日大生産工(院) 〇山田 泰正 日大生産工(院) 後藤 吉範

## 日大生産工 遠藤 茂勝

1. はじめに

湖沼において、生活排水に含まれる窒素や リン酸等による富栄養化で藍藻類が大発生す るアオコと呼ばれる現象が起きている。アオ コを構成する藍藻類は水面に層をなして広が り景観を悪化させ、過剰繁殖により腐敗し、 環境問題となっている。このため、水資源の 確保や環境維持のためのアオコの回収処理は 急務である。

高濃度に藻類が混じった溶液は、流動性が 悪いため、回収後の輸送方法として圧縮空気 を用いた管路輸送が試みられている。これら 輸送物は圧縮空気と同時に管路内に供給する ことでスラグ流が発生し長距離輸送が可能と なる。群体藻類の輸送においては、スラグ流 の発生により高速攪乱流となるアオコの結合 群体の崩壊を促進させるとともに、管路内の 圧力変動を伴う脈流によって細胞の破壊など も期待できる。またこの方法の応用として外 来生物種の混入が問題となっているタンカー のバラスト水処理における、オゾンガスを混 入した高圧殺菌処理法への応用などがある。

気液スラグ流はもっとも一般的な気液二相 流の流動様式で、スラグ流は気相と液相が交 互に流れる間欠流であり、空気と輸送媒体の 分離が容易であるほか、管路内での粘性摩擦 の低減効果によって、低圧力で高速な輸送が 可能などの利点がある。

このような輸送を実現するためには長距離 管路における現象の把握が必要である。実験 の観察によれば、スラグ流の速度は吐出口に 近づくほど加速されるといった特徴の流れで ある。既往の研究においては、短距離による 実験がほとんどのため、スラグ流速度が気相 の膨張により加速され、距離によってスラグ 流速度が変化するということが述べられてい ない。一方、Taitel・Barnea や小川らによって スラグ流の速度が増加することが指摘され、 その理由は空気の圧縮性に起因することが示 されている。しかし、このような気相の効果 についてはまだあまり明らかになっていない。 そのため、著者らはこれまで短距離管路と長 距離管路における気液スラグ流の流動の違い などを明らかにする目的とした管路長の異な る管路を用いて気液二相流の実験を行い、管 路内の流動について検討を行っている。

本研究においては、気液スラグ流の数値シ ミュレーションを行うときの粘性摩擦損失係 数などのパラメータを決定するためのステッ プとして、速度、圧力および気液相長の流動 距離および気液流量による傾向を把握し、こ れらの結果から管路内における気液スラグの 位置を示す管路内分布を作成することを目的 とし、さらにこの分布から粘性摩擦損失係数 を算出し検討した。

## 2. 実験装置

実験装置は Fig-1 に示すような管径 *d* = 38mm の透明管路を用い、長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、空気流量計を通して 管路内に供給した。また液相である輸送媒体 はタンクからポンプで流量計を通し供給した。 気相と液相は、同時にかつ連続的に管路内へ 供給され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て管路内圧力 を測定した。

スラグ流は流動速度が速いので、目視によ る測定は困難である。このため本研究におい ては Fig-2 に示すような光透過量測定装置を 考案した。この装置は透明なアクリル板を箱 型にし、管の中央の高さとなる位置に LED と

Study on Fluidity Characteristic Distribution of Intermittent Slug Flow Yasumasa YAMADA, Yoshinori GOTO and Shigekatsu ENDO 光の受光部であるセンサーが 1m 間隔に取り 付けられていて、パイプの中心部に光が照射 されている。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、液相部の通過が 確認できる。本実験においてはこの装置を用 いてスラグ流速度、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 2kHz にて測定を行った。

実験条件は Table-1、2 に示される。気液流 量による条件を 30 条件、管路長条件を 6 条件 とした。Table-1 における気相フルード数  $Fr_G$ 、 液相フルード数  $Fr_L$ は、気相流量 Qa、液相流 量 Qw を用いて表し、式(1)により求めた。

$$J_G = \frac{Qa}{A}, J_L = \frac{Qw}{A} \qquad Fr_G = \frac{J_G}{\sqrt{gd}}, Fr_L = \frac{J_L}{\sqrt{gd}}$$
(1)

ここで Qa: 気相流量 Qw: 液相流量

*J<sub>G</sub>*:気相容積流束 *J<sub>L</sub>*:液相容積流束 *A*:管路断面積 *d*: 管路径 *g*:重力加速度 光透過量測定装置の設置箇所は *V*<sub>1</sub>∼*V*<sub>6</sub>の 各 6 地点で、また圧力の測定は *P*<sub>0</sub>~*P*<sub>6</sub>の各 7 地点に設置した。

3. 実験結果及び考察

管路内の分布及び粘性摩擦損失を算出す るためには速度、圧力及び気液相長の特性 について把握する必要があるので、実験結 果を用いて検討する。

流動距離に対する速度の特性について示 したものが Fig-3 である。これは横軸に各測 定点 0 と管路長 L の比である 0/L、縦軸にス ラグ流速度 Vs をとったもので、管路長をパラ メータとした。これよりどの管路長の条件に おいても管路吐出口(0/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 ほどスラグ流の加速度が大きくなる。本実験 において最も管路長が短い管路 L/d=1842 で 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 と比べ初期の流動速度は遅いが、吐 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。

同じ気液流量ならばスラグ発生間隔である 発生周期が等しいので、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。液相流量と圧力に



Fig-1 実験概要図



Fig-2 光透過量測定装置

Table-1 実験条件(気液流量)

$Fr_G/Fr_L$		$Fr_L$								
		0.29	0.48	0.67	0.87	1.06	1.25			
Fr <sub>G</sub>	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			

Table-2 実験条件(管路全長および測点)

<i>L</i> (m)	L/d	Q/L							
		$P_0$	$P_1, V_1$	$P_2, V_2$	$P_{3}, V_{3}$	$P_4, V_4$	$P_5, V_5$	$P_6, V_6$	
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	



ついて検討を行ったものが Fig-4 である。こ の図は横軸に吐出口からの距離 Lexit と管径 d の比である Lexit/d をとり、縦軸に管内圧力 P を示したもので、吐出口において圧力は0と なるので、吐出口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であることが わかる。このことからスラグ個数は管路長に よって比例し、それに伴って圧力が増加する ことが分かる。つまり管路長を長くなる場合、 この曲線を延長することにより予測が可能と なる。

次に気液相長の特性について示したものが Fig-5 であり、横軸に流動距離の無次元量0/L、 縦軸に気相長 l<sub>a</sub>と液相長 lsをとったものであ る。この結果から、気相については流動距離 が長くなるほど気相の膨張により気相長が長 くなり、吐出口付近において気相の膨張がよ り顕著になり、供給口付近の約 2~3 倍の長さ になっている。また、液相についても長くな っているが、これは吐出口付近に進むほど短 い液相は気相の膨張効果により速度が増すた めに崩壊が起こりやすくなり管路底部に滞留 するため、安定して流動している液相に吸収 される。このために数十 cm から長いもので lm 程度長くなるものと考えられる。

これらの結果を用いて管路内のスラグ位置 を示した流動分布を求めた。スラグ流は気相 と液相の間欠流であるので気相と液相が交互 に配置される。またスラグユニットは1対の 気相と液相とする。供給口からのスラグユニ ットに番号をつけ、気相および液相長さは Fig-5 における曲線から求めることとし、Q/L を要素とした関数形とした。また、配置した 気相及び液相の座標がℓ/L>1となる1つ前の ユニットが最後のユニットとし、このユニッ ト数が管路全体におけるスラグ個数となる。 この結果を示したものが Fig-6 である。これ は、L/d=16316 における結果であり、図中に おける数字は気液供給口付近からの距離を示 し、気相には色を付けた。このように管路内 における気相液相を再現が出来た。

この結果より気相の膨張におけるスラグ個数に対する割合について、ヒストグラムを作成した。それを示したものが、Fig-7 である。



Fig-6 管路内の流動分布

横軸に気相長を 50cm おきの度数にとり、縦 軸にスラグ個数に対する頻度をとった。この 結果から、気相が短いところはすべて供給口 付近に集中していて、そのスラグの個数は多 い。また、気相が膨張すると同時にスラグ個 数が減少していることが分かった。

供給口付近において供給された気相は管の 上部を流動し、液相は管の底部に滞留する分 離流となっているが、滞留している液位の上 昇により、気相の通過部分が閉塞されて液相 を吹き飛ばす現象が発生しスラグ流が形成さ れる。また、気相と液相は一定量を連続的に 供給されているので、液位の上昇速度および スラグが発生する周期はほぼ一定と考えられ る。Fig-6、7の結果より供給口付近から100m (l/L=0.161)付近における気相と液相の間隔 はほぼ等しいことから、スラグの発生周期の 間隔で流動していることが分かる。また、こ れ以降において、気相の膨張が徐々に顕著に なるため液相と液相との間隔が徐々に長くな り、この付近から長距離管路においてスラグ 流速度の上昇が始まる。この気相の膨張は吐 出口に近づくほど大きくなりこれと同時にス ラグ流速度の加速が大きくなる。

気液相の位置および、長さを算出できたの でこの結果より粘性摩擦損失を算出する。管 路内の圧力は Fig-4 の曲線を使用した。スラ グユニットにおいて、粘性摩擦が存在してい る部分は液相のみであり、気相における圧力 勾配は無視した。しかし、Fig-4における圧力 は流動距離によって曲線的に低下しているの で、気相を含めたスラグユニットの長さにお ける圧力降下は液相の粘性摩擦とし摩擦損失 係数 fs を以下のように算出した。また、流動 距離がすすむと速度が増加するので、fs は管 路内の液相すべてに算出した。

$$fs = \frac{\Delta P}{\rho g} \cdot \frac{d}{ls_n} \cdot \frac{2g}{v_n^2}$$
(2)

ここで、

ΔP:n番目のユニットにおける圧力降下
ρ:水の密度 g:重力加速度 d:管径
ls<sub>n</sub>:n番目の液相長

vn:n番目液相のスラグ流速度

この結果について示したのが Fig-8 であ る。これは横軸に単相流における f、縦軸に 式(2)から求めたfsをとり比較したものであ る。両者を比較すると、ほぼ等しいことが 分かる。ただし、実験観察により液相前端 部において管底部の液膜部が液相内に巻き 込みがあり、この損失分を考慮すると fs は



fと比べ低くなるものと考えられる。 4. まとめ

スラグ流は流動距離が進むと気相の膨張 により速度が増加し圧力は低下する。また、 気液相の位置及び流動分布を作成した結果、 気相の膨張は0/L=0.161 近辺を境に徐々に起 こり、0/L=0.500 より大きいところでは著しく なるため、スラグ流速度の増加が大きくなる と考えられる。

気液スラグ流における摩擦損失係数fs は液 相部内における気泡の混入などにより液相ボ イド率の低下および、液相前端部における液 膜部が液相内に吸収されるときに起こる加速 による損失が考えられるため、実際は単相流 の摩擦損失係数fの小さい値なるものと考え られるが、これらの損失をすべて足すとfs と 等しくなるものと考えられる。

## 参考文献

山田泰正、落合実、遠藤茂勝(2007):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、 pp315-320