

## PS-24 鉛直動揺管内におけるスラリー移送評価

海洋開発系 \*高野 慧、正信 聡太郎、金田 成雄、小野 正夫

### 1. はじめに

日本の排他的経済水域（沖縄海域や伊豆・小笠原海域）には、海底熱水鉱床などの海洋鉱物資源が賦存していることが知られているが、それらの資源を生産するために解決しなければならない技術的な課題は多い。海底熱水鉱床の生産においては、管内をスラリー状で海上まで移送することが想定されており、鉱石の最大粒径は50mm程度<sup>1)</sup>になることも予想されている。著者らは、これまでに定常な流れを対象として、縮尺1/8程度の配管を用いた模型試験をとおして、大粒径粒子をスラリー移送した場合の圧力損失を評価するモデルを構築してきた<sup>2)</sup>。しかしながら、熱水鉱床の生産の際、海上にある母船が動揺するため、スラリーを移送する揚鉱管も動揺すると考えられる。そこで、著者らは鉛直動揺する管内におけるスラリー移送を対象とした模型試験を実施した。本稿では試験概要とその結果を報告する。

### 2. 試験概要

#### 2.1 試験装置

試験装置の概略図を図-1に示す。試験装置は配管、スラリーポンプ、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めの分離タンク、配管を鉛直加振するための加振機、加振による変位を吸収するためのフレキシブルホースで構成されている。なお、本試験装置で用いた配管の縮尺は1/8程度である。

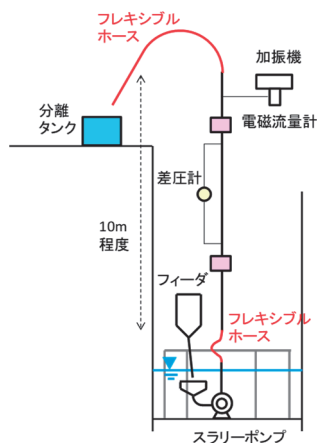


図-1 試験装置模式図

#### 2.2 方法

まず、スラリーポンプを起動して、水単相を移送する。その後、水の移送が安定したら、フィーダから模擬鉱石を供給して、スラリー移送を開始する。管路内を移送された模擬鉱

石は分離タンクへ吐出され、そこで模擬鉱石のみを回収する。回収した模擬鉱石はフィーダへ戻す。スラリーが安定したら、一度スラリーを容器で回収し、その際の回収時間を計測しておく。次に加振機を起動し、配管を動揺させる。スラリーが安定したら、再びスラリーを容器で回収する。その際、先程と同様に回収時間を計測しておく。配管加振時の吐出量の計測では、計測時間の目標を加振周期の整数倍とした。それぞれにおいて計測された水重量及び模擬鉱石重量と吐出時間からスラリー流速と吐出濃度を算出した。

配管には圧力損失計測区間（長さ：2.84m、内径D：26.0mmの透明塩ビ管）があり、当該区間で差圧計を用いて差圧を計測した。また管路内に電磁流量計を、分離タンクに水温計を設置し、それぞれ水流速及び水温を計測した。

#### 2.3 試験条件

本試験では模擬鉱石として、海底熱水鉱床の実鉱石と密度が近いと考えられるアルミナボール（密度3,690kg/m<sup>3</sup>）と、移送する物体の比重の影響を評価するために、ガラスビーズ（密度2,553kg/m<sup>3</sup>）の合計2種類を用いた。これらの2種類の模擬鉱石の粒径は4mmであった。

加振周期は母船の動揺を考慮して、1.26, 1.90, 2.85, 3.48, 5.06secの5種類とした。加振振幅については、水流量の片振幅が水流量の平均値の5%, 10%, 15%となることを目標とした調整を行った。

また、結果として、スラリー流速は1.6~3.6m/s、吐出濃度は3.6~10%であった。

### 3. 試験結果

#### 3.1 固液二相流の定常成分

圧力勾配  $I_m$  の測定値を定常流における推定式から求まる圧力勾配と比較する。

$I_m$  の推定式について以下に示す。まず、鉛直管における  $I_m$  は流体単相による圧力勾配  $I_w$  と固体粒子による付加的な圧力勾配  $I_s$  の和によって表される。ここで、 $I_w$  はダルシー・ワイズバッハの式で求め、管摩擦係数にはブラジウスの式を用いた。

$I_s$  についてであるが、鉛直管においては、固体粒子による付加的な圧力損失のうち、固体粒子と管壁との摩擦及び衝突による損失と固体粒子同士の衝突による損失は無視しても実用上では問題ないと言われており<sup>3)</sup>、その場合、 $I_s$  は以下の式で表される。

$$I_s = C_s \left[ (\rho_s - \rho_w) / \rho_w \right] \quad (1)$$

ここで、 $C_s$ は管内濃度、 $\rho_s$ は鉱石密度、 $\rho_w$ は水密度である。

$I_m$ の推定値と計測値を比較した結果を図-2に示す。図-2中の点線は、 $\pm 10\%$ を表す。当該グラフには、静止した配管で計測した結果と動揺管における結果の両方を示してある。計算結果と試験結果が概ね一致しており、本試験の範囲では、鉛直動揺が圧力損失の定常成分へ及ぼす影響は非常に小さかったと考えられる。

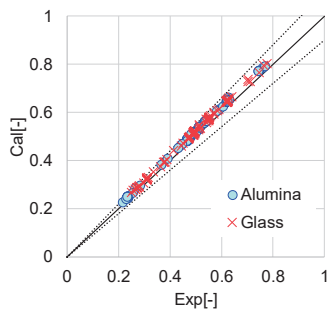


図-2 圧力勾配の計測結果と計算結果の比較

### 3. 2 水単相流及び固液二相流の変動成分

鉛直動揺中に計測した差圧のデータに対して周波数解析を行った。その一例として、ガラスビーズを移送した際のデータを解析した結果を図-3に示す。周波数解析の結果、配管の加振周波数で差圧の振幅も卓越していることがわかったので、図-3には配管の加振周期における差圧の振幅を示してある。この結果から、周期が短くなるにつれて、振幅が大きくなることがわかった。

鉛直動揺管内の流れは、ポンプを一定回転で作動させた場合、配管に対するみかけの流速が鉛直動揺に応じて変化し、脈動流のようにふるまうと考えられる。そこで、脈動流に関する評価方法の適用を試みた。近江らは、脈動流の流動形態が $\omega'/\bar{Re}^{3/4}$ によって粘性項と圧力項とがほぼ釣り合う擬定常領域、慣性項と粘性項が圧力項と釣り合う中間領域、及び慣性項と圧力項がほぼ釣り合う慣性領域の3領域に分けられることを報告している<sup>4)</sup>。なお、 $\omega'$ は無次元角周波数(=  $D^2\omega/4\nu$ )、 $\bar{Re}$ はレイノルズ数の時間平均値をそれぞれ表す。ここでは、本試験における圧力項に対する慣性項の比 $\Phi_t$

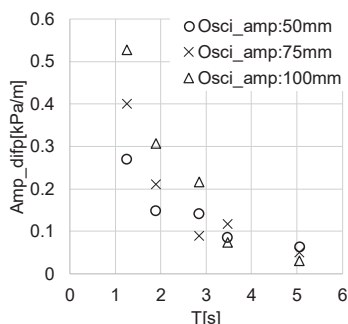


図-3 周期と差圧の振幅の関係 (スラリー流速: 1.9~2.0m/s : 吐出濃度: 4.1~4.8%)

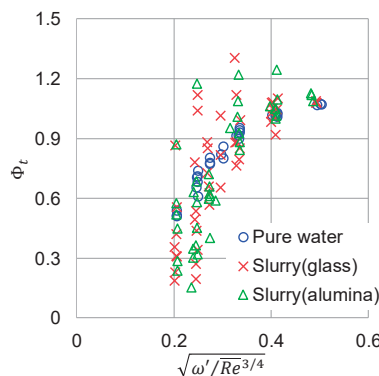


図-4 圧力項と慣性項の比と無次元角周波数及びレイノルズ数の関係

を求めた。その結果を図-4に示す。ただし、慣性項は水に対するものであり、スラリーに対するものではない。水単相の場合に比べて、スラリー流の方が、 $\Phi_t$ が幅広く分布している。特に $\Phi_t$ が小さいケースでは、相対的に圧力勾配の振幅が大きいことを意味しており、ポンプの設計や運用時において配管の鉛直動揺の影響を無視できない可能性があることが示唆される。

### 4. まとめ

内径 26mm の透明模型塩ビ配管及び模擬鉱石としてアルミナボール及びガラスビーズを用いて、動揺管におけるスラリー移送試験を実施し、圧力勾配の定常成分及び差圧の変動成分について調査した。定常成分については、静止した配管における圧力勾配のモデル式の結果と実験結果が概ね一致しており、鉛直動揺が圧力損失の定常成分へ及ぼす影響は非常に小さいことがわかった。差圧の変動成分については、鉛直動揺の周期と同じ周期で差圧振幅の卓越が見られ、周期が短いほど、振幅が大きくなることがわかった。また、圧力項と慣性項の比は、水単相に比べスラリー移送時の方が幅広く分布していることがわかった。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18H01648 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁他：海底熱水鉱床開発計画第1期最終評価報告書，2013.
- 2) 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.
- 3) 寺田進：固体混合液の管路輸送 一流動理論と抵抗計算法一，理工図書，1973.
- 4) 近江宗一ほか：円管内脈動流れの流動形態と摩擦損失（第3報，乱流の場合の流動形態の系統的表示），日本機械学会論文集（B編），第46巻，第404号，pp.636-643，1980.