海底熱水鉱床開発のための海底選鉱の研究*

Study on Seafloor Mineral Processing for Development of Seafloor Massive Sulfides

中島 康晴**
NAKAJIMA Yasuharu

定木 淳***
SADAKI Jun

Abstract Seafloor Massive Sulfides (SMSs), which were formed by deposition of precipitates from hydrothermal fluids vented from seafloor, are one of unconventional mineral resources beneath deep seafloors in the Exclusive Economic Zone (EEZ) of Japan. The authors have proposed the concept of Seafloor Mineral Processing, where useful minerals contained in SMS ores are separated from feed ores on deep seafloor to be lifted while remaining gangue is disposed on seafloor in appropriate ways. To apply column flotation, which is usually used for mineral processing on land, for seafloor mineral processing, model experiments of column flotation on deep seafloor were carried out at high pressures up to 10MPa using a large-scale high pressure vessel. In the experiments, fine bubbles suitable to flotation were generated in the flotation column at the pressures, and overflow of froth from the flotation column was observed. The content of metallic elements such as copper and zinc in the concentrates obtained from flotation at 1MPa was higher than that in the feed ores while that of silicon and calcium, which are mainly assigned to gangue, was lower than that in the feed ores. These results suggest that column flotation would be applicable for seafloor mineral processing.

Keywords: Exclusive Economic Zone (EEZ), Flotation, Mineral Processing, Mining, Seafloor Massive Sulfides (SMSs)

1. はじめに

我が国の排他的経済水域（EEZ）の海底には、海底熱水鉱床やメタンハイドレートなどの未開発の鉱物・エネルギー資源が賦存している。海底熱水鉱床とは、海底から噴出した熱水に含まれる金属硫化物等が海底に堆積したものである。日本近海の熱水鉱床は、海外の熱水鉱床と比較して、銅、亜鉛、鉛などの品位が高いものが多いことが報告されている[1,2]。近年、パプアニューギニア、ニュージーランド、日本などの周辺海域に存在する熱水鉱床を対象として、資源ベンチャーによる鉱区申請の動きが報じられており、その動向に注目が集まっている。

海底熱水鉱床の開発方式として様々な方式が提案されている。代表的な方式は、Fig. 1 に示すように、海底で採掘した鉱石をそのまま海上へと揚鉱し、さらに陸上の選鉱・製錬施設に輸送して、選鉱・製錬を行う方法である[3,4]。しかし、鉱石には不要な岩石（脈石）が多く含まれているため、この方式では経済性が損なわれるだけでなく、陸上において脈石処分の問題が生じる可能性がある。著者らは、Fig. 2 に示すように、海底において鉱物を粉碎・選別し、有用鉱物のみを揚鉱することを提案し、これを海底選鉱と名付け、研究を行っている[5,6]。海底選鉱の実現により、揚鉱に要するコストだけでなく、陸上における脈石処分

* 2011.11.1 受付

** 独立行政法人海上技術安全研究所 〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1

TEL: (0422)41-3786 FAX: (0422)41-3056 E-mail: nakajima@nmri.go.jp

*** 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

コストの削減も可能となるため、海底熱水鉱床開発の推進に資すると期待される。

Fig. 1 Conventional scheme of SMS mining [5].

Fig. 2 New scheme of SMS mining with seafloor mineral processing.

2. 海底選鉱のコンセプト

海底選鉱は、採掘された鉱石を微粉砕する粉砕、サイズ分けを行う分級、有用鉱物を分離する選別などのプロセスから構成される。これらのプロセスのうち、主要なものは粉砕と選別である。

陸上の鉱山では、採掘された鉱石をジョークラッシャーやジャイレトリークラッシャーなどの粉砕機を用いて粗く粉砕（粗砕）し、ロッドミルやボールミルを用いて粒径数十～数百 μm にまで微粉砕した後選鉱機に投入し、比重、磁性、表面の濡れ性などの性質の違いを利用して有用鉱物と脈石とを選別する。最も一般的な選別法は、表面の濡れ性の違いを利用する浮遊選鉱（浮選）である。有用鉱物の表面が水に濡れにくいのにに対して、脈石の表面は濡れやすい。鉱石の微粒子を分散させた水中で微細な気泡を発生させると、有用鉱物粒子は気泡表面に付着するが、脈石粒子は付着しないため、両者を選別することができる[7,8]。選別される前の鉱石は原鉱と呼ばれ、起泡

剤や捕収剤などの試薬を添加した水と混合したパルプと呼ばれる状態で浮選機に投入される。浮選機内で気泡がパルプの表層において層状に集積したものはフロスと呼ばれ、装置の隔壁を越えてフロスがオーバーフローすることにより、精鉱と尾鉱とに分離される。実際には、実収率や分離効率の改善、金属種別の分離を目的として、選鉱は多段階で行われることが多い[7,8]。最終的に得られた精鉱は製錬されて金属となり、尾鉱は鉱滓ダム等において処分される。

浮選機には、気泡発生のための攪拌翼を備えた空気攪拌型と、円筒形容器の下部に空気を圧入して気泡を発生させるカラム型がある。著者らは、稼働部品が少なく、気泡発生のための攪拌動力が不要なカラム型浮選機が海底選鉱に適していると考え、海底選鉱への適用することを検討している。Fig. 3に著者らが想定している海底選鉱用カラム型浮選機の概念図を示す。基本的な構造は陸上用のカラム型浮選機と同様であるが、海上から空気を供給する必要があり、また、供給された空気を再利用するための機能が必要と考えられる。

Fig. 3 Conceptual design of column flotation for seafloor mineral processing.

粉砕は機械的なプロセスであり、高圧力の深海底でも原理的には成立すると予想されるが、深海

底における浮選（海底浮選）が成立するかどうかは不明であり、過去にも検討されていない。そこで、カラム型浮選機を水深 1000m 程度の深海底で稼働させることを想定し、大型高圧実験装置を用いて、高圧水中条件において浮選が成立するかどうかを実験により検討した。次節では、その検討内容について紹介する。

3. 海底浮選の実験的検討

3.1 実験の概要

検討では、まず簡易的な実験装置を用いて大気圧条件下での浮選実験を実施し、浮選に適したパルプの調製条件を見出した。次に海底浮選用カラム型浮選機を模擬した実験装置を製作し、所定の圧力条件における気泡発生実験と、浮選実験を実施した。気泡発生実験では、浮選に適したサブミリ程度の微細気泡を発生させることができるか、浮選実験では、フロスをオーバーフローさせ、試料の一部を精鉱として分離することができるか、さらに精鉱に含まれる金属元素の品位が原鉱のそれと比較して向上しているかどうかの検討を行った。

実験用試料として、Photo 1 に示す、秋田県内の鉱山で採掘された黒鉱と呼ばれる鉱石を使用した。黒鉱は、かつて海底熱水鉱床であったものが長い年月を経て陸上において鉱山として発見されたものと考えられている[9]。実験に使用した鉱石は、銅、亜鉛、鉛などを比較的豊富に含んでいたため、品位を調整するために石英、石膏及び重晶石を添加したものを試料とした。ボールミルを用いて試料を微粉碎し、150 μ m 以下の粒子をふるい分け、原鉱とした。純水（イオン交換水）または人工海水に起泡剤及び捕収剤を添加し、pH を調整した液と原鉱とを混合してパルプを調製した。起泡剤としては MIBC (Methyl Isobutyl Carbinol) を、捕収剤としては PAX (Potassium Amyl Xanthate) を使用した。これらの試薬は鉱山で一般に使用されているものである。試薬の添加率や pH を変えてパルプを調製し、大気圧条件下で浮選実験を行い、最適な結果が得られる調製条件を検討した。使用した原鉱ならびに浮選の結果得られた精鉱及び尾鉱に含まれる主要な元素の品位（含有率）は、蛍光 X 線法 (XRF) により測定した。

Photo 1 Ore sample of Kuroko.

3.2 大気圧下における浮選実験

大気圧条件下の浮選実験で使用した装置の外観を Photo 2 に示す。実験装置は、パルプを充填し、気泡を発生させる気泡発生部、気泡発生部からオーバーフローしたフロスを受ける受け部、空気を供給するためのコンプレッサー、配管等から構成されている。気泡発生部は、アクリル樹脂製の管を金属製の台座に搭載したものであり、台座には焼結金属製のフィルタを用いた気泡発生ノズルが設置されている。

Photo 2 Experimental apparatus for flotation at atmospheric pressure.

実験では、まず気泡発生部内に水を充填して気泡発生実験を行い、適切なサイズの気泡が発生するようにノズル及び空気流量の調整を行った。次にパルプを充填して浮選実験を行い、鉱物の分離特性を検討した。浮選実験におけるフロスのオーバーフローの様子を Photo 3 に示す。ノズルの形状や空気流量の調整により、浮選に適した微細気泡の発生に成功した。微細気泡から形成されたフ

ロスは厚く層状に発達し、オーバーフローしたため、分析するのに十分な量の精鉱を分離することに成功した。純水ベース及び人工海水ベースのパルプを用いて同様な実験を行った。

Photo 3 Overflow of froth in experiment at atmospheric pressure.

実験結果から見出されたパルプの最適調製条件を Table 1 に示す。本条件における起泡剤の添加率は、一般の鉱山における添加率と比較して、かなり高いと推定される。

Table 1 Preparing condition of pulp for flotation at atmospheric pressure.

	Pure Water	Artificial Seawater
Ratio of Feed Ore/Water (mass%)	10	10
pH	8	6
Ratio of MIBC/Water (mL/L)	450	450
Ratio of PAX/Feed Ore (mg/kg)	25	50

浮選実験で得られた精鉱等の分析結果を Fig. 4 に示す。精鉱中の銅や亜鉛の品位は原鉱における品位と比較して向上し、脈石に多く含まれる元素であるケイ素やカルシウムの含有率は低下した。一方、尾鉱中の銅や亜鉛の品位は原鉱における品位よりも低いのにに対して、ケイ素やカルシウムの含有率は増大した。人工海水ベースのパルプを用いた場合も、純水ベースのパルプを用いた場合と概ね同様な結果が得られた。なお、精鉱の収量は原鉱の仕込み量の約半分であった。

(Using pure water-based pulp)

(Using artificial seawater-based pulp)

Fig. 4 Content of main elements in feed ores, concentrates and tailings from flotation at atmospheric pressure.

3.3 高圧下における浮選実験

高圧条件下の浮選実験で使用した装置の外観を Photo 4 に示す。実験装置は、気泡発生部、受け部、高圧下において空気層を維持するためのアキュムレータ、空気ポンプ、バルブユニット、配管等から構成されている。気泡発生部には、大気圧条件用の実験装置と同様な気泡発生ノズルが設置されている。気泡発生部、受け部及びアキュムレータは、治具を用いて一体化され、配管により連結されている。気泡の発生状況やフロスの挙動を観察しやすくするため、気泡発生部及び受け部はアクリル樹脂製の矩形管を用いて製作した。

実験には、海上技術安全研究所が所有する大型高圧実験施設である高圧タンクを使用した。高圧タンクの概観を Fig. 5 に示す。高圧タンクは、内径 1.1m、内部の深さ 3m の圧力容器であり、内部を最大で 60MPa にまで加圧することが可能である。また、内部に 6 台の水中カメラと水中ライトが装備されており、加圧した状態で内部の観察が

可能となっている。

Photo 4 Experimental apparatus for flotation at high pressures.

Fig. 5 Schematic view of high-pressure tank.

実験では、Fig. 6 に示すように、気泡発生部等の装置を高圧タンク内に設置した。アキュムレータの下端はタンク内に開放されているため、タンク内を加圧すると、アキュムレータ内に水が浸入して気泡発生部内まで加圧されるが、アキュムレータ内に十分な量の空気を充填しておくことにより、気泡発生部のパルプの上に空気層を維持することができる。さらに、高圧タンク蓋の貫通孔及びタンク内の配管を経由して外部の空気源から気泡発生部に空気を圧入し、気泡を発生させる。空気流量はタンク外に設置したバルブユニット

のニードル弁（圧力調整弁）を用いて調整することができる。

Fig. 6 Arrangement of experimental apparatus in high-pressure tank.

実験では、高圧タンク内の圧力を 1、5 及び 10MPa として、気泡発生実験及び浮選実験を行った。1MPa における気泡発生の様子を Photo 5 に示す。圧入空気の流量調整により、微細気泡を発生させることに成功した。5MPa 及び 10MPa においても、空気流量の調節により微細気泡の発生に成功した。

Photo 5 Bubbling in flotation column at 1MPa.

次に、気泡発生部にパルプを充填して浮選実験を行い、フロスの挙動を観察した。使用したパルプの調製条件を Table 2 に示す。前節でも記したように、Table 1 に示す条件では起泡剤の添加率が通常の添加率よりもかなり高いと推定されたため、起泡剤の添加率を低く抑えた調製条件で実験を開始した。圧力条件の上昇とともに起泡剤の添加率を調整する必要が生じ、最終的には起泡剤

の添加率をこの 10 倍にまで高めて調製を行った。

Table 2 Preparing condition of pulp for flotation at high pressures.

	Pure Water	Artificial Seawater
Ratio of Feed Ore/Water (mass%)	10	10
pH	8	6
Ratio of MIBC/Water (mL/L)	50	50
Ratio of PAX/Feed Ore (mg/kg)	25	50

実験の結果、高圧条件におけるフロスのオーバーフローに成功した。その様子を **Photo 6** に示す。微細気泡から形成されたフロスは厚く層状に発達し、オーバーフローした。1MPa での実験では、分析するのに充分な量の精鉱を分離することに成功した。

Photo 6 Overflow of froth from flotation column at 1MPa.

1MPa での浮選実験で回収された精鉱等の分析結果を **Fig. 7** に示す。大気圧条件下での浮選実験と同様に、精鉱中の銅や亜鉛の品位は原鉱における品位と比較して向上し、ケイ素やカルシウムの含有率は低下した。精鉱の収率が 10%程度と低かったため、尾鉱の品位は原鉱とあまり変わらない結果となった。人工海水ベースのパルプを用いた場合も、純水ベースのパルプを用いた場合と概ね同様な結果が得られた。以上の結果から、高圧条件においても浮選による有用鉱物の分離が成立する可能性があることが示唆された。また、圧力条件の変化に応じて、空気流量やパルプの調製条件を調整する必要があることが示された。

(Using pure water-based pulp)

(Using artificial seawater-based pulp)

Fig. 7 Content of main elements in feed ores, concentrates and tailings from flotation at 1MPa.

4. まとめと今後の展望

我が国の排他的経済水域に存在する海底熱水鉱床は、新たな海底鉱物資源として注目されている。本稿では、海底熱水鉱床開発のための海底選鉱の概念と、その主要なプロセスである海底浮選の研究について紹介した。

海底選鉱は、採掘された鉱石を微粉砕する粉砕や、そこから有用鉱物を分離する選別などのプロセスから構成される。水深 1000m 程度の深海底において浮選が原理的に成立するかどうかを確認するため、大型高圧実験装置を用いて海底浮選の模擬実験を行った。10MPa までの高圧水中において浮選に適した微細気泡の発生と、フロスのオーバーフローに成功した。1MPa での浮選実験で得られた精鉱の元素分析から、精鉱中の銅や亜鉛の品位が原鉱における品位と比較して向上した一方で、ケイ素やカルシウムの含有率は低下したことが示された。以上の結果から、高圧条件にお

いて、浮選による有用鉱物の選別が成立する可能性が示唆された。

今後は、海底浮選の研究をさらに進めるとともに、粉碎についても検討を行い、最終的には、Fig. 8に示すような海底選鉱システムを提案したいと考えている。海底選鉱システムは、粉碎や浮選のユニットを組み合わせた水中構造物になると考えられ、システム全体の設計、運用、制御などの検討を行う必要がある。また、採掘された鉱石の受け入れ方法、精鉱を揚鉱システムへ搬送する方法、尾鉱の処分方法など、他にも多くの検討課題が山積しており、海底浮選の検討と同じく、混相流の関与する多数のプロセスが存在する。混相流の研究に携わる方々が、海底鉱物資源の開発に関心を寄せて頂ければ幸いである。

Fig. 8 Image of seafloor mineral processing system.

謝 辞

本稿で紹介した研究は、科学研究費補助金（課題番号 22360373）を得て実施されました。研究で使用した黒鉱鉱石は、卯根倉鉱業株式会社殿からご提供を頂きました。研究にご協力頂いた関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Rona, P. A. and Scott, S. D., A Special Issue on Sea-Floor Hydrothermal Mineralization: New Perspectives: Preface, *Economic Geology*, Vol. 88(8), 1935–1976 (1993).
- [2] Glasby, G. P., Iizasa, K., Yuasa, M. and Usui, A., Submarine Hydrothermal Mineralization on the Izu-Bonin Arc, South of Japan: An Overview, *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 18(2), 141–176 (2000).
- [3] Nautilus Minerals Niugini Limited, Environmental Impact Statement, Solwara I Project, Volume A, 2-1–2-6 (2008).
- [4] Chujo, T., Ishida, S., Yukawa, K., Namba, Y., Nakajima, Y. and Kato, S., Research and Development of Offshore Platforms for SMS Mining Part 1 An Integrated Design Tool of Offshore Platforms, *Proc. of the ASME 2010 29th Intl. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2010)*, CD-ROM, Paper No. OMAE2010-20779 (2010).
- [5] Otabe, S., Sadaki, J., Matsuo, S., Okaya, K., Fujita, T., Nakajima, Y. and Uto, S., Study of Seafloor Mineral Processing Technology for Seafloor Massive Sulfide, *Proc. of MMIJ2010*, 40 (2010).
- [6] Nakajima, Y., Uto, S., Kanada, S., Yamamoto, J., Takahashi, I., Otabe, S., Sadaki, J., Okaya, K., Matsuo, S. and Fujita, T., Concept of Seafloor Mineral Processing for Development of Seafloor Massive Sulfides, *Proc. of the ASME 2011 30th Intl. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2011)*, CD-ROM, Paper No. OMAE2011-49981 (2011).
- [7] Imai, T., Sawaki, K., and Tamai, H., Column Flotation of Pb and Zn Ores at TOYOKA Concentrator, *RESOURCES PROCESSING*, Vol. 36(2), 69–74 (1989).
- [8] Imai, T., Development of Column Flotation Technologies, *RESOURCES PROCESSING*, Vol. 47(1), 14–21 (2003).
- [9] Fujioka, K., Where were the “Kuroko Deposits” formed, looking for the Present Day Analogy, *Mining Geology Special Issue*, No. 11, 55–68 (1983).