日本大学大学院研究生	学生会員	○後藤	吉範
日大生産工学部	フェロー会員	遠藤	茂勝

1. はじめに

近年、生活排水の一部などが湖沼などの水域に流出 することで、富栄養化しそのことで、アオコが大量発 生している。そのため、飲料水の取水源となっている 水域の水質に著しい影響が出始め、このような異常に 対する対策が急がれている。そこで、早急に回収し処 理をしなければならないがアオコ混じりの水は、粘度 が高いことから流動性が悪いため、このような問題に 対して最近では輸送媒体として水を使わずに空気を用 いた輸送が試みられている。これは、空気の混入によ り管路内の流動中の粘性に関わる抵抗力が低減され、 粘度の高い物質の輸送に適すると言われている。空気 と輸送対象物を管路内に同時に混入することで、スラ グ流が発生するので効率の良い輸送が可能となる。

スラグ流とは、液相と気相の間欠した流れである他、 気相と液相の分離が容易であり低圧力で高速での長距 離輸送ができる。スラグ流としてアオコを輸送するこ とで、管底に滞留する輸送媒体を取り込むときに、高 速撹拌流が起こることでアオコなどの群体藻類の崩 壊・ガス胞の破壊などが促進できるメリットもある。 また、タンカーの空荷の時に積み込むバラスト水のオ ゾンガスで殺菌する時にスラグ流を応用することもで きる。

しかし、従来の研究では冷却装置など小口径短距離 の機械分野での研究が多く、長距離を目的とした研究 はあまりされてはおらず未解明の部分がある他、間欠 流であるため気相と液相の界面が複雑な流動特性を持 っている。そこで本研究では、長距離におけるスラグ 流の基本的な流動特性を把握し、清水と粘性の高い CMC 溶液を使用し流動する際に起こる損失について 検討した。

2. 実験概要及び実験装置

本研究では長距離スラグ流に関する研究を行うため、 高速のスラグ流を可視化することなどを配慮し Fig-1

キーワード:高粘性、スラグ流速度、損失

〒272-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1 TEL047-474-2445 連絡先



Fig-1 実験装置概要

Table-1 実験条件

CMC			清水			
Qca	Qc	Qa	Qw	Qa	Qw	
(N@/min)	(ℓ/min)	(N@/min)	(ℓ/min)	(N@/min)	(ℓ/min)	
60.0	4.0	40.0	12.0	140. 0	12.0	
	8.0		20.0		20.0	
	12.0		28.0		28.0	
80.0	4.0		36.0		36.0	
	8.0		44.0		44.0	
	12.0		52.0		52.0	
4.0 100.0 8.0	4.0		12.0	180_0	12.0	
	8.0		20.0		20.0	
	12.0	60.0	28.0		28.0	
<u>4.0</u> 8.0	00.0	36.0	100.0	36.0		
	8.0		44.0		44.0	
120.0	120.0 12.0		52.0		52.0	
	16.0	100. 0	12.0			
	20.0		20.0			
140.0	4.0		28.0			
	8.0		36.0			
	12.0		44.0			
	16.0		52.0			

プを用い、気相である空気と液相である水を同時かつ 連続的に供給することでスラグ流を発生させる装置と した。気相と液相を同時に供給するとそれぞれ上下に 分離し、その後、液相は停滞し液位が上昇することに に示すような、管内径 d=38mm の透明なビニールパイ より気相の通過する面積が狭くなり、吹き飛ばしが起 こることによりスラグ流が発生する。また、実験に使用した CMC とはカルボキシメチルセルロースと呼ばれるゲル状の有機性粘性体である。清水と粉末状の水溶性高分子 CMC を清水: CMC=100:1 の割合で水溶液としたものである。CMC は清水と比べて密度は変わらないが、粘度は約 300 倍の値を持っている。

気液 Qw、Qc と気相 Qa の実験条件は Table-1 に示し、 管路全長 L は清水において 150m、620m、CMC におい て 150m、600m で測定を行った。測定内容は、スラグ 流速度 $V_1 \sim V_6$ の6 地点、圧力は $P_0 \sim P_6$ の7 地点で測 定した。スラグ流速度は速度が速いため、測定方法と して光透過量測定装置を考案して計測した。この装置 はアクリル板を箱状に組み合わせ、赤色 LED と受光セ ンサーをアクリル板の側面に 1.0m の間隔に取り付け た物を2ヵ所に配置し、光の透過量からスラグを判別 し速度や、気相・液相の長さなどを検出した。

3. 実験結果及び考察

3.1 スラグ流の速度について

長距離スラグ流は流動に伴い気相の膨張により速 度が増加する傾向がある。そのため、基本的な流動特 性についてまず検討を行うため、横軸に無次元化した 流動距離0/L、縦軸にスラグ流速度 V,をとり、溶液の 違う場合でのスラグ流速度について検討したものが Fig-2 である。これによれば、清水および CMC 溶液い ずれの場合も管内を流動するに従い、スラグ流速度は 増加していることがわかる。また、入口付近では CMC 溶液より清水におけるスラグ流速度が大きいが、CMC 溶液は出口付近に近づくにつれて急激に増加している ことがわかる。これは、液相の粘性がスラグ流速度に 影響を与え、粘度が高くなると流動初期のスラグ流速 度は小さいが増加割合は大きくなると考えられる。つ まり、粘度が高いとスラグの流動性が悪いために気相 が圧縮され初速度は遅くなる。次に管内の圧力につい て検討した。

3.2 管内圧力について

清水、CMC 溶液の速度増加は、気相の膨張を挙げ られるが、これは管路内部の圧力変化を伴うものと考 えられるため、距離に対する圧力変化についても検討 した。横軸に各地点距離を管路全長で無次元化した0/L をとり、また縦軸に管内圧力 *P* をとったものが Fig-3 である。これによれば、清水および CMC 溶液いずれ の場合も管内圧力は流動距離に対し降下していき、出









ロ付近では、ほぼ同じ値となっている。全長が長くな ると、液相流量が多くなりスラグ個数が増え、抵抗が 大きくなるので、全長が長くなると圧力が大きくなる と考えられる。また、CMC は清水に比べ入口付近では、 圧力が高いことが分かる。これは、粘度が高いと管と のせん断力が高くなり摩擦損失が大きいため、管内圧 力の増加につながっていると考えられる。

3.3 容積流束とスラグ流速度について

スラグ流速度と気相の膨張との関係について、容積 流束を用いて検討する。容積流束は、気液流量から算 出され以下のように定義される。

$$J_G = \frac{Qa}{A}, J_L = \frac{Q_W}{A} \quad J_T = J_G + J_L \tag{1}$$

ここで、Qa:気相流量 Qw:液相流量

また、Dukler and Hubbard はスラグ流速度 *V*_sと容積流 束について次のように定義している。

$$Vs = C_2 J_T \tag{2}$$

ここで、 C_2 :係数 J_T :容積流束

しかし、Zuber らは水平管における静水圧を考慮した、 ドリフト速度 V_d を提案している。また、Aziz らの実験 によりドリフト速度 V_d の存在が確認された V_s は以下 の式で示した。

$$Vs = C_2 J_T + V_d \tag{3}$$

ここで、*V*_d:ドリフト速度

これらから、スラグ流速度と容積流束と関係を検討した。 J_T は供給流量を断面積で徐したものであり、これらから、容積流束 J_T のとスラグ流速度 V_s を示した。横軸にスラグ流発生地点 0m 地点の容積流束 J_T の、縦軸にスラグ流速度 V_s をとり、すべての条件について示した。CMC の管路長 600m については Fig-4、清水の管路長 620m については Fig-5 に示している。これらの結果よれば、CMC、清水とも地点ごとの結果はそれぞれ別々の傾きを示しており、また流動距離が進むにつれて傾きが徐々に大きくなることが確認でき、一定ではないことが確認できる。

次に、気相の膨張の効果を検討するために各地点の 容積流束について検討を行った。横軸に各地点におけ



全長 L=620m

•Vs₁: $\ell=100m$

▲Vs₃:**ℓ**=300m

■Vs₅:ℓ=500m

0.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0

 $J_{T0}(m/sec)$

Fig-5 容積流束とスラグ流速度(清水)

1.0

0.5

0.0

J_{T0}:ℓ=0m

OVs2:l=200m

 $\Delta Vs_4: l=400m$

 $\Box Vs_6: l=600m$



0.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 $J_{Tn}(m/sec)$

Fig-7 容積流束とスラグ流速度(清水)

る圧力を考慮した容積流束 J_{Tn} 、縦軸にスラグ流速度 V_s をとり、CMC の管路長が 600m の図を示したものが Fig-6 であり、清水の管路長が 620m の場合を示したも のが Fig-7 である。これを見ると、CMC、清水ともほ ぼ一直線上にのっていることが確認できる。また、 CMC の C_2 の値が清水の C_2 の値より大きくないってい ることが確認できる。

3.4 スラグ流分布

これまで、気相・液相の長さの測定が困難となって いたが光透過量測定装置を使うことで気相・液相長の 測定が可能となった。このことから、気相・液相の位 置・個数を推算した。スラグ流は、気相・液相の間欠 した流れであることから、交互に表示される。スラグ の個数は気相先端部から液相後端部の長さを1ユニッ トとし1つの個数とした。これらから気相・液相の位 置・個数の流動分布を示したものが Fig-8 と Fig-9 であ る。Fig-8 は気相流量 Qa=100(Nℓ/min)、液相流量 Qw =12(ℓ/min)の CMC の流動分布を表したものであり、 同様に清水の流動分布を表したものが Fig-9 である。 ここでは、色が塗られてあるのは液相である。これを 見ると、入口付近では均等に気相、液相と流動してい るが、距離が進むことでスラグが崩壊し気相、液相が 不均等に流動していることが確認できる。また、出口 付近では崩壊したスラグが管の底部に停滞し、次のス ラグに吸収されるためスラグの長さが長くなっている ことも確認できる。

3.5 損失について

スラグ流では、気相と液相の間欠流で気相の損失は ないが液相の損失が生じるために損失係数 f を算出し た。スラグが流動する上で、損失がかかるのは液相だ けであることから、気相は無視する。スラグユニット の損失係数 f を算出する上で、Darcy-Weisbach の式を 適用した。この結果を示したものが Fig-10 である。気 相流量 Qa=100(N@/min)、液相流量 Qw=12(@/min)の CMC と清水の損失を示してある。これを見ると、清水 に比べて CMC が損失の係数が大きいことが確認でき る。また、CMC は流動距離が進むにつれて損失係数が 徐々に小さくなっていることが確認できる。これは、 Fig-8 で見て取れるように入口付近ではスラグは均等 に流動しており、距離が進むにつれてスラグが他のス ラグに取り込まれスラグの長さが長くなり、速度が速 くなるので損失が大きくなると考えられる。 4.まとめ

清水における圧力とスラグ速度の基本的な傾向は 変わらなかったが、CMC の場合は粘性の影響により管 壁での摩擦力が大きくなり圧力が高くなることが分か った。このため、スラグ流速度にも影響を与えことで、 C2の値も変化することがわかった。また、流動分布が 作成できたことにより位置・個数が推算されるので損 失に関わる損失係数の推算を試みた。

参考文献

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.
山田泰正,落合実,遠藤茂勝: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、土木学会海洋開発論文集 No.23, pp315-32,2007









Fig-9 管路内流動分布図(清水)

Qa/Qw=8.33

