大径粒子の非定常挙動を考慮した固液二相流搬送シミュレータの開発

Development of Solid and Liquid Multiphase Flow Simulator in Consideration of Unsteady Motion of Large Solid Particles

佐野 岳志*1 Takeshi Sano
レカラリ マルティノ*2 Martino Reclari
野中 剛*3 Tsuyoshi Nonaka
末松 潤一*4 Junichi Suematsu
下川 眞男*5 Masao Shimokawa
小松 正夫*6 Masao Komatsu

鉱物資源分野等では，水と鉱石の混合物を固液二相ポンプで連続的かつ大量搬送する事例が多くみられるが，時間的にも空間的にも変化する固体の粒径・密度・濃度の影響を受け，管路圧損が非定常的に変化する為，一定流量での連続運転が難しい場合がある。そこで，粒子挙動を非定常的に評価可能な固液二相流搬送シミュレータを開発し，海底資源採掘試験結果と比較する事で，十分な解析精度を有している事を確認した。また，本シミュレータを計画外停止に対するリスクの定量評価に適用可能である事も確認した。

1. はじめに

固体粒子の連続大量搬送需要は，産業界の種々の分野で存在し，例えば石炭火力発電所では，燃料となる石炭や，排気ガス中に含まれる灰を常時搬送・排出する必要があり，ベルトコンベアや配管内の気流で紛体を搬送する方法等が用いられる。一方，鉱物資源分野では，採掘した鉱物を水とともにポンプを用いて搬出する手法が採用され，ベルトコンベアに比べて高速に，気流搬送に比べて大径・大重量粒子の搬送が可能となる。管路内に流体を流す場合，管路圧力損失が生じるため，これに打ち勝つだけの圧力をポンプで付与する事により流体搬送が可能となるが，流体中に固体粒子が大量に存在する場合，粒子の径，濃度，及び密度によっても圧力損失が影響を受けるため，管路内の固体粒子の時間的・空間的分布を正確に把握できなければ，搬送に必要なポンプ圧力を算出する事が出来ない。特に粒子径が大きく，液体と固体を均質媒体として取り扱えない場合，その影響が大きくなる。そこで当社では，搬送システム内での大径固体粒子の挙動を時々刻々評価可能な固液二相シミュレータを開発し，海底資源採掘試験結果と比較する事により，そのシミュレータの精度検証を行った。本稿では，そのシミュレータの概要，及び今後の展望に関して述べる。

2. 固液搬送シミュレータの概要

2.1 計算モデル

当社では，様々な管路構成（管の種類，管路長やポンプ配置等），様々な固体粒子（粒径・密度）に対応する為，既存の固液搬送シミュレータの一般化・拡張を進めている。

固液搬送において重要となるポイントは，時々刻々の固体粒子の空間分布を正確に算出する事であり，すなわち，流体中での固体粒子群の移動速度を適切に計算する事である。まず，移動する流体中に存在する単一の固体粒子には，図1に示すように，粒子そのものの重力の他，浮力

*1 総合研究所 流体研究部 室長 技術士（機械部門）
*2 総合研究所 流体研究部 工博
*3 総合研究所 流体研究部 主席研究員
*4 総合研究所 流体研究部
*5 三菱造船（株） マリンエンジニアリングセンター 開発部 技術士（総監，応理）
*6 三菱造船（株） マリンエンジニアリングセンター 開発部 主幹技師

と流体から受ける抗力が作用する。鉛直管内の上昇流の場合，浮力と抗力の合力が重力よりも十分に大きければ，固体粒子は流体と同一方向に搬送される。一方で，固体粒子が大量に存在する場合，粒子同士の衝突・反発の影響や，粒子の存在によって流れ場が乱される作用が生じるため，これらの影響を加味した“流群速度”を算出する必要があり，これまでに種々の要素試験が行われている。このうち，Masanobu ら[(1)]は，任意の傾斜角度の配管に対して，種々の形状・大きさの粒子を水とともに流す要素試験を行い，流群速度，及び固液二相搬送状態の管路圧力損失を計算するモデルを提唱している。

当社の固液搬送シミュレータでは，Masanobu らの提唱するモデルを用い，流群速度や圧力損失を計算しているが，Masanobu らのモデルでは，流入する固体の濃度が時間的に変化しない状態を取り扱う事から，より一般性を持たせるために，流入する固体の濃度が時間的に変動する場合にも対応できるような改良を施した。

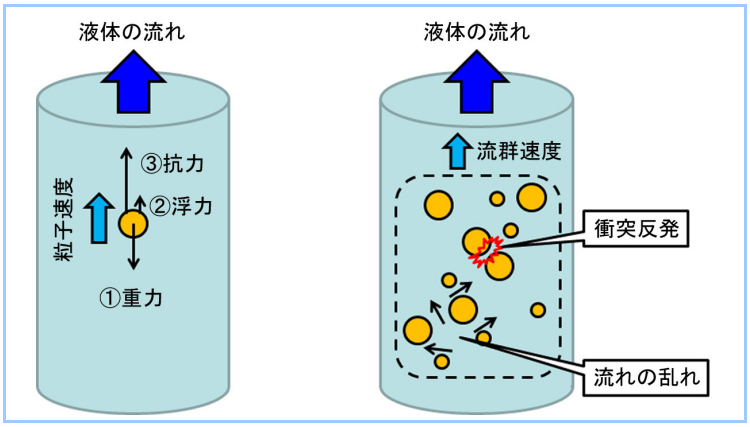

図1　流体により搬送される固体粒子の力のバランス

2.2　シミュレータの特徴，及び計算方法

計算フローを図2に示す。まず，固液搬送システム全体を，直管，曲管，フレキホース，ポンプ，バルブ等の管路要素に分解する。次に，境界条件として，入口端・出口端の圧力，及び，入口端における固体流入量の時間変化（密度の時間変化として付与）を設定し，管路全体の固体粒子の速度，濃度，及び圧力分布を計算，流量が所定の流量となるよう，ポンプ回転数を調整する。一旦状態が定まると，微小時間だけ時間進行させ，同様の計算を繰り返すことで，時間変動解を得る。

システム内にフレキシブルホースが存在する場合，管内流速や固体濃度に応じて，フレキシブルホースの懸垂形状（カテナリー曲線）が変化し，これにより，管路圧力損失特性が変化するが，本シミュレータでは，この影響も考慮する事が可能である。また，海底資源採掘分野への適用も念頭に，潮流により管路が定常的に受ける力や，浮力材による付加浮力も考慮する事が可能である。

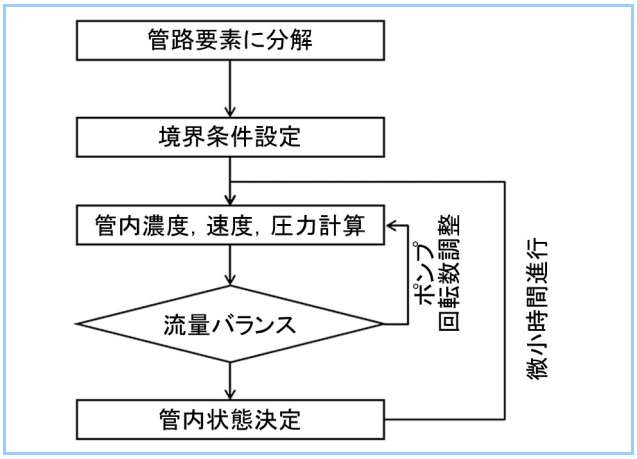

図2　固液搬送シミュレータの計算フロー

3. シミュレータによる計算例

3.1 海底熱水鉱床連続揚鉱試験の概要

本シミュレータの精度検証の為，大径粒子の長距離搬送試験例として，2017 年8月から9月にかけて，独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）からの委託で，当社を代表としたコンソーシアムが行った，世界初の海底熱水鉱床連続揚鉱試験[2]を取り上げる（図3）。当該試験は，水深 1600m の海底で掘削・破砕した鉱石を，海水とともに洋上まで連続的に揚鉱するものであり，当社は集鉱機や水中ポンプの新規開発の他，当該シミュレータを活用した，安定操業条件の導出，及びシステム全体制御ロジックの開発を担当した。

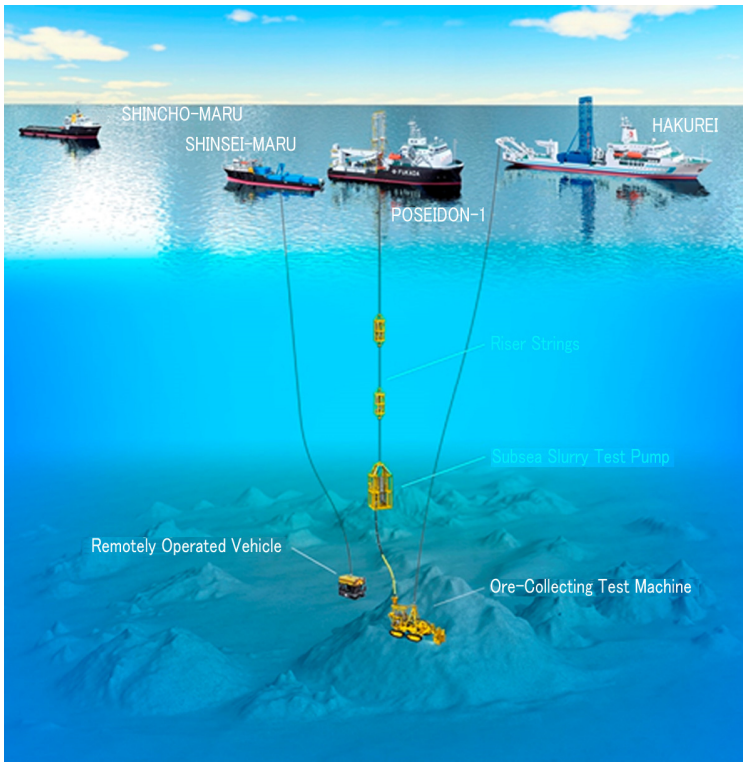

図3 海底熱水鉱床連続揚鉱試験のシステム構成イメージ

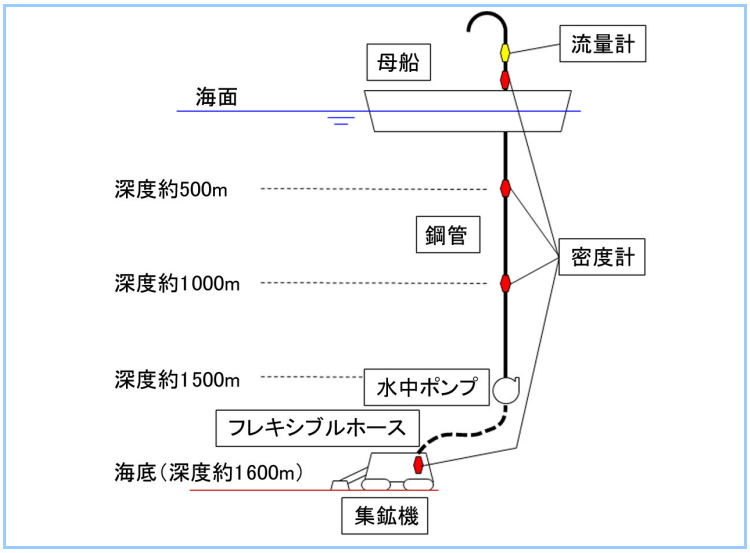

図4 海底熱水鉱床揚鉱システム概念図

当該試験で採用された揚鉱システムの概念図を図4に示す。母船から，鋼管をつなぎ合わせて水中ポンプを海面下約 1500m 地点に懸垂し，深度約 1600m の海底に設置された集鉱機との間をフレキシブルホースで接続している。運転状態の監視の為，密度計や圧力計，及び流量計が複数個所に設置されており，試験時は流量が一定となるよう水中ポンプの回転数をフィードバ

ック制御し，安定的かつ連続的に鉱石を揚鉱している。試験では，流速が約 4m/s となるように条件が設定され，この場合，海底で集鉱された鉱石が船上に到達するまで約7分程度の時間を要する事となる。即ち，管路全体に鉱石がいきわたるまでに，最低7分間の安定集鉱が必要となるが，集鉱機の動作状況や鉱石の堆積状況に応じて集鉱量は時々刻々変化し得る。この為，前章に記載の通り，濃度が時間的に変化する機能がシミュレータには求められる。

3.2 計算結果

本稿では，試験で得られた集鉱機における密度の時間変化，すなわち，鉱石吸入量の時間変化を境界条件としてシミュレータに入力し，各部の密度変化や流量を試験結果と比較し，解析精度の検証を行った。

図5に，各部の密度計算結果を試験結果と比較して示す。横軸は集鉱動作開始からの時間を，縦軸は管内の海水と鉱石の混合流体の密度を表す。鉱石通過は密度上昇として検知する事が出来るが，密度波形の立ち上がり時間が深度上昇に伴い遅くなる傾向，すなわち鉱石が管路内を上昇していく様相等，試験結果を精度よく再現できている事を確認した。ただし，深度約 0m（船上部）の波形に着目すると，試験と解析の波形には時間的なズレが若干見られ，これは鉱石移動速度に換算すると，約3%のズレに相当する。即ち，流群速度の推定に若干の誤差があったものと考えられるが，計測誤差の影響も含まれることから，本解析手法はシステム全体挙動を精度よく予測できていると考えられる。

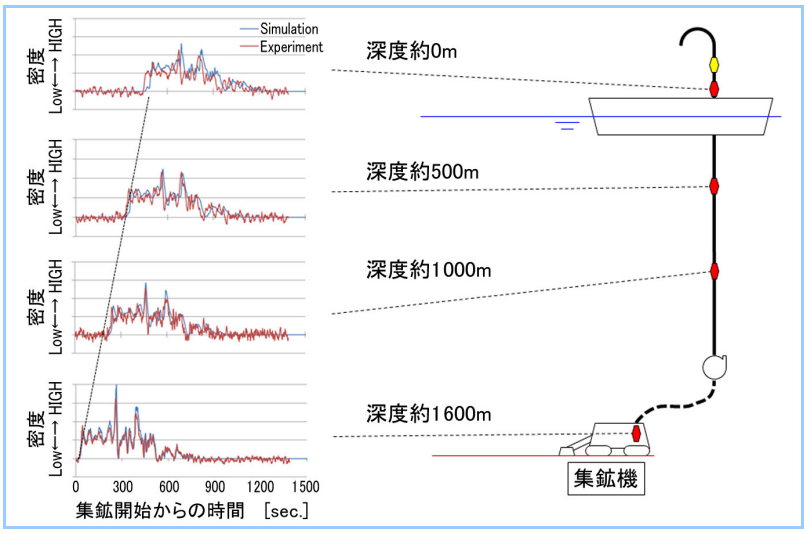

図5 各部密度の実測値との比較

次に，図6に流量を比較して示す。図の縦軸は，制御目標流量で無次元化した流量である。試験では流量計測には電磁流量計を用いたが，鉱石通過時に指示値がランダムかつ短周期で変動する傾向が見られた。しかし，実際の管路長は 1600m 以上あり，水中音速が約 1500m/s である事を考慮すると，1ヘルツオーダよりも高い周波数での流量変動は生じにくい事から，鉱石が流量計の電極付近を通過した影響で，電磁流量計の出力にノイズが重畳したものと考えている。この為，解析では当然ながら短周期変動は見られないものの，流量の大まかな変化傾向は試験結果とよく一致している事を確認した。

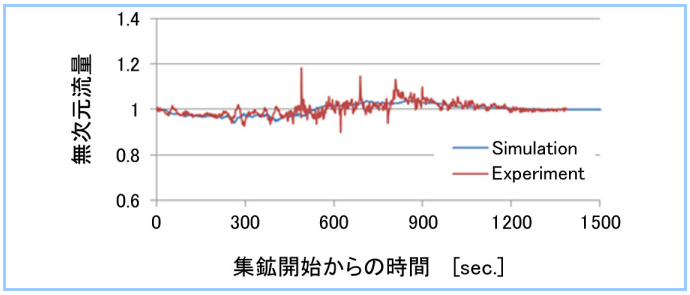

図6 流量の実測値との比較

なお，固液二相搬送時の最大の問題である管路内閉塞に関しては，閉塞に至る迄の物理的プロセスが複雑かつ偶発的である為，本シミュレータでは直接的には取り扱う事は出来ない。しかし，図7に示すように，本シミュレータを用いて固体濃度の時間的・空間的分布を簡単に評価できるため，あらかじめ要素試験等で閉塞限界流速や濃度がわかっている場合，閉塞限界までの裕度を明瞭に図示する事が可能である事から，閉塞等による計画外停止リスク度合いの定量評価が可能となり，リスクを考慮した上での生産条件最適化が可能となる。

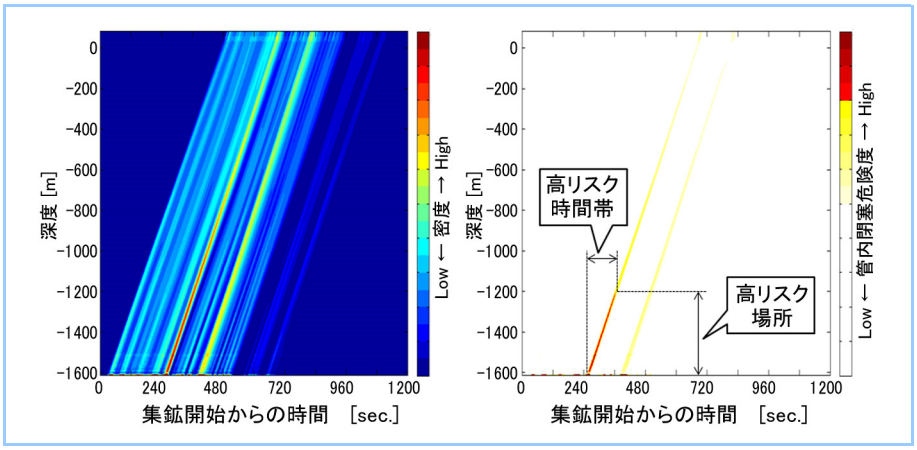

図7 固体濃度の時間，空間分布と閉塞リスク表示例

4. まとめ

以上より，開発した固液搬送シミュレータにより，大径粒子を含む固液二相流体の長距離連続搬送状態を精度よく再現出来る事を確認した。これにより，固体搬送システム全体挙動や，計画外停止リスクに対する裕度の評価も可能となり，資源採掘分野等の生産性向上等への活用が期待される。

本調査は経済産業省の委託を受けた JOGMEC の調査の一環として実施された。経済産業省並びに本業務に携わった関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

(1) S. Masanobu, et al., Experimental Studies Of Pressure Loss in Inclined Pipe in Slurry Transport for Subsea Mining, ASME 2015 34th Internetional Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2015-41211.
(2) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構，ニュースリリース，(2017)
http://www.jogmec.go.jp/news/release/news_06_000315.html