

気液二相流における管内圧力低下に伴う スラグ流動について

STUDY ON SLUG FLOW WITH A PRESSURE DROP IN THE AIR-LIQUID TWO PHASE PIPE FLOW

山田泰正¹・濱田龍寿²・小川元³・落合実⁴・遠藤茂勝⁵

Yasumasa YAMADA, Tatsuhisa HAMADA, 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非会員 農修 佐伯建設工業㈱ 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 佐伯建設工業㈱ 建設本部技術部 (〒101-8632 東京都千代田区東神田1-7-8)

⁴正会員 工修 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)

⁵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 oil or high viscosity solution by using compressed air. 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. 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.

Key Words: Air-liquid two-phase flow, slugging, horizontal pipe, pressure drop, slug velocity

1. はじめに

清水に油やエマルジョン化しつつある重油などの高粘度流体や泥土、土砂のような粒状の固体を含む混合流体の輸送には圧縮空気を用いることによって輸送可能となる。通常これらは圧縮空気である気相と輸送される媒体である液相を管路内に同時に供給することによりスラグ流が発生し流動する。媒体の粘度が高いにもかかわらず小径の気液流において約5m/s、径600mm程度の固気液流においては約10m/sという速い速度を持って流動しており、流動過程において気相の圧縮性が著しく寄与しているものと考えられる。しかし、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大きくなることが明らかとなった¹⁾。スラグ流速の増加は気相の膨張による効果によるものであるが²⁾、長

い管路に対する研究が少ないために気相の効果については明らかになっていない。本研究においてはこれらの特性を明らかにするために清水、高粘度流体や泥土など物性の異なるスラグ流の実験を行い気相の膨張に伴う速度増加について検討を行った。

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や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、管路全長を600.0mについても検討を行うこととした。

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。液相には清水および粘性流体を用いた。粘性流体は高分子電解質CMCを水に溶解させたものを使用し、密度は清水と同じであるが、粘度は清水の300倍となっている。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、スラグ流速度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を行った。測定地点は管内圧力については0m～500m地点の6地点、速度および周期については100m～500m地点の5地点において行った。実験条件としての気相流量(Q_a)および液相流量(Q_w, Q_c)は表-1に示すとおりであり、清水については72条件、CMC溶液については19条件とした。

3. 実験結果および考察

(1) スラグ流速と管内圧力

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。気液流量とスラグ流速の関係を示したものが図-2である。横軸に液相流量 Q_w 、縦軸にスラグ流速 V_s をとり気相流量 Q_a をパラメータとし100m地点の結果を示したものである。図より、液相流量を増加させるとスラグ速度は気相流量が少ない場合においてはあまり変化しないが、気相流量が多い場合においてはスラグ流速度が減少傾向を示す。これは液相流量が多いとスラグ周期が短くなるためにスラグの個数が多くなるためであると考えられる。

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。これは横軸に測定地点 L 、縦軸にスラグ流速 V_s をとり流動距離によるスラグ流速の変化を調べたものである。図より気液流量比の違う条件を示しているがすべての条件においてスラグ流速度は増加することがわかる。気液二相流は気液流量比によって流動状態が変化し、スラグ発生地点において液相を押し

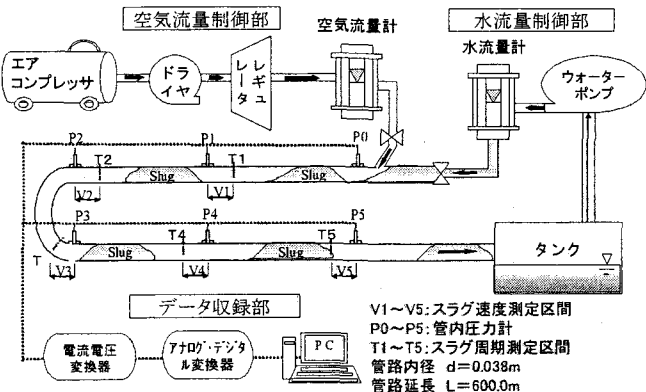


図-1 実験装置概略図

表-1 実験条件一覧表

清水						CMC溶液	
Q_a (NL/min)	Q_w (L/min)	Q_a (NL/min)	Q_w (L/min)	Q_a (NL/min)	Q_w (L/min)	Q_a (NL/min)	Q_c (L/min)
60.0	12.0	140.0	12.0	220.0	12.0	60.0	4.0
	20.0		20.0		20.0		8.0
	28.0		28.0		28.0		10.0
	36.0		36.0		36.0	80.0	12.0
	44.0		44.0		44.0		4.0
	52.0		52.0		52.0		8.0
80.0	12.0	160.0	12.0	240.0	12.0	100.0	12.0
	20.0		20.0		20.0		4.0
	28.0		28.0		28.0		8.0
	36.0		36.0		36.0	120.0	12.0
	44.0		44.0		44.0		4.0
	52.0		52.0		52.0		8.0
100.0	12.0	180.0	12.0	260.0	12.0	140.0	12.0
	20.0		20.0		20.0		16.0
	28.0		28.0		28.0		20.0
	36.0		36.0		36.0		4.0
	44.0		44.0		44.0		8.0
	52.0		52.0		52.0		12.0
120.0	12.0	200.0	12.0	280.0	12.0		16.0
	20.0		20.0		20.0		
	28.0		28.0		28.0		
	36.0		36.0		36.0		
	44.0		44.0		44.0		
	52.0		52.0		52.0		

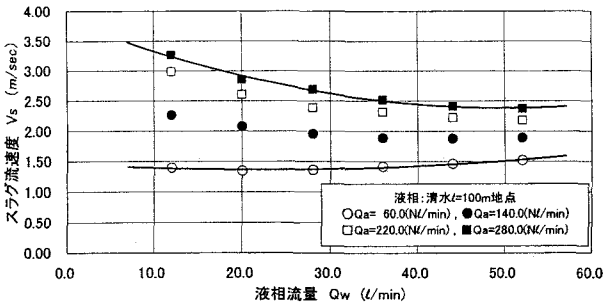


図-2 液相流量とスラグ流速

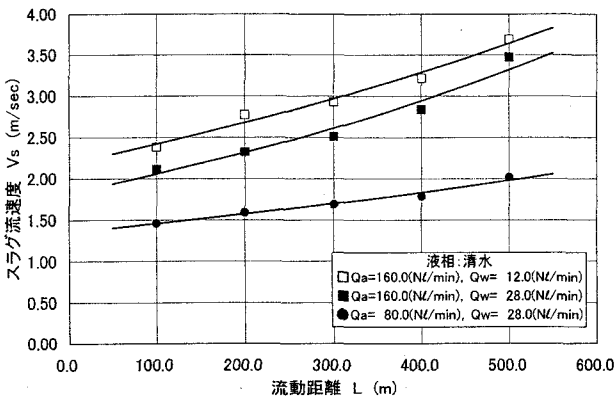


図-3 流動距離とスラグ流速

ている圧縮空気は流動距離が進むと徐々に膨張するので流動距離が進むと速度が増加するものと考えられる。またこの加速特性は全長の短い管路においては見ることはできず、管路長を長くすると速度増加が著しくなる¹⁾。

スラグ流速は気相の圧縮性に起因す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であり図-2と気液流量条件を対応してある。この図は横軸に液相流量 Q_w 、縦軸に管内圧力 P をとり気相流量 Q_a をパラメータとし100m地点の結果について示したものである。この結果から気相流量、液相流量ともに増加させると基本的には管内圧力は増大するが、特に液相流量を増加させると液相の抵抗が増えるので管内圧力の増加の割合は気相流量による割合よりも大きいことがわかる。

次に流動距離に対しての管内圧力について横軸に流動距離 L 、縦軸に管内圧力 P 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、気相が圧縮されたまま流動している。また、管路出口は大気開放となっているので距離が進むと徐々に膨張し大気圧に近づくため圧力が直線的に低下することがわかる。

(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起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_T 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_T とスラグ流速 V_s 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 V_{sn} をとって示したものである。この結果から容積流束 J_{T0} とスラグ流速 V_{sn} 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ることがわかる。そこで、この直線の傾きで容積流束 J_{T0} とスラグ流速 V_{sn} との比である C_2 について清水とCMC溶液について示したものが図-7である。このように地点が進むと C_2 は増加し、CMC溶液は清水よりも値が大きくなる。これらの結果から、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ことが考えられる。

このことから、気相の膨張を考慮した各地点における容積流束 J_{Tn} とスラグ流速 V_{sn} の関係を示したものが図-8である。図より、すべての気液の条件においてどの地

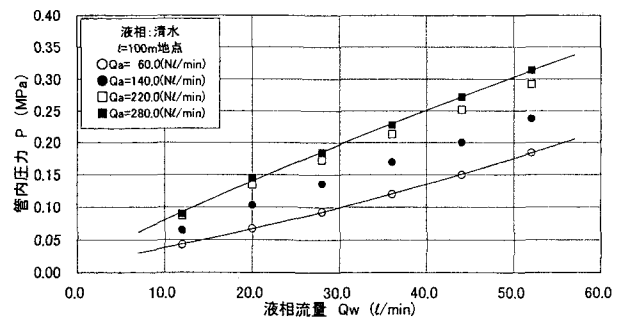


図-4 液相流量と管内圧力

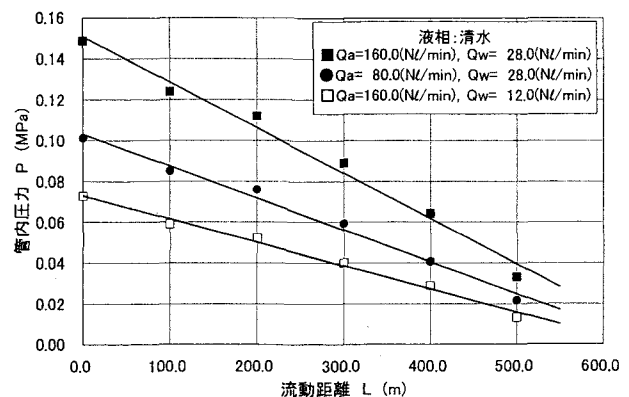


図-5 流動距離と管内圧力

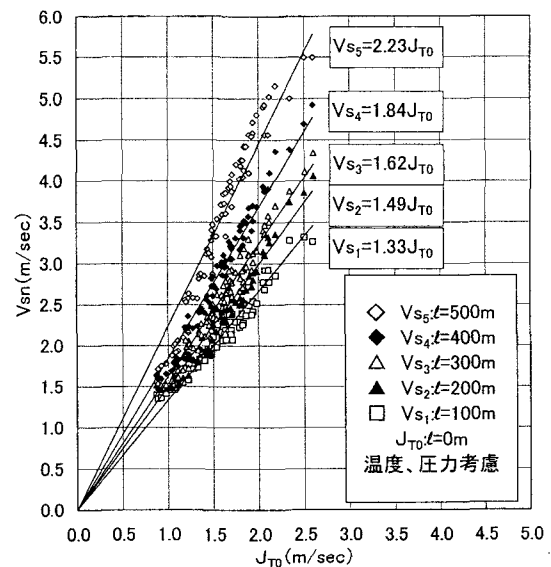


図-6 初期容積流束とスラグ流速

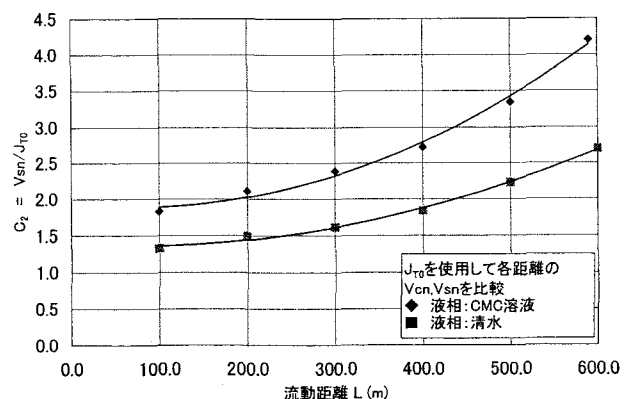


図-7 流動距離と C_2

点においてもある一定値となり気相の膨張が速度増加に寄与していることが明らかとなった。また、CMC溶液は粘性の影響により C_2 の値が清水と比べ高くなっている。これは粘性が大きいため流動初期の圧力が大きいため気相の膨張の効果が大きいための考えられる。

(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。そこで、各地点の管内圧力と液相が加速に必要な圧力を推算し、横軸に測定地点 L 、縦軸に管内圧力 P_0 と各地点の圧力の合計の比をとって示したものが図-9である。図中の P_n は各地点の管内圧力、 P_n+P_v は各地点における管内圧力と液相が流動させるための圧力を合計したものである。こ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がスラグに取り込まれて加速されるために損失が大きいと考えられるのでHubbardが提案したスラグ流モデル⁴⁾⁵⁾に基づき加速損失について検討を行った、

Hubbardのスラグ流モデルはscooping modelと呼ばれ、図-10のような、液相スラグ先端から液相スラグより流速の小さい液膜部の液体を取り込み、スラグ後端から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を提案した。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。大気泡部においてほとんど損失がないため圧力は一定と考え、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-11のようになる。

図中における u_s は液相スラグ部の流速であるので容積流束 J_T と等しく、スラグ先端の移動速度 u_t とは異なる。また、スラグ先端の移動速度 u_t はスラグ先端から流入する液体の量によって u_s よりも大きくなるため次式によって表される。

$$u_t = u_s + \frac{m}{\rho_L (1 - \alpha_s) A} \tag{1}$$

右辺第2項はスラグ先端からの流入による速度増加分である。また、式(1)は容積流束 J_T を用いて表すと式(2)のようになる。

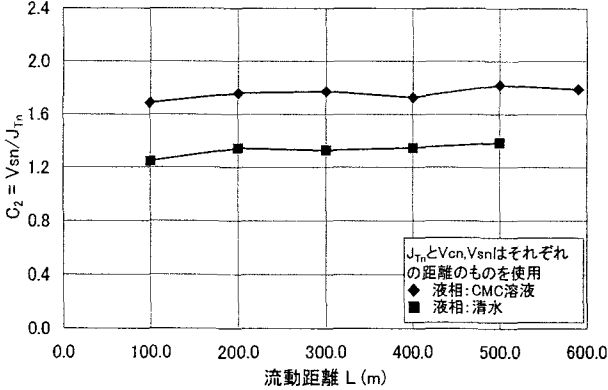


図-8 流動距離と C_2

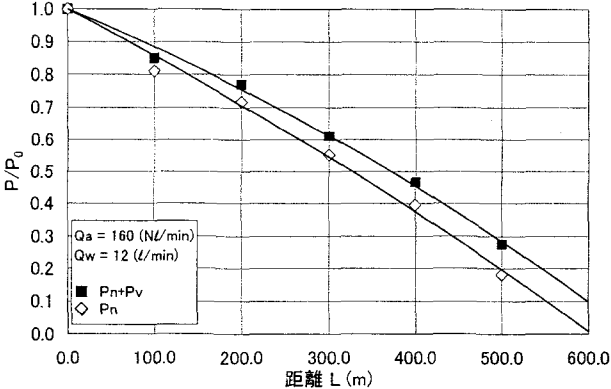


図-9 流動距離と圧力割合

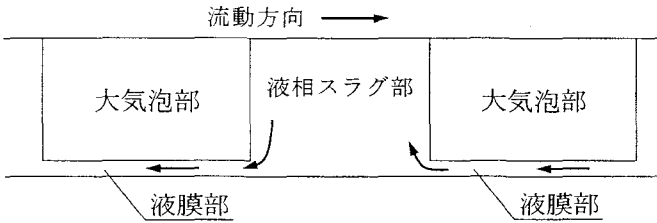


図-10 Hubbard's scooping model

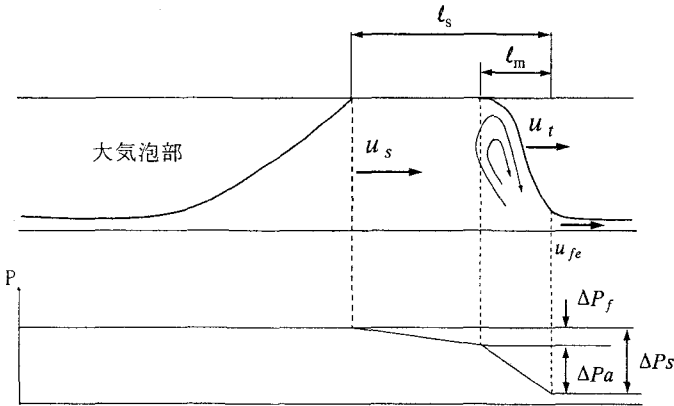


図-11 スラグ内における圧力分布図

$$u_t = (1 + C') J_T \tag{2}$$

ただし、 C' は次のように示される。

$$C' = \frac{m}{\rho_L (1 - \alpha_s) A J_T} \quad (3)$$

式(2)はHughmarkが提唱した⁶⁾水平管路においてスラグ流速 V_s と容積流束 J_T の関係を示した次式と等値である。

$$V_s = C_2 J_T \quad (4)$$

式(2)～(4)より液膜部の液体がスラグ先端からスラグ内に流入する質量 m は以下のように表すことができ、 C_2 はスラグ流速 V_s と容積流束 J_T との比から求まることのできる。

$$m = (C_2 - 1) \rho_L (1 - \alpha_s) A \cdot J_T \quad (5)$$

図-11から液相スラグ部の全圧力損失は次式(6)となる。

$$\Delta P_s = \Delta P_a + \Delta P_f \quad (6)$$

ここで、 ΔP_s : 液相スラグ部における全損失

ΔP_a : スラグ先端部の加速損失

ΔP_f : 液相スラグ部の摩擦損失

スラグ先端部の加速損失は、液膜部の流速 u_{fe} は液相スラグ部 u_s に加速するために生じるので運動量から算出すると次式(7)となる。

$$\Delta P_a = \frac{m}{A} (u_s - u_{fe}) \quad (7)$$

ここで、 m : 液膜部の液体がスラグ先端からスラグ内に単位時間流入する質量

u_s : 液相スラグ部の流速

u_{fe} : 液膜部の流速

式(5)、(7)より加速損失 ΔP_a が求めることができる。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 u_{fe} を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ので、推算したスラグ個数より、100m区間の加速損失を求めた。

この加速損失を圧力損失として評価し、横軸に流動距離、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ための圧力損失 P_v および加速損失 P_a の合計を地点ごとに示したものが図-12(a)、(b)、(c)、(d)である。また、図-12(a)と(b)は気相流量 $Q_a=60$ (NL/min)の場合、図-12(c)と(d)は気相流量 $Q_a=160$ (NL/min)の場合についてであり液相流量はそれぞれ $Q_w=36, 44$ (L/min)の結果を示した。図中の P_n 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で P_a は各地点までの液膜部の加速損失である。この結果からすべての条件において流動距離が進むと加速損失が増えていき出口付近においては加速損失が全損失の約70～90%以上となっ

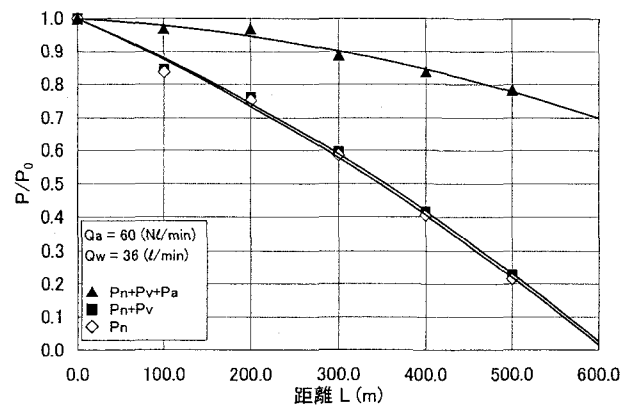


図-12(a) 流動距離と圧力割合

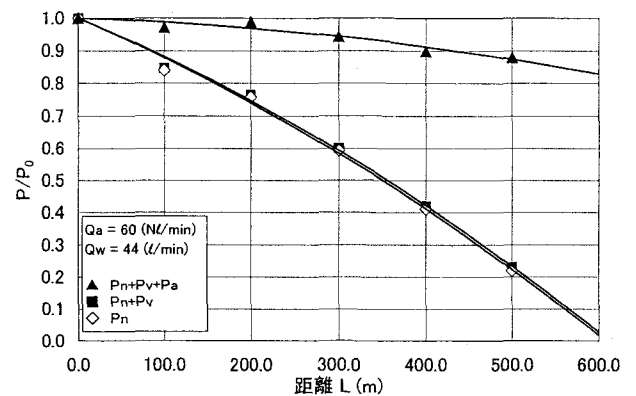


図-12(b) 流動距離と圧力割合

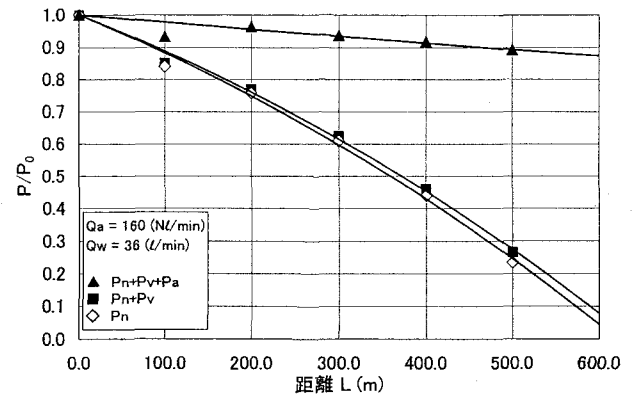


図-12(c) 流動距離と圧力割合

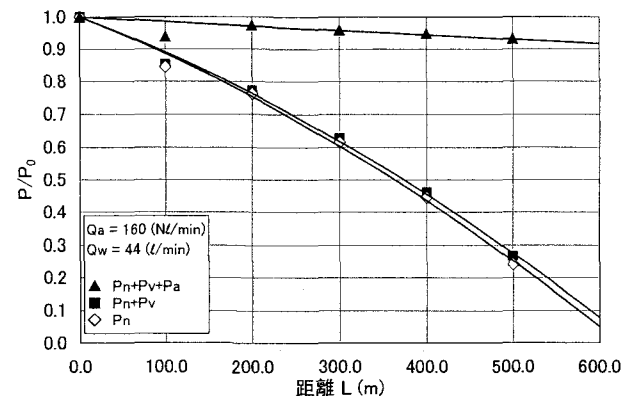


図-12(d) 流動距離と圧力割合

ている。そして、気相流量および液相流量を増加させると、全損失に対する加速損失の占める割合は大きくなり粘性摩擦損失は全体としては極めて少ないことがわかる。このことにより、圧力低下によるエネルギーの70%以上はスラグ液膜部における液相の加速によって消費される。気相を増加させるとスラグ流速が増加し同時にスラグ先端部の速度が大きくなるため加速損失が大きくなる。また液相を増加させると周期が短くなるため⁷⁾にスラグの個数が増えるため管内における加速損失が増大すると考えられる。

(4) 高粘性溶液による加速損失

物性の異なる液相の場合では、流動特性にどのような違いがあるかについて前述の加速損失を用いて検討を行ったものが図-13(a), (b)である。これは気相流量 $Q_a=60$ (NL/min) と $Q_a=120$ (NL/min) の場合について示したもので、液相流量は $Q_c=12$ (L/min) とした。横軸に流動距離 L 、縦軸に各地点の圧力損失の合計について示したものである。この結果から、気相流量を増加させると加速損失は増加し、液相の物性が変わっても基本的な傾向は同様であるが、液相が清水の場合と比べて加速損失の占める割合は小さく、出口付近においても全損失の20~40%程度となっていて、高粘性溶液は清水と比べて粘度が極めて大きいので摩擦損失が大きいのに流動初期の圧力が高い。このため流動の初期速度は遅いが徐々に加速され出口付近のスラグ速度は清水よりも高くなっている⁸⁾が、これはCMC溶液の特性で粘性による壁面での抵抗が大きいのに壁面から少し離れた部分で境界層が発達しそこでのせん断応力から減少するためと考えられる。

4. まとめ

本研究によって得られた結果をまとめると以下のよう
に要約される

- (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) 各地点の容積流束とスラグ流速はある一定の関係となりスラグ流速は容積流束より大きくなる。
- (3) Hubbardモデルによる液膜部の取り込みとその加速損失が圧力損失の大部分を占めることが明らかとなり、スラグ流の速度が速いのは気相の圧力が得気相の加速のために大部分が消費されむしろ粘性摩擦損失が少ないことによるものと考えられる。

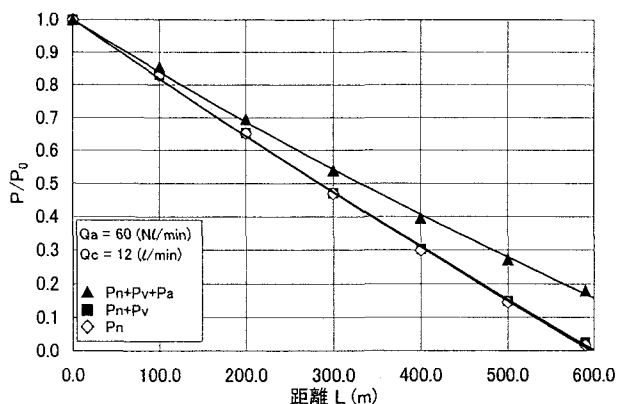


図-13(a) 流動距離と圧力割合 (CMC溶液)

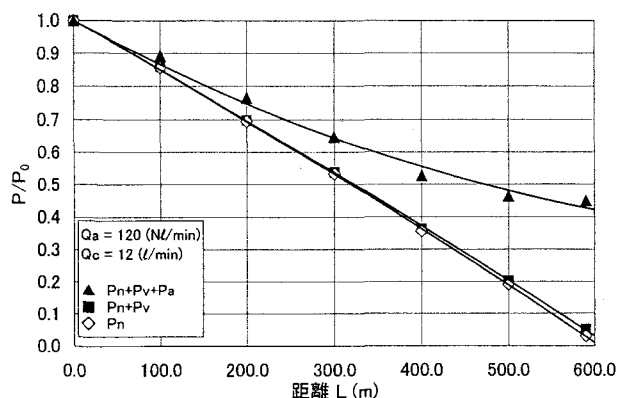


図-13(b) 流動距離と圧力割合 (CMC溶液)

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) Hubbard, M. G. and Dukler, A. E., paper presented at the ASME National Meeting, Tampa, Fla. 1968.
- 5) 日本機化学会編: 気液二相流ハンドブック, コロナ社, pp260-268, 1989.
- 6) Hughmark, G. A., Holdup and Heat Transfer in Horizontal Slug Gas-Liquid Flow, Chem. Engng. Sci., 20-12, pp1007-1010, 1965.
- 7) 幕内, 山田, 小川, 落合, 北澤, 遠藤: 気液スラグ流の発生メカニズムと流動周期特性について, 土木学会海洋開発論文集, Vol. 20, pp905~910, 2004.
- 8) 小川元, 落合実, 北澤賢次, 遠藤茂勝: 高粘性溶液を用いたスラグ流の特性について, 土木学会海洋開発論文集, Vol. 19, pp725~730, 2003.