

海底鉍物資源混合揚収に向けた パルプリフト方式の基礎的検討

菅原 弘貴¹・下村 光毅²・中谷 直樹³・山崎 哲生⁴・
片山 裕之⁵・熊谷 隆宏⁶

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: hiroki.sugahara@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

² 大阪公立大学大学院工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1)
E-mail: sbb03052@st.osakafu-u.ac.jp

³ 正会員 大阪公立大学大学院工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1)
Nakatani.marine@omu.ac.jp

⁴ 大阪公立大学大学院工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1)
yamazaki.marine@omu.ac.jp

⁵ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
Hiroyuki.Katayama@mail.penta-ocean.co.jp

⁶ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
Takahiro.Kumagai@mail.penta-ocean.co.jp

日本のEEZ内にある南鳥島周辺の海底付近には、レアアース泥やマンガン団塊が存在する。その揚収手法の一つとして、パルプリフト方式が検討されている。パルプリフト方式とは、レアアース泥と海水を混合した高粘度の作動流体を用いてマンガン団塊を輸送する方式である。この方法を実現するためには、様々な条件下での海底資源の揚収量を推定することが不可欠である。しかし、作動流体の粘性特性は不明であり、確実な揚収量推定は困難であった。本研究では、パルプリフトシステムの作動流体の粘性特性を実験により明らかにし、揚収量を推定するためのシミュレーションモデルを構築した。

Key Words : *pulp-lift method, rare earth mud, manganese nodules, viscosity characteristics*

1. はじめに

レアアースやレアメタルといった希少資源は現代社会において必要不可欠である。しかし、日本はそれら資源の殆どを輸入に依存しており、安全保障の面からも安定した供給ルートを確認することが急がれている。一方、南鳥島周辺の日本のEEZ内の海底面近くの海底泥に、レアアースが多く含まれていることが発見された¹⁾。南鳥島周辺は以前よりマンガン団塊が多く賦存していることが報告されており、パルプリフト方式と呼ばれる手法での混合揚収が検討されている²⁾。

パルプリフト方式とは、レアアース泥と海水を混合して作成した高粘度の作動流体を用いて、マンガン団塊を輸送する方式である。1980年代にフランスで開発された揚鉍方法³⁾であり、揚収物中の鉍物資源の割合が高まるため、揚収物の処理・廃棄コストが抑えられるメリットがある。この方式を実現できれば、これまで揚収方法として考えられてきたガスリフト方式よりも採算性が高く、環境負荷が低い有効な開発となるが、フランスでの検討

以降、研究開発が進んでいないのが現状である。

パルプリフト方式を用いた揚収システムの検討に際し、種々の条件下における揚収量の推定結果に基づくリスク評価が必要である。ここで、レアアース泥は高粘度の擬塑性流体であることが報告されており⁴⁾、レアアース泥と海水との混合体である作動流体の粘度は、揚収速度や混合率といった要因により大きく変化することが予想される。作動流体の粘度の最適化は揚収量に大きく影響すると考えられるため、レアアース泥の特性や、揚程や揚収量などの様々な条件下における作動流体の粘度を把握するとともに、想定する条件下における最適な粘度を特定しなければ、正確な揚収量を推定することは困難である。

本研究では、パルプリフト方式によるレアアース泥水とマンガン団塊の混合揚収技術の基礎的検討として、模擬深海泥を用いた作動流体の粘度特性について検討を行い、マンガン団塊を模擬した鉍石を用いて揚鉍実験を実施した。更に、これらの結果を参考に、混合揚収量を評価するためのシミュレーションモデルを構築し、揚収量の試算を行った結果を報告するものである。

2. 模擬泥の検討

(1) 粘度特性を表すパラメータ

作動流体はレアアース泥と同様に擬塑性流体であると予想される。擬塑性流体の粘度 μ は、(1)式で表される。

$$\mu = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

ここで $\dot{\gamma}$ [1/s]はずり速度、 K [Pa·sⁿ]は擬塑性粘度、 n はべき乗指数である。 K は流体の粘度の高さ、 n はずり速度との応答関係を示す。上式より、 K, n を得られれば、作動流体の高い粘性や揚収速度による粘度の変化を表現可能である。ただし、作動流体はレアアース泥と海水の混合体であることから、 K, n はその混合率によって変化すると考えられるため、幾つかの混合率で作動流体を作成し、それぞれの K, n を調べることにした。更にここで得た K, n の変化を混合率により定式化し、任意の混合率で K, n を得られるようにすることにより、揚収速度や混合率の変化に伴う作動流体の粘度特性の変化を表現できる。

(2) 粘度計測実験

K, n はずり速度と粘度の応答関係を表わすパラメータであるため、それらの応答関係から K, n を推定することができる。本研究では、対象とする作動流体の粘度に対するずり速度の応答関係を、回転粘度計(TBV-10型粘度計、東機産業)を用いて計測した。

試料は、ハワイ沖海底4000mで採取された深海底泥⁹⁾を使用した。この泥は南鳥島付近のレアアース泥と同じ太平洋プレート上にあり、非常に高粘度の擬塑性流体であり、周辺環境、性質共にレアアース泥と共通点が多く、レアアース泥として扱うことにした。

実験条件は、混合率を作動流体中の泥粒子の体積濃度(以降 C_x)とし、 $C_x=5, 10, 16\%$ (原泥の体積濃度が16%)の試料を作成した。粘度が高すぎる試料は流動性が低く粘度計の回転羽に試料が密着せず、空洞が発生してしまう懸念があったため、濃度は原泥の16%を最大とした。室内温度は5, 10, 15, 20°Cの4種類とした。

(3) ずり速度定数

K, n の推定のためには、計測結果毎のずり速度が必要となる。しかし今回使用した粘度計では計測条件毎のずり速度が定められておらず、 K, n が推定できない。そこで、ずり速度定数からずり速度を求める手法を考案した。ずり速度定数とは、計測時のローターの回転数 N [rpm]に乘ずることでずり速度を得られる係数であり、一部の円筒型のローターにおいて定められている。本研究では、ずり速度定数はローター形状から定まると考え、ローター形状からずり速度定数を求める関数を構築した。

ずり速度定数を定める関数は、半径 r_0 [m]、高さ L [m]、

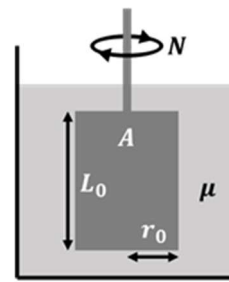


図-1 流体中で回転するローターの模式図

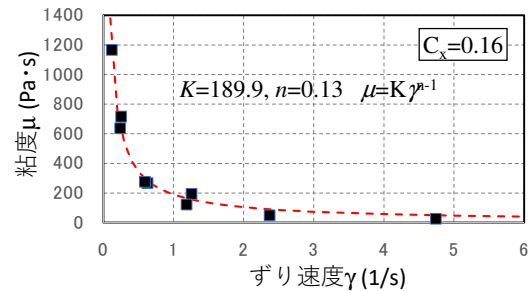


図-2 原泥における K, n の測定結果 ($C_x=0.16$ の場合)

ずり速度定数 A のローターを、粘度が μ [Pa·s]の試料中で、回転数 N [rpm]で回転させた際に発生する剪断応力 τ とトルク T から与えられる(図-1)。

剪断応力 τ は式(2)、トルク T は式(3)で表される。

$$\tau = \mu AN \quad (2)$$

$$T = \tau(\pi r_0^3 + 2\pi r_0^2 L) \quad (3)$$

以上の式から A について解くと式(4)を得る。

$$A = \frac{1}{(r_0^3 + 2r_0^2 L)} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{T}{\mu N} \quad (4)$$

ここで、 $r_0^3 + 2r_0^2 L$ を形状係数 S とし、 $T/\pi\mu N$ も形状で定まるものと仮定すれば、ずり速度定数 A は形状係数を変数とした関数として扱うことができる。ここでは、ずり速度定数とローターの寸法^{注1)}を使用してローター毎に形状係数 S を求め、本研究においてはずり速度定数を形状係数で定式化した。(5)式に導出した式を示す。

$$A = 0.209e^{644328 \cdot S} \quad (5)$$

本研究では式(5)を用い各ローターのずり速度定数を算出し、計測条件毎のずり速度を定めた。これにより各混合率における K, n の推定が可能となった。

(4) 原泥の K, n

まず原泥($C_x=0.16$)について、粘度計測実験結果から K, n の推定を行なった結果を図-2に示す。なお、縦軸が粘度 μ [Pa·s]、横軸がずり速度 $\dot{\gamma}$ [1/s]である。

計測結果からずり速度と粘度は反比例的な関係を持ち、作動流体のベースとなる原泥が擬塑性流体の特性を示すことが確認された。図中の点線は、推定した K, n で推定した粘度特性である。海水の K, n は $C_x=0$ のとき $K=0.002$,

$n=1$ であることから、海水とレアース泥水では粘度特性が大きく異なることがわかる。

(5) 作動流体の K, n

次に作動流体について、 Cx 毎に推定した K, n を図-3 に示した。 K は混合率の上昇に伴い指数的に上昇している一方、 n は混合率の上昇に伴い単調減少していることから、それぞれの関係を次の(6),(7)式のように定式化した。

$$K = 0.002 + (19.48 \cdot Cx)^{4.62} \quad (6)$$

$$n = 1.0 - 5.45 \cdot Cx \quad (7)$$

上式より、任意の Cx における K, n が得られる。

(6) 模擬泥の選定

ハワイ沖水深5,000 m海域の海底泥⁵⁾の粘度試験結果を基に、揚鉦実験で使用する模擬泥水の検討を行った。その結果、擬塑性流体であることを前提として既往研究における使用実績や入手の容易さからベントナイトとカオリンを用いた泥水を準備した(図-4)。また、配管内部の挙動を確認するために、透明な擬塑性流体であるCMC(カルボキシメチルセルロース)水溶液も採用した。揚鉦実験でベントナイト泥水とカオリン泥水を用いる際は、両者の粘性条件を合わせるため、海水の液性限界 w_L と泥水の含水比 w による正規化含水比(=模擬泥の含水比 w / 液性限界 w_L)で整理することとした。ただし、増粘剤は揚鉦時の管内状況視認を目的としたため、カタログを参考に濃度1%で水溶液を作成した。

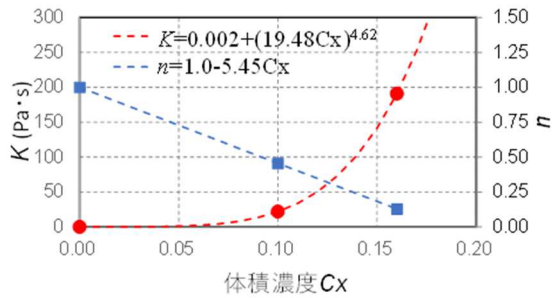


図-3 K と n の定式化推定値

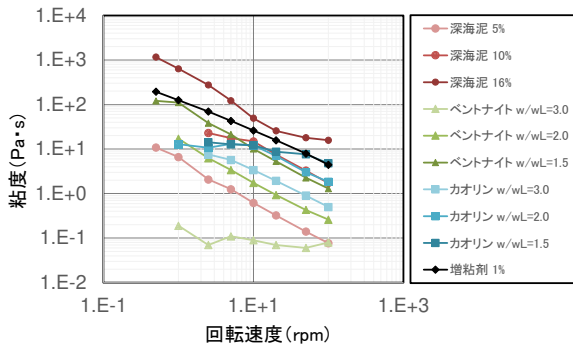


図-4 模擬深海底泥検討のための粘度試験結果

3. 模擬泥を用いた揚鉦実験

(1) 実験条件

検討した模擬深海底泥を用いた泥水を作動流体とした揚鉦実験を実施した。高粘度流体を管内で閉塞させることなく、鉛直上向きに圧送するためには高压出力可能な機器が必要と考え、モルタル圧送に使用されるスクイズポンプ(新明和工業 MM200 最大吐出量200 L/min)を採用した。また、高耐圧仕様の内径50 mmの肉厚塩ビ管を用い、揚程3 mの模擬鉦石の揚鉦実験を実施した。

模擬鉦石の揚鉦状況を把握するため、圧力計4台、RFIDアンテナ4台、 γ 線密度計2台、配管流量計2台、電磁流速計1台を設置し測定を行った(図-5)。実験では、作動流体(泥水)、泥水濃度、管内流速を変えて、図-6に示す模擬鉦石(碎石とステンレス球)の揚鉦を計61ケース実施した(表-1)。塩ビ管は透明なものを採用したが、ベントナイトとカオリンの模擬泥水は不透明で揚鉦時の状況を視認できなかったため、折田ら⁶⁾を参考に模擬鉦石にはRFIDタグを埋込み、泥水中の挙動を追跡した。なお、RFIDタグによる検知には指向性があり、アンテナに対するタグの向きによっては通過を検知できない懸念があった。本実験では1つの模擬鉦石に対してRFIDタグを3方向に付けることによって検知精度を向上させた。

(2) 実験結果

実験結果のうち、ベントナイト泥水($w/w_L=2.0$)、流速1 m/sの流速データと圧力データの経時変化を示した(図-7)。スクイズポンプ特有の脈動波形が確認され、模擬鉦石も管内圧力・流速の変動に伴い、泥水中を上下移動しながら揚鉦されていた。また、RFIDタグによる計測結果

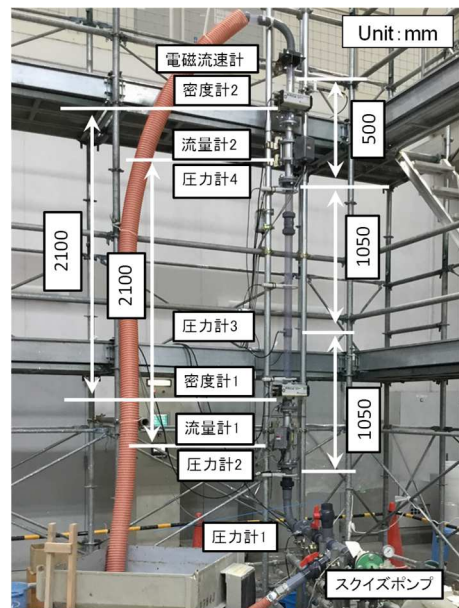


図-5 実験設備・計測器設置状況

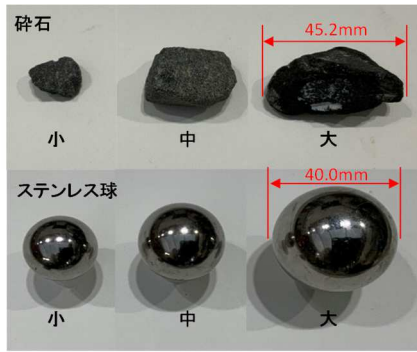


図-6 揚鉤に用いた模擬鉤石

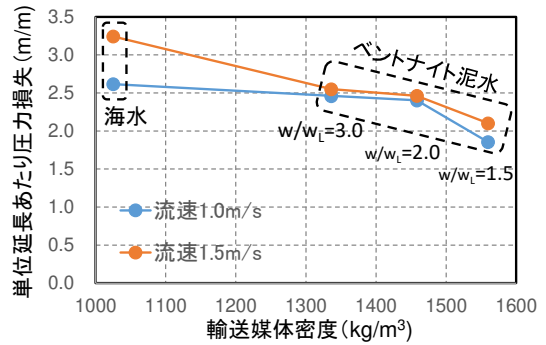


図-9 揚鉤時の鉛直部圧力損失

表-1 揚鉤実験条件

作動流体	人工海水, ベントナイト泥水, カリウム泥水, CMC
濃度	w/w _L =1.5, 2.0, 3.0 (ベントナイト泥水例: ρ=1560, 1458, 1336 kg/m ³)
流速	0.5, 1.0, 1.5 m/s
模擬鉤石	砕石: 直径 15, 30, 45 mm, ρ=2650 kg/m ³ ステンレス球: 直径 25, 30, 40 mm, ρ=7800 kg/m ³

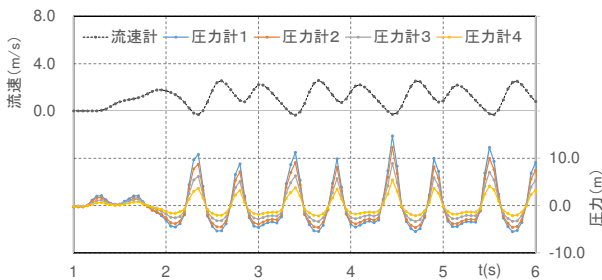


図-7 揚鉤時の流速・圧力データ例

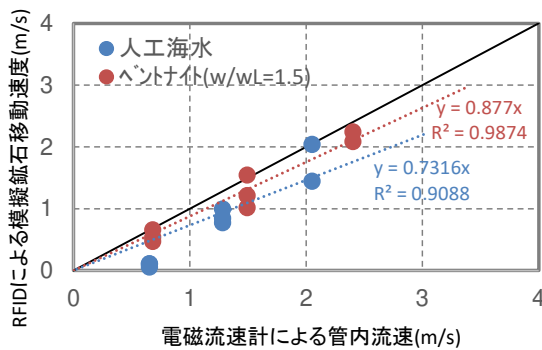


図-8 RFID タグによる模擬鉤石(砕石)の移動状況確認結果

から、人工海水では模擬鉤石(砕石)の移動速度の73%程度に低下しているのに対して、泥水では1割程度の低下に留まっており作動流体とほぼ同位相で移動していることも確認できた(図-8)。

実験では、海水では揚鉤できなかった模擬鉤石に対して、泥水では流速0.5m/sの一部のケースを除いて揚鉤可能であった。これは同じポンプ圧力に対して泥水の方が

圧力損失が小さく(図-9)、流速低下時に高粘度高密度泥水の中では模擬鉤石の沈降速度が海水に比べ低減されることが原因であると考えられる。なお、実験では中サイズの模擬鉤石が揚鉤できない条件で大サイズが揚鉤できるケースも見られた。これは、塩ビ管の内径50mmに対して大サイズの模擬鉤石の直径が40~50mmのため、作動流体通過面積の減少に伴い、他のケースに比べ揚力を受けやすくなったためと考えられる。今後、管径に対する最適鉤石サイズの検討も必要である。

4. 揚収量の推定モデル

(1) 管内流動状況を表す方程式

本研究では固液混相管内流を扱うため、ドリフトフラックスモデル⁷⁾を参考にモデルを構築した。ドリフトフラックスモデルとは、揚収管の各管路断面の平均量と管内物質の相の比率を表す体積率をパラメータとして管内の流動状況を表現するモデルであり、管断面にて平均した物理量と、管断面における相の比率を表す体積率を与える。ここで揚収管内は等温かつ流れは定常流であると仮定し、鉛直上方向にz軸を設ければ、固液二相流の基礎方程式は、式(8)、(9)のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial z}(f_k \rho_k V_k) = 0 \quad (k = S, L) \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\sum_k^{S,L} f_k \rho_k V_k^2) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{4\tau_w}{D} - \rho_M g \quad (9)$$

式(8)は各相の基礎方程式、式(9)は管内の運動方程式である。なお固相(添字S)はマンガン団塊、液相(添字L)はレアアース泥水である。 f_k [-]は体積率、 ρ_k [kg/m³]は密度、 V_k [m/s]は各相の平均速度、 P [Pa]は圧力、 τ_w [Pa]は壁面せん断応力、 D [m]は揚鉤管の管径、 $\rho_M (=f_S \rho_S + f_L \rho_L)$ [kg/m³]は二相の平均密度、 g [m/s²]は重力加速度である。ここでは、上式に次の構成方程式を2つ加え系を閉じる。

まず、鉛管円管内定常流の壁面せん断応力によるエネルギー損失に関する構成方程式を式(10)に示す。

$$\frac{\tau_w}{4D} = \lambda \frac{1}{D} \frac{\rho_L J_M^2}{2} \quad (10)$$

ここで、 λ [-]は管内摩擦係数である。管内摩擦係数は、管内流における R_e 数($=(\rho_L V_M^{2-n}) D^n / K$)により求められる係数である。 $J_M (=J_L + J_S)$ [m/s]は混合流束である。

次に管内流中の固体粒子の沈降により生じる平均ドリフト速度の構成方程式を次の式(11)に示す。

$$V_{Sj}^* = 1.10V_M - V_{SS}f_L^m - J_M \quad (11)$$

V_{Sj}^* は J_M に対する $V_S (V_{Sj}^* = V_S - J_M)$ で定義され、二相間の速度差を表す。また V_M は、二相の質量中心速度($= (f_S \rho_S V_S + f_L \rho_L V_L) / \rho_M$) [m/s]を表す。ここで V_{SS} [m/s]は固体粒子の終速度⁸⁾、 $m[-]$ は粒子 $R_d (=(\rho_L V_{SS}^{(2-n)} d_s^n) / K)$ と粒子形状より定まる定数、 d_s [m]は固体粒子径である。

これらの構成方程式に含まれる K, n に式(6), (7)を代入することで、任意の Cx における作動流体の粘度特性を考慮した流動状況について調べることができる。

以上よりモデルの変数は、 P, f_S, V_M, Cx となることから、本モデルにて任意の揚収物の組成 (f_S, Cx) 及び揚収を行う管内流速 (V_M)を設定すれば、必要な圧力 P と各相の流速を計算することができる。

(2) 揚収可否の判別条件

揚収実現可否を判別する条件を与え、計算結果の中から現実的に揚収が不可能なものを除外した。ここで揚収が不可能な場合は、マンガン団塊が管内を上昇できない場合、もしくは管内流動の再現に必要な圧力がポンプでは賄えない場合である。前者は固相の流速のみで判別可能であるが、後者は実際に使用するポンプの性能を基に判別する必要がある。

圧力による判別を行う際、流量毎のポンプの吐出可能圧力が必要となる。そのため使用するポンプを仮定し、流量と吐出可能圧力の関係を明らかにしておく。本研究では、高揚程かつ逆止弁付きのダイヤフラムポンプの使用を想定した。想定したポンプの最大吐出圧力は 34.3 MPa、最大流量は 112.5 lpm である。ポンプの圧力と流速の関係を示す性能曲線については、類似ポンプ^{註2)}の性能を参考に関係を決定した。高揚程ポンプは、流量の増加に伴い圧力が線形で低下する傾向があるため、今回扱うポンプにおいても同様の傾向があるとし、圧力と流速の関係を式(12)で表されるものとした。

$$P_{Suction} = 34.3 - 0.3433Q \quad (12)$$

ここで、 $P_{Suction}$ はポンプの吐出圧力、 Q [lpm]はポンプの回転数とバルブの種類により定まる流量である。この式により任意の流速および管径のポンプ吐出圧力が得られる。この吐出圧力に対して、前節のモデルにて計算した必要圧力が上回れば実現不可と判断されることになる。

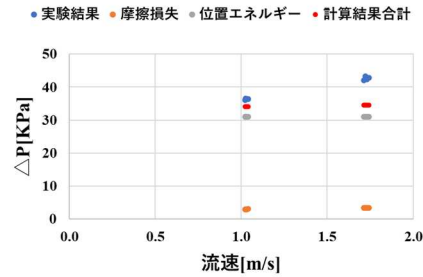


図-10 圧力損失の比較

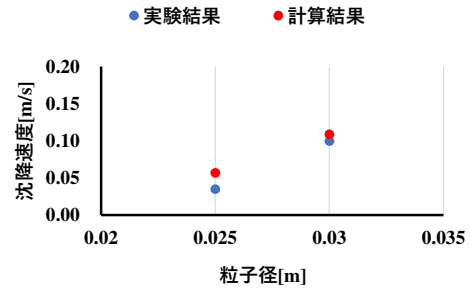


図-11 沈降速度の比較

(3) モデルの妥当性の検証

実験結果を用いて、モデルの信頼性を確認した。粘度特性に大きく影響を受ける圧力損失および沈降速度について検証した。

実験における圧力損失は、管内をベントナイト懸濁液単層で流動させた際の圧力計の計測値から算出した。また沈降速度は、管内を CMC 水溶液で満たしてステンレス球を上部から投入した際に、球が各所を通過する時刻から算出した。なお、ベントナイトおよび CMC の粘度特性は、第 2 章で示した方法で K, n を推定した。計測値とモデルによる計算値との比較を図-10, 11 に示す。図中、青丸が実験値、赤丸が計算値を表す。また図-10 で、橙と灰色は摩擦損失と位置エネルギーの大きさを表し、これらが計算値の内訳となっている。

圧力損失は、流速が約 1.1 m/s と約 1.7 m/s にてそれぞれ 4 回計測を行った。1.1 m/s では計算結果は実験値に概ね一致しているものの、1.7 m/s では計測値と実験値の差が大きくなっている。これは粘度の推定式において、ずり速度が非常に大きい領域の推定となっており、粘度特性を把握する実験における速度レンジよりも大きかったため、粘度の推定精度が低くなったためと考えられる。一方、沈降速度については、粒子径が異なった条件でも両者はほぼ一致した。

実験に用いたベントナイトの K, n を推定する際に用いたずり速度の範囲内である 1.1 m/s の条件では、計算値は実験値とある程度一致していることや、実際の揚収条件の速度領域はこれより低いことから計算結果は概ね信頼できると判断した。

(4) 揚収量の推定結果

モデルを用いて、 $V_M=0.01$ m/s および $V_M=0.10$ m/s におけるレアアース泥とマンガン団塊の揚収量を計算した(図-12)。図中、縦軸は混合率 C_x 、横軸は固相の体積率 f_s を示し、下のセルほど混合率が高く、右のセルほど体積率が高い。なおセルの色の濃さは揚収量の多さを表す。また灰色部分は判別条件により揚収不可と判断された揚収条件である。灰色部分の上側は流体の密度及び粘度が低すぎるためマンガン団塊が上昇しない領域、下側は揚収物が高密度すぎるためポンプの吐出圧力が不足し、管内を流動させられない領域である。

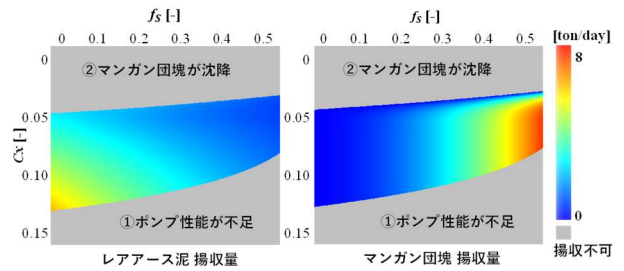
揚収が可能である領域について詳しく見ると、レアアース泥は C_x が増加し、 f_s が減少するにつれて揚収量が増加している。流速が一定の中で管内を占めるレアアース泥の割合が高まれば、その揚収量は増加する。一方で、マンガン団塊は C_x 、 f_s の双方が増加しても揚収量が増加する傾向が見られる。 C_x が増加すれば作動流体の密度と粘度が増加するため、マンガン団塊は沈降しにくくなる。また f_s の増加につれマンガン団塊が作動流体から流体力を受けやすくなり、沈降も起きにくくなる。以上のことから C_x 、 f_s のどちらの増加もマンガン団塊の揚収量の増加に寄与すると考えられる。ただし、過度に C_x 、 f_s を増やせば、揚収不可領域に入るため、揚収物の組成を決定する際には注意が必要である。

5. おわりに

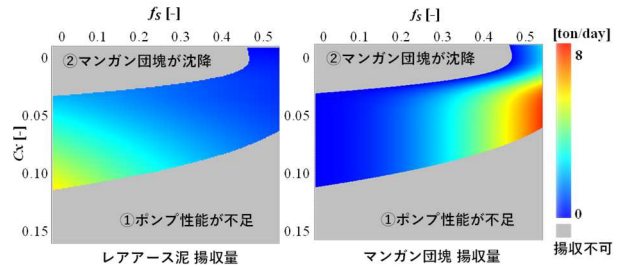
レアアース泥水を作動流体としてマンガン団塊を揚収するパルプリフト方式について、ベントナイトとカオリンを使った模擬泥水および模擬鉍石を用いた実験を実施した。また同時に作動流体の混合率毎の粘度特性を把握するとともに、揚収時のポンプ制約条件を考慮したマンガン団塊とレアアースの混合揚収量を推定するモデルを構築した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・レアアース泥水を使ったパルプリフト方式は、海水を使った揚鉍より有利なことを確認した。
- ・レアアース泥水の擬塑性流体の特性を反映したレアアース泥水濃度およびマンガン団塊との混合率による混合揚収量推定モデルを構築した。また構築したモデルにより、使用想定ポンプに対して揚収量の推定を行った結果、揚収量分布および揚収不可となる条件を確認することが可能となった。

今後、構築した揚収量推定モデルで計算した揚収量と、金属・鉍物資源の価格や政治的問題など外部の要因を併せることで、揚収システムについてより現実的なリスク評価を行うことが可能となる。



(1) V=0.01 (m/s)の場合



(2) V=0.10 (m/s)の場合

図-12 揚鉍量推定結果

NOTES

- 注1) 英弘精機株式会社 : ” Brookfield 回転粘度計 仕様書 一覧 ver.1.6 ” Available at : <[https://eko.co.jp/wp-content/uploads/2019/04/B型粘度計仕様書 ver.1.6.pdf](https://eko.co.jp/wp-content/uploads/2019/04/B型粘度計仕様書ver.1.6.pdf)> Accessed on: July. 21th 2022.
- 注2) タイヨーインタナショナル, EXP シリーズ金属製ダイヤフラムポンプ性能曲線, Available at : <<https://premium.ipros.jp/tic-tokyo/catalog/detail/533027/>> Accessed on: Dec. 14th, 2022.

REFERENCES

- 1) Y. Kato, K. Fujinaga, K. Nakamura, Y. Takaya, K. Kitamura, J. Ohta, R. Toda, T. Nakashima and H. Iwamori, “Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements”, Nature Geosci., 4, 535-539, 2011.
- 2) T. Yamazaki, N. Nakatani, R. Arai, T. Sekimoto and H. Katayama: Combined Mining and Pulp-Lifting of Ferromanganese Nodules and Rare-Earth Element-Rich Mud around Minamitorishima Island in the Western North Pacific: A Prefeasibility Study, Minerals 2021, 11, 310. <https://doi.org/10.3390/min11030310>
- 3) J. B. Gemonod, A. Bath and B. G. Preussag: Analysis and Comparison of Nodule Hydraulic Transport Systems: OTC 5476, pp.487-498, 1987.
- 4) 布谷信貴, 土田孝, 安部太紀 : 高含水比状態における海成粘土の流動特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol. 68, No.2, 2012, I_551-I555. [Nunoya, N., Tsuchida, T. and Abe, T.: Flow characteristics of marine clays of high water content condition, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2(Coastal Engineering), Vol.68, No.2, 2012.]

- 5) 菅原弘貴, 片山裕之, 中谷直樹, 山崎哲夫: 深海底泥の沈降特性に関する実験的検討, 第76回土木学会年次学術講演会論文集, II-113, 2021. [Sugahara, H., Katayama, H., Nakatani, N. and Yamazaki, T.: Experimental study on sedimentation characteristics of deep-sea mud, Proceedings of the 76th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers, II-113, 2021.]
- 6) 折田清隆, 谷和夫, 鈴木亮彦, 菅章悟, 田中肇一: 模型実験において鉱石モデルの揚鉱速度を計測するRFIDシステムの開発, 土木学会論文集(B3), Vol.75, No.2, pp.1_941-1_946, 2019. [Orita, K., Tani, K., Suzuki, A., Suga, S. and Tanaka, K.: Development of rfid System for measuring ore model velocity in lifting experiment, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3(Ocean Engineering), Vol.75, No.2, pp. 1_941-1_946, 2019.]
- 7) 畠山信夫, 益山忠: 混合体モデルによる基礎方程式, 資源と素材, Vol.107, No.1, pp.23-29, 1991. [Hatakenaka, N. and Masuyama, T.: Conservation equation by mixture model, Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, Vol.107, No.1, pp.23-29, 1991.]
- 8) 野田佳六, 川島俊夫, 吉沢幸雄: 固体粒子の水力輸送に関する研究, 日本鉱業会誌, Vol.86, No.987, pp.419-423, 1970. [Noda, K., Kawashima, T. and Yoshizawa, Y.: Hydraulic Transportation of Solid Material (3rd Report), Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, Vol.86, No.987, pp.419-423, 1970.]

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 11, 2023)

FUNDAMENTAL STUDY OF PULP LIFT METHOD FOR MIXED LIFTING OF SUBMARINE MINERAL RESOURCES

Hiroki SUGAHARA, Koki SHIMOMURA, Naoki NAKATANI,
Tetsuo YAMAZAKI, Hiroyuki KATAYAMA and Takahiro KUMAGAI

Rare earth mud and manganese nodules exist near the seafloor around Minami-torishima Island, which is within Japan's EEZ. The Pulp-lift method is being considered as one of the development methods. The Pulp-lift method is a transporting manganese nodules using a high-viscosity working fluid made by mixing rare earth mud and seawater. To realize this method, it is essential to estimate the yield of seafloor resources under various conditions. However, the viscosity characteristics of the working fluid were unknown, and the reliable estimation of the yield was not possible. In this study, the viscosity characteristics of the working fluid of the pulp lift system were clarified through experiments, and a simulation model was constructed for estimating the lifted yield.