

6 海底鉱物資源開発のための計画支援システムの開発

山本 譲司*, 中島 康晴*, 渡邊 充史*, 湯川 和浩*,
正信聡太郎*

Development of Analytical Tools to Support Planning of Seabed Mining Projects

by

YAMAMOTO Joji, NAKAJIMA Yasuharu, WATANABE Mitsushi,
YUKAWA Kazuhiro and MASANOBU Sotaro

Abstract

Japan's exclusive economic zone (EEZ) is the sixth largest in the world, and it is expected to have promising resources such as seafloor massive sulfides, cobalt-rich ferromanganese crusts, and mud with rare-earth elements, and more. To support the planning of seabed mining projects, the NMRI is developing two analytical tools for estimating the availability and cost of developing seabed mineral resources. The availability evaluation tool calculates the amount of unloading to the port and availability considering the sea conditions and maintenance period of the equipment used in the projects. The cost evaluation tool provides indices of benefit-cost analysis such as capital expenditure (CAPEX), operating expense (OPEX), net present value (NPV), and internal rate of return (IRR) in accordance with the initial conditions such as the resource amount and the mining plan including the configuration of the mining platform. These tools are expected to facilitate and support the future development of seabed minerals.

* 海洋開発系

原稿受付 令和 4年4月27日

審査日 令和 4年5月24日

1. はじめに

近年、日本では、低炭素・脱炭素社会を目指す施策が進められている。海洋分野においても、海洋再生可能エネルギーの開発や海運業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なっている。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。¹⁾ 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。^{2,3)} 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、マンガング塊、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。^{4,5)}

我が国では、第2期、第3期海洋基本計画に基づき、排他的経済水域（EEZ）内における海底鉱物資源の調査及び商業化に向けた技術開発を進めている。⁶⁾ 海底熱水鉱床を対象とした事業では、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年に沖縄近海で採鉱・揚鉱パイロット試験を実施し連続揚鉱に成功した。^{7,8)} 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。⁹⁾ 海外では2000年頃から韓国、中国、インドがマンガング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。¹⁰⁻¹²⁾ 欧州では、マンガング塊の開発を目指すBlue Miningプロジェクトが欧州連合のファンドにより2014～2018年にかけて実施された。¹³⁾ 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。¹⁴⁾ 当所では、このような動向を踏まえ、ナショナルプロジェクトの技術支援として安全性評価技術や計画支援技術に係る研究を行っている。また、民間企業や外部の研究機関とも協力し研究開発を実施している。¹⁵⁾ 海底鉱物資源開発事業の事前検討を行う上で開発システムに即した稼働率及び経済性に係る検討を行うことが重要となる。計画支援技術に係る研究では、簡易的な運用で稼働性・経済性の検討が可能となるツールとして計画支援システムの開発を進めている。本稿では、海底鉱物資源開発に係る計画支援システムの開発について報告する。

2. 計画支援システムの開発

当所で開発している計画支援システムは、稼働性評価プログラムと経済性評価プログラムから構成される。

海底熱水鉱床やコバルトリッチクラストなどの鉱物資源は、海底に固着しているため、採掘機等を用いて採掘する必要がある。そして、採掘した鉱物は洋上施設に揚収され、運搬船（以降、シャトル船と記す）により陸上施設へと輸送されることになる。代表的な事例として、図-1に海底熱水鉱床

の開発システム概念図を示す。

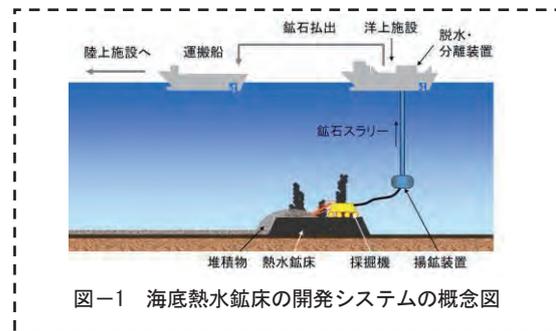


図-1 海底熱水鉱床の開発システムの概念図

2.1 稼働性評価プログラムの開発

本プログラムは、開発海域の海気象特性を考慮し、開発事業の稼働率や事業を構成する各開発作業に要する時間を推算するプログラムである。対象となる開発作業として、海底資源の採掘作業から洋上施設への揚収、シャトル船への払出、港での荷役までを考慮している。本プログラムの解析手順フローを図-2に示す。操作を簡便にするため、マイクロソフト社 EXCEL VBA にて作成した。

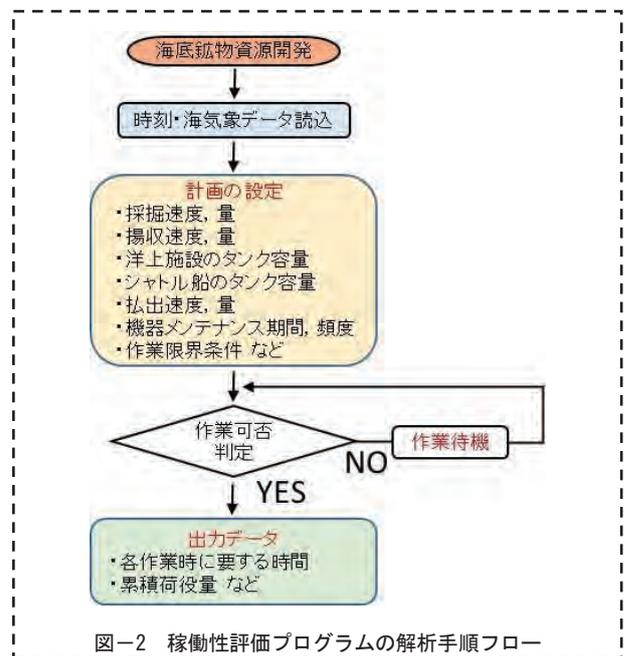


図-2 稼働性評価プログラムの解析手順フロー

海気象データは、読込形式に倣い作成した波高・風速データを使用する。また、一般財団法人日本気象協会が提供する1時間毎の波高・風速情報を読み込むこともできる。計画の設定に必要な情報は、資源量、採掘・揚収・払出に係る速度と量、想定母港までの距離、シャトル船の船速である。また、作業開始可否の判定条件として、採掘機器等の投入及び揚収時・シャトル船の接舷及び離舷時・シャトル船への払出時の限界波高と風速、出入港の制限時間帯、洋上施設及びシ

ャトル船のタンク容量等を設定することができる。過去の知見を基に決定した判定条件のデフォルト値が用意されており、対象海域や使用機器に応じて、設定値を変更することも可能である。

これらの情報を基に、最短で1時間毎の海底から洋上施設への揚収量、洋上施設及びシャトル船の貯蔵量、払出量、港における荷役量を算出することが可能である。作業の可否判定は以下のように設定した。1)洋上施設のタンク容量を超える前に、採掘・揚収作業を停止する。2)洋上施設のタンク貯蔵量が毎時払出量よりも少なくなった場合は、払出を中止し、シャトル船は想定母港へと向かう。3)想定母港での荷役が終了次第、対象海域に戻り、接触し払出を受ける。シャトル船の出港判断は、洋上施設への離接触時間、洋上施設からの払出時間を確保した上で離接触が可能な海気象条件であること等とした。これらの判定条件及び設定に従い、累積荷役量が資源量に達するまで計算を繰り返す。

出力情報は、時間毎の採掘量、揚収量、払出量、荷役量、採掘に係る作業状況（採掘中、待機中、メンテナンス中など）、洋上施設の作業状況（揚収中、待機中、メンテナンス中など）、シャトル船の作業状況（航行中、待機中、払出中など）、累積揚収量、累積荷役量である。これら情報により、各作業に占める時間、稼働率、生産期間を得ることができる。併せて、時系列グラフ、作業時間占有率図を表示する。

計算結果の表示事例として、累積荷役量の時系列を図-3に、採掘作業における時間占有率図を図-4に示す。

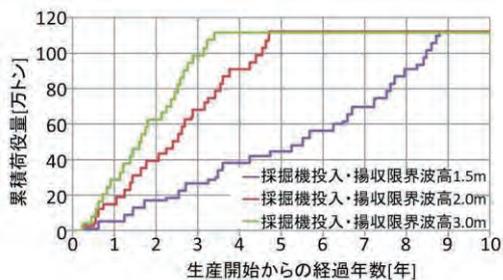


図-3 累積荷役量の時系列グラフ事例

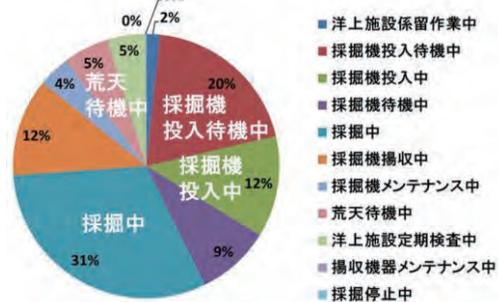


図-4 採掘作業における占有率図事例

本プログラムを用いることにより、稼働率を下げる要因（作業）とその条件が明確となり、稼働率を向上させる対策

検討を行うことが容易となる。また、対象海域の海気象特性を考慮した稼働率は、次節で記載する経済性検討に資する情報となる。

2. 2 経済性評価プログラムの開発

海底鉱物資源開発の事業化検討に資するため、開発事業の経済性を簡易的に評価する経済性評価プログラムの開発を実施した。当所では、これまでに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た。¹⁶⁻¹⁷⁾ 本研究では、計算上の負荷を軽減し、海底鉱物資源開発に特化した計画支援プログラムを開発した。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、多くの設定値を任意に調整できるようになっている。

本プログラムの解析手順フローを図-5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、日本周辺海域の水深データを収録した水深 DB 及び日本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。簡便な操作性を考慮し GUI (Graphical User Interface) を採用した。

計画の策定は、プログラムの起動画面に沿って、採掘地、集積港、生産計画、生産システムについて入力、又は選択することにより設定できる。採掘地及び集積港は、画面に表示される海域マップ上 (図-6) で選択することにより設定でき、航路設定と輸送距離が算出される。また、採掘地の水深情報が表示される。計画設定画面では、生産計画の情報として稼働期間、生産量、荷役間隔などが入力でき、併せて生産システムの設定として、洋上施設 (本プログラムではプラットフォームと記す) の形式、位置保持の形式、輸送方法が選択できる。設定した条件により、洋上施設の仕様や位置保持装置の基数と出力などが算定される。また、シャトル船を使用した輸送方法を選択した場合は、シャトル船の仕様も算定される (図-7)。現状は、洋上施設は船型、位置保持の形式は DPS (Dynamic Positioning System) のみ設定可能である。

設定した生産計画に応じ、内蔵された各種の算定式により年毎の設備投資費用 (CAPEX)、運営費 (OPEX)、総収入、総コスト、総利益、正味現在価値 (NPV)、内部収益率 (IRR) の事業性評価指標を算出する。図-8 に評価画面を示す。

なお、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。

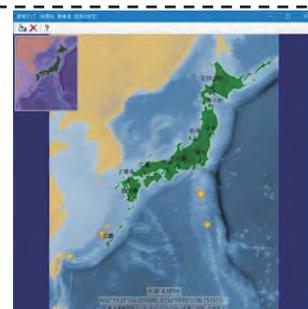


図-6 海域マップ

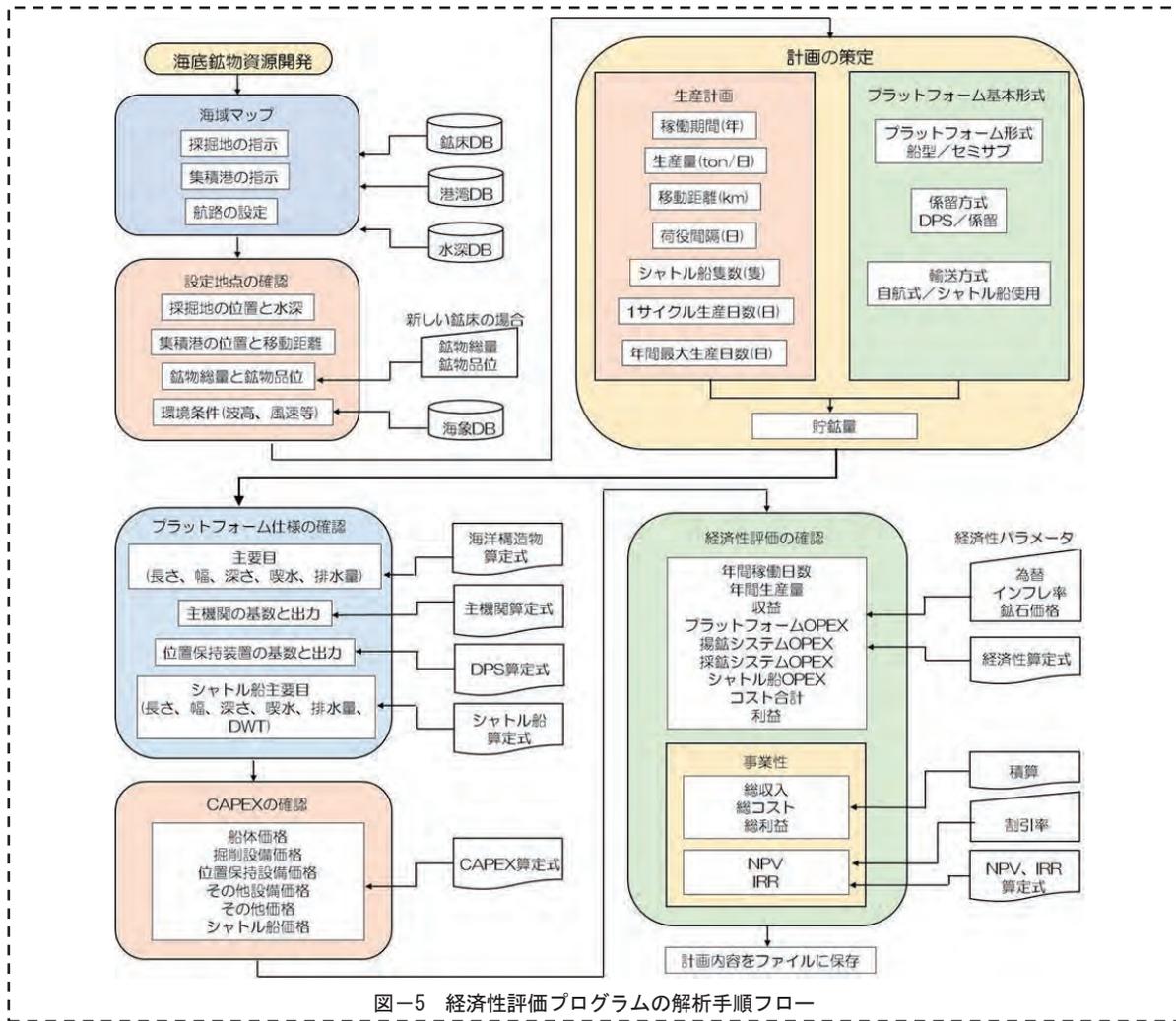


図-5 経済性評価プログラムの解析手順フロー



図-7 プラットフォーム仕様画面

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	MMS 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	MMS 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	MMS 41.6	41.8	44.2	42.2	48.2	42.7	42.9	45.3	
掘削システム CAPEX	MMS 44.4								
掘削システム OPEX	MMS 4.4								
採鉱システム CAPEX	MMS 45.6								
採鉱システム OPEX	MMS 4.6	4.6	4.6	4.6	4.7	4.7	4.7	4.7	
シャトル船 CAPEX	MMS 27.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
シャトル船 OPEX	MMS 14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	
コスト合計	MMS 65.1	65.3	67.7	65.8	71.9	66.3	66.6	69.1	
利益	MMS 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
	総コスト	1,250	億円				IRR	12.4	%

図-8 経済性評価画面

本プログラムを用いることにより、海底鉱物資源開発の経済性を簡易的に評価できる。なお、本プログラムには海底鉱物資源として海底熱水鉱床とコバルトリッチクラストの賦存位置情報も収録されている。

今後、使用データの充実を図るとともに、前節で記載した稼働性評価プログラムとの統合を行い、対象海域の海気象特性に基づき計算した稼働率を経済性評価に反映することを計画している。

4. まとめ

当所では、日本近海に賦存している有用金属を含む海底鉱物資源の開発に資することを目的として、海底鉱物資源の開発事業における稼働性及び経済性を評価する、計画支援ツールの開発を進めている。

現在、輸入に依存しているレアメタル等の希少鉱物資源について、経済安全保障の観点から、EEZ内に賦存する海洋資源を採取・回収が検討されている。また、国際的にも、海底熱水鉱床、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、支援ツールの開発と併せて、海底鉱物資源の回収に係る技術の開発につい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

本研究の実施にあたりご協力頂きました当所海洋開発系非常勤職員阿部徹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 Land-based Resources, *Ore Geology Reviews*, Vol.51 (2013), pp.1-14.
- 6) Cabinet Office: Basic Plan on Ocean Policy, (2013,2018) <https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan.html>
- 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) 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 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, China, OMAE2010-20779.
- 17) 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 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, China, OMAE2010-20836.