

水平管内気液二相スラグ流の 流動特性に関する研究

STUDY ON FLUIDITY CHARACTERISTICS OF LIQUID-GAS TWO-PHASE
SLUG FLOW CAUSED BY COMPRESSED AIR IN HORIZONTAL PIPELINE

小川元¹・田崎道宏²・落合実³・遠藤茂勝⁴

Hajime OGAWA, Michihiro TAZAKI, Minoru OCHIAI 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学生会員 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)

³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)

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)

In case of recent marine construction works and coastal zone development, the air transportation which used compressed air became used for the conveyance of dredged mud. So far, we examined the effect of compressed air at long distance conveyance. And then, we are proceeding with the research to solve a problem that is the efficient transportation in the actual scale of construction work. We are experimented which used water so far, but it did the examination which used viscosity liquid newly flow material. This paper describe about moving velocity, pressure gradient, pressure fluctuations and passage period of slug flow between water and viscosity liquid.

Key Words : *Slug flow, two-phase flow, viscosity liquid, conveyance*

1. はじめに

これまでの空気輸送に関する研究は、工場内での粉体や粒体の輸送を想定したものが主で、比較的小規模で口径が小さく短距離の輸送が対象であった。しかし最近、空気混入による粘性摩擦の低減効果を利用して、浚渫土砂など高濃度の軟泥の輸送などに応用されている。余水処理の問題が大幅に解消されることや粘性摩擦の低減による所要動力の軽減が図れるなどの利点が多く、高濃度の軟泥を輸送することに対し有効な方法である。しかし、これまでの研究とは異なる比較的長距離で大口径の空気輸送に関する研究はきわめて少なく、空気輸送の有効性を考えた場合、これらの混相流としての現象を解明することは意義があると考えられる。

高濃度軟泥の輸送に関する研究として、岡山ら¹⁾²⁾は、垂直管輸送について空気混入軟泥の基本的流動と損失、輸送系への影響等を調べ、また水平管路については、空気混入時の軟泥の流動特性の変化と流動抵抗に関する研究を行っている。一方、管路に圧縮空気を用いてスラグ流を発生させた輸送方式の研究としては、西川ら³⁾の研究があり、圧力損失の推算および高粘性流体と空気の気液二相流の生成、崩

壊について現地レベルの実験により検討した研究がある。

著者らは、輸送時における圧縮空気の効果と輸送効率等の課題について検討を加え、現地施工における効率的な輸送、搬送距離の延伸という課題の解決を目的として研究を行っている。気液二相スラグ流については、これまで水と圧縮空気の可視化実験による検討を行ってきたが、今回新たに、流動物質として高粘性溶液を用いた検討を行い、水を使った実験を基準とした流動特性の比較検討を行うことで、物理的な現象としての混相流の流動解析を試みた。

2. スラグ流の可視化実験

(1)スラグ流について

気液二相流における液体部分と気体部分をそれぞれ液相および気相と呼ぶが、本論文では水や水と粘性体の混合物を液相と表記することとし、また同様に空気部分を気相と表す。本研究で述べるスラグ流とは、図-1に示すように液体と気体が同時に連続的に管内に供給されると、液相が重力の作用で気体と分離し分離流となるが、その直後に液相の水深が増大して気相の通過断面が減少すると液相が塊と

なって突然吹き飛ばされて発生する流れである。この流れは液相と気相が交互に連続した一体の流れであり、きわめて速い速度で移動する。

(2) 可視化実験について

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、管路延長が50.0mおよび150.0mのケースについて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、崩壊の過程および流動過程における速度変動や圧力降下等について検討した⁴⁾⁵⁾。しかし、管路の総延長が管路内の現象を著しく支配することや、実用的な観点からの長距離輸送を考慮し、管路延長を600.0mとしてさらに検討を行った。

また今回は、粘度の高い水溶液を用いたスラグ流について検討を行ったが、特に粘性溶液と水との流動特性の比較に重点を置き、これまでの検討と同様にスラグ流の管内速度や管内圧力、通過周期について検討した。

(3) 実験概要

水の他に今回実験に用いた粘性水溶液は、水と水溶性高分子電解質CMC（カルボキシメチルセルロース）を、水：CMC=550kg：5kgの割合で水溶液としたものである。粘度は2.6~3.7dPa・s程度であり、水の約300倍の粘度を持つが、目視による限り流動状態は水とほとんど変わらない様子であった。

実験装置全体は図-1に示されるが、管路はこれまでの実験と同じ内径φ38mmの透明パイプを使用し内部の流動状況を確認した。水の実験では延長600.0m、CMC溶液の実験では延長150.0mとした。

CMC溶液の実験で管路延長を短くしたのは、実験に用いた管路の耐圧性と、粘性の増加による圧力の増大を考慮したものである。

水およびCMC溶液は、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流入する。また空気は、エアドライヤーで水分を除去した後、空気流量計で検定し、管内に供給される。液相は気相の上流側から連続的に供給され両相の合流点で混合流となる。

測定内容としては管内圧力、スラグ流速、スラグ流周期を同時に計測し、スラグ流速は10m区間の液相の平均管内速度で、スラグ周期は、各測定地点における液相個々の連続した通過時間間隔である。

水およびCMC溶液の各諸元の計測地点は表-1に示すとおりである。管内圧力は管路に取り付けた圧力計(0.00~0.49MPa)で計測し、液体および空気流量とともに連続したデジタルデータとしてパソコンに収録される。スラグ流速と周期は、圧力計設置箇所の上流で、目視により観測した。

水流量 Q_w 、CMC溶液流量 Q_c および空気流量 Q_a などの実験条件は表-2に示したとおりである。供給空気流量(Nℓ/min)は、気温0℃、1気圧(0.1013MPa)

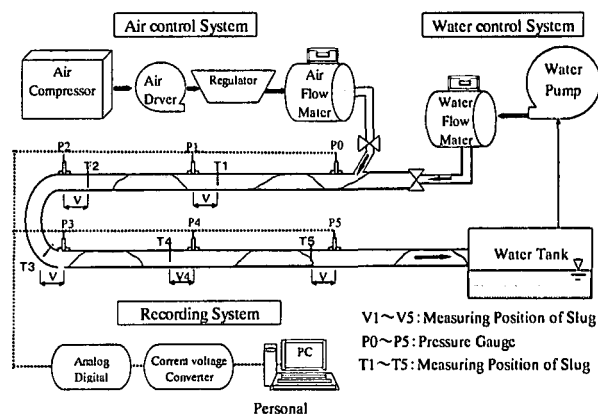


図-1 実験装置概略図

表-1 計測地点

計測項目	水による実験					
	管内圧力	P ₀ 0.0m	P ₁ 100.0m	P ₂ 200.0m	P ₃ 300.0m	P ₄ 400.0m
スラグ流速		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
スラグ通過周期		T ₁ 90.0m	T ₂ 190.0m	T ₃ 290.0m	T ₄ 390.0m	T ₅ 490.0m

計測項目	CMC溶液による実験				
	管内圧力	P ₀ 0.0m	P ₁ 10.0m	P ₂ 50.0m	P ₃ 100.0m
スラグ流速		V ₁ 5.0~ 15.0m	V ₂ 40.0~ 50.0m	V ₃ 90.0~ 100.0m	V ₄ 130.0~ 140.0m
スラグ通過周期	T ₀ 0.0m	T ₁ 10.0m	T ₂ 50.0m	T ₃ 100.0m	T ₄ 140.0m

表-2 実験条件

		水による実験の液相気相流量比					
		Q _w (ℓ/min)					
		12.0	20.0	28.0	36.0	44.0	52.0
Q _a (Nℓ/min)	60.0	0.200	0.333	0.467	0.600	0.733	0.867
	80.0	0.150	0.250	0.350	0.450	0.550	0.650
	100.0	0.120	0.200	0.280	0.360	0.440	0.520
	120.0	0.100	0.167	0.233	0.300	0.367	0.433
	140.0	0.086	0.143	0.200	0.257	0.314	0.371
	160.0	0.075	0.125	0.175	0.225	0.275	0.325
	180.0	0.067	0.111	0.156	0.200	0.244	0.289
	200.0	0.060	0.100	0.140	0.180	0.220	0.260
	220.0	0.055	0.091	0.127	0.164	0.200	0.236
	240.0	0.050	0.083	0.117	0.150	0.183	0.217
260.0	0.046	0.077	0.108	0.138	0.169	0.200	
280.0	0.043	0.071	0.100	0.129	0.157	0.186	

		CMC溶液による実験の液相気相流量比				
		Q _c (ℓ/min)				
		12.0	20.0	28.0	36.0	44.0
Q _a (Nℓ/min)	60.0	0.200	0.333	0.467	0.600	
	100.0	0.120	0.200	0.280		
	140.0	0.086	0.143	0.200		
	180.0	0.067	0.111	0.156	0.200	
	220.0	0.055	0.091	0.127	0.164	0.200
	260.0	0.046	0.077	0.108	0.138	

における流量に換算された流量を基準とした量で表示される。水を用いた実験は合計72ケース、CMC溶液の実験は合計23ケースで行った。

3. 実験結果

(1) 液相流量とスラグ流速度について

管路内を流動するスラグ流の速度と液相流量の関係について示したものが、図-2 aおよび図-2 bである。図-2 aは水の実験、図-2 bはCMC溶液の実験についての結果で、管路全長Lに対する測定位置 l の割合の同じもの($l/L=0.67$)を示している。横軸に液相流量 Q_w 、縦軸に各測定地点でのスラグ流速度 V_s をとり、気相流量をパラメータとした。

水の実験の結果によれば、気相流量が多い場合に液相流量が増加するとスラグ流速度は小さくなる傾向を示し、気相流量が少ない場合には液相流量の変化によるスラグ速度の変化はほとんどない。これに対し、CMC溶液の場合は水と比較して基本的に傾向は同じであるが、気相流量が多い場合には、スラグ速度の低下は小さくなっている。また気相流量が少ない場合には、水と同様で液相流量の変化に対してスラグ速度の低下する傾向はみられない。

このように気相流量の多少によってスラグ速度の変動傾向が異なることから、次に気相流量とスラグ流速度の関係について検討する。

(2) 気相流量とスラグ流速度について

気相流量とスラグ流速度について示したものが、図-3 aおよび図-3 bである。図-3 aは水の実験について、図-3 bはCMC溶液の実験についての結果で、これも同様に管路全長に対する測定位置の割合の同じものを示している。横軸に気相流量 Q_a 、縦軸には各測定地点でのスラグ流速度 V_s をとったもので、液相流量をパラメータとした。

水の実験の結果によれば、液相流量が少ない場合には気相流量の増加によるスラグ速度の増加の傾向は直線的であるが、液相流量が多い場合には気相流量の増加によるスラグ流速度の増加の割合は徐々に小さくなっていることがわかる。これに対しCMC溶液の場合は、水の場合の液相流量が多い場合と同様であり、スラグ流速度の増加の割合は徐々に減少する。スラグ流速度の増加の割合が直線的に変化しないのは、何らかの抵抗が生じているからであると考えられるので、次に管内圧力について検討する。

(3) 液相流量と管内圧力について

スラグ流が流動している際の管内圧力と液相流量の関係について示したものが、図-4 aおよび図-4 bである。図-4 aは水の実験、図-4 bはCMC

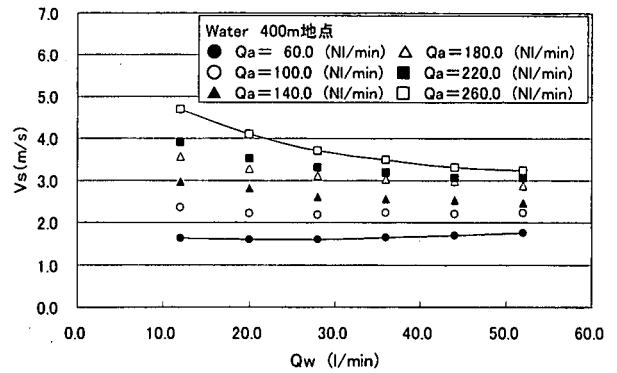


図-2 a 液相流量とスラグ流速度 (水)

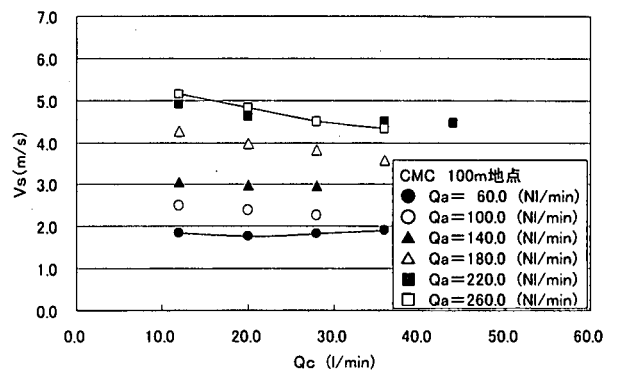


図-2 b 液相流量とスラグ流速度 (CMC)

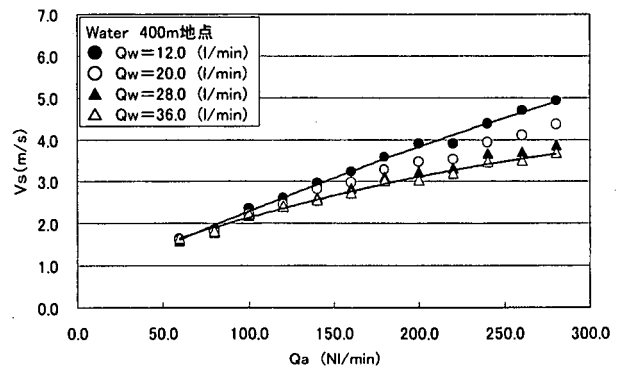


図-3 a 気相流量とスラグ流速度 (水)

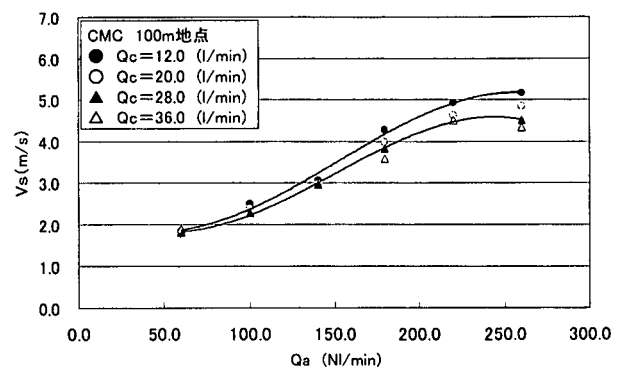


図-3 b 気相流量とスラグ流速度 (CMC)

溶液の実験についての結果で、これまでと同様に管路全長に対する測定位置の割合の同じものを示している。横軸に液相流量 Q_w 、縦軸には各測定地点での管内圧力値 P_n をとったもので、気相流量をパラメータとした。

水の場合の実験結果によれば、液相流量が増加すると管内圧力値も比例的に大きくなっている。その増加の割合は気相流量が少ない場合に比較して、気相流量が多い場合の方が大きくなっている。

これに対してCMC溶液の場合は、水の場合と同様に液相流量が多くなると、管内圧力が大きくなっている。しかし、気相流量による管内圧力の増減は明確ではない。そこで次に気相流量による管内圧力の変動について検討する。

(4) 気相流量と管内圧力について

気相流量と管内圧力値の関係について示したものが、図-5 aおよび図-5 bである。図-5 aは水の実験、図-5 bはCMC溶液の実験についての結果で、液体と空気の混合地点(圧送距離0 m)における結果を示している。横軸に気相流量 Q_a 、縦軸に管内圧力値 P_n をとり、液相流量をパラメータとした。

水の実験の結果によれば、気相流量の増加により管内圧力は比例的に大きくなっており、これは液相流量の増加による変化と同様である。また、液相流量が少ない場合に比較して、液相流量が多い場合は、気相流量の増加に対する管内圧力の増加の割合が大きくなっている。

これに対し、CMC溶液の場合は、空気流量の増加に対し必ずしも管内圧力が上昇しておらず、いずれの液体流量においても気相流量を増加していくと、気相流量140 l/min 付近から徐々に管内圧力は下がり、気相流量220 l/min で一様に管内圧力値が一番小さい値を示している。

このように、管内圧力には液相流量および気相流量ともに影響するものと推測される。ただし、CMC溶液では管内圧力を減少させる気相流量が存在するということが特徴として挙げられる。

(5) 液相流量とスラグ流周期について

管路内を流動する連続したスラグ流の流動周期について検討するため、各測点における液塊の通過時間間隔を測定した。液相流量とスラグ周期の関係について示したものが、図-6 aおよび図-6 bである。図-6 aは水の実験について、図-6 bはCMC溶液の実験についての結果で、管路全長に対する測定位置の割合の同じものを示している。横軸に液相流量 Q_w 、縦軸には各測定地点でのスラグ平均周期 T_s をとったもので、気相流量をパラメータとした。

水の実験の結果によれば、液相流量が増加すると

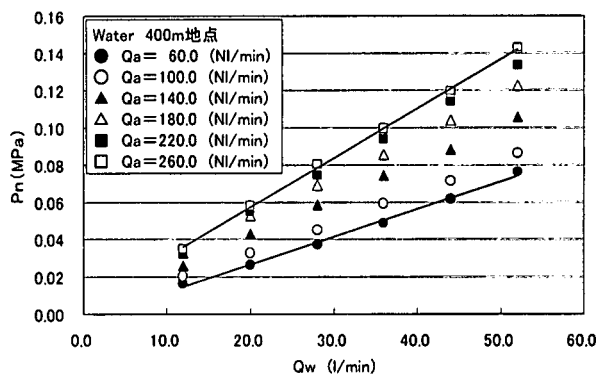


図-4 a 液相流量と管内圧力 (水)

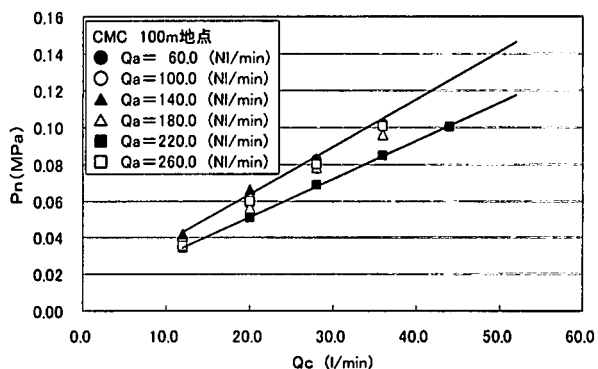


図-4 b 液相流量と管内圧力 (CMC)

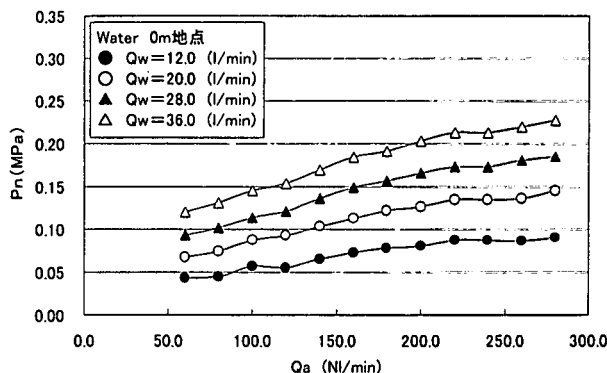


図-5 a 気相流量と管内圧力 (水)

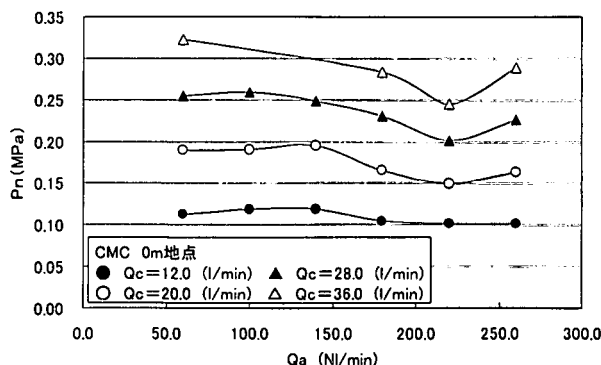


図-5 b 気相流量と管内圧力 (CMC)

スラグ流周期は短くなっている。また、気相流量の増減によるスラグ周期の変動は液相流量が少ないときにやや変動が大きい。これに対しCMC溶液の場合は、水の場合に比較して全体的に周期は短くなっているものの、液相流量の増加によって周期は短くなっている。周期は、管路内の水位がある水深になるとスラグ流が発生することと関連があり、液相流量が多くなればスラグ流の周期は短くなるという分布はその様子をよく示している。しかし、気相流量によるスラグ周期の違いは水およびCMC溶液ともに明確でないので、次に気相流量とスラグ周期の関係について検討する。

(6) 気相流量とスラグ周期について

気相流量とスラグ周期の関係について示したものが図-7 aおよび図-7 bである。図-7 aは水の実験、図-7 bはCMC溶液の実験についての結果で、管路全長に対する測定位置の割合の同じものである。横軸に気相流量 Q_a 、縦軸に各測定地点でのスラグ周期 T_s をとり、液相流量をパラメータとしている。

水の結果から、液相流量が $Q_w=12.0\text{ l/min}$ の場合には気相流量の変化に対して、極値を持つ傾向を示している。一方、液相流量を増加させると、気相流量を変化させてもスラグ周期はほぼ一定の値となる。

これに対しCMC溶液は、水の場合に比較して全体的にスラグ周期は短いが液相流量の増減によるスラグ周期の変動はきわめて小さく、安定している。

(7) 管内圧力と容積流束の関係

(3)および(4)の結果から、管内圧力の挙動は気相流量および液相流量により変化し、水とCMC溶液では様相を異にする。そこで圧縮された空気の膨張についても考慮した容積流束により判断する。管路のそれぞれの地点によって異なる静圧から補正した容積流量を断面積で除すことにより求められる容積流束 J_T と管内圧力 P_n の関係について調べたのが、図-8 aおよび図-8 bである。ここで全容積流束 $J_T = J_c + J_l$ であり、 J_c および J_l は、補正した気相流量および液相流量を管断面積で除して求められるそれぞれの容積流束である。横軸には全容積流束 J_T を縦軸には管内圧力 P_n をとった。

水の場合管内圧力は容積流束の増加により大きくなり、気相流量および液相流量どちらの影響も受けていることがわかる。これに対しCMC溶液の場合は管内圧力の増加は気相流量による変化が少なく、液相流量の影響を大きく受けていることがわかる。

(8) スラグ流速度と容積流束の関係

(1)および(2)の結果から、スラグ流速度は、液体流量を増加させるとやや小さくなり、空気流量を増加させると大きくなるという結果が得られた。これ

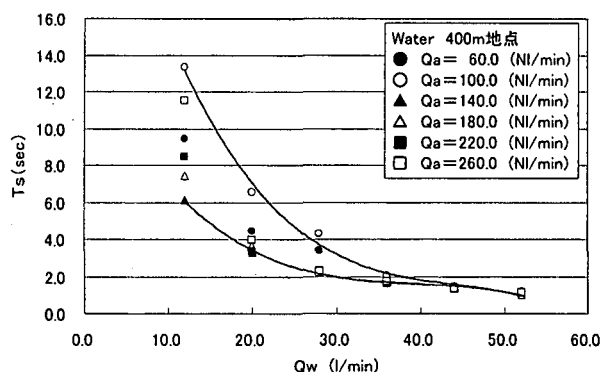


図-6 a 液相流量とスラグ周期 (水)

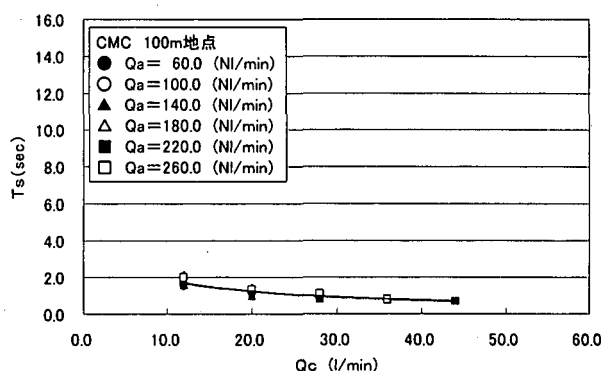


図-6 b 液相流量とスラグ周期 (CMC)

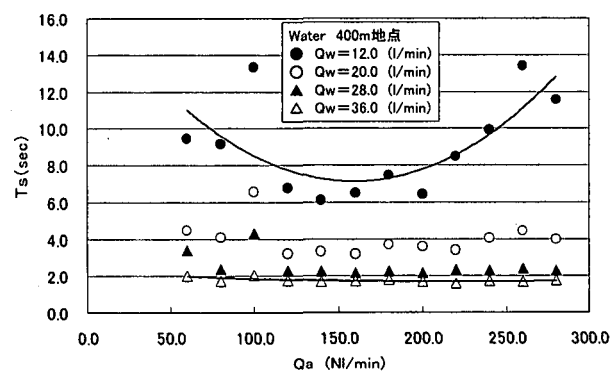


図-7 a 気相流量とスラグ周期 (水)

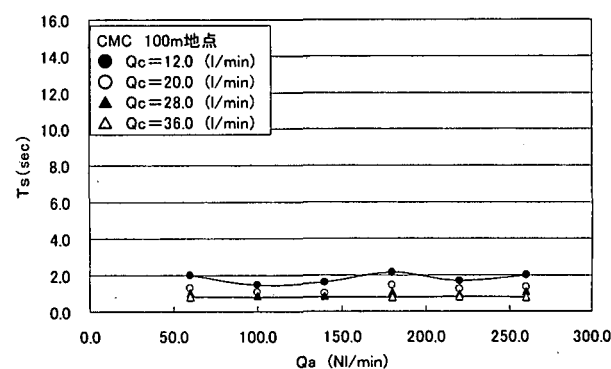


図-7 b 気相流量とスラグ周期 (CMC)

は管路内に供給された圧縮空気の膨張によるものと推測され空気輸送の特徴ともいえる。そこで全容積流束 J_T と実験で測定したスラグ流速 V_s の関係を示したものが図-9である。

横軸には全容積流束 J_T をとり、縦軸には実測のスラグ流速 V_s を取って示した。

一般的にスラグ流速は気液の供給流量と管路の断面積から求めた全容積流束よりも速くなると言われている。Hughmark⁶⁾は、水平管路におけるスラグ流速 U_B とスラグ容積流束 J_T の関係を次式のように示している。

$$U_B = C_2 \times J_T \quad (C_2 = \text{const}) \quad (1)$$

また、Gregory⁶⁾らによると $C_2 = 1.35$ であるとしている。今回の実験結果から、水の場合 $C_2 = 1.36$ 、CMC溶液の場合 $C_2 = 1.56$ となり、水の場合にはGregoryの結果と同様な結果が得られた。

4. まとめ

本研究により、長距離管路内に水・粘性溶液・空気を混入して発生させたスラグ流動時の液相・気相流量の影響やスラグ流速、管内圧力、スラグ周期について以下のようにまとめられる。

- (1) スラグ流速は、液相流量の増加により小さくなり、気相流量の増加により大きくなる。また容積流束とは比例的な関係にあるが、圧送物質によりその増加割合は異なる。
- (2) 管内圧力は、水とCMC溶液において様相を異にしている。すなわち、水の場合、液相流量および気相流量の増加はともに管内圧力の上昇に結びつくが、CMC溶液では気相流量の増加が必ずしも管内圧力の上昇につながらない。このことは容積流束との関係からも明らかである。
- (3) スラグ流周期は液相流量に依存する。

最後に本研究は日本大学学術助成金「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) 岡山, 鮎貝, 鈴木, 福本: 水平管における空気混入軟泥の流動特性, 港湾技術研究所報告, Vol.30, No.2, pp533-557, 1991.
- 2) 岡山, 鮎貝, 鈴木, 福本: 水平管における空気混入軟泥の流動特性(第2報), 港湾技術研究所報告, Vol.31, No.3, pp97-126, 1992.
- 3) 西川, 橋本, 片山, 武居, 松前, 堀井: 混気圧送液泥輸送のシステムにおける液相スラグの流動現象-液相スラグの生成・成長・崩壊-, 混相流, 7巻, 4号, pp335-343, 1993.

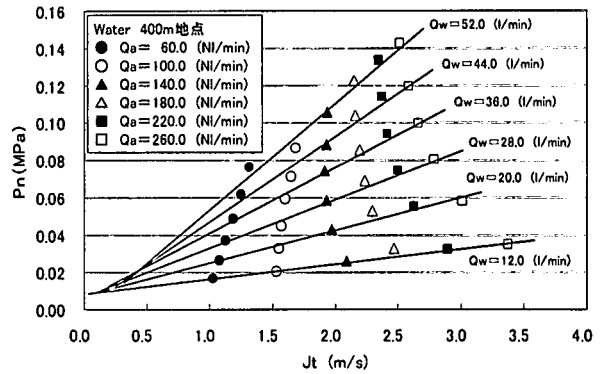


図-8 a 容積流束と管内圧力 (水)

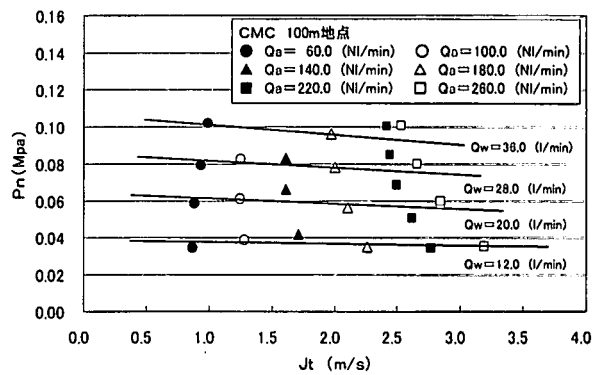


図-8 b 容積流束と管内圧力 (CMC)

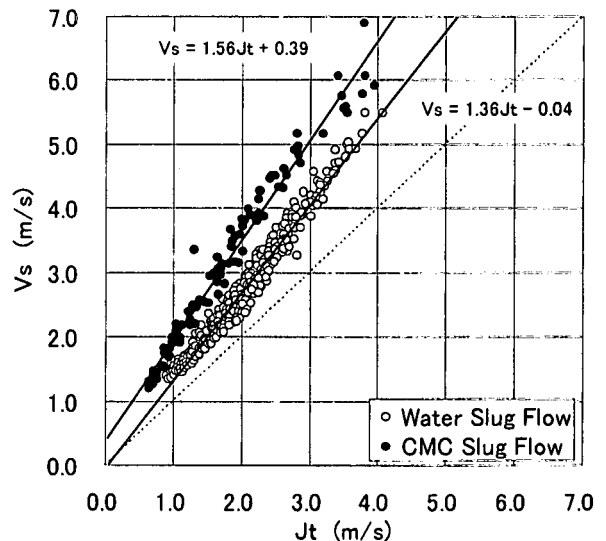


図-9 容積流束とスラグ流速

- 4) 小川, 田崎, 落合, 遠藤: 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, 土木学会海洋開発論文集, Vol.17, pp625-630, 2001.
- 5) 小川, 田崎, 落合, 遠藤: 水平スラグ流輸送における圧力, 速度特性について, 土木学会海岸工学論文集, Vol.48, pp1006-1010, 2001.
- 6) 日本機械学会編: 気液二相流ハンドブック, コロナ社, pp260-271, 1989.