

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01355

研究課題名(和文) 海底鉱物資源の開発のためのキャリア循環方式による揚鉱システム

研究課題名(英文) Lifting technology by carrier circulation system for development of submarine mineral resources

研究代表者

谷 和夫 (Tani, Kazuo)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：50313466

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,700,000円

研究成果の概要(和文)：海底の鉱物資源の効率的な揚鉱技術として、キャリア物質の循環方式を提案して、基礎的な検討を行った。小型の揚鉱模型実験と、管状の容器の中での球体の鉱石モデルの沈降実験及び引上げ実験を行った。これらの実験において鉱石モデルの管中の移動を観測する手法として、RFID(Radio Frequency IDentifyer)システムを利用する計測方法を開発した。そして、揚鉱に用いるキャリア物質の鉱石保持性能を評価するためのモデルを検討した。また、移送メカニズムを解明するための格子法による数値シミュレータの開発にも挑戦した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海底の鉱物資源の効率的な揚鉱技術として、キャリア物質(粒状体を含む粘性流動体)の循環方式を提案して、基礎的な検討を行った。小型の揚鉱模型実験、管状の容器の中での球体の鉱石モデルの沈降実験と引上げ実験をRFIDを利用した計測システムを開発して行った。そして、揚鉱に用いるキャリア物質の鉱石保持性能を評価するためのモデルを作った。また、移送メカニズムを解明するための格子法による数値シミュレータの開発にも挑戦した。キャリア物質を利用することにより、(海)水を利用する従来の方法に比較して格段に揚鉱性能が向上することが示され、海底鉱物資源の開発の実現可能性が高くなった。

研究成果の概要(英文)：As an efficient lifting technology for mineral resources on the seabed, we proposed a carrier material circulation method and conducted the relevant feasibility study. Small-scale model tests of ore lifting and a series of settling and pulling experiments of an ore model in a cylindrical container were conducted. In these experiments, a new measurement method using an RFID (Radio Frequency IDentifyer) system was developed for observing the movements of an ore model in a riser pipe. Then, a theoretical model was proposed to estimate the ore retention performance of the carrier materials based on their rheological characteristics. We also attempted to develop a numerical simulator using a particle-based method to elucidate the transport mechanism.

研究分野：地盤工学

キーワード：海洋資源 資源開発工学 揚鉱 鉱石

1. 研究開始当初の背景

深海底には未開発の鉱物資源(海底熱水鉱床, マンガンクラスト, マンガン団塊, レアース泥)が賦存することが知られている。これらの有用鉱物を深海底から洋上に移送するさまざまな揚鉱システムが提案されているが, 世界的に有効かつ実用的な技術は開発されていない。例えばエアリフト方式あるいはスラリーや重泥水を用いた重液体循環方式は, 移送できる鉱石の最大粒径は細粒分レベル(粒径 2 mm 以下)で効率が悪く, またポンプが停止した時に鉱石が沈降してライザー管の閉塞が懸念される(谷, 2016)。

そこで, フレッシュコンクリートの高所打設や液状化対策の1つである流動化させた砂の地盤注入において, 粗粒分レベル(粒径 2~75 mm)の骨材や地盤材料を数百 m 超もポンプ圧送できることに注目し, 図 1 に示す新たな揚鉱システムを考案した(谷ほか, 2017)。このアイデアは, キャリア物質(粒状体を含む粘性流動体)を U 字管ないし二重管構造のライザー管内に循環させて鉱石を深海底から洋上に移送する方式(以後, キャリア循環方式とする)である。ポイントとなるキャリア物質の特性は, ポンプ圧送性, 鉱石保持性, 軽量性である。ポンプ圧送性と鉱石保持性により, 移送できる鉱石の最大粒径を石分レベル(粒径 75 mm 以上)にまで拡大し, かつライザー管の閉塞を防止する。また軽量性により, 鉱石を移送する上昇管の海底での内・外の圧力差を抑えて, 鉱石の上昇管への搬入を容易にすると共に, 管構造を軽薄化する。

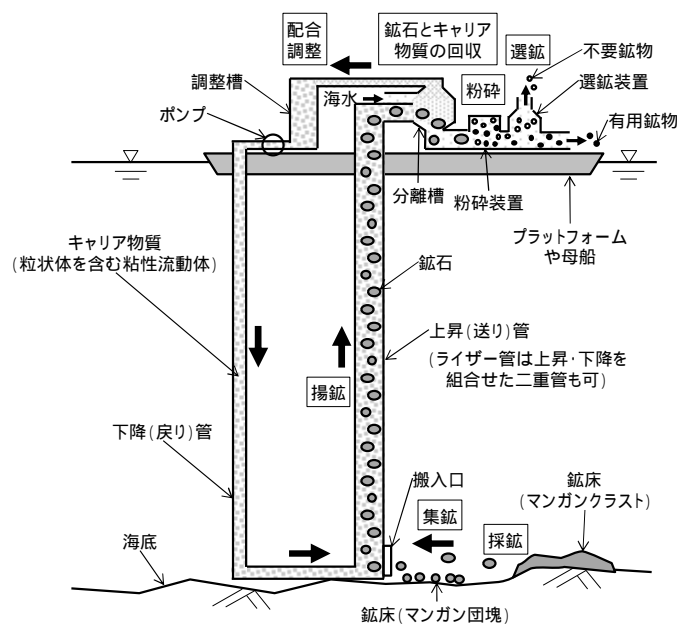


図 1: キャリア循環方式による揚鉱システムの概要

2. 研究の目的

応募研究の目的は, このキャリア循環方式による揚鉱システムを実用化するための基盤的な技術を開発することであり, 以下に示す 3 テーマについて検討を進めた。目標とする性能は, 内径 300 mm 程度のライザー管と浚渫に用いる船上ポンプを用いて, マンガン団塊(最大径 100 mm 程度, 密度 3 Mg/m<sup>3</sup> 程度)を未粉碎のまま洋上に移送可能とすることである。

【テーマ 1】ポンプ圧送性と鉱石保持性を調べる手法の開発

ポンプ圧送性と鉱石保持性は, コンクリートや流動化処理土のワーカビリティ(コンシステンシー(変形・流動に対する抵抗性)と材料分離抵抗性とを合わせた作業性)に類似している。そこで, コンシステンシー特性および材料分離抵抗性の評価手法を参考に, キャリア物質のポンプ圧送性と鉱石保持性を調べる手法の開発を目指した。

【テーマ 2】鉱石保持性能のモデル化

キャリア物質が具備すべき性能には, ポンプ圧送性と鉱石保持性の他にも軽量性, 環境親和性, 経済性などが含まれる。そこで, これらの諸特性を考慮して選択した候補となる粒状物質と増粘剤の組み合わせについて, 最も重要な鉱石保持性能のモデル化を目指した。

【テーマ 3】移送メカニズムの解明と数値シミュレータの開発

鉱石を含むキャリア物質のポンプ圧送の現象は固体・液体の混相流(固液二相流)である。そこで, 粒子間相互作用を評価しつつ個々の鉱石や粒状物質の運動の追跡が可能な個別要素法(DEM: Discrete Element Method)型の粒子法(Particle-based method)に基づく数値解析モデルを開発し, 数値実験によってキャリア物質が鉱石を移送するメカニズムを解明すると共に, 揚鉱システムにおける管路設計と材料配合に用いる数値シミュレータの開発を目指した。

### 3. 研究の方法

テーマ1とテーマ2は実験作業が中心で、東京海洋大学の地盤工学分野の教員(谷和夫)が(株)不動テトラの地盤工学分野および機械工学分野の研究者(鈴木亮彦, 田中肇一, 菅章悟, 古庄哲司)と協力して担当した。一方、テーマ3は計算作業が中心で、東京海洋大学の水工学分野の教員(岡安章夫, 池谷毅, 稲津大祐)が担当した。

#### (1) 実験による検討

キャリア物質が鉱石を保持するメカニズムに注目して、管路内のキャリア物質中を移動する球体を観察する実験として揚鉱実験と沈降実験・引上げ実験を主に実施した。

鉱石を模した鉱石モデルには、密度( $\rho_{OM} = 2.2, 3.9, 6.1 \text{ Mg/m}^3$ )と直径( $d_{OM} = 12.7, 15.9, 19.1, 25.0 \text{ mm}$ )が異なる球体を用いた。キャリア物質(粒状体を含む粘性流動体)には、水道水、増粘剤(CMC)、粒状体(珪砂6号とベントナイト)を配合して用いた。

キャリア物質中の鉱石モデルの移動(沈降)を計測するために、計画当初はガラス粒状体模型とレーザー光シートを利用した液浸法(透明な個体を屈折率の等しい液中に浸して固体内部を観察するLAT法: Laser-aided tomography method)による可視化実験の技術の適用を考えていた(小長井・田村, 1988)。しかし、キャリア物質や鉱石モデルの選定が制限されることから、可視化しなくても複数の固体位置を非接触で同定することが可能な計測手法として、RFID(Radio Frequency Identifier)を利用した計測システムを新たに開発した(折田ほか, 2019)。

図2に揚鉱実験装置の概要を示す(鈴木ほか, 2018)。圧送ポンプ、鉱石モデルの取り込み装置、揚鉱管(内径50mm, 長さ1000mm)、鉱石モデルの分離装置などから構成される。揚鉱管の観察区間は860mmで、RFIDのアンテナを離間距離400mmで2断面に設置して鉱石モデルの揚鉱速さを計測した。

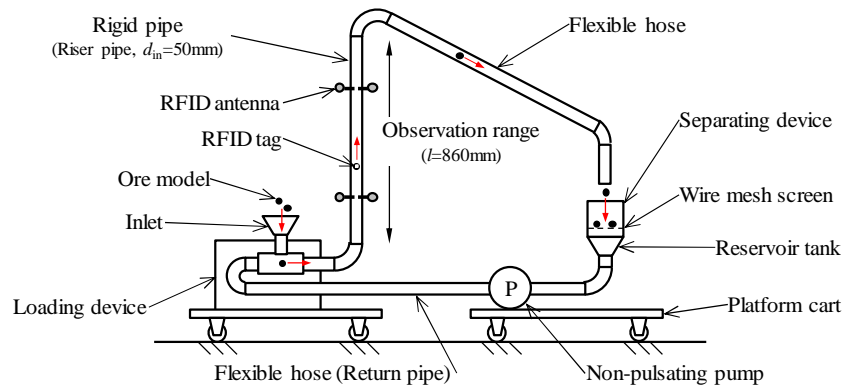


図2：揚鉱実験装置の概要

図3に沈降実験・引上げ実験装置の概要を示す。円筒容器(内径100mm, 高さ3700mm)、滑車、モーターなどから構成される。RFIDのアンテナを4ないし8断面に設置して鉱石モデルの移動を計測した。

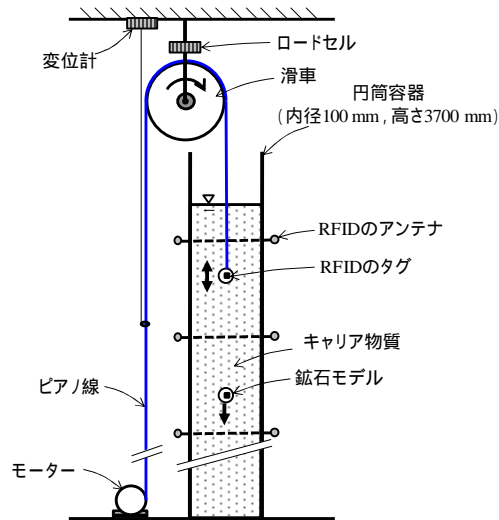


図3：沈降実験・引上げ実験装置の概要

(2) 計算による検討

DEM 型の粒子法に基づくモデル化の手法には 2 つの候補がある。1 つは、鉱石とキャリア物質の粒状物質を共に粒度が異なる固体要素で表現し、間隙水(海水)をニュートン流体要素とするケースである。もう 1 つは、粗粒の鉱石のみを固体要素に、キャリア物質の粒状物質は細粒なので間隙水(海水)と合わせてビンガム流体要素とするケースである。さらに、鉱石の形状と粒径についても 2 種類のモデル化が考えられる。マンガン団塊については、形状がほぼ球形で粒径幅も狭いので、単一粒径の球要素という単純なモデルで表現が可能である。しかし、海底熱水鉱床やマンガクラストについては、掘削された鉱石の形状は多様かつ角形で粒径幅も広いので、固体要素の形状と粒度について幅広い条件設定が必要である。

この研究では後者の数値解析モデルの開発を目指して種々検討を行った。鉱石モデルとする DEM 要素の移動計算においては、キャリア物質としての流体粒子要素の安定計算の実現が欠かせない。一般に粒子法を用いる場合、計算内における見かけの圧力変動が非常に大きくなる傾向にあり、まず圧力計算の安定化のために、計算の様々なステージで高精度スキームを取り入れた液相計算のプログラムを作成した。また、延長の大きなライザー管内において、始動・停止時の非定常流況下のみならず定常流動条件でも発生しうる圧力振動によりキャリア流体の流動振動が発生することを想定して、模擬的に水槽内の流体振動計算を実施した。このとき、ライザー管壁面の境界条件の取り方、特にライザー管壁面位置の設定手法により振動数や振動形態がどのように変化するかについて詳細な検討を行った。

4. 研究成果

(1) 実験による検討

揚鉱実験により得られた鉱石モデル(直径  $d_{OM} = 25 \text{ mm}$ ) の揚鉱速度  $v_{OM}$  とキャリア物質の流速  $v_{CM}$  の関係を図 4 に示す。キャリア物質が CMC 水溶液の場合は透明なので鉱石モデルの移動を目視で観察できるが、珪砂を混入した場合には不透明なので RFID システムを利用して揚鉱速度を計測した。珪砂を混入することで揚鉱速度は向上し、鉱石モデルの密度  $\rho_{OM} = 2.7 \text{ Mg/m}^3$  と重く礫に相当する粗粒 ( $d_{OM} = 25 \text{ mm}$ ) のケースでもキャリア物質の流速が  $0.03 \text{ m/s}$  以上であれば揚鉱が可能なが分かった。

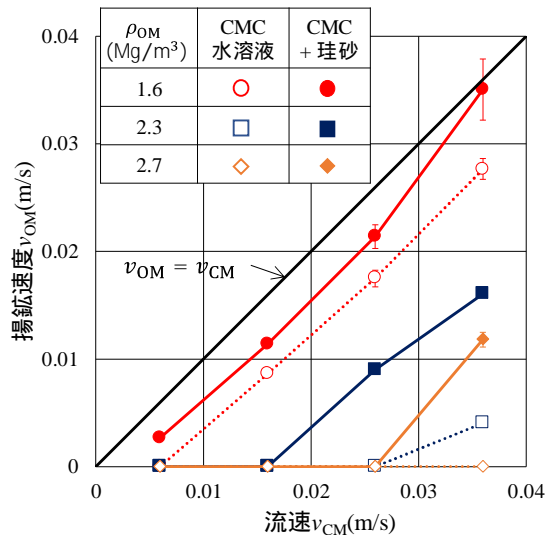


図 4 : 沈降実験の結果 (揚鉱速度とキャリア物質の流速の関係)

鉱石モデルの沈降実験により得られた鉱石モデルの終端速度  $v_{OM}$  と直径  $d_{OM}$  の関係を図 5 に示す。キャリア物質(粒状体を含む粘性流動体)の配合は、流体部分の増粘剤水比  $T/W (= C_t/C_w, C_t$  と  $C_w$  は増粘剤と水の質量パーセント濃度)と  $C_p$  (粒状体の質量パーセント濃度)を変えたケースで行った。鉱石モデルの密度  $\rho_{OM}$  と直径  $d_{OM}$  と共に終端速度  $v_{OM}$  は速くなること、増粘剤水比  $T/W$  ( $0.5 \sim 1.0\%$ ) によって終端速度  $v_{OM}$  は  $1/100$  程度に、粒状体の配合量  $C_p$  ( $0 \sim 30\%$ ) によっても終端速度  $v_{OM}$  は  $1/10$  程度に低下することが分かった。これらの実験結果を利用して、キャリア物質をビンガム流体と仮定してレオロジー特性に基づく相対的な沈降速度の推定方法を提案した(折田ほか, 2020)。

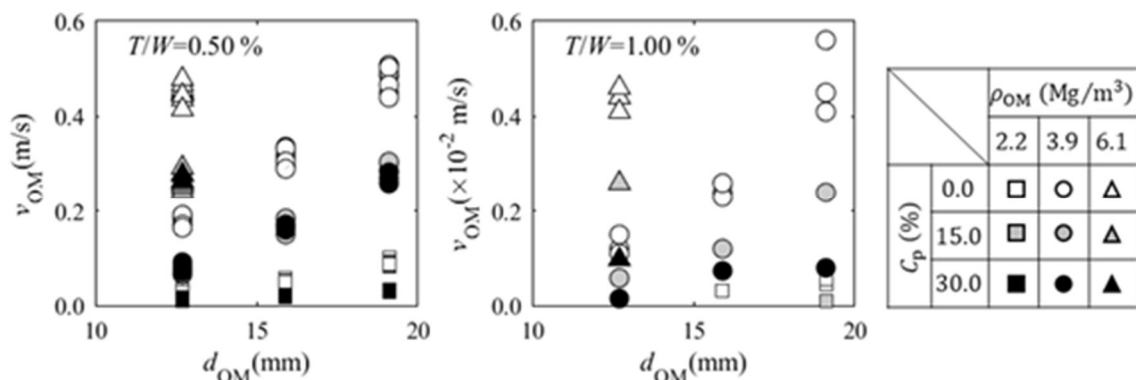


図 5：沈降実験の結果（揚鉱速度とキャリア物質の流速の関係）

(2) 計算による検討

キャリア物質中の鉱石モデルの挙動をシミュレーションする数値解析モデルとして、高精度化した Moving Particle Simulation (MPS) のほか、計算効率を向上させるため Explicit-Moving Particle Simulation (E-MPS) を数値解析手法として選択し検討を行った。長い延長のライザー管のモデル化、および鉱石モデルのように巨大な粒子とキャリア物質中の粒状物質のように細かい粒子を適切にモデル化することが可能と判断したからである。

この手法の適用において計算不安定となり易い静的な条件下(管状の容器内の静水)でも圧力分布が安定して計算が実行できるように様々なスキームを取り込んでモデルを改良した。液相の運動や圧力変動や流体振動についても十分な精度を持って計算を行うことが可能となったことを確認したが、鉛直管中に置かれた球体周辺の流れ場に係る数値シミュレーションができるプログラムの整備については未達であり、揚鉱に関する数値実験を行う段階には進んでいない。

参考文献

- 1) 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(海洋開発), Vol.75, No.2, ppI\_941-I\_946, 2019.
- 2) 折田清隆, 谷 和夫, 鈴木亮彦, 菅 章悟, 田中肇一: 揚鉱に用いるキャリア物質(粒状体を含む粘性流動体)が球に及ぼす力の沈降実験による検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.76, No.2, ppI\_\*\*-I\_\*\*, 2020.
- 3) 小長井一男, 田村重四郎: 粒状体構造模型の動的挙動の可視化, 生産研究, 40-11, pp.580-583, 1988.
- 4) 鈴木亮彦, 田中肇一, 谷 和夫: キャリア物質循環方式による揚鉱の模型実験装置の開発, 第 53 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp.93-94, 2018.
- 5) 谷 和夫: 海底鉱物資源の揚鉱技術に関する文献調査と模擬実験装置の開発, 第 60 回地盤工学シンポジウム, 地盤工学会, pp.285-288, 2016.
- 6) 谷 和夫, 鈴木亮彦, 大林 淳: 海底有価物質の揚鉱方法及び揚鉱装置, 特願 2017-64701, 特開 2018-168537, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 折田清隆, 谷 和夫, 鈴木亮彦, 菅 章悟, 田中肇一	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 I_941 ~ I_946
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2208/jscejoe.75.I_941">https://doi.org/10.2208/jscejoe.75.I_941</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 折田清隆, 谷 和夫, 鈴木亮彦, 菅 章悟, 田中肇一	4. 巻 76(2)
2. 論文標題 揚鉱に用いるキャリア物質 (粒状体を含む粘性流動体) が球に及ぼす力の沈降実験による検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 折田清隆, 谷 和夫, 鈴木亮彦, 田中肇一, 菅 章悟
2. 発表標題 揚鉱・沈降実験における鉱石モデルの管内移動の計測に用いるRFIDシステムの検討
3. 学会等名 第15回地盤工学会関東支部発表会, 地盤工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木亮彦, 田中肇一, 谷 和夫
2. 発表標題 キャリア物質循環方式による揚鉱の模型実験装置の開発
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会, 地盤工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tani, K., Suzuki, A., Tanaka, K. and Suga, S.
2. 発表標題 Development of experimental apparatus for model tests of lifting marine mineral resources by carrier materials
3. 学会等名 Proc. 10th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS10) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 折田清隆, 谷 和夫, 鈴木亮彦, 菅 章悟, 田中肇一
2. 発表標題 揚鉱実験における鉱石モデルの移動速度を計測するRFIDシステムの有効性の検討
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会, 地盤工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 折田清隆, 谷 和夫, 鈴木亮彦, 菅 章悟, 田中肇一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第44回海洋開発シンポジウム, 土木学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 折田清隆, 谷 和夫, 鈴木亮彦, 田中肇一, 菅 章悟
2. 発表標題 RFIDシステムを用いた揚鉱・沈降実験における鉱石モデルの管内移動の計測方法の開発
3. 学会等名 第46回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富田晃弘, 谷 和夫, 鈴木亮彦, 田中肇一
2. 発表標題 海底鉱石資源の揚鉱システムに用いる粘性流動物質の粘性特性の検討
3. 学会等名 第14回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Orita, K., Tani, K., Suzuki, A., Suga, S. and Tanaka, K.
2. 発表標題 Development of RFID system for monitoring ore model to study the feasibility of carrier materials in lifting experiment
3. 学会等名 Proc. 5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics & International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future (YSRM 2019 & REIF 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 折田清隆, 谷 和夫, 鈴木亮彦, 菅 章悟, 田中肇一
2. 発表標題 揚鉱に用いるキャリア物質（粒状体を含む粘性流動体）が球に及ぼす力の沈降実験による検討
3. 学会等名 第45回海洋開発シンポジウム, 土木学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 折田清隆, 谷 和夫, 古庄哲司, 鈴木亮彦, 田中肇一
2. 発表標題 揚鉱に用いるキャリア物質（粒状体を含む粘性流動体）の材料分離抵抗性についてレオロジー定数を用いた評価方法の検討
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会, 地盤工学会
4. 発表年 2020年



〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 海底有価物質の揚鉦方法及び揚鉦装置	発明者 谷 和夫, 鈴木亮彦, 大林 淳	権利者 東京海洋大学, (株)不動テトラ
産業財産権の種類、番号 特許、特開2018-168537	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 キャリア物質、これを用いる海底有価物質の揚鉦方法及び揚鉦装置	発明者 谷 和夫, 鈴木亮彦, 大林 淳, 田中肇一	権利者 東京海洋大学, (株)不動テトラ
産業財産権の種類、番号 特許、特許第6570000号	取得年 2019年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡安 章夫 (Okayasu Akio) (20213994)	東京海洋大学・学術研究院・教授  (12614)	
研究分担者	池谷 毅 (Ikeya Tsuyoshi) (20416746)	東京海洋大学・学術研究院・教授  (12614)	
研究分担者	稲津 大祐 (Inazu Daisuke) (30462170)	東京海洋大学・学術研究院・准教授  (12614)	