

# PS-28 ガスリフト方式による固気液三相流の移送評価

海洋開発系 \* 高野 慧, 正信 聡太郎, 山本 譲司, 金田 成雄, 小野 正夫

## 1. はじめに

海底鉱物資源や表層型メタンハイドレートの揚収において、ガスリフト方式による移送は有望な手法の1つと考えられている。著者らは、揚収システムにおける揚収量を検討するための基礎データを試験をとおして取得することを目的とし、鉛直管を対象としたガスリフト方式による固気液三相流の移送試験を実施してきた<sup>1)</sup>。しかし、実際のシステムにおいては、海底から海上までの間には鉛直のみならず、傾斜した配管も有する可能性が想定されるため、当該システムの設計時には、鉛直管だけでなく傾斜管における三相流の移送評価が重要となる。本稿では、固気液三相流の移送評価において重要となる摩擦損失や各相の体積率を評価するために実施した試験の概要とその結果について報告する。

## 2. 三相流移送試験概要

### 2.1 試験装置

試験装置の模式図を図-1に示す。試験装置は内径 26.2mm の透明塩ビ管、空気を供給するためのコンプレッサ、模擬球を供給するためのフィーダ、移送された模擬球を回収するための分離タンク、配管の傾斜角を変更するためのフレキシブルホース、試験中に水位を一定に保つための水位調整配管で構成されている。傾斜角を変化させた場合でも浸水率 ( $L_s/L$ ) が等しくなるように水位調整管の高さを調節した。

本試験では海底鉱物資源を模擬した固体として直径 4mm、密度 2,553kg/m<sup>3</sup> のガラスビーズ（以下、模擬球）を用いた。また、移送流体には淡水を用いた。

主な計測器としては、供給する空気流量を調整するためのマスフローコントローラ、管内流量を計測するための電磁流量計、三相流の圧力損失を計測するための差圧計がある。

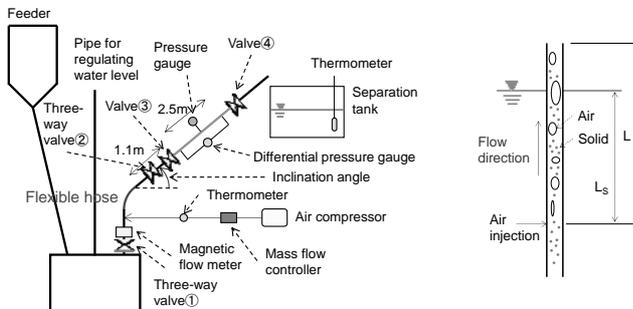


図-1 試験装置模式図及びガスリフト概念図

### 2.2 試験方法

はじめに、マスフローコントローラで流量が調整された空

気を配管内に供給する。次に、流れが安定したことを確認した後、フィーダから模擬球を投入する。その後、移送された三相流は分離タンクへ吐出されるため、模擬球だけを回収し、回収した模擬球をフィーダへ戻す。三相流が安定するまでは当該作業を繰り返し、三相流が安定したことが確認されたら、分離タンク内で三相流を回収し、水と模擬球の重量をそれぞれ計測した。

### 2.3 試験条件

本試験では、空気供給量を 19.1~223.0L/min (圧力 1atm、温度 20℃における値) の範囲で変化させて試験を実施した。結果として、浸水率は 0.74~0.76 の範囲であった。配管傾斜角  $\theta$  は 30 度、45 度、60 度、75 度、90 度の 5 種類で試験を実施した。

## 3. 試験結果

### 3.1 体積率

固気液三相流における気相の体積率  $\alpha_G$  を求める際に、固気液三相流を気相と固液スラリー相の二相流とみなして、気液二相流における気相の体積率を表す Smith の式<sup>2)</sup>を、式(1)のとおり修正した式を適用するという考え方が提案されている<sup>3)</sup>。ここでは、計測した固相体積率  $\alpha_S$  と各相の流速  $j_k$  ( $k=G, L, S$ ) 及び式(1)を用いて、式(6)を満たす液相体積率  $\alpha_L$  と  $\alpha_G$  の組み合わせを数値的に求めた。

$$\alpha_G = \left[ \frac{1 + 0.4 \frac{\rho_G}{\rho_{LS}} \left( \frac{1}{x} - 1 \right) + 0.6 \frac{\rho_G}{\rho_{LS}} \left( \frac{1}{x} - 1 \right)^{0.5}}{\left[ \frac{\rho_{LS} + 0.4 \left( \frac{1}{x} - 1 \right)}{1 + 0.4 \left( \frac{1}{x} - 1 \right)} \right]} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$x = \frac{\rho_G j_G}{G} \quad (2)$$

$$G = \rho_G j_G + \rho_L j_L + \rho_S j_S \quad (3)$$

$$j_k = Q_k / A \quad (k = G, L, S) \quad (4)$$

$$\rho_{LS} = \rho_L \frac{\alpha_L}{\alpha_L + \alpha_S} + \rho_S \frac{\alpha_S}{\alpha_L + \alpha_S} \quad (5)$$

$$\alpha_G + \alpha_L + \alpha_S = 1 \quad (6)$$

ここで、 $Q$  は各相の流量、 $A$  は配管断面積、 $\rho$  は密度、添字の  $G, L, S, LS$  は気相、液相、固相、固液スラリー相をそれぞれ表す。

計測した  $\alpha_G$  と計算した  $\alpha_G$  を比較したものを図-2 に示す。図-2 の点線は  $\pm 15\%$  を表す。

図-2 から、傾斜角によらず、計算結果と試験結果が概ね一致していることがわかる。このことから、傾斜角によらず、固気液三相流における気相体積率を、式(1)を用いて表せると考えられる。

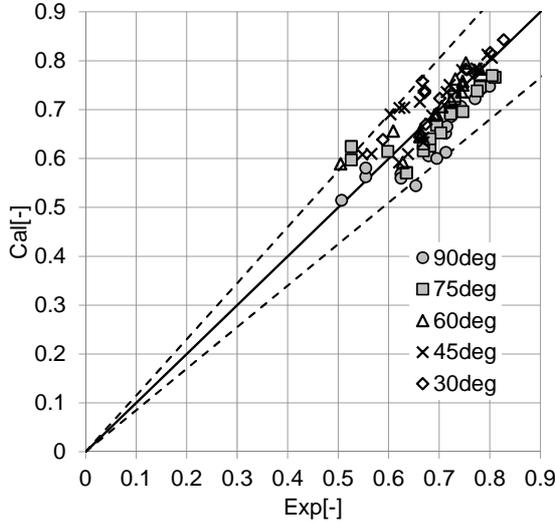


図-2 気相体積率の試験結果と計算結果の比較

### 3. 2 摩擦損失

畠山らは、Lockhart-Martinelli によるパラメータを用いた気液二相流の摩擦損失を表す式を基に、固気液三相流を気相と固液スラリー相の二相流とみなして、液相のパラメータを固液スラリー相に置き換えることにより、三相流の摩擦損失を以下の式で表すことができるとしている<sup>4)</sup>。

$$X_3^2 = I_{LS} / I_G \quad (7)$$

$$\phi_{LS3}^2 = I_{GLS} / I_{LS} \quad (8)$$

$$\phi_{LS3}^2 = 1 + \frac{A}{X_3} + \frac{1}{X_3^2} \quad (9)$$

$$I_{LS} = \lambda_{LS} \frac{1}{D} \frac{\rho_L (j_L + j_S)^2}{2} \quad (10)$$

$$\text{Re}_{LS} = \frac{\rho_L (j_L + j_S) D}{\nu_L} \quad (11)$$

$$A = 52 N_D^{-0.2} \quad (12)$$

$$N_D = D \sqrt{\rho_L g / \sigma_t} \quad (13)$$

ここで、 $\lambda$  は管摩擦係数、 $D$  は配管内径、 $\nu$  は動粘性係数、 $\sigma_t$  は水の表面張力、 $g$  は重力加速度をそれぞれ表す。

固液スラリー相の摩擦損失を表す式として、式(10)で示される Durand による式が用いられているが、当該式を用いて三相流の摩擦損失を計算したところ、著者らの試験結果と若干、一致度が低かった。そこで、佐田富らが提案している式

(10) の液相密度の項をスラリー相の密度に置き換えた Durand の式の修正式<sup>3)</sup>を用いて、固気液三相流の摩擦損失の計算を試みた。Durand の式の修正式を式(14)に示す。

$$I_{LS} = \lambda_{LS} \frac{1}{D} \frac{\rho_{LS} (j_L + j_S)^2}{2} \quad (14)$$

摩擦損失の試験結果と計算結果を比較したものを図-3 に示す。図-3 中の点線は  $\pm 30\%$  の線を表す。この結果から、試験結果と計算結果が概ね一致しており、固気液三相流においても、傾斜角によらず式(9)で摩擦損失が表せると考えられる。

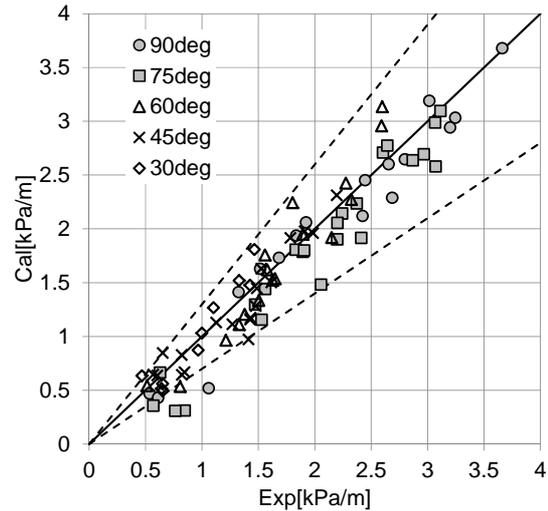


図-3 摩擦損失の試験結果と計算結果の比較

## 4. まとめ

透明塩ビ配管及びガラスビーズを用いて鉛直を含む傾斜配管における固気液三相流の移送試験を実施し、圧力損失や、各相の体積率を計測するとともに、圧力損失と各相の体積率の計測結果から摩擦損失を得た。試験の結果から、固気液三相流の気相の体積率の計算に、傾斜角によらず Smith の式の修正式が適用できることが示唆された。また、畠山らが提案した摩擦損失推定式に佐田富らが考案した固液スラリー相の圧力勾配式を適用することによって、三相流の摩擦損失が表せることが示唆された。

### 参考文献

- 1) 高野慧ほか：エアリフト方式での揚鉤に関する研究，海上技術安全研究所 研究発表会，2018。
- 2) S. L. Smith：VOID FRACTIONS IN TWO-PHASE FLOW：A CORRELATION BASED UPON AN EQUAL VELOCITY HEAD MODEL，Proc. Inst. Mech. Eng.，Vol. 184，No. 36.，pp. 647-664，1969。
- 3) 佐田富道雄ほか：粗粒子群の垂直管内水力輸送に関する研究（第2報，気液固三相流），混相流，4巻，2号，pp. 125-140，1990。
- 4) 畠山信夫ほか：垂直管内気液固三相流における圧力損失，資源と素材，Vol. 111，pp. 465-470，1995。