

海底鉍物資源開発に係る揚鉍管内に おける大粒径粒子のスラリー移送評価

海洋開発系 深海技術研究グループ

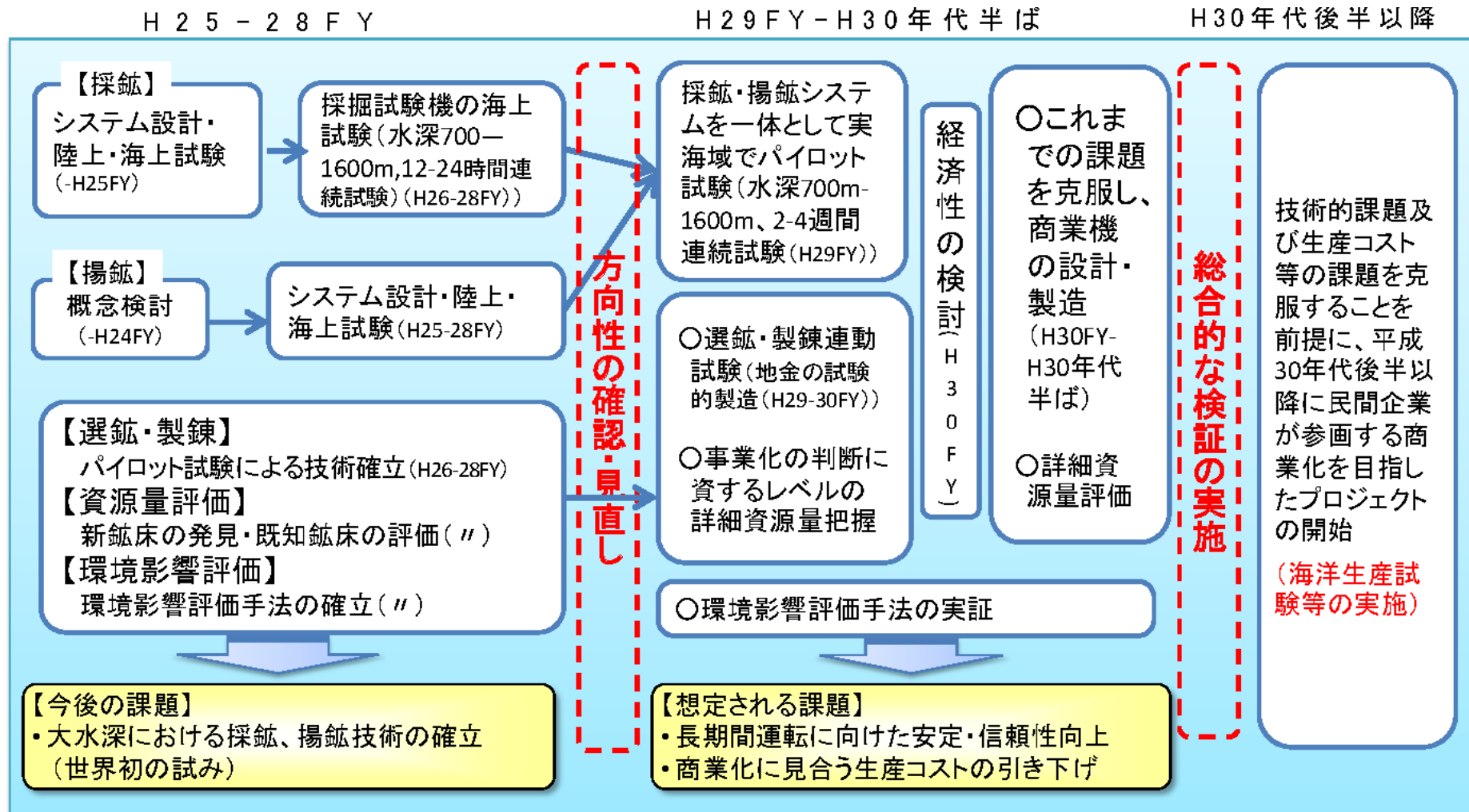
高野 慧*、小野 正夫、正信 聡太郎、
藤原 智、金田 成雄

- 研究の背景・目的
- 循環式摩耗試験の紹介
 - ✓ 循環式摩耗試験①
 - ✓ 循環式摩耗試験②
 - ✓ 循環式摩耗試験のまとめ
- 摩耗量評価手法の紹介
- スラリー移送試験の紹介
 - ✓ スラリー移送試験①
 - ✓ スラリー移送試験②
- まとめと今後の課題

研究の背景

● 研究背景

✓ 海底熱水鉱床の開発に向けた工程表

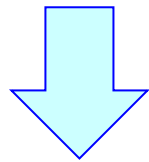


出典：海洋エネルギー・鉱物資源開発計画（改定案）

研究の背景・目的

● 研究背景

- ✓ 海底鉱物資源開発のための揚鉱ユニットの設計・運用条件の決定には以下の技術が必要
 - 揚鉱管の強度・疲労評価技術
 - 揚鉱管のスラリー移送による摩耗性評価技術
 - 揚鉱管のスラリー移送による圧力損失評価技術
 - Etc...
- ✓ 当所はこれまで揚鉱管の強度・疲労評価技術に関する研究を行っている
- ✓ 揚鉱ユニットの設計・運用条件の決定を行うためには内部流に関する評価技術を構築する必要がある
- ✓ 採鉱の条件として海底での鉱石サイズは最大50mm程度が想定されている



● 研究目的

- ✓ 大粒径粒子のスラリー移送による摩耗性や圧力損失の評価技術の開発

● 熱水鉱床採鉱システムイメージ図



出典：海底熱水鉱床開発計画 第1期最終報告書

循環式摩耗試験の紹介

● 循環式摩耗試験①

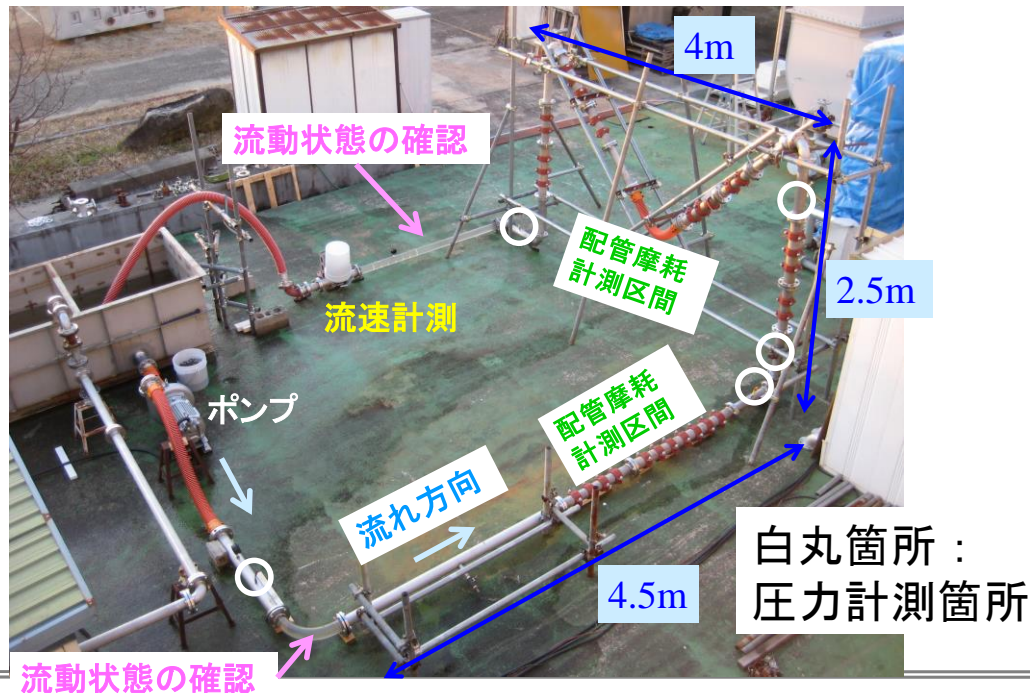
- ✓ 大粒径粒子を用いた循環式摩耗試験を実施

□ 摩耗試験結果

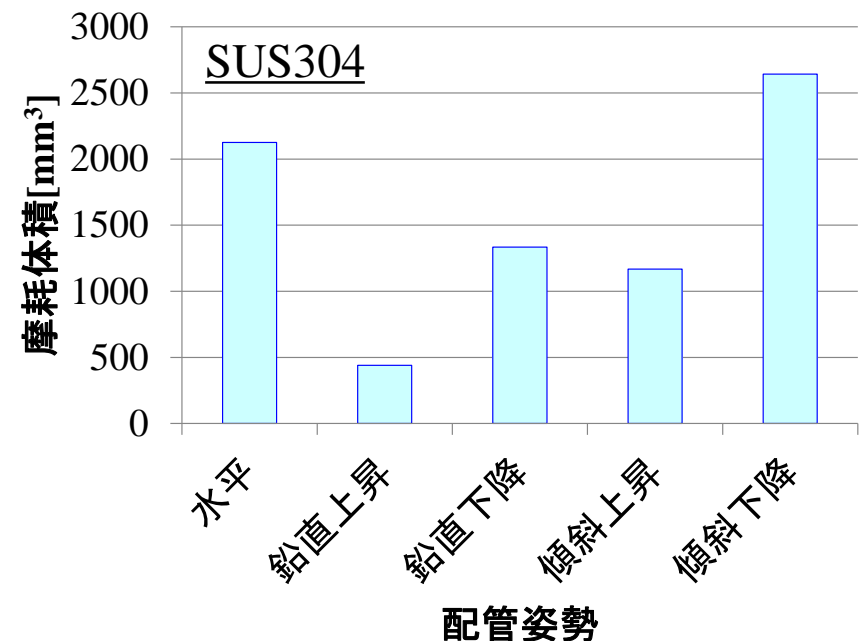
- ✓ 鉛直、水平、傾斜上昇、傾斜下降管の中で、傾斜下降管の摩耗量が最も大きい結果となった
- ✓ SUS304、ゴムライニングと低密度ポリエチレンライニングの3種類の中でSUS304が最も優れた耐摩耗性を示した

➡ 摩耗量の傾斜角の影響を確認する試験

● 試験装置全体図



● 試験結果 (例)



循環式摩耗試験の紹介

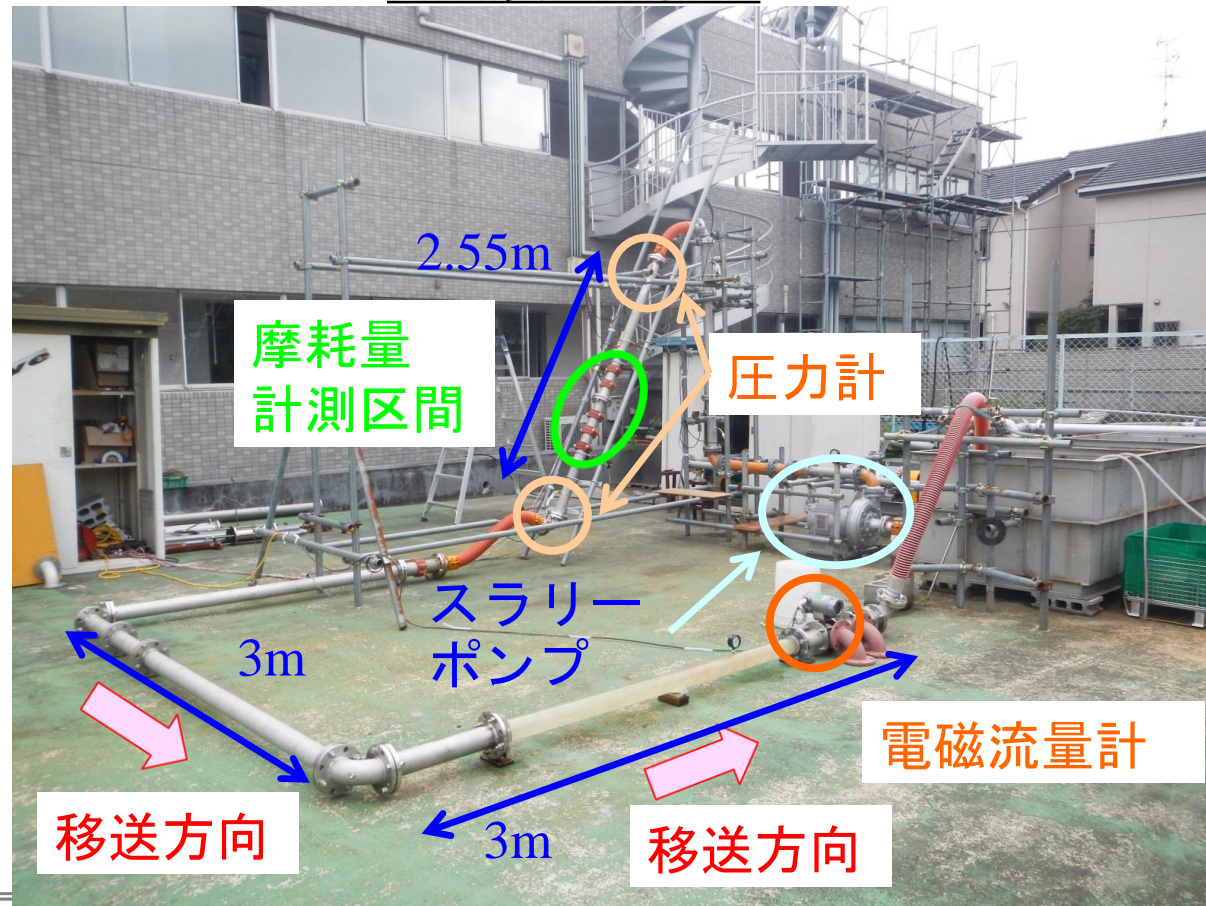
● 循環式摩耗試験②

□ 試験目的

- ✓ 配管姿勢（傾斜）が摩耗量に及ぼす影響を評価する

□ 試験場所：海上技術安全研究所 大阪支所

・ 試験装置全体図



● 循環式摩耗試験②

□ 試験設備

- 配管径：80A
- サンドポンプ
- フレキシブルホース
✓ 傾斜角を変更可能

□ 摩耗量計測配管

- 長さ150mm
- 材質
✓ SUS304
✓ ライニング1
✓ ライニング2

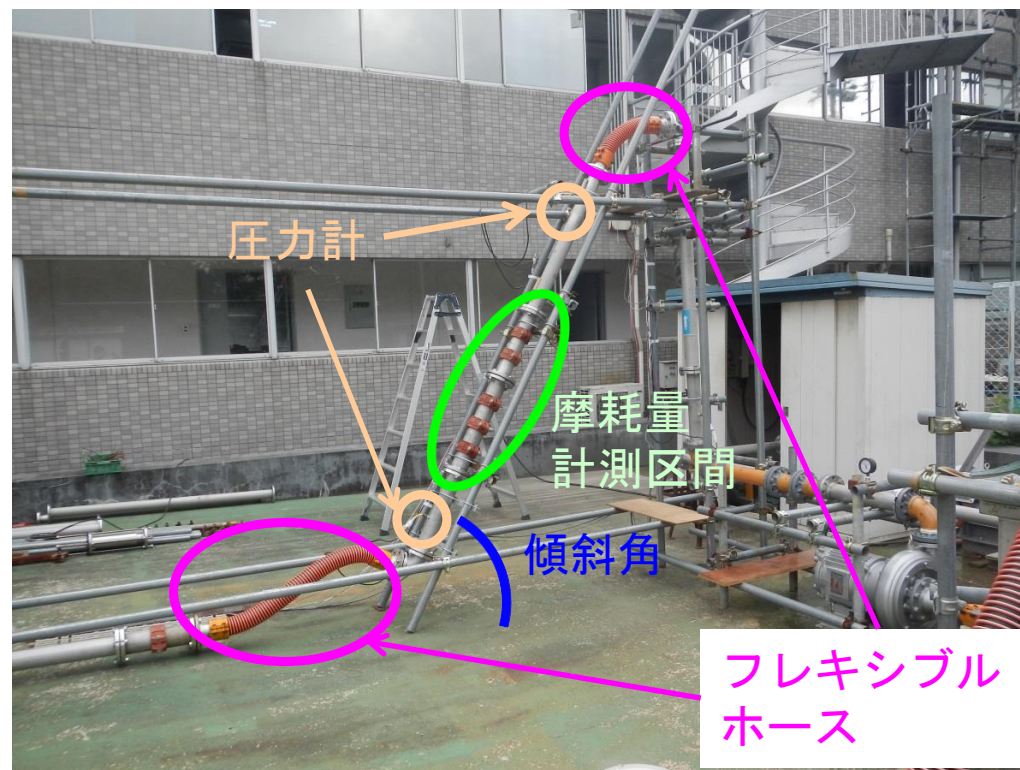
□ スラリー仕様

- 移送流体：淡水
- 模擬鉱石：流紋岩碎石5号（10mm-20mm）

□ 試験条件

| ケース | 吐出濃度 | スラリー流速 | 傾斜角 | スラリー移送時間 |
|-----|------|--------|-------|----------|
| 1 | 4% | 4m/s | 60deg | 30hour |
| 2 | 4% | 4m/s | 45deg | 30hour |
| 3 | 4% | 4m/s | 30deg | 30hour |

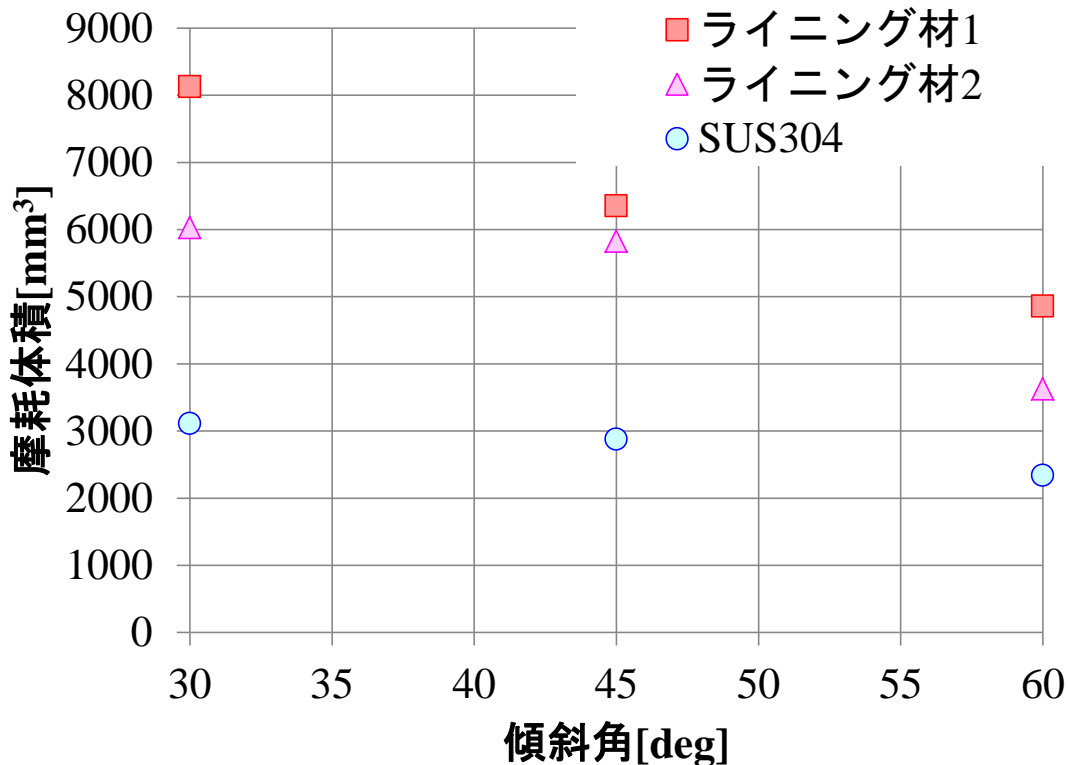
● 傾斜部概観



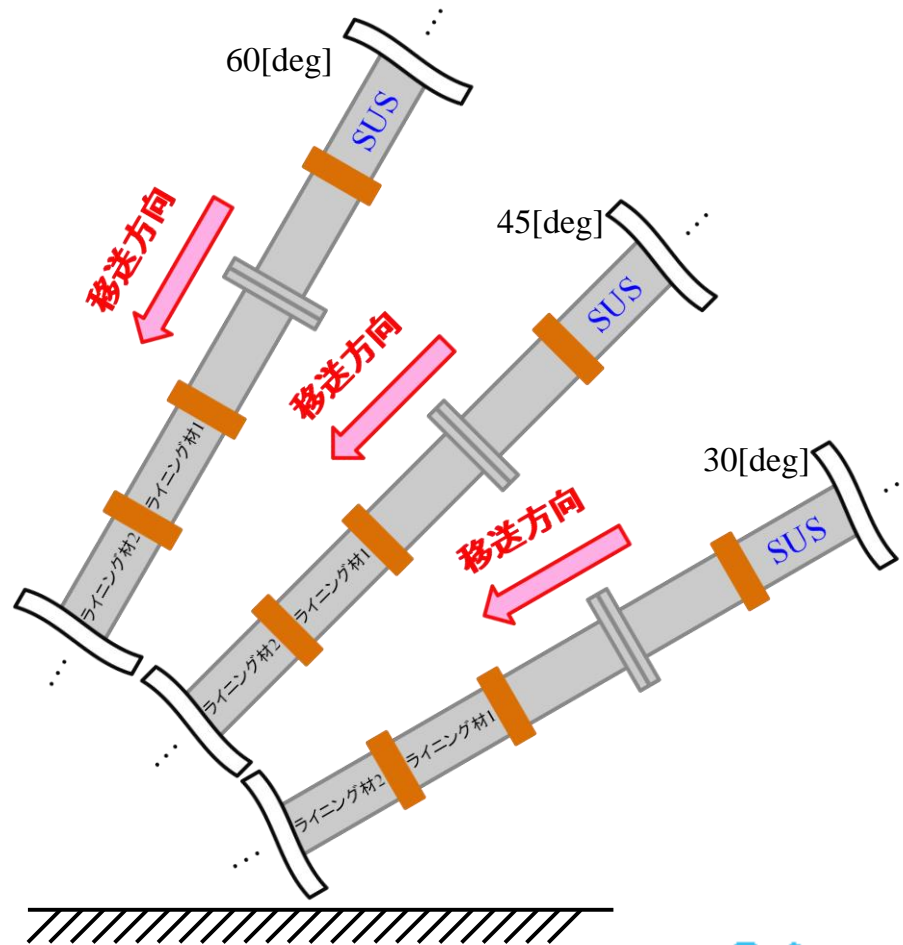
● 循環式摩耗試験②

□ 試験結果（摩耗体積）

● 流速4m/sにおける摩耗量結果



● 傾斜角イメージ図



- ✓ 3種類の材料の中ではSUS304の摩耗量が最小
- ✓ 傾斜角30degで摩耗量が最大

● 循環式摩耗試験のまとめ

□ 配管内面の材質について

- ✓ 循環式摩耗試験①及び②で用いた5種類の材料の中では、SUS304が最も優れた耐摩耗性を示した

□ 配管姿勢の影響

- ✓ 配管姿勢が摩耗量に影響を及ぼすことが明らかとなった
- ✓ 傾斜角度が0（水平）～45degの間で摩耗量最大
- ✓ 傾斜角の影響があるため、採鉱機とポンプをつなぐフレキシブルホースの取り回しには留意する必要がある

・ フレキシブルホースイメージ



● 摩耗量評価手法

- ✓ 摩耗モデルとスラリ一流の粒子の配管内部への衝突情報を組み合わせて摩耗量を評価

□ 摩耗モデル

- ✓ 摩耗モデルのパラメータは衝突角度、衝突速度、衝突重量及び実験定数

● 摩耗モデル式

$$W_T = W_d + W_c \quad W_d = \frac{1}{2} \frac{MV^2 \sin^2 \alpha}{\epsilon} \quad W_c = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{MV^2 \cos^2 \alpha \cdot \sin n\alpha}{\phi} & \text{for } \alpha < \alpha_0 \\ \frac{1}{2} \frac{MV^2 \cos^2 \alpha}{\phi} & \text{for } \alpha \geq \alpha_0 \end{cases}$$

- ✓ 落下衝撃試験を実施し摩耗モデルを構築

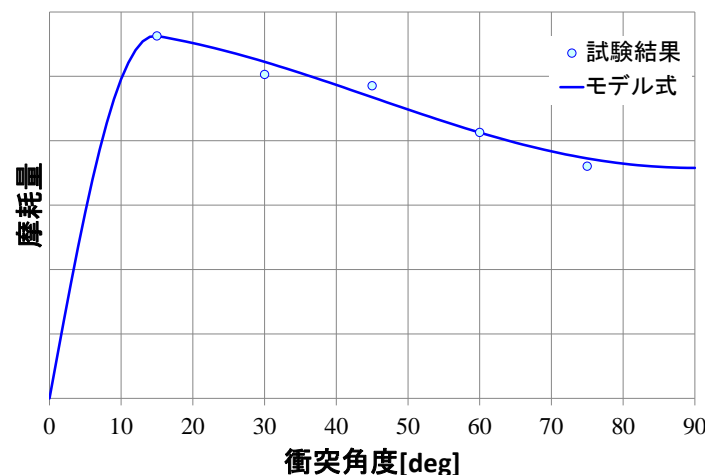
□ 粒子衝突情報

- ✓ スラリ一流を表現する数値シミュレーションを行うことにより、粒子の管内壁への衝突情報（角度 α_i 、速度 V_i 、重量 M_i ）を取得

□ 摩耗量評価

- ✓ 摩耗量は次のように表すことができる $W_T = \sum w_t(\alpha_i, V_i, M_i)$

● 摩耗モデルイメージ

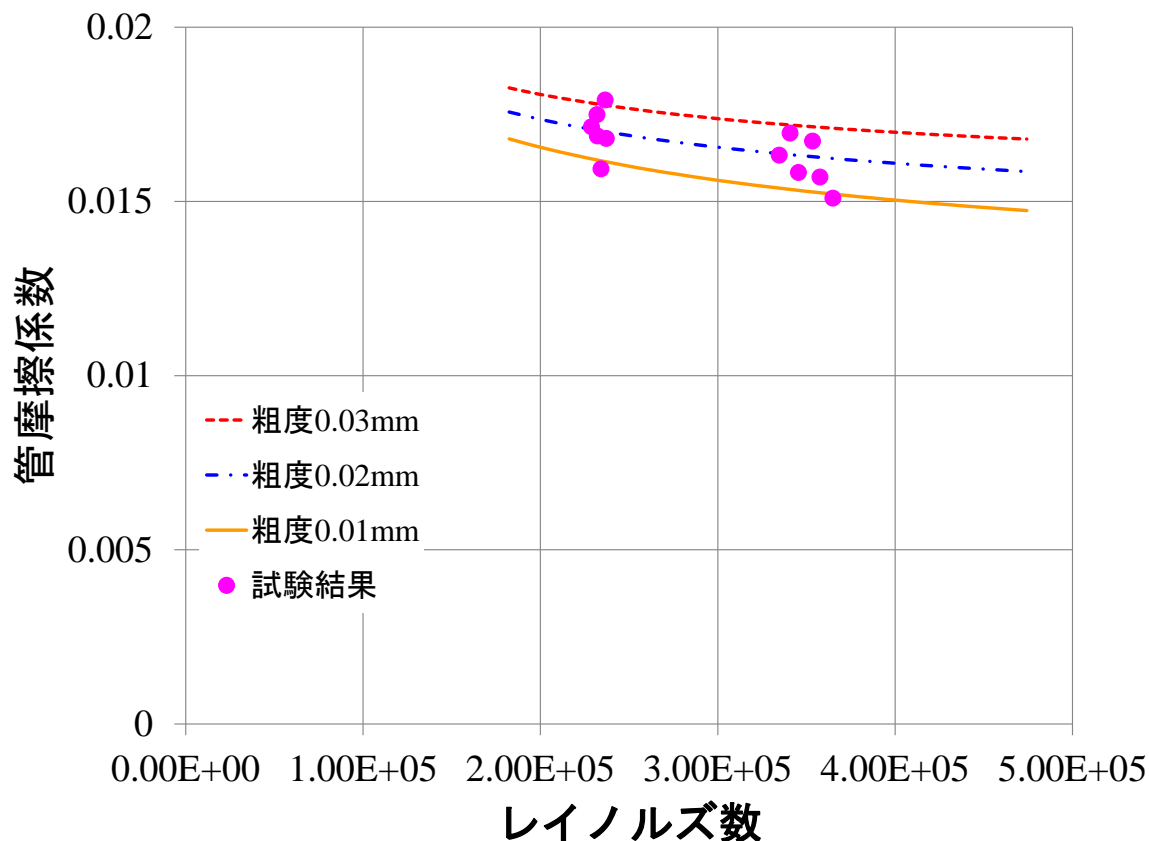


● スラリー移送試験①

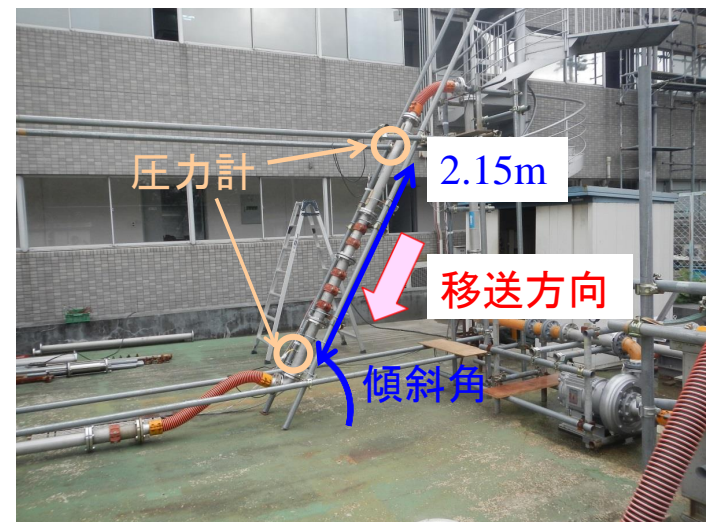
- ✓ 循環式摩耗試験②と同じ設備を用いて試験を実施
- ✓ 傾斜部に圧力計を設置

□ 試験結果（管摩擦係数）

- 管摩擦係数算出結果



● 圧力計設置箇所



- ✓ 水のみ移送時のデータを計測し、実験式と比較

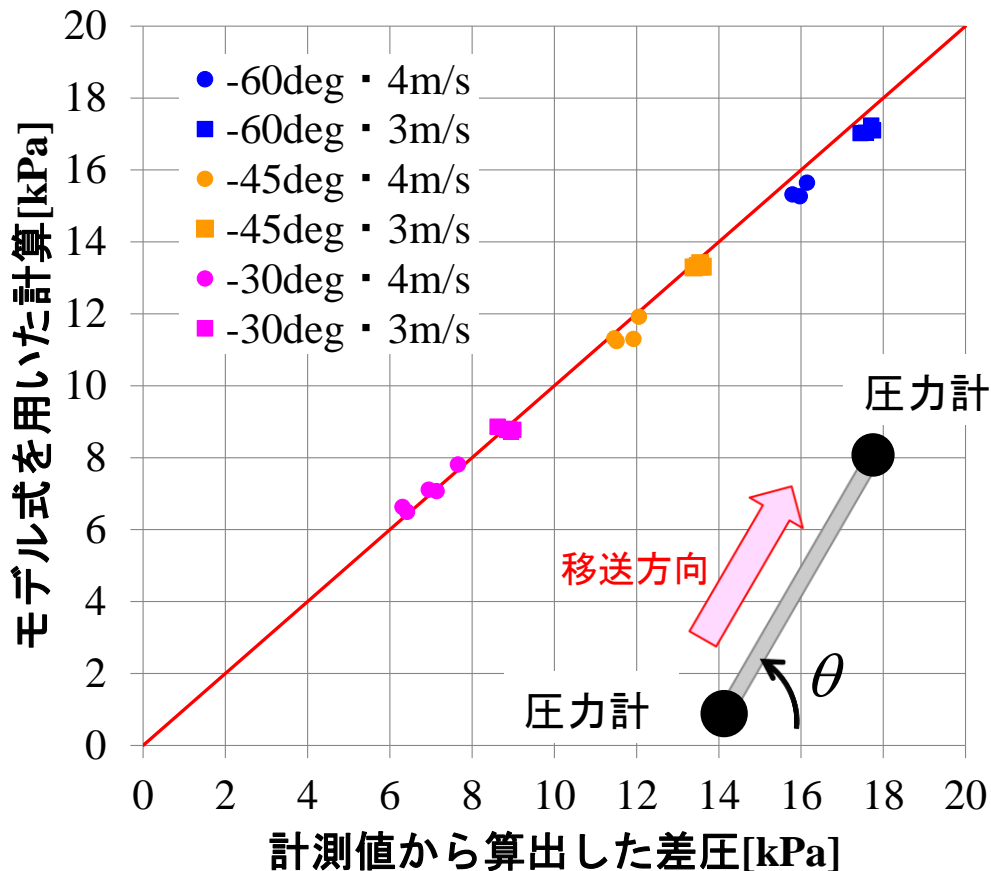
$$f_w = \frac{2D}{\Delta L \rho_w V_w^2} \Delta P_w$$

- ※ ΔP_w は静水圧を含まない
- ✓ 管の壁面粗度を0.02mmとする

● スラリー移送試験①

□ 試験結果（スラリー移送中の差圧）

・ スラリー流評価モデルと試験結果の比較



※スラリー吐出濃度は3~4%程度であった

・ モデル式

$$\Delta P_m = \Delta P_w + \Delta P_s$$

$$\Delta P_w = \rho_w g \Delta L \sin \theta + f_w \frac{\Delta L}{D} \frac{1}{2} \rho_w \left(\frac{V_w}{V_m} \right)^2 V_m^2$$

$$\Delta P_s = \rho_w g \Delta L \cdot C_s (S_s - 1) \sin \theta + f_s' \frac{\Delta L}{D} \frac{1}{2} \rho_w V_m^2$$

※ただし、以下を仮定

- ✓ 非球形粒子の抗力係数 $C_D = 1.25$
- ✓ 固体粒子と管壁との摩擦係数 $\xi_s = 0.757$
- ✓ スラリー速度と流体速度の関係 $V_m = V_w$
- ✓ 吐出濃度と管内濃度の関係 $C_s = C_v$

● スラリー移送試験②

□ 試験目的

✓ 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式の検証

□ 試験場所：海上技術安全研究所



● 試験装置概観



スラリー移送試験の紹介

● スラリー移送試験②

□ 試験設備

- 配管径：30A
- スラリーポンプ
- 模擬鉱石供給用ホッパー
 - ✓一定の速度で模擬鉱石を供給可能
- バッファタンク

□ スラリー仕様

- 移送流体：淡水
- 模擬鉱石：アルミナボール (φ6mm)

● アルミナボール

● バッファタンク

● 模擬鉱石供給用ホッパー



● スラリーポンプ



スラリー移送試験の紹介

● スラリー移送試験②

□ 試験条件

| 条件 | パラメータ |
|--------|--|
| 傾斜角 | 0deg, 30deg, 60deg, 90deg |
| 流速 | 0.6m/s, 0.9m/s, 1.2m/s, 1.5m/s, 1.8m/s |
| スラリー濃度 | 5%, 10%, 15% |

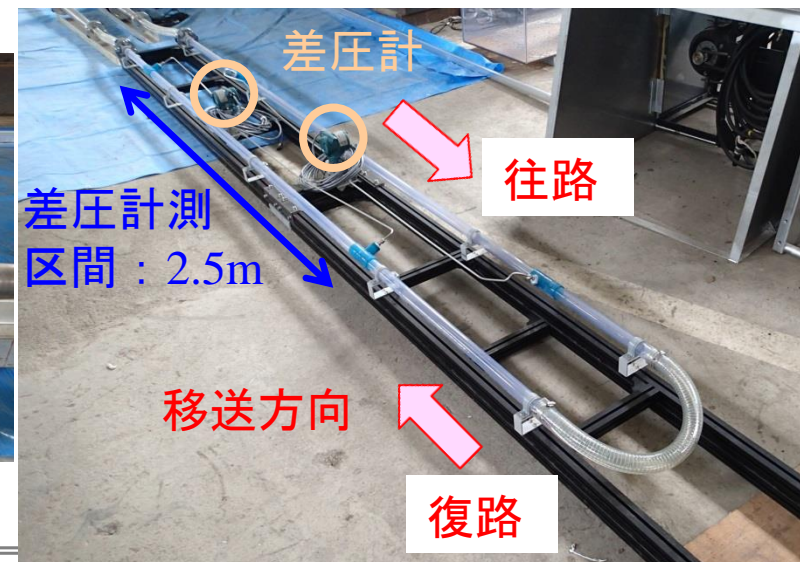
□ 計測データ

- 流速
 - ✓ 電磁流量計
- 差圧
 - ✓ 差圧計で往路と復路の差圧を計測
- 水温
 - ✓ 水温計
- 吐出模擬鉱石重量
 - ✓ バッファタンク

● 電磁流量計



● 差圧計測



● スラリー移送試験②

□ 試験結果

● 試験結果概要

- ✓ 流速 V_w は2.5m/s～3.0m/s程度
- ✓ 吐出濃度 C_V は4～7%
- ✓ 傾斜角は0deg (=水平管)

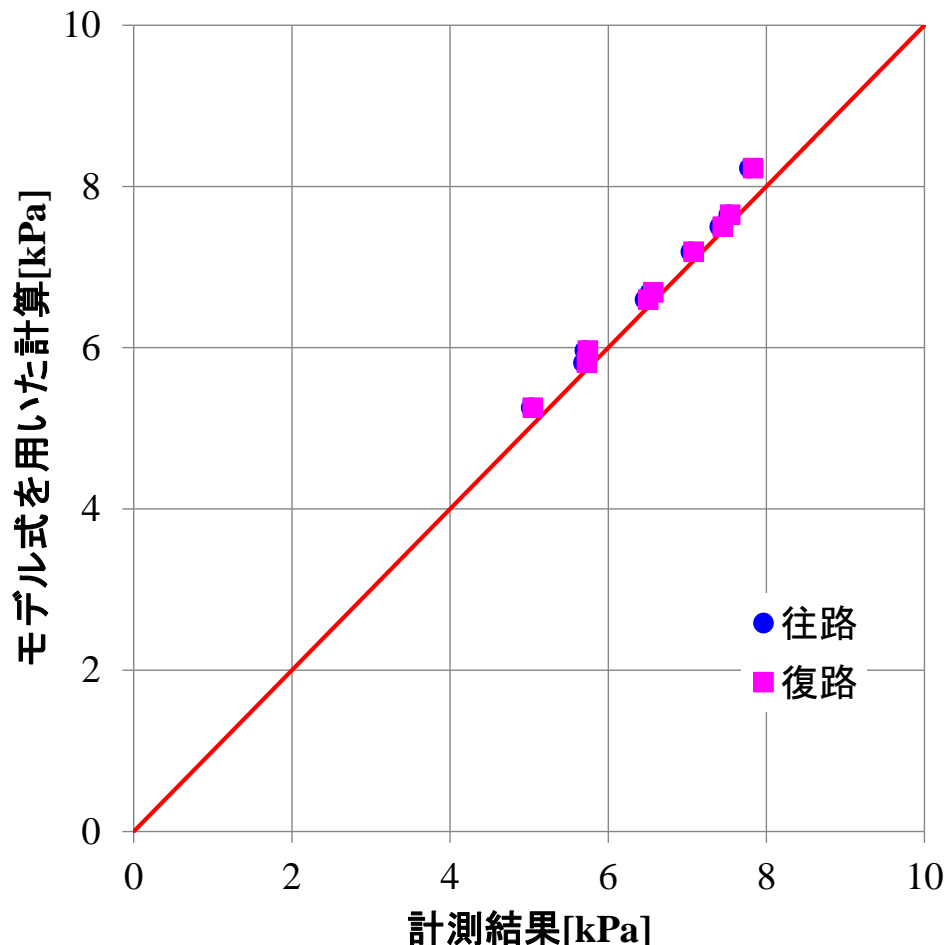
● モデル式

- ✓ 9ページ目のスライドと同様のモデル式を用いた

※ただし、以下を仮定

- ✓ 球形粒子の抗力係数 $C_D = 0.4$
- ✓ 固体粒子と管壁との摩擦係数 $\xi_s = 0.757$
- ✓ スラリー速度と流体速度の関係 $V_m = V_w$
- ✓ 吐出濃度と管内濃度の関係 $C_s = C_V$
- ✓ 壁面粗度は0.001mm

● スラリー流評価モデルと試験結果の比較



- 当所ではライザー技術の1つとして、内部流に着目したコア技術の開発を目指しており、現在は摩耗量評価技術と圧力損失評価技術の構築を行っている

□ 摩耗量評価技術

- ✓ 循環式摩耗試験を行い、次のことが明らかとなった
 - ・ 傾斜角度は摩耗量に影響を及ぼし、傾斜角が0deg~45degの間で摩耗量最大
 - ・ 循環式摩耗試験で用いた材質の中ではSUS304が最も耐摩耗性に優れる
- ✓ 摩耗モデルを用いた摩耗量評価手法を開発した

□ 圧力損失評価技術

- ✓ スラリー移送試験を行い、傾斜管での圧力損失を評価可能なスラリー流評価モデルを構築した

● 今後の課題

- ✓ 摩耗モデルと数値シミュレーションを用いた摩耗量評価手法の検証
- ✓ スラリー移送試験の継続実施と構築したスラリー流評価モデルの詳細な検証及び動揺管に対応したモデルへの拡張

※スラリー移送試験②はJSPS科研費 25289323 の助成を受けたものです

