

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289323

研究課題名(和文) 海底鉱物資源開発のための傾斜/動揺管内スラリー移送に関する研究

研究課題名(英文) Study on Hydraulic Transport of Solid Particles in Inclined / Oscillating Pipes for Subsea Mining

研究代表者

正信 聡太郎 (Masanobu, Sotaro)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・海洋開発系・グループ長

研究者番号：80373413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、海底鉱物資源開発で検討されている揚鉱システムを対象とした。鉱石と海水のスラリー移送時におけるフレキシブルホース等の傾斜を有する管内の圧力損失推定法を開発した。さらに、水平動揺する揚鉱管に関して、管動揺が管内の圧力損失に及ぼす影響及び内部流が管挙動に及ぼす影響について調査して、想定実機において管動揺影響はほとんどないことを確認した。

研究成果の概要(英文)：In the present study, the lifting system for subsea mining was focused. The mathematical model to estimate the pressure loss in inclined pipe during the slurry transport was developed. Furthermore, the effect of pipe oscillation on pressure loss in a vertical pipe with horizontal motion was investigated. As the result of the investigation, it was confirmed that the effect was negligible for the prototype model.

研究分野：海洋工学

キーワード：海底鉱物資源 大水深スラリー移送 Flow Assurance 傾斜管 動揺管

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、新しい金属鉱物資源として海底熱水鉱床が注目されている。我が国においても、伊豆・小笠原海域及び沖縄海域で海底熱水鉱床が発見されており、平成 20 年 3 月に閣議決定された海洋基本計画に基づき、平成 30 年度頃を目途に商業化を実現することを目標に開発が推進されている。海底熱水鉱床が発見されている海域は水深が深く (700 ~ 2,000m)、黒潮や台風の通過もある荒れた海域であるため、安全で確実に採鉱できるシステムを開発する必要がある。

(2) 海底熱水鉱床の採鉱システムは、採掘システム・揚鉱システム・採鉱母船から構成され、揚鉱システムとしてはライザー管及びポンプを用いたスラリー移送方式が有望である。また、深海底で鉱物を掘削する採掘システムと揚鉱システムは、採掘システムが海底を自由に移動できるようにフレキシブルホースで接続されている。しかし、スラリー移送方式によって海底鉱物資源を揚鉱する際に、長大な揚鉱管の径やポンプの性能をどのように選定するのか、フレキシブルホース内で鉱石が閉塞しないためにはどのようなオペレーションが必要か等、問題は非常に複雑である。

2. 研究の目的

本研究では、海底熱水鉱床開発における揚鉱システムを対象として、フレキシブルホース等の管の傾斜影響や揚鉱管の動揺影響を考慮したスラリー移送による管内圧力損失推定手法を確立するとともに、スラリー流を考慮した揚鉱管の水中線状構造物の応答予測手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 傾斜管内のスラリー流評価

圧力損失推定式

本研究では、十分発達した定常状態でのスラリー移送の場合を考え、固体粒子によって流体の流動様式が大きく変化しないものと仮定した上で、図 1 に示すような主流方向のみを考慮する管軸方向一次元モデルを採用した。図中の  $\theta$  は傾斜角、 $\Delta L$  は管路長、 $P$  は圧力、 $\Delta P_m$  は全圧力損失、 $V_m$ 、 $V_s$  はそれぞれスラリー平均流速及び固体粒子の平均速度、 $F_D$ 、 $F_f$ 、 $F_g$  はそれぞれ固体粒子が流体から受ける抗力、管壁から受ける摩擦力、重力による力、 $W_s$  は固体粒子群の水中重量を示している。

スラリーが管路を流れることによる全圧力損失を流体だけの単相流による圧力損失と固体粒子による付加的な圧力損失との和で表す。ここで付加的な圧力損失は、固体粒子を浮遊させるのに必要な圧力損失、固体粒子と管壁との摩擦及び衝突による損失、固体粒子相互の衝突による損失の和で与えられるとした。固体粒子と管壁との摩擦等に起因

する付加的な摩擦係数については、水平管を対象とした過去の研究[1]で一部浮遊を伴う摺動状態の固体粒子群に対して導入された実験式を、本研究でも採用した。

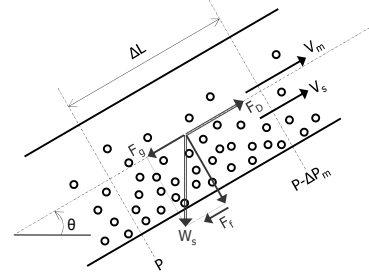


図 1 計算モデル

傾斜管スラリー移送試験

構築した圧力損失推定式を検証するために、傾斜管路を用いたスラリー移送試験を実施した。試験装置は実機の縮尺 1/8 程度 (管内径: 31mm) とした。試験装置の概略を図 2 に示す。試験に供した模擬鉱石は、アルミナボール (6mm、4mm と 5mm の混合、2mm)、ガラスボール (4mm)、碎石 7 号 (平均粒径 3.2mm) であった。

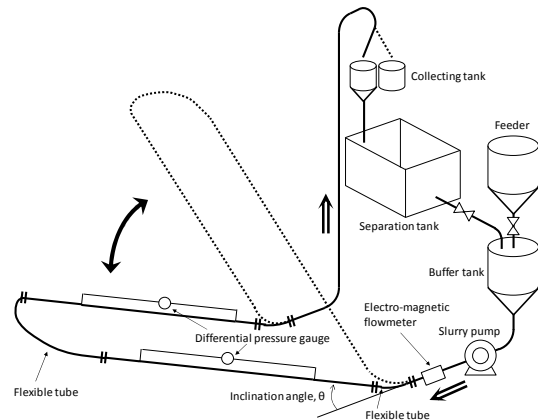


図 2 傾斜管スラリー移送試験装置

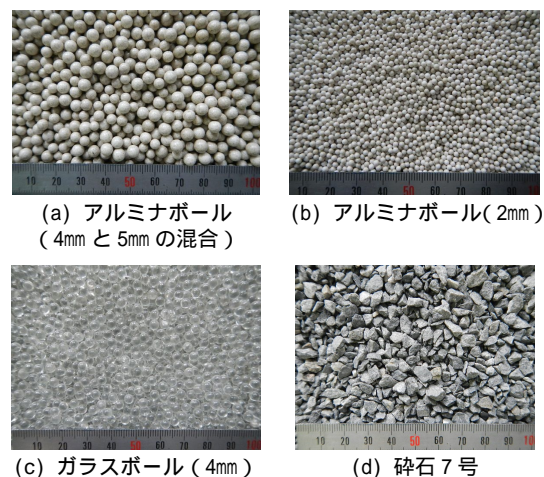


図 3 模擬鉱石の例

(2) 動揺管内のスラリー流評価

動揺管スラリー移送試験

管動揺がスラリー流に及ぼす影響を確認するために、動揺する鉛直揚鉱管を対象とし

たスラリー移送試験を実施した。試験装置は実機の縮尺 1/10 程度（管内径：25mm）とした。揚鉱管模型の諸元を表 1 に、試験装置の概略を図 4 にそれぞれ示す。動揺方向は水平方向のみとし、試験に供した模擬鉱石は、アルミナボール（4mm と 5mm の混合、2mm）、ガラスボール（4mm）であった。

表 1 揚鉱管模型諸元

	想定実機	模型	備考
縮尺比		1/10 程度	
長さ [m]	1,600	20	縮尺部分模型
外径 [m]	0.298	0.040	
内径 [m]	0.254	0.025	
曲げ剛性 [Nm <sup>2</sup> ]	$3.77 \times 10^7$	$0.90 \times 10^2$	
質量 [kg/m]	149.7	1.55	

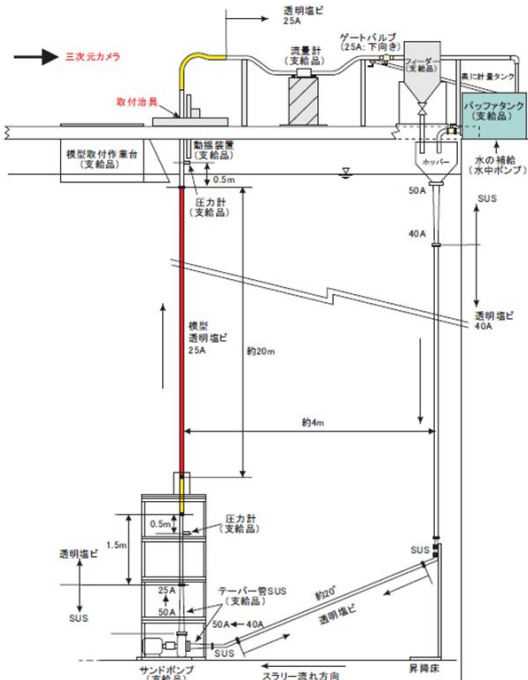


図 4 動揺管スラリー移送試験装置

### (3) 水中線状構造物の応答予測手法 数値シミュレーション

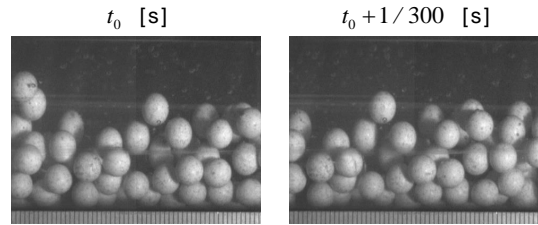
解析ツールとして、石油・天然ガス掘削・生産用鋼製ライザー、フレキシブルライザー等の水中線状構造物の応答解析プログラムとして世界的に実績のある RIFLEX を用いた。動揺管スラリー移送試験で使用した管模型の諸元を用いたシミュレーションを行って、試験結果と比較した。シミュレーションでは、内部の圧力損失が挙動に及ぼす影響は少ないと考え、内部流の影響として密度のみを考慮した。

## 4. 研究成果

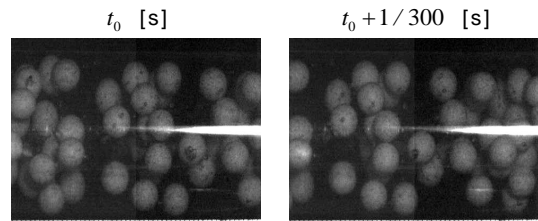
### (1) 傾斜管内のスラリー流評価

試験中の模擬鉱石の移送状況を図 5 に示す。図中の  $C_v$  は吐出濃度を示す。本試験では、水平管及び傾斜管（ $-90 < \theta < 90 \text{ deg}$ ）内のスラリー流は下層では摺動状態であり、上層では

浮遊状態であることが確認された。一方、鉛直管（ $\theta = \pm 90 \text{ deg}$ ）については管壁への接触が少ないことが確認された。



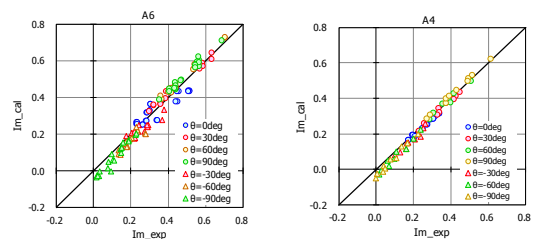
(a)  $\theta : 30 \text{ deg}$ ,  $C_v : 11.6\%$ ,  $V_m : 3.6 \text{ m/s}$



(b)  $\theta : 90 \text{ deg}$ ,  $C_v : 12.8\%$ ,  $V_m : 3.4 \text{ m/s}$

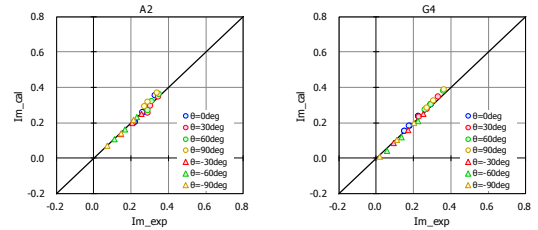
図 5 固体粒子の移送状況  
（アルミナボール 6mm；移送方向：右から左）

推定結果と試験結果の比較を図 6 に示す。推定結果と試験結果は概ね良い一致を示しており、本研究で構築した推定式が傾斜管内の圧力損失の推定に適用できることがわかった。



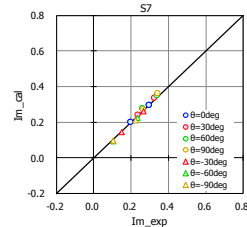
(a) アルミナボール（6mm）

(b) アルミナボール  
（4mm と 5mm の混合）



(c) アルミナボール（2mm）

(d) ガラスボール（4mm）



(e) 砕石 7 号

図 6 推定結果と試験結果の比較（水力勾配）

### (2) 動揺管内のスラリー流評価

動揺の有無による圧力損失（水力勾配）の

違いを図7に示す。本試験の条件では、管の動揺は水力勾配にほとんど影響しないことがわかる。

水のみを移送した場合とスラリーを移送した場合の揚鉱管模型の挙動の比較を図8に示す。両者の挙動特性はほとんど同じであり、本試験の条件では、内部流の影響が揚鉱管の挙動に及ぼす影響はほとんどないことがわかる。

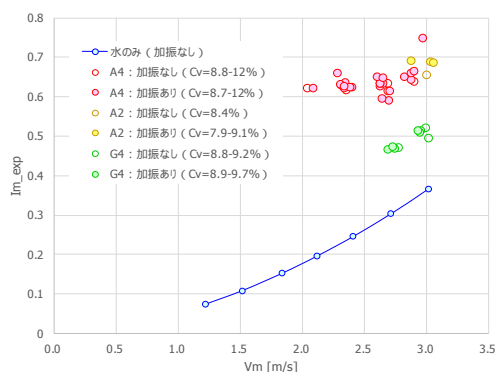


図7 動揺管内の水力勾配

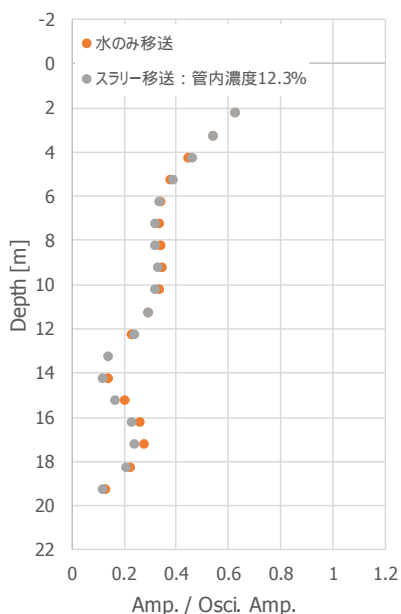


図8 揚鉱管模型挙動の比較  
(加振周期: 1.9s、加振振幅 10cm)

### (3) 水中線状構造物の応答予測手法

スラリー移送時における揚鉱管模型挙動の試験結果とシミュレーション結果の比較を図9に示す。シミュレーション結果は試験結果と良い相関を示しており、本シミュレーション手法が有効であることが確認された。管内濃度が20%となっても、揚鉱管の挙動特性はほとんど変わらないことから、内部流が揚鉱管の挙動に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

一方で、移送管のようなフレキシブルホースでは、揚鉱管のようなライザーに比べて曲げ剛性が小さく、条件によっては内外圧差による曲げ剛性等の変化を考慮する必要があ

るため、今後は種々の管体を用いた検討を行い、汎用的な応答予測手法を構築していくことが望まれる。

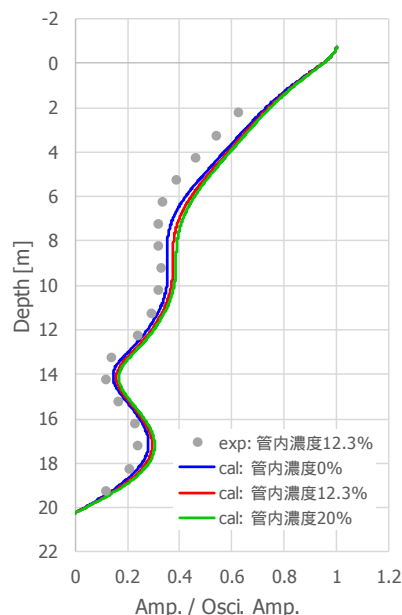


図9 揚鉱管模型挙動の比較

### <引用文献>

- [1] 鮎川恭三、越智順治、固体粒子の水平管水力輸送における圧力損失、日本機械学会論文集(第2部)、Vol.33、No.254、1967、pp.1625-1632

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- (1) S. Masanobu, S. Takano, T. Fujiwara, S. Kanada, M. Ono, EXPERIMENTAL STUDIES OF PRESSURE LOSS IN INCLINED PIPE IN SLURRY TRANSPORT FOR SUBSEA MINING, Proc. ASME 2015 34th Intl. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有、DOI:10.1115/OMAE2015-41211、2015

〔学会発表〕(2件)

- (1) 正信太郎、藤原智、金田成雄、小野正夫、高野慧、海底鉱物資源開発のためのスラリー移送に関する研究 - 第1報 傾斜管内スラリー移送試験 -、日本船舶海洋工学会講演会、平成26年11月21日、長崎  
(2) 正信太郎、高野慧、藤原智、金田成雄、小野正夫、海底鉱物資源開発のためのスラリー移送に関する研究 - 第2報 傾斜管内の圧力損失の推定方法 -、日本船舶海洋工学会講演会、平成26年11月21日、長崎

〔その他〕

- (1) 所属機関ホームページ  
<https://www.nmri.go.jp/institutes/>

marine\_development/deepwater\_tech\_research/develop\_sms/index.html

(2) 所属機関主催研究発表会

高野慧、小野正夫、正信聡太郎、藤原智、金田成雄、海底鉱物資源開発に係る揚鉱管内における大粒径粒子のスラリー移送評価、平成 26 年度(第 14 回)海上技術安全研究所研究発表会講演集、平成 26 年 6 月 25 日、pp.182-189

正信聡太郎、海底熱水鉱床採鉱・揚鉱システムの安全性・性能評価技術の開発、平成 27 年度(第 15 回)海上技術安全研究所研究発表会講演集、平成 27 年 6 月 27 日、pp.86-95

正信聡太郎、海底鉱物資源開発等に係る基盤技術の構築に関する研究、平成 28 年度(第 16 回)海上技術安全研究所研究発表会講演集、平成 28 年 6 月 24 日、in press

6. 研究組織

(1) 研究代表者

正信 聡太郎 (MASANOBU, Sotaro)  
国立研究開発法人 海上技術安全研究所・海洋開発系・深海技術研究グループ長  
研究者番号：80373413

(2) 研究分担者

藤原 智 (FUJIWARA, Tomo)  
国立研究開発法人 海上技術安全研究所・海洋開発系・主任研究員  
研究者番号：70511591

YAMAMOTO, Marcio (ヤマモト マルシオ)  
国立研究開発法人 海上技術安全研究所・海洋開発系・研究員  
研究者番号：10608631  
(2013 年度のみ)

高野 慧 (TAKANO, Satoru)  
国立研究開発法人 海上技術安全研究所・海洋開発系・研究員  
研究者番号：90636820