

1 海洋開発のためのマリンオペレーションと資源開発技術に関する研究への取り組み

山本 譲司*, 湯川 和浩*, 大坪 和久*, 高野 慧*
渡邊 充史*, 正信聡太郎**

Research Efforts Towards Marine Operations and Resource Development Technology for Ocean Development

by

YAMAMOTO Joji, YUKAWA Kazuhiro, OTSUBO Kazuhisa
TAKANO Satoru, WATANABE Mitsushi and MASANOBU Sotaro

Abstract

Due to the increase in policies aimed towards a low-carbon and decarbonized society in Japan, new marine facilities such as those for offshore wind power generation and carbon dioxide capture and storage (CCS) are needed in the maritime industry. Toward this end, the NMRI is conducting research on technologies for evaluating the safety and availability of marine operations. On the other hand, in the field of deep-sea mineral resource development, Japan's Exclusive Economic Zone (EEZ) is the sixth largest in the world, and promising resources such as seafloor massive sulfides, cobalt-rich ferromanganese crusts, and mud containing rare earth elements have been discovered. Thus, we are conducting research to support projects in the development of seabed resources from a technical perspective. This paper introduces the research achievements thus far and future efforts related to the evaluation and support technology for marine operations and deep-sea mineral resource development.

* 海洋開発系, ** 海洋先端技術系

原稿受付 令和 5年 4月 27日

審査日 令和 5年 5月 26日

1. はじめに

近年、我が国では、低炭素・脱炭素社会を目指す施策が重点的に進められている。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。当所では、2016年度に開始した第1期中長期計画に基づき、海洋エネルギー・鉱物資源開発システムの総合安全性評価技術の開発に関する研究を進めてきた。近年では、洋上風力発電施設に係る各種作業船による設置・維持管理技術や CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)におけるマリンオペレーションにおける評価技術に関する研究を実施している。

また、第2期、第3期の海洋基本計画りに基づき、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が進められている。海底熱水鉱床の分野では、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が行われ、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^{2,3)}。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されている⁴⁾。海外では、マンガン団塊の開発を中心に研究開発が進められており、2022年にハワイ南東のクラリオン・クリップトン断裂帯 (Clarion-Clipperton Fracture Zone ; CCZ)にて大規模な採掘試験が行われた⁵⁾。このような海洋鉱物資源開発の動向を踏まえ、当所ではナショナルプロジェクトの技術支援として安全性評価や計画支援技術に係る研究を実施している。

本稿では、第1期中長期期間におけるマリンオペレーション及び海洋鉱物資源開発に係る技術に関する研究成果と 2023年度からの第2期中長期計画にて取り組む研究について紹介する。

2. マリンオペレーションに係る取り組み

第1期中長期期間においては、マリンオペレーションに関する研究として、作業船の洋上クレーン作業や洋上風力発電アクセス船 (CTV: Crew Transfer Vessel) , LNG バンカリング等を対象とした稼働性及び安全性評価に資する研究を実施した。本稿ではその研究成果の概要を報告する。

2.1 洋上クレーン作業の高度化

構造物や施設を海底または海上に設置するためには、クレーン作業を必要とする場合がほとんどである。特に最近では構造物が複雑化及び大型化していることから、排水量の異なるクレーン船を2隻用いた同時作業や、構造物の柔軟性を考慮して多数の吊点を設けてクレーン作業を行うなど、求められる作業が高度化している。当所では、クレーン作業における多目的作業船の波浪中運動評価に関する研究を実施し、評価技術を確立した^{6,7)}。この評価技術を活用することで、クレーンの吊式、吊点位置、吊荷の着水前後での多目的作業船の波浪中運動性能 (ロールの固有周期の変化等) に及ぼす影響について明らかにした。また、これらの技術知見を応用し、

図-1に示すような水槽試験を実施し、排水量の異なる2隻の作業船を使った協調クレーン作業に関する波浪中連成運動評価ツールを開発した⁸⁾。

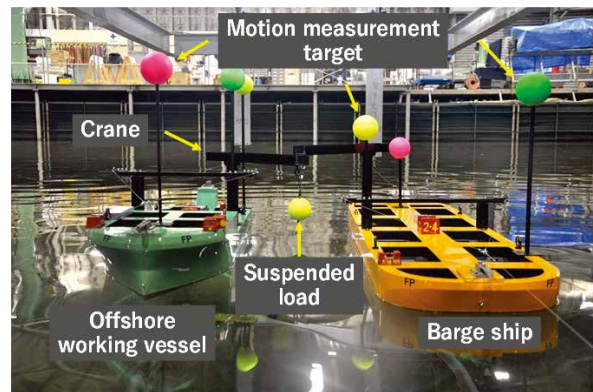


図-1 協調クレーン作業を対象にした水槽試験

2.2 CTVの風車タワーへの乗り移り評価

洋上風力事業を進めるためには、運用・維持管理コストを最小化することがカギとされている。運用・維持管理コストの約半分は船舶に関連する経費であり、中でも洋上風力発電施設に向かうための CTV に関する経費の占める割合は大きい⁹⁾。昨今、欧州では、双胴型高速船が CTV として使用されることが多い。作業現場では通常、CTV の船首部を風車タワーに強く押し付けながら作業員の乗り移りが行われているが、波浪中動揺する CTV から風車タワーに作業員が乗り移ることは容易ではない。また、船首フェンダーと風車タワー間に生じる摩擦が波浪中運動に与える影響については、これまであまり検討が行われていない。そこで当所では、風車タワーに船首接舷した CTV の波浪中運動評価に関する研究を実施した。図-2に水槽試験の様子を示す。双胴型高速船を対象に船首部から風車タワーへの人員の乗り移り作業を想定した¹⁰⁻¹¹⁾。

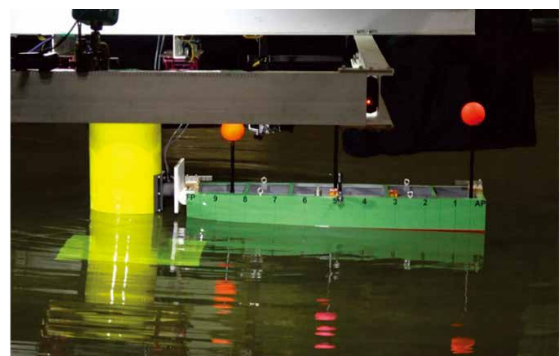


図-2 船首接舷した CTV の水槽試験

船首部が風車タワーから離れると、重大な事故が発生することになるため、船首部がタワーから離れることがないよ

う、推進器によるスラストで一定の押し付け力を加える必要がある。その時の押し付け力が乗り移り部の上下運動へ与える影響を確認したものを図-3に示す。大きな押し付け力は船首部の上下運動を抑制する効果があることが分かる。これらの水槽試験結果との比較検証を行いながら、船首部の上下スリップの発生可否を評価するための数値解析ツール等を開発した。

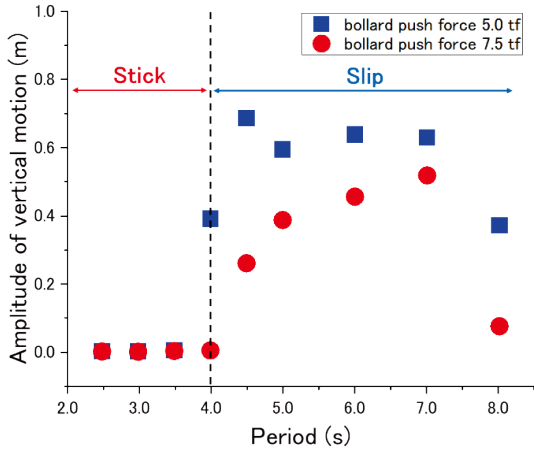


図-3 船首乗り移り部の上下運動振幅（押し付け力影響）

2. 3 次世代船用燃料バンカリングの安全性・稼働性評価

国際海事機関による環境規制が進められる中、CO₂排出削減に貢献する次世代船用燃料に向けた検討が加速している。国土交通省では平成24年度に天然ガス燃料船の早期実用化に向けた総合対策事業に着手し、天然ガス燃料船とバンカー船間のLNG燃料移送に係る運用ガイドラインとオペレーションマニュアルの策定を行っている¹²⁾。

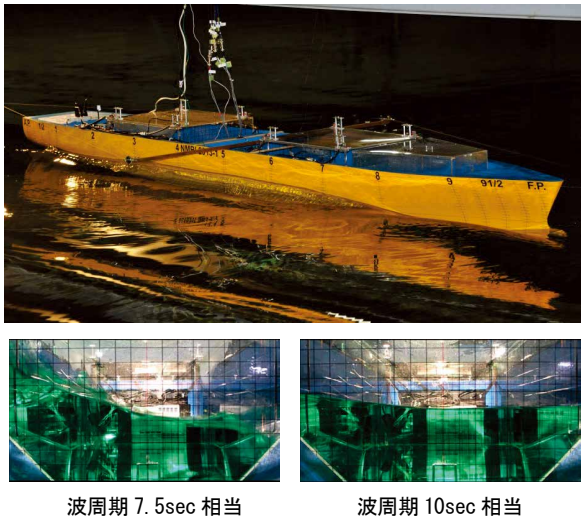


図-4 タンク内遊動水影響を考慮した波浪中動揺評価試験

このような背景を踏まえ、当所ではLNGバンカリングを対象として、大型の液体貨物タンクや燃料タンクを有する浮体（天然ガス燃料船およびバンカー船）、係船/係留索、防舷

材、払い出し装置（フレキシブルな移送ホース）で構成されるシステムによるLNG移送オペレーションに対する限界稼働条件や安全性・稼働性について検討し、その評価手法を構築した¹³⁾。評価手法検証のために実施した水槽試験の様子を図-4に示す。

3. 海洋資源開発技術に係る取り組み

海洋資源開発、主に海底熱水鉱床開発を対象としたシステムについて、安全性評価に資する研究と開発計画を支援するためのツールの開発を行った。

3. 1 評価技術の開発

海底熱水鉱床開発を対象としたシステムは、図-5に示すとおり、洋上施設、揚鉱管、移送管、採掘機で構成されることが想定される。各システムは海気象による外的な影響と他のシステムとの運動影響、鉱物を移送することによる挙動影響など複数の動的な影響要因の中で使用されることとなる。そこで、これらの影響を踏まえた評価手法の開発が必要となる。当所では、鉱石スラリー移送中の揚鉱管や移送管の挙動評価、内部流影響や安全性評価に関する研究を実施した。図-6に採掘機と揚鉱管を接続する移送管の挙動評価事例を示す。挙動評価を行うためには、実施の現象を把握し、それを数値解析により表現することが必要となる。数値解析により現象を表現することにより、実機ベースへの検討や多岐に亘る条件による検討が可能となる。

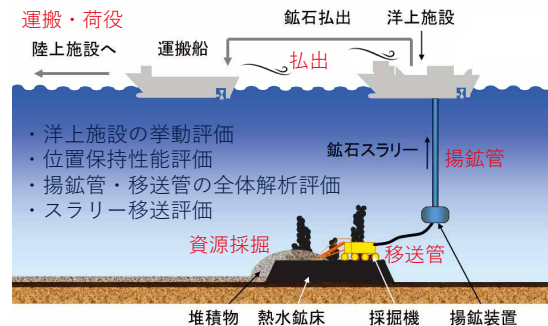


図-5 海底熱水鉱床の開発システムの概念図

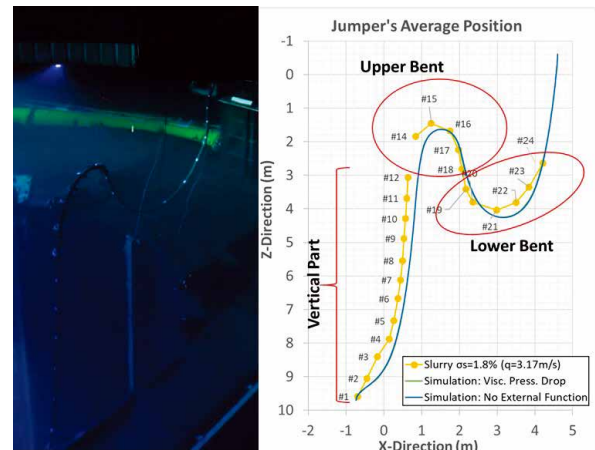


図-6 移送管挙動に係る水槽試験と解析事例

3. 2 計画支援ツールの開発

計画支援技術に係る研究では、海底熱水鉱床を対象に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行った。

稼働性評価プログラムは、開発対象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。なお、本プログラムは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。

一方、経済性評価プログラムは、簡便な操作性を考慮し GUI (Graphical User Interface) を採用した。採掘地、集積港、生産計画、生産システムについて、場面上で入力又は選択することにより設定できる。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自動で算定される。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) の事業性評価指標が算出できる。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。

両プログラムを簡易的に統合した支援プログラムを作成した。統合することにより 共通する項目 (対象海域、荷役場所、システム構成、稼働率等) を共有することができ、統一した条件のもと、海底熱水鉱床開発の稼働性と経済性を両面から検討することが可能となった (図-7 参照)。



図-7 支援プログラムの概要

4. 今後の取り組み

第2期中長期期間にてマリンオペレーション及び海洋資源開発に係る取り組みについて記載する。

4. 1 マリンオペレーションに係る取り組み

海洋再生可能エネルギー等の地球環境問題の解決に資する技術への産業界の注目度は年々大きくなっている。また、石油・天然ガスに代わるエネルギーとしての洋上風力発電などの発電技術だけでなく、二酸化炭素の海底下貯留のような海洋 CCS や次世代船用燃料船への沖合いでのバンカリングも今後欠かせない技術になる。当所では、海洋石油・天然ガ

ス開発分野でこれまでに培った浮体、位置保持に関する安全性・稼働性評価技術やフローアシュアランス評価技術をコア技術とし、必要に応じてそれら技術を有機的につなげながら、研究を総合的に推進していく。

具体的には次のような研究テーマを進め、研究成果の社会実装を目指していく。

- ・浮体式風力発電施設を設置する際の最適作業を提案するため、洋上風力発電において重要となる設置、維持管理技術に関連する要素技術の研究を実施し、今後必要になる数値計算プログラム等を開発
- ・海洋 CCS プロジェクトで必要となる浮体、配管内部流評価に関する数値計算プログラム等を開発
- ・次世代燃料バンカリングや海洋 CCS を対象として、浮体や係留/係船索、防舷材や払い出し装置等で構成されるシステムによるマリンオペレーションの安全性・稼働性の評価精度を向上させるため、高精度な2船体連成運動の推定手法を構築

4. 2 海洋資源開発技術に係る取り組み

今後の海洋資源開発は、マンガン団塊やレアアース泥など水深 4,000m 以深の大水深での開発へと進む流れとなっている。当所では、大水深化に伴い必要とされる技術として、揚鉱に係る技術と計画支援に係る技術に関する研究を中心に行う計画である。

揚鉱技術では、過年度より実施している洋上施設、揚鉱管・移送管の安全性評価技術に加え、内部流影響を含めたエアリフト方式による評価技術に係る研究を行う。計画支援技術では、第1期中長期期間にて作成した支援プログラムをもとに、評価対象を本邦 EEZ 内で開発予定の海底熱水鉱床以外の海底鉱物資源にまで拡充を図る。拡充するためには以下の情報を取得する必要がある。

- ・洋上施設、位置保持、ライザーシステム、輸送方法の選択肢の拡充
- ・選択機器の運用条件、交換頻度、概算価格情報の充実
- ・水深、海域に適したシステム構成の選定手法の構築 等

上記情報の取得には、従来研究を続けているコア技術である浮体システム、位置保持システム、ライザーシステム、サブシーシステムに係る評価技術の成果を反映することとなる (図-8 参照)。本支援技術は、コア技術の研究成果を集約したものになると考えている。加えて、プログラム言語の統一、運用の利便性向上のための可視化対応なども必要に応じ実施する予定である。

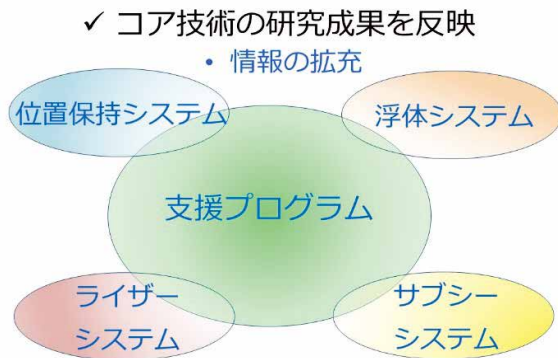


図-8 支援プログラムとコア技術の関係

5. まとめ

第1期中長期期間において実施したマリンオペレーションに係る安全性・稼働性評価と海洋資源開発に係る技術支援に関する研究成果について紹介した。第1期中長期計画の研究成果や本邦の施策動向を踏まえ、2023年度から7カ年における第2期中長期計画にて実施予定の研究について記載した。

今後、海洋では、洋上、海中、海底を問わず多岐に亘り開発、利用が進められ、対象事業に適した評価・支援技術が必要不可欠となる。また、海気象の厳しい海域や大水深における開発も進められている。当所では、これらの動向を踏まえ、海洋開発に必要な技術に係る研究を積極的に実施していく所存である。

References

- 1) Cabinet Office: Basic Plan on Ocean Policy, (2013,2018)
<https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/plan/plan.html>
- 2) 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)
- 3) 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).
- 4) 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.
- 5) The Metals Company: NORI and Allseas Lift Over 3,000 Tonnes of Polymetallic Nodules to Surface from Planet’s Largest Deposit of Battery Metals, as Leading Scientists and Marine Experts Continue Gathering Environmental Data, Press Release (November 14, 2022).
- 6) 大坪和久, 他4名: クレーン作業中の多目的作業船と吊荷の波浪中連成運動評価, 日本船舶海洋工学会論文集, 第30号(2019), pp.187-200.
- 7) 大坪和久, 長谷川賢太: クレーン作業中の多目的作業船と吊荷の波浪中連成運動評価 第2報 吊荷が着水した直後での波浪中連成運動解析, 日本船舶海洋工学会論文集, 第33号(2021), pp.173-190.
- 8) Otsubo, K.: On Wave-induced Coupled Motion During Cooperative Multi-crane Lifting Operation with Two Vessels, International Journal of Offshore and Polar Engineering. (to be published)
- 9) Dalgic, Y., et al: Investigation of Optimum Crew Transfer Vessel Fleet for Offshore Wind Farm Maintenance Operations, Wind Engineering, Vol.39 No.1 (2015), pp.31-52.
- 10) 大坪和久: 風車タワーに船首接触したCTVの波浪中運動評価, 第22回海上技術安全研究所研究発表会(2022), pp.177-178.
- 11) Otsubo, K.: On the Stick/slip Phenomenon of a Crew Transfer Vessel Pushing its Bow Against an Offshore Wind Tower During a Transfer Operation, Proc. 33rd International Offshore and Polar Engineering Conference (2023). (accepted)
- 12) 国土交通省: Ship to Ship方式のLNG移送オペレーションガイドライン(2013).
- 13) 湯川和浩, 他3名: 金属内管ホースを用いたShip-to-Ship方式によるLNGバンカリングの安全性評価, 日本船舶海洋工学会論文集, 第31号(2020), pp.107-122.