

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05351

研究課題名（和文）環境低負荷型 海洋底鉱物資源採掘システムの開発

研究課題名（英文）Development of Mining System for Deep-sea Mineral Resources with Low Environmental Impact

研究代表者

笹岡 孝司（SASAOKA, TAKASHI）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：20444862

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年、エネルギー・鉱物資源の需要の高まりから、海洋底に賦存するメタンハイドレートやレアアース等の資源が注目されている。しかしながら、海洋底での資源開発は様々な困難を伴い、一旦事故が起これば環境へ甚大な被害を与える可能性がある。そこで本研究では、海洋底資源開発に伴う環境擾乱を抑制する工法として、資源開発時に海底面を海底シーリング材で被覆することで、海底面に堆積している有害元素の拡散を抑制しながら採掘を行う海洋底鉱物資源採掘システムを提案するとともに、必要な被覆材の開発や本採掘システムの施工指針について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋底鉱物資源開発において材料および採掘手法の両視点から環境負荷の低減に着目した研究は乏しく、特に産業副産物の適用については皆無である。材料開発～実証実験の検討過程で得られる水圧による材料特性が変化するメカニズムの解明や被覆技術の研究開発成果は、産業副産物を有効利用した環境低負荷型の海洋底鉱物資源採掘を可能にするだけでなく、海洋底構造物や月面都市の建設技術やCO2の海底貯留構想における被覆材などへ適用できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In recent years, due to the increasing demand for energy and mineral resources, resources such as methane hydrate and rare-earth endowed on the sea floor have been attracting attention. However, resource development on the sea floor entails various difficulties, and once an accident occurs, it can cause enormous damage to the environment. Therefore, in this research, as a measure to suppress the environmental disturbance caused by the development of seafloor resources, the seafloor is covered with a seafloor sealant during resource development, and mining is performed while suppressing the diffusion of harmful elements deposited on the seafloor. In addition to proposing a seafloor mineral resource mining system, the development of necessary covering materials and the construction guidelines for this mining system are discussed.

研究分野：資源開発

キーワード：海洋底鉱物資源 環境低負荷型採掘システム 海洋底被覆材 吸引採掘 環境影響評価

1. 研究開始当初の背景

日本近海に多く賦存するメタンハイドレートやレアアースなどの確保を目的として、海面数百m以深の海洋底鉱物資源の採掘技術の開発が検討されている。資源・エネルギーの確保は緊急の課題であり、未利用・未発見の資源が豊富に存在する海洋底の資源を開発・利用することは、人類の持続的な発展に必要不可欠であり、これら海洋底資源の調査・開発は国家戦略としても極めて重要である。しかしながら、海洋底鉱物資源の開発が周辺生態系へ及ぼす影響の低減策や開発後の海底環境の修復方法は未だ具体的に検討されていない。さらに、低温高圧に加え熱水鉱床付近では有害堆積物が賦存する海洋底での鉱物資源回収には高い技術が求められ、一旦事故が起こればその制御・対策には困難を伴い、環境へ甚大な被害も懸念される。

2. 研究の目的

本研究では、海洋底資源開発に伴う環境擾乱を抑制する工法として、資源開発時に海底面を海底シーリング材で被覆することで、海底面に堆積している有害元素の拡散を抑制しながら採掘を行う海洋底鉱物資源採掘システム(図1参照)を提案するとともに、必要な被覆材の開発や本採掘システムの施工指針について検討した。

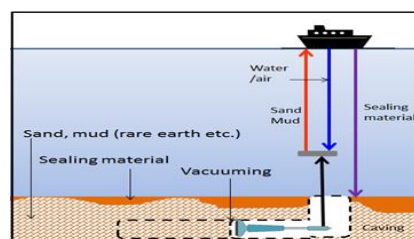


図1 採掘システム概念図

3. 研究の方法

①セメント材料の海底シーリング材への適用性評価に関する研究

現在海底シーリング材として適用が期待されている3種類の試料(OPC系, TB系, Slug系)を用いて室内試験および現場試験を実施し、被覆性能および周辺環境に及ぼす影響の観点から海洋底資源開発における各試料の適用性評価を行った。

<室内実験>

シーリング材として適用が期待されている3種類の試料を用い(表1参照)、シーリング材の被覆性を示す指標となるレオロジー特性に関して評価を行った。試料Cのビスコトップ系試料については、加圧条件下での塑性粘度を比較するために室内試験のみ実施しその性能評価を行った。また、海洋底資源開発では大きな水圧が作用するため、本試験では加圧条件下で試料にせん断速度を加えせん断応力および塑性粘度を測定した。表2に各加圧条件下における塑性粘度を示す。

表1 シーリング材試料の配合

Portland cement Polycarboxylic ether superplasticizer, Hydroxyethyl cellulose	Portland cement, Gypsum, Calcium aluminate cement Polycarboxylic ether superplasticizer, Hydroxyethyl cellulose, Retarder, Accelerator	Portland cement polycarboxylic ether superplasticizer, Anion-cationic surfactant
--	--	---

表2 各試料の加圧条件下における塑性粘度の変化
(括弧内は同条件下での各試料の浮遊物質質量を示す(mg/L))

Stress condition (MPa)	Plastic viscosity A (Pa·sec)	Plastic viscosity B (Pa·sec)	Plastic viscosity C (Pa·sec)
0.1	6.12 (16.3)	7.09 (19.1)	8.95 (6.50)
0.5	5.84 (18.2)	4.87 (69.2)	4.70 (41.4)
2.0	5.49 (17.0)	4.52 (56.5)	3.56 (82.9)
6.0	5.62 (17.6)	4.41 (67.7)	3.71 (98.2)
10	5.60 (17.7)	4.09 (64.2)	3.22 (81.7)

<現場試験>

各試料の海底熱水環境下における挙動を把握することを目的として、鹿児島湾の水深約200mの海底において海底施工試験を行い、海底熱水環境下における海底の被覆挙動および水中拡散性を評価した。図2に試料Aの施工状況を示す。



図2 試料Aの施工状況

②模擬土壤の作製および吸引採掘試験

海洋底資源の開発において、海底地形の変形や懸濁物質が発生する可能性があるため、採掘時における土壤の挙動を把握することが必要となっている。それに対し、既往の研究において、無機系シーリング材を用いて予め鉋区を被覆することにより、開発に伴う環境への影響を抑制する工法が提案されている。そこで本研究では、レアアース泥採掘法として吸引採掘に着目し、吸引採掘時の土壤の挙動を明らかにするとともに、シーリング材で被覆した場合の環境負荷低減効果に関して室内実験を行い種々検討した。

<模擬土壤の作製>

レアアース泥は土壤分類において粘土と定義される。しかし、その液性限界や含水比は様々であるため、採掘時の挙動に差異が生じることが予想される。そこで、特に液性限界について着目し、液性限界の異なる試料を作製した。

<吸引採掘試験>

作製した模擬土壤の含水比を変化させた試料を用意し、各試料に対して吸引試験を実施し吸引量および沈下挙動の影響範囲を測定した。図3に吸引試験の概念図を示す。吸引機構として、最大吸引圧 21.4 kPa の真空ポンプを用い、吸引圧は 4.0 kPa に調整し、各土壤を吸引した。また、吸引径は 10 mm、吸引時間は 8 s とし、土壤表面から 50 mm 下部まで吸引を行った。吸引後、模擬土壤の表面を観察し、地表面の沈下など吸引の影響が及んだ領域を影響範囲として測定した。また本試験において、土壤の液性限界 (W_L) に対する含水比 (W_C) を定量的に評価するため、含水比率 (W_C/W_L) を定義した。

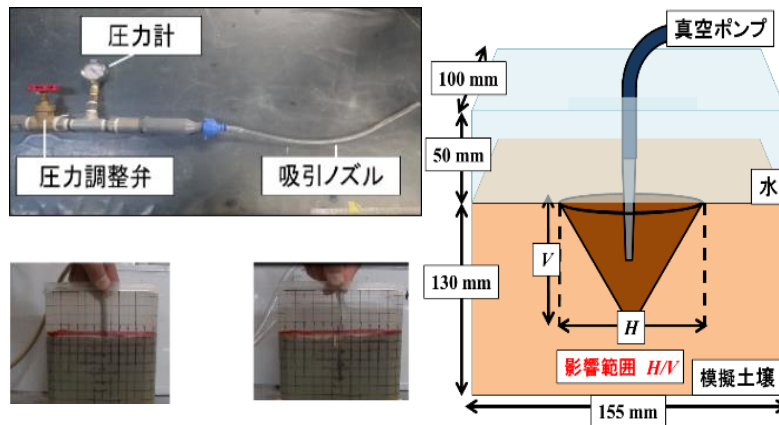
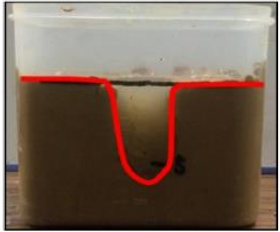
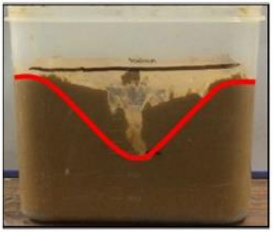
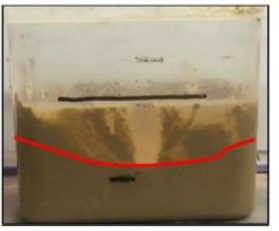


図3 吸引試験装置

表3に示すように、局所的な沈下挙動を示したもの、すり鉢状の沈下挙動を示したもの、円弧上の沈下挙動を示したものとして3つに大別し分類できた。さらに含水比率が1.3以下では局所的な沈下挙動を示し、含水比率が1.3~1.6の間ではすり鉢状の沈下挙動、含水比率が1.6を超える場合では円弧上の沈下挙動を示した。

表3 含水比率による模擬土壤の吸引挙動の大別

W_C/W_L	<1.3 (局所的)	1.3 ~ 1.6 (すり鉢状)	>1.6 (円弧上)
採掘挙動			
採掘効率	低	中	大

<シーリング材施工時における吸引採掘試験>

シーリング材施工時における土壤の採掘挙動の把握のため、模擬土壤表面にシーリング材を厚さ 10mm で施工し、前章と同条件下において吸引試験を実施した。その結果、図4に示すようにシーリング材の有無に関わらず土壤の含水比率が増加することにより吸引量が増加するが、シーリング材を土壤表面に施工することで土壤の吸引量が減少することが明らかとなった。

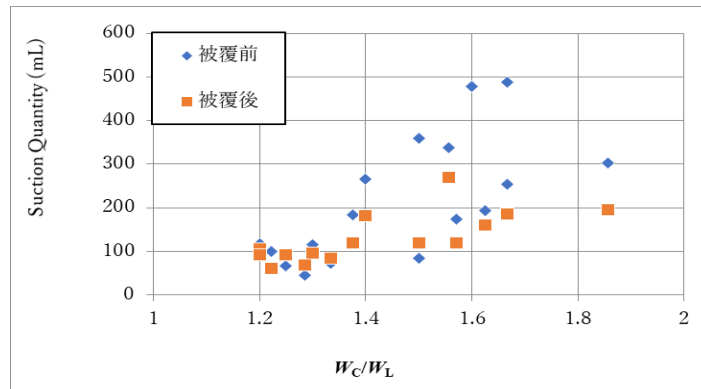


図4 シーリング材施工の有無による吸引量の比較

③界面活性剤による海底堆積物の流動特性の改質および採掘挙動の変化に関する検討

海底面直下に賦存する場所では局所的なものより円弧状の採掘挙動の方が採掘効率は大きくなり、比較的深部に賦存する場所では円弧状よりすり鉢状の採掘挙動の方が採掘効率は大きくなると考えられる。そこで、レアアース堆積物の採掘に適用性のある吸引採掘に着目し、堆積物の採掘挙動を制御することを目的として、界面活性剤による堆積物の流動特性の改質が採掘挙動に与える影響について検討を行った。

<模擬堆積物の作製及び最適な含水率に関する検討>

堆積物の採掘挙動は堆積物の含水比を液性限界で除した値である含水比率 (WC/WL) で規定できることが明らかとなっている。そこで液性限界および含水比を調整することで含水比率の異なる模擬堆積物を作製した。模擬堆積物に8種類の界面活性剤を添加した試料においてコンシステンシー試験および粘性試験を実施し、各種界面活性剤が堆積物の流動特性に与える影響を評価した。また、界面活性剤の添加率を0-1.0%まで変化させた。結果の一例として図5に添加率と含水比率の関係を示す。アニオン-カチオン系界面活性剤およびカチオン系界面活性剤を添加した場合、含水比率は増加し粘性は低下したため、流動性は増加したと考えられる。一方、吸水性ポリマーおよびヒドロキシエチルセルロースを添加することで、含水比率は減少し粘性は増加したため、流動性は比較的減少したと考えられる。そこで次の吸引試験では、これら4種の界面活性剤を対象とした。

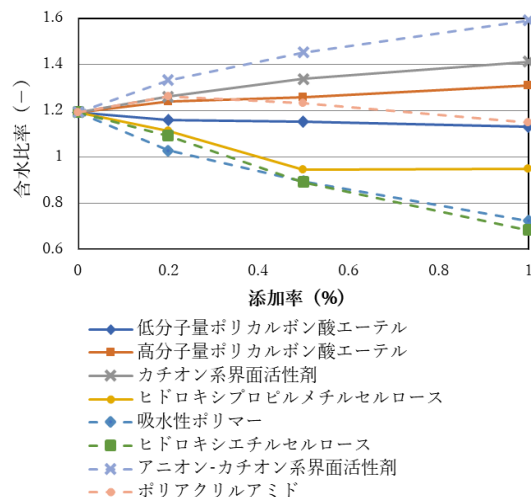


図5 各種界面活性剤の添加率と含水比率の関係

<改質した堆積物における吸引試験>

前節で選定した界面活性剤を添加した各模擬堆積物において吸引試験を実施し、吸引量および沈下挙動の影響範囲、懸濁物質量を測定した。各界面活性剤を用いることで模擬堆積物の流動特性を改質し、吸水性ポリマーおよびヒドロキシエチルセルロースを用いた場合は円弧状からすり鉢状へ(図6参照)、アニオン-カチオン系界面活性剤およびカチオン系界面活性剤を用いた場合は局所的からすり鉢状へ堆積物の採掘挙動が変化することが明らかとなった。また改質を行うことで吸引による堆積物の擾乱を抑制し、懸濁物質量を低減できることが明らかとなった。

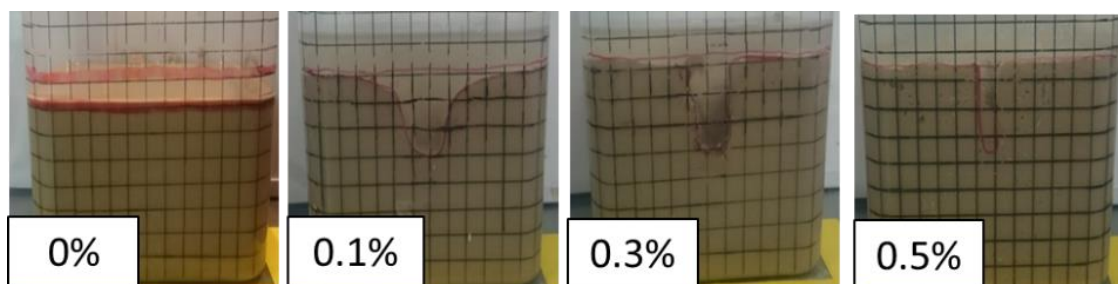


図6 ヒドロキシエチルセルロースの各添加率における吸引後の採掘挙動

＜シーリング材の適用評価＞

シーリング材の適用性について検討するため、吸引試験を実施した。その結果、シーリング材を施工することにより吸引採掘による模擬堆積物の擾乱を抑制し、懸濁物質量を低減できることが確認できた（図7および図8参照）。また、吸引時にシーリング材が沈下部に流入することによって模擬堆積物の変形を抑制し、模擬堆積物の吸引挙動に影響を及ぼすことも明らかとなった。

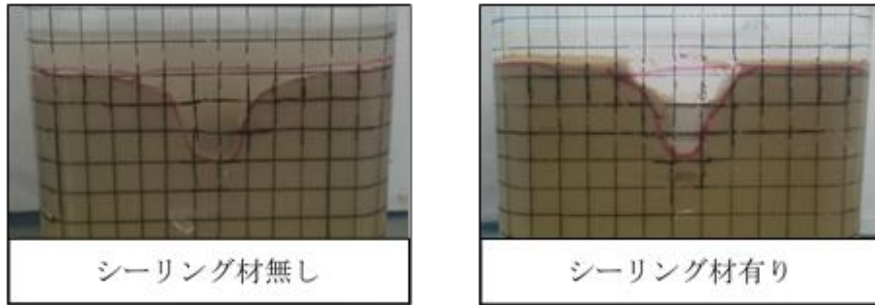


図7 シーリング材の有無による吸引挙動の差異
（界面活性剤：ヒドロキシエチルセルロース）

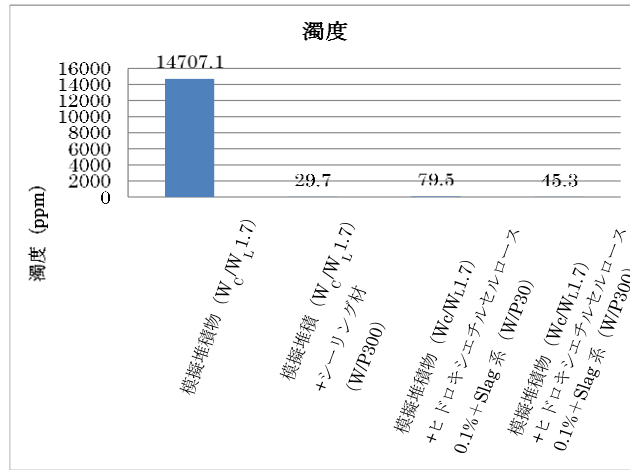


図8 模擬堆積物（含水比率 1.7）および各種界面活性剤の添加により改質した堆積物においてシーリング材を施工した場合の懸濁物質量

4. 研究成果

①セメント材料の海底シーリング材への適用性評価に関する研究

試料 A は海底条件下においても良好な被覆性能を発揮するとともに採掘に伴う地形追従性も優れていること、さらに浮遊物質の発生による周辺環境への負荷が少ない試料であることから、採掘に伴う環境擾乱を抑制可能な海底面被覆材として有望であることがわかった。

②模擬土壌の作製および吸引採掘試験

レアアース泥採掘時の挙動は土壌の含水比率によって規定できることが示唆された。土壌の含水比率の増加に伴い吸引量は増大し、土壌の沈下は局所的なものから、すり鉢状、円弧状の挙動へと変化することが明らかとなった。またシーリング材を施工した場合、土壌との間に生じる粘着力や被覆による自由面の減少によって、吸引量が減少するものの、採掘の影響範囲を低減することが出来るため、環境への影響を抑制できることが明らかとなった。

③界面活性剤による海底堆積物の流動特性の改質および採掘挙動の変化に関する検討

界面活性剤を用いることで模擬堆積物の流動特性が改質され、採掘挙動が変化することが明らかとなった。また、改質を行うことで吸引による堆積物の擾乱を抑制し、懸濁物質量を低減できることが明らかとなった。さらに、シーリング材を施工することにより吸引採掘による模擬堆積物の擾乱を抑制し、懸濁物質量を低減できることが確認できた。

④総括

本研究では、一連の室内および現場実験結果から、海洋底鉱物資源を安全かつ最大限回収でき、資源開発に伴う環境負荷を抑制できる方法として、被覆材を用いた環境低負荷型の海洋底鉱物資源採掘システムを提案するとともにその施工指針について示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takashi SASAOKA, Hiroto HASHIKAWA, Akihiro HAMANAKA, Hideki SHIMADA, Keisuke TAKAHASHI	4. 巻 6
2. 論文標題 Study on Deformation Behavior of Sediments and Applicability of Sealants in Seabed Mining	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal	6. 最初と最後の頁 170-175
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takashi SASAOKA, Akihiro HAMANAKA, Takahiro FUNATSU, Hideki SHIMADA, Keisuke TAKAHASHI	4. 巻 45
2. 論文標題 Study on Addition of Surfactants Agents to Improve the Behavior of High Water Content Sediment for Rare Earth Mining in Deep Sea	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Inzynieria Mineralna Journal of the Polish Mineral Engineering Society	6. 最初と最後の頁 183-188
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi SASAOKA, Akihiro HAMANAKA, Takahiro FUNATSU, Hideki SHIMADA, Keisuke TAKAHASHI	4. 巻 Vol.1
2. 論文標題 Study on Addition of Surfactants Agents to Improve the Behavior of High Water Content Sediment for Rare Earth Mining in Deep Sea	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 23rd International Conference on Environment and Mineral Processing and Workshop Waste Secondary Raw Materials	6. 最初と最後の頁 241-246
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takashi SASAOKA, Akihiro HAMANAKA, Takahiro FUNATSU, Hideki SHIMADA, Keisuke TAKAHASHI
2. 発表標題 Study on Addition of Surfactants Agents to Improve the Behavior of High Water Content Sediment for Rare Earth Mining in Deep Sea
3. 学会等名 International Conference on Environment and Mineral Processing and Workshop Waste - Secondary Raw Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshihiro TAGASHIRA, Takashi SASAOKA, Akihiro HAMANAKA, Hideki SHIMADA, Keisuke TAKAHASHI
2. 発表標題 Study of Applicability of Sealing Material with Low Specific Gravity for Suction Mining of Rare-earth Rich Mud
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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	島田 英樹 (SHIMADA HIDEKI) (70253490)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------