

## スラグ流の物性による内部流れの検討

日本大学大学院	学生会員	山田 泰正
日本大学大学院	学生会員	幕内真一郎
佐伯建設工業(株)	正会員	小川 元
日大生産工学部	フェロー会員	遠藤 茂勝

## 1. はじめに

現在、気液スラグ流は海岸工事における浚渫土砂の輸送方法などに利用されていて、空気混入輸送のため浚渫土砂との分離が容易なことや、粘性摩擦の低減効果が図れるなどの利点がある。また最近では大深度からの天然ガス（メタン）の回収方法として応用も考えられている。

気液スラグ流の研究は管長十数 m で、管径数 cm 程度の小規模な管路を対象としたものが多く、長距離で大口径の管路を使用する土砂輸送には適用できなかった。そこで、これまで長距離の混気輸送における気液スラグ流の流動特性を明確にするために土砂輸送のモデル実験として水および粘性溶液を用い圧縮空気輸送する可視化実験を行い、スラグ流の発生状況や管内の圧力損失の傾向、速度特性や周期特性などの基本的な流動特性の解明を行った。

本論文では、気液スラグ流の実験から得られた知見を基にした数値解析の結果を示し、物理特性の異なる輸送対象による流動特性について考察した。

## 2. スラグ流の数値解析

スラグ流の実験では管路延長 600m、管径 38mm の透明なビニールパイプを使用し気相と液相を同時に混入することによりスラグ流を発生させた。測定はスラグ流の速度、通過周期および、管路内の圧力について行った。液相に水の他に水と同じ密度で水の 300 倍の粘性を持つ粘性溶液(カルボキシメチルセルロース、CMC)を用いた。またこれとは別に管路長 1700m、管径 560mm の現地軟泥輸送実験も行っている。この軟泥は、粘性流体の水と乾燥した塑性体である土粒子の混合物であり、その混合比率により物理特性も変化するが本研究においては土粒子と水の混合比率が同じであったため粘性流体として扱って

いる。

このような実験の観察から、数値計算に用いるモデルを作成した。このモデルは輸送対象の液相は非圧縮性流体とし、輸送に用いる気相は圧縮性流体とした。管内では等エントロピー流れとし、かつ流れ場を密度と圧力のみ依存するバロトロピー流れであると仮定した。

また流下方向への移動が毎秒数メートルという極端に速い流れであることから、1 次元の流れとして取り扱うこととし、気泡を含まない液相塊の流れるモデルとした。そして、管路内の一様な気相の流れに液相塊が次々に投入されるモデルとし、空気の流動とともにこの液相塊が流動する。また、抵抗力  $F$  は管路の粘性摩擦のみとした。

基礎式は連続の式、運動方程式、状態方程式を連立させ、未知数である密度  $\rho$ 、速度  $u$ 、圧力  $P$  を解くものとした。

連続式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

運動方程式

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} - F = 0 \dots \dots \dots (2)$$

ここで  $F$  は水と管壁面との単位体積あたりの抵抗力であり、以下のように表される

$$F = f \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \frac{1}{\Delta x} \cdot \rho_w \dots \dots \dots (3)$$

ここで、

$f$ : 粘性摩擦係数	$u$ : 流速
$\ell$ : 液体塊の長さ	$d$ : 管径
$w$ : 液体の密度	$x$ : メッシュ幅

キーワード： スラグ流、気液二相流、混気圧送、数値解析、長距離水平管路

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

状態方程式

圧力と状態量の関係を表す式として完全ガスの状態方程式として次式により空気の圧縮性を考慮した。

$$P/\rho^\kappa = C \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\kappa$ は比熱比で 1.4 とした。

計算結果を Fig-3、Fig-4 に示す。これらは横軸に距離(m)、縦軸にスラグ流速(m/sec)をとり、実験値と計算値を比較したものである。また、液相が水の場合について Fig-3、CMC 溶液について Fig-4 に示す。両者とも空気流量が大きいところでは若干の誤差があるが良好一致を示しており、物性の違った液相においてスラグ流速を先に述べた基礎式により求めることができた。

3. 考察

式(3)において、粘性摩擦係数  $f$  が必要となるが、任意な粘性摩擦係数を入力し計算を行った。その中で、実験値と計算値が一致する粘性摩擦係数  $f_s$  について検討した結果が Fig-5 である。なお、現地実験の軟泥について計算した結果も合わせて示す。横軸に空気流量  $Q_a$  と水流量  $Q_w$  の比をとり、縦軸に粘性摩擦係数  $f_s$  をとった。この  $f_s$  は、気液二相流において空気の圧縮性を考慮した見かけ上の粘性摩擦係数であり、従来の粘性摩擦係数と区別した。この結果から、粘性が低い水は  $f_s$  の値が小さく、粘性が大きい流体は  $f_s$  が大きくなるのがわかる。

そこで次にレオロジー特性を把握するために空気を用いない単相流の実験を行い、横軸にせん断応力、縦軸にせん断速度をとり Fig-6 に示した。これより、水は傾きが 1 であることからニュートン流体であるのに対し、CMC 溶液は塑性流体としての特性を持つので水の結果とは異なる。

4. まとめと今後の課題

これらの結果から粘性摩擦係数  $f_s$  は、レオロジー特性の違いにより異なるものと考えられ、液体塊内部の挙動についての詳細な見当が必要になる。今後は高速度カメラを用いた画像解析により、液体塊内部の挙動をより詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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、pp617-622、土木学会、2003

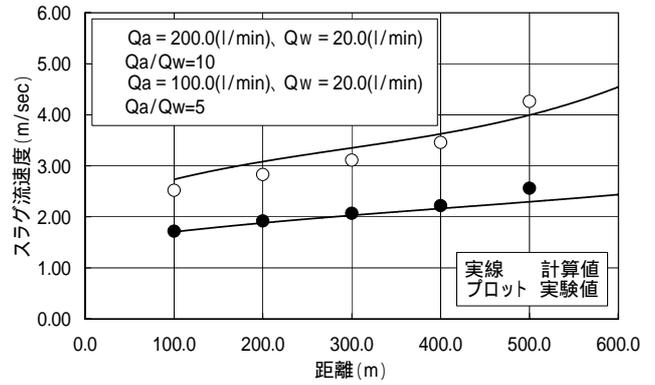


Fig-3. 計算値と実験値との比較 (水)

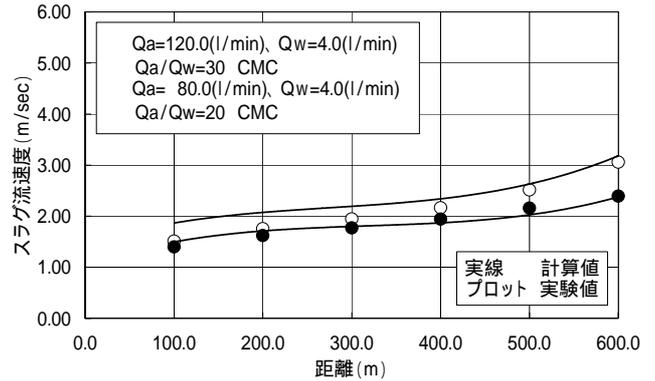


Fig-4. 計算値と実験値との比較 (CMC)

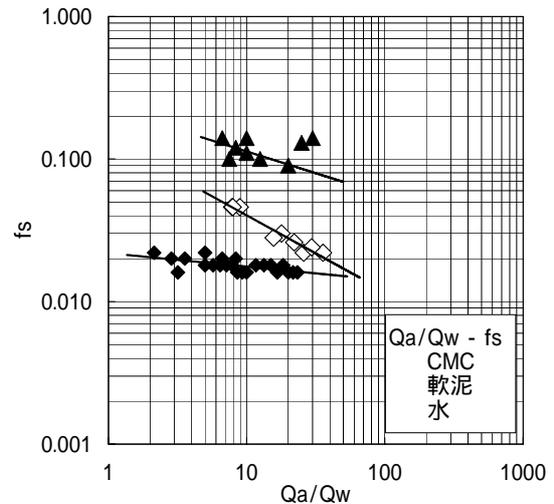


Fig-5. 空気流量比と  $f_s$  との関係

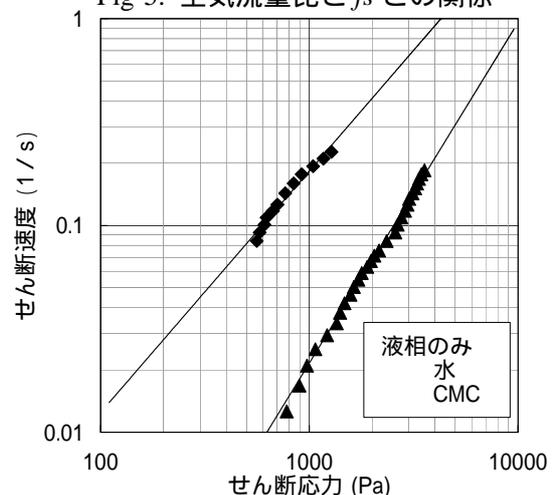


Fig-6. レオロジー特性