ流の速度はいずれの条件でも増大するが、液相流量の多い▲印と液相流量の少ない◆印では気相の膨張割合が異なり、膨張量の多い後者のほうがスラグ流の速度はやや大きい、 Fr_L の差を考えると速度差は少ない。

距離に対する速度変動をまとめたものが図-4である。この結果は液相流量を一定としてスラグ流速を ℓ/L について示したものである。この結果から Q_a/Q_w が少ない $Q_a/Q_w=2.14$ ではスラグ速度は距離に対して緩やかな直線状に増加しているが、これに対し $Q_a/Q_w=8.56$ で気相流量が著しく多い場合ではスラグ流の速度は指数関数的に増加することが分かる。これは前者においてスラグ流の流れの駆動力となる気相の流量が少ないために流動過程においても気相の膨張割合が少なく、逆に後者では気相流量が多いために流動過程での膨張量が速度増に貢献したものと考えられる。このような気相の速度増加への効果は管路長の中間地点 $\ell/L=0.5$ 程度までは比較的少ないが、それ以降に顕著となる傾向が認められる。

このようにスラグ流の流動は気相の膨張による効果と考えられるので、流動中の管内圧力について次に検討を行う。図-5はスラグ流動中の管路内の圧力について示したものである。横軸には圧力低下による気相の膨張を考慮した気相流量と液相流量の比 Q_{ap}/Q_w を取り、縦軸には管内圧力の無次元量を取り、図-3と同様に P_1 と P_5 の2地点の結果を示した。白印のスラグ発生地点に近い P_1 ($\ell/L=0.167$) では液相流量の多い△印 ($Fr_L=1.06$) では気相流量の増大とともに管内圧力は増大する。しかし液相流量の少ない◇印 ($Fr_L=0.29$) では管内圧力は極端に増大しない。この傾向は出口付近まで維持される。

次に管内圧力の低下を距離による傾向として示したものが図-6である。横軸には距離 ℓ/L 、縦軸に圧力を取り、液相流量を一定にしたときの圧力を示したものである。全体の傾向として出口に向かって圧力は減少していくことが分かる。特に管路延長の中間地点までは管内圧力がほぼ直線的に減少するが、中間地点から先になると

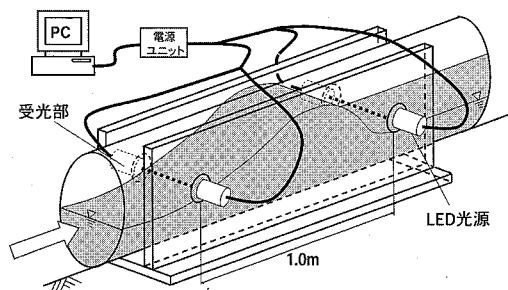


図-2 光透過量測定装置

表-1 実験条件

液相	気相	Fr_L					
		0.29	0.48	0.67	0.87	1.06	1.25
Fr_G	1.44	5.00	3.00	2.14	1.67	1.36	1.15
	1.93	6.67	4.00	2.86	2.22	1.82	1.54
	2.41	8.33	5.00	3.57	2.78	2.27	1.92
	2.89	10.00	6.00	4.29	3.33	2.73	2.31
	3.37	11.67	7.00	5.00	3.89	3.18	2.69
	3.85	13.33	8.00	5.71	4.44	3.64	3.08
	4.33	15.00	9.00	6.43	5.00	4.09	3.46
	4.82	16.67	10.00	7.14	5.56	4.55	3.85
	5.30	18.33	11.00	7.86	6.11	5.00	4.23
	5.78	20.00	12.00	8.57	6.67	5.45	4.62
	6.26	21.67	13.00	9.29	7.22	5.91	5.00
	6.74	23.33	14.00	10.00	7.78	6.36	5.38

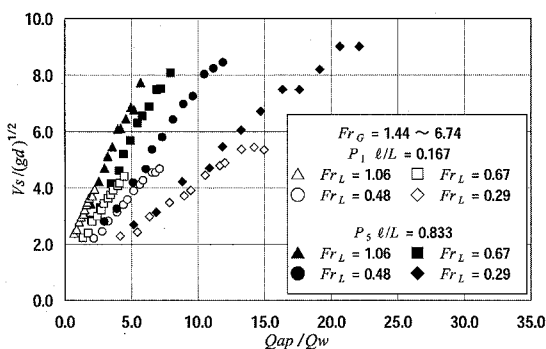


図-3 液相流量とスラグ流速

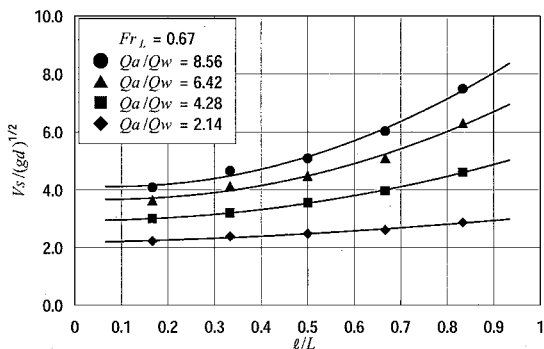


図-4 流動距離とスラグ流速

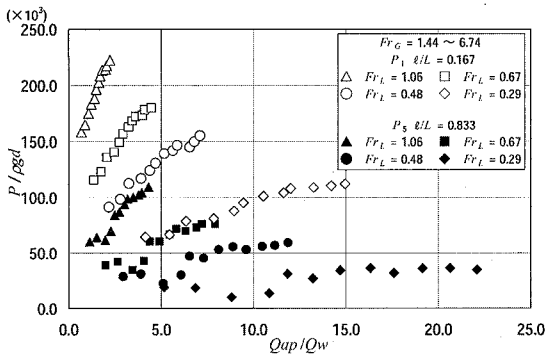


図-5 液相流量と管内圧力

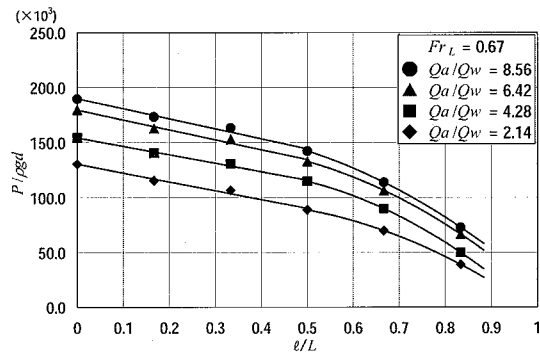


図-6 流動距離と管内圧力

出口の影響を受けて急激に減少する。そしてこの傾向は気相流量が多いほど顕著となることが認められる。

次に流動中のスラグ流速について気相の膨張との関係について検討する。スラグの流動に伴って気相の圧力が低下する反面、気相の膨張によって気相容積は増大する。この気相の容積の増大がスラグ流の速度に関係すると推測されるので、これを示したものが図-7である。横軸にはスラグ発生地点 P_0 における気液の合計容積流量と管断面積から算出される容積流速 $J_{T0} = (Qap + Qw)/A$ を、縦軸には各地点のスラグ流速 V_{sn} ($V_{s1} \sim V_{s5}$) をとり、地点ごとの結果をまとめて示したものである。これらの結果によれば、容積流速 J_{T0} とスラグ流速 V_{sn} の関係はほぼ直線的な傾向を示すが、その勾配は管路の出口に近くなるほど大きくなる傾向にある。このような関係は Dukler・Hubbard (1975) が示した式 (2) と同様な結果となった。

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

本実験結果では管路延長が長いために J_{T0} と V_{sn} の比である C_2 は出口に近くなるほど大きくなることが分かる。そこでこの C_2 について地点ごとの結果をまとめたのが図-8である。図に示されるように C_2 は流動距離によって増加することが分かる。Gregory ら (1969) は C_2

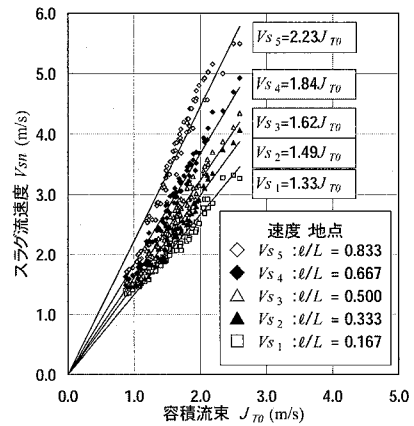
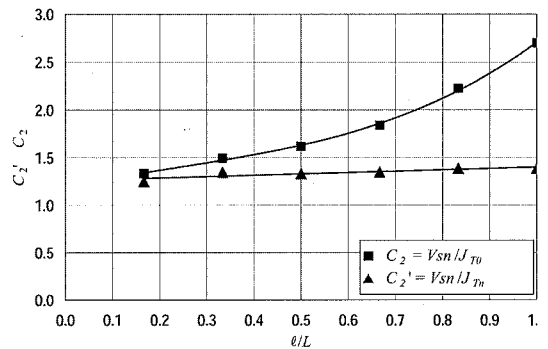


図-7 初期容積流速とスラグ流速

図-8 流動距離と C_2

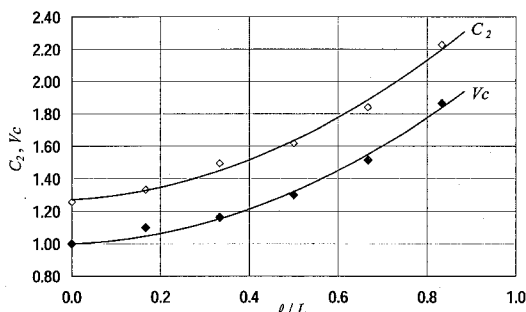
$= 1.35$ という値を示しているが、本実験の結果では地点によって異なった値となっている。つまり、スラグ流速は最大、容積流速の 2.7 倍までの流速になることがわかる。一方各地点の圧力を考慮して算出した容積流速 J_{Tn} とスラグ流速 V_{sn} との比である $C_2' (= V_{sn}/J_{Tn})$ は、管路の全区間についてほぼ一定値 ($C_2' = 1.3 \sim 1.4$) となり、気相の膨張の効果が速度に反映されていると考えられる。

そして、気相の膨張がスラグ流の速度に関係することを確認するために、スラグ流の発生地点に近い気液の合流地点における圧力を考慮した単位時間当たりの容積 V_{ap0} と各測定地点の圧力を考慮した単位時間当たりの容積 V_{apn} を算出し、それらの比である気相の膨張比 V_c

$$V_c = \frac{V_{apn}}{V_{ap0}} \quad (3)$$

についてまとめたものが図-9である。これらの結果によれば、流動に伴う気相の膨張比 V_c とスラグ流速の増加割合を示す C_2 の曲線は極めて近似した傾向を示している。このことは気相の膨張による気相の増加割合とスラグ流の速度増加割合がほぼ等しく、気相の膨張がスラグ流の速度増加に寄与していると考えられる。

次に実験結果とスラグ流モデルとの関連について検討

図-9 流動距離による C_2 と気相体積比

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、Dukler・Hubbard(1975)が提案したスラグ流モデルに基づき加速損失について推算し各種損失の評価を行った。

Dukler・Hubbard(1975)のスラグ流モデルは scooping model と呼ばれ図-10 に示すように、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するというモデルである。これより、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、圧力変化はないと考えられる。

加速損失に関わる液膜部の取り込み量 m は図-11 より液相スラグ先端部の移動速度 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。

$$m = \rho_L A R_{fe} (V_s - V_{fe}) \quad (4)$$

ここで、 ρ_L は液相の密度、 A は管路断面積、 V_{fe} は液膜部の速度、 R_{fe} は液膜部の割合を示し、次式で示される。

$$R_{fe} = \frac{A_{fe}}{A} \quad (5)$$

ここで、 A_{fe} は液膜部の断面積である。

液膜部の取り込みに伴う加速損失 ΔPa は図-11 に示すように、検査面 1, 2 における圧力を P_1, P_2 とすると、運動量の式から以下のように示すことができる。

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

ゆえに検査面の圧力差を ΔPa とすれば、

$$\Delta Pa = \frac{m}{A} (J_T - V_{fe}) \quad (6)$$

となる。ここで液膜部の流速 V_{fe} は明確には測定できなかったので観測により P_0 点での層状流における流速 (0.1 m/s) にスラグ流の流動時の速度増加割合を考慮した。また、この加速損失 ΔPa はスラグ 1 個についての損失であ

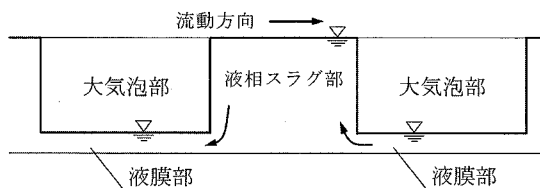


図-10 Dukler・Hubbard's scooping model

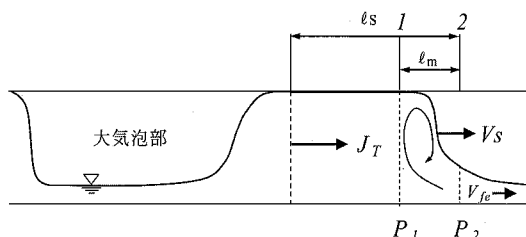


図-11 Dukler・Hubbard のスラグ流モデル

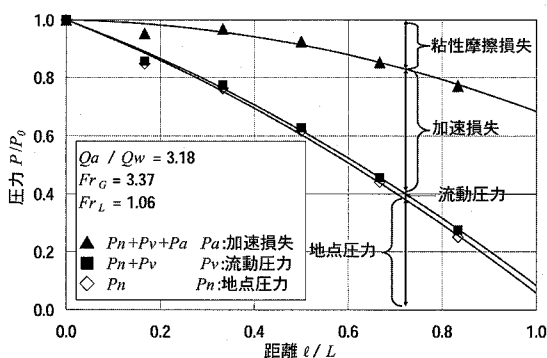


図-12 流動距離による各種損失

るので、スラグ個数を求め、区間の加速損失を ΔPa とした。

各区間の流動損失を検討するために、各地点の管内圧力、式 (6) で推算された圧力、粘性に伴う損失を考慮して各地点の圧力割合を推算した。各地点の圧力の結果を示したものが図-12 である。この図は l/L と各圧力の推算値の関係を示した。この結果から管内流動中における主要な損失は、加速損失であることが分かる。ここで示した加速損失は Dukler・Hubbard モデルに実験結果を適用して求めたもので、流動距離が増加することによる加速損失の増大が示されている。このように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。スラグ流動中の主要な圧力損失が液膜部の加速損失であることが明らかとなった。

このように加速損失が得られたので、気液条件による加速損失の傾向を検討するためにまとめたものが図-13 である。この図は横軸に Q_w/Q_a 、縦軸に $\Delta Pa/P_0$ を示し、各地点 l/L について示したものである。この結果から

Qw/Qa が増加すると比例的に Pa/P_0 も増加し、式 (7) のように示される。

$$\frac{Pa}{P_0} = K \frac{Qw}{Qa} + \alpha \quad (7)$$

ここで、 K は Pa の勾配を示し、 α は切片である。この結果より、 Qw/Qa がある値で直線の傾き K が変化していることがわかる。

このように加速損失が、ある流量比を境として損失の傾向が異なることが明らかとなった。この加速損失の変化が生じる境界は、気相フルード数によって異なる値をとるので、気相フルード数 Fr_G と流量比 Qw/Qa の関係についてまとめたものが図-14 である。図中の曲線 (1) (2) は図-13 より圧力が変化する境界の値を示す曲線である。この図から曲線 (1) より流量比が多い条件では、液相流量が多く液膜部が厚いため加速損失が大きくなる。また曲線 (2) より流量比が少ない条件では、液膜部が薄く液相が少いため加速損失が著しく低減する。この2つの曲線の間は過渡領域である。

図-13 の結果からわかるように、 Fr_G を一定とした場合、気液流量比 $Qw/Qa=0.17$ 程度までは加速損失は緩やかな増加を示すが、それ以上液相流量が増加すると各地点ともに加速損失は著しく増大する。この著しく増大する範囲内での液相の変化による加速損失の増加傾向についてまとめたものが図-15 である。この結果は図-14 で示される領域 I の条件ではそれぞれの地点ごとの加速損失の増加傾向を示す K の値は異なるが、同一地点ではそれぞれほぼ同じような K の値 (▲印) をとり図-13 に示した傾向が同じになる気相フルード数の範囲 ($2.4 < Fr_G < 4.33$) が存在することが分かる。逆にこれ以外の気相フルード数の領域では、それぞれの地点に対する加速損失の増加割合は条件により異なり $Fr_G > 4.8$ では領域 I の加速損失より増大し、また $Fr_G < 1.92$ では領域 I の加速損失より低くなる傾向にある。すなわち気相フルード数の範囲によってスラグ流動中の液膜部の加速損失は異なり3つの領域に分けられ、各種損失割合が異

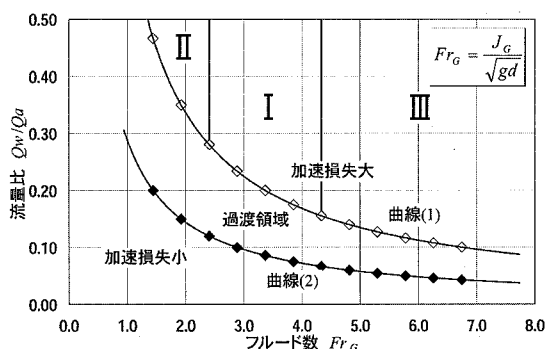


図-14 Fr_G と Qw/Qa による加速損失の変化

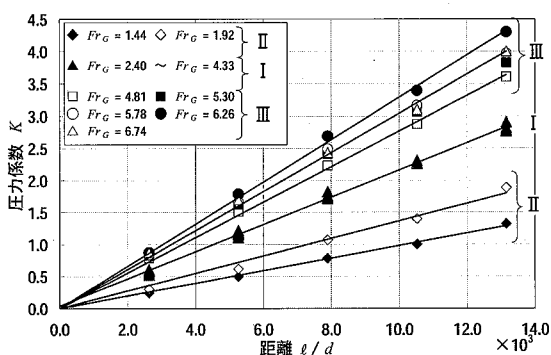


図-15 流動距離による圧力係数

なるものと推測される。

4. ま と め

本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 実験結果と運動量式から加速損失を推算した結果、圧力損失に占める加速損失の割合は大きく逆に粘性摩擦損失は少ないことが推測された。
- 2) 加速損失は気液流量比がある値よりも小さい範囲では、加速される液相流量が少ないために加速損失が著しく低減する領域が存在することが分かった。
- 3) 主要な損失である加速損失は管路全区間でほぼ一様となる条件と、増大する条件、減少する条件が存在することが明らかとなった。

参 考 文 献

- 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.
- Dukler, A. E., and M. G. Hubbard, (1975): A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes, Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol.14, No.4, pp. 337-347.
- Gregory, G. A., and D.S.Scott, (1969): Correlation of Liquid Slug Velocity and Frequency in Horizontal Concurrent Gas-Liquid Slug Flow, AIChE J., Vol.15, No.6, pp. 933-935.
- Taitel, Y., and D.Barnea, (1998): Effect of Gas Compressibility on a Slug Tracking Model, Chem. Eng. Sci., Vol.53, pp. 2089-2097.

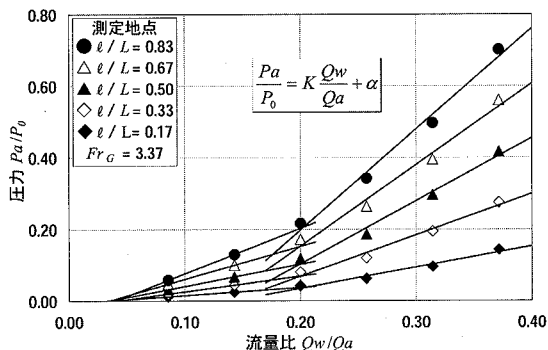


図-13 流量比と加速損失