

高粘性溶液を用いたスラグ流の特性について

STUDY ON FLUIDITY CHARACTERISTICS OF SLUG FLOW CAUSED BY HIGH VISCOSITY LIQUID

小川元¹・落合実²・北澤賢次³・遠藤茂勝⁴

Hajime OGAWA, Minoru OCHIAI, Kenji KITAZAWA, and Shigekatsu ENDO

¹正会員 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)

³正会員 佐伯建設工業(株) 技術本部技術開発部長 (〒101-8632 東京都千代田区東神田1-7-8)

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)

Recently, multi phase flow technology using a compressed air is utilized in dredged mud transportation. We are proceeding with the research on the method of efficient mud transporting system. However, the mud in coastal zone is in high viscosity condition by influx mud from river and inflow waste water. Therefore, we have to examine slug flow movement and viscosity friction loss. We have done experiment on high viscosity liquid using a transparent pipe and compressed air. This paper described about study on fluidity characteristics of high viscosity liquid slug flow based on experimental results.

Key Words : Slug flow, two-phase flow, viscosity liquid, compressed air

1. はじめに

近年, 土砂輸送に圧縮空気を用いた混相流の技術が応用されるようになってきた. しかし, 河川からの流入土砂や生活排水などの影響により土砂中には各種有機物が多く含まれ, 土砂の粘性度が高くなってきて輸送しにくい状態となりつつある. これまでスラグ流に関する基本的な現象を知る目的で, 水と圧縮空気を用いた検討^{1)~4)}を行ってきたが, 効率的な土砂輸送を行う上で粘性度を考慮した検討が必要となってきた. そこで本研究では, 粘性摩擦損失が著しく大きいと考えられる高粘性溶液を用いたスラグ流実験により, 流動特性を調べるとともに水と圧縮空気による気液二相流との流動現象の特性の相違について検討を行った.

2. スラグ流可視化実験

(1) 実験装置および方法

スラグ流に関する実験装置は図-1に示すとおり

であり, 管路内径0.038m, 管路延長600.0mの透明管路を用いた. 輸送対象である液相はタンクからポンプによって供給され, 流量計を通して検定されたのち管内に供給される. 一方, 輸送エネルギーとなる圧縮空気はコンプレッサからドライヤおよびレギュレータを通し, 流量計で検定した後, 管内に供給される. 液相は気相の上流から連続的に供給され両相の合流点で混合流となる. 本実験で対象とする

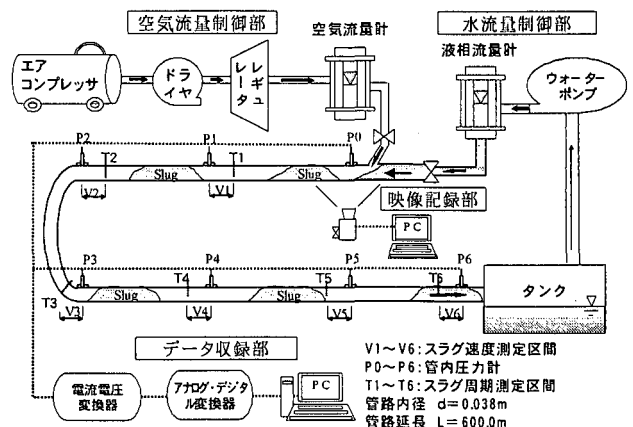


図-1 実験概要

表-1 実験諸元

測定項目	測定地点						
	P ₀ 0.0m	P ₁ 100.0m	P ₂ 200.0m	P ₃ 300.0m	P ₄ 400.0m	P ₅ 500.0m	P ₆ 590.0m
管内圧力							
スラグ速度	— *1	V ₁ 90.0~ 100.0m	V ₂ 190.0~ 200.0m	V ₃ 290.0~ 300.0m	V ₄ 390.0~ 400.0m	V ₅ 490.0~ 500.0m	V ₆ 580.0~ 590.0m

*1 混合流区間

表-2 実験条件

気液流量比 (Q _w /Q _a)	水流量 Q _w (l/min)						
	12.0	20.0	28.0	36.0	44.0	52.0	60.0
空気流量 Q _a (Nl/min)*2	60.0	80.0	100.0	120.0	140.0	160.0	180.0
	0.200	0.150	0.120	0.100	0.086	0.073	0.067
	0.333	0.250	0.200	0.167	0.143	0.120	0.100
	0.467	0.350	0.280	0.233	0.200	0.167	0.143
	0.600	0.450	0.360	0.300	0.257	0.214	0.182
	0.733	0.550	0.440	0.367	0.314	0.267	0.229
	0.867	0.650	0.520	0.433	0.371	0.314	0.267

気液流量比 (Q _c /Q _a)	CMC流量 Q _c (l/min)				
	4.0	8.0	12.0	16.0	20.0
空気流量 Q _a (Nl/min)*2	60.0	80.0	100.0	120.0	140.0
	0.067	0.050	0.040	0.033	0.029
	0.133	0.100	0.080	0.067	0.057
	0.200	0.150	0.120	0.100	0.086
	0.267	0.200	0.160	0.133	0.114
	0.333	0.250	0.200	0.167	0.143

*2 Nl/min: 0℃ 1atmにおける流量

スラグ流は、図-1に示すように液相と気相を同時に連続的に供給するため混合流となるが、重力の作用で分離流となった後に液相が塊となって突然吹き飛ばされて発生する流れである。スラグ流では液相と気相は交互に間欠的に流動し、速度は実験室レベルで 3.0m/sec にもなる流れである。

測定諸元としては管内圧力、スラグ速度およびスラグ発生地点における高速画像を収録した。管内圧力は図-1のように管路上壁に取り付けた圧力計(0.0~1.0MPa)で計測し、気相および液相流量とともにデジタルデータとしてパソコンに収録される。スラグ速度は圧力計設置箇所の上流10m区間で目視による液相の通過平均時間より算出した。各諸元の計測地点は表-1に、また液相流量および気相流量などの実験条件は表-2に示したとおりである。

(2) 液相としてのCMC溶液

今回の実験では輸送対象物として高粘性のCMC溶液を使用した。CMC溶液は、水と水溶性高分子電解質CMC(カルボキシメチルセルローズ)を、水:CMC=550kg:5kgの割合で水溶液としたものである。粘度は1.4~2.3dPa・sで、水の約200倍の粘度を持っている。水およびCMC溶液は、観察を容易にするためどちらも赤色に着色してある。目視による観察では流動状態の相違はほとんど認められなかった。

(3) スラグ流発生時の画像解析

スラグ流は、著者らの研究¹⁾により液相と気相の混合地点から約1.0~3.0m下流で発生することが明らかとなっているので、スラグ流の発生状況を把握するためにシャッタースピード1/1000、毎秒500コマ撮影の高速度CCDカメラをスラグ流発生地点に設置し、広角レンズを使用して1m幅の画像を収録し解析を行った。

3. 実験結果

(1) スラグ流の流動特性

まずスラグ流の速度特性について検討した結果を示す。図-2は液相が水の場合で、図-3はCMC溶液の結果である。横軸には気液の混合地点からの距離を、また縦軸にはスラグ速度をとって空気流量Q_{ma}をパラメータとして示した。液相流量として水流量とCMC流量は等しく、Q_w=Q_c=12.0(l/min)の場合である。

これらの結果によれば、水およびCMC溶液どちらの場合でも管内を流動するに従い、スラグ速度は

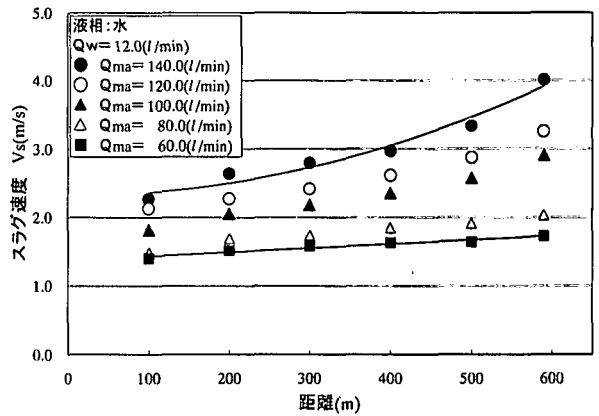


図-2 スラグ流速度特性(水)

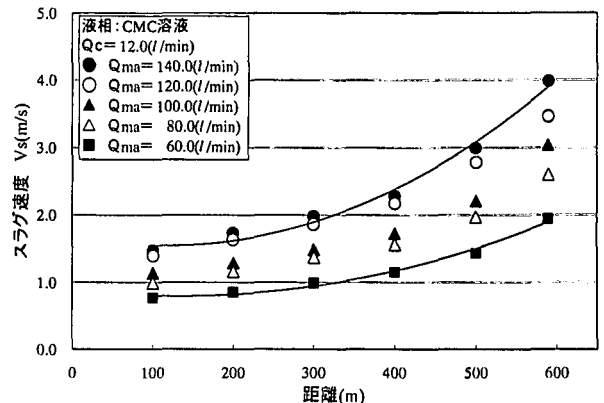


図-3 スラグ流速度特性(CMC溶液)

増大していることがわかる。また、100m 地点の速度は水の方が CMC 溶液に比較して約1.5倍の値をとっているが、管路出口付近では、ほぼ同様な速度となっている。このように液相の粘性の程度が、初期のスラグ流の速度特性に影響を与え、粘度の大きい CMC 溶液の方がスラグ速度の増加割合が大きくなる。つまり粘度の強さに支配されスラグの流動性が悪いために空気の膨張が抑えられ、初期の速度から上がりにくいのに対し、吐出部では空気の圧縮性の効果が大きく大気圧に解放されるため、急激に速度が上昇しているものと考えられる。

(2) 管内圧力特性

管路内の圧力の減少傾向を示したものが図-4 であり、水および CMC 溶液の結果をあわせて示してある。横軸には気液の混合地点からの距離をとり、縦軸には管内圧力 P_n をとって、空気流量 Q_{ma} をパラメータとしている。液相流量 $Q_w = Q_c = 12.0$ (l/min) の場合を示してある。

これらの結果によれば、水および CMC 溶液どちらの場合にも管内圧力は気液混合地点から徐々に低下し、管路出口付近ではほぼ同じ値となっている。気液の混合地点(0m)での管内圧力は CMC 溶液の方が大きく水の約4倍の値となっており、圧力特性においても、液相の粘性度の影響を受けることがわかる。粘性度が大きいと摩擦損失が大きく、管内圧力の増大につながっていると考えられる。

(3) スラグ流速と容積流束の特性

一般にスラグ速度 V_s は、見掛けの速度である全容積流束 J_T よりも大きくなるといわれている。全容積流束 J_T は管内圧力の低下による膨張を考慮した気液の供給流量を管路の断面積で除した値である。Hughmark⁵⁾ は、スラグ速度 V_s と容積流束 J_T の関係について次式を示している。

$$V_s = C_2 \times J_T \quad (1)$$

$$(C_2 = \text{const})$$

この V_s と J_T の関係についてまとめたのが図-5 である。横軸に容積流束 J_T 、縦軸にスラグ速度 V_s をとったもので、液相別に示し、気液の混合地点から 300m地点 ($l/d = 7895$) の結果をまとめたものである。この結果からわかるように、水および CMC 溶液どちらの場合もスラグ速度 V_s は、容積流束 J_T より大きく、(1)式の C_2 値が 1.0以上となっている。水の場合は $C_2 = 1.305$ 、CMC 溶液の場合は C_2

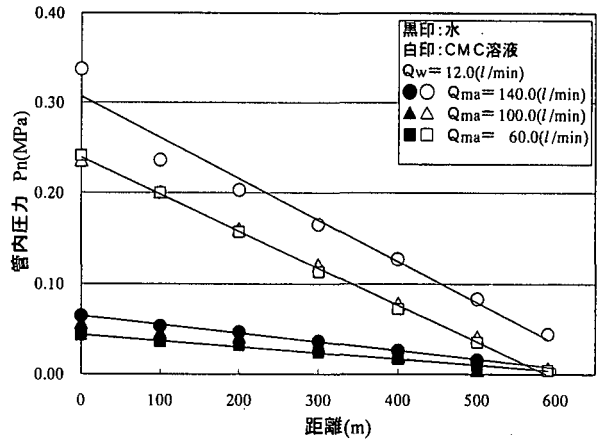


図-4 スラグ流圧力特性

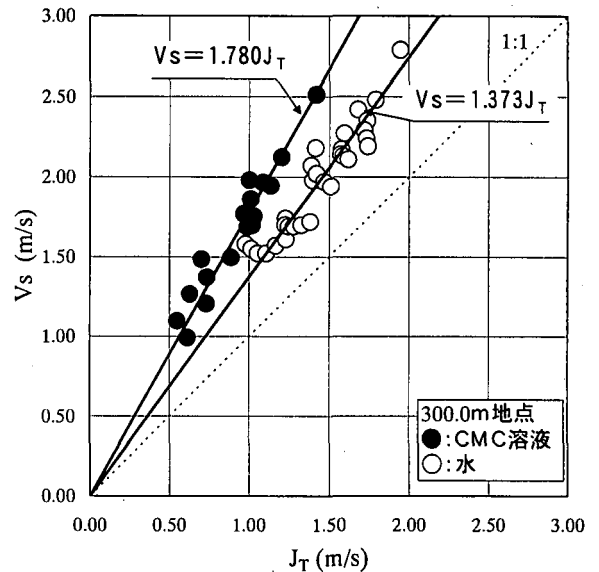


図-5 スラグ速度と容積流束 (100m)

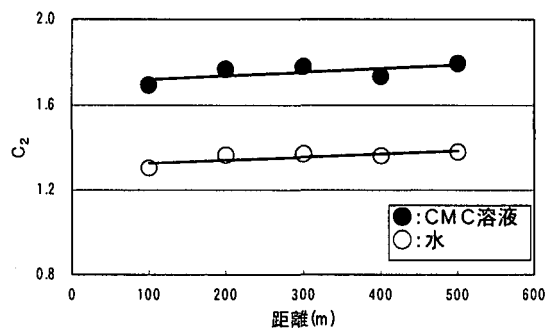


図-6 CMC 溶液と水の C_2 の関係

$= 1.694$ であり、液相の粘性が大きいと C_2 値が大きくなっている。

またこの C_2 値について気液の混合地点からの距離ごとにまとめたものが図-6 である。横軸に気液の混合地点からの距離をとり、縦軸には C_2 値を示した。距離に対して C_2 の値は両者ともやや増大の

傾向になるがCMC溶液の方が常に大きく、地点による水の場合との差はほぼ一定であることがわかる。

このように粘性の高いCMC溶液においてもスラグ速度は容積流束によって一元的に表されることがあきらかとなった。

(4) スラグ発生状況

スラグの発生状況についての画像を図-7に示す。スラグは液相と気相が分離して流れているときに、液相が管断面を突然閉塞してそれまで滞留していた液相を取り込みながら一気に速度を増大させ下流へ間欠的に流動するものである。

水の場合、①の分離流から②の液相の上昇による気相の速度増加によって孤立波が発生し、③ではその孤立波が発達することによって④のように管断面を閉塞させ、⑤のようにスラグが発生することが確認された。スラグ流の発生平均水深は $0.6 \sim 0.7d$ であった。

これに対しCMC溶液の場合は、水の場合と異なり液面の乱れがきわめて少ないことが確認できる。水の場合と同様に分離流となった液相の滞留により液位が上昇するが液表面での波はなく、④のように液位が $0.8 \sim 0.9d$ で突然閉塞が起り、⑤のようなスラグ流を発生させる。粘性のあるCMC溶液は液相

面の波の発達ではなく液位の上昇にのみ支配され管断面が閉塞されてスラグが発生することが確認された。

4. スラグ流解析

実験での流動状態の観察および測定の結果から、図-8のようなスラグ流モデルを想定し数値計算を試みた。スラグ流は水と空気が間欠的に流れる流動であるが、一次元空気流の中にスラグによる抵抗値があると仮定してモデル化した。その際、輸送物としての液相は非圧縮性流体と仮定した。

(1) 気相密度について

液相塊は空気との混合速度場により移動するので、密度 ρ は、本来気液混合密度を用いるべきであるが、管路内の観察から気泡混入が少ないことが認められたので、単純に空気密度を用いた。

(2) 粘性摩擦損失について

空気の粘性は、水の粘性に対して著しく小さいため無視し、液相塊に挟まれた空気の乱流による粘性

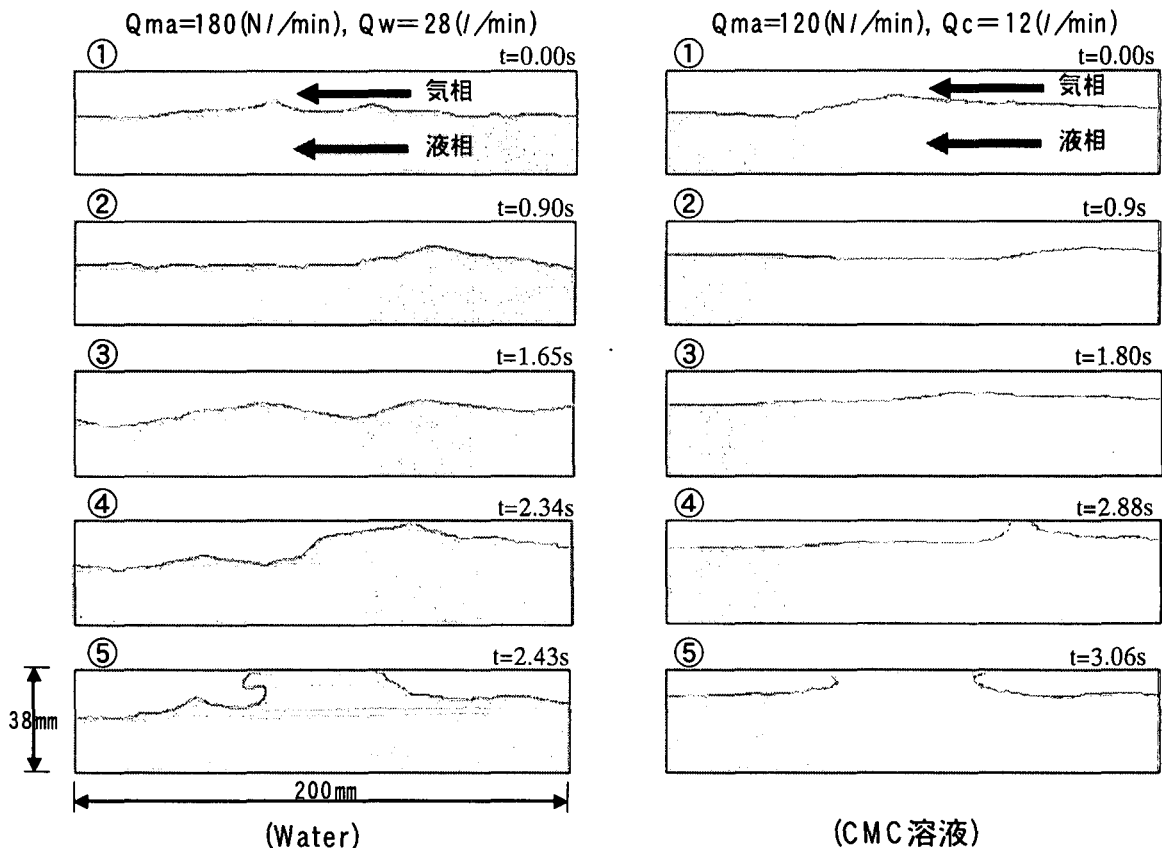


図-7 液相の挙動とスラグ発生状況

効果も無視し、液相の壁面に対する管摩擦損失のみ考慮した。また、輸送時の個々の液相塊内での流体計算は行わず、流動による乱流粘性の影響等は壁面との抵抗力（管摩擦係数）の中で表現する。

(3) 熱量について

圧縮性流体の計算を厳密に行う場合、系の内外の熱流入出を考慮して詳細なエネルギー式や、状態方程式を用いるが、本解析では熱的影響が少ないとして等エントロピーの完全気体とし、密度が圧力のみ依存するバロトロピー流れとして考え、流動中に水塊内を空気は通過しないものとした。

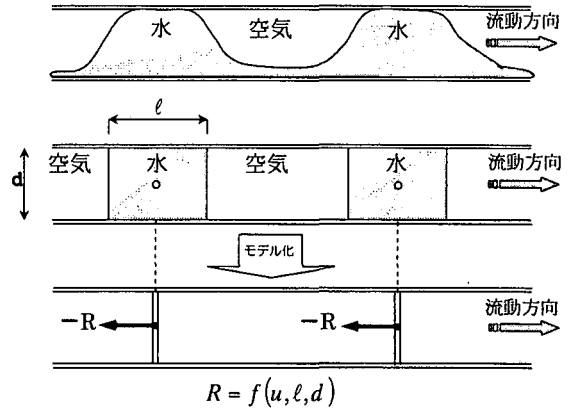


図 - 8 スラッグ流のモデル化

(4) 数値解析

未知量は、流速 u 、圧力 P 、空気密度 ρ であり、連続の式、運動方程式に状態方程式を加えて解く。

a) 連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで ρu を運動量 $m (= \rho u)$ とすると、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

b) 運動方程式

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} - R = 0 \quad (4)$$

ここで ρu を運動量 $m (= \rho u)$ とすると、

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial(m^2/\rho + P)}{\partial x} = R \quad (5)$$

ここで、 R は管壁面との抵抗力を単位体積当りの力として表現したものであり、次式で考慮した。

$$R = f \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \frac{1}{\Delta x} \cdot \rho_w \quad (6)$$

ここで、

- f : 管摩擦係数
- ℓ : 1 個の液相塊長さ (plug size)
- d : 管径
- u : 流速 (気液混合速度場)
- ρ_w : 液体塊の密度
- Δx : 1 次元計算用メッシュ幅

c) 状態方程式

圧力と状態量の関係を示す式は、完全ガスの仮定とし次式で考慮する。

$$P / \rho^\kappa = C \quad (7)$$

ここで κ は比熱比であり、ここでは、 $\kappa = 1.4$ とした。

d) 境界条件

流入側はDirichlet条件（値の指定）とし流出側は、値の勾配を 0 としたNeumann条件とする。

① 流入側境界条件

$$\rho_o = (P_n / C)^{1/\kappa} \quad (8)$$

$$u = u_o \quad (\text{流入速度}) \quad (9)$$

これらから、

$$m_o = \rho_o u_o \quad (10)$$

$$P = P_o \quad (0 \text{ m地点圧力}) \quad (11)$$

② 流出側境界条件

流出側では、速度の変化量はない自然流出条件とした。ただし、圧力は大気圧とし、密度と運動量は次式にて算出した値を与える。

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

$$\rho_{ou} = (P_n / C)^{1/\kappa} \quad (13)$$

ここで、

ρ_{ou} : 出口境界条件設定密度

P_n : 大気圧

$$M = \rho_{ou} \cdot u_{ou} \quad (14)$$

ここで、

M : 流出境界条件設定運動量

u_{ou} : 流出境界条件設定速度

e) 管摩擦係数

式(6)における管摩擦係数 f は図-8に示す液相塊の流れと仮定し、次式のようにレイノルズ数の関数として与えることとした。

① $Re < 2000$

$$f = 64/Re \quad (15)$$

② $3000 < Re < 10^5$

$$f = 0.3164/Re^{0.25} \quad (16)$$

また、 $2000 \leq Re \leq 3000$ の遷移領域は(16)式に $Re = 3000$ とした値を用いた。

そして、 $Re \geq 10^5$ のときは(16)式に $Re = 10^5$ とした値を用いることとした。

実験結果からスラグ速度は管路を流動するに伴って増加する傾向が認められるため、レイノルズ数の変化による管摩擦係数 f として考慮した。

(5) 数値解析結果

これらの過程による計算結果と実験値の比較を図-9に示す。横軸に気液の混合地点からの距離をとり、縦軸にはスラグ速度 V_s をとって、 $Q_w = 12.0$ (l/min) における2つの条件について比較した。その結果、10%程度の誤差を含むが、実験における管路内の挙動をほぼ再現することができた。

空気量が少ない $Q_{ma} = 80.0$ (Nl/min) の場合には、実験値と計算値がほぼ同様な値を示したが、空気量が多い $Q_{ma} = 200.0$ (Nl/min) の場合には、100~200m地点および500m地点での実験値と計算値に差異が生じた。これらの区間は、長距離の空気輸送において、空気の圧縮性の効果が速度値に顕著に現れる区間で200m区間では先のスラグの存在による抵抗を受け、また500m区間では管路末端が解放されてい

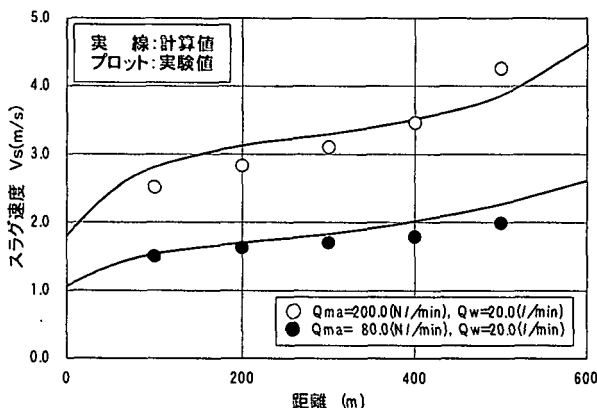


図-9 計算値と実験値の比較

る影響で速度が増大する。

また、計算では境界条件として、流入速度と圧力の値から求めた容積流束の値を、また液相塊長さについてはスラグ周期を仮定し容積流束から求めた値を用いている。

5. まとめ

本研究により、長距離管路内に水や高粘性溶液と空気を混入した場合の、スラグ流の速度特性、圧力特性、容積流束の特性、数値解析結果について検討した結果について次のようにまとめられる。

- (1) スラグ流の発生メカニズムは、液相の粘性度の違いによる影響を受ける。水の場合には液面に発生する波の発達の影響に大きく支配されるのに対して、粘性度の大きい液相の場合には液位の上昇速度がスラグの発生に大きく影響する。
- (2) スラグ速度は液相の粘性度の影響を受け、粘性度が大きいと、初期の速度は小さいが速度の増加割合が大きく、管路出口近傍では粘性の小さい水の結果とほぼ同じ速度となる。
- (3) 管内圧力も液相の粘性度の影響を受け、管路の入口付近の圧力は、粘性度が大きいと増大し、水に比較して約4~5倍となる。管路出口では大気解放されるため、圧力値はほぼ同値となる。
- (4) 見掛けの速度である容積流束にも液相の粘性度の違いによる影響が現れ、粘性が大きいと、見掛け速度に対する実際の速度の増加割合が大きくなり、 C_2 値が大きくなる。

最後に本研究は日本大学学術助成金平成13, 14年度「国際総合研究」の交付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 小川元, 田崎道宏, 落合実, 遠藤茂勝: 長距離管路内における液相スラグの流動特性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.17, pp.625-630, 2001.
- 2) 小川元, 田崎道宏, 落合実, 遠藤茂勝: 水平スラグ流輸送における圧力, 速度特性について, 海岸工学論文集, Vol.48, pp.1006-1010, 2001.
- 3) 小川元, 田崎道宏, 落合実, 遠藤茂勝: 水平管内気液二相スラグ流の流動特性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.18, pp.617-622, 2002.
- 4) 小川元, 落合実, 遠藤茂勝: 水平管内スラグ流における容積流束とスラグ流速度について, 海岸工学論文集, Vol.49, pp.891-895, 2002.
- 5) 日本機械学会編: 気液二相流ハンドブック, コロナ社, pp.260-271, 1989.