

気液スラグ流の流動速度と 管内圧力に及ぼす管路長の影響について

EFFECT OF PIPE LENGTH ON SLUG VELOCITY AND INITIAL AIR PRESSURE IN CONDUIT TRANSPORT

山田泰正¹・落合実²・遠藤茂勝³

Yasumasa YAMADA, Minoru OCHIAI and Shigekatsu ENDO

¹学生会員 修(工) 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 博(工) 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)

³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)

Recently, the conduit transport using compressed air is attempted as a transportation method of emulsified oil, high viscosity solution. This transport system would be used in: compound of corpuscle and water such as seabed-dirt with comparatively high water content, crude petroleum that flowed into sea area with increased viscosity, and liquid that mixed algae in a high density of the freshwater lakes. Though the long distance conduit transportation is needed to achieve these transportations, the research of the corresponding long distance is extremely few. In this research, the experiments are set-upped by 620m for the longest length in the horizontal pipe, 38mm for the pipe diameter. We examined the effect of initial pressure of compressed air in long distance conveyance. As the results of the experiment, it was to clarify that the pipe length and initial pressure have the correlation. Prediction formula concerning the initial pressure was able to be required from these data.

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

1. はじめに

海洋や湖沼水域における流出油やアオコなどの浮遊物は水域の汚染物質であるため地上への輸送と処理が必要である。これらの浮遊物の輸送や処理には圧縮気体を用いた混気輸送技術が適用できる。この混気輸送とは、圧縮空気や薬用ガスである気相と処理水である液相を管路内に同時に供給することでスラグ流を発生させて浮遊物などを高速で輸送するものである。またアオコのような群体藻類の輸送においては、発生する高速攪拌流によって結合群体の崩壊作用を促進し、圧力変動を伴う脈流によって細胞の破碎などが期待される。さらに外来生物等が混入したバラスト水においては、オゾンガスを用いた高圧殺菌処理法への応用などがある。このような混気輸送においては気相の特性を生かした海上地上問わず管路長数 km の長距離輸送が実現できる。

これまでに気液二相流における基礎的な研究¹⁾³⁾が行われているが、短距離管路を目的としたものが多く、長距離管路輸送を対象とした研究例が少ない。また、長距離管路では気相の圧縮性の効果により流動速度が増加する⁴⁾といった短距離管路には見られ

ない現象が見られる。そこで本研究では、短距離管路と長距離管路における気相の効果の違いや流動などについて明らかにする目的で、管路長の異なる管路における気液二相流の実験を行い管路長による流動状況について検討を行った。

2. 実験概要

これまでスラグ流に関する可視化実験として、管路長 50.0m, 150.0m および、600.0m の透明管路を用いた実験を行い、スラグ流の発生・流動のメカニズムや、流動課程における流動特性などの検討を行った。スラグ流は気液の供給合流地点においては、気相と液相が分離した流れとなっているが液相の水深の増加と表面波の成長により管路を閉塞し、気相の通る面積が狭まることによる吹き飛ばしの現象によってスラグが発生し流動する流れである。液相流量の変化によりこ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。また実験の観察から、液相流量の増加により流動しているスラグ

個数が増加し、この液相による流動抵抗が増えることによって管路内の圧力が変化し、気相の膨張が支配される。このことから、管路内の流動が複雑に変化する⁵⁾ことが明らかとなっている。また、管路長が長くなることでスラグ個数が増え、気相の圧縮性の効果が増し、スラグ流速の増加や圧力増加が考えられるが、管路長 $L=100\text{m}^{6)}$ や $150\text{m}^{7)}$ にて気相の圧縮性がスラグ流動に影響すると述べられており、この効果による流動の影響を明らかにする必要がある。このため本研究においては、気相の圧縮性の効果が見られる $L=150(\text{m})$ 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。

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、長い楕円状にパイプを設置し管路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した後、空気流量計を通り管路内に供給される。また液相である輸送媒体はタンクから流量計を通り供給される。気相と液相は、同時にかつ連続的に管路内へ供給されるのでスラグ流が発生する。各測定点において管路上部に圧力計を設置した。

スラグ流は流動速度が速いために、いままでスラグ速度は目視のため明確な測定が困難であった。このため本研究において図-2 に示すような光透過量測定装置を考案した。この装置は管の側面と上部をつないだに透明なアクリル箱を設置し、管の中央の高さに LED とその向かい側に受光部であるセンサーが取り付けられている。液相は濃紺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、液相部の通過した時間が測定できる。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あるので、この時間差により速度などの算出が可能である。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 2000Hz にて測定を行った。

実験条件は表-1、2 に示し、気液流量による条件を 30 条件、管路長による条件 6 条件とした。表-1 における気相及び液相流量比は、気相流量 Q_a 、液相流量 Q_w を用いて気相フルード数 Fr_G 、液相フルード数 Fr_L で表し、式(1)によって求めた。

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

ここで Q_a : 気相流量 Q_w : 液相流量
 J_G : 気相容積流速 J_L : 液相容積流速
 A : 管路断面積 d : 管路径
 g : 重力加速度

光透過量測定装置による測定は $V_1 \sim V_6$ の各 6 地点で、また圧力の測定は $P_0 \sim P_6$ の各 7 地点において測定を行った。

$P_0 \sim P_6$: 管内圧力計設置地点 $V_1 \sim V_6$: 光透過量測定装置 設置地点
 APD : エアードライヤー CMP : コンプレッサー
 AQM : 空気流量計 WQM : 水流量計
 RTG : レギュレータ WPM : 水ポンプ
 A/D : アナログデジタル変換機

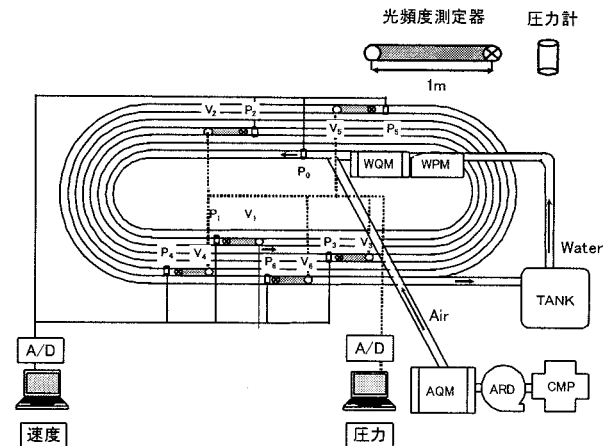


図-1 実験概要図

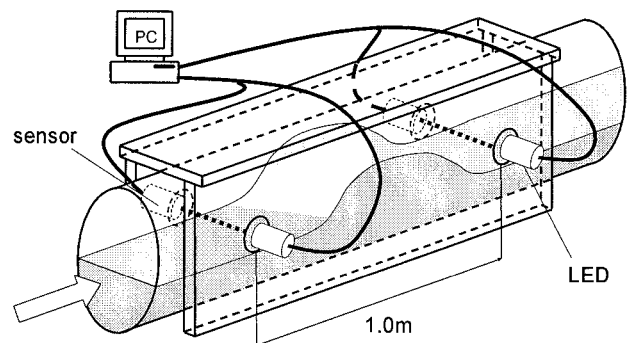


図-2 光透過量測定装置

表-1 実験条件(気液流量比)

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	3.32	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

表-2 実験条件(管路長)

全長 L (m)	L/d	測定点 ℓ / 全長 L						
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

3. 実験結果及び考察

(1) スラグ流速度について

管路長や気相、液相流量の変化による気相の圧縮性に基づく流動への影響などの、長距離スラグ流の基本的な流動特性について実験結果を用いて検討する。

本実験において、管路長による流動距離に対するスラグ流速度について示したものが図-3である。これは横軸に各測定点 ℓ と管路長 L の比である ℓ/L 、縦軸にスラグ流速度 V_s をとったものであり、 $Fr_G=3.37$, $Fr_L=0.67$ における、管路長を変化させた場合の結果について示している。このようにどの管路長の条件においても管路出口($\ell/L=1.0$)に近づくほどスラグ流速度は増加し、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 $L/d=1842$ であり、この管路においてもスラグ流速度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、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。

スラグ流の発生駆動力となる気相は、スラグの発生する時までは一様に流れるが、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気相の圧縮性がより顕著となるため、入口付近においての速度が小さくなり、出口に近づくにつれて気相が徐々に膨張し、速度増加が著しくなるものと考えられる。

次に気液の流量によるスラグ流速度の変化について示したものが図-4~7である。この結果は、横軸に液相フルード数 Fr_L 、縦軸にスラグ流速度 V_s をとったものであり、気相フルード数 Fr_G を変化させたときの結果である。入口付近において、管路長の短い $L/d=1842$ の結果が図-4、管路長の長い $L/d=16316$ の結果が図-5であり、気相流量 $Fr_G=2.408$ 以下の場合、液相流量 Fr_L が増加すると V_s が増加する。しかし、 $Fr_G=3.371$ 以上の場合、 V_s はほぼ一定か減少の傾向を示す。この結果は管路の管路長が変化しても

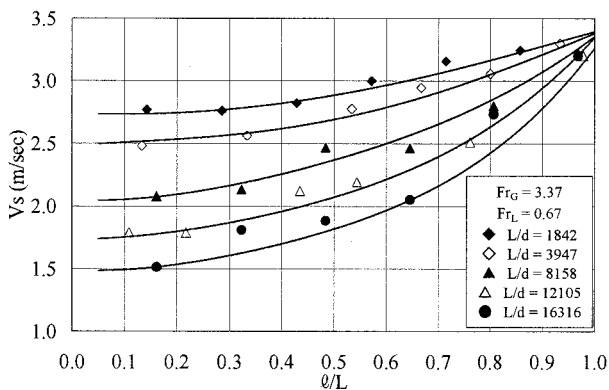


図-3 流動距離に対するスラグ流速度

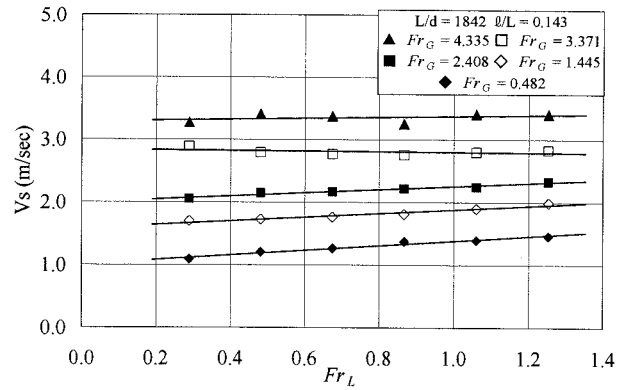


図-4 液相流量とスラグ流速度(発生直後 $L/d=1842$)

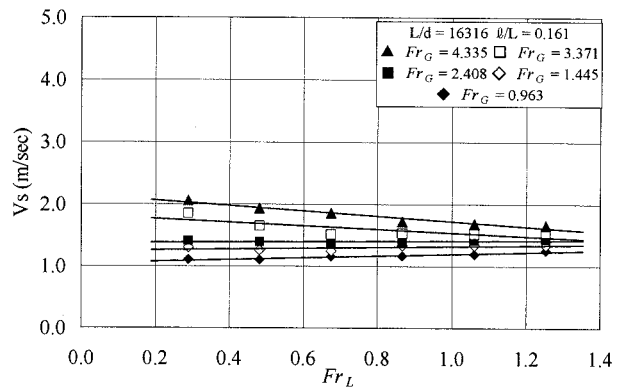


図-5 液相流量とスラグ流速度(発生直後 $L/d=16316$)

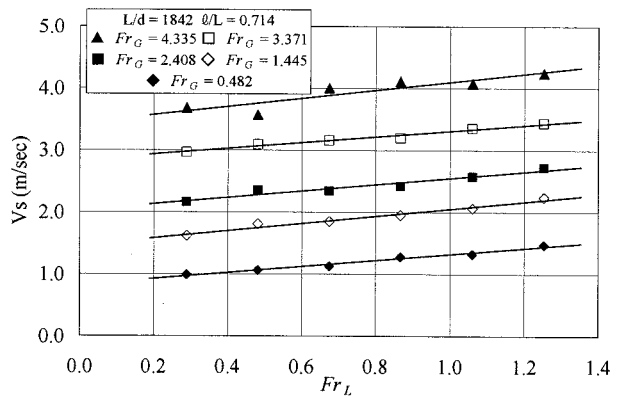


図-6 液相流量とスラグ流速度(出口付近 $L/d=1842$)

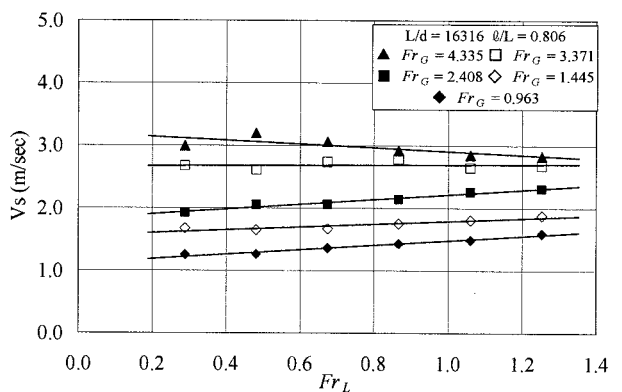


図-7 液相流量とスラグ流速度(出口付近 $L/d=16316$)

同様なものとなった。また出口付近において管路長の短い結果が図-6、管路長の長い結果が図-7であり、管路長が短い場合においては、入口付近の結果と異なり、すべての Fr_G について、 Fr_L が増加すると V_s は増加する結果となったが、管路長が長い場合においては、入口付近の結果と同様な傾向となった。

この結果から、管路長が短い場合のスラグ流速は、入口付近において気相の圧縮性が小さいために、気相流量の効果によるスラグ流速の差は見られる。またこの傾向は、出口付近においてもあまり変わらないことが分かる。しかし管路長が長い場合については、入口付近においてスラグの個数の増加により気相の圧縮性が大きくなるため、気相流量によるスラグ流速の差は小さくなる。また、出口に進むとともに気相の膨張によって、気相流量によるスラグ流速の差が大きくなり、また液相流量の増加による傾向の変化は液相増加によるスラグ個数の増加によって多少異なることが分かる。

(2) 管内圧力について

このようにスラグ流の流動には気相の圧縮・膨張が寄与しているので、次に管路内の圧力について検討を行った。図-8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ある。これは、横軸に流動距離の無次元量 ℓ/L 、縦軸に管内圧力 P をとったものであり、図-4と同様の気液の条件で管路長をパラメータとして示した。この結果から、すべての条件において管内圧力は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。これらの結果から、スラグ流の流れの駆動力である気相は出口に近づくほど徐々に膨張するため圧力が低下し、この効果によって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液相の個数も増え、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り流動速度が低下する。したがって、管路長を長くすると、初速度が遅くいため速度の増加量が顕著となるものと考えられる。

同じ気液流量ならばスラグ発生する間隔である発生周期が同じであることが推測されるので、管路長が長くなれば、管路長増加分だけスラグ個数が増え、圧力が上がるものと考えられる。このことについて検討を行ったものが図-9である。この図は横軸に出口からの距離 L_{exit} と管径 d の比である L_{exit}/d をとり、縦軸に管内圧力 P を取り示したもので、出口において圧力は0となるので、ここからの距離をとり圧力を比較した。この結果に示されるように同じ気液流量ならば圧力は同一の曲線上に乗ることがわかった。このことからスラグ個数は管路長によって比例し、圧力が増加することが分かる。つまり管路長を変化させた場合、この曲線を延長することにより予測が可能であることが分かる。

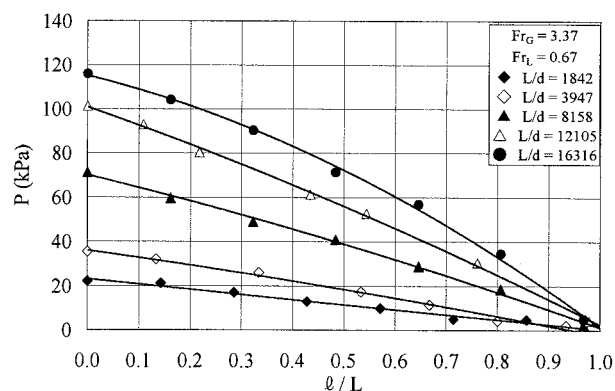


図-8 流動距離と管内圧力

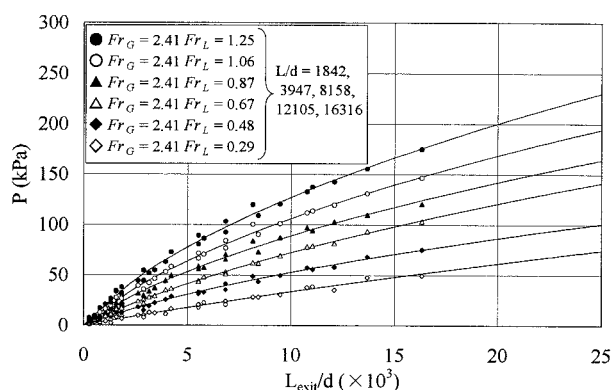


図-9 吐出口からの距離と管内圧力

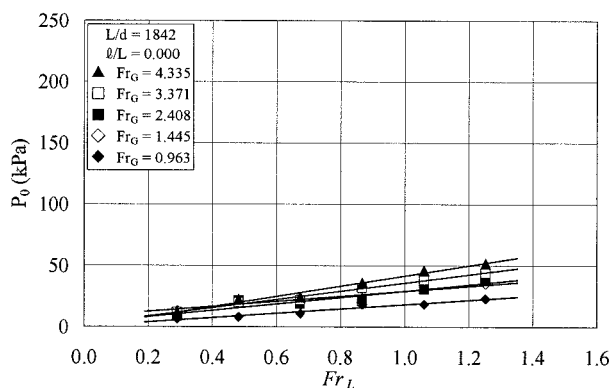


図-10 スラグ発生地点の管内圧力(L/d=1842)

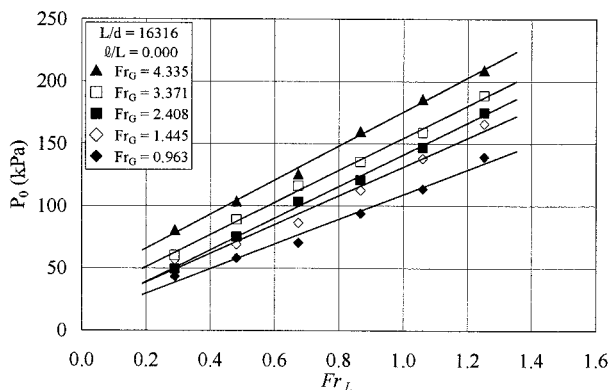


図-11 スラグ発生地点の管内圧力(L/d=16316)

次に気液流量に対する管内圧力について検討を行い示したものが図-10、図-11である。この図は、横軸に液相フルード数 Fr_L 、縦軸にスラグ発生地点における管内圧力 P_0 をとり、気相流量を変化させた場合についてのものであり、管路長の短い $L/d=1842$ の結果が図-10 管路長の長い $L/d=16316$ の結果が図-11 に示した。この結果より、管路長が短い場合は気相流量や液相流量の変化に対しての初期圧力の変化量が小さいといえる。また、どの気相流量の条件においても、液相流量が増加すると管内圧力は線形的に増加することが確認できる。これは液相流量が増えることでスラグ流発生地点におけるスラグの発生周期が早くなり、結果的に管路長におけるスラグの個数が増える。このため液相の抵抗が増え気相はさらに圧縮されるために圧力が増加する。

(3) 初期圧力について

このように気液流量による圧力の変化は管路長によって変化する。また、気相流量を多くすると気相が圧縮し、圧力増加に繋がることは明らかとなっているので、気相流量を一定にした場合について、管路長と液相流量の影響について検討を行った。それを示したものが図-12～15 である。横軸と縦軸は図-10と同様のもので、 Fr_G を一定とし、管路長をパラメータとしたものである。 $Fr_G=1.445$ については図-12、 $Fr_G=2.408$ については図-13、 $Fr_G=3.371$ については図-14、 $Fr_G=4.335$ については図-15 にそれぞれ示した。これらの結果から、どの条件においても、 Fr_L の増加に対して P_0 は増加しており、液相流量による影響は大きいことが分かる。また管路長が長くなると P_0 の勾配が大きくなることから、管路長による影響も大きい。しかし同じ L/d において、 Fr_G が増加してもほぼ同じ勾配を持つので、液相流量の影響より気相流量の影響は小さいものと考えられる。

これらの結果から初期圧力 P_0 は気相流量を一定とした場合、液相流量と管路長によって傾向が定まることが分かる。したがってこれらの傾向は式(2)のように表すことができる。

$$P_0 = K \times Fr_L + \alpha \quad (2)$$

ここで、 K は気相流量と管路長によって定まる係数で P_0 の勾配を表わす。

次にこの傾き K と Fr_G との関係について調べるために示したものが図-16 である。この結果から、管路長が変化してもこの直線の傾きはほぼ一定であることがわかる。また、この直線の切片は管路長が長くなるほど大きくなり、管路長によって変化することが分かる。

これらの結果から、 K は次式(3)のように示される。

$$K = 7.050 \times Fr_G + \beta \quad (3)$$

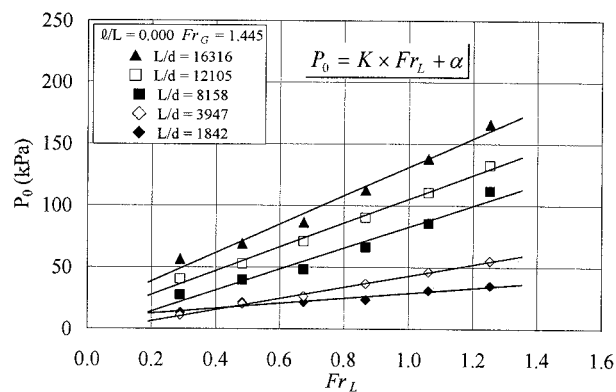


図-12 液相流量と管内圧力($Fr_G=1.445$)

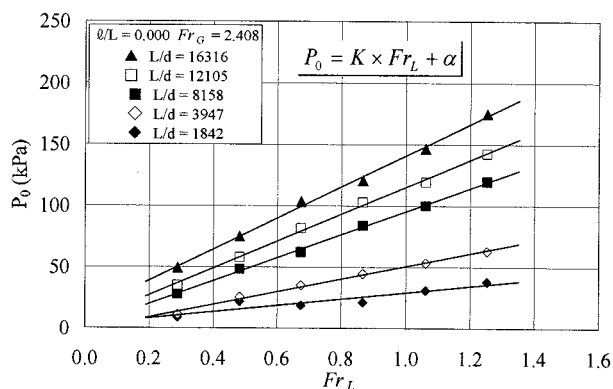


図-13 液相流量と管内圧力($Fr_G=2.408$)

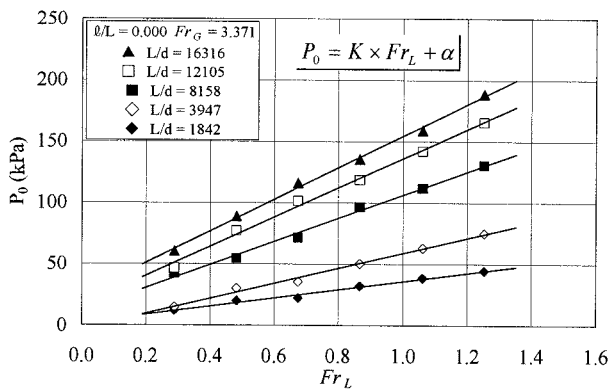


図-14 液相流量と管内圧力($Fr_G=3.371$)

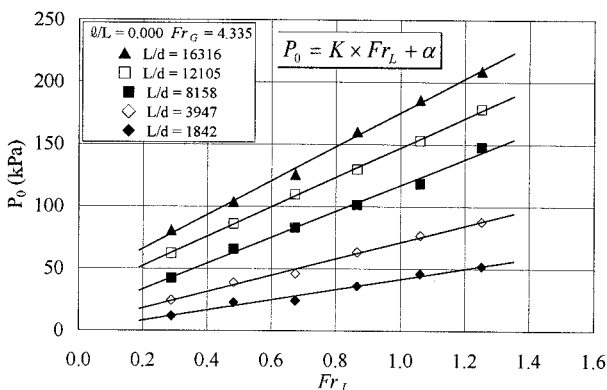


図-15 液相流量と管内圧力($Fr_G=4.335$)

傾きはほぼ一定でその平均値は 7.050 であり, β はこの直線における切片である.

さらに β について, 管路長の長さ L/d との関係について示したものが図-17 である. この結果より, β は L/d に対して二次曲線的な傾向を示し, 図より以下の式(4)のように示される.

$$\beta = -2 \times 10^{-7} \left(\frac{L}{d} \right)^2 + 0.0105 \left(\frac{L}{d} \right) \quad (4)$$

式(2)~(4)より, P_0 の推算式は以下のように示される.

$$P_0 = \left(7.050 Fr_G - 2 \times 10^{-7} \left(\frac{L}{d} \right)^2 + 0.0105 \left(\frac{L}{d} \right) \right) Fr_L + \alpha \quad (5)$$

この式(5)より, P_0 が推算されるので, この P_0 と実験値との比較を行った. これを示したものが図-18 である. この図は横軸に式(5)から算出された P_{cal} , 縦軸にスラグ発生地点における管内圧力 P_0 を取った. α については液相流量が 0 の場合でも $P_0 \neq 0$ であり不確定であるため, $\alpha=0$ として推算を行った. この結果から, 両者はほぼ一致しており, 推算が可能で初期圧力 P_0 を推算することができる. 最後に本実験の精度や管径などからこの式の適用範囲は $L/d=25000$ でおおよそ 1km 程度と考えている.

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) 気液スラグ流の流動速度は管路長が長くなるほど初期流動速度は低いが, 距離を進むにつれて急速に増大し, 出口付近では管路長に関係なくほぼ同一の速度となり, 初期速度より増加する.
- (2) 管路長に対する管内のスラグ流速への液相流量の影響は比較的少ない.
- (3) 管路長に対するスラグ発生初期圧力は管路長が長いほど, また液相流量が多いほど増大するが, 吐出口に向けて減少し吐出口では大気圧となる.
- (4) 管路長に対するスラグ発生初期圧力は気液流量の関係で表されそれらに関する実験式を求めることが出来た.

参考文献

- 1) 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
- 2) Nicholson, M. K., Aziz, K. and Gregory, G. A.: Intermittent two phase flow in horizontal pipes: predictive models, *Can. J. Chem. Eng.*, Vol.56, pp. 653-663, 1978
- 3) Taitel, Y. and Barnea, D.: Two-Phase Slug Flow, *Advances in Heat Transfer*, Vol.20, pp. 83-132, 1990

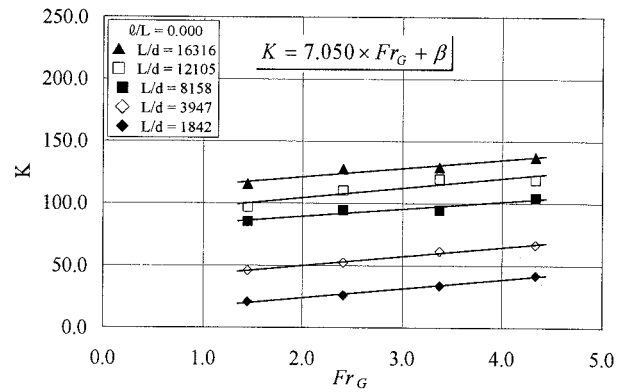


図-16 気相流量と K

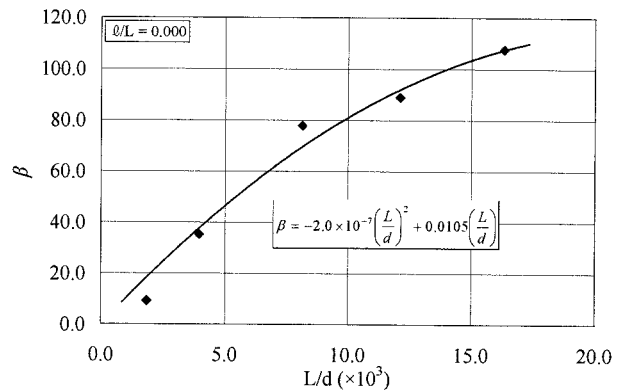


図-17 管路長と β

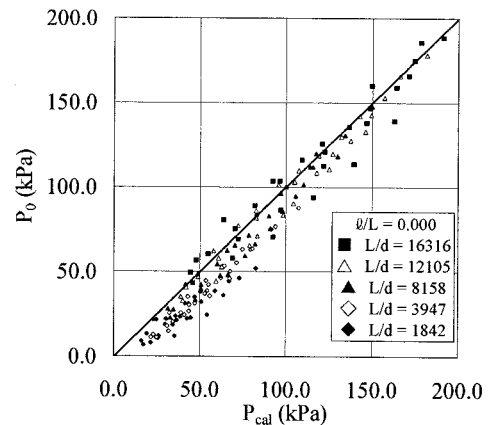


図-18 P_0 の推算値と実験値

- 4) 小川元, 遠藤茂勝:スラグ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, 2003
- 5) 山田泰正, 落合実, 遠藤茂勝: 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.53, pp.911-915, 2006
- 6) 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
- 7) 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