

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14977

研究課題名（和文）海底資源開発における高ボイド率下での三相流移送評価技術の構築

研究課題名（英文）Flow assurance for three phase flow for deep sea mining

研究代表者

高野 慧（Takano, Satoru）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・主任研究員

研究者番号：90636820

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：固気液三相流における気・液・固の各相の体積率や三相流が移送されることによる摩擦損失の推定方法を構築した。気相の体積率については、ドリフトフラックスモデルを、固相の体積率については、液体中の粒子群の干渉沈降速度の関係式を参考に推定手法を構築した。摩擦損失については、均質流モデルを基に推定手法を構築した。当該手法の検証のために、ガスリフト方式で固気液三相流の移送試験を実施し、各相の体積率や摩擦損失のデータを取得した。取得したデータと構築した推定手法を用いた計算結果を比較して、推定手法の妥当性を検証した。その結果、構築した推定手法を用いれば、一定の精度で推定できることが示唆される結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の排他的経済水域に広く賦存していることが知られている海洋鉱物資源の開発において、それら資源の有望な揚収手法の1つとしてエアリフト方式があげられる。当該方式での揚収システムにおいて、空気やガスと海水、及び資源である固体の固気液三相流の各相の体積率や三相流が移送されることによる摩擦損失の推定手法を構築することは、システムのガス抜き必要性の有無や、ガス流入量・流入箇所、揚収可能な固相の体積率等、システム的设计・運用のための貴重な指針につながるため社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：I established the estimating methods for volume fractions of each phase in gas-liquid-solid three-phase flows and frictional pressure drops due to three-phase flows. For establishing volume fractions of gas phase, I referred to drift flux model. For establishing volume fractions of solid phase, I referred to correlations for hindered settling velocities. For establishing frictional pressure drops due to three-phase flows, I referred the expressions of homogeneous flow model.

For validating those methods, I carried out the experiment of gas-lift pumping systems and obtained the data of volume fractions of each phase and frictional pressure drops due to three-phase flows and compared the experimental data and calculated results. The comparisons suggested that those methods could calculate the volume fractions and frictional pressure drops.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海洋鉱物資源 混相流 摩擦損失 体積率 内部流

## 1. 研究開始当初の背景

マンガン団塊の開発においてガスリフトによる揚収が検討されていた際、鉛直管を対象とした三相流の移送評価に関する研究が盛んに行われており、それらの研究では、開発システムの設計・運用の指針とするために各相の体積率や摩擦損失の推定手法の構築が行われてきた。しかしながら、それ以降の研究は途絶え、現在まで間、海底鉱物資源開発の分野では三相流の移送評価技術の構築に関して空白の期間がある。近年、日本の排他的経済水域には、海底熱水鉱床やコバルトリッチクラスト、レアアース泥等の資源が賦存していることが知られており、それらの揚収を対象とした研究が盛んになってきている。例えば、海底熱水鉱床では、スラリーポンプを用いた固液二相流による揚収が有望視されており、平成 29 年度の夏には、深海底から実際に熱水鉱床をスラリーポンプで揚収するパイロット試験に成功している。一方、レアアース泥や表層型メタンハイドレートの揚収では、ガスリフト方式での揚収が検討されている。また、近年、マンガン団塊を対象にしたガスリフト方式による固気液三相流の移送実験が行われていた時と同等の設備を用いて、ガスリフト方式によるレアアース泥の揚収に関するプロジェクトが行われている。これらのことから、ガスリフト方式での資源揚収に関する技術開発の需要が高まっていると考えられる。

ガスリフト方式の場合、気体を注入する深さが深くなるほど、海面に近づいた際の気相の膨張が大きくなり、管内の気相の体積率が大きくなると考えられるため、そのような領域(以下、高ボイド領域)での三相流移送評価技術の構築が不可欠である。高ボイド領域では、管内流れが環状流になって揚水効率が下がり、それに伴って固体揚収量も低下すると考えられるが、既往の研究に、高ボイド領域における各相のボイド率や摩擦損失の推定手法を提案しているものは少なく、移送評価技術の構築は重要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、固気液三相流の高ボイド領域における各相の体積率と摩擦損失の推定手法を構築することである。既往の研究では、鉛直管を対象とした実験を基にした気相体積率や摩擦損失の推定手法が提案されているが、当然のこととして、推定手法の適用範囲は実験条件範囲内に限られる。そこで本研究では三相流移送実験を実施して、各相の体積率や圧力損失を計測するとともに、先行研究で得られた実験結果も活用し、鉛直上昇流の高ボイド領域を含む幅広い領域に適用可能な体積率や圧力損失の推定手法を構築する。

## 3. 研究の方法

気液二相流や固液二相流における各相の体積率や摩擦損失の推定手法を参考に、三相流におけるそれらの推定手法を構築した。また、これらの推定手法の妥当性を検証するために、ガスリフト式の三相流移送実験から得られた各相の体積率や摩擦損失の結果と推定結果を比較することで、推定手法の妥当性を検証した。検証の際には、先行研究で得られた実験結果も用いた。実験装置のイメージ図を図 1 に示す。ガスリフト式で流体を移送する場合、試験中に配管外側の水位が変動すると、揚水性能が変化し、定常な結果が得られないため、試験中は水位調整管を用いて、水位を一定に保った。空気供給量はマスフローコントローラにより一定に制御された。固相には直径 4mm、密度 2,553kg/m<sup>3</sup> のガラスビーズを用いた。差圧を計測する配管には 50A のものを用いた。各相の体積率は、管路内にあるボールバルブを、三相流を移送中に急閉し、流れを閉じ込め体積率計測する締切法で計測した。本実験では固気液三相流の流動状態に関するデータに加え、気液二相流のデータも取得した。気液二相流における気相および液相のみかけ流速  $j_G$ 、 $j_L$  はそれぞれ 0.38 ~ 0.61 m/s、0.74 ~ 1.5 m/s であった。また、固気液三相流における  $j_G$ 、 $j_L$  および固相のみかけ流速  $j_s$  はそれぞれ 0.75 ~ 6.1 m/s、0.50 ~ 1.3 m/s、0.015 ~ 0.089 m/s であった。

## 4. 研究成果

### (1) 各相体積率の推定手法

固気液三相流における各相の体積率の推定方法を構築するために、気液二相流や固液二相流に関する研究を含めた先行研究について調査した。

気液二相流の気相体積率  $\alpha_G$  の推定手法として、気液間にスリップがないと仮定した均質流モデルや、ボイド率分布及び気液間のすべり速度を考慮したドリフトフラックスモデル等がある。本研究では、重要な相関の 1 つであると考えられているドリフトフラックスモデルに着目することとした。ドリフトフラックスモデルを用いると、気液二相流における気相流速  $u_G$  は次式で表される。

$$u_G = C_0 (j_G + j_L) + V_{Gj}$$

ここで、 $C_0$  は分布パラメータ、 $V_{Gj}$  はドリフト速度である。分布パラメータやドリフト速度は計測結果及び理論解析を踏まえて定められる。それらを表す代表的なものとして Ishii<sup>1)</sup> による相

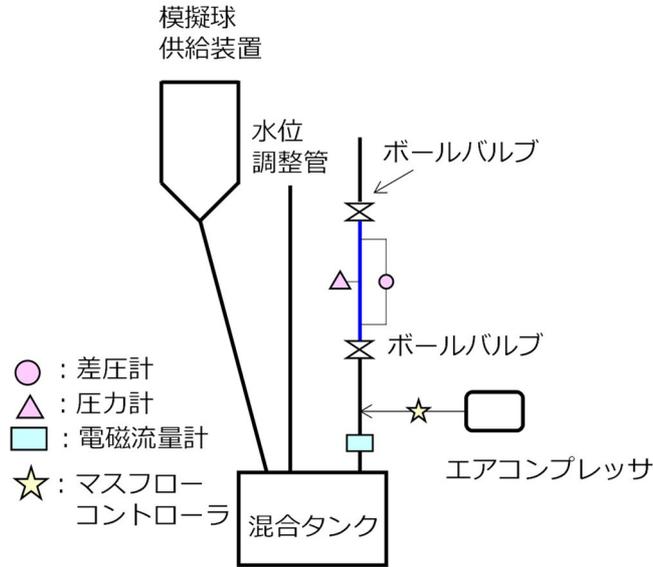


図1 試験装置模式図

関式があげられる。当該式の精度を確認するために、気液二相流移送時の計測結果と計算結果を比較した。比較には、本研究で実施した実験で得られたデータに加え、Takano et al.<sup>2)</sup>が得た実験結果のうち、配管内径が26mmと41mmでの計測結果も用いた。その結果を図2に示す。なお、 $u_G$ と $\alpha_G$ には以下の関係が成り立つ。

$$\alpha_G = j_G / u_G$$

比較においては、計測された $j_G$ と計算された $u_G$ から計算される $\alpha_G$ と実験で計測された $\alpha_G$ を比較した。また、相関式を用いるためには流動様式を判別する必要があるが、実験時の目視による確認と、流動様式線図を参考に決定した。図2から、ほとんどのデータが $\pm 20\%$ の範囲に収まっており、計算結果と計測結果はよく一致していることがわかった。

次にドリフトフラックスモデルを三相流に拡張する。連続の条件を踏まえると、固気液三相流における $u_G$ は次式で表される。

$$u_G = C_{03}(j_G + j_L + j_S) + V_{Gj3}$$

ここで、 $C_{03}$ は三相流における分布パラメータ、 $V_{Gj3}$ は三相流におけるドリフト速度である。固気液三相流を気相と固液スラリー相の固液二相流と考え、固気液三相流の場合も気液二相流の場合と同様の分布パラメータとドリフト速度の相関式が成り立つとし、気液二相流における比較と同様に、本研究で実施した実験に加え、Takano et al.<sup>2)</sup>が得た実験結果も用いて、計算結果と比較した。比較の結果を図3に示す。図3から、すべてのデータが $\pm 30\%$ の範囲に収まっており、気相の体積率が0.8程度までの範囲で、計算結果と計測結果がよく一致していることがわかった。

三相流中の固体粒子は液相に存在すると考え、固液二相流における固相流速 $u_S$ の関係式について調査した。固液二相流中の $u_S$ は次式で表される。

$$u_S = u_L - V_{sh}$$

ここで、 $u_L$ は液相の流速、 $V_{sh}$ は粒子群の干渉沈降速度である。

三相流中の固相体積率 $\alpha_S$ の推定において、固液二相流における粒子群の干渉沈降速度を表す相関式を三相流用に修正した以下の式を用いることとした。

$$V_{sh} = - \left\{ 1 - \left( \frac{d_S}{D} \right)^2 \right\} \sqrt{S_f^{5.38\alpha_S/(1-\alpha_G)}} e^{-4S_f \frac{\alpha_S/(1-\alpha_G)}{1+\alpha_S/(1-\alpha_G)}} \times \sqrt{\frac{4gd_S(\rho_S - \rho_L)}{3C_D\rho_L}}$$

ここで、 $d_S$ は固体粒子の直径、 $D$ は配管内径、 $S_f$ は粒子の形状係数、 $g$ は重力加速度、 $\rho_S$ は固相密度、 $\rho_L$ は液相密度、 $C_D$ は粒子の抗力係数である。

気相体積率の比較の場合と同様に、固相体積率の計測結果と計算結果を比較した。その結果を図4に示す。比較データのうち、 $\pm 30\%$ に収まっているものも一定数あるが、残りは全体的に計算結果が過大となっており、精度の高い相関式について検討していく必要がある。

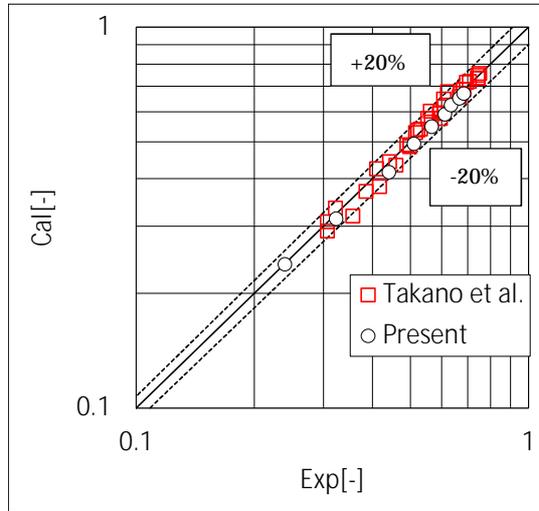


図2 気相体積率の比較（気液二相流）

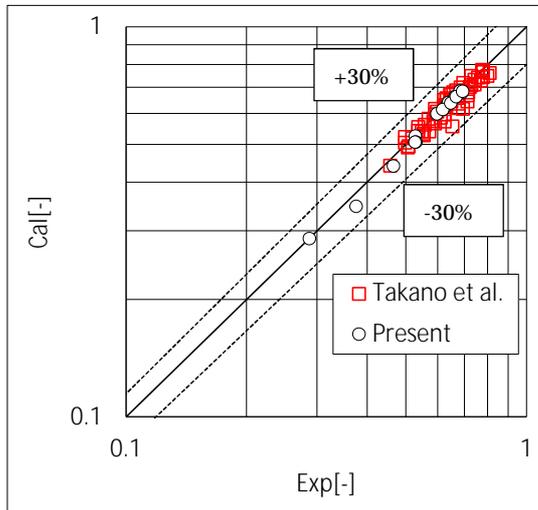


図3 気相体積率の比較（固気液三相流）

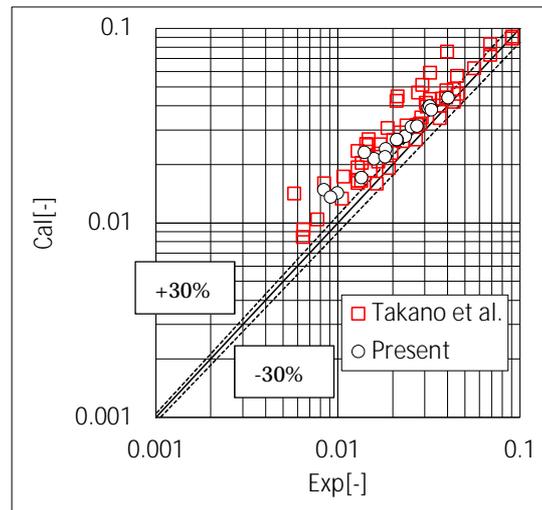


図4 固相体積率の比較（固気液三相流）

## (2) 摩擦損失の推定手法

固気液三相流の摩擦損失  $p_{GL}/L$  の推定手法の構築のため、気液二相流の摩擦損失  $p_{GL}/L$  の推定手法について調査した。 $p_{GL}/L$  の推定手法には、大きく分けて均質流モデルと分離流モデルの2つがある。均質流モデルにおいては、気液二相流の摩擦損失を単相流の場合と同じように計算することができ、気液二相流の粘性係数やレイノルズ数に関する式が多くの研究で提案されている。

分離流モデルは、水平管において気相と液相が完全に分離した状態を想定したもので Lockhart と Martinelli<sup>3)</sup>によって初めに提案された。分離流モデルでは、液相が単独で流れたと仮定した場合の摩擦損失  $p_L/L$  と気相が単独で流れたと仮定した場合の摩擦損失  $p_G/L$  の比の平方根で表されるパラメータ  $X$  と、 $p_{GL}/L$  と  $p_L/L$  の比  $\phi_L^2$  や、 $p_{GL}/L$  と  $p_G/L$  の比  $\phi_G^2$  の関係を表す式が多くの研究で提案されている。ここでは、実験で得られた気液二相流におけるデータを用いて、これまでに提案されている推定手法の精度を調査した。計測結果との一致度の高かった Shannak<sup>4)</sup>による関係式（均質流モデル）を用いた計算結果と計測結果の比較を図5に示す。比較には体積率の場合と同様に Takano et al.<sup>2)</sup>が得た実験結果も用いた。なお、均質流モデルによる  $p_{GL}/L$  及び Shannak による関係式は次式のとおりである。

$$\frac{\Delta p_{GL}}{\Delta L} = f_{GL} \frac{1}{D} \frac{(\rho_G j_G + \rho_L j_L)^2}{2\rho_{GL}}$$

$$\rho_{GL} = \frac{j_G}{j_G + j_L} \rho_G + \frac{j_L}{j_G + j_L} \rho_L$$

$$Re_{GL} = \frac{\rho_G j_G^2 D^2 + \rho_L j_L^2 D^2}{\mu_G j_G D + \mu_L j_L D}$$

ここで、 $f_{GL}$  は二相流における管摩擦係数を表す。

図5から、多くのデータが $\pm 30\%$ に収まっており、計算結果と計測結果は概ね一致していることがわかった。そこで、Shannak の関係式を三相流に拡張することを考えた。当該関係式では、レイノルズ数が二相流の慣性力と粘性力の比となっているため、三相流に拡張した場合、次式のようなになる。

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

また、均質流モデルにおける三相流の摩擦損失は次式で表される。

$$\frac{\Delta p_{GLS}}{\Delta L} = f_{GLS} \frac{1}{D} \frac{(\rho_G j_G + \rho_L j_L + \rho_S j_S)^2}{2\rho_{GLS}}$$

$$\rho_{GLS} = \frac{j_G}{j_G + j_L + j_S} \rho_G + \frac{j_L}{j_G + j_L + j_S} \rho_L + \frac{j_S}{j_G + j_L + j_S} \rho_S$$

ここで、 $f_{GLS}$  は三相流における管摩擦係数を表す。

これらを用いて計算した  $p_{GLS}/L$  の計算結果と計測結果の比較を図6に示す。図6から、実験結果が1 kPa/m以下の小さいところでは乖離が大きい傾向にあるが、他の領域では多くのデータが $\pm 30\%$ の範囲に収まっており、計算結果と計測結果が概ね一致していることがわかった。

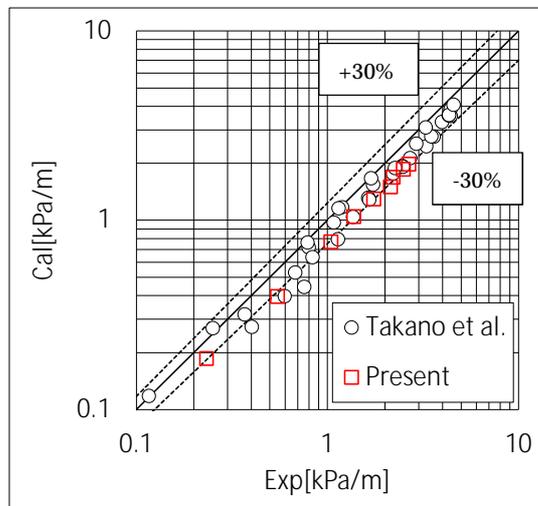


図5 摩擦損失の比較（気液二相流）

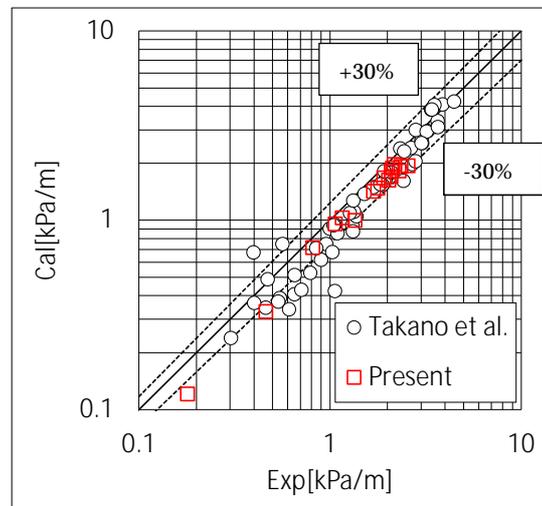


図6 摩擦損失の比較（固気液三相流）

全体として、気相の体積率と摩擦損失については、高ボイド領域のみならず、幅広い領域で各相の体積率と摩擦損失を一定の精度で推定できる手法を提示した。一方、特に固相の体積率については計算結果と計測結果の乖離が大きく、今後、精度の高い推定手法の構築が望まれる。

本研究成果を活用すれば、日本の排他的経済水域に賦存することが知られているレアアース泥や表層型メタンハイドレートといった資源を、ガスリフト方式で揚収するためのシステム設計・運用に役立つ貴重な指針が得られると考えられる。

#### 参考文献：

- 1) 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
- 2) Takano, S., et al., Experimental study on void fractions and pressure drops in three-phase flow for deep sea mining, Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2021
- 3) Lockhart, R. W. and Martinelli, R. C., Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. Chemical Engineering. Progress, Vol. 45, pp.39-48, 1949
- 4) Shannak, A. B., Frictional pressure drop of gas liquid two-phase flow in pipes, Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, pp.3277-3284, 2008

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Satoru TAKANO , Sotaro MASANOBU, Shigeo KANADA, Masao ONO
2. 発表標題 EXPERIMENTAL STUDY ON VOID FRACTIONS AND PRESSURE DROPS IN THREE-PHASE FLOW FOR DEEP SEA MINING
3. 学会等名 OMAE2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------