

PS-16 海底鉱物資源開発における移送管内部流の数値解析

海洋開発系 * 山本 マルシオ、金田 成雄、小野 正夫、藤原 智、
荒木 元輝、高野 慧、山本 譲司、正信 総太郎

1. はじめに

海底鉱物資源開発には、図-1に示すような生産システムが検討されている。掘削機を用いて鉱石を掘削、収集し、鉱石は海水と混合したスラリーとして移送管を介して水中ポンプに送られ、母船で揚収する。本研究では、移送管の動的挙動に対するスラリー流れの影響を評価するために、深海水槽において5分の1縮尺の移送管模型を用いて実験を行い、実験結果をシミュレーション結果と比較した。

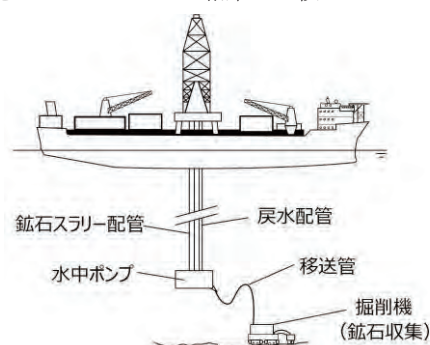


図-1 海底鉱物資源開発用の生産システム¹⁾

2. 研究方法

本研究では、スラリーを流した移送管の模型を用いた実験を行った。加えて、移送管挙動の分析には、商用ソフトウェアであるOrcaFlex²⁾を使用して計算を行った。また、移送管に流れたスラリーの圧力損失を計算するために、OrcaFlexに組み込む外部スクリプトを開発した。開発したプログラムによるシミュレーション結果と実験を比較、評価した。

2.1 実験

実験は海上技術安全研究所の深海水槽で行った。表-1に移送管の想定実機と模型の関係を示す。模型縮尺は1/5とした。「Steep Wave Riser」の形状を得るために、11個のブイを模型に取り付けた。表-2にブイの想定実機と模型の関係を示し、図-2にブイの配置を示す。

図-3に実験装置の概要を示す。振動フィーダを用いて一定の速度で模擬鉱石として使用したアルミナビーズをスラリーポンプの入口に運搬した。スラリーは模型を通して濃度計測用のタンクまで運ばれ、そこでビーズを分離してスラリー濃度を評価した。模型の上端は、母船のヒープ運動を再現するために垂直方向に加振した。

表-1 移送管の想定実機と模型の関係

	想定実機	1/5 縮尺比	
		目標	実測
外径 [m]	0.254	0.0508	0.050
内径 [m]	0.203	0.0406	0.038
長さ [m]	85	17	17
曲げ剛性 [Nm ²]	3.85E+2	0.123	0.6
軸剛性 [N]	4.12E+5	3.3E+3	8.0E+3
線重量[kg/m]	26.80	1.07	1.17

表-2 ブイの想定実機と模型の関係

	想定実機	1/5 縮尺比
外径	0.65 m	0.13 m
内径	0.25 m	0.05 m
厚さ	0.20 m	0.04 m
質量	5.625 kg	0.045 kg

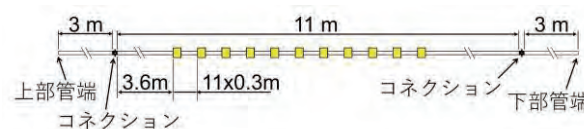


図-2 移送管模型に取り付けられたブイの配置

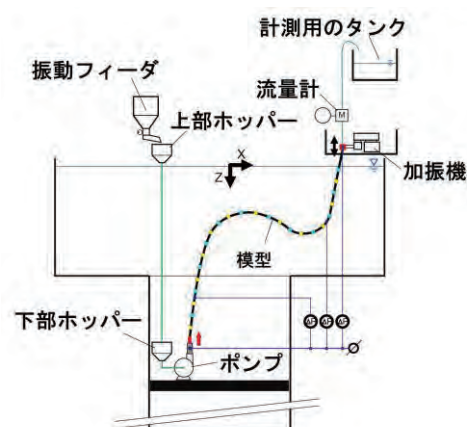


図-3 実験装置の模式図

2.2 シミュレーション

ライザー挙動解析の商用ソフトウェアである OrcaFlex を使用して数値シミュレーションを実行した。このソフトウェアは、曲がったパイプを流れる均質な流体に生じる遠心力を挙動解析に反映することは出来るが、粘性圧力損失は計算されない。そこで、外部スクリプトを開発し、粘性圧力損失を挙動解析に反映できるようにした。

3. 結果

母船のヒーブ運動として、振幅が 10cm, 周波数が 0.224Hz の上端の垂直振動を想定した。スラリーの流速は 3.17m/s, 容積濃度は 1.8% だった。図-4 に実験とシミュレーションによる移送管模型全体の平均位置を示す。黄色の線は実験結果であり、数値計算結果として異なる 2 ケースを示す。緑色の線は外部スクリプトによって計算された内部流れの圧力損失を含み、青色の線は圧力損失を考慮しない結果である。実験結果と計算結果 2 ケースを比較すると、計算結果が若干下方に寄っているが、全体としては概ね一致している。一方で 2 ケースの計算には差異が見られない。

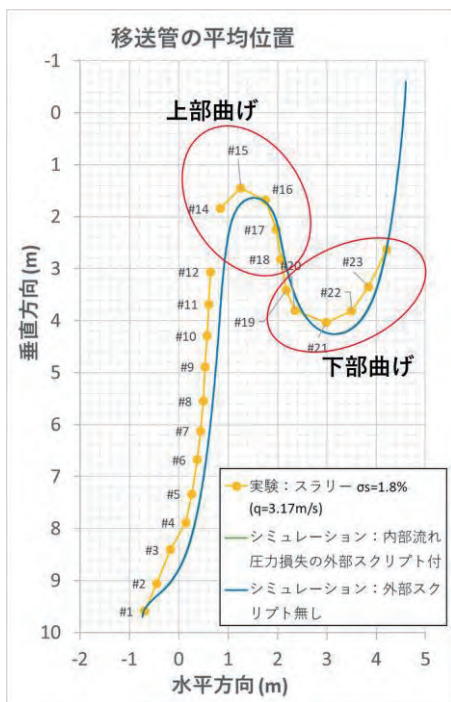


図-4 模型の平均位置

次に、上端加振時の模型の振幅を、水平方向 (図-5) と垂直方向 (図-6) に分けて示す。図-5 の下部曲げの位置では加振位置が近いので、大きな振幅が確認され、計算結果は実験結果に一致していることがわかる。しかし、上部曲げの位置では計算結果は実験結果より小さい。この理由として、上部曲げによりスラリー内の固体に強い遠心力が生じていたためではないかと推測している。そのため、スラリーを均質な流体と見なした数値計算との差が発生したと考えられる。図-6 の垂直方向振幅でも水平方向振幅と同じ傾向が見られ、上部曲げの位置で同じく計算結果が振幅を過小評価しているこ

とがわかる。この原因にもスラリー固体に生じる遠心力の影響が一因であると考えている。

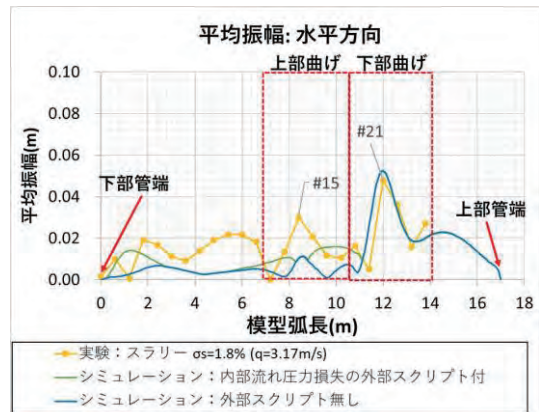


図-5 模型の水平方向平均振幅

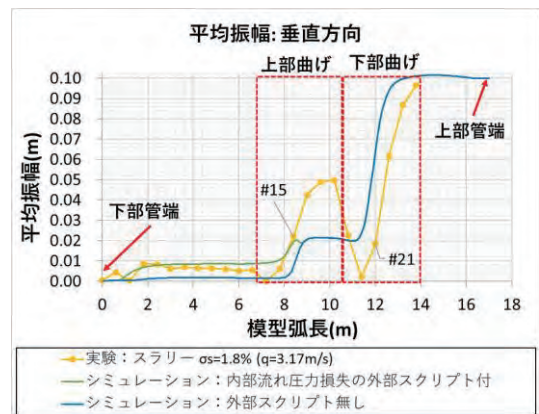


図-6 模型の垂直方向平均振幅

4. まとめ

本研究では、移送管の動的挙動に対するスラリー流の影響を調査するために模型実験及び数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションでは、精度向上を目的として内部流による圧力損失を計算するための外部スクリプトを開発した。その結果、計算結果は実験結果と一部一致しないことを確認した (図 4~6)。計算ではスラリーを均質流と見なしたが、実際は不均質流であるため、均一な流体としてスラリーを取り扱うことは正確ではない可能性がある。

今後、スラリーを二相流として仮定し、移送管の動的挙動を計算可能なソフトウェアを開発する予定である。同ソフトウェアでは、管内の固体濃度及び圧力損失の管軸方向分布を計算し、挙動解析に反映できるようにする計画である。

参考文献

- 1) Yamamoto, M. *et al.*: Deep-Sea Mining R&D Activities in the NMRI, Underwater Mining Conference, Bergen (2018).
- 2) Orcina: Documentation for OrcaFlex (version 11.2c), <https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Default.htm>, (2022).