

# PS-11 固液二相流がフレキシブルホースの動的挙動に与える影響に関する実験的研究

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

## 1. はじめに

海底鉱物資源開発では、図-1 に示すように海底で鉱物資源を掘削するユニットと水中でスラリーポンプを用い海上に揚鉱するユニットを繋げた資源開発システムが検討されている。掘削ユニットを用いて採掘した鉱物は水中ポンプ及び鉱石リフトライザーと海中排水管、電源供給に用いるケーブルなどで構成される揚鉱管システムまで移送管を通して水中移送することが想定される。

水中にてフレキシブルな移送管に鉱物が流入した場合、内部流体が海水から鉱石と海水が混じったスラリーへと変化するため、移送流体密度の変化が生じる。加えて、鉱石の移送量は一定ではないため、スラリー濃度に時間変動が生じることが想定される。これらの時間変動は移送管内の圧力変動および流速の変動を誘因し、移送管の挙動に影響を与え、移送管に接続した掘削ユニットの移動や可動範囲に悪影響を与える可能性がある。そのため、水中にて鉱物を移送するフレキシブルな移送管の挙動を把握することが重要となる。

本研究では、内部流の影響を考慮した移送管の挙動を解析可能なプログラムの開発に必要な検証データを取得するため、採鉱機から揚鉱用水中ポンプまでをつなぐ移送管を模擬したフレキシブルホース模型を用いて水槽実験を実施した。実験では、主に鉱物を固液二相流として移送する際の移送管模型の挙動、内部圧力および掘削ユニットとの接続部に生じる荷重の動的変化を計測した。ここでは、実験概要と実験結果を紹介する。

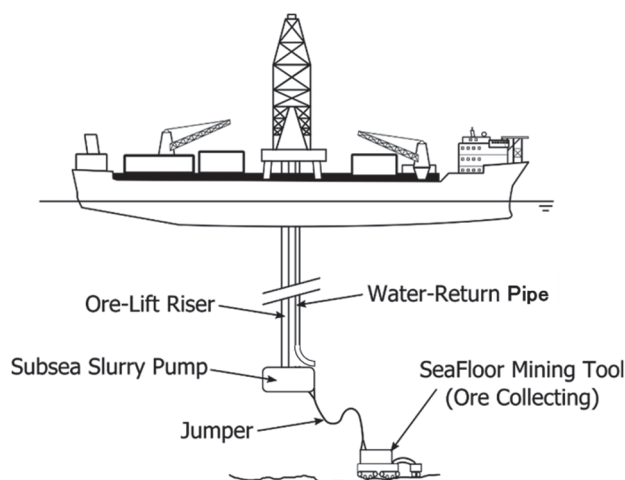


図-1 海底鉱物資源開発用システムの模式図

## 2. 実験概要

### 2.1 実験設備

実験は当所の深海水槽で行った。図-2 に実験装置の模式図を示す。移送管模型の掘削ユニット側端部は水深約 10m の位置に固定し、その上流にスラリーポンプを設置した。スラリーポンプ手前には電磁フィーダーを用いた鉱石投入装置及び当該装置から供給されたアルミナ製模擬鉱石と水槽内の水を混合するホッパーを設けることで任意の流量および濃度のスラリー流を生成した。また、内部流量を時間変動させるため、インバータを用いてポンプのモーターの回転速度を制御した。移送管模型上下端部と下端から長さ 3m と 14m の計 4 か所には、圧力取り出し部を設け、模型内部の圧力損失を測定し、移送管模型上端側に設置した流量計を用いて流量の変動を計測した。さらに、模型の上端部は採鉱用母船に鉱石リフトライザーで接続する水中ポンプの挙動を模擬するために電動リニアスライダの強制動揺装置を設置し、模型の両端にはロードセルを設置して移送管模型両端に生じる荷重を測定した。移送管模型の挙動は、深海水槽内に設置された 3 次元挙動計測システムを用いて、模型に貼った反射テープをステレオ撮影することにより、非接触で測定した。

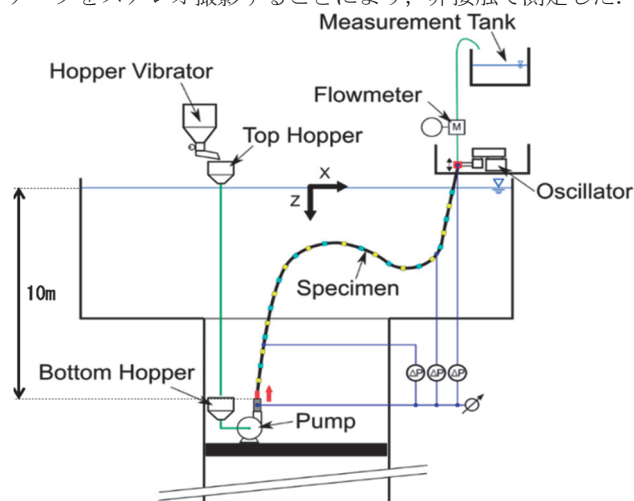


図-2 実験装置の模式図

### 2.2 移送管模型

表-1 に、移送管の想定実機及び縮尺模型の主な特性の比較を示す。相似条件として、フルード数及びコーシー数を考慮した<sup>1)</sup>。移送管の想定実機には、耐摩耗ホースである東北ゴム(株)のMPLホースを設定し、曲げ剛性及び軸剛性については情報が得られなかったため、ここでは参考として模型の実測値を示している。

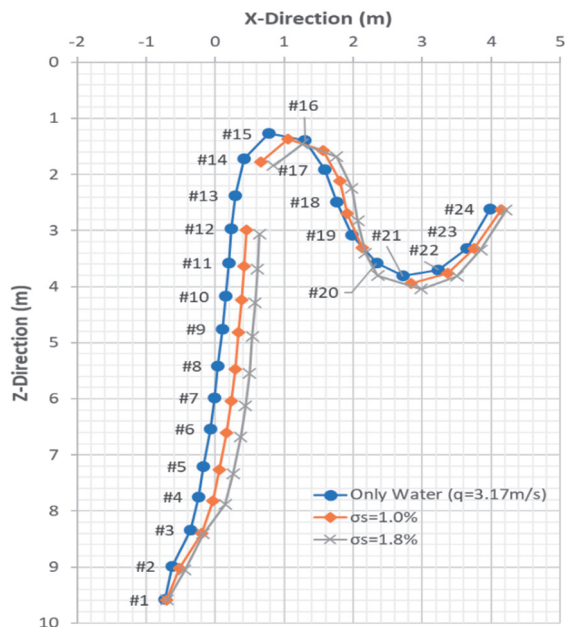
表一 想定実機と模型の諸元

| 想定実機                    | 1/5 縮尺比 |            |
|-------------------------|---------|------------|
|                         | 目標      | 実測         |
| 長さ [m]                  | 85      | 17         |
| 外径 [m]                  | 0.254   | 0.051      |
| 内径 [m]                  | 0.203   | 0.040      |
| 曲げ剛性 [Nm <sup>2</sup> ] | N/A     | N/A        |
| 軸剛性 [N]                 | N/A     | 4.0~8.0E+3 |
| 空中重量 [kg/m]             | 26.80   | 1.07       |
| 水中重量 [kg/m]             | 8.10    | 0.32       |

なお、移送管は掘削ユニットの移動範囲の確保や移送管が海底面と接触して損耗することを防ぐために、図一2 に示すような Steep-wave 形状に配置することを想定し、本試験では 11 個の浮力体を下端側から約 6m から 10m にかけて設置することで移送管の水中形状を再現した。

### 3. 実験結果

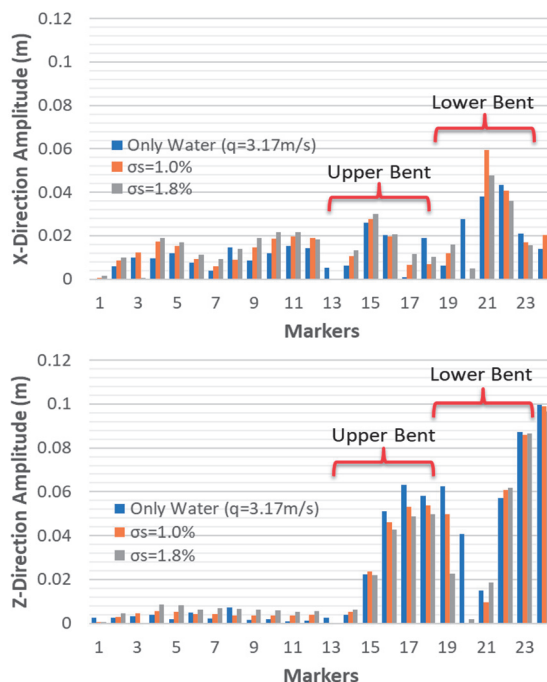
実験結果の一例として、採鉱用母船の動揺が水中ポンプに伝搬したことを想定した、移送管模型上端部を振幅 10 cm, 周期 0.224Hz (実機 0.5m, 0.1Hz 相当) で規則加振した際の移送管模型の平均位置を、内部流体が異なる 3 つのケースについて図一3 にそれぞれ示す。図中の計測点左の#1~24 は計測マーカーの通し番号であり、下端に最も近い点から番号を振っている。内部流の速度は平均 3.17m/s とし、それぞれ水のみ、水と模擬鉱石の混合 (スラリー) 濃度として、今回の実験装置で再現可能な 1.0%と 1.8%の 2 ケースを設定した。



図一3 内部流体が異なる移送管挙動の比較 (平均値)

一部の計測点では、計測範囲を逸脱することによって欠測しているものの、ほとんどの測定位置において 3 次元挙動が適切に測定できた。さらに、内部流体中の固体濃度の増加に伴って移送管模型の形状が変化することが観察された。なお、この形状の変化は、内部流体が上端部の加振による動的

応答ではなく、主に静的形状に与えた影響が強く表れた結果であると考えられる。



図一4 内部流体が異なる移送管挙動の比較 (動揺振幅)  
上図：水平方向変位, 下図：鉛直方向変位

次に、変位振幅を Fourier 係数<sup>2)</sup>を用いて算出した。図一4 に水平方向と鉛直方向の動揺振幅の比較を示す。図中の Upper Bent は図一2 に示す移送管模型のうち、山を成す屈曲部を表し、Lower Bent は谷を成す屈曲部をそれぞれ示している。水平方向の振幅は Lower Bent において最も大きくなり、鉛直方向の振幅は強制振動が加えられた上端に最も近い位置と Upper Bent 付近で大きくなるのが計測された。また、内部流体が与える変動振幅への影響が鉛直方向の Upper Bent および Lower Bent で発生することを確認した。

### 4. まとめ

本実験により、内部流体が静的形状および動的挙動に対して影響を与えることを明らかにするとともに、その影響が屈曲部や直線部など位置によって異なることが示唆された。また、本研究で得られた知見は、移送管やコネクター等の設計及び疲労解析に利用できると考える。

今後、これらの計測結果を検証用データとして内部流の影響を考慮した移送管の挙動を解析可能なプログラムの開発を行う予定である。

### 参考文献

- 1) Chakrabarti, S. K. "Offshore Structure Modelling", Singapore: World Scientific Publishing, 1994.
- 2) Yamamoto, M. et al. "Experimental Analysis of Reduced-Scale Jumper for Deep-Sea Mining", Proc. 38th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering, Glasgow, OMAE2019-95990, 2019.