

PS-13 固気液三相流移送における各相の体積率と摩擦損失評価手法

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

海洋鉱物資源の揚鉱において、管内に空気やガスを送気し管内の密度を下げ、外部の海水との密度差を利用して流れを発生させるエアリフト方式は有望な手法の1つと考えられている¹⁾。エアリフト方式での揚取システム的设计・運用には、固気液三相流における各相の体積率や摩擦損失の推定手法を構築することが重要である。気液二相流を対象とした各相の体積率や摩擦損失に関する研究は数多くあるが、固気液三相流を対象とした研究は少ない。そこで、著者らは既往の研究について調査するとともに、気液二相流における考え方や、いくつかの固気液三相流の移送評価に関する研究を参考に、三相流を対象とした新たな推定手法について検討を行った。さらに、エアリフト方式での固気液三相流移送試験を行って、体積率や摩擦損失に関するデータを取得するとともに、新たに検討した手法の妥当性を検証した。本稿では、推定手法と実施した試験概要及びその結果、推定手法の検証結果について報告する。

2. 推定手法

2.1 気相の体積率推定方法

既往の固気液三相流の移送評価では、ドリフトフラックスモデルが用いられており²⁾、ここでも、ドリフトフラックスモデルを用いた。

固気液三相流における気相速度 u_G は、次式で表される。

$$u_G = C_{03} (j_G + j_L + j_S) + V_{Gj} \quad (2.1)$$

ここで、 C_{03} は分布パラメータ、 j は見かけ速度、 V_{Gj} はドリフト速度をそれぞれ表す。また添え字の G, L, S はそれぞれ気相、液相、固相を表す。

島山と益山²⁾は、固気液三相流における分布パラメータは気液二相流の場合と大きく変わらないことを報告しており、ここでは、気液二相流における分布パラメータとドリフト速度を表す式としてよく知られている Ishii³⁾による式を用いることとした。

2.2 固相の体積率推定方法

固気液三相流における固相は液相内にしか存在しないと仮定すると、固相流速 u_S は次式で表される。

$$u_S = u_L - u_{SW} \quad (2.2)$$

ここで、 u_L は液相流速、 u_{SW} は固相の干渉沈降速度である。干渉沈降速度は、固液二相流における当該速度を表す式⁴⁾を参考に、次式で表されるものとした。

$$u_{SW} = - \left\{ 1 - \left(\frac{d_s}{D} \right)^2 \right\} \sqrt{S_f^{5.38\alpha_S/(1-\alpha_G)} e^{-4S_f \frac{\alpha_S/(1-\alpha_G)}{1+\alpha_S/(1-\alpha_G)}}} \times \sqrt{\frac{4gd_s(\rho_S - \rho_L)}{3C_D\rho_L}} \quad (2.3)$$

ここで、 d_s は固相粒子の直径、 D は管内径、 S_f は固相粒子の形状係数、 α は体積率、 g は重力加速度、 ρ は密度、 C_D は固相粒子の抗力係数をそれぞれ表す。

2.3 摩擦損失推定方法

気液二相流の均質流モデルを固気液三相流に拡張することを試みた。固気液三相流における摩擦損失は次式で表される。

$$I_3 = f_3 \frac{1}{D} \frac{G_3^2}{2\rho_3} \quad (2.4)$$

ここで、 f_3 は三相流における管摩擦係数、 G_3 は三相流の質量流量、 ρ_3 は三相流の密度をそれぞれ表す。

管摩擦係数 f_3 を求めるために、三相流のレイノルズ数 Re が必要になるが、Shannak⁵⁾の提案している気液二相流の Re を表す式を参考に、三相流における Re は次式で表されるものとした。

$$Re = \frac{\rho_G j_G^2 D^2 + \rho_L j_L^2 D^2 + \rho_S j_S^2 D^2}{\mu_G j_G D + \mu_L (j_L + j_S) D} \quad (2.5)$$

ここで、 μ は粘性係数を表す。

3. 固気液三相流移送試験

3.1 試験概要

本試験は、固気液三相流における各相の体積率や摩擦損失に関するデータを取得することが目的である。試験装置の概略図を図-1に示す。試験装置は配管、エアコンプレッサ、模擬鉱石を投入するためのフィーダ、模擬鉱石を回収するた

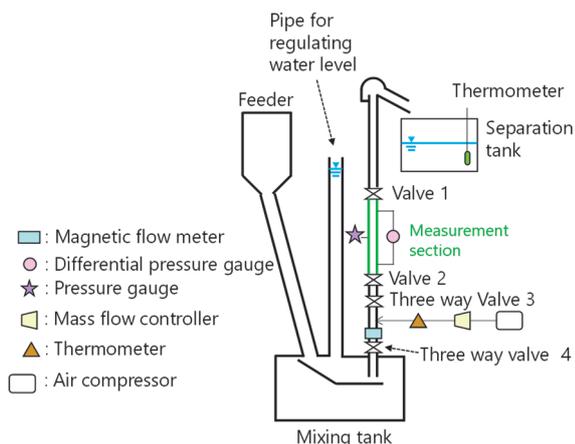


図-1 試験装置模式図

め分離タンク、試験中の水位を調整するための水位調整管、体積率を計測するためのバルブで構成されている。

3. 2 試験条件

本試験では模擬鉱石として、ガラスビーズ（密度 $2,553\text{kg/m}^3$ ）を用いた。また、配管口径の影響を調査するために、計測区間の配管口径を変更して試験を実施した。試験条件を表-1 に示す。

表-1 試験条件

Internal diameter [mm]	j_G [m/s]	j_L [m/s]	j_S [m/s]
26	0.50~11	0.50~1.1	0.026~0.067
41	0.48~4.8	0.44~0.82	0.015~0.044
52	0.50~2.8	0.30~0.59	0.010~0.030

4. 検証結果

4. 1 各相の体積率

気相、液相、固相の体積率の計測結果と、計算結果の比較を図-2 に示す。図-2 中の点線は、 $\pm 30\%$ を表す。多少のバラつきはあるものの、計測結果と計算結果が概ね一致しており、本稿で提案した手法で、三相流中における各相の体積率が計算できることが示唆された。

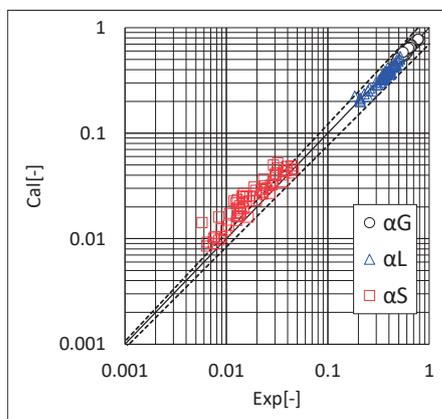


図-2 体積率の計測結果と計算結果の比較

4. 2 摩擦損失

三相流の移送による摩擦損失の計測結果と計算結果の比較を図-3 に示す。図-3 中の点線は、 $\pm 30\%$ を表す。摩擦損失が小さいところではばらつきは大きいものの、計測結果と計算結果が概ね一致しており、本稿で提案した手法で、三相流中における各相の体積率が計算できることが示唆された。

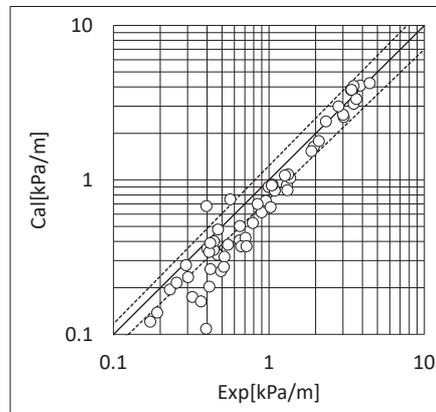


図-3 摩擦損失の計測結果と計算結果の比較

5. まとめ

気液二相流と固気液三相流の移送評価に関する研究を参考に、固気液三相流における各相の体積率と摩擦損失の推定手法について検討した。内径 26, 41, 52mm の 3 種類の内径の配管及びガラスビーズを用いて、エアリフト方式の固気液三相流移送試験を実施し、計測結果を用いて、推定手法の妥当性を検証した。その結果、推定手法が妥当であることが示唆される結果を得た。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP20K14977 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Claire Beauchesne et al., State of the Art of 1D Steady State Flow Assurance Models for Deepsea Mining Production System Using Air-Lift Pumping, OTC2015 (2015).
- 2) 畠山信夫, 益山忠: 垂直管内気液固三相流における各相の平均速度および平均体積率, 資源と素材, 111 巻 (1995), pp. 245-251.
- 3) Ishii, M., One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes, Argonne National Laboratory Report, ANL-77-47 (1977).
- 4) Masanobu, S., et al.: Study on Hydraulic Transport of Large Solid Particles in Inclined Pipes for Subsea Mining, ASME J. Offshore Mech. Arct. Eng., Vol. 139, No. 5, 051401 (2017).
- 5) Shannak, A. B., Frictional pressure drop of gas liquid two-phase flow in pipes, Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, pp. 3277-3284 (2008).