

長距離気液スラグ流の管内流速と 流動分布について

STUDY ON FLOW VELOCITY AND FLOW DISTRIBUTION OF GAS-LIQUID SLUG FLOW IN LONG PIPE

山田泰正¹・遠藤茂勝²・落合実³

Yasumasa YAMADA, Shigekatsu ENDO and Minoru OCHIAI

¹ 正会員 博(工) 日本大学工学部 学術フロンティア PD 研究員
(〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

² 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)

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

The large amounts of nitrogen, phosphorus, etc. to be exhausted are causing the eutrophication problem, and it is recognized as a social issue. Moreover, on the bottom of the water stream there is eutrophicated, high density accumulation mud. They cause the abnormal occurrence of algae. Although those substances were transported together with large volumes of water or seawater, the separation of the gas-liquid after the transportation was not easy. Due to the return to the sea of the water which was transportation medium, the micro soil particle contained in that water were diffused in that water area, then this kinds of the method was prohibited in concern with the pollution of the fishery. Then, it is the compressed air transportation to attract much attention. This method has the advantage to be able to transport at high speed by the intermittent flow; "slug flow", by supplying into the conduit the compressed air and the transportation medium simultaneously. This is the hydraulics study to analyze the phenomena of flowing characteristic and the process of "slug flow", as a basic research of the technological application of the slug flow.

Key Words : Gas-Liquid two phase flow, Slug flow, Long distance transportation, Slug velocity, Superficial velocity

1. はじめに

都市化による人口集中や生活向上によって河川や沿岸に排出されている生活排水が増え、飲料水や工業用水を確保するための貯水池など淡水域においては、窒素やリン等の富栄養化により藍藻類が大発生し、アオコと呼ばれる現象が起きている。

高濃度に藻類が混じった溶液は流動性が悪いため、回収後の輸送方法としては管路に藻類が混じった溶液のみを輸送するのではなく、圧縮空気を用いた管路輸送が試みられている。この輸送は圧縮空気と輸送物を同時に管路内に供給することでスラグ流を発生させ、長距離での高速輸送が可能となる。群体藻類の輸送では、管路内で気液スラグ流によって発生する高速攪拌乱流を用いて、アオコの結合群体の崩壊を促進させるとともに、管路内の圧力変動を伴う脈流によって細胞の破壊なども期待できる。またこの方法は外来生物種の混入が問題となっているタンカーのバラスト水処理において、オゾンガスを混入しスラグ流を発生させて循環させる高圧殺菌処理法への応用などがある。

一方、船舶の航路確保や水深維持、赤潮や青潮の

発生原因となっている底質除去のために港湾、河川や湖沼などにも圧縮空気による軟泥輸送システムの導入が図られて、経済性の評価のための輸送手段の確立が求められている。

これらの輸送における管路内の流動とな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で、原子力プラント内冷却水の蒸気流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応用されている現象である。また、圧縮空気を用いた輸送において、気液スラグ流は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となるなどの利点がある。

このように、気相と含水比の高い輸送媒体である液相を同時に管路内に供給することによって発生するスラグ流の応用は、環境問題の解決のほかに次世代エネルギーとして海底下に存在しているメタンハイドレートの回収にも、メタンガスと液体の混入によりスラグ流としての回収が予測されていて、新たな技術として期待が高まっている。

これらの輸送を実現するためには長距離管路気液スラグ流の現象の把握が必要であるが、これまでの

研究は管路の長さ及び管路径が比較的小さい小口径短距離のものが多く、数 100m～数 km を想定したものがかなり少ない。このような背景から本研究においては、長距離管路における気液スラグ流を工学的な分野への応用のため、流動特性や流動過程での現象解析を目的とし、水理学的な流動の検討を行った。

2. 実験概要

スラグ流は液相が清水の場合、気液の供給合流地点で分離した気相と液相の流れが、水深の増加や孤立波の成長により、気相の通過面積が狭まることによる一瞬の吹き飛ばしの現象によって発生する流れである。そして液相流量の変化によりスラグの発生するタイミングが変化し、気相流量の変化により吹き飛ばし後の流動速度に変化が生じることが明らかとなっている¹⁾。また、管路長が長くなることでスラグ個数が増え、気相の圧縮性が圧力増加やスラグ流速の増加に寄与する。管路長が $L=100\text{m}$ や 150m ($d=38\text{mm}$) 程度になると気相の圧縮性がスラグ流動に影響することが既往の研究において述べられているので¹⁾、この気相圧縮性が影響しない管路を短距離管路、気相の圧縮性が影響する管路を長距離管路と定義し、気相効果による流動の違いを明らかにする必要がある。本研究では、気相の圧縮性の効果が見られる長距離管路 $L=150(\text{m})$ とその $1/2$ 倍、 2 倍、 3 倍、 4 倍の長さの管路を用いた実験を行った。また、気液スラグ流の基礎的な研究と位置づけているため、気液スラグ流の流動を支配している要素を把握することや、これらの要素の関係を明らかにすること、また粘度を高くすると流動が複雑化することが明らかとなっているので、粘度の影響が小さい清水を用いた実験を行い検討した。

実験設備は図-1 に示すような管径 $d=38\text{mm}$ の透明管路を用いて、長楕円状にパイプを設置した。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た後レギュレータ、空気流量計を通して管路へ、また液相である輸送媒体はタンクから流量計を通して管路へそれぞれ供給し、同時にかつ連続的に供給した。

本実験における液相前面の移動速度をスラグ流速速度としているが、液相の速度が速いので、LED を用いた光透過量測定装置を考案して測定した。この装置は図-2 に示したもので側面に LED と受光部を 1m の間隔で 2 箇所に取り付けたものである。LED および受光部は管の中央の高さとなるように配置し、管の底部に滞留する液膜部より常に高い位置としている。

また液相は濃紺色に着色しているので、液相と気相の光透過量は著しく変化するので、液相気相の判

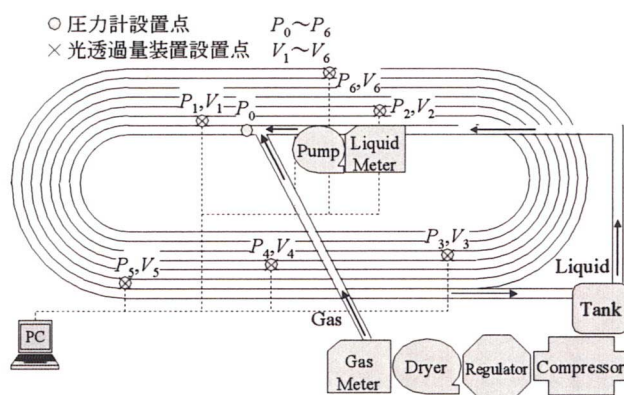


図-1 実験概要図

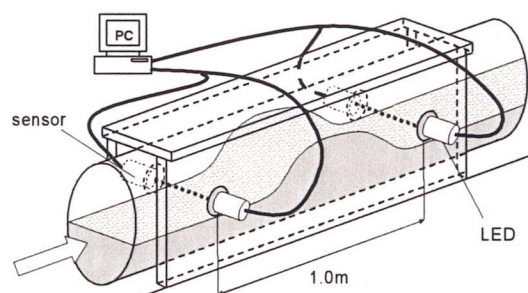


図-2 光透過量測定装置

表-1 気液流量実験条件

Fr_G / Fr_L		Fr_L					
		0.29	0.48	0.67	0.87	1.06	1.25
Fr_G	0.96	3.32	1.99	1.42	1.11	0.91	0.77
	1.44	4.98	2.99	2.14	1.66	1.36	1.15
	2.41	8.34	5.00	3.57	2.78	2.27	1.92
	3.37	11.66	7.00	5.00	3.89	3.18	2.69
	4.33	14.98	8.99	6.42	4.99	4.09	3.46

別が容易にできる。この結果から気相および液相の通過時間及び長さが測定できる。本実験においては、この装置を用いてスラグ流速、液相の間隔であるスラグ通過周期、液相長、気相長をサンプリング周波数 2kHz にて測定した。

実験条件は表-1 に示した条件で、気液の流量比で示してある。表中の気相フルード数 Fr_G 、液相フルード数 Fr_L は、気相流量 Q_a 、液相流量 Q_w から算出した。

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

ここで、

Q_a : 気相流量(m^3/s) Q_w : 液相流量(m^3/s)
 J_G : 気相容積流束(m/s) J_L : 液相容積流束(m/s)
 A : 管路断面積(m^2) d : 管路径(m)
 g : 重力加速度(m/s^2)

また、表-2 は管路長と計測点を示したもので、管路長 L と管径 d の比 L/d 、および各測定点 θ と管路長

L の比 θ/L で示したものである。測点は図-1、表-2 中に示す地点である。光透過量測定装置による測定は $V_1 \sim V_6$ の各 6 地点、また圧力の測定は $P_0 \sim P_6$ の各 7 地点において測定した。

3. 実験結果及び考察

(1) 管路内圧力について

長距離管路における気液スラグ流の管路内圧力特性について、実験から得られた結果をもとに短距離管路との違いについて検討する。

気液スラグ流の流動は気相の圧縮・膨張が関与するので、このことについて検討を行った。図-3 はスラグ流動中における管路内の圧力について示したもので、横軸に流動距離の無次元量 θ/L 、縦軸に管路内圧力 P をとり、気液の条件を $Fr_G=3.37$, $Fr_L=0.48$ 、管路長 L/d をパラメータと示した。この結果から、すべての条件において管路内圧力は吐出口に向かって減少し、また管路長が長くなると入口における初期圧力が大きくなる。スラグ流の流れの駆動力である気相は吐出口に近づくほど徐々に膨張するため圧力が低下し、液相が加速するものと考えられる。また管路長が長くなるとスラグの個数も増え、液相による粘性等による抵抗も増えるため初期圧力が高くなる。

本実験では、吐出口である管路端部は大気圧となるので、気液流量が一定であるとき管路長が変化した場合、吐出口からの距離が同じであれば吐出口からのスラグ個数が一定、つまり管路内圧力が同じであることが考えられる。このことについて検討を行った。横軸に吐出口からの距離 L_{exit} と管径 d との無次元量 L_{exit}/d 、縦軸に圧力 P をとって示したものが図-4 である。この結果から吐出口からの距離が同じであればどの管路長に関わらず、同じ圧力になることが分かった。つまり、気液流量が同一であれば吐出口からのスラグの個数が、同じと推定されるので、圧力値が等しくなるものと考えられる。

また、この気液流量以外の条件について縦軸を管路内圧力 P と大気圧 P_{air} の無次元量 P/P_{air} として、同じ関係を示したものを図-5 に示す。この結果より、気液流量によって一定の傾向を示し、この曲線を延長すれば、圧力が予測可能となった。

(2) スラグ流速について

長距離管路における気液スラグ流の速度特性について、圧力と同様に短距離管路との違いについて検討する。

管路長や気相、液相流量の変化によるスラグ流動への影響など、長距離スラグ流のスラグ流速特性について実験結果を用いて検討する。管路長 L/d に

表-2 管路長および測定点

L (m)	L/d	θ/L						
		P_0	P_1, V_1	P_2, V_2	P_3, V_3	P_4, V_4	P_5, V_5	P_6, V_6
70.0	1842	0.000	0.143	0.286	0.429	0.571	0.714	0.857
150.0	3947	0.000	0.133	0.333	0.533	0.667	0.800	0.933
310.0	8158	0.000	0.161	0.323	0.484	0.645	0.806	0.968
460.0	12105	0.000	0.109	0.217	0.435	0.543	0.761	0.978
620.0	16316	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

L : 管路長, d : 管径, P : 圧力, V : 速度, θ : 地点

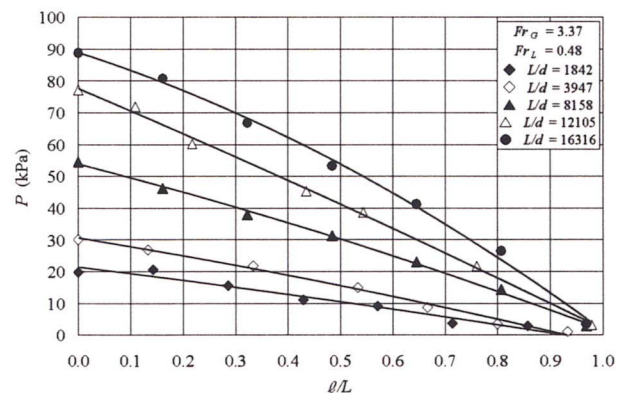


図-3 流動距離に対する管路内圧力

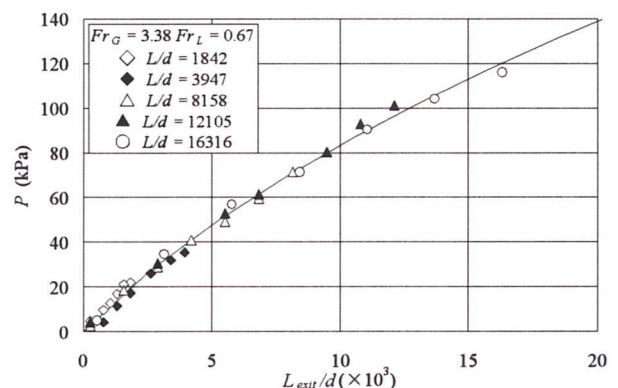


図-4 吐出口からの距離と管路内圧力

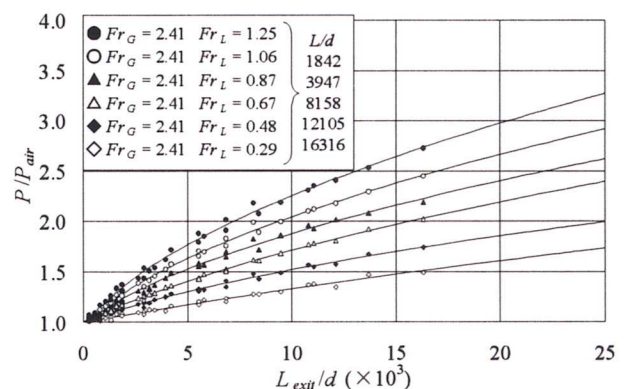


図-5 吐出口からの距離と管路内圧力

よる流動距離 θ/L に対するスラグ流速について $Fr_G=3.37$, $Fr_L=0.67$ を図-6 に示した。

このようにどの管路長の条件においても管路出口 ($\theta/L=1.0$) に近づくほどスラグ流速は増加し、また管路長が長くなるほど速度の増加率が増えることが分かる。本実験において最も管路長が短い管路は $L/d=1842$ でもスラグ流速の増加が認められる。また、管路長が長い $L/d=16316$ では管路長が短い $L/d=1842$ と比べ初速度は遅いが、吐出口においては両者の速度がほぼ一致することが分かる。したがって管路長を長くすると、初速度が遅くなるため速度の増加量が顕著になるものと考えられる。

スラグ流の発生駆動力となる気相は、スラグが発生する時までには一様に流れるが、スラグ発生時には液相が抵抗となって気相を圧縮した状態で流動する。したがって、管路長が長くなるほどスラグ個数の増加により液相の抵抗が増えて圧力が増加し、入口付近においての速度が小さくなり、吐出口に近づくにつれて気相が徐々に膨張し、速度増加が著しく増加するものと考えられる。

(3) 容積流束とスラグ流速

長距離管路における気液スラグ流動は、管路内の圧力が下流に向かって低下し、気相の膨張によって気相容積が増大する。このことはスラグ流の圧力特性や速度特性から明らかとなった。そこで圧縮された空気が膨張した場合の容積から求めたみかけ上の速度である容積流束を用いて、流動中のスラグ流速と気相の膨張との関係について検討する。

容積流束とは見かけ上の速度で、気液の供給流量を断面積で除して求められる。既往の研究においては、供給している流量の一般化した値として用いられている。また、Dukler・Hubbard²⁾は、スラグ流速 V_s と容積流束 J_T の関係については次式のように定義している。

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

$$J_T = J_G + J_L \quad (3)$$

ここで、 J_G : 気相容積流束 J_L : 液相容積流束

また、係数 C_2 については Dukler・Hubbard²⁾は $C_2 = 1.2$ 、Gregory・Scott³⁾は $C_2 = 1.35$ となることを示している。

しかし Zuber・Findlay⁴⁾は水平管における静水圧を考慮したドリフト速度 V_d を考慮し、スラグ流速 V_s と容積流束 J_T の関係について次式を示している。

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

Benjamin⁵⁾は、ドリフト速度について理論的に検討しているが、その結果に基づいて Aziz ら (1974) の実験 ($L/d = 936.0$) によりドリフト速度の存在が確認され、式(4)における係数 C_2 について Collins ら⁶⁾は、水平管路スラグ流の乱流域において 1.2 となることを示している。

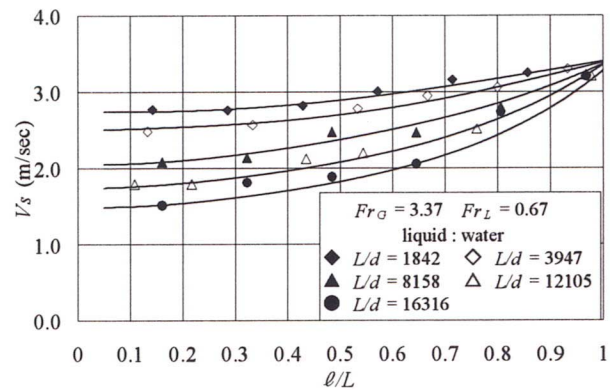


図-6 流動距離に対するスラグ流速

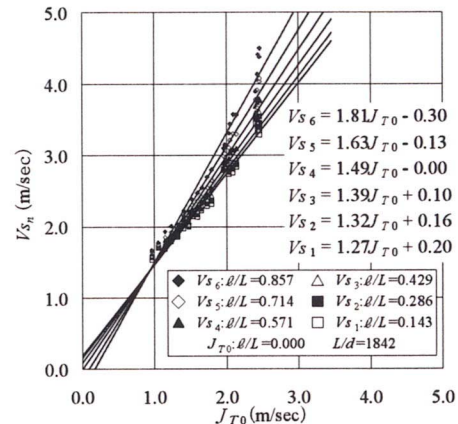


図-7 容積流束とスラグ流速

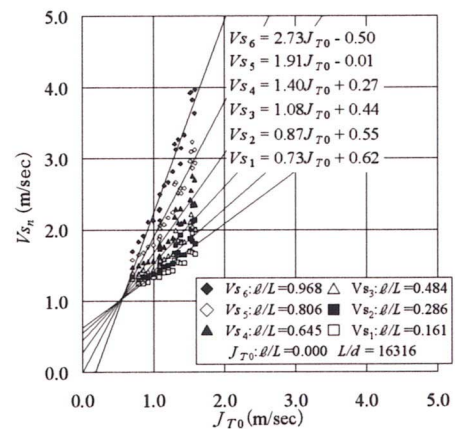


図-8 容積流束とスラグ流速

既往の研究においては短距離管路の実験から式が示されているために管路内圧力が低く、前節で述べた容積流束はすべて供給流量条件をそのまま使用している。気相は圧縮性流体であるので圧縮されると容積流量が変化する。本研究においては一番短い管路 $L/d=1842$ でも気相の圧縮性は小さいが無視できないものと判断し、すべての管路長において圧力によって気相流量の補正を行い、容積流束を算出した。

スラグ流速 V_s と容積流束 J_T の関係を、管路長が短い $L/d=1842$ の結果を図-7 に、管路長が長い $L/d=16316$ の結果を図-8 に示した。これは、横軸にスラグ発生地点における圧力を考慮した気液の容積

流量と管路断面積から算出される容積流束 J_{T0} を、縦軸に各地点のスラグ流速度 V_{s_n} をとり、各地点の結果を示したものである。この結果より、供給口付近の圧力で考慮した J_{T0} と各地点のスラグ流速度 V_{s_n} の関係は、各地点で違った関係を示し、傾きである C_2 は一定値とはならないことが分かった。

次に、同地点における空気の膨張の効果とスラグ流速度を検討するために、各地点の圧力を考慮した容積流束 J_{Tn} と各地点のスラグ速度 V_{s_n} の結果について検討した。管路長によって結果が異なるため、 $L/d=1842$ については図-9 に、 $L/d=16316$ については図-10 にそれぞれ示した。

この結果より、管路長が短い前者ではすべての地点においてほぼ同一直線上にあり $C_2 \approx 1.25$ となった。しかし、管路長が長い後者では入り口に近ほど C_2 の値が小さく、吐出口に近くなるほど大きくなり、吐出口付近での C_2 は短い管路の C_2 と一致し $C_2 \approx 1.25$ 程度となっている。したがってすべての管路内で一定ではないことが分かる。また、ドリフト速度 V_d は、吐出口付近においては両者ともにほぼ等しくなるが、入口に近づくほど V_d が大きくなり、管路長が長くなるほど加速の影響を受けて大きくなることが分かる。このように長距離管路においては圧力が高く気相が圧縮されているために、 C_2 の値が小さく V_d が大きくなるものと考えられる。

(4) スラグ流の管内流動分布特性

これまで、管路内における気相と液相の管路内における位置は運動量式によって予測されたものがほとんどであり、また実際流動しているものと対比できていなかったのが現状である。本実験において、光透過量装置を使用したことにより速い速度で流動するスラグ流において、これまで測定すら困難であった気相長や液相長の測定が可能となった。そこで、この実験結果を用いて管路内の気相と液相の位置を割り出し、流動分布図を作成した。

流動距離が長くなるとスラグ流速度は増加するが、気相の膨張の寄与が考えられ、また管路長が長いと吐出口付近で液相が崩壊することも考えられる。これを明らかにするために気相長と液相長について検討を行った。はじめに流動距離との気相長の関係を調べ図-11 に示した。これは横軸に流動距離の無次元量 θ/L 、縦軸に気相と液相の長さ l_G と l_S をそれぞれとり、パラメータを管路長とした。気相は $Fr_G=3.37$ 液相は $Fr_L=0.87$ のときのものである。管路長によらず吐出口に向かって気相は徐々に膨張し、さらに管路長が長い場合その増加率は大きいことがわかる。

また、液相長について同様の結果を図-12 に示した。液相長は管路長が一番長い $L/d=16316$ を除いて管路全区間においてほぼ一定であるのに対し、 $L/d=16316$ は吐出口に向かって長くなっていることがわかる。これは、流動距離が進むにつれ比較的短

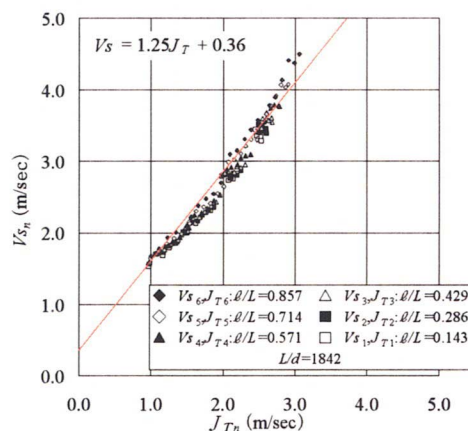


図-9 容積流束とスラグ流速度

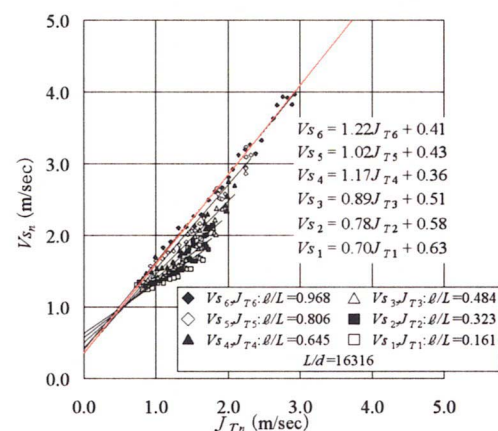


図-10 容積流束とスラグ流速度

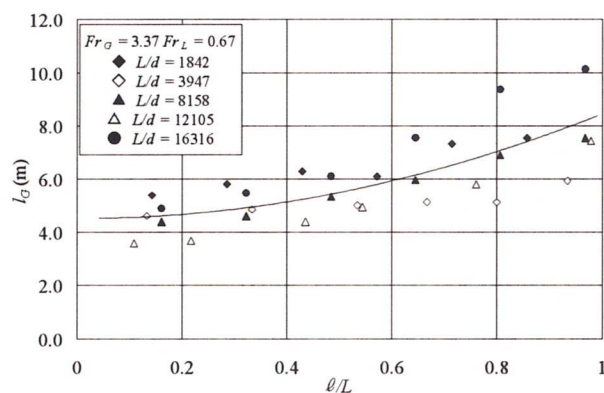


図-11 流動距離と気相長

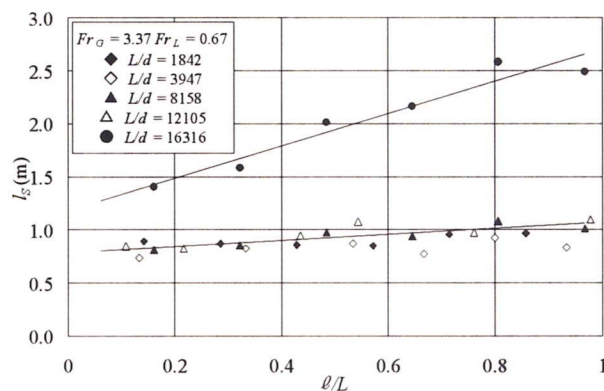


図-12 流動距離と液相長

い液相の崩壊が起こっているためと考えられ、崩壊が起きると管底部に滞留し、後続の液相スラグに吸収され長くなるものと考えられる。

気液スラグ流の気相長の特性が明らかとなったので、これらの結果を用いて管路内のスラグ位置を示した流動分布を求めた。スラグ流は気相と液相の間欠流であるので、気相と液相が交互に配置され、スラグユニットは1対の気相と液相となる。供給口からのスラグユニットに番号をつけ、気相および液相長さは図-11、図-12における曲線を気液の条件ごとに求め、 θ/L を要素とした関数の形とした。また、配置した気相及び液相の座標が $\theta/L > 1$ となる1つ前のユニットを最後のユニットとした。

この結果を示したものが図-13である。これは、 $L/d=16316$ における $Fr_G=4.33$ 、 $Fr_L=0.87$ の結果であり、図中における数字は気液供給口付近からの距離(m)を示し、 $L/d=16316$ の場合においては、 $L=620(m)$ が管路末端部の吐出口である。また、液相は黒印で示してある。このように長距離スラグ流の特徴である、気相の膨張や液相の崩壊によって長くなる液相などの再現が来ている。

これらの結果では、スラグの発生メカニズムより、滞留している液位の上昇によって、気相の通過部分が閉塞され、液相を吹き飛ばす現象が発生しスラグ流が形成される。また気相と液相が一定量連続的に供給されていることから、液位の上昇およびスラグが発生する周期はほぼ一定と考えられる。供給口付近から100m ($\theta/L=0.161$) 付近の位置における気相と液相の間隔はほぼ等しいから、スラグの発生周期の間隔で流動していることが分かる。また、これ以降において、気相の膨張が徐々に顕著になるため液相と液相との間隔が徐々に長くなり、この付近から長距離管路においてスラグ流速の上昇が始まる。この気相の膨張は吐出口に近づくほど大きくなり、これと同時に液相の間隔が大きくなるためと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のよう

- に要約される。
- (1) 短距離管路ではスラグ流速はほとんど変化しないのに対し、長距離管路ではスラグ個数が多くなるために供給口付近における気相の圧力が高くなり、スラグの抵抗のためにスラグ初速度が遅くなる。流動距離が長くなると、気相の膨張が大きくなるためにスラグ流速が加速する。各地点の圧力を使った容積流束 J_{Tn} とスラグ流速の関係は、圧力が高い長い管路においても、管路末端の吐出口付近では一定となり、気相の膨張がスラグ流速に還元されていることが明らかとなった。

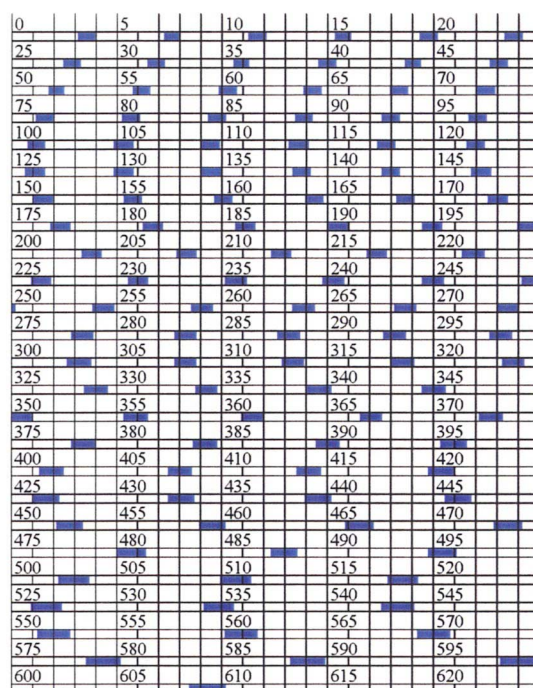


図-13 管路内の流動分布

($Q_a = 180\text{Nl/min}$, $Q_w = 36\text{l/min}$, $L = 620\text{m}$)

- (2) またこのときの係数 C_2 およびドリフト速度 V_d は、既往の研究で述べられている値と一致する。それ以外の地点では、係数 C_2 は供給口に近くなるほど低くなり、ドリフト速度 V_d は高くなる。
- (3) 気液相長の関係を用いることにより気相と液相の位置がわかり流動分布が作成でき、実験の観察で得られるスラグ流の特徴を再現が出来た。

謝辞

この研究は、日本大学工学部学術フロンティア推進事業から、一部援助を頂いたことを付記する。

参考文献

- 1) Taitel, Y. and Barnea, D.: Effect of Gas Compressibility on a Slug Tracking Model, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 53, No.11, pp. 2089-2097, 1998.
- 2) Dukler, A. E. and Hubbard, M. G.: A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, Vol.14, No.4, pp. 337-347, 1975.
- 3) Gregory, G. A. and Scott, D. S.: Correlation of Liquid Slug Velocity and Frequency in Horizontal Concurrent Gas-Liquid Slug Flow, *AIChE J.*, Vol.15, No.6, pp.933-935, 1969.
- 4) Zuber, N. and Findlay, J. A.: Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems, *J. Heat Transfer*, Vol.87, pp.453-468, 1965.
- 5) Benjamin, T. B.: Gravity Currents and Related Phenomena, *J. Fluid Mech.*, Vol.31, No.2, pp.209-248, 1968.
- 6) Collins, S. L. et al.: The Motion of a Large Gas Bubble Rising Through Liquid Flowing in a Tube, *J. Fluid Mech.*, Vol.89, No.3, pp.497-514, 1978.
- 7) 山田泰正, 遠藤茂勝, 落合実: 長距離管路輸送における気液流の流動特性と流動初期圧力について, 環境技術学会誌「環境技術」, Vol.37, No.2, pp117-125, 2008