

気液混相流の加速損失の推算について

日大生産工（院） 村上 康博 日本生産工（院）山田 泰正
日大生産工 遠藤 茂勝

1. はじめに

相は姿形や状態を意味する言葉で、物質は気相・液相・固相に大別することができ、これら各状態が混合した流体を混相流と呼ぶ。また、管路中に気相、液相の二相が混在した状態の流れは、気液二相流と分類することができ、他にも二相流だけでなく固気液三相流などが存在する。このうち気液二相流は、浚渫工事における軟泥の輸送や、発電所のエネルギー関連装置、化学工業装置など広汎に用いられている。そのため、気液二相流に関する研究は急速に進展している。しかし、冷却装置を中心とした小口径で短距離の研究が多く、軟泥輸送で使用されているような大口径で長距離輸送を対象としたものではない。また、管内の現象がきわめて複雑であり、長距離管路内において液相速度増加が著しく見られ、圧縮空気の膨張による効果や流動にともなう圧力の低下により、各種損失について検討をする必要がある。よって本研究では液相の先端部における加速損失に着目し、この加速損失の推算を行いその評価を行なった。

2. 実験概要

本研究で使用した装置を Fig.1 に示す。管路延長 $L=600\text{m}$ 、管内径 $d=38\text{mm}$ の透明なビニール管を用いて可視化実験を行った。気相である圧縮空気はエアコンプレッサーから供給され、エアドライヤーで水分を除去した後、空気流量計を通し管内に流入する。一方、液相である清水はタンクからポンプによって供給され、流量計を通り管内に流入する。気相

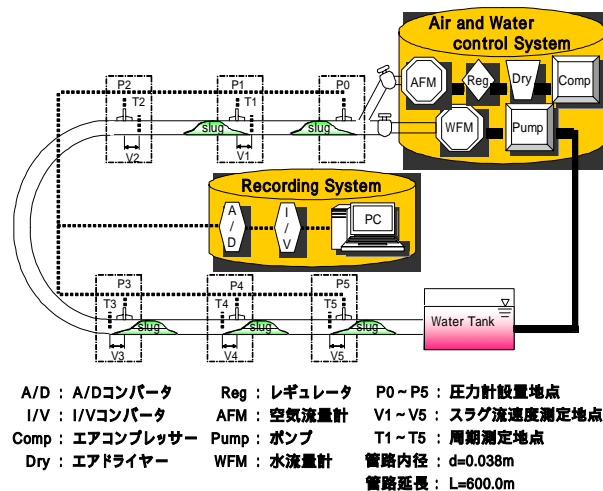


Fig.1 概略図

Table.1 実験条件

気液流量比 (Q_w/Q_a)	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

と液相は同時かつ連続的に供給することから混合流が発生する。また、実験条件は Table.1 に示す気液流量比の 72 条件とした。測定は、スラグ流速を $V1\sim V5$ 、通過周期を $T1\sim T5$ の各 5 地点、管内圧力を $P0\sim P5$ の 6 地点で測定を行った。

3. 実験結果および考察

スラグ流の基本的な特性として流動距離によるスラグ流速と管内圧力について検討を

行ったものが Fig.2 である。これは横軸に測定地点 L, 縦軸にスラグ流速 V_s , 管内圧力 P をとり、流動距離による変化について示し、図より気液流量比の異なる条件を載せている。すべての条件において流動距離が進むとスラグ流速が増加し、またスラグ発生地点において圧力が高く、流動距離が進むと圧力が低下する。これは流動距離が進むと気相が徐々に膨張し速度が加速するものと考えられる。また圧力は、気相が膨張し出口において大気圧に近づくため低下することがわかる。これより、スラグ流速の増加および圧力低下は、気相の膨張が起因となっているものと考えられる。

長距離管路において流動距離が進むと速度増加が見られるが、それにともない圧力が低下している。そのために、エネルギー損失について検討を行ったが、管路とスラグ上部の摩擦のみの損失とは考えられないため、液相スラグ先端部における圧力損失について検討することとした。

3.1 スラグ流モデル

液相の加速損失について検討するために Hubbard らの scooping model を適用した。このモデルは Fig.3 に示す通り、液相スラグ部先端から液相スラグ部より流動の遅い液膜部の液体を取り込み、取り込んだ同量を後方より排出するものである。また同様に液相スラグ部の前方にある大気泡部より小気泡を取り込み後方より排出するモデルである。

また取り込まれる液体は、液膜部の速度から液相の移動速度まで加速されるために圧力が低下する。さらに液相スラグ部においても管摩擦により圧力低下が起こる。また大気泡部については損失がないため、圧力一定となっている。これらの水平管内における圧力分布を Fig.4 に示した。

3.2 加速損失

Fig.4 よりスラグユニットにおける圧力損失は、位置損失を考慮しないため次式になる。

$$\Delta P_s = \Delta P_a + \Delta P_f \quad (1)$$

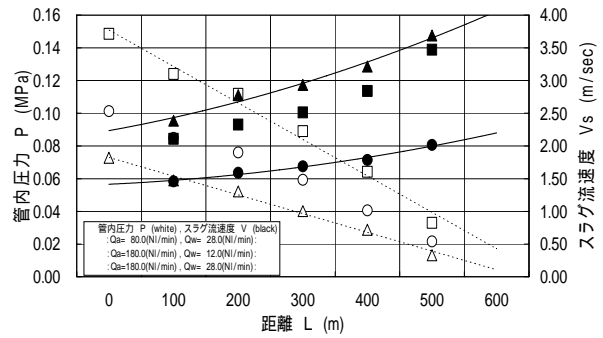


Fig.2 スラグ流速と管内圧力

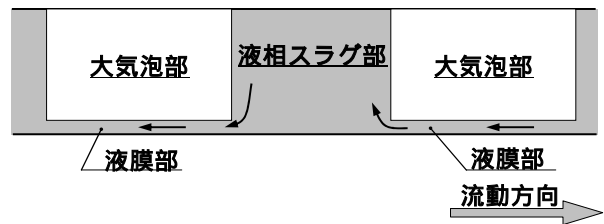


Fig.3 スラグ流モデル

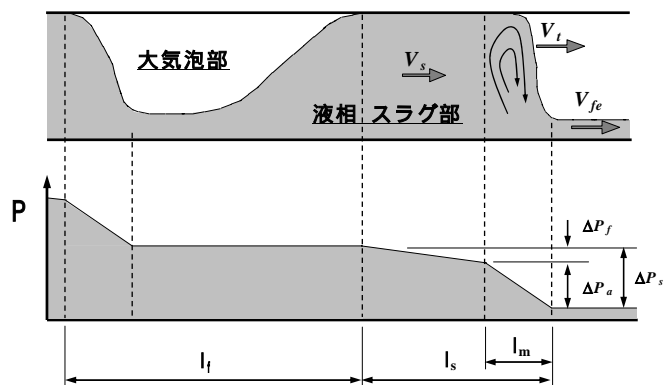


Fig.4 スラグユニットの圧力分布図

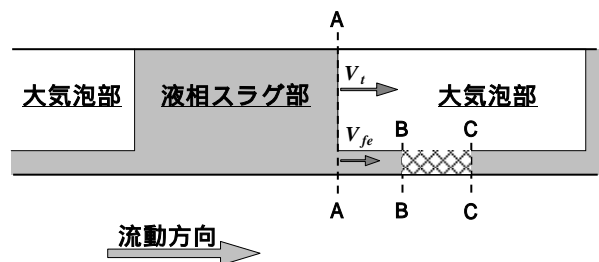


Fig.5 液膜部の巻き込み現象

ここで P_s : スラグユニットの全圧力損失

P_a : スラグ先端部による加速損失

P_f : 液相スラグにおける摩擦損失

スラグ先端部における加速損失は、運動量の式や加速損失に関わる取込量 m を用いると次式となる。

$$\Delta P_a = \frac{m}{A}(V_s - V_{fe}) \quad (2)$$

ここで m : 液膜部の液相が液相スラグ部に
取り込まれる質量

A : 管路断面積

V_s : スラグの平均流速

V_{fe} : 液膜部の流速

Fig.5 には取り込む過程を示した。液膜部は常に液相が堆積しており、圧縮空気による流動の影響を受けにくいことから、(液相スラグ先端部の移動速度 V_t) > (液膜部の流速 V_{fe}) となる。A 軸におけるスラグ先端部が、 t 秒後に V_t の速度で流動するため C 地点へ、 V_{fe} で流動する液膜部は B 地点に到達する。よって網かけ B-C 区間の液相はスラグに取り込まれることとなる。このことより、流速 V_{fe} で流動している液膜部はスラグ部に取り込まれ、スラグ部先端速度 V_t に加速されることにより、運動量方程式から速度差を考慮した次式を用いて、液相スラグ部に取り込まれる量 m の算出することができる。

$$m = \rho_L A R_{fe} (V_t - V_{fe}) \quad (3)$$

ここで ρ_L : 液相密度

R_{fe} : 液膜部のボイド率

V_t : スラグ先端流動速度

液相スラグ先端速度は、先端部より流動の遅い液膜部を取り込むことから、スラグ部内のスラグ平均流速は(4)式で示すことができる。この式は、これまでの実験結果から算出した(5)式と同様のものとなる。

$$V_t = (1 + C)V_s \quad (4)$$

$$V_t = C_2 V_s \quad (5)$$

ここで C : 定数 (= $C_2 - 1$)

C_2 : 実験から導いた係数 (= 1.35)

スラグ流は間欠流であり、液相スラグ後部は次のスラグ先端部と見ることができ、スラグの取り込まれる部分と同様に考えられることから、この部分の流速は次のスラグ部にお

ける流速と仮定することができる。

そのため、スラグ後部で運動量方程式をたて、大気泡部は圧力一定とし、管路壁面のせん断応力、液膜部の潤辺、液相表面から液中の圧力中心までの距離、スラグ後部における流速を運動方程式に代入すると(6),(7)式となる。

$$W_{(R_{fe})} = \frac{\ell_f}{D} \quad (6)$$

ここで R_f : 気相部における液相ボイド率

ℓ_f : 気相部の長さ

D : 導水管路内径

$$W(R_{fe}) =$$

$$\frac{C^2 R_s^2}{R_{fe}^2} \frac{1}{F_r} \left(\frac{\frac{\pi}{2} R_{fe} \sin \frac{\theta}{2} + \sin^2 \frac{\theta}{2}}{1 - \cos \theta} - \frac{1}{2} \cos \frac{\theta}{2} \right) \Bigg/ \frac{f_{fe} B^2 \theta}{\pi} \quad (7)$$

ここで R_s : 液膜部における液相ボイド率

F_r : フルード数

$$B = 1 + C \left(\frac{R_{fe} - R_s}{R_{fe}} \right) \quad (8)$$

(6)式における気相部の長さは、以下に示す(9),(10)式を用いて算出する。

$$\ell_f = V_t T - \ell_s \quad (9)$$

$$\ell_s = V_t T (R_s - R_{fe}) \quad (10)$$

ここで T : スラグ周期

ℓ_s : スラグ部の長さ

また、管路内における管路中心から液相面の角度 θ を Fig.6 に示した。液膜部のボイド率 R_{fe} を θ の関係から次式のように表すことができる。

$$R_{fe} = \frac{\theta - \sin \theta}{2\pi} \quad (11)$$

この角度 θ は未知数であるので、(11)式に任意の角度を代入し、この R_{fe} を(6)式の等式が成り立つように θ を調節する。この結果を(3)式に代入する。また液膜部の流速は、(3)式において V_{fe} が必要となるが、実験の観察により、液膜部はほとんど流動していないために流速を「0」とした。

$$V_{fe} = V_s \left\{ 1 + C \left(\frac{R_{fe} - R_s}{R_{fe}} \right) \right\} = 0 \quad (12)$$

これらにより、(2)式から加速損失を算出することができる。

3.3 流動距離と水頭

以上より算出した加速損失を用いて、流動距離と圧力の関係について検討を行った。

まず圧縮空気の流量を一定とし、清水の流量を変化させ、横軸に流動距離、縦軸に 0m 地点に対する各地点の圧力と加速損失の比をとったものを Fig.7 に示した。清水の流量を増加させると加速損失も同様に増加する。

次に清水の流量を一定とし、圧縮空気の流量を変化させ、横軸に流動距離、縦軸に 0m 地点に対する各地点の圧力と加速損失の比をとったものを Fig.8 に示した。圧縮空気の流量を増加させるにつれ加速損失も同様に増加傾向を示したが、変化量としては清水のみを変化させた方が大きな値を示した。この要因として管路内を流動する清水に比べ圧縮空気の割合が非常に多いために、清水が乱れた状態で流動してしまう。これにより、スラグ上部を圧縮空気が通過してしまうため、スラグの崩壊が起こっているのではないかと推測される。

4. まとめ

本研究によって得られた結果をまとめると以下のように要約される。

- (1)スラグ流は、流動距離が進むにつれ管内の圧力が低下し、速度増加が起こる。これは、圧力の低下による気相の膨張がスラグの速度増加に影響している。

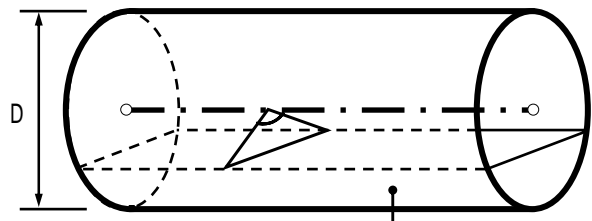


Fig.6 管路内図

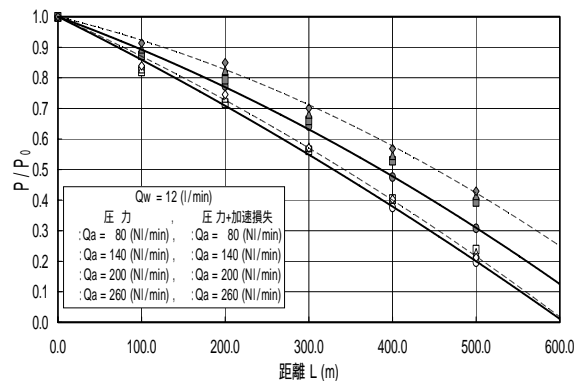


Fig.7 流動距離と圧力比(1)

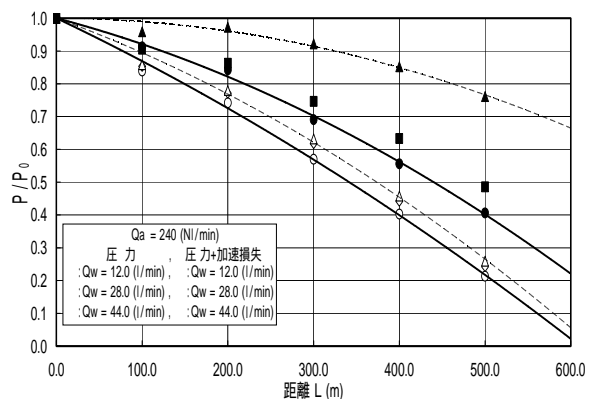


Fig.8 流動距離と圧力比(2)

- (2)Hubbardらの scooping model を適用して加速損失を算出することにより、加速損失が圧力損失の大半を占めるといえる。
- (3)管路内における気相ポイド率が高くなると、流動している液相が乱れてしまい、圧縮空気がスラグに作用しにくく、流動効率が悪いといえる。

「参考文献」

山田 泰正, 濱田 龍寿, 小川 元, 落合 実, 遠藤 茂勝, 気液二相流における管内圧力低下に伴うスラグ流動についてについて, 海洋開発論文集, Vol.21, (2005), pp.897-902