

海洋鉱物資源開発における傾斜管内の 固気液三相流の移送評価

高野 慧*, 正信聡太郎**, 山本 譲司*, 金田 成雄*,
小野 正夫*

Flow Assurance for Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flow in Inclined Pipe for Deep Sea Mining

by

TAKANO Satoru, MASANOBU Sotaro, YAMAMOTO Joji, KANADA Shigeo,
and ONO Masao

Abstract

Subsea minerals, such as seafloor massive sulfides deposits or cobalt rich crust, exist in the deep water within Japan's exclusive economic zone. However, the development of subsea minerals has not been commercialized yet. Air-lift pumps raise fluid or slurry by supplying pipes with air to reduce their density to efficiently transport subsea minerals to the surface. It is important to estimate the amount of ore that can be lifted by the air-lift pumps under certain conditions such as submergence ratio and volume of supplied air. The void fraction in three-phase flow and friction loss of the flow must be known in order to estimate the amount of lifted ore. Empirical methods for estimating the void fraction and friction loss in three-phase flow were previously proposed, but these studies targeted estimation in vertical pipes. Meanwhile, lifting systems that use an air-lift pump or centrifugal pump for subsea minerals have both vertical and inclined pipes. In this study, we conducted scaled model experiments to investigate void fractions and friction losses in inclined pipes. The experiments were conducted for five different inclination angles. The empirical estimating method for vertical or horizontal pipes proposed in the previous studies was applied to our experimental condition. Then we compared the experimental data on void fraction and friction loss with those estimated by the previously proposed method. The comparison showed the estimated results agreed well with the experimental results, which suggested that the void fraction and friction loss in inclined pipes can be calculated by the previous method. In addition, we calculated the liquid-phase flux in the multiphase flow on the basis of momentum conservation with reference to prior studies which proposed calculation methods for flux of liquid phase in an air-lift pump system. A comparison between the calculated results and the experimental results indicated that the calculation procedure can be applied to determine the liquid flux in inclined pipes.

* 海洋開発系深海技術研究グループ, ** 海洋開発系

原稿受付 令和2年10月26日

審査日 令和2年12月11日

目 次

1. まえがき	3
2. 固気液三相流移送試験	3
2.1 試験装置	3
2.2 試験方法	4
2.3 試験条件	5
2.4 試験結果	5
2.4.1 気液二相流における液相流束	5
2.4.2 気液二相流における気相体積率	6
2.4.3 気液二相流における摩擦損失	7
2.4.4 固気液三相流における液相流束	8
2.4.5 固気液三相流における各相の体積率	9
2.4.6 固気液三相流における摩擦損失	11
3. 液相流束の計算	12
3.1 計算方法	12
3.2 試験結果と計算結果の比較	14
4. まとめ	15
参考文献	16

記 号

A : Chisholm-Laird の相関式の実験定数	[-]
C_D : 粒子の抗力係数	[-]
d_s : 粒子直径	[m]
D : 配管内径	[m]
g : 重力加速度	[m/s ²]
G : 質量流束	[kg/m ² s]
I : 圧力勾配	[Pa/m]
j : 各相の流束	[m/s]
L : 配管全長	[m]
N_D : 管径に関する無次元数	[-]
ΔP_E : 管の入口形状及び固液二相流の助走の損失	[Pa]
ΔP_I : 固気液三相流の助走の損失	[Pa]
Q : 流量	[m ³ /s]
Re : レイノルズ数	[-]
u : 速度	[m/s]
u_{SW} : 粒子の干渉沈降速度	[m/s]
x : クオリティ	[-]
X : Lockhart-Martinelli によるパラメータ	[-]
α : 体積率	[-]
ζ : 助走の損失係数	[-]
θ : 配管の傾斜角	[deg]
λ : 管摩擦係数	[-]
ν : 動粘性係数	[m ² /s]
ξ : 管の入口形状による損失係数	[-]

ρ : 密度	[kg/m ³]
ρ_E : 実効密度	[kg/m ³]
σ : 浸水率	[-]
σ_t : 表面張力	[N/m]
τ : 壁面せん断応力	[Pa]
ϕ : Lockhart-Martinelli によるパラメータ	[-]

添字

E : 配管入口

G : 気相

G_O : 圧力 1atm, 温度 20 度における気相

I : 空気供給点

k : 各相

L : 液相

LS : 固液二相

M : 配管の中間位置

O : 配管出口

S : 固相

3 : 固気液三相

1. まえがき

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)~3)}。著者らは、それらの資源を海上に移送するための揚収システムにおける揚水量・揚鉱量を検討するための基礎データとなる空気供給量や浸水率と、液相流束の関係を調査することを目的として、鉛直管を対象としたエアリフト方式による固気液三相流の移送試験を実施した⁴⁾。しかし、実際の揚収システムでは、鉛直だけでなく、フレキシブルな傾斜配管を有する可能性も想定される。揚収システムの設計時の揚水量・揚鉱量の推定には、三相流の移送による摩擦損失や三相流中の各相の体積率を推定する必要がある。従来のマンガング塊などを対象とした固気液三相流の移送評価に関する研究では、鉛直管を対象とした研究がほとんどであり、傾斜管を対象とした研究は少ない。そこで、著者らは傾斜管における固気液三相流の摩擦損失や各相の体積率の推定手法を構築するためにエアリフト方式による三相流の移送試験を実施した。本稿では、その試験の概要と試験結果について報告する。また、エアリフト方式による二相流・三相流移送における液相流束の推定を行ったので、その結果も合わせて報告する。なお、本報告は基盤研究「ガスリフトによる海底資源揚収のための内部流評価技術に関する研究」の成果報告であり、参考文献⁵⁾を再編集した内容であることを付記する。

2. 固気液三相流移送試験

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 25.6mm の透明塩ビ管、コンプレッサ、模擬球を供給するためのフィーダ、揚収された水と模擬球を分離するための分離タンク、浸水率を一定に保つための水位調整管、水と模擬球を混合するための混合タンク及び配管を傾斜させるためのフレキシブルホースで構成される。試験装置に供給するための空気流量を一定に保つために、マスフローコントローラを用いた。また、気液二相流や固気

液三相流の移送による摩擦損失を計測するために差圧計を，差圧計測区間の長さ方向の中心の圧力を計測するために圧力計を，管内の流量を計測するために電磁流量計をそれぞれ用いた．使用した主な計測器を表 1 にまとめた．

模擬球として，海底熱水鉱床の密度と，想定される粒子径を参考に，直径 4mm のガラスビーズ（密度：2,553kg/m³）を用いた．

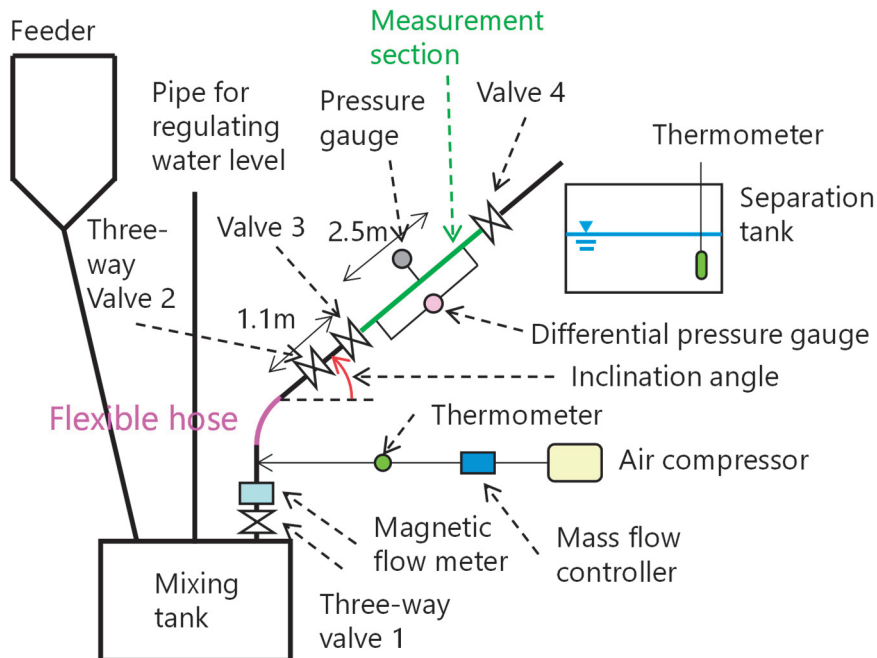


図 1 試験装置模式図

表 1 主な計測器一覧

計測項目	計測センサ	仕様
管内流量	電磁流量計（東京計装製 EGM7300C）	レンジ：0 ～ 12m/s 精度：指示値の±0.5%
供給空気流量	マスフローコントローラ（KOFLOC 製 MODEL DF-250C）	レンジ：0～400L/min 精度：± 2.0% F.S.
差圧	差圧伝送器（横河電気製 EJX110J）	レンジ：0～100kPa 精度：± 0.075% F.S.
管内圧力	差圧伝送器（横河電気製 EJX110J）	レンジ：0～100kPa 精度：± 0.075% F.S.

2.2 試験方法

本試験では，揚水量や摩擦損失を計測するための試験と，二相流及び三相流の各相の体積率を計測するための試験の 2 種類を行った．まず 2 種類の試験における共通部分の方法を以下に示す．はじめに，コンプレッサを起動し，マスフローコントローラを介して一定流量で空気を試験装置に供給する．空気が供給されることにより生じた流れが安定したことを確認した後，フィーダを起動し，模擬球を混合タンクに供給する．揚収された模擬球は分離タンクで回収した．三相流の移送が安定したら，摩擦損失などのデータの収録を開始するとともに，分離タンクにて水と模擬球の揚収量を計測した．このとき，揚収に要した時間も合わせて計測することで，液相流束と固相流束を求めた．

体積率の計測の際には，二相流や三相流の移送中に，ボールバルブ（図 1 中のバルブ 3 及びバルブ 4）を急閉し，流れを閉じ込めて配管内に堆積した模擬球の高さと水面の高さから固気液各相の体積率を得た．なお，堆積

した模擬球群の高さや水面の高さと実際の体積率の関係は、事前に校正を行うことで把握した。固相の体積率が低く、堆積した高さを目視で確認できない場合には、図1中の三方弁2を操作して、閉じ込めた流れの中の模擬球を回収して、体積を直接計測した。バルブ1及びバルブ2を急閉することによる流れの急停止を避けるため、バルブ1及びバルブ2の急閉の際には、三方弁1も操作し、流れが急停止しないようにした。

2.3 試験条件

気相流束は0.51～7.2m/s（圧力1atm，温度20℃での値）の範囲で，固相流束は0.022～0.11m/sの範囲で試験を実施した。傾斜角を90（鉛直），75，60，45，30度の5種類に変化させて試験を実施した。浸水率（図2中のL'/L）は0.74～0.76の間であった。試験条件をまとめたものを表2に示す。

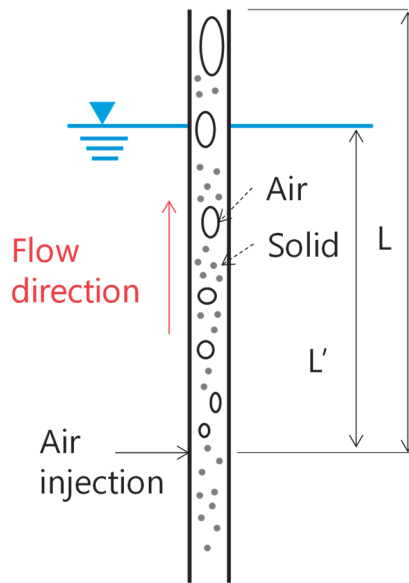


図2 エアリフト模式図

表2 試験条件

j_{G_0} [m/s]	傾斜角[deg]	固相流束[m/s]	浸水率
0.62～7.2	90	0, 0.043～0.11	0.74～0.76
0.62～7.2	75	0, 0.022～0.086	
0.62～7.2	60	0, 0.029～0.072	
0.62～7.2	45	0, 0.028～0.057	
0.62～7.2	30	0, 0.022～0.036	

2.4 試験結果

2.4.1 気液二相流における液相流束

図3に気相流束と液相流束の計測結果を示す。結果は傾斜角ごとに整理している。図3の横軸は圧力1atm，温度20度における気相流束を，縦軸は液相流束をそれぞれ示しており，流束は次式で表される。

$$j_k = Q_k / (D^2 \pi / 4), (k=G, L) \quad (2.1)$$

j_{G_0} が増加するに従って， j_L も増加していく傾向が確認できるが， j_{G_0} がある値を超えると， j_L が減少していく。これは，空気の増加による液相流束の増加より，摩擦による損失分が大きくなるためであると考えられる⁶⁾。

また、傾斜角が小さくなるにつれて、 j_L が低下する傾向が確認された。これは、既存の文献⁷⁾で報告されている傾向と一致する。

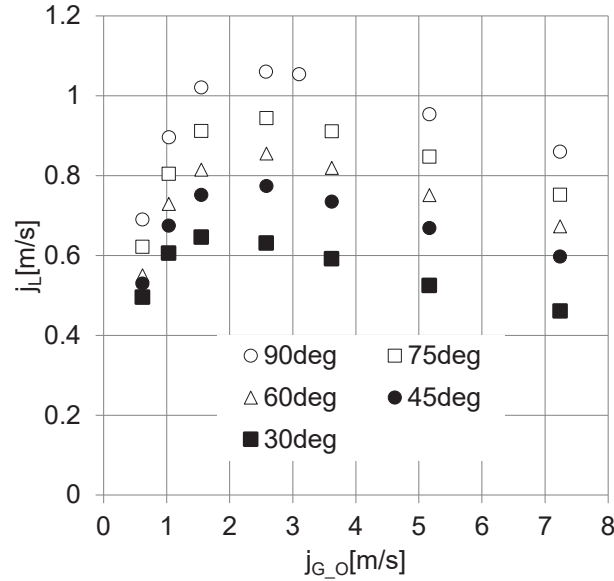


図3 気相流束及び液相流束の計測結果

2.4.2 気液二相流における気相体積率

気液二相流中の気相体積率の計測結果と計算結果の比較を図4に示す。気相体積率の計算には、Smith⁸⁾が提案している式(2.2)～式(2.4)を用いた。式(2.2)は環状噴霧流における液膜の速度ヘッドと液滴を含む気相の速度ヘッドが等しいという仮定に基づいた考え方で求められたもので、当該式には鉛直管と水平管を対象とした実験結果から定められた実験定数が用いられている。本来、環状噴霧流を対象として提案されているため、式(2.2)は他の流動様式には適用できないと考えられるが、環状噴霧流以外の他の流動様式でも実験結果とよく一致することが知られている⁹⁾。当該式は鉛直管、水平管に関わらず、同一の形で表されるため、本稿では傾斜管にも適用を試みた。図4から、鉛直管のみならず、傾斜管においても計測結果と計算結果がよく一致しており、式(2.2)は傾斜管にも適用できることが示唆された。

$$\alpha_G = \left[1 + 0.4 \frac{\rho_G}{\rho_L} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) + 0.6 \frac{\rho_G}{\rho_L} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \times \left\{ \frac{\frac{\rho_L}{\rho_G} + 0.4 \left(\frac{1}{x} - 1 \right)}{1 + 0.4 \left(\frac{1}{x} - 1 \right)} \right\}^{0.5} \right]^{-1} \quad (2.2)$$

$$x = \frac{\rho_G j_G}{G} \quad (2.3)$$

$$G = \rho_G j_G + \rho_L j_L \quad (2.4)$$

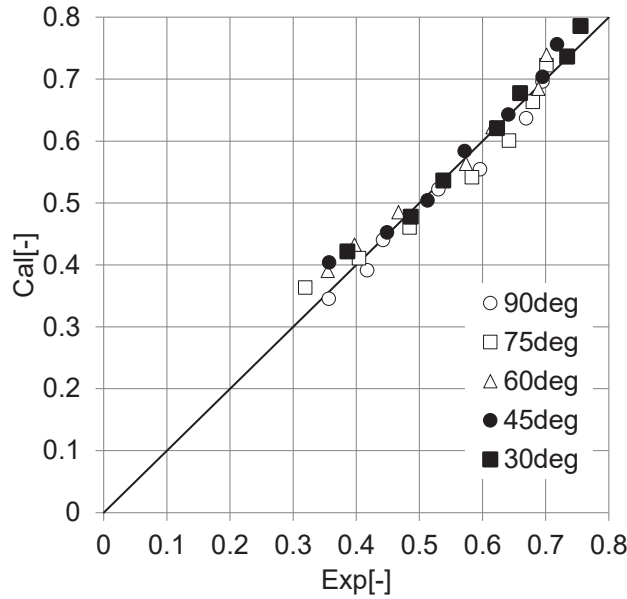


図4 気相体積率比較結果

2.4.3 気液二相流における摩擦損失

摩擦損失の計測結果と計算結果の比較を図5に示す。図5中の点線は±30%を表す。摩擦損失の計測結果は、差圧計で計測した圧力損失から、静水圧分を除いた値である。静水圧分は別途計測した体積率から算出した。摩擦損失の計算には、畠山ら¹⁰⁾が提案している式(2.5)～式(2.10)を用いた。これらの式はLockhart-Martinelliによるパラメータが用いられており、鉛直管を対象とした試験で妥当性が検証されている。Lockhart-Martinelliによるパラメータは、気相と液相がそれぞれ単独で管を満たして流れる際の圧力損失の比である。ここでは、当該式を傾斜管にも適用して計算を行った。

$$X^2 = I_L / I_G \quad (2.5)$$

$$I_k = \lambda_k \frac{1}{D} \frac{\rho_k j_k^2}{2}, (k=G, L) \quad (2.6)$$

$$\phi_L^2 = I_{GL} / I_L \quad (2.7)$$

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{A}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (2.8)$$

$$A = 52 N_D^{-0.2} \quad (2.9)$$

$$N_D = D \sqrt{\rho_L g / \sigma_i} \quad (2.10)$$

なお、式(2.6)中の λ は次式で示される内面が滑らかな配管の管摩擦係数を表す次式¹¹⁾を用いた。

$$\frac{1}{\lambda_k} = 2.0 \log_{10} \left(\text{Re} \sqrt{\lambda_k} \right) - 0.8 \quad (2.11)$$

ここで，レイノルズ数は次式で表される．

$$Re = \frac{D \cdot j_L}{\nu} \quad (2.12)$$

図 5 から，計算結果が計測結果に比べて過大ではあるが，配管の傾斜角によらず，同一の式で摩擦損失を表せることを示唆する結果が得られた．

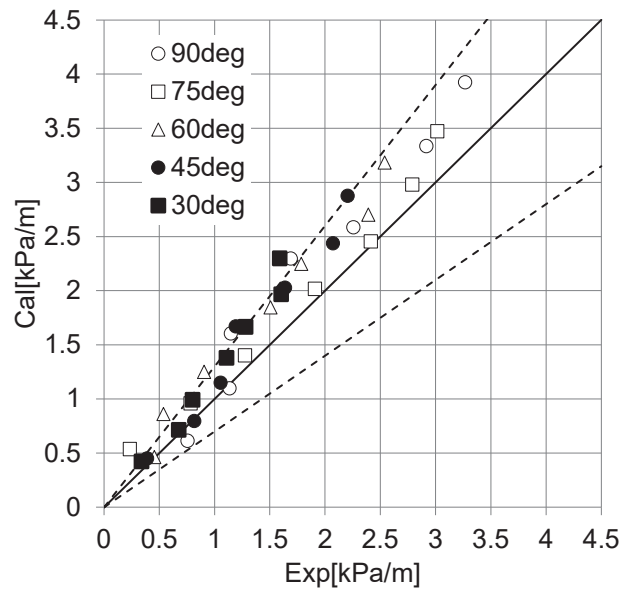


図 5 摩擦損失比較結果

2.4.4 固気液三相流における液相流束

固気液三相流の移送における液相流束の計測結果の一例として，傾斜角が 60 度のときの結果を図 6 に示す．固相流束が上昇するにつれて，液相流束が低下していく傾向が確認できる．また，気液二相流の場合と同様に，気相流束の上昇とともに，液相流束も上昇していくが，ある値を超えると下降に転じる傾向が確認された．

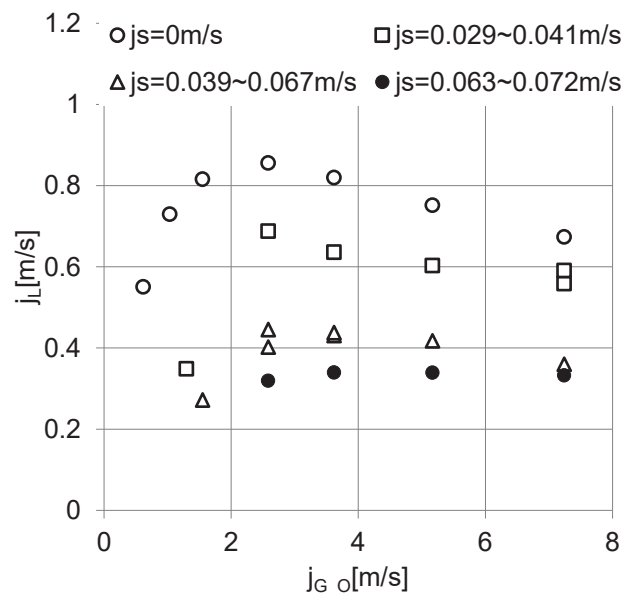


図 6 液相流束計測結果（傾斜角 60 度）

2.4.5 固気液三相流における各相の体積率

固気液三相流中の気相体積率を計算するために、佐田富ら¹²⁾は、固気液三相流を固液スラリー相と気相の二相流とみなして、(2.2)式を修正した次式を提案している。

$$\alpha_G = \left[1 + 0.4 \frac{\rho_G}{\rho_{LS}} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) + 0.6 \frac{\rho_G}{\rho_{LS}} \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \times \left\{ \frac{\frac{\rho_{LS}}{\rho_G} + 0.4 \left(\frac{1}{x} - 1 \right)}{1 + 0.4 \left(\frac{1}{x} - 1 \right)} \right\}^{0.5} \right]^{-1} \quad (2.13)$$

$$\rho_{LS} = \rho_L \frac{\alpha_L}{\alpha_L + \alpha_S} + \rho_S \frac{\alpha_S}{\alpha_L + \alpha_S} \quad (2.14)$$

また、三相流における各相の体積率を求めるためには、三相流中における固体粒子速度を把握する必要があり、その推定には佐田富ら¹²⁾によって提案された次式がある。

$$u_S = c \frac{G}{\rho_E} + u_{SW} \quad (2.15)$$

$$c = 1 + 0.2 e^{-5 \frac{\alpha_S}{1 - \alpha_G}} \quad (2.16)$$

$$\rho_E = \left(\frac{\rho_3}{\rho_{LS}} \right)^{1.5} \rho_{LS} \quad (2.17)$$

$$\rho_3 = \rho_G \alpha_G + \rho_L \alpha_L + \rho_S \alpha_S \quad (2.18)$$

$$u_{SW} = - \left\{ 1 - \left(\frac{d_S}{D} \right)^2 \right\} \left(1 - \frac{\alpha_S}{1 - \alpha_G} \right)^{2.7} \sqrt{\frac{4 g d_S (\rho_S - \rho_E)}{3 C_D \rho_E}} \quad (2.19)$$

ここでは、佐田富らが提案している方法を用いて、各相の体積率を計算した。計算方法の概要を以下に、計算のフローを図7にそれぞれ示す。

- ① 各相の流束、密度、配管内径、粒子直径及び粒子の抗力係数を与える。
- ② 仮の液相の体積率 α_L' と固相の体積率 α_S' を与える。
- ③ 式(2.3)、式(2.13)及び式(2.14)を用いて、 α_G を計算するとともに、式(2.15)～(2.19)を用いて u_S を計算する。これらを用いて、 α_S と α_L を計算する。
- ④ 得られた α_S と②で仮定した α_S' が乖離している場合、②に戻り、得られた α_S を α_S' として再度計算を行う。
- ⑤ α_L も α_S と同様に計算を行う。
- ⑥ α_L と α_S が収束するまで繰り返し計算を行い、 α_G 、 α_L 、 α_S を求める。

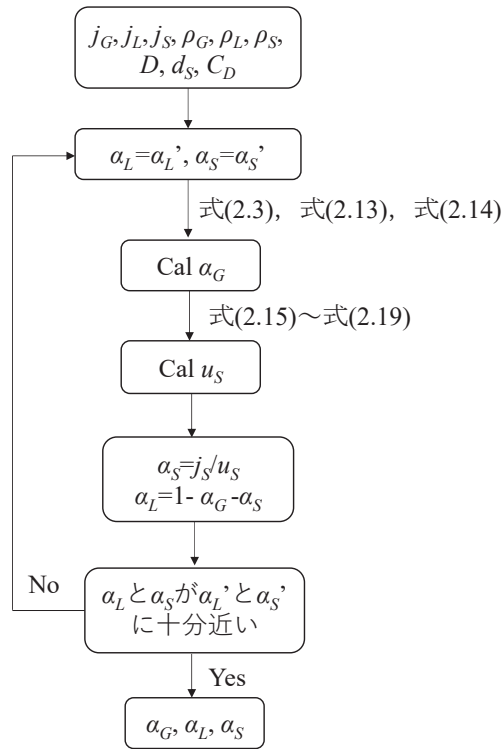


図7 体積率計算フローチャート

ここで、傾斜管における固相流速については、式(2.15)のかわりに次式を用いた。

$$u_S = c \frac{G}{\rho_E} + u_{SW} \sin \theta \quad (2.20)$$

各相体積率の計測結果と計算結果の比較を図8に示す。図8中の点線は $\pm 30\%$ を表す。また、図8中の結果には30度から90度の5つの傾斜角における結果が含まれている。比較結果の大部分が $\pm 30\%$ の範囲に収まっており、前述の計算方法が傾斜管にも適用できることが示唆された。

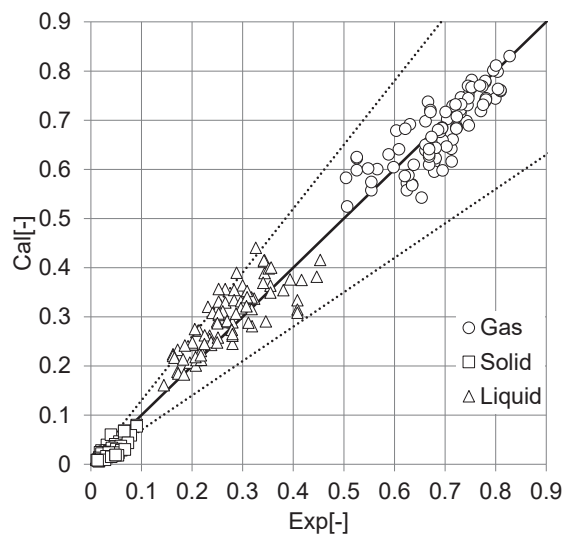


図8 各相体積率の計測結果と計算結果の比較

2.4.6 固気液三相流における摩擦損失

固気液三相流の移送による摩擦損失を計算するために、畠山ら¹⁰⁾は、式(2.21)～(2.23)を提案している。これらの式は液相における摩擦損失を計算する式(2.5)、(2.7)及び(2.8)の液相に関する部分を固液スラリー相に置き換えたものである。

$$X_3^2 = I_{LS} / I_G \quad (2.21)$$

$$\phi_3^2 = I_3 / I_{LS} \quad (2.22)$$

$$\phi_3^2 = 1 + \frac{A}{X_3} + \frac{1}{X_3^2} \quad (2.23)$$

式(2.21)における X_3 を計算するために、固液スラリー流による摩擦損失が必要である。固液スラリー流による摩擦損失を表す式として、Durand¹³⁾によって提案されている次式がある。

$$I_{LS} = \lambda_{LS} \frac{1}{D} \frac{\rho_L (j_L + j_S)}{2} \quad (2.24)$$

λ_{LS} は、式(2.11)及び以下に示されるレイノルズ数を用いて計算される。

$$\text{Re}_{LS} = \frac{(j_L + j_S) D}{\nu_L} \quad (2.25)$$

著者らは、式(2.21)～式(2.25)を用いた固気液三相流の摩擦損失の計算を試みたが、計算結果が計測結果より過小な傾向を示した。そこで、固液スラリー流の摩擦損失として、佐田富ら¹²⁾が提案している式(2.26)を用いて計算を行った。式(2.26)は式(2.24)の液相密度をスラリー密度に置き換えたものである。

$$I_{LS} = \lambda_{LS} \frac{1}{D} \frac{\rho_{LS} (j_L + j_S)}{2} \quad (2.26)$$

計測結果と式(2.21)～(2.23)と式(2.26)を用いて計算した結果の比較を図9に示す。図9中の点線は $\pm 30\%$ を表す。二相流の場合と比べて、計測結果と計算結果の差のバラツキが大きい、概ね計算結果が計測結果と一致していることが確認できた。このことから、先程述べた方法で傾斜管における固気液三相流の移送による摩擦損失が推定できることが示唆された。

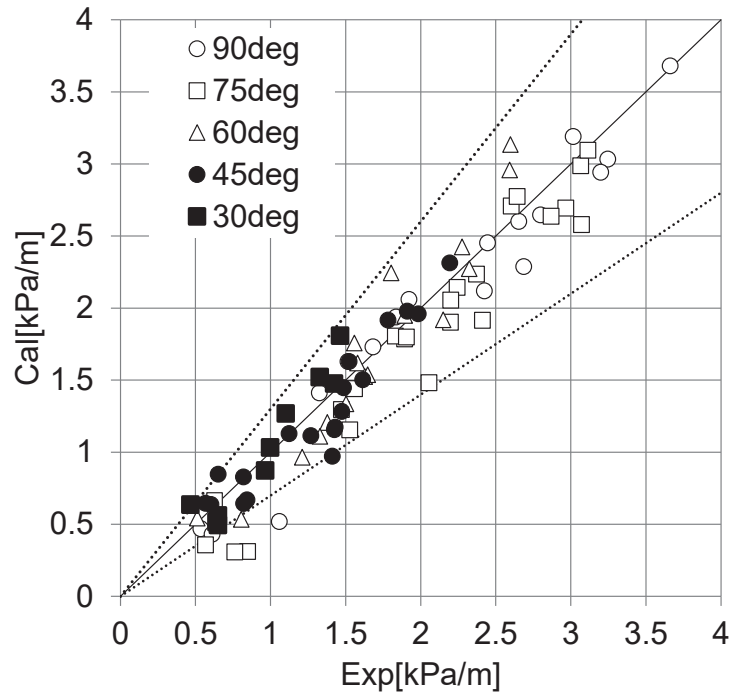


図9 三相流の移送による摩擦損失の計測結果と計算結果の比較

3. 液相流束の計算

3.1 計算方法

配管の入口と出口の運動量保存に基づき、固相流束が与えられたときの、液相流束の計算を行った。計算は吉永ら¹⁴⁾が提案している方法に基づいており、ここでは、その計算方法を簡単に述べる。まず、エアリフト方式の模式図を図10に示す。

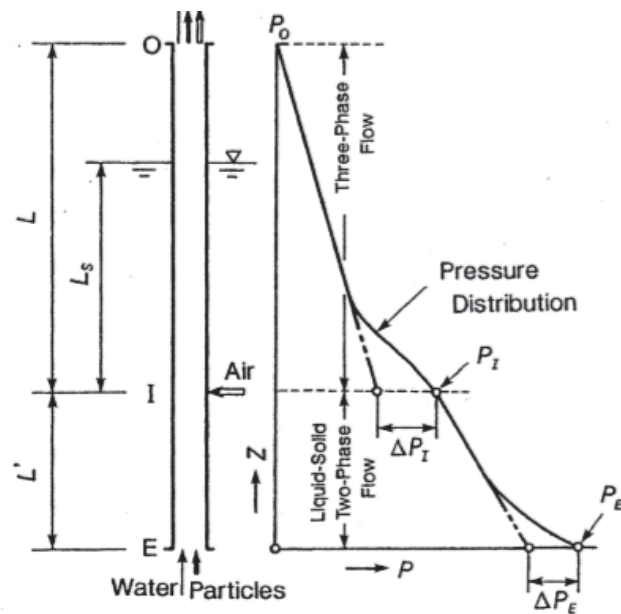


図10 エアリフト方式の模式図¹⁴⁾

配管の入口 E と出口 O の間の運動量保存は次式で表される.

$$\begin{aligned} & \left(j_L \rho_L u_{L,E} + j_S \rho_S u_{S,E} \right) - \left(j_{G,O} \rho_{G,O} u_{G,O} + j_L \rho_L u_{L,O} + j_S \rho_S u_{S,O} \right) \\ & - \frac{4}{D} \int_E^I \tau_{LS} dz - \frac{4}{D} \int_I^O \tau_3 dz - \int_E^I \left(\rho_L \alpha_L^* + \rho_S \alpha_S^* \right) g dz \\ & - \int_I^O \left(\rho_G \alpha_G + \rho_L \alpha_L + \rho_S \alpha_S \right) g dz + \left\{ \rho_L g (L' + L_S) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

左辺の第1項は入口から流入する運動量, 第2項は出口から流出する運動量をそれぞれ表す. 第3項と第4項は固液二相流による摩擦損失と固気液三相流による摩擦損失をそれぞれ表す. 第5項と第6項は二相流と三相流に及ぼす重力の項をそれぞれ表す. 第7項は外からかかる圧力の項を表す. なお, 第5項の α_L^* と α_S^* は, 二相流中の体積率を表す. 摩擦損失の項 (第3項と第4項) は過渡的な流れによる損失と発達した流れによる損失の和で表されると考えると次式で表される.

$$\frac{4}{D} \int_E^I \tau_{LS} dz = \int_E^I I_{LS} dz + \Delta P_E \quad (3.2)$$

$$\frac{4}{D} \int_E^I \tau_3 dz = \int_E^I I_3 dz + \Delta P_I \quad (3.3)$$

ここで, ΔP_E と ΔP_I はそれぞれ, 次式で表されたとした¹⁴⁾.

$$\Delta P_E = (\xi + \zeta_E) \rho_{LS} \frac{(j_L + j_S)^2}{2} \quad (3.4)$$

$$\Delta P_I = \zeta_I \left\{ \rho_{LS} \frac{\left(\frac{j_L + j_S}{1 - \alpha_G} \right)^2}{2} - \rho_{LS,2} \frac{(j_L + j_S)^2}{2} \right\} \quad (3.5)$$

配管の入口部の周りに流れを阻害するものが何もないときの ξ は 0.56¹⁵⁾とされている. また, ζ_E 及び ζ_I は, 吉永¹⁴⁾の方法にならい, 1 とした. また, 簡便に液相流束の計算を行うため, 次に示す2つの条件を仮定した.

- 1) 液相と気相の温度変化はないものとし, 液相は非圧縮性流体とする.
- 2) 式(3.1)中の摩擦損失項と重力項の計算には, 長さ方向の中心の値を代表して用いる.

これらの前提条件における計算手順を以下に, 計算フローを図11に示す.

- ① 配管の内径, 配管全長, 浸水率, 配管の摩擦係数, 液相の物性, 粒子の直径, 密度, 抗力係数を与える.
- ② 気相の流束と固相の流束を与える.
- ③ 気相の流入点における圧力が, 流入点の深さにおける静水圧に等しいと仮定する.
- ④ 配管の中間位置の圧力を, 気相の流入点と出口圧力の平均とする.
- ⑤ 気相の流入点, 配管の中間位置及び出口での気相の密度及び流束を計算する.
- ⑥ 式(3.1)の左辺を 0 に収束させるよう, 液相流束を求める.

- ⑦ 気相の流入点での圧力を更新し，④以降を繰り返す。
 ⑧ 気相の流入点での圧力が収束したら計算を終了する。

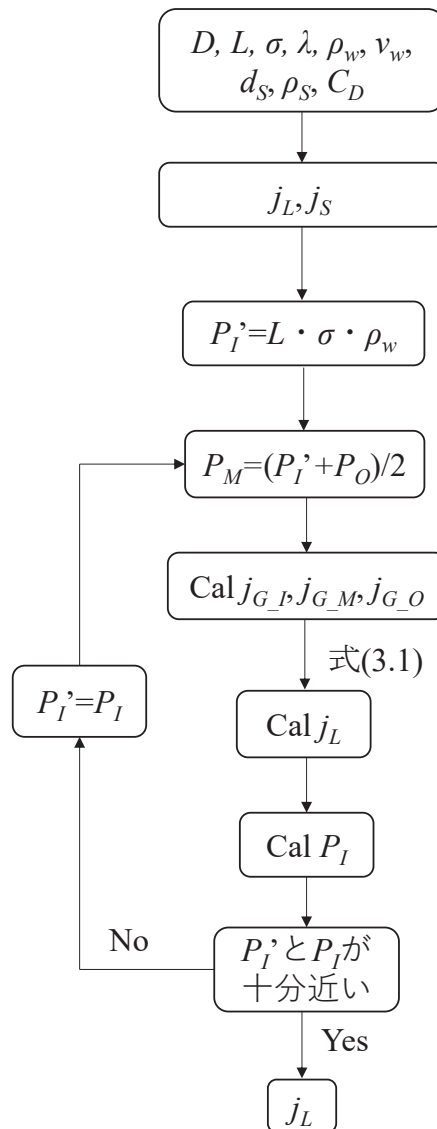


図 11 液相流束計算フローチャート

3.2 試験結果と計算結果の比較

液相流束の計算結果の例を図 12 及び 13 に示す。図 12 には種々の傾斜角における二相流に対する計算結果を、図 13 には傾斜角 60 度における二相流及び三相流に対する計算結果をそれぞれ示し、計測結果と比較した。なお、図 12 及び図 13 中のプロットは計測結果を示す。二相流における計算では、液相流束の計算結果と計測結果が概ね一致していることが確認できた。一方、三相流の場合、固相流束が小さいところでは、計算結果と計測結果は概ね一致しているが、固相流束が大きいところでは、両者の乖離が大きい。固相流束が大きなケースでは、配管入口が粒子で閉塞する現象が確認されていた。計算では、入口の周りには流れを阻害するものが何もないという条件での損失係数を用いており、実際の入口部での圧力損失よりも計算における圧力損失が過小となったことが乖離の原因であると考えられる。

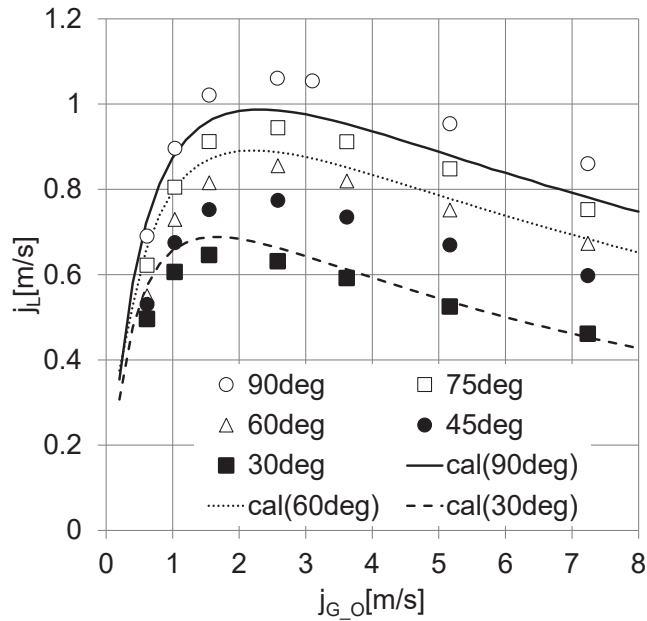


図12 気液二相流における液相流束の計算結果

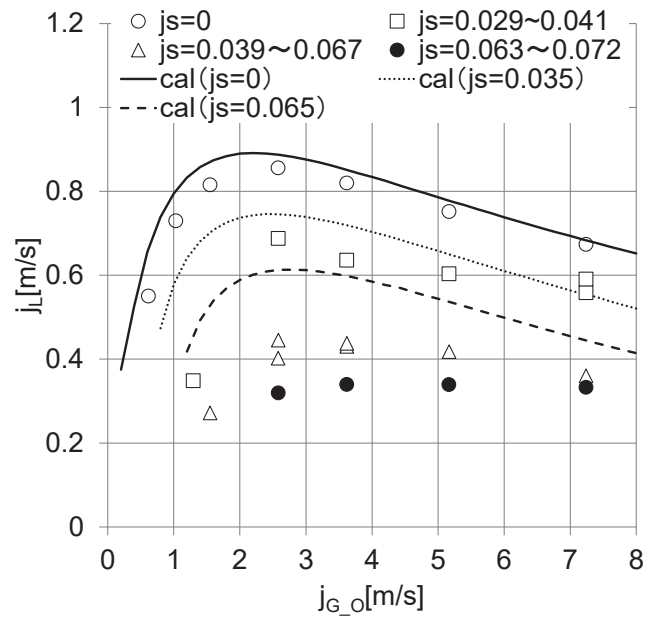


図13 固気液三相流における液相流束の計算結果（傾斜角 60 度）

4. まとめ

傾斜管における固気液三相流の摩擦損失や各相の体積率の推定手法を構築することを目的に、内径 25.6mm の透明塩ビ管とガラスビーズを用いて、エアリフト方式による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に及ぼす配管傾斜の影響について調査した。本試験の範囲では、配管が傾くにつれて、液相流束が低下していくことがわかった。また、鉛直管や水平管を対象とした各相の体積率と摩擦損失の計算方法が傾斜管にも適用できることが示唆された。

エアリフトポンプによる垂直管内の固気液三相流に対して提案されている計算方法を用いて、傾斜管の試験条件に基づいた液相流束の計算を実施した。気液二相流及び固相流束が小さい固気液三相流では、計算結果と計測結果が概ね一致したが、固相流束が大きな場合は、計測結果と計算結果に乖離が見られた。この乖離は試験実施時の状態が計算方法の仮定条件と完全には一致しないためであると考えられるが、摩擦損失や各相の体積率の推定精度は、固相流束の範囲に依存しないことから、前述の計算方法は傾斜管にも適用できることが示唆された。

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) 八田夏夫, 石井隆次: 揚鉱管内を上昇する固気液 3 相流体の流動に関する数値モデル, 資源と素材, 111 巻 (1995), pp.637-642.
- 3) 宇佐美毅, 山門憲雄: エアリフトポンプによる固体粒子の輸送特性 (第 1 報), 日本鉱業会誌, 97 巻, 1118 号 (1981), pp.245-250.
- 4) S. Takano *et al.*, 2018, Experimental studies of air-lift pump for deep sea mining, Proc. of the ASME 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Spain.
- 5) S. Takano *et al.*, 2020, Experimental study on three phase flow in inclined pipe for Deep Sea Mining Proc. of the ASME 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Virtual.
- 6) スラリー輸送研究会編, スラリー・カプセル輸送技術要覧 (1984) .
- 7) 宇佐美毅, 斉藤隆之: エアリフトポンプによる固体粒子の輸送に関する研究, 公害資源研究所報告, 第 38 号 (1984) .
- 8) 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 (1969), pp.647-664.
- 9) 赤川浩繭: 気液二相流 (1974), コロナ社.
- 10) 畠山信夫, 益山忠: 垂直管内気液固三相流における圧力損失, 資源と素材, 111 巻 (1995), pp.465-470.
- 11) 日野幹雄: 流体力学 (1992), 朝倉書店.
- 12) 佐田富道雄他: 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 (1990), pp.125-140.
- 13) Durand, R., Houille blanche, Vol. 8, p.124 (1953).
- 14) 吉永俊雄他: エアリフトポンプの揚固特性, 混相流, 4 巻, 3 号 (1990), pp.174-191.
- 15) 日本機械学会, 管路・ダクトの流体抵抗論 (1979) .