

遷移流動を伴う気液スラグ流に関する圧力損失

PRESSURE LOSS ON TRANSITIONAL AIR-LIQUID SLUG FLOW IN HORIZONTAL PIPELINE

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 (〒275-8735 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 (〒275-8735 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 (〒275-8735 千葉県習志野市泉町1-2-1)

The objective of this study was to resolve pressure loss of transitional slug flow relating to two phase flow composed of air and liquid in horizontal long pipeline. Therefore, the model experiments were conducted to get the pressure data and imaged intermittent flow using a transparent pipe for the observation.

This paper describes investigated result about pressure loss and variations of slug velocity that are taken remarkable effect by pipe length. As the results, the pressure loss and variation of slug flow per length of long pipeline is uneven in each measuring sections.

Key Words : Two-phase flow, slug flow, pressure drop, pneumatic conveyance

1. はじめに

海岸工事における浚渫土砂の輸送には、これまでは大量の水を用いたポンプ方式の輸送方法が用いられていた。しかし余水による環境汚染等の問題から、最近では空気圧送方式の輸送が採用されることが多くなっている。この種の管路輸送では、空気混入による見掛け上の粘性摩擦の低減により浚渫土砂を高濃度で輸送することが可能であり、ポンプ方式の輸送に比較して余水処理設備を極端に軽減することができるなどのメリットがある。

しかし、空気圧送方式による浚渫土砂の輸送のような気相、液相、そして固相からなる混相流体は個々の物性が著しく異なり、加えられた応力に対してひずみやひずみ速度に著しい違いが生じることから、気、固、液の二相以上で構成される流体では、それらの混合比率により流動のパターンが変化し、種々な流動様式となる。また、従来の研究は、気相と真水や油などの液相あるいはセメントなどの微粉粒体などの固相を同時に混入した場合の流動の発生メカニズムや各相の混合比率による管路内の流動パターンについての研究が多く、確認のための実験が主であるため、大部分はその規模が小さく管径100mm

程度以下、長さ10m程度以下のものが主であった。これに対し、本研究で対象としている規模は実機で管径700mm程度、管路延長は2000～5000m程度を想定している。

このような管路輸送では気相と液相を同時に混入したときに間欠的に発生するスラグ流を輸送手段として用いていることから、本研究では長距離管路輸送を課題とし混相流の流動パターンのうち、スラグ流に焦点を絞り検討を行った。

水と空気を用いスラグ流の流動特性を実験的に検討した結果では、スラグ流速度は気相流量を増加すると増大し、液相流量を増加させた場合には小さくなるが、管路系の下流へ流動する過程では増大する。また、管内圧力は、気相流量および液相流量のどちらを増加させても増大するが、下流地点に向かってゆるやかに減少することが確認された¹⁾。また周期は液相流量を増加することによりスラグ発生条件を満たす間隔が短くなり頻度が増大し周期が短くなることがわかった¹⁾。

一方、液相に高粘度溶液を用いスラグ流の流動特性について実験的に検討したところ、スラグ流の速度は水スラグ流と同様に、気相流量を増加すると増大し、液相流量を増加させた場合には流動抵抗の増大のため小さくなることが明らかとなり、また、下流へ流動する過程では

水スラグ流に比較して圧縮気相の効果のため著しく増大することが明らかとなった^{3) 6)}。スラグ流発生地点の圧力は、水スラグ流に比較して著しく増大し、管路系全体の圧力も上昇し、下流に向かっては大気圧開放のため急激に降下する。また液相流量を増加させると管内圧力は増大するが、気相流量の増加に対しては一様な増大とはならず、最小圧力を示すような気相流量が存在し、この点が水スラグ流と比較して異なる。

また、水スラグ流が液相面に卓越した波の存在によりスラグが発生するのに対して、高粘性流体の場合には粘性の影響により液相表面に著しい波が発生せず、液相の水深の増大がスラグ発生の主要因となっていることなどが明らかとなった^{2) 4) 6)}。

このような流動特性の把握をもとに、スラグ流の流動をモデル化した数値シミュレーションを行い^{5) 6)}、その結果に基づいてスラグ流に関する輸送設計資料を得るための数値解析手法の確立を目的に研究を行っている。

本論文ではスラグ流の流動特性のうち、長距離管路の影響が顕著に現れている圧力損失と速度変化について詳細に検討するものである。

2. スラグ流の可視化実験

スラグ流に関する可視化実験は管路内径0.038m、管路延長600.0mの透明管路を用いて行った。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、流量計で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スラグ流は、混合流が重力の作用で分離流となった後、管底に滞留した液相が塊となって突然吹き飛ばされて発生し、その後は液相と気相が交互に間欠的に流動するものである。

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。管内圧力は管路上壁に取り付けた圧力計で計測し、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。気液二相流では液相と気相の速度は異なると考えられるが、本研究においてはみかけ上の液相塊の移動速度をスラグ速度と定義し、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。

3. 長距離管路内におけるスラグ流特性

(1) スラグ流の発生

スラグ発生メカニズムについて高速画像を用いて分析した結果を図-1に示す。液相と気相は同時に連続的に供

給され、①の分離流の状態から②の液相レベル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のような状態からの水塊の吹飛ばしによりスラグ流が発生する。そしてまた①の段階に戻り、この動作が繰り返されて下流では間欠的な流れとなる。

(2) 管内圧力変化

スラグ流動時の管内圧力について調べたものが図-2で $Q_w = 28.0 (\ell / \text{min})$ の測定結果を示したものである。横軸に気液の混合地点からの距離をとり、縦軸には管内圧力をとって気相流量 Q_a をパラメータとして示した。

この結果によれば、いずれの気相流量の場合にも管内圧力は気液の混合地点から離れるほど減少し、管路端末

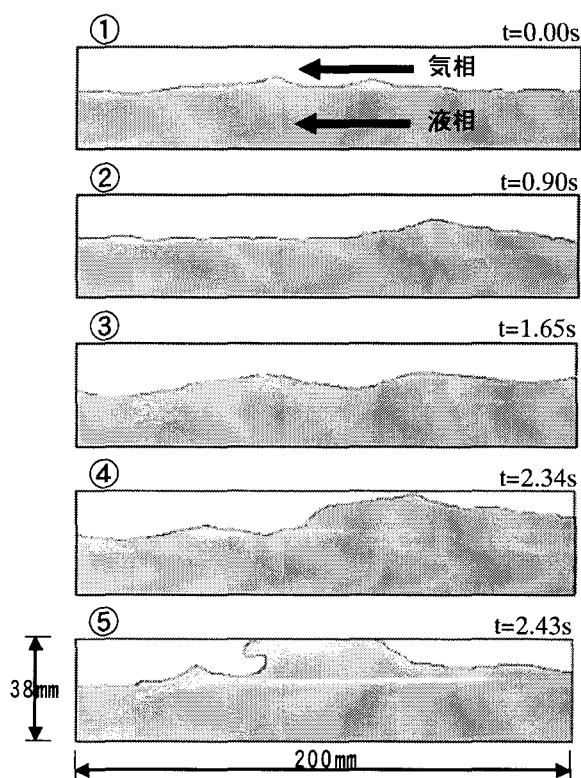


図-1 スラグ流発生状況

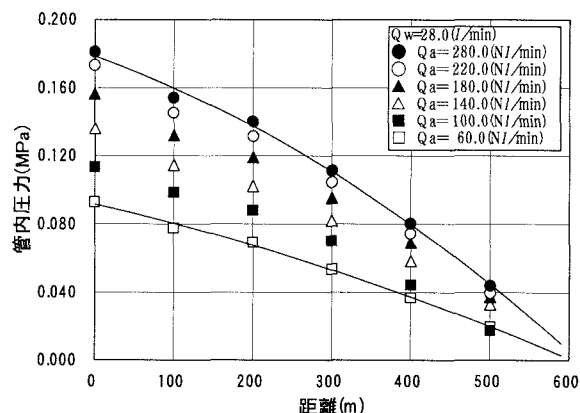


図-2 管内圧力

の 600m地点では大気圧付近まで降下していることが認められる。そして気相流量が多い方が、管路全体を通して管内圧力は高い値となっているため、圧力降下割合も大きくなっていることがわかる。

また、測定区間 100mごとの圧力降下量を見ると、いずれの気相流量においても管路端末に近づくに伴い、圧力降下の割合が大きくなっていることがわかる。

(3) スラグ流速

次に同じ条件におけるスラグ流速の結果について示したものが図-3である。横軸には気液の混合地点からの距離をとり、縦軸にはスラグ流速をとって、気相流量 Q_a をパラメータとして示している。

この結果によれば、いずれの気相流量の場合にもスラグ流速は気液の混合地点から次第に増加していき、管路端末の 600m付近で最大となっている。また、気相流量が多い方が初期流動速度が大きい値を示し、速度の増加割合も大きくなっていることがわかった。

(4) 管内圧力損失

上に述べたように気相流量の多い方が管内圧力の減少割合およびスラグ速度の増加割合が大きいことが明らかとなった。そこで管内圧力損失について検討したのが図-4である。横軸には気相流量 Q_a をとり、縦軸には 100m区間ごとに計算した平均圧力損失をとり、液相流量 Q_w をパラメータとし、 $L=100\sim200\text{m}$ と $L=400\sim500\text{m}$ の区間についてまとめたものである。

これらの結果によれば、どちらの区間においても、気相流量が増加すると圧力損失が大きい値を示す。また、いずれの液相流量においても $L=400\sim500\text{m}$ 区間の方が圧力損失が大きく、気相流量の増加によっても圧力損失は高い値を示す。

また、図中の線は Lockhart-Maltineri の圧力損失式⁷⁾から計算したものであり、 $Q_w=0.0(\ell/\text{min})$ の空気のみを流したものと $Q_w=12.0(\ell/\text{min})$ の場合を示した。 $L=100\sim200\text{m}$ の間では L-M 式の値とほぼ同様な数値となっているが、 $L=400\sim500\text{m}$ ではそれより高い値を示している。

これらの結果は管路が長くなることにより現象が異なることを意味していると考えられるので、次に液相流量を固定して圧力損失の区間変化について検討した。

(5) 圧力損失の区間変化

次に気液の混合地点からの距離ごとの平均圧力損失を示したものが図-5である。液相流量 $Q_w=44.0(\ell/\text{min})$ の場合を示しており、横軸には気相流量の液相流量に対する比 Q_a/Q_w (空気水流量比)、縦軸には平均圧力損失をとって、混合地点からの距離区間をパラメータとしたものである。

いずれの区間においても、空気水流量比が大きくなると、平均圧力損失は

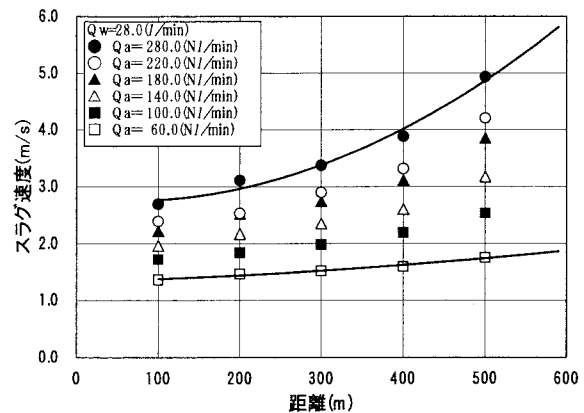


図-3 スラグ速度

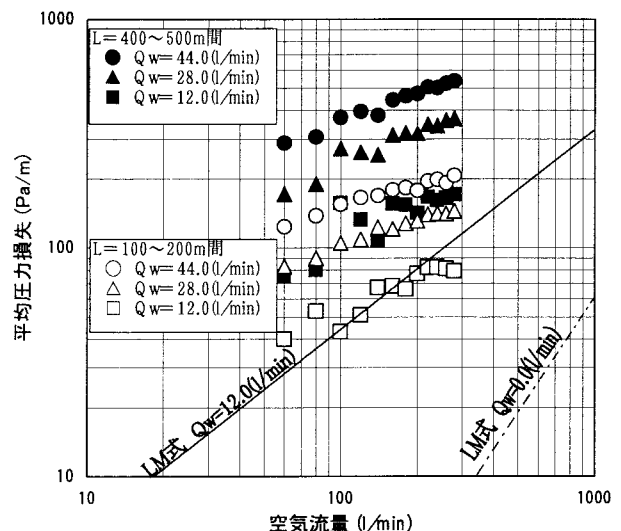


図-4 管路内圧力損失

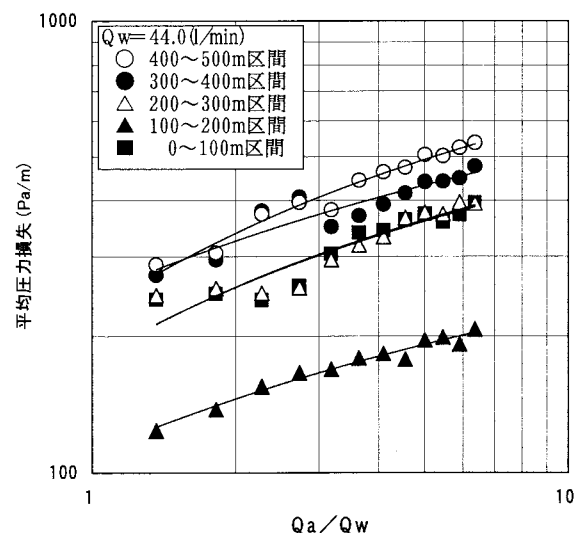


図-5 圧力損失の区間変化

わち気相流量の割合が大きくなると、平均圧力損失は大きくなることがわかる。また、区間ごとの圧力損失を比較すると 200~500mの各区間は距離が増すほど徐々に圧

力損失が大きくなっているが、0～100mは 200～300mと同等の高い値を示し、100～200mは他区間に比較して小さな値を示している。これはスラグが発生して流動を開始し、スラグ流速を急激に加速するための加速損失があるために、この区間で圧力損失が異なっているものと考えられる。

(6) 液相流量と圧力損失

次に液相流量による圧力損失への影響を調べた。横軸には空気水流量比 Q_a/Q_w をとり、縦軸には平均圧力損失をとったもので、液相流量 Q_w をパラメータとして示したものである。図-6は 100～200m区間の結果であり、図-7は 400～500m区間の結果を示した。全体的に図-7の400～500m区間の方が大きな値を示し、いずれの結果においても液相流量 Q_w が多くなることにより、平均圧力損失が大きくなっていることがわかる。

また、平均圧力損失は、液相流量および空気水流量比の増加により大きくなるが、その増大割合の地点による差異はあまりみられない。

一般的に圧力損失の増大は、スラグ流速の増加が要因の1つとして考えられるので、次にスラグ流速の変化について検討する。

(7) スラグ流速の区間変化

液相流量 $Q_w=52.0(\ell/\text{min})$ の場合における速度変化を検討したのが図-8である。横軸に空気水流量比をとり、縦軸には区間ごとの平均速度変化をとったもので、各100m区間をパラメータとしている。

この結果から、いずれの区間においても空気水流量比が増加すると、平均速度変化が大きくなっていることがわかる。また区間ごとの変化をみると、200m以降の下流側区間においては、空気水流量比の増加に対して同じような傾向がみられるが、100～200m区間では他区間と異なった様相を呈し、それらに比較して急激な増大傾向となっている。200mより下流区間では下流に流動するに伴い空気水流量比の増加に対する速度変化が大きくなり、その変化の増加割合も大きくなっていくのがわかる。

このようにスラグ流発生直後の 100～200m区間においては他区間と比較して現象が異なると考えられ、このような様子はスラグの遷移過程の影響によるものと考えられる。

(8) 液相流量とスラグ流速

次にそれぞれの区間における速度変化について検討した。図-9は $L=100\sim 200\text{m}$ 区間の速度変化を示し、図-10は $L=400\sim 500\text{m}$ 区間の結果を示している。横軸に空気水流量比をとり、縦軸に平均速度変化をとって液相流量 Q_w をパラメータとしている。

これらの結果によれば全体的に空気水流量比の増加により平均速度変化が増大し、 $L=100\sim 200\text{m}$ 間では液相流

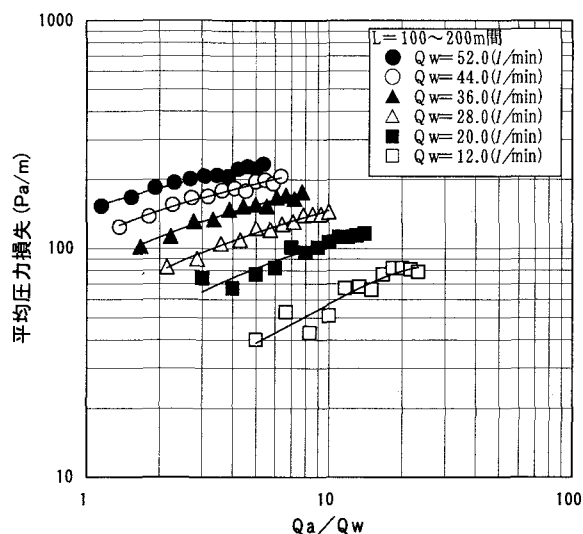


図-6 液相流量と圧力損失(100～200m区間)

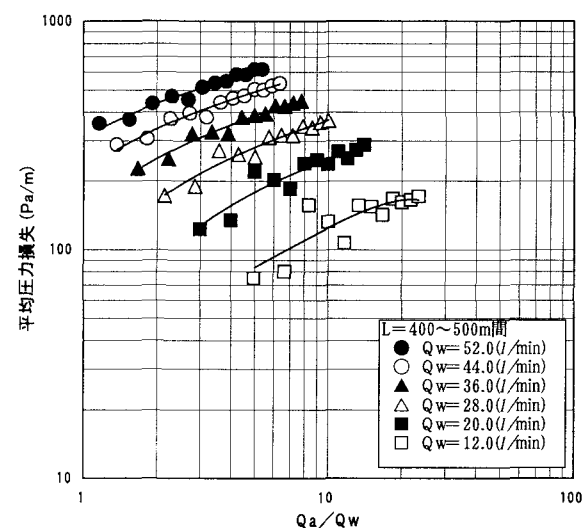


図-7 液相流量と圧力損失(400～500m区間)

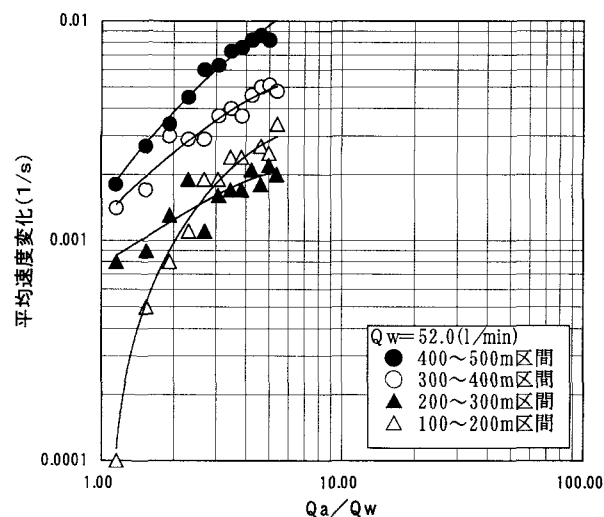


図-8 スラグ流速の区間変化

量にあまり関係なく、空気水流量比によってほぼ一様な割合で速度が変化している。一方、 $L=400\sim 500\text{m}$ 間では速度変化の割合が水流量に支配される傾向となり、同じ空気水流量比でも液相流量の違いによって平均速度変化の割合が異なる。

$L=400\sim 500\text{m}$ 間は $L=100\sim 200\text{m}$ 区間と異なり、空気水流量比で一様に表すことができず、液相流量に支配されていて液相流量による損失が異なるのはスラグ流の数が多いことによるためと考えられる。

(9) 管内圧力変動とスラグ流の速度変化

これまで述べてきたように、平均速度変化および圧力損失は流動する区間によって様相が異なっていることが明らかとなった。一般的に速度の増加によって圧力損失が増大すると考えられるので、これらの関係について検証する。

図-11は $Q_w=52.0(\ell/\text{min})$ の結果についてまとめたもので、横軸には平均圧力損失をとり、縦軸には平均速度変化をとって 100m ごとの区間をパラメータとして示している。これらの結果によれば、 $100\sim 200\text{m}$ 区間を除き、他の区間はほぼまとまった結果となっており、この結果からも $100\sim 200\text{m}$ 区間では様相が他区間と異なることが確認できる。

(10) 液相流量による圧力損失と速度変化

そこでそれぞれの区間における圧力損失と速度変化の関係を図-12および図-13に示す。

図-12は $100\sim 200\text{m}$ 間、図-13は $400\sim 500\text{m}$ 区間の結果である。横軸には同様に平均圧力損失をとり、縦軸には平均速度変化をとったもので、液相流量 Q_w をパラメータとしている。どちらの区間においても液相流量の違いによって値に差異が見られるが、全体的に $100\sim 200\text{m}$ 区間の方が $400\sim 500\text{m}$ 区間に比較して平均圧力損失の変化に対して速度変化の値が大きく変動していることがわかる。

4. まとめ

- (1) 管路内の平均圧力損失は、気相流量および液相流量が多くなると増大する。
- (2) 長距離管路における平均圧力損失は、区間ごとに異なる値を示す。スラグ流が発生する初期の区間、スラグ流が安定する区間、スラグ流速が増大する区間に大きく分けられる。
- (3) スラグ流速は、気相流量の増加に伴って増大し、管路端末に進むほど増大する。
- (4) 長距離管路における単位長さ当りのスラグ流速の変化は、区間ごとに異なる値を示す。管路延長 600m の場合、 200m までの区間とそれ以降の区間では様相

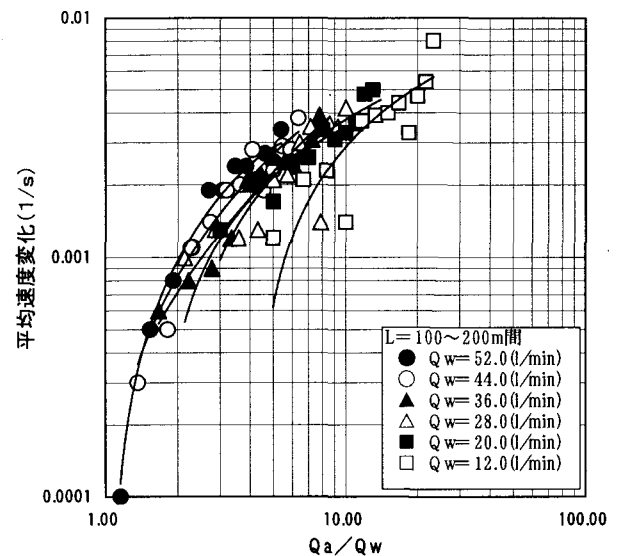


図-9 液相流量とスラグ流速の変化($100\sim 200\text{m}$)

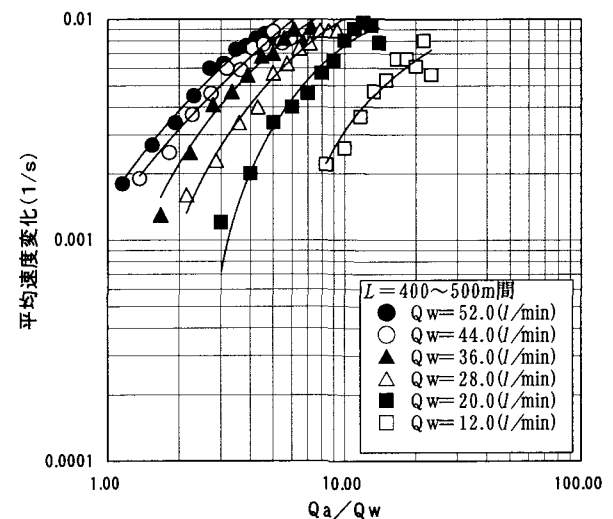


図-10 液相流量とスラグ流速の変化($400\sim 500\text{m}$)

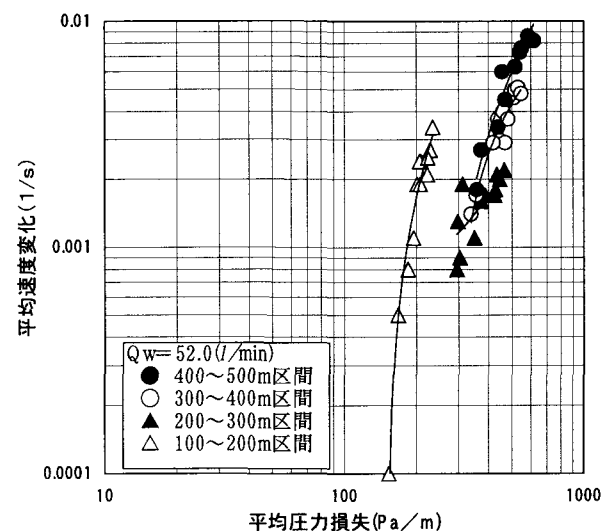


図-11 管内圧力損失とスラグ流速変化

を異にする。

- (5) 長距離管路における平均圧力損失とスラグ流速変化の関係においても、区間ごとに様相が異なり、管路延長600mの場合、200mまでの区間とそれ以外とで大きく分けられる。

このように長距離管路では、圧力損失とスラグ流速の変化が管路の地点によって異なることが明らかとなった。これはスラグ流の流動状態が、スラグの発生する初期の区間、スラグ流が安定する区間、スラグ流速が増加する区間で異なることが要因と考えられる。

すなわち、スラグの発生する初期の区間は、スラグ発生の様子からもわかるように、滞留していた液相をスラグとして突然送り出すためのエネルギーを必要とし、圧力損失が増大しているものと考えられ、スラグ発生から流動し始めるための加速損失と実動部が成長する現象が圧力損失に大きく影響しているものと考えられる。その後の100～200m区間はスラグ発生による加速後の慣性力が卓越した区間と考えられる。

また、スラグが安定する次の区間においては、粘性摩擦が圧力損失の主要因と考えられる。そして、管路末端に近づいてスラグ速度が増加する区間においては、スラグ速度の増大により、レイノルズ数が高くなり、粘性摩擦損失に加えスラグ流と底部の液相と混合して加速させるための乱流摩擦損失が加わりその割合が大きくなるものと考えられる。

スラグ流では、管路の底部には常に液相が滞留しており、スラグとして流動する液相は滞留している液相をスラグ先端で取込み、スラグ後端から液相を排出しながら流動するが、液相を取込む際に三次元的な乱れが発生し、スラグ流速の増加とともに乱流摩擦損失が大きくなるものと考えられる。このようにスラグ流の圧力損失には粘性摩擦損失および乱流摩擦損失が大きく影響していると考えられるが、スラグ流は液相と気相による混相流であるため、単相流のような摩擦損失係数を用いた解析が困難であった。今後、スラグ流のボイド率やレイノルズ数とみかけ上の摩擦損失係数等との関係について検討する必要があると考えている。

今後、長距離管路における圧力損失については、管路の地点により損失の要因が異なることを考慮して検討すべきと考えるが、より粘性度の高い粘性流体においても同様の検討を行う必要がある。

最後に本研究は日本大学学術助成金平成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,

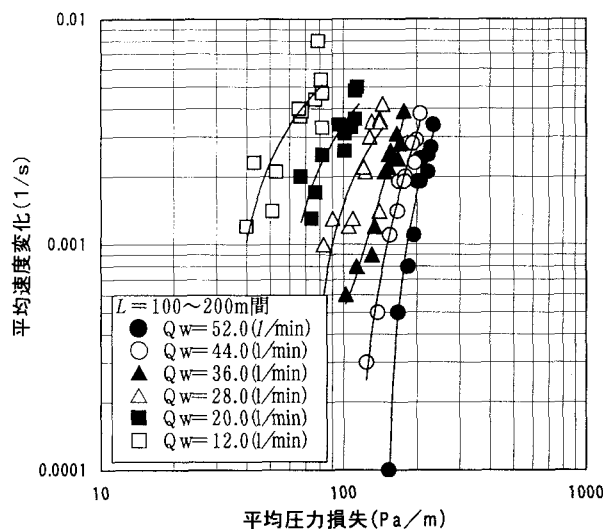


図-12 圧力損失と速度変化(100～200m)

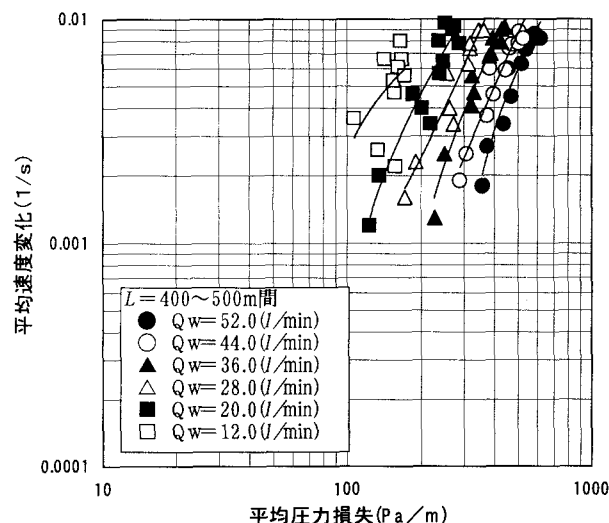


図-13 圧力損失と速度変化(400～500m)

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について, 海岸工学論文集, Vol. 49, pp. 891-895, 2002.
- 5) 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, Vol. 2, pp. 77~82, 土木学会, 2003.
- 6) 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, 海洋開発論文集, Vol. 19, pp. 617~622, 土木学会, 2003.
- 7) 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.

(2003. 9. 30受付)