

# 1 海底鉱物資源開発のための基盤的技術並びに 解析・評価ツールの開発

中島 康晴\*, 山本 譲司\*, 高野 慧\*, 荒木 元輝\*, 藤原 智\*,  
山本マルシオ\*, 小野 正夫\*, 金田 成雄\*, 高橋一比古\*, 正信聡太郎\*

## Development of Fundamental Techniques and Analytical Tool for Seabed Mining

by

NAKAJIMA Yasuharu, YAMAMOTO Joji, TAKANO Satoru, ARAKI Motoki,  
FUJIWARA Tomo, Marcio YAMAMOTO, ONO Masao,  
KANADA Shigeo, TAKAHASHI Ichihiko and MASANOBU Sotaro

### Abstract

Seabed minerals such as polymetallic massive sulphides, cobalt-rich ferromanganese crusts, ferromanganese nodules, and ocean-floor mud containing rare earth elements are being considered for future mineral resources. NMRI has been researching and developing fundamental techniques for seabed mining systems and an analytical tool to support the planning of seabed mining projects. This paper discusses the progress made towards the development of the fundamental techniques and the aforementioned analytical tool. In the development of the techniques, the characteristics of ore slurry transportation such as pressure loss and wear of riser pipes were investigated for designing an ore lifting system in the seabed mining system. The analytical tool provides indices for benefit-cost analysis such as capital expenditure (CAPEX), operating expense (OPEX), net present value (NPV), and internal rate of return (IRR) with regards to initial conditions such as resource amount and mining plan including platform type. The results of these studies are expected to facilitate the future development of seabed minerals.

---

\* 海洋開発系

原稿受付 令和3年5月17日

審査日 令和3年5月31日

## 1. はじめに

低炭素・脱炭素を中心とする持続可能な社会への変革は、我が国において喫緊の課題である。とりわけ、海洋再生可能エネルギーの開発や海運のゼロエミッション化は、海洋・海事産業における重要な研究課題と認識されている。そのためには、発電機、モーター、バッテリーといった機器が必要であり、それらに不可欠な素材である銅やコバルト、レアアースなどの希少金属の確保が重要な課題となる<sup>1)</sup>。これらの希少金属はクリティカルメタルとも呼ばれ、中長期的な調達リスクが指摘されている<sup>2-3)</sup>。このような状況に鑑み、近年、将来の金属鉱物資源として、海底熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガン団塊、さらにレアアースを含む海底泥といった海底鉱物資源の重要性が認識されている<sup>4-5)</sup>。

我が国では、海洋基本計画に基づき、今世紀初頭から排他的経済水域内での海底鉱物資源の調査を実施してきた<sup>6)</sup>。並行して、海底鉱物資源の開発に必要な採鉱・揚鉱システム等の開発や、資源開発に係る環境影響評価手法等の研究を実施し、世界に先駆けて2017年に海底熱水鉱床の採鉱・揚鉱パイロット試験を実施した<sup>7-8)</sup>。また、国際海底機構(ISA)から認可された鉱区においてコバルトリッチクラストの資源探査も実施している<sup>9)</sup>。海外では2000年頃から韓国、中国、インドがマンガン団塊の開発を目指す国家的な研究プロジェクトを実施している<sup>10-12)</sup>。欧州では、マンガン団塊の開発を目指すBlue Miningプロジェクトが欧州連合のファンドにより2014~18年にかけて実施された<sup>13)</sup>。また、海洋油・ガス田開発の技術を海底鉱物資源開発に転用しようというノルウェーのMarMineプロジェクトも実施されている<sup>14)</sup>。

海上技術安全研究所(以下、当所)では、このような動向を踏まえ、民間企業や外部の研究機関とも協力して研究開発を実施している<sup>15)</sup>。本稿では、当所における近年の海底鉱物資源開発に係る基盤的技術並びに解析・評価ツールの開発について報告する。

## 2. 基盤的技術の開発

### 2.1 採鉱・揚鉱システムに係わる技術

海底熱水鉱床やコバルトリッチクラストは海底に固着しているため、掘削機のような機械を用いて採掘する必要がある。代表的な事例として、図-1に海底熱水鉱床の採鉱・揚鉱システム概念図を示す。我が国の周辺海域では、海底熱水鉱床は水深数百~2,000m程度の海底に多く賦存しており、採鉱・揚鉱システムにはこのような大水深において稼働できる性能が求められる。

採鉱システムに係わる検討として、採掘機等に搭載される機器等の耐圧性能評価が挙げられる。当所が保有する高圧タンクを用いて耐圧性能評価に係る検討を実施した。単純な耐圧試験に加えて、加圧状態において外部からタンク内の供試体に電力を供給し、さらにセンサ等のデータをリアルタイム

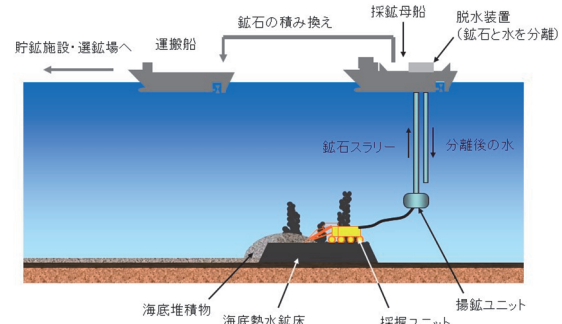


図-1 海底熱水鉱床の採鉱・揚鉱システム概念図

で計測する手法を開発している。

揚鉱システムに係わる検討として、海底で採取された鉱石粒子を固液混合物(スラリー)として洋上の支援母船まで移送する場合を想定し、揚鉱管内の摩擦損失や管の摩耗評価の検討を実施した<sup>15-18)</sup>。スラリー方式による粒子輸送は古くから土木・鉱山などの分野で利用されているが、粒径の大きな粒子を大水深から揚収するケースは実用化されていない。そこでアルミナボール等の模擬鉱石粒子を用いて揚鉱管模型によるスラリー移送試験を実施した。スラリー濃度や揚鉱管の傾斜角を変えて実験を行い、摩擦損失を与える数学的モデルの検証を実施した。さらに、海洋油・ガス田の開発に広く利用されているフレキシブルライザーについて、揚鉱システムへの適用を考慮し、強度評価及び疲労評価を実施した<sup>15)</sup>。

### 2.2 鉱物処理に係わる技術

陸上の鉱山と比較して海底熱水鉱床の品位は高いことが知られているが、脈石と呼ばれる不要な鉱物も多く含まれている。将来的な開発コストの低減を目的として、海底で採掘した鉱石をその場で粉砕し有用な鉱物のみを選別する海底鉱物処理(海底選鉱)を提案し、その基盤的技術の開発を実施した<sup>15, 19-20)</sup>。海底選鉱システム概念図を図-2に示す。海底選鉱システムの主要な要素となるのは鉱石を粉砕する粉

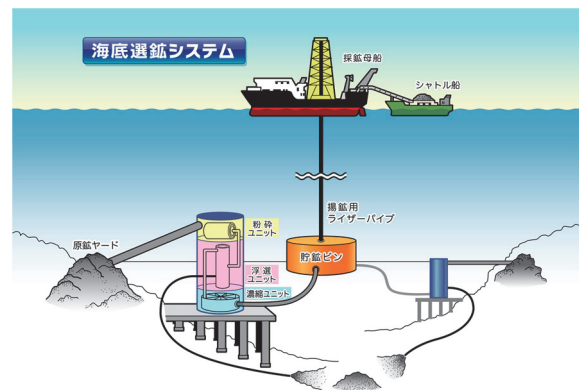


図-2 海底選鉱システム概念図

砕ユニットと粉碎された鉱石粒子を選別する選別ユニットである。粉碎ユニットについては、採掘された鉱石のサイズに応じて、2枚の歯板で挟み込むことにより破碎するジョークラッシャ（粒径の大きな鉱石に適す）、回転する2本の円筒間に挟み込むことにより粉碎するロールミル（中間程度の粒径に適す）、回転する容器内で鉄球等を用いて微粉碎するボールミル（粒径の小さなものに適す）等を組み合わせた形式が考えられる。選別ユニットについては、陸上の鉱山で広く利用されている浮遊選鉱法（有用鉱物と脈石の表面の濡れ性の違いを利用し、気泡を用いて微粉碎した鉱石粒子を選別する手法）の適用を検討した。

### 3. 解析・評価ツールの開発

海底鉱物資源開発の事業化推進に資するため、開発事業の経済性を簡易的に評価する解析・評価ツールの開発を実施した。当所では、これまでも洋上再生可能エネルギーを含む海洋開発用プラットフォームの設計支援ツールとして、調和設計プログラムの開発を実施している<sup>21-22</sup>。本開発では、計算上の負荷を軽減し、海底鉱物資源開発に特化した新たな計画支援プログラムの開発を実施した。本プログラムでは、ユ

ーザーサイドから見た使い勝手の向上を念頭に置き、多くの設定値をユーザーが調整できるようになっている。なお、本プログラムの説明では、図-1に示すような採鉱母船をプラットフォームと表記する。

本プログラムのフローを図-3に示す。本プログラムには、海底熱水鉱床の賦存海域、資源量、品位等のデータを収録した鉱床DB、港湾の位置情報を収録した港湾DB、我が国周辺海域の水深等のデータを収録した水深DB及び我が国周辺海域の海象データを収録した海象DBが付属している。ユーザーが画面上で選択した海底熱水鉱床の採掘地と集積港、入力または選択した稼働期間や生産量等の生産計画、プラットフォームの基本形式に応じて、内蔵された各種の算定式によりプラットフォームの仕様、設備投資費用(CAPEX)、運営費(OPEX)さらに正味現在価値(NPV)や内部収益率(IRR)等の事業性評価指標を計算し出力するようになっている。プラットフォームの仕様やコストを計算するための算定式は当所の調査に基づき作成した。

本プログラムの画面表示の例を図-4に示す。初期画面(図-4(1))から海域マップ(図-4(2))を呼び出し、資源の採掘地及び集積港を選択する。採掘地と集積港の選択により航路

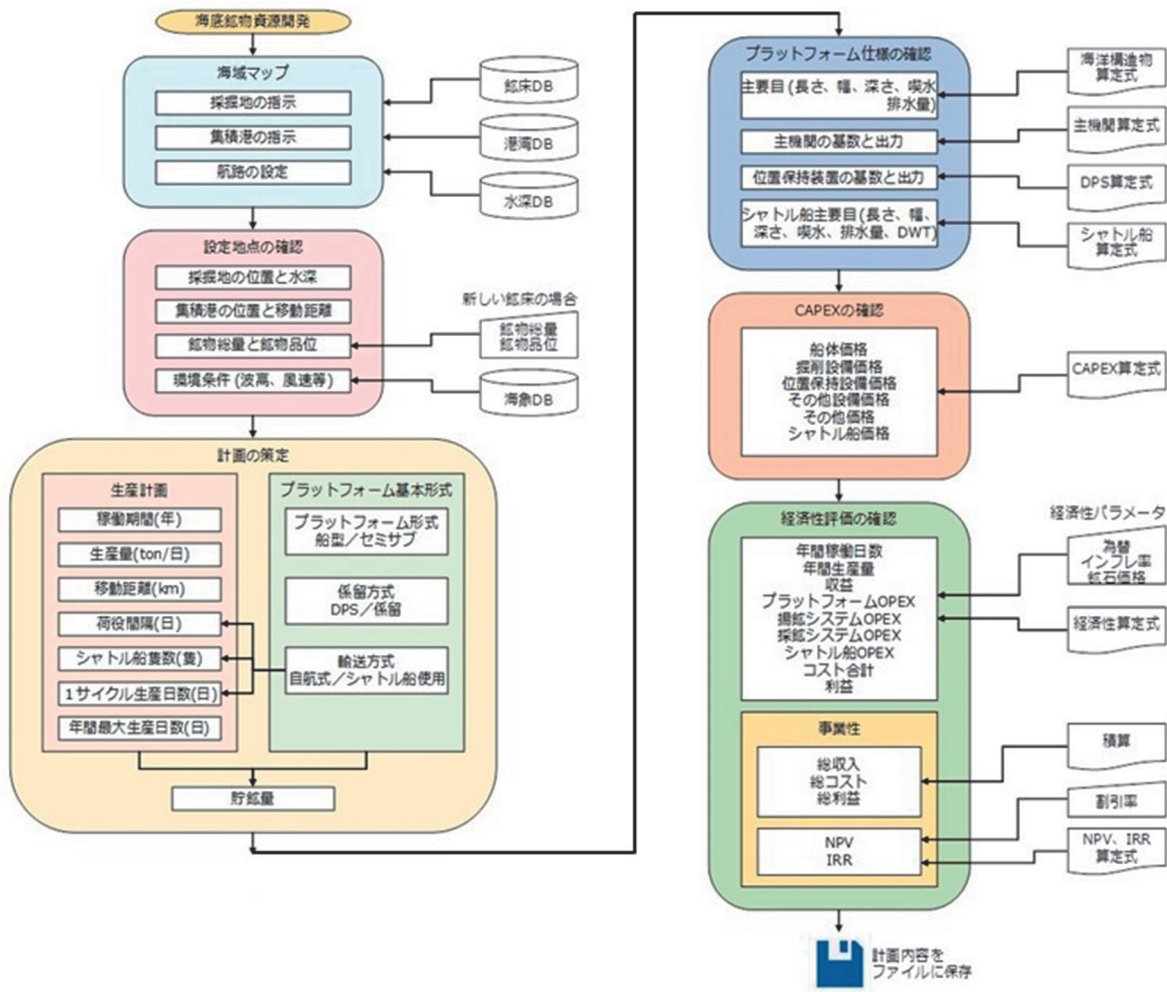


図-3 計画支援プログラムのフロー

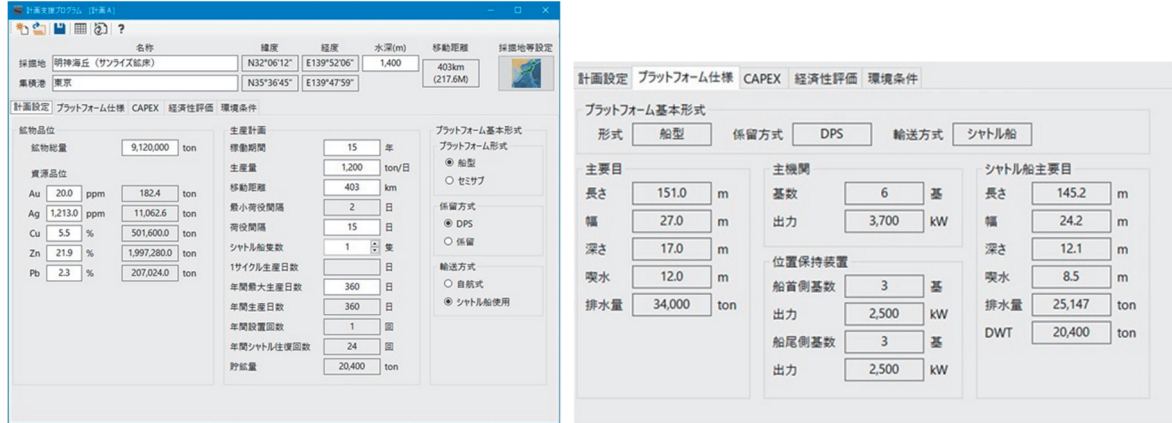


が設定される。海域マップを閉じると計画設定ページが表示される(図-4(3))。鉱床DBに収録されている採掘地を選択した場合、海底熱水鉱床の資源量や品位のデータが計画設定タブに自動的に表示されるが、ユーザーがこれらの数値を変更することも可能である(ただし、DB収録データ自体は変更されない)。次に、計画設定タブ上で稼働期間や生産量などの生産計画を入力し、プラットフォームの形式、係留方式、輸送方式を選択する。生産計画及びプラットフォームの基本形式に応じてプラットフォームの主要目等の仕様が計算され、プラットフォーム仕様のタブに表示される(図-4(4))。輸送方式としてシャトル船が選択された場合は、シャトル船の主要目もこのタブに表示される。採掘地の海象データは海象DBから呼び出され、環境条件のタブに表示される(図-4(5))。なお、本プログラムには海象データに対応してプラットフォームの稼働性を計算する機能は含まれていない。仕様から計算されたプラットフォームのCAPEXはCAPEXのタブに表示される(図-4(6))。輸送方式としてシャトル船が選択された場合は、シャトル船のCAPEXもこのタブに表示され

れ、プラットフォーム仕様のタブに表示される(図-4(4))。輸送方式としてシャトル船が選択された場合は、シャトル船の主要目もこのタブに表示される。採掘地の海象データは海象DBから呼び出され、環境条件のタブに表示される(図-4(5))。なお、本プログラムには海象データに対応してプラットフォームの稼働性を計算する機能は含まれていない。仕様から計算されたプラットフォームのCAPEXはCAPEXのタブに表示される(図-4(6))。輸送方式としてシャトル船が選択された場合は、シャトル船のCAPEXもこのタブに表示され



(1) トップ画面, (2) 海域マップ



(3) 計画設定ページ, (4) プラットフォーム仕様のタブ



(5) 環境条件のタブ, (6) CAPEXのタブ  
図-4 計画支援プログラムの画面表示

計画設定											
プラットフォーム仕様		CAPEX		経済性評価		環境条件					
経済性パラメータ											
為替	110.0	円/\$	インフレ率	0.5	%	鉱石価格	300.0	\$/ton			
	単位	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目	8年目		
▶ 年間稼働日数	日	360	360	345	360	330	360	360	345		
年間生産量	ton	432,000	432,000	414,000	432,000	396,000	432,000	432,000	414,000		
収益	MM\$	129.6	130.2	125.4	131.6	121.2	132.9	133.5	128.6		
プラットフォーム CAPEX	MM\$	270.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
プラットフォーム OPEX	MM\$	41.6	41.8	44.2	42.2	48.2	42.7	42.9	45.3		
揚鉱システム CAPEX	MM\$	44.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
揚鉱システム OPEX	MM\$	4.4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.6	4.6	4.6		
採鉱システム CAPEX	MM\$	45.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
採鉱システム OPEX	MM\$	4.6	4.6	4.6	4.6	4.7	4.7	4.7	4.7		
シャトル船 CAPEX	MM\$	27.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
シャトル船 OPEX	MM\$	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4		
コスト合計	MM\$	65.1	65.3	67.7	65.8	71.9	66.3	66.6	69.1		
利益	MM\$	64.5	64.9	57.7	65.7	49.3	66.5	66.9	59.5		
事業性											
総収入	2,159	億円	総計	909	億円	NPV	7	億円	割引率	12.0	%
総コスト	1,250	億円				IRR	12.4	%			

(7) 経済性評価のタブ

図-4 計画支援プログラムの画面表示（続き）

る。そして経済性評価のタブに、CAPEXのほか、OPEX、総収入、総コスト、NPV、IRR等が表示される（図-4(7)）。OPEXは、プラットフォームやシャトル船の人件費、燃料費、保険料その他の経費から算出する。収益やOPEXは年単位で表示される。事業性評価指標を計算するパラメータのうち、為替レート（円/ドル）、インフレ率、割引率等はユーザーが変更できるようになっている。また、上記の設定値、海域マップ、計算結果の数値並びにグラフ等をワークシートの形で出力することも可能である。

本プログラムを用いて、海底鉱物資源開発の経済性を簡易的に評価できる。その際、資源量や年間最大稼働日数等のパラメータを任意で調整し、事業性評価指標への影響を見るような使い方も可能である。なお、現在のプログラムには海底鉱物資源として海底熱水鉱床のデータのみが収録されているが、本年度中にコバルトリッチクラストの資源データを追加する機能拡張を実施する予定である。

また、次年度以降に、海気象データに対応した採鉱・揚鉱オペレーション等の稼働率を計算する機能を組み込み、稼働性を考慮した経済性評価が可能となるよう、解析・評価ツールの高度化を行うことを計画している。

#### 4. まとめ

将来の金属鉱物資源として期待されている海底鉱物資源の開発に資することを目的として、当所では基盤的技術の開発並びに解析・評価ツールの開発を実施している。基盤的技術の開発では、採鉱・揚鉱システムの要素技術開発、将来的な開発コストの低減を目指す海底選鉱システムの基盤的技術の開発を実施した。また、解析・評価ツールの開発では、海底鉱物資源開発事業の経済性を簡易的に評価するための計画支援プログラムの開発を実施した。これらの要素技術並びにツール開発の成果が、今後の海底鉱物資源開発システム

の開発や、事業性の検討に資すれば幸いである。また、海底鉱物資源の開発は国際的にも注目を集めており、海底熱水鉱床を皮切りとして、コバルトリッチクラストやマンガン団塊の開発に向けた動きも進むと期待されている。当所では、海底熱水鉱床を対象とする研究開発において蓄積した知見を活用し、これらの開発に対しても引き続き貢献していきたいと考えている。当所の取り組みが我が国の海底鉱物資源開発の推進の一助となれば幸いである。

#### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費（JP22360373, JP25289323, JP16H04609 及び JP18H01648）の助成を受けて実施されました。関係各位に深く感謝申し上げます。また、本研究の実施にあたりご協力いただいた当所海洋開発系非常勤職員の阿部徹氏、元非常勤職員の笹川広紀氏にお礼申し上げます。

#### References

- 1) Tokimatsu, K., et al.: Energy Modeling Approach to the Global Energy-Mineral Nexus: Exploring Metal Requirements and the well-below 2°C Target with 100 Percent Renewable Energy, Applied Energy, Vol.225 (2018), pp.1158-1175.
- 2) Lusty, P. A. J. and Gunn, A. G.: Challenges to Global Mineral Resource Security and Options for Future Supply, Geological Society, London, Special Publications, Vol.393 (2015), pp.265-276.
- 3) Watari, T., Nansai, K., and Nakajima, K.: Review of Critical Metal Dynamics to 2050 for 48 Elements, Resources, Conservations & Recycling, Vol.155 (2020), 104669.
- 4) Rona, P. A.: The Changing Vision of Marine Minerals, Ore Geology Reviews, Vol.33 (2008), pp.618-666.
- 5) Hein, J. R., Mizell, K., Koschinsky, A., and Conrad, T.: Deep-

- Ocean Mineral Deposits as a Source of Critical Metals for High-and Green-Technology Applications: Comparison with Lan-based Resources, *Ore Geology Reviews*, Vol.51 (2013), pp.1-14.
- 6) Ueda, S., and Okamoto, N.: The Overview of Project for Developing Seafloor Massive Sulfides in the EEZ of Japan, *Journal of MMIJ*, Vol.131 No.12 (2015), pp.610-613. (in Japanese)
- 7) Kawano, S., et al.: Study on Mining System for Seafloor Massive Sulfide Mound and Results of On-Site Excavation Tests in Okinawa Trough, *Journal of MMIJ*, Vol.131 No.12 (2015), pp.614-618. (in Japanese)
- 8) Yamaji, N., et al.: Achievement for Pilot Test of Excavation and Ore Lifting Conducted for Seafloor Polymetallic Sulphides – World’s First Success in Continuous Ore Lifting Test for Seafloor Polymetallic Sulphides -, *Journal of MMIJ*, Vol.135 No.6 (2019), pp.42-51. (in Japanese)
- 9) Neettiyath, U., et al.: Deep-Sea Robotic Survey and Data Processing Methods for Regional-Scale Estimation of Manganese Crust Distribution, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.46 No.1 (2021), pp.102-114.
- 10) Kim, S., et al.: Probability Distribution for Size and Mass of a Nodule in the KR5 Area for the Development of a Manganese Nodule Miner, *Ocean Engineering*, Vol.171 (2019), pp.131-138.
- 11) Qiu, Z., et al.: Geochemical Characteristics of Platinum-Group Elements in Polymetallic Nodules from the Northwest Pacific Ocean, *Acta Oceanologica Sinica*, Vol.39 No.8 (2020), pp.34-42.
- 12) Mukhopadhyay, R., et al.: The Economics of Mining Seabed Manganese Nodules: A Case Study of the Indian Ocean Nodule Field, *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol.37 No.7 (2019), pp.845-851.
- 13) BLUE MINING: Breakthrough Solutions for Mineral Extraction and Processing in Extreme Environments, 2018.
- 14) Snook, B., Drivenes, K., Rollinson, G. K., and Aasly, K.: Characterisation of Mineralised Material from the Loki’s Castle Hydrothermal Vent on the Mohn’s Ridge, *Minerals*, Vol.8 (2018), 576.
- 15) Masanobu, S., et al.: Research on Core Technologies for Subsea Mining, *Papers of National Maritime Research Institute*, Vo.17 No.2 (2017), pp.125-152. (in Japanese)
- 16) Masanobu, S., et al.: Study on Hydraulic Transport of Large Solid Particles in Inclined Pipes for Subsea Mining, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol.139 No. 5 (2017), 051401.
- 17) Takano, S., Ono, M., and Masanobu, S.: Evaluation Method of Pipe Wear for Development of Seafloor Massive Sulfides, *Doboki Gakkai Ronbunshu B3*, Vol. 74 No. 1 (2018), pp.13-26. (in Japanese)
- 18) Masanobu, S., Takano, S., Kanada, S., and Ono, M.: Pressure Loss Due to Hydraulic Transport of Large Solid Particles in Vertical Pipes under Pulsating Flow Conditions, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol.143 No. 6 (2021), 061801.
- 19) Nakajima, Y., et al., 2019, Development of Elemental Technologies for Seafloor Mineral Processing of Seafloor Massive Sulfides, *Proc. the ASME 2019 38<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Scotland, OMAE2019-96040.
- 20) Nakajima, Y., Yamabe, Y., Fujita, T., and Dodbiba, G.: Beneficiation of Seafloor Massive Sulfides by Liquid-Liquid Extraction, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, in press.
- 21) Chujo, T., et al., 2010, Research and Development of Offshore Platforms for SMS Mining: Part 1 An Integrated Design Tool of Offshore Platforms, *Proc. the ASME 2010 29<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, China, OMAE2010-20779.
- 22) Masanobu, S., Kato, S., Ishida, S., and Uto, S., 2010, Research and Development of Offshore Platforms for SMS Mining: Part 2 Conceptual Design of the Platform, *Proc. the ASME 2010 29<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, China, OMAE2010-20836.