

気相の圧縮性を考慮したスラグ流の数値計算について

学生会員	日本大学大学院生産工学研究科	○山田 泰正
正会員	日本大学大学院生産工学研究科	小川 元
フェロー会員	日本大学教授生産工学部土木工学科	遠藤 茂勝

1. はじめに

現在、気液二相流は海岸工事における浚渫土砂の輸送方法として利用されていて、空気混入により粘性摩擦の低減効果が計れるなどの有利性がある。また気液二相流は、最近では大深海から採取した天然ガス（メタン）の輸送方法としても考えられている。

これまでの気液二相流の研究は管長数十 m で、管径数 cm 程度のものを対象としたものが多かった。著者らは大口径、長距離の空気輸送に関する研究を進める過程で、気液スラグ流の流動特性を明らかにするために土砂のモデルとして水、粘性流体を圧縮空気で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、及び長距離輸送におけるスラグ流の基本的な流動特性の解明を行った。

本研究では実験や画像解析により気液二相流をモデル化し、圧縮空気を考慮した数値解析を行うことを目的とした。

2. スラグ流のモデル化

スラグ流の実験は管径 3.8cm 管全長 600m のビニールパイプを使用し、圧縮空気を輸送するコンプレッサと水を送水するポンプを使用した。この圧縮空気と水を同時に供給させることにより、スラグ流が発生させることができる。このスラグ流の実験において、流動状況の観察から Fig-1 のようなスラグ流のモデルを考察した。空気と水を同時に供給すると管上部では空気が流れ、管低部では水が留まる分離した流れとなる。その分離流に波が発生しある一定の高さまで波が発達すると空気によって水が吹き飛ばされ、空気が水塊を押している流れとなる。

輸送対象は非圧縮性粘性流体の水を対象とし、輸送に用いる気体を圧縮性粘性流体である空気とした。多くのシミュレーションを効率的かつ実用的に解析

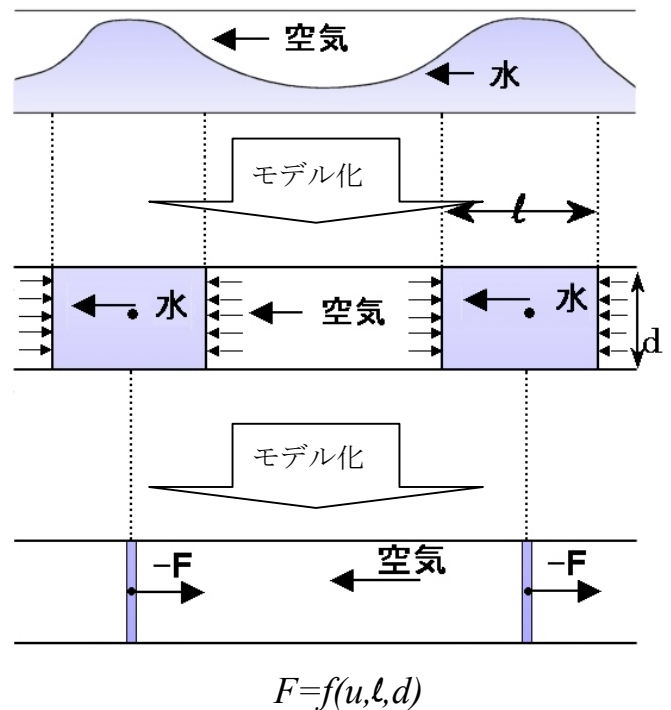


Fig-1 スラグ流モデル

するため、また実験時の観察や画像解析などにより、空気は水塊を一様な鉛直分布で押していると仮定でき、1次元での移動変化になることにより1次元でのモデル化を行った。これにより、輸送対象の水の粘性による効果は壁面との間での抵抗力となる。

輸送に用いる気体は、輸送対象の水の粘性に対してかなり小さいため粘性の影響は無視した。また、プラグ間には含まれた空気塊中の乱流による粘性効果等も無視した。

数値解法は連続の式、運動方程式、状態方程式を連立にして未知数の密度 ρ 、速度 u 、圧力 P を解くこととした。

1) 連続式

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

キーワード： スラグ流、気液二相流、混気圧送、数値解析、管路

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

2) 運動方程式

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

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

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

ここで、

f : 管摩擦係数

ℓ : 1 個の液体塊の長さ

d : 管径

u : 流速（気液混合速度場）

ρ_w : 液体塊の密度

Δx : 1 次元計算用メッシュ幅

3) 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式を用いる。この式により空気の圧縮を考慮した。

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

ここで、 κ は比熱比であり、 $\kappa=1.4$ とした。 C は定数である。

4) 境界条件

流入側は **Dirichlet** 条件（値の指定）とし流出側は、値の勾配を 0 とした **Neumann** 条件とする。

① 流入側境界条件

$$u = u_0 \quad \text{流入速度を入力} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$P = P_0 \quad \text{0m 地点圧力を入力} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\rho_0 = (P_0/C)^{1/\kappa} \quad \dots \dots \dots (7)$$

② 流出側境界条件

流出側では速度の変化量はない自然流出条件とし、圧力は大気圧とした。密度と運動量は次式にて算出した値を与える。

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$\rho_{ou} = (P_n/C)^{1/\kappa} \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 P_n は大気圧とする。

5) 管摩擦係数

式(3)において、管摩擦係数 f を与える必要があるの

で、次式のように各液体塊の流速から求められる Re の関数とし、 f を与えた。

① $Re < 2000$

$$f = 64/Re \quad \dots \dots \dots (10)$$

② $3000 < Re < 10^5$

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad \dots \dots \dots (11)$$

③ $2000 \leq Re \leq 3000$ (遷移領域)

$$f = \frac{0.3164}{3000^{0.25}} = 0.0428 \quad \dots \dots \dots (12)$$

④ $Re \geq 10^5$

$$f = \frac{0.3164}{100000^{0.25}} = 0.0178 \quad \dots \dots \dots (13)$$

3. まとめ

今回スラグ流の数値解析を行うことにあたり、以前の課題であった式(3)における管摩擦係数 f について、従来の数値解析においては管摩擦係数 f を一様に与えていたため、空気の膨張によるスラグ速度の変化から管路全体において一様でない可能性があったので、 Re の関数で管摩擦係数 f を与えることにした。しかし、液体塊長 ℓ については現在も流動状況の写真から計測した液体塊の平均的な長さを式(3)に与えているため、液体塊長 ℓ の定義式についての検討が残されている。

また、液体部分に比較して空気量のほうが多いため、液体塊は空気流動に従属した計算手法とした。したがって、流動中に液体塊内を空気は通過しないものとしている。実験の観察状況から液体塊長 ℓ が変化するので今後の検討課題とする。

参考文献

- 1) 小川元・田崎道宏・落合実・遠藤茂勝：水平管内気液二相スラグ流の流動特性に関する研究、海洋開発論文集、Vol.18、2002
- 2) 小川元・落合実・遠藤茂勝：水平管内スラグ流における容積流束とスラグ流速について、海岸工学論文集、Vol.49、2002
- 3) 小川元・遠藤茂勝：スラグ流の発生メカニズムと流動解析、流体力の評価とその応用に関する研究論文集、第2巻、2003
- 4) 小川元・田崎道宏・落合実・遠藤茂勝：水平スラグ流輸送における圧力、速度特性について、海岸工学論文集、Vol.48、2001