

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月24日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360373

研究課題名（和文） 海底鉱物資源開発のための鉱物処理システムの開発

研究課題名（英文） Development of Seafloor Mineral Processing System for Development of Seafloor Mineral Resources

研究代表者

中島 康晴（NAKAJIMA Yasuharu）

独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開発系・主任研究員

研究者番号：30344237

研究成果の概要（和文）：海底熱水鉱床の開発を促進するため、採掘した鉱石を海底において粉碎し、有用鉱物を選別する海底鉱物処理（海底選鉱）の概念を考案した。海底選鉱の要素技術である粉碎及び浮選について、海底選鉱への適用可能性を明らかにした。本研究の成果を元に海底選鉱を実用化できれば、採掘した鉱石の全量を揚鉱するという従来の海底熱水鉱床開発方式と比較して、開発コストの低減が可能となると期待される。

研究成果の概要（英文）：The authors proposed the concept of Seafloor Mineral Processing, where ores excavated on seafloor are in situ ground to separate useful minerals, to promote the development of Seafloor Massive Sulfides (SMSs). The possibility of candidates for grinding and flotation as elemental technologies of Seafloor Mineral Processing was clarified. If Seafloor Mineral Processing is realized based on the results of this study, the mining cost of SMSs could be saved in comparison with the conventional mining scheme that all excavated ores are lifted up.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2011年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2012年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、船舶海洋工学

キーワード：海底選鉱・海底熱水鉱床・資源開発工学・ボールミル・離散要素法・浮選

1. 研究開始当初の背景

(1) 我が国の排他的経済水域の海底には、未開発のエネルギー・鉱物資源が賦存することが知られている。これらのうち、海底から噴出する熱水から析出した金属硫化物が海底に堆積して形成された海底熱水鉱床は、海外の海底熱水鉱床と比較して銅、亜鉛、鉛などの品位が高く、将来の金属鉱物資源として期待されている。

(2) これまでに提案されている採鉱計画では、海底で採掘した鉱石の全量を洋上まで揚鉱することが想定されている。しかし、一般に、鉱石中の有用金属の含有率は数%～十数%程度に過ぎず、全量揚鉱では不要な脈石をも揚鉱してしまうため、資源としての経済性が低下する。そこで、著者らは、採掘した鉱石を海底において粉碎し、有用鉱物のみを分離



図3 粉碎実験装置の外観

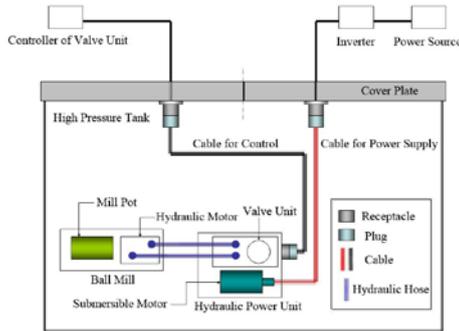


図4 実験装置全体のシステム系統

② 離散要素法による数値解析

離散要素法 (DEM) とは、各要素について運動方程式を解くことにより、その運動を追跡する手法である。本研究では、ミルポット内の鉄球の運動を解析し、その運動エネルギーの損失を計算することにより、鉄球による粉碎効率を評価することとした。

鉄球に作用する力としては、重力、浮力、流体の摩擦力、ミルポット壁や他の鉄球との衝突や摩擦により受ける力 (接触力) を考慮した。接触力を表現するために、バネとダンパを組み合わせたフォークト・モデルを採用した。図5に鉄球間衝突のフォークト・モデルを示す。図中の K_n はバネの弾性抵抗を、 C はダンパの粘性抵抗をそれぞれ示す。また、添え字の n 及び t は法線方向及び接線方向をそれぞれ示す。

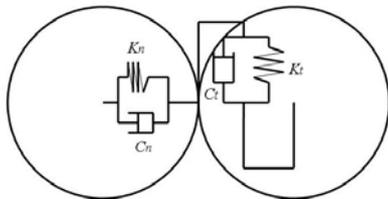


図5 鉄球間衝突のフォークト・モデル

実験と同様に、圧力については大気圧と高圧 (10MPa)、ミルポット内の空気層の有無については有 (湿式粉碎) と無 (水没粉碎) の

条件の組み合わせに対して解析を実施し、エネルギー散逸の和を算出する事により、これらの条件が粉碎性能に及ぼす影響を検討した。

(2) 浮選技術の研究

カラム型浮選機を模擬した小型実験装置を製作し、大気圧及び高圧水中条件において浮選実験を実施し、原鉱から精鉱及び尾鉱を分離することを行った。海底熱水鉱床から採取された鉱石を実験用として入手できなかったため、模擬鉱石として東北地方から算出された黒鉱を使用した。試料を粉碎し、篩い分けしたものを原鉱として、所定の試薬 (起泡剤及び捕収剤) を添加した水と混合することによりパルプを調製した。海水中の塩分による影響を検討するため、純水をベースとしたパルプと人工海水をベースとしたパルプを調製し、その結果を比較した。試薬の添加率等は、事前に大気圧条件下で実施した浮選実験の結果に基づき決定した。大気圧条件下での浮選実験の様子を図6に示す。



図6 大気圧条件下での浮選実験の様子

高圧条件下の実験では、図7に示すように、高圧水中条件用の実験装置を大型高圧実験施設 (高圧タンク) 内に投入し、実験装置全体を加圧した状態で実施した。気泡発生用の高圧空気はタンク外のボンベから供給した。

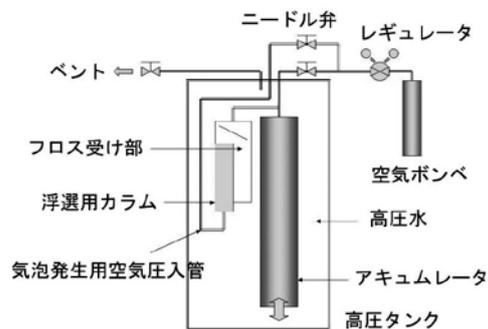


図7 浮選実験装置の概念図

実験で得られた精鉱及び尾鉱並びに原鉱を蛍光 X 線法 (XRF) により分析し、主要な元素の含有率を測定した。

(3) 社会的受容性に関する調査

技術研究と並行して、海底鉱物処理の社会的受容性に関する調査を実施した。調査では、文献等の資料を調査するとともに、関連分野の有識者へのヒアリングを行った。

4. 研究成果

(1) 粉砕技術の研究

① 高压条件下におけるボールミル粉砕の実験的研究

大気圧条件及び高压条件（10MPa、以下同様）における粉砕実験で得られた珪砂微粒子の粒径分布を図8に、体積平均粒径を図9にそれぞれ示す。いずれの条件においても、粒径分布については大きな差異はなかった。

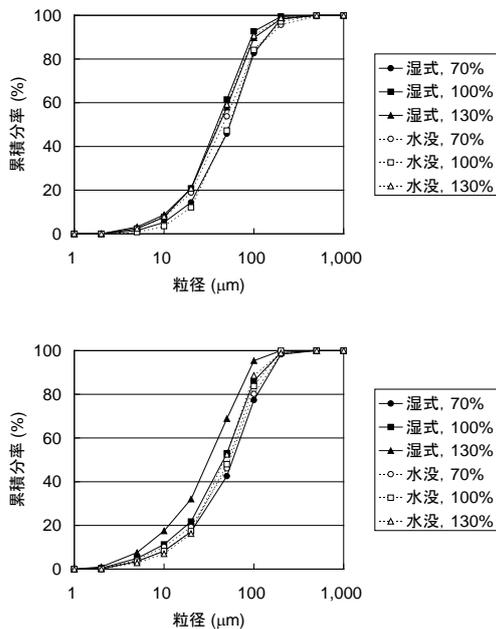


図8 粉砕された珪砂の粒径分布
(上：大気圧条件，下：高压条件)
凡例の数字は回転数比 (N/N_c) を示す

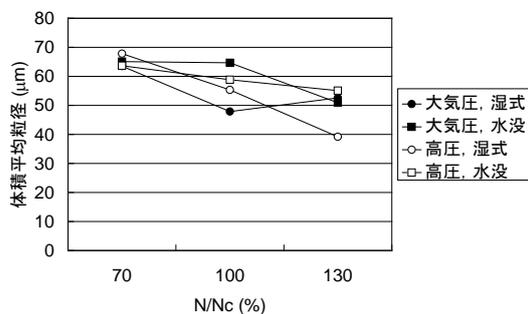


図9 粉砕された珪砂の体積平均粒径

体積平均粒径については、大気圧条件の場合、湿式粉砕では回転数比が70~100%の範囲において体積平均粒径が最小となったのに対して、水没粉砕では回転数が上昇するにつれて体積平均粒径が小さくなる傾向が示された。高压条件の場合、湿式粉砕、水没粉砕ともに回転数が上昇するにつれて体積平均粒径が小さくなる傾向を示した。このため、湿式粉砕同士の比較では、高压条件での回転数比 (N/N_c) 130%において、大気圧条件を上回る粉砕性能を得ることができた。一方、水没粉砕同士の比較では、圧力の変化に対する顕著な粉砕性能の違いは示されなかった。

このように、大気圧条件での湿式粉砕と比較して、ミルポット内の高压化や水没に起因する顕著な粉砕性能の低下は示されなかった。以上の結果から、高压水中において水没粉砕を採用した場合も、大気圧での湿式粉砕と概ね同程度の粉砕性能が期待でき、外圧開放型ミルポットを使用した水没粉砕という、もっとも廉価な粉砕方式の採用が可能となることが示された。

② 離散要素法による数値解析
数値解析により得られた鉄球運動のスナップショットの例を図10に、エネルギー散逸の和の計算結果を図11にそれぞれ示す。

② 離散要素法による数値解析

数値解析により得られた鉄球運動のスナップショットの例を図10に、エネルギー散逸の和の計算結果を図11にそれぞれ示す。



図10 鉄球運動のスナップショットの例

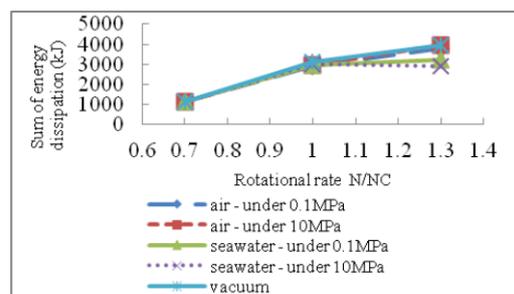


図11 エネルギー散逸の和の計算結果

湿式粉砕の大気圧条件と高压条件におけるエネルギー散逸の和を比較すると、両者の間に顕著な違いは見られなかった。水没粉砕同士の比較でも同様であった。一方、湿式粉砕と水没粉砕の比較においては、回転数比 (N/N_c) 70%及び100%においては顕著な違いは見られないが、130%においては、水没粉砕のエネルギー散逸の和が湿式粉砕よりも小さくなり、粉砕効率が高くなることが示された。

(2) 浮選技術の研究

高圧水中条件における浮選実験では、高圧水中条件（1MPa 及び 10MPa）において微細気泡を発生させ、装置内部にフロスを形成し、オーバーフローさせることに成功した。大気圧条件及び高圧条件（1MPa）における浮選実験に使用した原鉱、ならびに、回収された精鉱及び尾鉱の分析結果を図 12 に示す（いずれも純水ベースのパルプを使用した場合）。大気圧条件では、仕込み量の約 50%を精鉱として回収したが、高圧条件での精鉱回収率は約 10%であった。

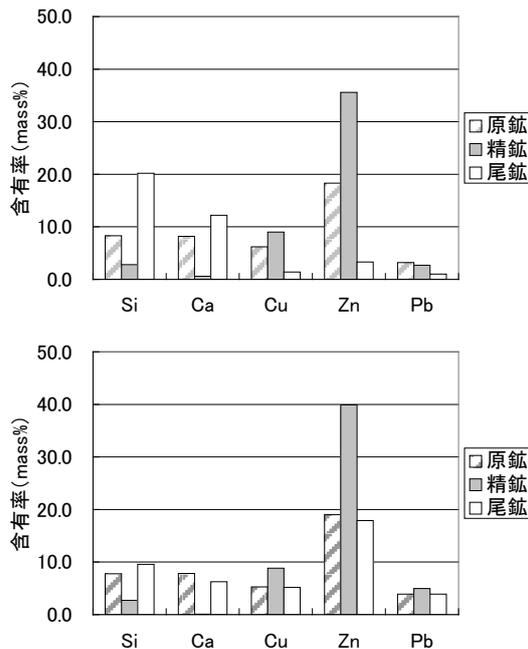


図 12 浮選実験の結果
(上：大気圧条件，下：高圧条件)

どちらの圧力条件においても、精鉱中の銅及び亜鉛の含有率は原鉱と比較して向上し、ケイ素やカルシウムの含有率は低くなった。また、人工海水ベースのパルプを使用した場合でも、概ね同様な実験結果が得られた。以上の結果から、黒鉱と同様な試料であれば、高圧水中条件においても、大気圧条件と同様なカラム浮選が可能になると示唆された。

(3) 社会的受容性に関する調査

海底選鉱に関係すると考えられる我が国の国内法、ならびに、我が国が批准している国際条約について調査をおこなった。我が国の鉱業法や鉱山保安法は元来陸上の鉱山を想定しており、海底選鉱の舞台となる海底の鉱山については特に想定されていない。また、海洋投棄に関するロンドン条約及び同条約議定書は、前文において鉱山業に関しては適用除外となることが記載されている。しかしながら、近年、海底資源開発に関わる内外の動きが活発化していることから、海底選鉱を

海洋環境の保全と両立させるための方策を検討する必要がある。

(4) まとめ

海底熱水鉱床の開発を促進するため、採掘した鉱石を海底において粉碎・選別する海底選鉱の概念を考案した。粉碎及び浮選について、候補となる技術を検討し、海底選鉱への適用可能性を明らかにした。本研究の成果を元に海底選鉱を実用化できれば、従来の開発方式と比較して、開発コストの低減が可能となると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Y. Nakajima, J. Yamamoto, S. Kanada, I. Takahashi, S. Masanobu, K. Okaya, S. Matsuo, T. Fukushima, T. Fujita, Study on Grinding Technology for Seafloor Mineral Processing, Proc. ASME 2013 32nd Intl. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2013), DOI:10.1115/OMAE2013-10756, 2013, in press, 査読有
- ② S. Matsuo, K. Okaya, J. Sadaki, T. Fujita, Y. Nakajima, S. Masanobu, J. Yamamoto, I. Takahashi, Fundamental ball mill simulation by using DEM for development of hydrothermal deposits, Proc. 20th Intl. Congress of Chemical and Process Engineering, 2012, 査読無
- ③ Y. Nakajima, J. Yamamoto, S. Kanada, S. Masanobu, I. Takahashi, J. Sadaki, R. Abe, K. Okaya, S. Matsuo, T. Fujita, Study on Seafloor Mineral Processing for Mining of Seafloor Massive Sulfides, Proc. ASME 2012 31st Intl. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2012), DOI:10.1115/OMAE2012-83354, 2012, in press, 査読有
- ④ 中島康晴, 定木淳, 海底熱水鉱床開発のための海底選鉱の研究, 混相流, vol. 25, pp. 308-314, 2011, 査読無
- ⑤ Y. Nakajima, S. Uto, S. Kanada, J. Yamamoto, I. Takahashi, S. Otake, J. Sadaki, K. Okaya, S. Matsuo, T. Fujita, Concept of Seafloor Mineral Processing for Development of Seafloor Massive Sulfides, Proc. ASME 2011 30th Intl. Conf. Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2011), vol. 5, pp. 157-162, DOI:10.1115/OMAE2011-49981, 2011, 査読有

〔学会発表〕(計5件)

- ① 中島康晴, 山本讓司, 高橋一比古, 正信聡太郎, 定木淳, 岡屋克則, 松尾誠治, 藤田豊久, 海底熱水鉱床開発のための粉碎技術の研究, 第23回海洋工学シンポジウム, 東京, 2012年8月2日
- ② 阿部亮介, 定木淳, 岡屋克則, 松尾誠治, 藤田豊久, 中島康晴, 海底選鉱におけるボールミル粉碎に関する研究, 資源・素材学会平成24年度春季大会, 東京, 2012年3月26日
- ③ 小田部翔, 定木淳, 松尾誠治, 岡屋克則, 藤田豊久, 海底熱水鉱床の海底選鉱技術に関する研究, 資源・素材学会平成23年度春季大会, 東京, 2011年3月28日
- ④ 中島康晴, 高橋一比古, 正信聡太郎, 定木淳, 岡屋克則, 松尾誠治, 藤田豊久, 海底熱水鉱床開発のための海底選鉱の研究, 第22回海洋工学シンポジウム, 東京, 2011年3月18日
- ⑤ 小田部翔, 定木淳, 松尾誠治, 岡屋克則, 藤田豊久, 中島康晴, 宇都正太郎, 海底熱水鉱床の海底選鉱技術に関する研究, 平成22年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 福岡, 2010年9月13日

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 海底鉱物処理システム

発明者: 中島康晴、金田成雄、定木淳、岡屋克則、松尾誠治

権利者: 独立行政法人海上技術安全研究所

種類: 特許

番号: 特開2012-57350

出願年月日: 22年9月8日

国内外の別: 国内

〔その他〕

海底選鉱に関するワークショップの開催

資源工学、海洋工学等の研究者、専門家を対象として、海底選鉱に関するワークショップを平成24年12月に東京大学において開催し、研究成果の普及に努めた。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 康晴 (NAKAJIMA Yasuharu)

独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開発系・主任研究員

研究者番号: 30344237

(2) 研究分担者

宇都 正太郎 (UTO Shotaro)

独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開発系・研究グループ長

研究者番号: 40358396

(2010年度のみ)

(3) 研究分担者

高橋 一比古 (TAKAHASHI Ichihiko)

独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開発系・上席研究員

研究者番号: 30425748

(4) 研究分担者

藤田 豊久 (FUJITA Toyohisa)

東京大学・大学院工学系研究科システム創成学専攻・教授

研究者番号: 70124617

(5) 研究分担者

定木 淳 (SADAKI Jun)

東京大学・大学院工学系研究科システム創成学専攻・准教授

研究者番号: 60332582

(2010年度及び11年度のみ)

(6) 研究分担者

岡屋 克則 (OKAYA Katsunori)

東京大学・大学院工学系研究科システム創成学専攻・助教

研究者番号: 80134493

(7) 研究分担者

松尾 誠治 (MATSUO Seiji)

東京大学・大学院工学系研究科システム創成学専攻・助教

研究者番号: 20302755

(8) 研究分担者

正信 聡太郎 (MASANOBU Sotaro)

独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開発系・研究グループ長

研究者番号: 80373413

(2011年度及び12年度のみ)

(9) 研究分担者

山本 讓司 (YAMAMOTO Joji)

独立行政法人海上技術安全研究所・海洋開発系・主任研究員

研究者番号: 00586703

(2011年度及び12年度のみ)

(10) 研究分担者

福島 朋彦 (FUKUSHIMA Tomohiko)

東京大学・大気海洋研究所・特任准教授

研究者番号: 60543288

(2012年度のみ)