

## 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

正信聡太郎\*, 湯川 和浩\*\*, 齊藤 昌勝\*\*, 佐藤 宏\*\*\*, 大坪 和久\*\*, 長谷川賢太\*\*,  
渡邊 充史\*\*, 石田 圭\*\*, 山本 譲司\*\*, 高橋一比古\*\*, 中島 康晴\*\*, 金田 成雄\*\*,  
小野 正夫\*\*, 藤原 智\*\*, 高野 慧\*\*, 荒木 元輝\*\*, 山本マルシオ\*\*,  
松沢 孝俊\*\*\*\*, 下田 春人\*\*\*\*, 若生 大輔\*\*\*\*, 山田 安平\*\*\*\*\*,  
松井 貞興\*\*\*\*\*, 伊藤 博子\*\*\*\*\*, 石村恵以子\*\*\*\*\*,  
益田 晶子\*\*\*\*\*, 馬 驍\*\*\*\*\*

### Research on Comprehensive Safety Evaluation Technologies for Marine Energy and Mineral Resources Development Systems

by

MASANOBU Sotaro\*, YUKAWA Kazuhiro\*\*, SAITO Masakatsu\*\*, SATO Hiroshi\*\*\*,  
OTSUBO Kazuhisa\*\*, HASEGAWA Kenta\*\*, WATANABE Mitsushi\*\*, ISHIDA Kei\*\*,  
YAMAMOTO Joji\*\*, TAKAHASHI Ichihiko\*\*, NAKAJIMA Yasuharu\*\*, KANADA Shigeo\*\*,  
ONO Masao\*\*, FUJIWARA Tomo\*\*, TAKANO Satoru\*\*, ARAKI Motoki\*\*,  
YAMAMOTO Marcio\*\*, MATSUZAWA Takatoshi\*\*\*\*, SHIMODA Haruhito\*\*\*\*\*,  
WAKO Daisuke\*\*\*\*, YAMADA Yasuhira\*\*\*\*\*, MATSUI Sadaoki\*\*\*\*\*, ITOH Hiroko\*\*\*\*\*,  
ISHIMURA Eiko\*\*\*\*\*, MASUDA Akiko\*\*\*\*\*, and MA Xiao\*\*\*\*\*

#### Abstract

For seven years (FY 2016-2022), the National Maritime Research Institute (NMRI) has prioritized research on establishing core technologies and safety evaluation methods for offshore production systems in order to provide technological support for advancing national R&D program and promoting the growth of marine industries. Through this research, NMRI has established core technologies for safety and performance evaluations of the systems for developing marine mineral resources. Subsequently, NMRI collaborated with private Japanese companies in a national project to investigate technical problems in the mining system for commercial use in the development of seafloor polymetallic sulphides. In addition, NMRI carried out research on offshore production systems in harsh environments. This paper provides an overview of these studies and their results.

---

\* 海洋先端技術系 (研究当時 海洋開発系), \*\* 海洋開発系, \*\*\* 海洋開発系 (研究当時), \*\*\*\* 流体設計系,  
\*\*\*\*\* 流体設計系 (研究当時), \*\*\*\*\* 構造・産業システム系, \*\*\*\*\* 海洋リスク評価系,  
\*\*\*\*\* 環境・動力系

原稿受付 令和 5年 10月 16日

審査日 令和 5年 11月 15日

## 目 次

1. はじめに	28
2. 海底熱水鉱床開発等のナショナルプロジェクトの技術支援	29
2.1 揚鉱・集鉱技術	29
2.1.1 水中線状構造物の応答評価	29
2.1.2 配管の内部流評価	31
2.1.3 耐摩耗性向上に関する検討	34
2.2 海底鉱物処理技術	35
2.2.1 高圧条件における接触角測定による適用可能性の検討	35
2.2.2 スラリー中の鉱石粒子の品位計測手法の検討	36
2.3 計画支援技術	38
2.3.1 稼働性評価プログラムの開発	39
2.3.2 計画支援（経済性評価）プログラムの開発	40
2.3.3 統合化検討	41
2.4 実海域での実証	42
2.4.1 採鉱・揚鉱パイロット試験の概要	42
2.4.2 採鉱・揚鉱パイロット試験における当所の取り組み	44
3. 厳環境下に設置される海洋資源開発システムの安全性・稼働性評価手法の構築	47
3.1 厳海象下で使用される浮体等の安全性評価	47
3.1.1 氷海資源開発におけるマネージドアイス中の全体氷荷重推定	47
3.1.2 海氷による氷海商船省エネ付加物への衝突評価	49
3.2 SURF システムの installation 技術等の安全性評価	50
3.2.1 波浪中連成運動評価（単吊の場合）	50
3.2.2 波浪中連成運動評価（共吊の場合）	52
3.3 SURF システムにおける管内流の健全性評価	53
3.3.1 アスファルテンの付着量評価に関する研究	53
3.3.2 ガスハイドレートに関する研究	55
4. おわりに	57
謝 辞	57
References	58

## 1. はじめに

近年、海洋再生可能エネルギー・海洋資源開発の促進、海洋開発産業の育成ならびに国際ルール形成への戦略的関与を通じた我が国海事産業の国際競争力強化が求められている。一般に、海洋開発は民間での開発リスクが過大であるため、海洋開発推進、海洋産業の育成に向けた国と民間との連携が重要である。

2018年5月に第3期海洋基本計画<sup>1)</sup>が閣議決定され、その主要施策の一つに「海洋の産業利用の促進」が挙げられた。当該施策において、メタンハイドレートや海底熱水鉱床等の海洋資源は、将来の商業化への移行が可能となるよう、産業化のための技術開発を着実に進めていくことが規定された。また、将来見込まれる海洋石油・天然ガス開発市場の拡大に向けて民間企業が技術力を高めることができるための支援を継続することも規定された。

そのような状況のもと、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所（以降、当所と表記）では、海洋基本計画等の国の施策に沿ったナショナルプロジェクト、海洋産業育成等への技術的貢献を行うとともに、実際の開発・生産を担う民間企業への技術的支援を行うため、2016～2022年度の中長期計画期間中

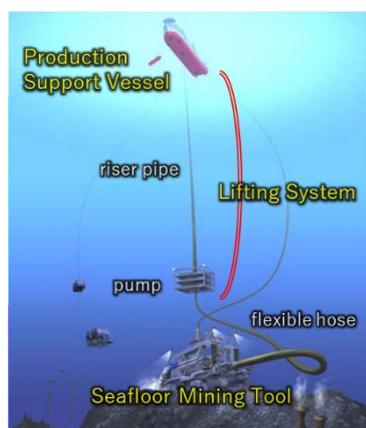
に、海洋資源開発に係る生産システム等の基盤技術の開発及び安全性評価手法の確立に関する重点研究を実施した。具体的には、海底鉱物資源開発のための基盤技術に関する研究を行うとともに、海底熱水鉱床開発に係るナショナルプロジェクトに民間企業と共同で参画した。さらに、民間企業の海洋資源開発・輸送等に係るビジネスへの参入を支援するために厳環境下に設置される海洋資源開発システムを対象とした研究を行った。

本稿では、これらの概要について紹介する。

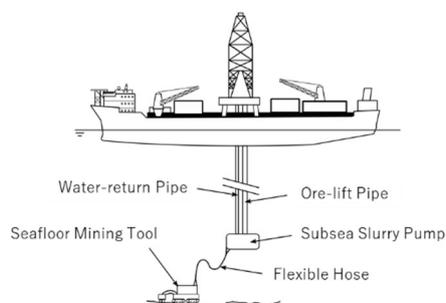
## 2. 海底熱水鉱床開発等のナショナルプロジェクトの技術支援

近年、新しい金属鉱物資源として海底熱水鉱床が注目されている。我が国においても、沖縄海域及び伊豆・小笠原海域で海底熱水鉱床が発見されており、海洋基本計画（第2期<sup>2)</sup>：2013年4月閣議決定、第3期<sup>1)</sup>：2018年5月閣議決定）に基づき、2020年代後半以降に民間企業が参画する商業化を目指したプロジェクトが開始されるよう、技術の確立に向けた取り組みが推進されている。海底熱水鉱床が発見されている海域は水深が深く（700～2,000m）、台風や黒潮の通過もある荒れた海域であるため、安全で確実に採鉱できるシステムを開発する必要がある。採鉱システムのイメージを図1に示す。しかしながら、世界的に開発事例がないため、採鉱システム設計技術の確立が急務となっている。

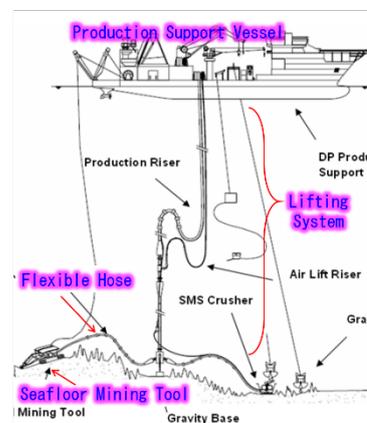
そのため当所では、2016～2022年度の期間で、重点研究として揚鉱・集鉱技術、海底鉱物処理技術、計画支援技術に関する研究を行った。さらに、経済産業省の委託を受けて独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構（当時、独立行政法人石油・天然ガス金属鉱物資源機構、以降、JOGMECと表記）が実施した海底熱水鉱床開発に係る調査事業に民間企業と共同で参画して、重点研究で得られた成果も活用しながら、商業化に向けた採鉱システムの要素技術に関する検討を行った。本章では、これらの概要について紹介する。



(a) 水中ポンプ方式<sup>3)</sup>



(b) 水中ポンプ方式<sup>4)</sup>



(c) エアリフトポンプ方式<sup>5)</sup>

図1 採鉱システムのイメージ

### 2.1 揚鉱・集鉱技術

#### 2.1.1 水中線状構造物の応答評価

##### (1) 揚鉱管・戻り管（複数本で構成されるリジッドパイプ）

商業規模での海底鉱物資源開発を考えたとき、鉱石とともに船上に揚げられた揚鉱水は、戻り管を介して海底付近に放流する可能性がある<sup>6)</sup>。そのような場合、採鉱システムは揚鉱管に加え、戻り管が必要となり、複数本の水中線状構造物で構成されることになる。ただし現時点では、揚鉱水の海底付近への放流に対する法制度面の整備ができていないため、揚鉱水の取り扱い方針の決定が商業化に向けての大きな課題となっていることに留意する必要がある。複数のパイプが近接して配置される場合、流体力学的な相互作用により、パイプ単独の場合よりも複雑な挙動を示すことが予想される<sup>7)</sup>。

揚鉤管・戻り管の構成として最も単純なものは、同程度の内径となる2本管である。動揺する2本円柱を対象に模型試験を実施して、相対運動を加味した振動パターン分けを行って2本円柱のVIV (Vortex Induced Vibration ; 渦励振) 推定に必要な振動パターン毎のVIV 流体力データベースを作成した (図2 参照) <sup>8)~10)</sup>。また、2本管の揚鉤ユニットから成る採鉤システムを対象に、揚鉤ユニットの強度評価を実施して、強度の視点から最適な揚鉤ユニットの設計手法について検討した <sup>11), 12)</sup>。

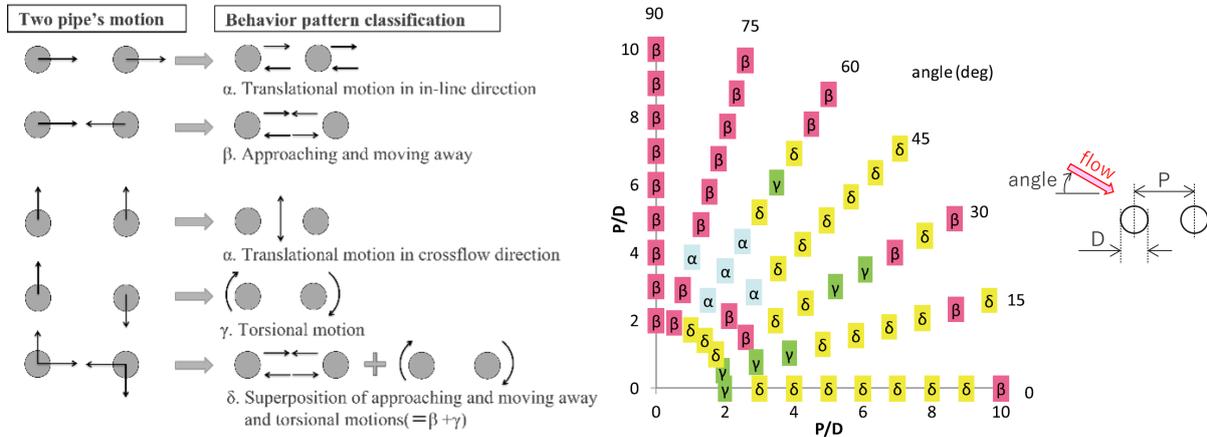


図2 一様流中における2本円柱の振動パターン <sup>10)</sup>

揚鉤管・戻り管の構成としては、戻り管を小径として揚鉤管周辺に複数本配置するものも考えられる。そこで揚鉤管1本・戻り管2本で構成される揚鉤ユニットを対象に、CFDを用いた複数本パイプのVIVに関する数値解析手法を検討するとともに、複数本パイプの挙動解析手法を構築した (図3, 図4 参照)。さらに、これらの検討の過程で複数本パイプのVIV低減法を考案した [特願 2022-110346]。

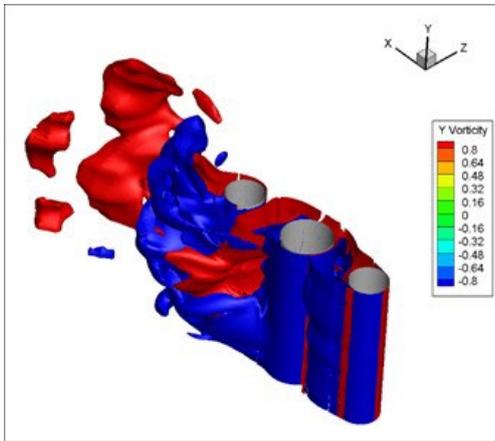


図3 複数本パイプのCFD解析事例 (パイプ周りの渦度分布)

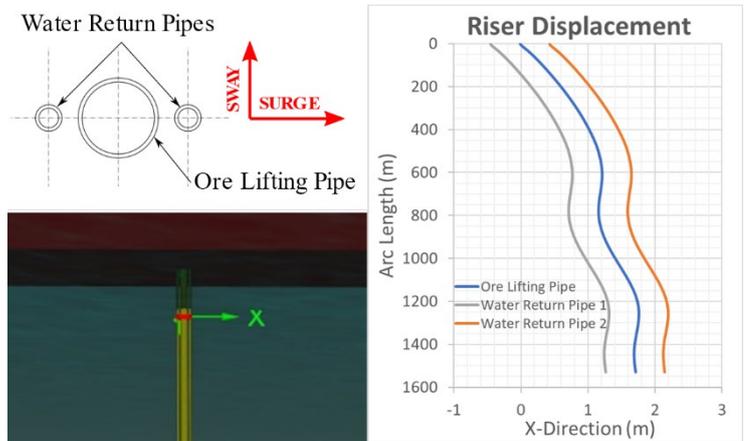


図4 複数本パイプの挙動解析事例

(2) 移送管 (フレキシブルホース)

図1に示したとおり、採掘ユニットと揚鉤ユニットの接続にはフレキシブルな移送管の適用が検討されている。移送管の形状は、採鉤母船の動揺や採掘ユニットの移動により時々刻々と変わり、さらに内部流の影響を受ける。形状によっては、移送管が海底に接触したり、管内部で閉塞が生じる恐れがあることから、移送管挙動を正確に把握することが重要である。そこで、内部流を考慮した移送管挙動解析プログラムを開発し、スラリー移送時を想定した水槽試験結果との比較を通じて、開発したプログラムを検証した (図5, 図6 参照) <sup>4), 13), 14)</sup>。時間平均成分については計算結果と試験結果は良い一致を示しているが、動揺成分については上端近傍を除いて一致度が良くない。本プログラムでは内部流を均質流と仮定してモデル化しているが、実際は管傾斜によって内部流の密度

分布は一定とならないことから均質流の仮定では不十分であると考えられるため、今後は 2.1.2 項で述べる内部流評価モデルを適用して、より現実に則したプログラムを開発する計画である。

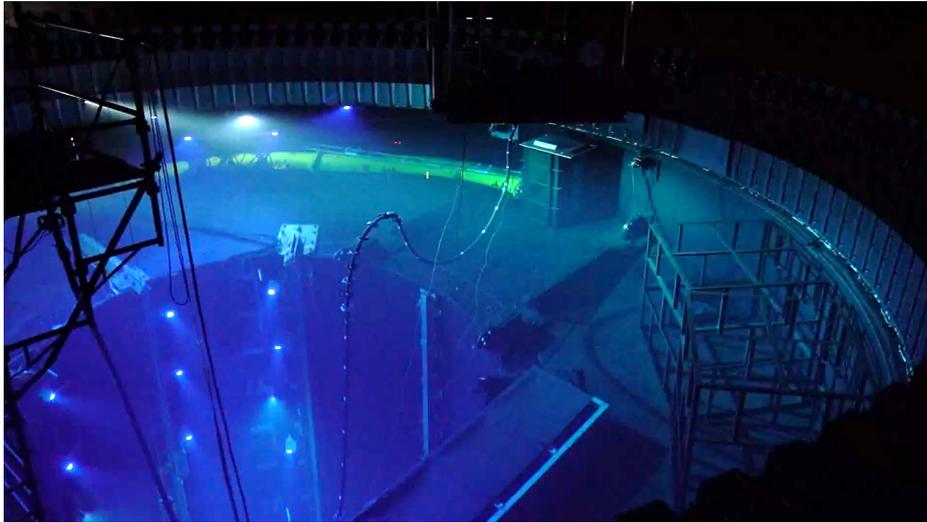
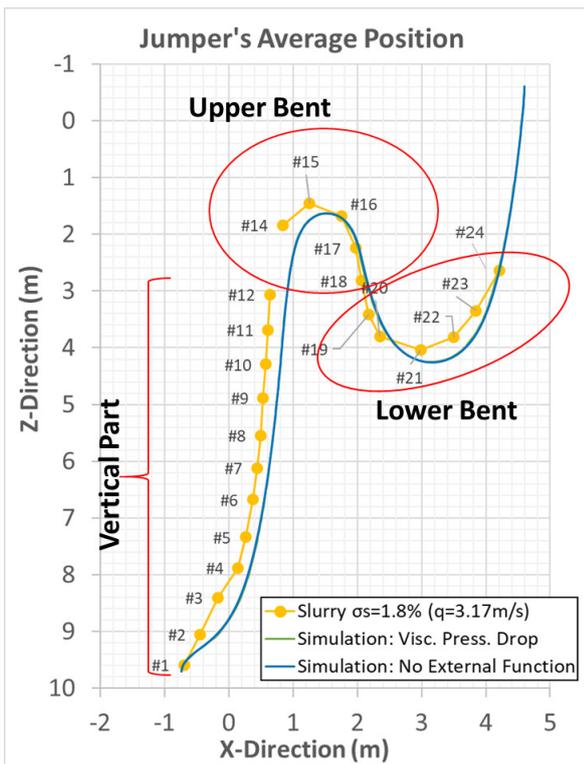
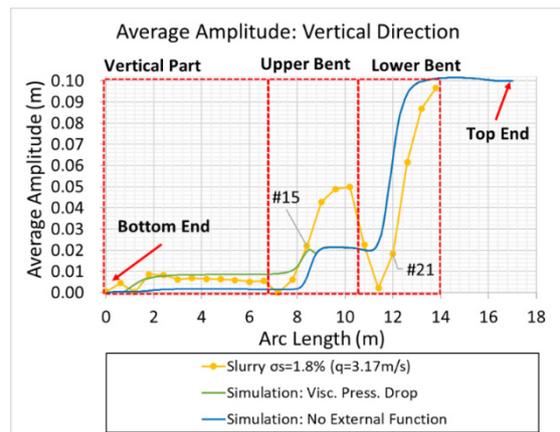
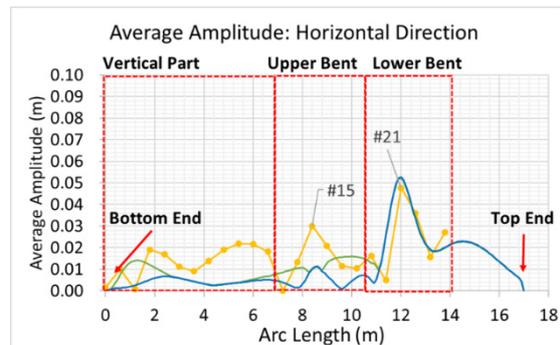


図5 移送管水槽試験の様子



(a) 移送管形状 (時間平均)



(b) 動揺振幅 (上: 水平方向、下: 鉛直方向)

図6 移送管の挙動解析結果 (上端加振: 振幅 0.1m, 周波数 0.224Hz, スラリー移送状態: 固体体積率 1.8%, 平均密度 1,048kg/m<sup>3</sup>, 平均流速 3.17m/s)<sup>14)</sup>

## 2.1.2 配管の内部流評価

### (1) 固液二相流

図1に示したように、採掘ユニットと揚鉦ユニットの接続にはフレキシブルな移送管の適用が検討されているが、採掘ユニットが海底を自由に移動できるように、移送管は傾斜を有する形状とする必要がある。図1(a), (b)

に示す水中ポンプを用いた揚鉦方式では、水中ポンプや移送管、揚鉦管の設計だけでなく、海底から船上までのフローシユアランス分析には、大粒径鉦石スラリー移送による配管内での圧力損失の評価が必要となる。そこで当所では、前期の重点研究において、固液二相流を対象とした傾斜管を含めた配管内の圧力損失推定法を構築した<sup>15)</sup>。本推定法は定常状態を想定したものであるが、配管が管軸方向に動揺する場合は当該動揺が圧力損失の変動特性にも大きく影響することがわかっている<sup>16)</sup>。さらに、採掘ユニットから移送されるスラリー流は非定常となる。したがって、安全で信頼性のある揚鉦オペレーションを達成するためには、配管動揺や非定常内部流れが圧力損失に及ぼす影響を評価することが肝要である。

そこで当所では、今期の重点研究において、固液二相脈動流れを対象に、傾斜管を含めた固定配管内の圧力損失推定法を構築した<sup>17), 18)</sup>。図7に示す縮尺 1/10 の傾斜可能な試験装置を製作し、様々な模擬鉦石を用いた移送試験を実施して、試験結果との比較を通じて、構築した推定法の妥当性を検証した(図8参照)。さらに、管軸方向に動揺する鉛直配管内の圧力損失についても詳細に検討して、体積濃度 10%以下の条件では、圧力損失の推定が可能であることを示した<sup>19)</sup>。また、前期の重点研究で構築した定常流における圧力損失推定手法<sup>15)</sup>を用いて移送管形状が圧力損失に及ぼす影響を調査するとともに、閉塞回避等の安定的な揚鉦を達成するために要求される限界流速を算出して、圧力損失、エネルギー消費、閉塞回避等の観点から効果的で信頼性の高い移送流速を示した<sup>20)</sup>。

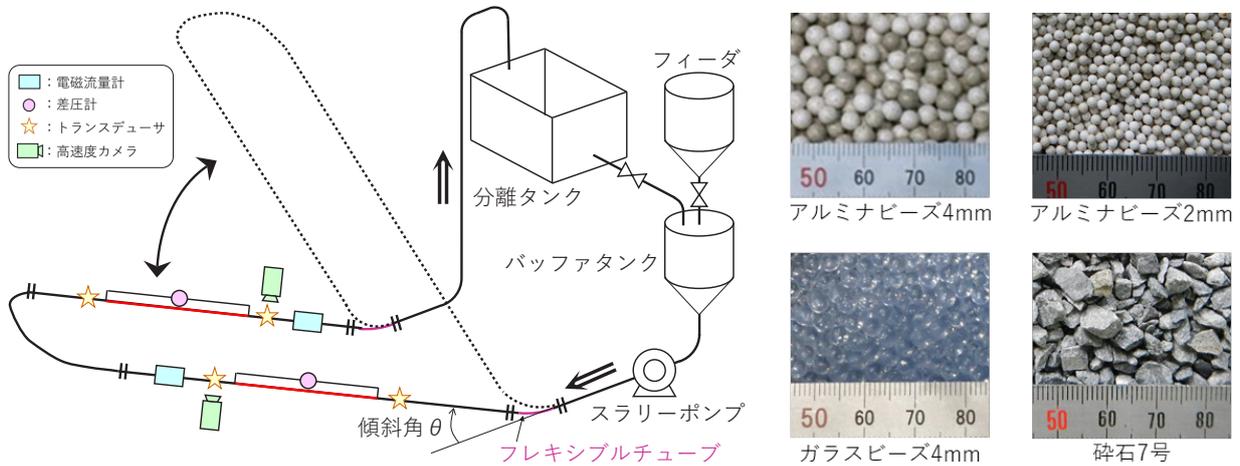


図7 固液二相脈動流の移送試験

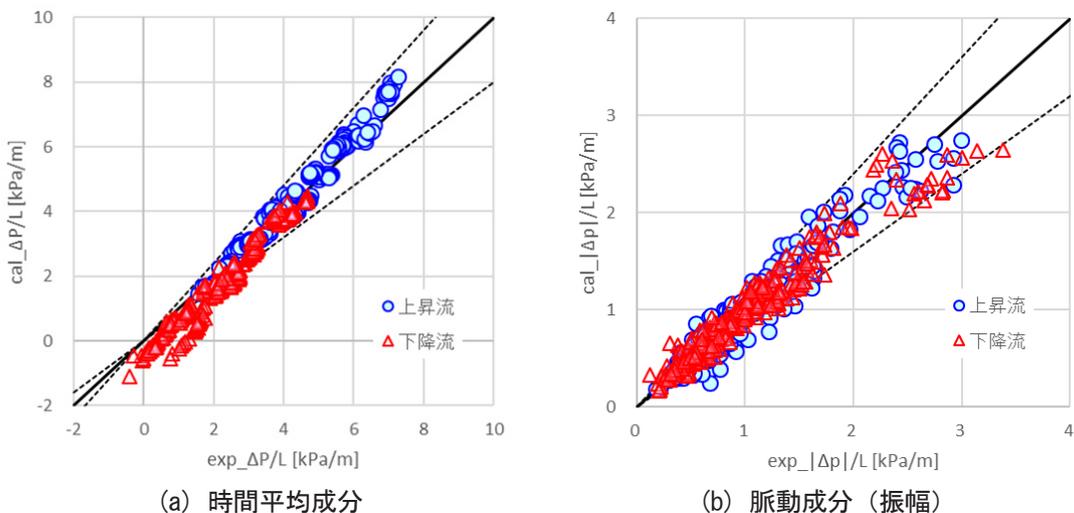
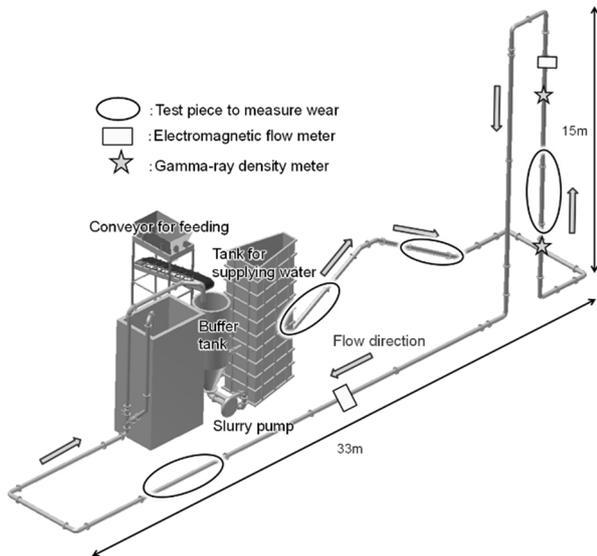


図8 固液二相脈動流中における圧力損失推定結果と試験結果の比較  
(傾斜角 : 0 deg, 30 deg, 60 deg, 90 deg, 点線 : ±20%)

揚鉬オペレーションにおいては、管内を大粒径の鉬石が移送されるため、管内は厳しい摩耗環境に晒されることが予想される。したがって、揚鉬管・移送管の摩耗量は、揚鉬ユニットの設計・運用時の重要な指標となる。そこで当所では、前期の重点研究において、想定実機の縮尺 1/4 程度の配管を用いた 3 種類の摩耗試験を実施して揚鉬管の摩耗量推定法を構築する<sup>21)</sup>とともに、経済産業省の委託を受けて JOGMEC が実施した海底熱水鉬床開発に係る調査事業において、実機スケールでの循環式スラリー移送試験を実施して揚鉬管の摩耗評価のための基礎データを取得した<sup>6), 22)</sup>。

今期の重点研究では、前述の実機スケールの基礎データを詳細に解析するとともに、縮尺 1/4 程度の配管を用いた試験結果に基づき構築した摩耗量推定法<sup>21)</sup>に、配管の摩耗に対する鉬石の摩耗能の影響を加え、実機スケールでの摩耗量推定を可能とした(図9参照)<sup>23)</sup>。さらに、鉬石スラリー移送用配管系に関する循環式摩耗試験を行い、鉬石の摩耗度とスラリー中の相対速度に関するデータを取りまとめ、当該配管系に含まれる配管類やスラリーポンプ等の各構成要素に生じる摩耗を簡便かつ定量的に評価できる摩耗量評価法を考案した〔特許第7029156号〕。これにより、実運用時においても重点的に摩耗状況を監視すべき構成要素の順位付けができ、また構成要素の点検及び交換時期の決定を行う際の定量的な判断基準が得られるため、当該配管系全体の信頼性、稼働性及び安全性を向上することができる。



配管種類	摩耗率 [mm <sup>3</sup> /h]	
	推定値	計測値
鉛直管	$2.31 \times 10^3$	$3.2 \times 10^3$
水平管	$16.9 \times 10^3$	$9.64 \times 10^3$
傾斜管 (上昇流)	$10.1 \times 10^3$	$7.15 \times 10^3$
傾斜管 (下降流)	$2.28 \times 10^4$	$1.54 \times 10^4$

(a) 循環式スラリー移送試験 (実機スケール)

(b) 摩耗量推定結果

図9 実機スケールでの配管摩耗量の推定 (参考文献<sup>23)</sup>を一部改変)

これまでに実施してきた試験では、移送流体として淡水を使用したのが、実際の揚鉬では移送流体は海水となるため、配管内は厳しい腐食環境に晒されることになる。したがって、実運用時の揚鉬管・移送管の摩耗量を評価するためには腐食影響を考慮する必要があるが、配管の摩耗は鉬石等の衝突による摩耗と腐食摩耗とが複雑に組み合わさった形で発生するため、その評価は容易ではない。

そこで当所では、まずは腐食影響を考慮可能な摩耗試験方法について検討を行った。溶存酸素濃度の異なる溶液を清水と人工海水で複数種類作成し、鋼板を浸漬させて溶存酸素濃度の経時変化と鋼板の錆の発生程度を確認する基礎試験を実施した。さらに、移送管の耐久性評価手法に係る研究として、ファインバブル発生装置を用いた窒素脱気水と酸素飽和水を、小規模循環式試験装置に適宜供給することで、当該装置内の流体の溶存酸素量の制御を試みる試験を実施した。これらの試験を通じて、溶存酸素濃度の制御方法や、溶存酸素濃度と錆の発生程度との関係を明らかにし、実運用に則した条件で配管等の腐食摩耗等のデータを取得することができる試験方法を考案した〔特開 2021-162578〕。

(2) 固気液三相流

海底鉬物資源の揚鉬では、図1(c)に示したように、洋上の採鉬母船から吊り下げられた揚鉬管に空気を供給して配管内外の密度差を利用するエアリフトポンプ方式も検討されている。エアリフトポンプ方式による揚鉬ユ

ニットの設計及び運用のためには、固気液三相流の移送評価技術が必要になることから、当所では、固気液三相流中の各相の流速や摩擦損失の推定手法に関する検討を行うとともに、それらを構成方程式として用いた三相流移送評価プログラムを開発し、内部流のシミュレーションを実施した<sup>24)~30)</sup>。各相の流速や摩擦損失の推定手法については、三相流移送試験を実施し、本試験で得られた計測結果と比較することで、提案した手法の妥当性を検証した(図10参照)。その結果、気相の流速がドリフトフラックスモデルで推定できることや、固相の流速が流動状態によって液相及び気相の流速と固体群の干渉沈降速度を用いて推定できることがわかった。さらに計測結果との比較を通じて、液相流速が支配的とする考え方に基づく摩擦損失の推定が可能であることを確認した。三相流の移送シミュレーションについても、計算結果と計測結果を比較し、概ね一致していることを確認した(図11参照)。

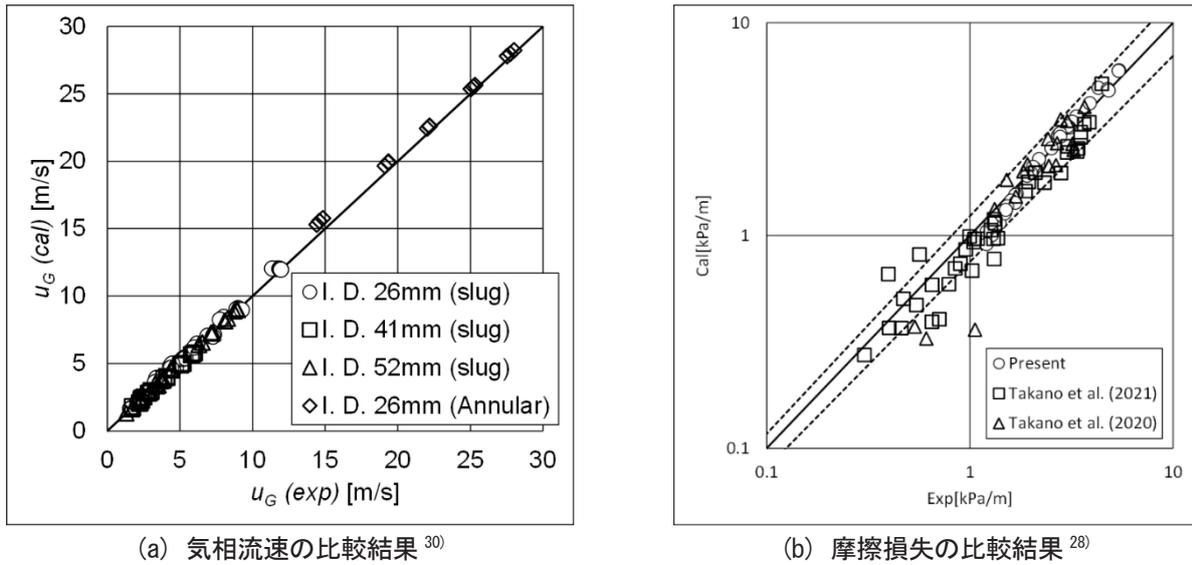


図10 推定手法の検証結果

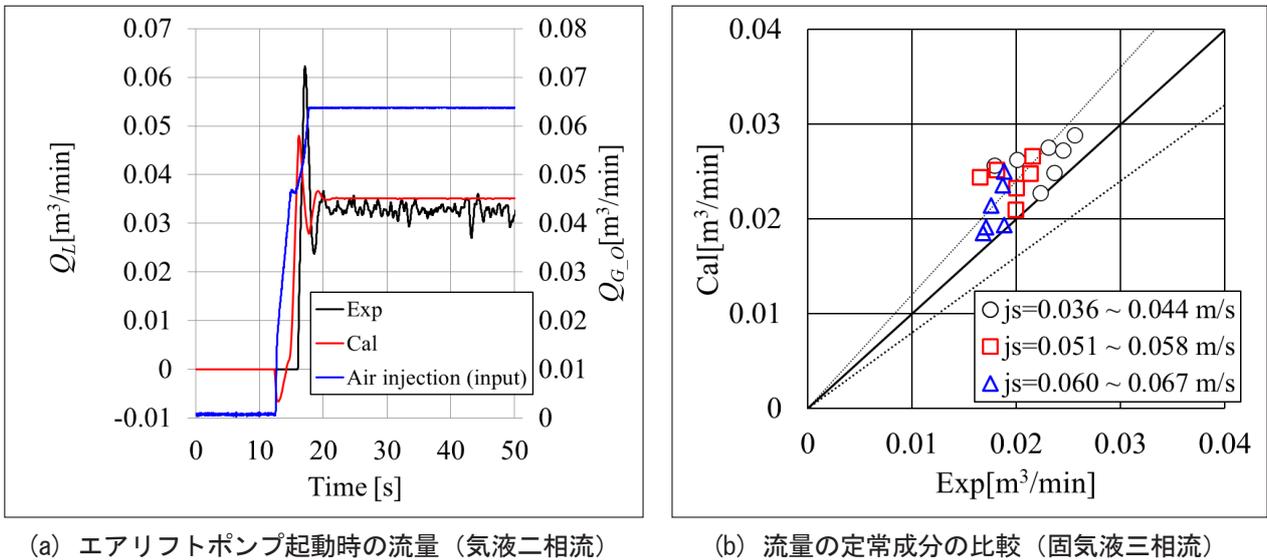


図11 混相流シミュレーション結果と計測結果の比較<sup>29)</sup>

2.1.3 耐摩耗性向上に関する検討

2.1.2 項 (1)で述べたとおり、比較的大粒径の鉱石をスラリー移送する場合、配管の摩耗量は、揚鉱ユニットの設計・運用時の重要な指標となる。特に、移送管のようにスラリー流が傾斜下降流となる箇所では、鉛直管や水平管より摩耗量が大きくなる可能性があることから、移送管の耐摩耗性を向上させることが重要となる。

そこで当所では、摩耗検知線による摩耗検知機能を有する輸送管と輸送管の寿命延伸方法を考案した〔特許第6984876号、特許第7018190号〕。また、移送配管の特に摩耗しやすい屈曲管外部に磁石等を配置させておき、輸送配管内に磁性ビーズ（鋼球等）を供給して屈曲部内面に磁性ビーズを付着させて保護層を設けることで耐摩耗性の向上を図るための基礎試験を行い、磁力、吸着力等の関係を明らかにして、スラリー移送管の耐摩耗性向上方法を考案した〔特許第7274718号〕。

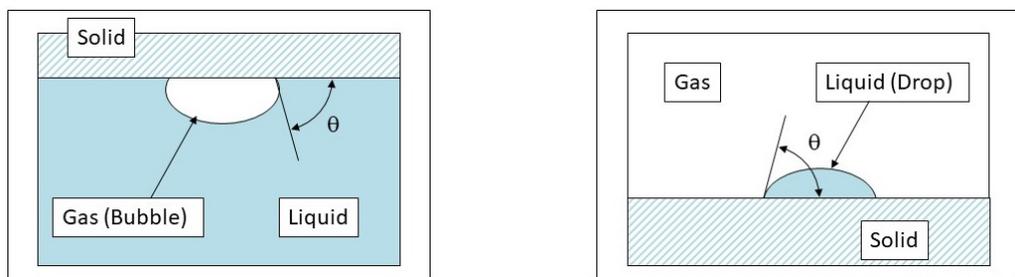
## 2.2 海底鉱物処理技術

我が国の排他的経済水域には海底熱水鉱床が数多く発見されており、将来の金属鉱物資源として期待されている。資源開発を推進するためには、採掘、揚鉱から選鉱、製錬といった一連のプロセスを通して開発コストを低減する必要がある。一般に、鉱山で採掘された鉱石には脈石と呼ばれる不要な鉱物が多く含まれており、鉱石の粉碎・選別により有用な鉱物を多く含む精鉱を取り出し、これを製錬して地金を得るが、この精鉱を得る工程を選鉱と呼ぶ。当所では、海底鉱物資源の中でも銅、鉛、亜鉛などの硫化鉱物を豊富に含む鉱石が堆積したものである海底熱水鉱床を対象として、選鉱プロセスを海底で実施する海底選鉱（海底鉱物処理）を提案し、粉碎や選別といった主要プロセスの基盤的技術の開発を実施してきた<sup>31)~33)</sup>。本研究では、選別技術の候補である浮遊選鉱（浮選）の適用可能性を確認するための基礎物性である鉱石の表面物性の測定と、プロセス中を移動する鉱石粒子の品位計測を自動的に行うための品位計測技術の検討を実施した。

### 2.2.1 高圧条件における接触角測定による浮選の適用可能性の検討

浮選とは、鉱石表面の濡れ性の違いを利用した鉱石粒子の選別法である。一般に、ケイ酸塩などの脈石の表面は水に濡れやすいのに対して硫化鉱物の表面は濡れにくいことが知られている。そこで、これらを含む鉱石を微粉碎し、粒子として水槽内に分散させ、そこに微細気泡を吹き込むことにより、硫化鉱物粒子を気泡に付着させて槽外にあふれさせ精鉱として分離することができる。当所では、これまでに浮選機を模擬した試験装置を製作し、水深1,000 mに相当する圧力条件（10 MPa）において装置内で微細気泡を発生させ、微粉碎した模擬鉱石粒子を選別する試験を実施し、高圧水中条件における浮選の適用可能性を検討している<sup>31),32)</sup>。しかしながら、鉱石には様々な種類の硫化鉱物が含まれており、鉱物の種類によっては適性が異なる可能性がある。また、広範囲な圧力範囲における適用可能性の確認や、海水中の塩分の影響についても検討する必要があった。そこで本研究では、高圧水中条件において、固体表面の濡れ性の指標である接触角を測定し、海底選鉱への浮選の適用可能性について検討した。

気相-液相-固相系における接触角（ $\theta$ ）の定義を図12に示す。本図には固相に気泡が付着した場合と液滴が付着した場合の接触角を示しているが、同一の物質系では、どちらの場合においても接触角は同一である。液相が水系の液体である場合、接触角は固相表面の濡れ性の指標であり、接触角が小さいほど濡れやすい。一般に、硫化鉱物は脈石より接触角が大きいことが知られている。また、接触角は温度などの物理的な条件、液相中の塩分やpHなどの化学的な条件、固相表面の汚れなどの影響を受けることが知られているが<sup>34),35)</sup>、圧力の影響を検討した事例は非常に少ない。本研究では海底選鉱への適用可能性を検討するため、外的な条件のうち、塩分と圧力の影響について検討を行った。



(a) 固相に付着した気泡の周りの接触角

(b) 固相に付着した液滴の周りの接触角

図12 接触角（ $\theta$ ）の定義

本研究で用いた接触角測定装置の概念図を図13に示す。本装置は、観察窓を有する耐圧容器、高圧配管、エアポンプ等で構成されており、デジタルマイクロスコープカメラ（KEYENCE製 VHX-5000）を用いた画像観察に

より接触角を測定した。鉱物としては、表 1 に示す市販の 4 種類の鉱物試料を使用した。浮選機内部の液に相当する試験液は純水ベースと人工海水ベースの 2 種類を使用した。試験液に含まれる添加剤の添加量や pH は、あらかじめ大気圧条件下で実施した浮選試験により純水ベースと人工海水ベースのそれぞれに最適な条件を見出し、その条件で調整した。測定の圧力範囲は大気圧から 8 MPa（ゲージ圧、以下同様）とした。

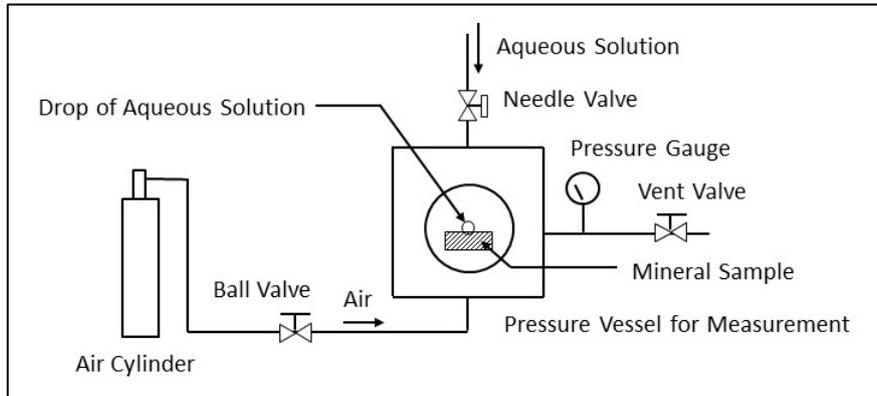
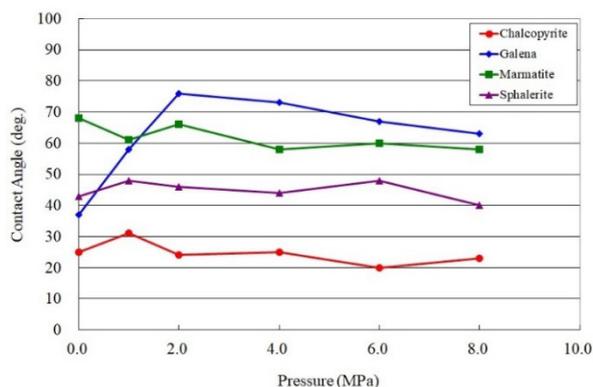


図 13 接触角測定装置の概念図

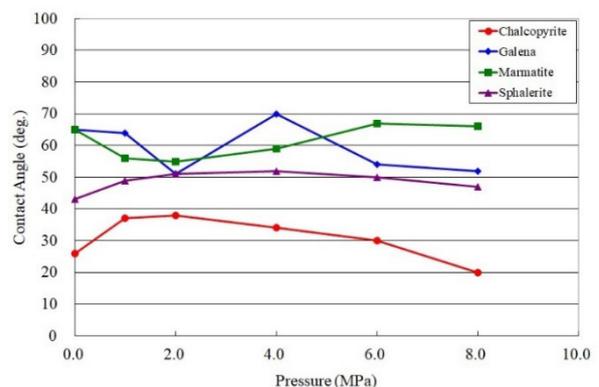
表 1 本研究で使用した鉱物試料

鉱物名	化学式
閃亜鉛鉱 (sphalerite)	ZnS
鉄閃亜鉛鉱 (marmatite)	(Zn, Fe)S
黄銅鉱 (chalcopyrite)	CuFeS <sub>2</sub>
方鉛鉱 (galena)	PbS

接触角測定の結果を図 14 に示す。純水ベースの場合では、方鉛鉱では圧力の変化とともに大きな変化が示されたが、他の鉱物ではそれほど大きな変化は示されなかった。人工海水ベースの場合も、圧力変化に伴う接触角の変化はそれほど大きなものではなかった。このため、海底選鉱における浮選の適用可能性については、圧力による影響は大きなものではなく、大気圧条件下で添加量等の条件を最適化すればよいことが示唆された<sup>36), 37)</sup>。



(a) 純水ベース



(b) 人工海水ベース

図 14 接触角測定の結果

## 2.2.2 スラリー中の鉱石粒子の品位計測手法の検討

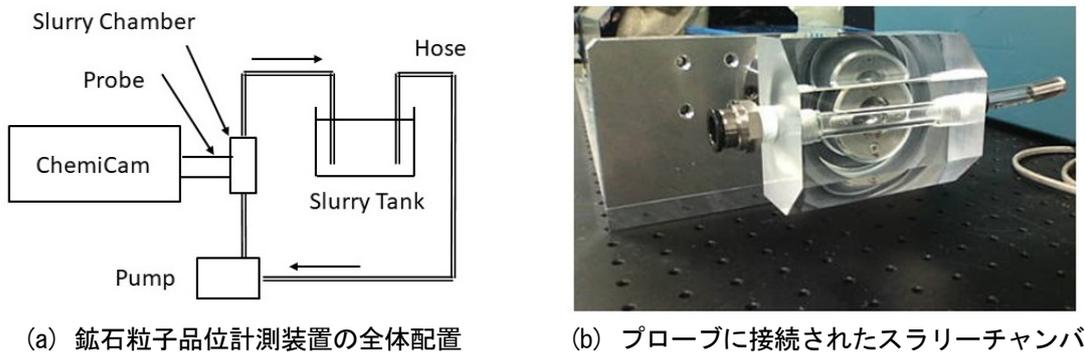
海底選鉱では、海底で採取した鉱石を粉碎し、選別するが、選別工程において最適な制御を行うためには、鉱石粒子の品位を現場で計測する必要がある。また、粒子は周囲にある海水と混合してスラリーとして搬送するこ

とが想定されるため、スラリーとして流動している粒子の品位を計測可能な手法が必要である。本研究では、深海底にある海底熱水鉱床等の品位計測に適用された実績のある、レーザー誘起ブレイクダウン分光法 (LIBS) に基づく品位計測を検討した。LIBSとは、固体等の試料の表面に強力なレーザーを照射し、そのエネルギーにより励起された原子が発する元素固有の光を検出することにより、試料に含まれている元素の種類を分析する手法である<sup>38)~44)</sup>。

図15に本研究で使用した鉱石粒子品位計測装置の概要を示す。スラリータンク内で調整した鉱石粒子スラリーをポンプにより装置内で循環させる。流路内のスラリーチャンバに東京大学生産技術研究所が開発したLIBS分析装置 (ChemiCam) のプローブを取り付け、チャンバ内を流動する粒子にレーザーを照射し、LIBSスペクトルを計測した。スラリーは、微粉碎した海底熱水鉱床の鉱石試料 (金属元素として、バリウム (Ba)、亜鉛 (Zn)、鉄 (Fe)、銅 (Cu) 等を含む) を純水または人工海水に所定の濃度で分散させ調製した。ChemiCamの基本的仕様及びスラリー濃度を表2及び表3にそれぞれ示す。実験では、まず純水ベースのスラリーで計測を実施し、解析に適するLIBSスペクトルを取得可能な濃度範囲を特定したのち、人工海水ベースのスラリーで計測を実施した。流量条件等は一定とした。

図16に、各スラリー濃度条件において、レーザーの照射に対して分析に適するLIBSスペクトル (図17参照) が取得できた割合を示す。粒子が流動する状況では照射したレーザーが粒子にヒットする確率が低く、多数回の照射を行う必要があるが、取得割合が高いスラリー濃度は一定の範囲内にあり、必ずしもスラリー濃度が高いほど効率的にスペクトルが得られるわけではないことが示唆された。

以上の結果から、粒子の流径や流動条件に応じて適切な計測条件を設定することにより、LIBSを用いたスラリー中の鉱石粒子品位計測の可能性が示唆された<sup>36), 45), 46)</sup>。



(a) 鉱石粒子品位計測装置の全体配置

(b) プローブに接続されたスラリーチャンバ

図15 鉱石粒子品位計測装置の概要

表2 ChemiCamの基本的仕様

Item	Specification
Laser type	Nd: YAG
Laser wavelength	1,064 nm
Pulse energy	28 mJ
Laser pulse width	200 ns
Spectral range	400 to 800 nm
Detector type	ICCD
Spectral resolution	1.6 nm
ICCD gate delay	200 ns
ICCD gate width	1000 ns

表 3 スラリーの調製条件

	ベース	スラリー濃度 [g/L]
Case 1	純水	0.46
Case 2	純水	0.99
Case 3	純水	2.46
Case 4	純水	4.89
Case 5	純水	10.01
Case 6	人工海水	4.61
Case 7	人工海水	6.93
Case 8	人工海水	9.54

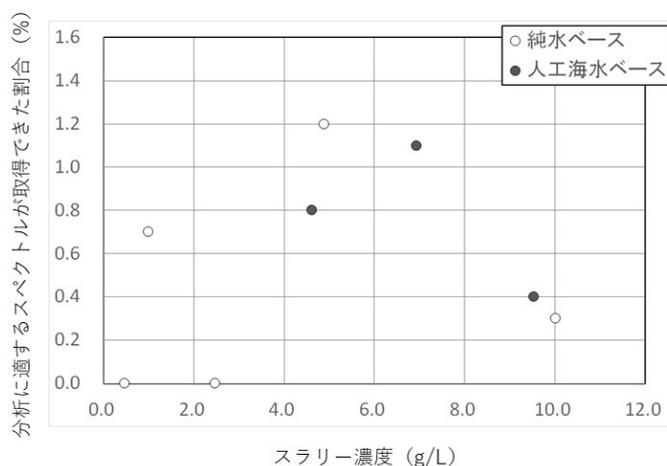


図 16 レーザー照射に対して分析に適するスペクトルが取得できた割合

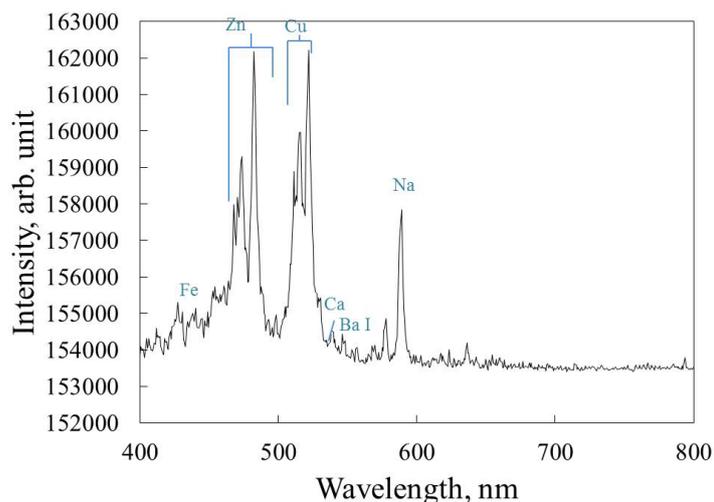


図 17 分析に適する LIBS スペクトルの例 (1 回のレーザー照射で得られたスペクトル, 取得条件: Case 7)

### 2.3 計画支援技術

我が国では、第 2 期、第 3 期海洋基本計画<sup>2), 1)</sup>に基づき、排他的経済水域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。当所では、ナショナルプロジェクトの技術支援として計画支援技術

に係る研究を行った。本研究では、海底鉱物資源開発事業（主に海底熱水鉱床）の事前検討を行う上で必要となる稼働性及び経済性に係る検討が可能となるツールを開発した。

### 2.3.1 稼働性評価プログラムの開発

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。採掘した鉱物は洋上施設に揚収され、運搬船（以降、シャトル船と表記）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18に海底熱水鉱床の開発事業におけるシステム構成例を示す。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た。なお、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。

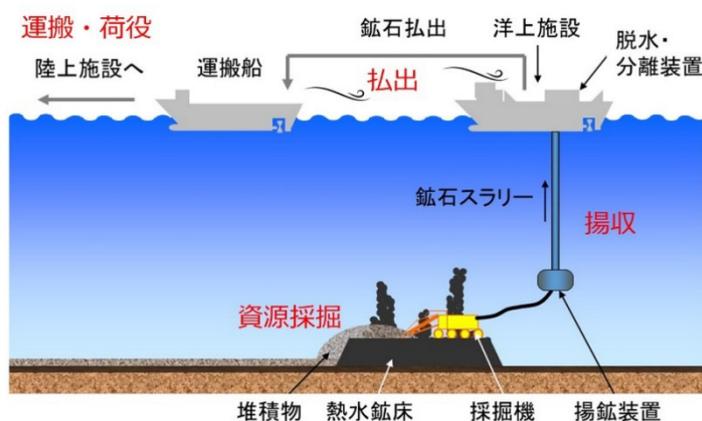


図18 海底熱水鉱床開発事業の構成事例

本プログラムの解析手順フローを図19に示す。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、総生産量、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を用意しており、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シャトル船は想定母港での荷役が終了次第、対象海域に戻り、接舷し払出を受ける。シャトル船の出港判断は、洋上施設への離接舷時間、洋上施設からの払出時間を確保した上で離接舷が可能な海気象条件であることとした。これらの判定条件及び設定に従い、累積荷役量が総生産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。これらの情報により、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（図20参照）。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<sup>47)</sup>。また、対象海域の海気象特性を考慮した稼働率は、2.3.2項で記載する経済性評価に資する情報となる。

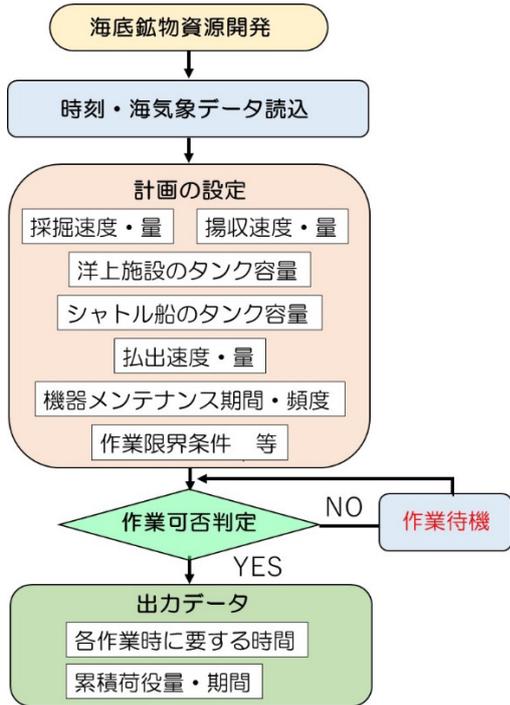


図 19 稼働性評価プログラム 解析手順フロー

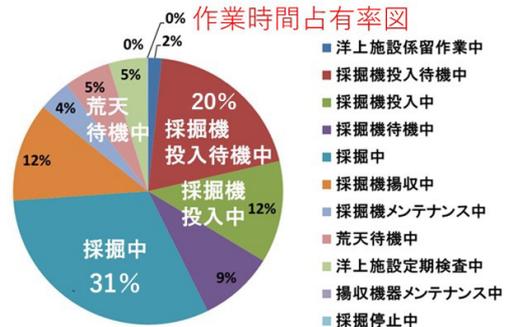
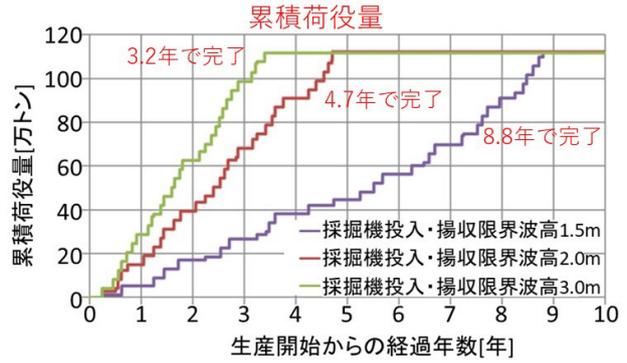


図 20 稼働性評価プログラム 結果表示例

2.3.2 計画支援（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必要な開発事業の経済性を簡易的に検討可能な経済性評価プログラム（開発当初は計画支援プログラムと称した）の開発を実施した。本プログラムは、海洋開発用プラットフォームの設計支援ツールとして開発した調和設計プログラムをもとに開発を行った<sup>48), 49)</sup>。本プログラムの解析手順フローを図 21 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データベース（以降、DB と表記）、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。なお、簡便な操作性を考慮し GUI（Graphical User Interface）を採用した。

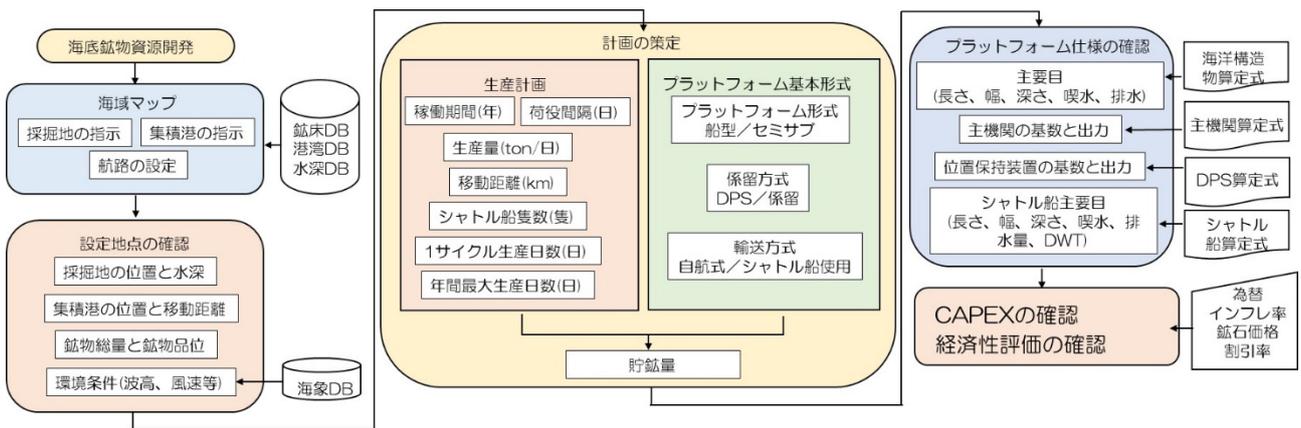


図 21 計画支援（経済性評価）プログラム 解析手順フロー

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で選択することにより設定でき、それにより航路が設定され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表記）の形式、位置保持の方法、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。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<sup>47)</sup>。

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22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。

年間稼働日数	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
操縦システム CAPEX	MMS	44.4						0.0	0.0
操縦システム OPEX	MMS	4.4						4.6	4.6
操縦システム CAPEX	MMS	45.6						0.0	0.0
操縦システム 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

年毎の収益・CAPEX・OPEX

事業性  
 総収入・総コスト  
 総収入 2,159 億円  
 総コスト 1,250 億円  
 総計 909 億円  
 NPV・IRR  
 NPV 7 億円  
 IRR 12.4 %  
 割引率 12.0 %

図22 計画支援（経済性評価）プログラム 経済性評価画面

### 2.3.3 統合化検討

事業計画の初期検討では、稼働性及び経済性の両面より開発事業で使用するシステム構成（洋上施設の形式、位置保持の方法、輸送方法と隻数など）の検討が必要である。そこで、個別に開発を行ってきた稼働性及び経済性評価プログラムに共通する情報である開発地点、荷役地点、輸送距離、システム構成、稼働率等について共有し、統一した条件のもと総合的な検討が可能となる開発支援プログラムとして統合を行った。また、統合に併せて運用面の向上を図るため、各プログラムの単独使用、統合使用に係わらず評価結果と設定条件をレポート出力する機能を追加した（図23参照）。なお、本開発支援プログラムは、海底熱水鉱床を対象としている。

開発支援プログラム 起動画面

経済性評価・統合評価メイン画面

稼働性評価のみのメイン画面

レポート事例（解析条件、解析結果）

経済性評価・統合評価メイン画面

稼働性評価のみのメイン画面

レポート事例（解析条件、解析結果）

図23 開発支援プログラム起動画面とレポート例

## 2.4 実海域での実証

第2期海洋基本計画（2013年4月閣議決定）<sup>2)</sup>に基づき2013年12月に策定された海洋エネルギー・鉱物資源開発計画<sup>50)</sup>では、水深700～1,600mの実海域で採鉱・揚鉱パイロット試験を実施して、2017年度までに採鉱・揚鉱分野の要素技術を確立することが計画された。当所は、採鉱・揚鉱パイロット試験受託コンソーシアムの一員として、経済産業省の委託を受けたJOGMECの海底熱水鉱床開発に係る調査事業の一環で実施された海底熱水鉱床の採鉱・揚鉱パイロット試験事業に参画し、重点研究等で得られた成果も活用しながら、商業化に向けた採鉱・揚鉱分野の要素技術に関する検討を行った。さらに、当該試験事業で取得した実海域データ等を用いて、これまで当所が重点研究等で構築した評価手法の妥当性を検証した。

### 2.4.1 採鉱・揚鉱パイロット試験の概要<sup>6)</sup>

将来の海底熱水鉱床開発の事業化に際して必要となる採鉱・揚鉱に係る要素技術を網羅的に確立するとともに、商業化を目指したプロジェクトの開始に向けて、技術、コスト等の課題を抽出し、経済性の検討に資するためのデータを取得することを目的として、2015～2017年度の3ヶ年の期間で採鉱・揚鉱パイロット試験事業が実施された。

本事業では、①各種測定データの取得、②連続的揚鉱の実施、③技術的課題の把握と対応策の検討・検証を目標とし、特に揚鉱ユニットに関する検証を中心として集鉱から揚鉱までの一連のシステムの確認が行われた。そのため、事前に掘削試験機で海底熱水鉱床を掘削し、3cm程度に破碎した鉱石を所定の場所に集めて、揚鉱試験に臨んだ。図24に、本事業における取組の概要を示す。採鉱計画立案、水中ポンプシステムや揚鉱管システムの開発、稼働性や安全性の評価、全体システムの検討等を行い、事前の陸上・洋上での各種試験を経て、2017年8月から9月にかけて実施した沖縄海域における揚鉱試験で、水深約1,600mの海底から高密度の海底熱水鉱床の鉱石をスラリー状で連続的に揚鉱することに世界で初めて成功した。図25及び図26に、揚鉱試験のイメージ及び試験の様子をそれぞれ示す。これらにより、商業化に向けた機器・システムの設計に資するスラリー揚鉱、水中ポンプ及び揚鉱管の摩耗、稼働性、全体システム、実海域でのオペレーション等の貴重なデータを取得することができた。

本事業の詳細については、海底熱水鉱床開発計画 総合評価報告書<sup>6)</sup>を参照されたい。

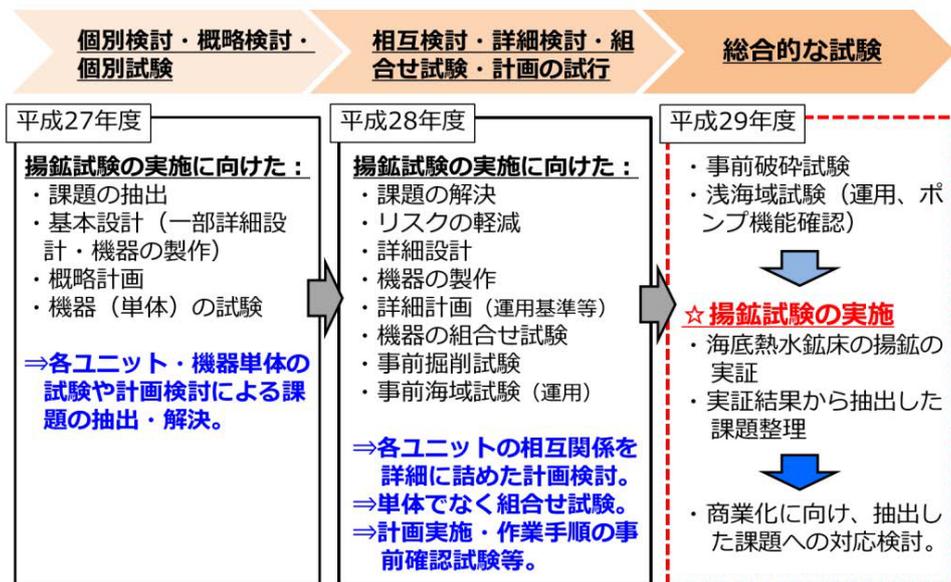


図24 採鉱・揚鉱パイロット試験事業取組内容の概要<sup>6)</sup>

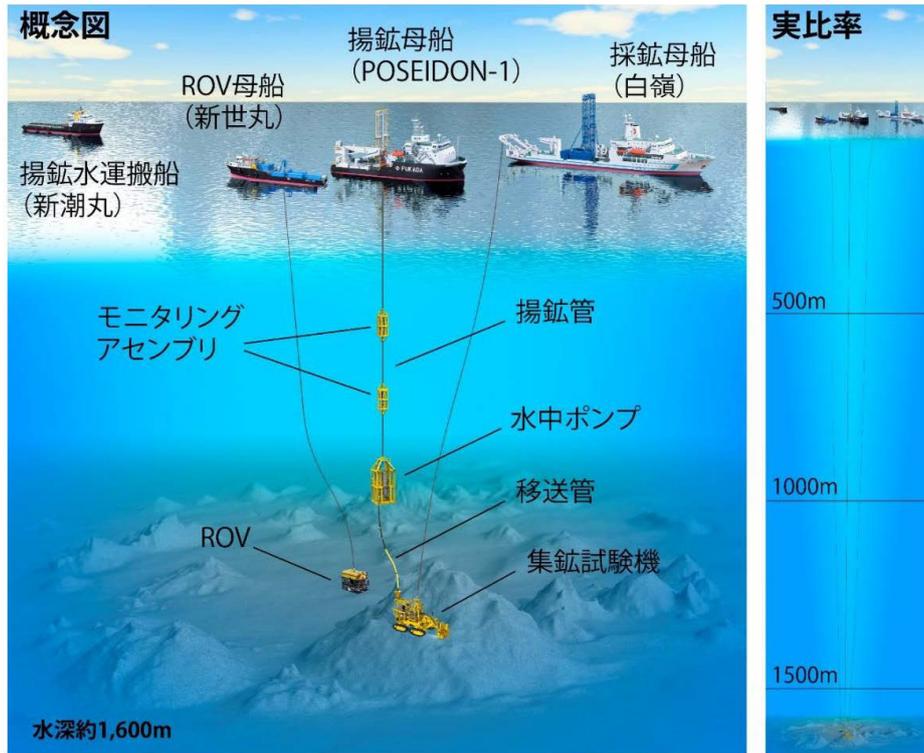
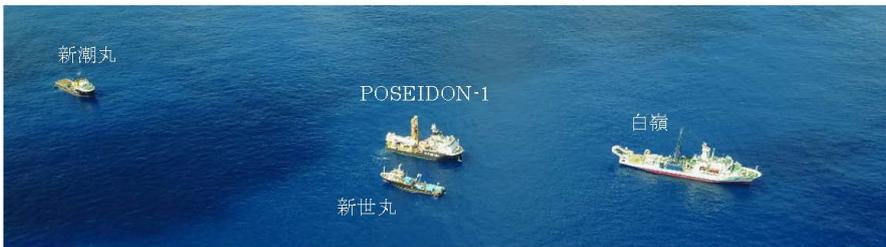


図 25 揚鉍試験イメージ図<sup>6)</sup>



揚鉍試験船団配置



揚鉍ユニット投入時船団配置

(a) 船団の様子<sup>6)</sup>



(b) 洋上に揚げられた鉍石<sup>51)</sup>

図 26 揚鉍試験の様子

2.4.2 採鉱・揚鉱パイロット試験における当所の取り組み

採鉱・揚鉱パイロット試験事業において当所が実施した主な内容を紹介する。

(1) 揚鉱管の全体解析

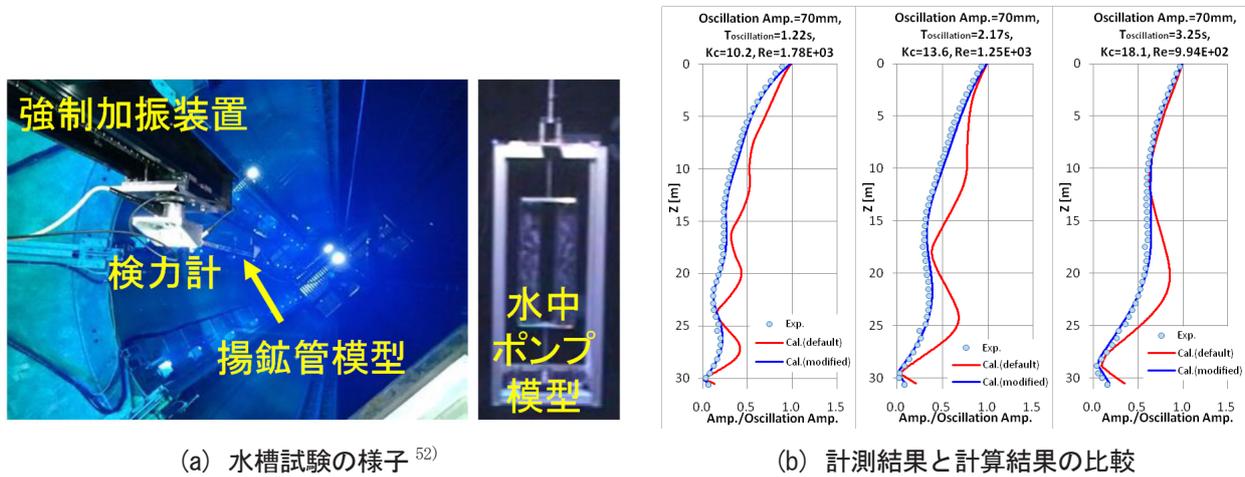
揚鉱管の全体解析フローを図 27 に示す。



図 27 揚鉱管の全体解析フロー

揚鉱管の縮尺部分模型を用いた水槽試験（図 28(a)参照）を行って、揚鉱システムの全体解析モデルを検証（図 28(b)参照）した上で、実機の全体解析を実施して強度・疲労評価を行った。全体解析手法として、これまでに当所が構築してきたものを用いた<sup>22)</sup>。強度評価では、揚鉱時に加え、強度面から特に厳しいオペレーションとなる揚鉱システムの設置・回収時を想定した解析も行った。さらに、強度面だけでなく揚鉱管と揚鉱母船のムーンプールの接触の可能性についても調査した。疲労評価では揚鉱時を対象として、VIVの影響も考慮した解析を行った。解析結果から、揚鉱試験期間中に、揚鉱管が強度・疲労に関する基準を満足するかどうかを確認するとともに、揚鉱システムの強度面から要求される作業限界条件を算出して、揚鉱試験計画に反映した。

さらに、揚鉱試験において揚鉱管の挙動を計測するための小型挙動計測装置を開発・製作し、揚鉱試験時に揚鉱管に 10 ヶ所取り付けて揚鉱管挙動を計測した（図 29(a)参照）。揚鉱試験時の揚鉱母船挙動データや海気象データを用いた全体解析を実施して、小型挙動計測装置にて計測した揚鉱管挙動データ（3 軸加速度及び 3 軸角度）との比較を行い、両者が概ね一致していることを確認した（図 29(b)参照）。これにより、当所が構築してきた全体解析手法が妥当であることが確認できた。



(a) 水槽試験の様子<sup>52)</sup>

(b) 計測結果と計算結果の比較

図 28 揚鉱管模型の挙動計測試験

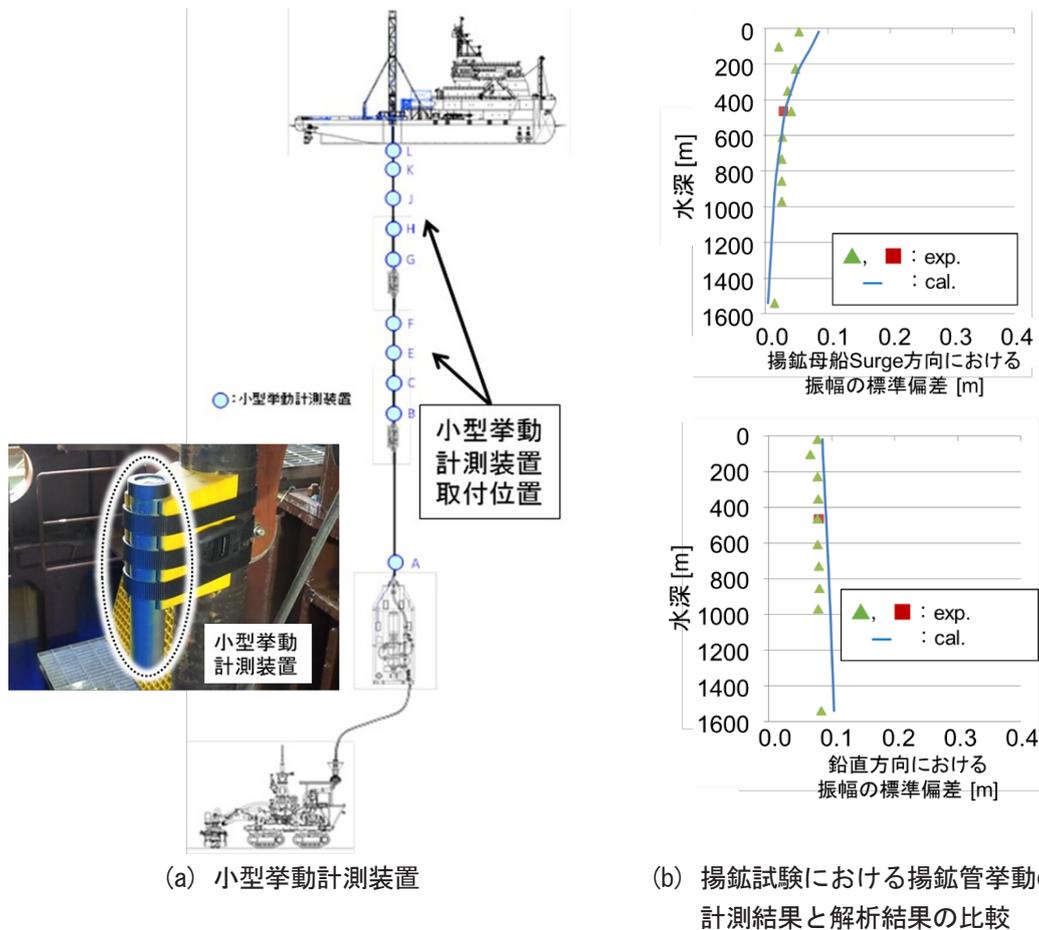


図29 実海域データとの比較による揚鉤管の挙動計測手法の検証<sup>52)</sup>

(2) 稼働性評価<sup>53)</sup>

想定海域における揚鉤母船の安全かつ効率的な操業のための稼働性評価を行った。稼働性評価フローを図30に示す。



図30 稼働性評価フロー

対象海域の海気象データを詳細調査するとともに、揚鉤母船の縮尺模型を用いた水槽試験を通じて、揚鉤母船の位置保持、波浪中動揺性能に関する基本性能を把握した。揚鉤試験では試験期間が限られているため、効率的なオペレーションが求められる。揚鉤試験のオペレーション要領の確認、各オペレーションの所要時間の把握等のために2016年度に行われた事前海域試験において、揚鉤母船性能評価検証を目的とした各種データ計測も実施して、揚鉤母船の基本性能の評価手法の妥当性を確認した(図31参照)。その後、2.4.2項(1)で述べた揚鉤管の強度面から要求される作業限界条件も考慮して揚鉤オペレーションが許容される海気象条件を求め、最終的に、過去の海気象データを用いて航海期間内で連続作業が何回期待できるかを評価する稼働性評価を行った。揚鉤試験後は、実海域での実績との比較により、船体動揺評価を含めた本評価手法の妥当性を確認した(図32参照)。本評価手法は、今後の海底熱水鉤床開発の商業化のみならず、実海域試験を伴う様々な大型の海洋プロジェクトの計画にも活用できるものである。

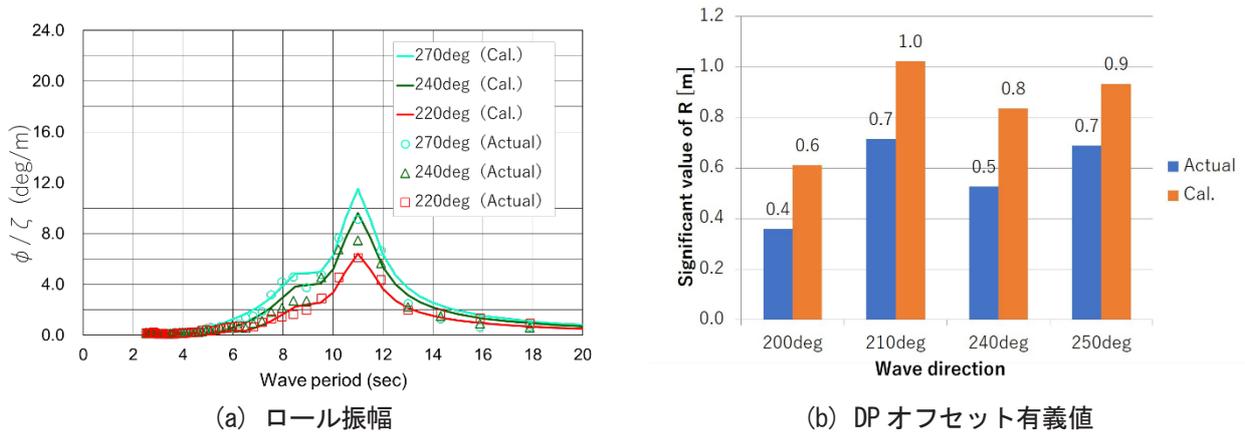


図 31 事前海域試験における揚鉦母船性能評価手法の検証（参考文献<sup>53</sup>を一部改変）

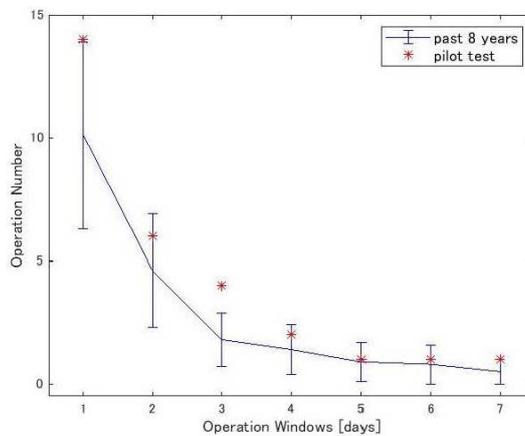


図 32 揚鉦試験期間内で実際に確保できた作業回数と過去 8 年間の海気象データを用いたオペレーションウィンドウ解析結果の比較（図中のエラーバーは標準偏差によるバラつき）<sup>53</sup>

(3) 安全性評価<sup>54</sup>

揚鉦試験の実施にあたっては、事前に安全性評価を実施することでハザードの抽出を行い、リスクレベルの高い項目があった場合は対策を施しリスクの低減を図り、設備設計・計画、試験計画等に反映させた。また揚鉦試験終了後は、揚鉦試験における安全上の問題点を分析し、海底熱水鉦床の商業生産に向けた採鉦・揚鉦オペレーションに関する安全ガイドラインを作成する上で考慮すべき事項を抽出して取りまとめた。安全性評価フローを図 33 に示す。



図 33 安全性評価フロー

計画の初期段階において、安全性を確認するため、揚鉦試験に使用されるシステム全体を対象として HAZID (Hazard Identification ; ハザード特定) 会議を実施した。採鉦・揚鉦プロセスで想定されるハザードの抽出と各オペレーション手順との因果関係の整理、機能停止や人命損傷といった全体プロセスにハザードが及ぼす影響の評価を行った。HAZID 会議で抽出されたハザードのうち、特に対策や詳細な解析が必要なものを選定するために半

定量評価を実施して、深刻度(SI; 1~4)、発生頻度(FI; 1~7)並びにリスクインデックス(RI=SI+FI)を算出した。RIが8以上、もしくはRIは7以下だがSIが4のハザードを高リスクハザードと定義し、これらについては必要な安全対策を追加した。追加した安全対策については、事前海域試験でその効果を確認した。

揚鉦試験を安全で効率的に実施するため、事前に各オペレーション要領及び所要時間の確認、各種データの取得を目的とした事前海域試験を実施した。本試験において、安全対策が確認可能なものについては、その効果を確認した。高リスクハザードのうち、事前海域試験で安全対策の確認が行えなかった項目として引火性ガス及び硫化水素など有害物質の流出があり、これらはフローラインの損傷の有無に関わらず起こりうると考えられることから、海底における鉦石の集鉦から揚鉦、船上での分離を経て揚鉦水運搬船までのフローをHAZOP(Hazard and Operability Study)会議において詳細解析を実施する対象とした。HAZOP会議でもHAZID会議同様、追加すべき安全対策があるかどうかの議論を行い、必要な安全対策を追加した。さらに2017年度初めには、2015年度のHAZID会議開催時の計画と、2017年の揚鉦試験前の段階での計画を比較したところ、変更が生じていたため、変更部分に関するHAZID会議(差分HAZID会議)を実施し、変更に伴う安全性評価を更新した。

揚鉦試験の約2ヶ月前には揚鉦試験の円滑な遂行のために、実機による機能確認や揚鉦管の投入揚収作業の更なる習熟訓練を目的とした浅海域試験を実施することになり、本試験においてこれまで検討した追加安全対策等を確認した。本試験での安全対策の確認結果や試験での問題点を整理し、揚鉦試験で注意して作業することが重要と考えられる項目を抽出し、関係者に周知した。

2017年8月から9月にかけて実施した揚鉦試験でも、これまでに検討した安全対策の確認を行った。揚鉦試験では8件の不具合事象が発生したが、これらの多くはHAZID/HAZOP会議を踏まえ事前立案された安全対策により原状回復を行った。

最終的に、3ヶ年に亘って実施した安全性評価と各種海域試験の結果及び安全対策の有効性の確認結果から、海底熱水鉦床の商業生産に向けた採鉦・揚鉦オペレーションに関する安全ガイドラインを作成する上で考慮すべき事項を取りまとめた。

#### (4) その他

当所では、その他に、掘削時における掘削試験機周辺の濁り影響低減の検討、鉦石分離装置内水槽の水位変動に係る試験、移送管に関するカタナリー試験等を実施した。

さらに、当所が前期の重点研究で構築した傾斜管を含めた配管内の圧力損失推定手法<sup>54)</sup>は、コンソーシアムの他メンバーが担当した、水中ポンプシステム開発や固液二相流搬送シミュレータの開発に活用された<sup>55)</sup>。

### 3. 厳環境下に設置される海洋資源開発システムの安全性・稼働性評価手法の構築

#### 3.1 厳海象下で使用される浮体等の安全性評価

##### 3.1.1 氷海資源開発におけるマネージドアイス中の全体氷荷重推定

北極圏において豊富な石油・天然ガス資源の存在が明らかとなっているものの、海水や冰山への対策の困難さのため、これらの資源の開発は依然として進んでいない。掘削等に用いられる浮体式構造物はその位置を保持する必要があるため、その周囲に大きな海氷が接近した場合に砕氷船が海氷を細かく砕く作業を行うことがある。このような作業を含む海氷の制御をアイスマネージメントという。アイスマネージメント中の砕氷により生成された氷盤はマネージドアイスと呼ばれるが、マネージドアイスが構造物へ与える全体氷荷重の推定技術は十分に確立されていない。本分野においては、多数の氷盤干渉と破壊を合理的に考慮し、全体氷荷重を精度良く推定することが重要な技術課題となっている。

本研究では、氷海域で実績があるモノコラムハル型構造物を対象に、マネージドアイス中の全体氷荷重を推定するため、氷海水槽試験と物理エンジンを利用した個別要素法による数値シミュレーションを実施した。氷海水槽試験では当所の氷海船舶試験水槽においてマネージドアイス環境を再現し(図34)、検力計を介して模型(図35)を拘束曳航することで模型に作用する全体氷荷重を計測した<sup>56),57)</sup>。実験で使用した模型氷は、強度(主に曲げ)や弾性率、密度を模型スケールへ縮尺するためにプロピレングリコールを水に溶解させ、テンパリングや気

泡の混入等の方法により製氷された。また、数値シミュレーションで必要となる模型氷の摩擦係数などの各種データも取得した。



図 34 氷海水槽試験

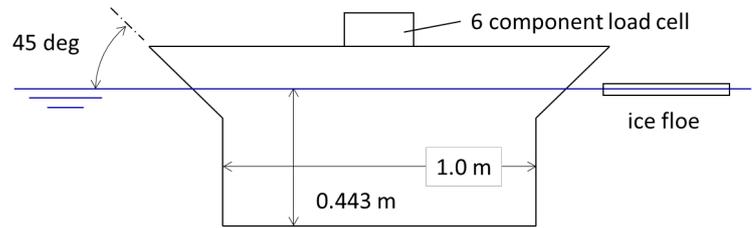


図 35 モノコラムハル型構造物模型

数値シミュレーションは、多数の氷盤干渉を取り扱うために計算コストの低い個別要素法を用いたオープンソースライブラリの物理エンジンである **Bullet** を衝突判定や拘束力の計算等に利用し、氷盤に働く流体力は各時間ステップで別途計算し外力として与えた<sup>57)</sup>。氷盤破壊は図 36 に示すように剛体要素を結合し、結合箇所に加わる力が氷盤強度から算出した基準値を上回った場合に要素間の結合を破断させて表現する方法を提案した<sup>58)</sup>、<sup>59)</sup>。また、氷盤の初期配置は、氷海水槽試験で撮影した模型氷の初期配置映像から watershed アルゴリズム等を用い、個々の氷盤位置や回転角を取り出して数値シミュレーション上で再現した<sup>60)</sup> (図 37 参照)。図 38 に構造物模型に作用する全体氷荷重の試験結果 (図中 exp.) と数値シミュレーション結果 (図中 sim.) を比較した一例を示す。  $L_e$  は氷盤の破壊モデルを構成する要素サイズを意味し、ここでは 60 cm 角の氷盤に対し  $L_e = 15$  cm は氷盤を 16 分割、 $L_e = 20$  cm は 9 分割した要素で構成された破壊を考慮した氷盤モデル (図 36(a)参照)、 $L_e = 60$  cm は分割なしで破壊を考慮しない氷盤モデルを指す。氷盤破壊を考慮しなかった場合 (sim.  $L_e = 60$  cm) に最大氷荷重が実験結果と比べ 2 倍以上の過大評価をしていたが、氷盤破壊モデルを適用することで全体氷荷重の平均値やばらつきを含め数値シミュレーションにより試験結果と同等の結果が得られるようになった。氷盤の挙動や破壊の状況も氷海水槽試験結果と似た傾向であることを確認した (図 39 参照)<sup>58)</sup>。

さらに、氷海資源開発に用いられた海洋構造物の公表データを参考に氷海水槽試験で係留系を再現した上で、マネージドアイスと干渉する係留浮体の動揺評価を行った。氷盤の漂流速度と氷盤サイズや氷盤の破壊サイズ (特性長) から得られる時間に関する係留浮体の振動成分を明らかにした<sup>61)</sup>。

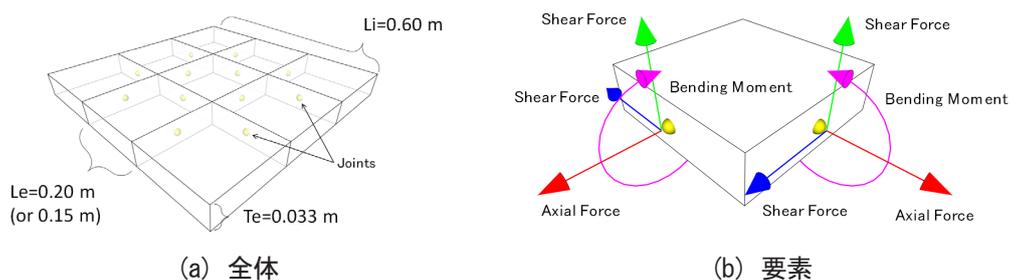


図 36 氷盤破壊モデルのイメージ

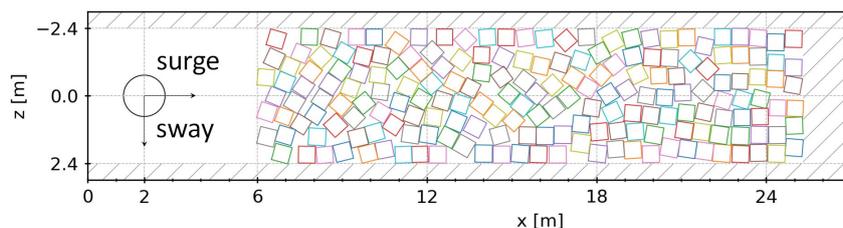


図 37 氷海水槽試験を再現した氷盤初期配置

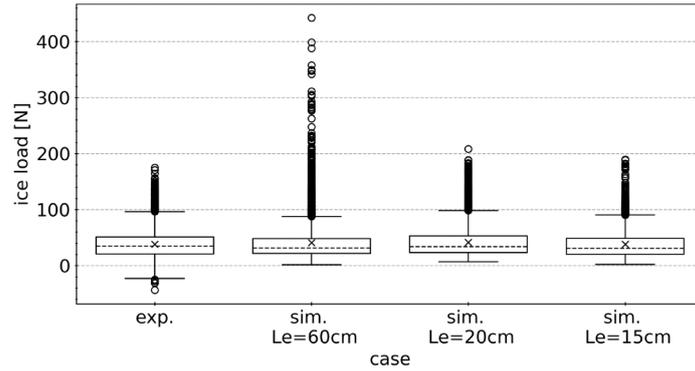
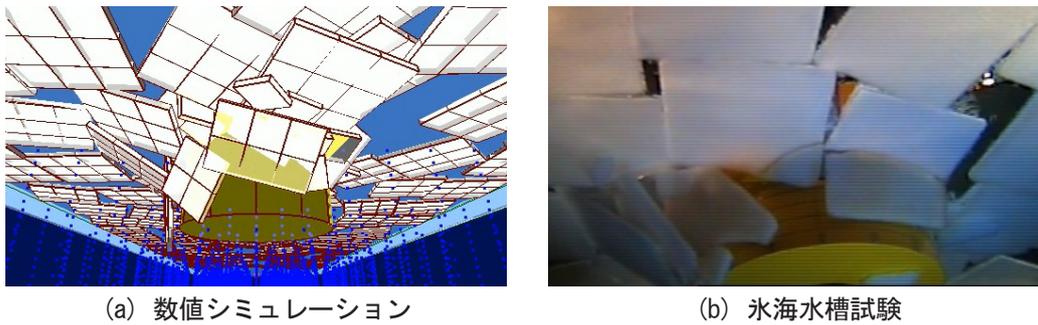


図 38 全体氷荷重のボックスプロット



(a) 数値シミュレーション

(b) 氷海水槽試験

図 39 構造物模型前方没水部の氷盤の様子

### 3.1.2 海水による氷海商船省エネ付加物への衝突評価

商船に装備されるようになってきた省エネ付加物は推進性能を向上させる有効な手段であり、氷海域を航行する砕氷船や耐氷船といったアイスクラスを有する氷海商船への適用も期待される。氷海域においては省エネ付加物が海水と衝突する恐れがあり、局所氷荷重に対し強度を十分に考慮して設計する必要がある。また、省エネ付加物は船体から張り出した構造をしているものが多く、振動などの動的要因の影響を強く受ける。そのため、従来のエネルギー理論に基づく静的な評価ではなく、海水の衝突による動的影響を考慮した構造応答を時間領域で正しく評価することが重要な技術課題となっている。

そこで本研究では、省エネ付加物として船尾ダクトを対象に、Finnish-Swedish Ice Class Rules<sup>62)</sup> (FSICR) の規則に基づいて海水が船尾ダクト前縁に衝突するシナリオを仮定し(図 40 参照)、海水と構造物の相互作用影響を考慮した構造の安全性や衝突荷重を評価するために動的非線形有限要素法による一連の衝突シミュレーションを LS-DYNA を用いて実施した<sup>63),64)</sup> (図 41 参照)。海水の有限要素モデルには Gagnon<sup>65)</sup>や他研究者により提案された複数モデルが存在するが、その妥当性を古典理論である Pressure-Area カーブに基づく衝突荷重<sup>66)</sup>との比較を通じて検証し、LS-DYNA で定義されている材料モデル MAT61 を本研究における海水の有限要素 (FE) モデルとして採用した。

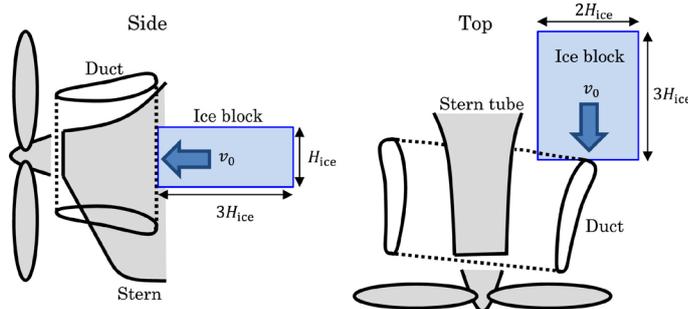


図 40 FSICR に基づく氷塊と船尾ダクトの衝突シナリオ

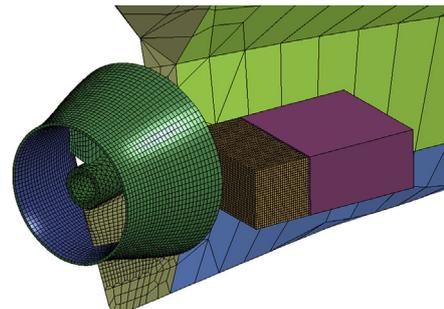


図 41 衝突連成解析モデル (偏心距離 0 m)

図 42 に最大応力が発生した瞬間の船尾ダクトのミーゼス応力分布の一例を示す。船尾ダクトと船体との接続部である上部と下部で比較的大きな応力が発生している。海氷と船体のような鋼構造物は剛性の差が大きいため、一般に船体を剛体と仮定して海氷の衝突荷重を求めることができる。しかし、船尾ダクトのような張り出した構造物である場合、衝撃力により大きく振動し、構造物の動的応答が衝撃荷重に影響する。そこで、本研究では船体を剛体ではなく弾塑性体としてモデル化し、同影響について動的非線形シミュレーションにより確認した。その結果、ダクトの弾性変位によって貫入量が減少することで衝撃荷重が減じられることを示した。さらに、海氷重心が偏心なく衝突するよりも、偏心を有してダクトに衝突する蓋然性の方が高いと想定されることから、海氷の衝突位置を偏心させて海氷の回転運動を考慮した衝突シミュレーションを実施し、運動量理論から導いた値と比較した（図 43 参照）。海氷は船尾ダクトとの衝突により貫入するため、滑りが無い場合の理論値と数値計算結果がほぼ一致することを確認した。また、海氷がダクトに偏心衝突することにより、衝撃力（Impulse Factor）が最大で約 20%程度低減することを定量的に確認し（図 43 参照）、偏心衝突による現実的な荷重レベルを定量的に明らかにした。海氷を FE モデル化し、船尾ダクトに対して動的衝突解析がなされた例は世界初である。

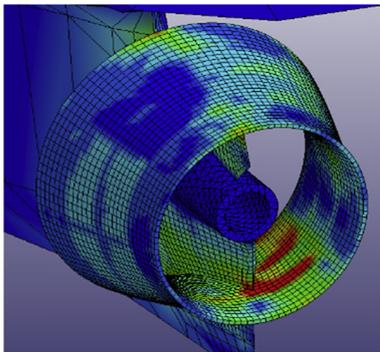


図 42 ミーゼス応力分布  
(赤が大きく、青が小さい)

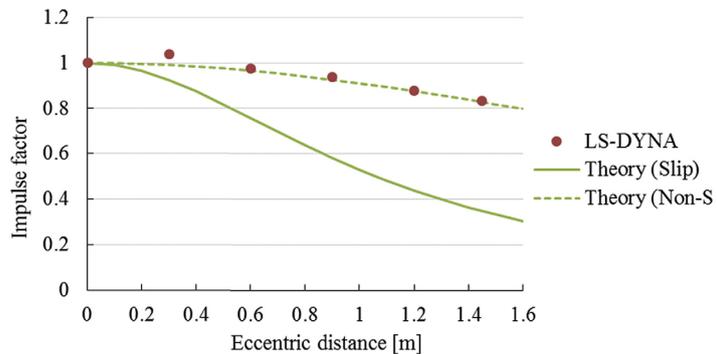


図 43 偏心衝突による荷重低減に関する解析結果と  
運動量理論との比較

### 3.2 SURF システムの installation 技術等の安全性評価

海底機器、フローラインなどの SURF (Subsea Umbilical, Riser and Flowline) システムを洋上にて設置する際、クレーン作業が必要となる。近年、海底機器等が複雑及び大型化してきていることから、2 隻の排水量の異なるクレーン船を使った協調作業や、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作業が高度化している。一方、どのようなクレーン作業を行う場合においても、作業時に発生する吊荷の振れ回りは、船上設備や作業員にとってはリスクとなるため、その事前評価が必要になるが、吊荷と浮体の運動は相互に影響を受けるため、吊荷と浮体の連成を考慮した波浪中運動評価が重要となる。以上から、当所においては洋上クレーン作業時における吊荷と浮体の波浪中連成運動評価に関して調査した<sup>67)~69)</sup>。

#### 3.2.1 波浪中連成運動評価 (単吊の場合)

まず、波浪中での浮体と吊荷の波浪中連成運動を把握するため、吊荷を懸下した状態での多目的作業船の波浪中動揺試験を当所の深海水槽にて実施した。多目的作業船は DPS で位置保持されるが、吊荷の運動は主に浮体のロールとピッチに大きく支配されると考えられるため、係留方式でも DPS でも振れ回りの相違は小さいものと考え、本研究では試験が容易な 4 点係留によって模型船を位置保持した。模型の設営状態を図 44 に示す。



図44 洋上クレーン作業中の多目的作業船の波浪中動揺試験

図45は多目的作業船のロールの応答関数の比較であり、左図は多目的作業船が単独状態、右図は多目的作業船に吊荷が懸下された状態の応答関数である。図中には試験結果に加えて計算結果についても表記した。数値計算は多目的作業船と吊荷の連成をラグランジェ方程式から求め、微小運動仮定の下で運動方程式を線形化して定式化した。係留力は線形復原力として考慮し、多目的作業船に作用する付加質量、造波減衰及び波強制力については境界要素法によって別途求めた。なお、吊荷の振り回り時に発生する空気や摩擦等による減衰は軽微と考慮してない。これらの結果から、吊荷によって浮体のロールの固有周期が長周期側に大きくシフトすることが明らかになった。

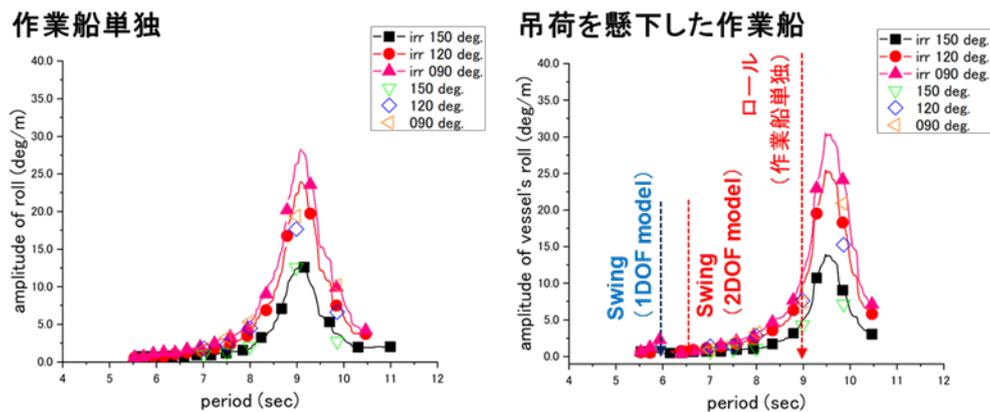


図45 吊荷と作業船の波浪中連成運動評価 (ロール応答関数)

吊荷が空中で懸下している場合と着水した場合で、多目的作業船のロールの固有周期がどのように変化するかを調査した結果を図46に示す。左図は横吊の場合、右図は縦吊の場合の固有周期の変化をまとめたものである。横軸は浮体から吊荷位置までの距離、縦軸は吊荷が無い場合のロールの固有周期で無次元化した値である。浮体から吊荷が遠ざかるほど、ロールの固有周期は大きく変化して、吊荷が空中か着水状態にあるかで変化は異なることがわかる。特に、横吊の場合は着水前後で固有周期が大きく変化することがわかった。

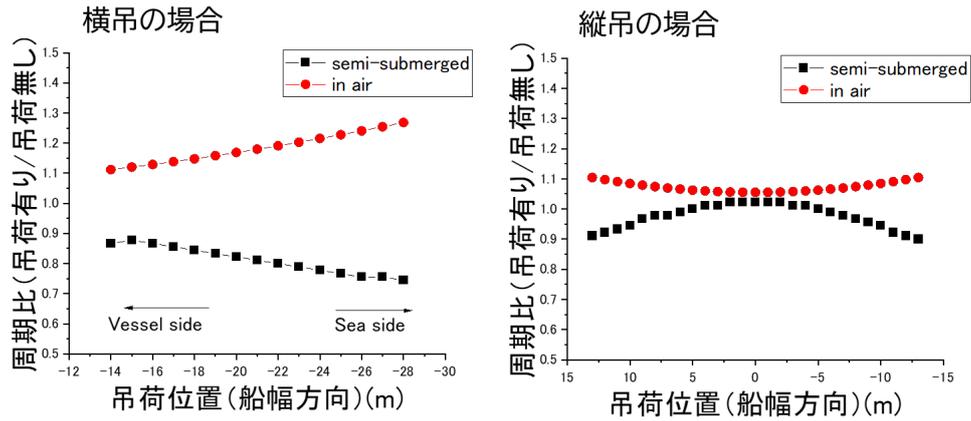


図 46 吊式によるロール固有周期の変化

3.2.2 波浪中連成運動評価（共吊の場合）

単吊の場合の吊荷と多目的作業船の波浪中連成運動評価で得られた知見等を応用し、排水量の異なる2浮体を使った協調クレーン作業（共吊）時を想定した波浪中運動評価に関する検討を行った。図 47 の左上図は当所の海洋構造物試験水槽において実施した水槽試験の様子である。左は作業船、右は作業バージの模型である。中央付近で吊荷を懸下している。なお、単吊の場合と同様に両浮体は係留方式で位置保持させ、規則波・不規則波中での浮体と吊荷の波浪中応答を調査した。

図 47 の左下図はある波周期条件における浮体と吊荷の航跡を描画したものである。吊荷が吊点からどのような相対方向に動いているのかを理解し易くするため、多目的作業船とバージ船のそれぞれの吊点平均座標を結んだ線（点線）を併記した。波周期に応じて吊荷が異なる相対方向に揺れている様子が確認できる。図 47 の右図は吊荷の運動方向を波周期毎にまとめたものである。若干のバラつきはあるものの、吊荷の振れ回り方向にも周期特性があることが確認される。本研究においては数値計算法についての検討も行い、水槽試験結果との比較を通じて検証した。

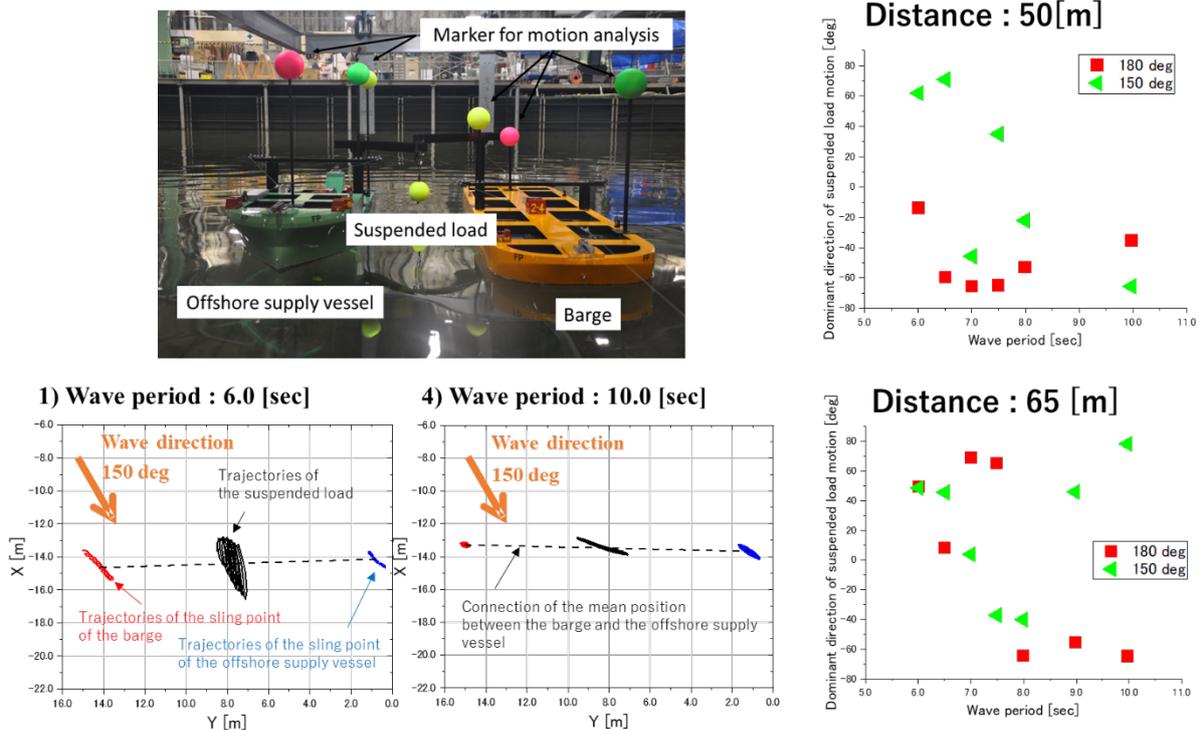


図 47 協調クレーン作業時（共吊）の波浪中連成運動評価試験の結果

### 3.3 SURF システムにおける管内流の健全性評価

長大な管で構成される SURF (Subsea Umbilical, Riser and Flowline) システムにおいて、内部閉塞などの事象が発生するとオペレーションをすべて中断せざるを得ないことから、多大なる経済的損失を生じさせる恐れがある。また、移送効率の最適化はプロジェクトにおいて常に必要とされるものである。したがって、管内流の健全性を管理することは非常に重要であるが、管内流の現象は内部流動と化学現象（相平衡）が複雑に絡んだ現象であるため、未だに明らかになっていないことが多い。以上から、当所ではアスファルテンの内部付着量評価とガスハイドレートに関する研究を実施した。

#### 3.3.1 アスファルテンの付着量評価に関する研究

原油やC重油などの重質油に含まれるアスファルテンは複雑な分子構造を有する物質であり、油井やパイプラインの閉塞の原因となる物質の1つである<sup>70),71)</sup>。アスファルテンは油の性状に応じて特定の温度・圧力領域において油相から析出し、管壁等に付着して閉塞を引き起こすと考えられている。しかし、具体的な付着特性については重質油の性状だけでなく壁面の性状等によっても影響を受ける可能性があり、付着特性を評価する手法は確立されていない。本研究では、アスファルテンの付着特性の評価手法を検討することを目的として、温度調節が可能な小型耐圧容器を含む実験装置を用いて、付着特性に関する基礎的なデータを取得する実験（以降、付着試験と表記）を実施した。

付着試験で使用した実験装置の概略を図48に示す。耐圧容器は最大使用圧力25 MPa、最高使用温度150℃、内容積14 cm<sup>3</sup>の円筒型容器であり、温度センサがキャップに挿入されている。容器内部の温度制御は、耐圧容器を浸したオイルバスの温度調節機能を用いて実施した。容器内の圧力はデジタル圧力センサ、容器内及びオイルバスの温度は温度センサを用いて測定し、データロガーに記録した。

付着試験で使用した重質油試料（JIS K 2205 相当のC重油）の基本的な性状を表4に示す。試料は、あらかじめ別のオイルバスで加温し、プランジャーポンプを用いて耐圧容器内に充填した。付着試験時の容器内部の温度・圧力条件は、90℃・10 MPaとし、この条件になるように事前にハンドポンプによる内部加圧を行ってから加温を実施した。試験期間は3週間及び6週間とした。

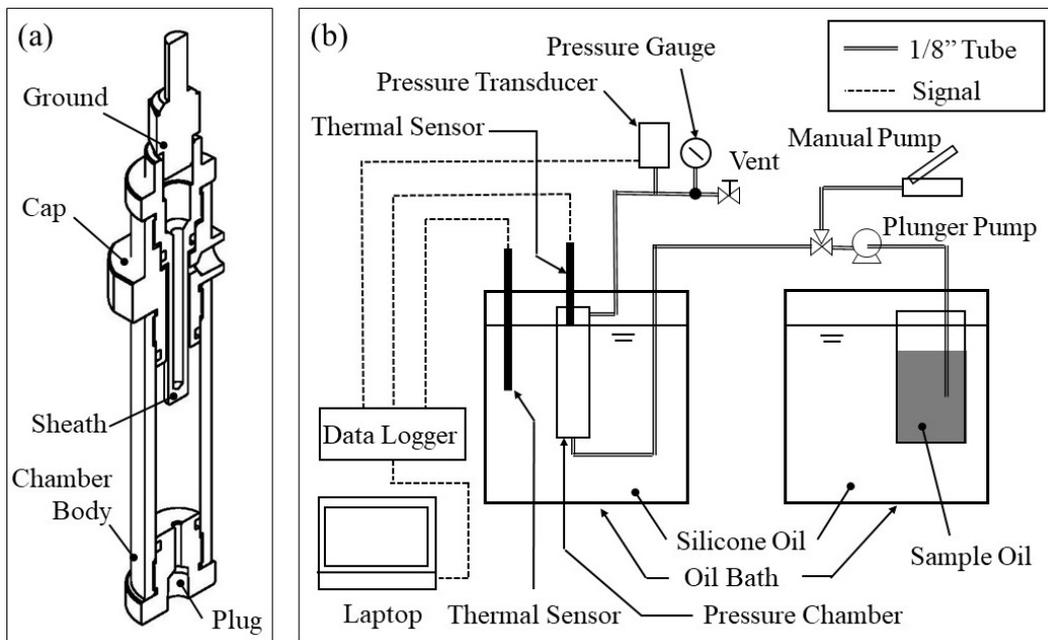


図48 付着試験で使用した実験装置の概略

(a) 耐圧容器の詳細, (b) 実験装置全体のレイアウト

表 4 重質油試料の基本的な性状

項目	単位	値	備考
密度	g/cm <sup>3</sup>	0.9806	@15°C
動粘度	mm <sup>2</sup> /s	241.4	@50°C
流動点	°C	<10	
引火点	°C	122	
残留炭素分	mass%	12.6	
硫黄分	mass%	2.21	
アスファルテン	mass%	4.5	
総発熱量	kJ/g	42.76	

付着試験終了後、実験装置を解体して重質油試料を容器から回収し、図 49 に示すフローシートに従って付着物の成分分析を実施した。解体した耐圧容器の胴体部を鉛直に固定し、自重により重質油の大半を流出させた後、流出せずに胴体部に付着して残留した試料を付着物として分析の対象とした。付着物のうち、n-ヘプタンに可溶な成分をマルテン（重質油中の有機物のうち、アスファルテン以外をあわせた総称）、n-ヘプタンに不溶かつトルエンに可溶な成分をアスファルテンとみなし、n-ヘプタン及びトルエンを用いた溶媒抽出法により両者を分離し、重量測定によりマルテン及びアスファルテンの測定を行った。溶媒抽出は、抽出の前後での重量変化がなくなるまで繰り返した。

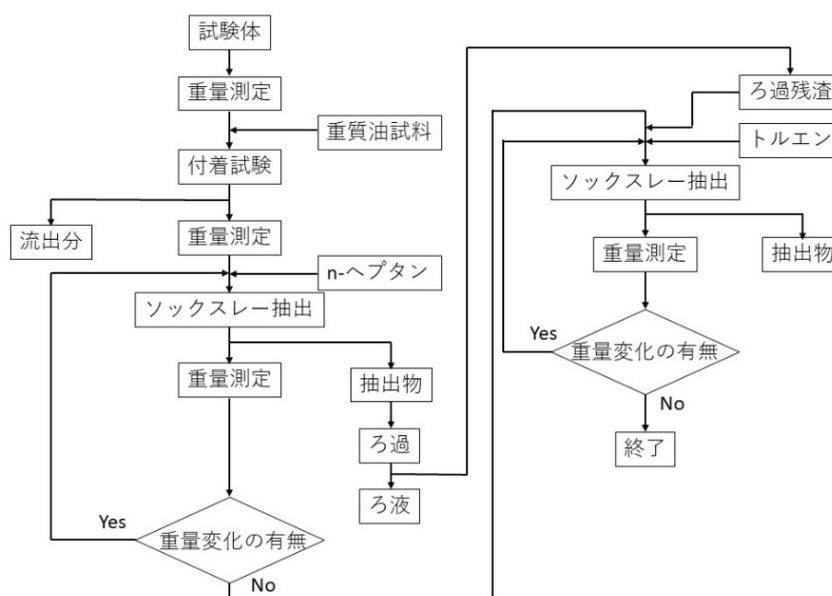


図 49 付着物の成分分析のフローシート

成分分析の結果として、付着物中に占めるマルテン及びアスファルテンの重量比を図 50 に示す。試験期間 3 週間と 6 週間の結果を比較すると、いずれの条件でもマルテンの重量比は 80 mass%以上、アスファルテンの重量比は 20 mass%以下であったが、試験期間を 6 週間とした場合の方がアスファルテンの重量比が増大した。データの点数が少ないため、付着試験期間と付着物中のアスファルテン重量比の関係については更なる検討が必要であるが、本研究で使用した簡易的な実験装置を用いて付着特性に係わるデータが取得できることが明らかになった。

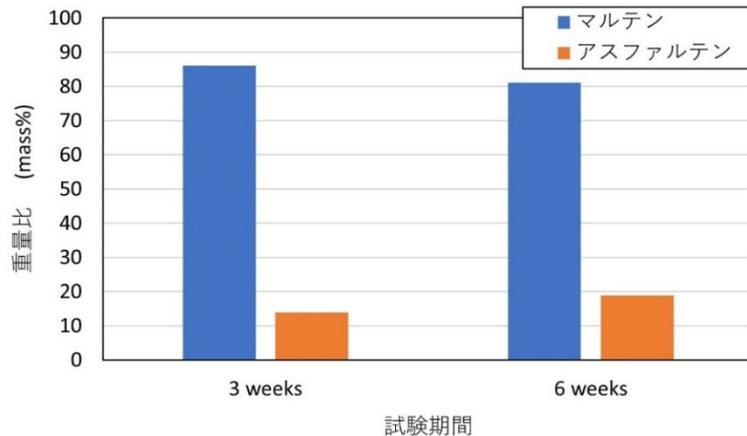


図50 付着物中に占めるマルテン及びアスファルテンの重量比

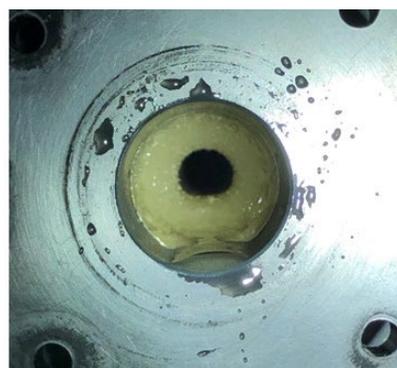
### 3.3.2 ガスハイドレートに関する研究

海洋資源開発におけるメタンハイドレート開発に関して、砂層型メタンハイドレートの開発で検討されている加熱または減圧法によりメタンガスのみを回収する方法とは異なり、表層型メタンハイドレートの開発では、メタンハイドレート粒子と海水の混合物であるスラリーとしてプラットフォームに移送する方法が検討されている。本方法では、移送中に管路内の温度や圧力条件により相変化が発生し管内流動に影響を及ぼす可能性がある。そこで、移送中における管内スラリーの相変化に伴う影響について、常圧下及び高圧下における基礎的な試験を行い、観察とデータ取得を実施した。

常圧下試験では、図51(a)に示す移送管の外部温度による影響も含め観察可能な熱交換器を組み込んだフローループ試験装置を製作し、ガスハイドレートを模擬した氷スラリーのループ試験を実施し、相変化過程を観察した。試験結果より、氷スラリーの影響により、管内の海水温度は、 $-1.5^{\circ}\text{C}$ まで低下したが管内閉塞を引き起こす状態には至らなかった。しかし、表層型メタンハイドレートが賦存する日本海側冬季の気温条件を想定し管外温度を徐々に下げていくと、管内では氷片が発生し、管外温度 $-4^{\circ}\text{C}$ で管内閉塞が確認された(図51(b)参照)。本試験より、通常の中移送では、氷スラリーの分解による減熱影響を考慮しても、相変化による管内閉塞への影響は確認できなかった。ただし、海上での移送では、外部気温の影響により管内の海水が凍結する温度まで低下する可能性が示唆された<sup>72)</sup>。



(a) ループ試験の様子



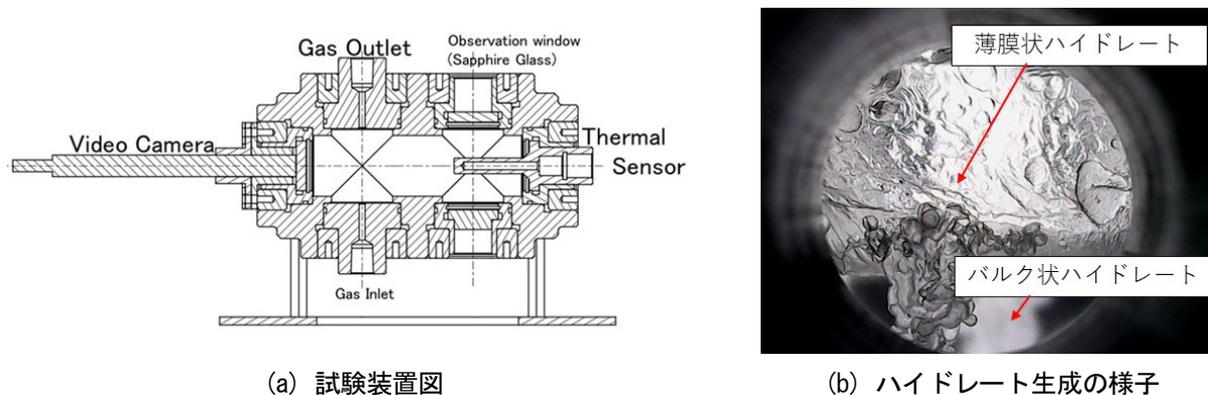
(b) 管内閉塞の様子

図51 ガスハイドレートを模擬した氷スラリーの相変化に及ぼす影響を調査するための常圧下ループ試験

高圧下試験では、温度や圧力の条件がハイドレートの生成・分解過程に与える影響を確認するため、ハイドレート相変化過程の観察及びデータの取得を行った。安全上のため、ハイドレートの材料は、二酸化炭素ガスを使用した。高圧試験装置は、最大圧力  $20\text{ MPaG}$  (G はゲージ圧力を示す)、内部容積  $100\text{ mL}$  である(図52(a)参照)。

試験により、温度・圧力条件やガスの制御によりハイドレートの成長過程が異なることが確認できた。例えば、最初に気液面から下向きに尖った結晶が生成され成長して帯状の結晶となり、マッシュパな結晶が生成される場合

<sup>73)</sup>や、チャンバの底面から大量の小さい気泡が発生し、その後気泡の表面がハイドレート化し、他の気泡と吸着し塊が形成される場合<sup>74)</sup>などが確認できた(図 52(b)参照)。また、ハイドレートが生成される温度・圧力条件であっても、ハイドレートが生成されない場合も確認できた。図 53 に、ハイドレート生成・分解試験における試験装置内の温度・圧力変化の例を示す。時刻  $t_1$  においてはじめて気液界面においてハイドレート結晶生成が確認され、気泡表面が徐々にハイドレート化する様子が観察された。その後、ベント(装置内のガスを排気する操作)により一旦装置内を減圧したのち、時刻  $t_2$  においてマッシブな(バルク状の)ハイドレート結晶が発生すると同時に装置内圧力が上昇し、系内の温度・圧力条件は、ガス-水(人工海水)-CO<sub>2</sub>ハイドレートの平衡状態に達した(図 52(b)に相当)。時刻  $t_2$  から  $t_3$  までの間はベント等を行わず装置を静置した。時刻  $t_3$  から徐々にベントを行い装置内の減圧を開始したが、バルク状のハイドレートが残留している間( $t_3 \sim t_4$ )は、ベントに対応してハイドレートが部分的に分解し、系内の温度・圧力は平衡曲線に沿って変化する傾向を示した。時刻  $t_4$  においてバルク状ハイドレートが消失したのちはベントにより急速に装置内圧力が低下した。このような試験結果より、ガスハイドレートの生成には、温度と圧力に加え、液相が過飽和に達するような、十分な量のガス圧入が必要であると示唆された。十分なガス量には、海水中の溶存ガスも含まれる。メタンハイドレートの移送中に溶存ガスが気化した場合の影響についても検討する必要があると考えられる<sup>75)</sup>。一方、ガスハイドレートの分解は、系の温度・圧力等の平衡条件からのずれが駆動力となって進行することが示唆された。



(a) 試験装置図

(b) ハイドレート生成の様子

図 52 ガスハイドレート生成過程を調査するための高圧下試験

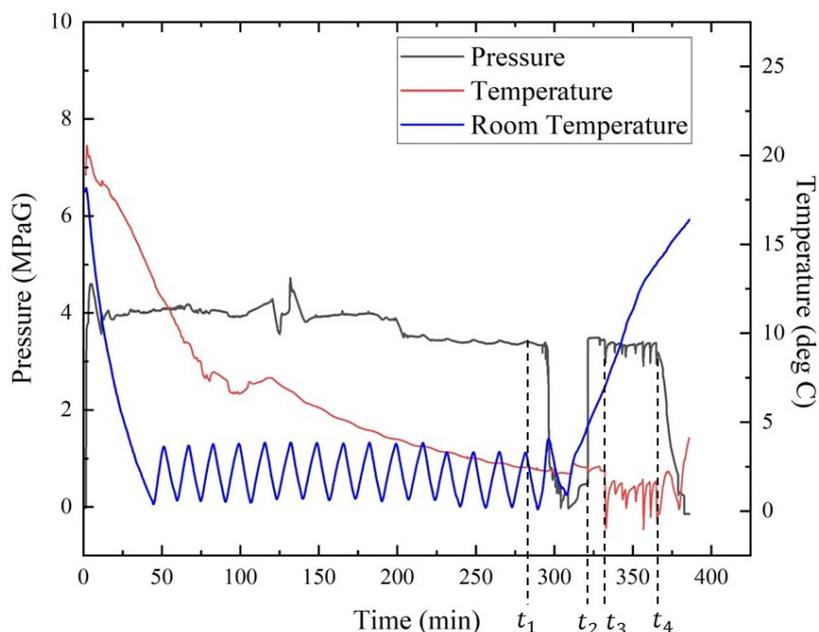


図 53 ハイドレート生成・分解試験における温度・圧力変化の例  
(図 52 (b) に示す画像を取得した試験ケース)

#### 4. おわりに

我が国では、海洋基本計画に基づき、メタンハイドレートや海底熱水鉱床等の海洋資源に関して将来の商業化への移行が可能となるよう産業化のための技術開発を着実に進めていくとともに、将来見込まれる海洋石油・天然ガス開発市場の拡大に向けて民間企業が技術力を高めることができるための取り組みが行われている。

当所では、海洋基本計画等の国の施策に沿ったナショナルプロジェクト及び海洋産業育成等への技術的貢献を行うとともに、実際の開発・生産を担う民間企業への技術的支援を行うため、2016～2022年度の中長期計画期間中に、海洋資源開発に係る生産システム等の基盤技術の開発及び安全性評価手法の確立に関する重点研究を実施した。

海底鉱物資源開発では、重点研究として揚鉱・集鉱技術、海底鉱物処理技術、計画支援技術に関する研究を行うとともに、経済産業省の委託を受けて JOGMEC が実施した海底熱水鉱床開発に係る調査事業に民間企業と共同で参画し、重点研究で得られた成果も活用しながら揚鉱管の全体解析、稼働性評価、安全性評価等を行って世界初となる鉱石の連続揚鉱試験の成功に貢献した。さらに当該事業で取得した実海域データ等を用いて、当所がこれまでに構築してきた各種評価手法が妥当であることを確認することができた。

また、厳環境下に設置される海洋資源開発システムについては、氷海域に設置される浮体式海洋構造物に作用するマネージドアイスによる全体氷荷重の推定手法の構築を行うとともに、氷海商船省エネ付加物への海氷の衝突による動的影響を考慮した衝突荷重評価を行った。また、SURF システム等の重量物を設置するための洋上クレーン作業時における吊荷と作業船の波浪中連成運動評価を行って、重量物の懸下状態によって船体の動揺特性が大きく変わることを示した。さらに、SURF システムにおける管内流の健全性評価として、アスファルテンの内部付着とガスハイドレートに焦点を当て、それらの基礎的な性状を把握した。

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、対象事業に応じた評価・支援技術が必要不可欠となる。当所では2023年度から始まった新たな中長期計画において、これらの状況を踏まえ、海洋開発に必要な技術に係る研究を積極的に実施して、我が国における海洋資源開発の促進、海洋開発産業の育成等に貢献していく所存である。

#### 謝 辞

配管の内部流評価における固液二相流に係る研究の一部、及び採鉱・揚鉱パイロット試験に係る研究は、経済産業省の委託を受けて独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（現、エネルギー・金属鉱物資源機構）が実施した海底熱水鉱床開発に係る業務の一環として実施したものである。また、配管の内部流評価における固気液三相流に係る研究の一部は、経済産業省のメタンハイドレート研究開発事業の一環として実施したものである。さらに、海氷による氷海商船省エネ付加物への衝突評価に係る研究は、Class NK Joint R&D for Industry Programの一環として、株式会社大島造船所と一般財団法人日本海事協会との共同研究により実施したものである。これらの業務に携わった関係各位に感謝の意を表す。

水中線状構造物の応答評価における揚鉱管・戻り管に係る研究の一部はJSPS科研費JP26289343, JP17H03500, 配管の内部流評価における固液二相流に係る研究の一部はJSPS科研費JP18H01648, JP21H04590, 固気液三相流に係る研究の一部はJSPS科研費JP20K14977, JP22K04568, 海底鉱物処理技術に係る研究はJSPS科研費JP16H04609, マネージドアイス中の全体氷荷重推定に係る研究はJSPS科研費JP17K14890, SURFシステムに係る研究の一部はJSPS科研費JP20H02378, JP19H02368の助成をそれぞれ受けたものである。

また、海底鉱物処理技術に係る研究で使用した海底熱水鉱床の鉱石試料は、国立研究開発法人海洋研究開発機構から提供を受けたものであり、下記のデータサイトに掲載されたサンプルを利用したものである。

- 海洋研究開発機構 (2016) JAMSTEC航海・潜航データ・サンプル検索システム (DARWIN) ,  
<http://www.godac.jamstec.go.jp/darwin/>

#### References

- 1) Cabinet Office: The Basic Plan on Ocean Policy, [https://www8.cao.go.jp/ocean/english/plan/pdf/plan03\\_e.pdf](https://www8.cao.go.jp/ocean/english/plan/pdf/plan03_e.pdf) (2018).
- 2) Cabinet Office: The Basic Plan on Ocean Policy, [https://www8.cao.go.jp/ocean/english/plan/pdf/plan02\\_e.pdf](https://www8.cao.go.jp/ocean/english/plan/pdf/plan02_e.pdf) (2013).
- 3) N. Okamoto, S. Shiokawa, S. Kawano, H. Sakurai, N. Yamaji, M. Kurihara: Current Status of Japan's Activities for Deep-Sea Commercial Mining Campaign, Proceedings of 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), Kobe, Japan (2018).
- 4) M. Yamamoto, T. Fujiwara, S. Kanada, M. Ono, S. Takano, J. Yamamoto: Experimental Analysis of Reduced-Scale Jumper for Deep-Sea Mining, Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2019), OMAE2019-95990.
- 5) P. Espinasse: Understanding SMS Behavior to Define the Subsea Mining Operating System, Proceedings of 2012 Offshore Technology Conference (2012), OTC20978.
- 6) Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan Oil, Gas and Metals National Corporation: Comprehensive Evaluation Report of PMS Development Program (2018) (in Japanese).
- 7) Det Norske Veritas: Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205 (2010).
- 8) T. Fujiwara, R. Wada, M. Ozaki: Experimental study on elastic behaviors of two tandem risers in constant flow, Journal of Marine Science and Technology, Vol.26, No.4 (2021), pp.1280-1291.
- 9) T. Fujiwara, R. Wada, M. Ozaki: Experimental study on two vertical risers in steady flow, Journal of Marine Science and Technology, Vol.27, No.2 (2022), pp.989-1001.
- 10) T. Fujiwara, R. Wada, M. Ozaki: Forced oscillation experiments for each vibration mode of closely spaced parallel pipes in steady flow, Journal of Fluids and Structures, Vol.117 (2023), 103833.
- 11) M. Yamamoto, J. Yamamoto, S. Masanobu: Simulation of a Vertical Riser System Composed of Two Pipes for Deep Sea Mining, Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2022), OMAE2022-78330.
- 12) M. Yamamoto, J. Yamamoto, S. Masanobu: Study on the Axial Tension Reduction of a Dual-bore Vertical Riser System for Deep Sea Mining, Proceedings of the ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2023), OMAE2023-101679.
- 13) M. Yamamoto, T. Fujiwara, S. Kanada, M. Ono, S. Takano, J. Yamamoto, S. Masanobu: The Effects of Solid-Liquid Internal Flow on the Dynamic Behavior of a Reduced-Scale Jumper for Deep-Sea Mining, Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2020), OMAE2020-18688.
- 14) M. Yamamoto, T. Fujiwara, J. Yamamoto, S. Masanobu: Numerical Simulation of a Jumper Conveying Slurry for Deep-Sea Mining, Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2021), OMAE2021-62356.
- 15) S. Masanobu, S. Takano, T. Fujiwara, S. Kanada, M. Ono, H. Sasagawa: Study on Hydraulic Transport of Large Solid Particles in Inclined Pipes for Subsea Mining, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.139 (2017), 051401.
- 16) S. Takano, S. Masanobu, S. Kanada, M. Ono, M. Araki, H. Sasagawa: Experimental Studies of Pressure Loss for Large Particle Slurry Transport in Oscillated Pipe for Subsea Mining, Proceedings of the ASME 2017 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2017), OMAE2017-61238.
- 17) S. Masanobu, S. Takano, S. Kanada, M. Ono: 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 (2021), 061801.

- 18) S. Masanobu, S. Takano, M. Yamamoto, Y. Murai, Y. Tasaka, H. J. Park: Study on Large Particle Slurry Transport in Inclined Pipes with Pulsating Flow for Subsea Mining, Proceedings of the ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2023), OMAE2023-100939.
- 19) S. Masanobu, S. Takano, S. Kanada, M. Ono: Experimental Investigation of Large Particle Slurry Transport in Vertically Oscillating Pipe for Subsea Mining, Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2021), OMAE2021-62347.
- 20) S. Masanobu, M. Yamamoto, S. Takano, Y. Murai: Study on Large Particle Slurry Transport in Jumper for Subsea Mining, Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2022), OMAE2022-79597.
- 21) S. Takano, M. Ono, S. Masanobu: Evaluation Method of Pipe Wear for Development of Seafloor Massive Sulfides, Journal of JSCE, Vol.8 (2020), pp.288-302.
- 22) S. Masanobu, J. Yamamoto, I. Takahashi, Y. Nakajima, S. Kanada, M. Ono, T. Fujiwara, S. Takano, M. Araki, T. Fujiwara, K. Yukawa, M. Saito, K. Otsubo, H. Sato, K. Ishida, M. Watanabe, H. Itoh, E. Ishimura, H. Matsui: Research on Core Technologies for Subsea Mining, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.17, No.2 (2017), pp.1-28 (in Japanese).
- 23) S. Takano, H. Sato, T. Terao, S. Masanobu, S. Kawano: Study on Pipe Wear Based on Large Scale Experiment and Scale Effect for Deep Sea Mining, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.144 (2022), 011803.
- 24) S. Takano, S. Masanobu, J. Yamamoto, S. Kanada, M. Ono, H. Sasagawa: Experimental Study on Three Phase Flow in Inclined Pipe for Deep Sea Mining, Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2020), OMAE2020-18257.
- 25) S. Takano, S. Masanobu, S. Kanada, M. Ono: Experimental Study on Void Fractions and Pressure Drops in Three-Phase Flow for Deep Sea Mining, Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2021), OMAE2021-60472.
- 26) S. Takano, S. Masanobu, S. Kanada, M. Ono: Flow Assurance for Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flow at High Void Fraction of Gas Phase for Methane Hydrate Transport, Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2022), OMAE2022-79601.
- 27) S. Takano, S. Masanobu: Subsea Mineral Resources and Flow Assurance for Air-lift Pumping Systems, Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol.36, No.3 (2022), pp.312-319 (in Japanese).
- 28) S. Takano, S. Masanobu, S. Kanada, M. Ono: Correlation for calculating frictional pressure drops in vertical three-phase flows for subsea-resource production, Ocean Engineering, Vol.275 (2023), 114121.
- 29) S. Takano, S. Masanobu: Numerical Simulation on Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flow by Gas-Lift Pumping System for Deep Sea Mining, Proceedings of the ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2023), OMAE2023-100624.
- 30) S. Takano, S. Masanobu, S. Kanada, M. Ono: Experimental Studies on Velocities of Gas- and Solid-Phases in Gas-Liquid-Solid Three-Phase Flow for Subsea Resource Productions, Journal of Multiphase Science and Technology, Vol.35, No.3 (2023), pp.35-54.
- 31) Y. Nakajima, S. Uto, S. Kanada, J. Yamamoto, I. Takahashi, S. Otabe, J. Sadaki, K. Okaya, S. Matsuo, T. Fujita: Concept of Seafloor Mineral Processing for Development of Seafloor Massive Sulfides, Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2011), OMAE-2011-49981.
- 32) 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, Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2012), OMAE-2012-83354.
- 33) Y. Nakajima, J. Yamamoto, S. Kanada, S. Masanobu, I. Takahashi, K. Okaya, S. Matsuo, T. Fukushima, T. Fujita: Study on Grinding Technology for Seafloor Mineral Processing, Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2013), OMAE-2013-10756.

- 34) B. Bharatwaj, L. Wu, S. R. P. da Rocha: Biocompatible, Lactide-Based Surfactants for the CO<sub>2</sub>-Water Interface: High-Pressure Contact Angle Goniometry, Tensiometry, and Emulsion Formation, *Langmuir*, Vol.23, No.24 (2007), pp. 12071-12078.
- 35) D. N. Espinoza, J. C. Santamarina: Water-CO<sub>2</sub>-Mineral Systems: Interfacial Tension, Contact Angle, and Diffusion – Implications to CO<sub>2</sub> Geological Storage, *Water Resources Research*, Vol.46 (2010), W0753.
- 36) Y. Nakajima, J. Yamamoto, T. Takahashi, B. Thornton, Y. Yamabe, G. Dodbiba, T. Fujita: Development of Elemental Technologies for Seafloor Mineral Processing of Seafloor Massive Sulfides, *Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (2019), OMAE-2019-96040.
- 37) Y. Nakajima, Y. Yamabe, T. Fujita, G. Dodbiba: Beneficiation of Seafloor Massive Sulfides by Liquid-Liquid Extraction, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol.144 No.1 (2022), 011501.
- 38) B. Thornton and T. Ura: Effect of Pressure on the Optical Emissions Observed from Solid Immersed in Water Using a Single Pulse Laser, *Applied Physics Express*, Vol.4, No.2 (2011), 022702.
- 39) B. Thornton, T. Masamura, T. Takahashi, T. Ura, K. Ohki, T. Sakka: Development and Field Testing of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for In Situ Multi-Element Analysis at Sea, *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS'12* (2012).
- 40) B. Thornton, T. Sakka, T. Takahashi, A. Tamura, T. Masamura, A. Matsumoto: Spectroscopic Measurements of Solids Immersed in Water at High Pressure Using a Long-Duration Nanosecond Laser Pulse, *Applied Physics Express*, Vol.6, No.8 (2013), 082401.
- 41) B. Thornton, T. Sakka, T. Masamura, A. Tamura, T. Takahashi, A. Matsumoto: Long-Duration Nano-Second Single Pulse Lasers for Observation of Spectra from Bulk Liquids at High Hydrostatic Pressures, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Vol. 97 (2014), pp.7-12.
- 42) B. Thornton, T. Takahashi, T. Sato, T. Sakka, A. Tamura, A. Matsumoto, T. Nozaki, T. Ohki, K. Ohki: Development of a Deep-Sea Laser-Induced Breakdown Spectrometer for In Situ Multi-Element Chemical Analysis, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Vol.95 (2015), pp.20-36.
- 43) T. Takahashi, B. Thornton, K. Ohki, T. Sakka: Calibration-Free Analysis of Immersed Brass Alloys Using Long-nanosecond Duration Pulse Laser-Induced Breakdown Spectroscopy with and without Correction for Non-stoichiometric Ablation, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Vol.111 (2015), pp.8-14.
- 44) Y. Nakajima, B. Thornton, T. Sato: Application of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for in-situ Measurement of Metal Grade for Seafloor Mineral Processing, *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS'15* (2015).
- 45) Y. Nakajima, T. Sato, B. Thornton, G. Dodbiba, T. Fujita: Development of Seafloor Mineral Processing for Seafloor Massive Sulfides, *Proceedings of Techno-Ocean 2016* (2016).
- 46) Y. Nakajima, J. Yamamoto, T. Takahashi, B. Thornton, G. Dodbiba, T. Fujita: Measurement of Metal Grade of Ore Particles in Slurry Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, *Proceedings of OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean 2018* (2018).
- 47) J. Yamamoto, Y. Nakajima, M. Watanabe, K. Yukawa, S. Masanobu: Development of Analytical Tools to Support Planning of Seabed Mining Projects, *Papers of National Maritime Research Institute (separate volume)*, Vol.22 (2022), pp.29-33 (in Japanese).
- 48) T. Chujo, S. Ishida, K. Yukawa, Y. Namba, Y. Nakajima, S. Kato: Research and Development of Offshore Platforms for SMS Mining: Part 1 An Integrated Design Tool of Offshore Platforms, *Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (2010), OMAE2010-20779.
- 49) S. Masanobu, S. Kato, S. Ishida, S. Uto: Research and Development of Offshore Platforms for SMS Mining: Part 2 Conceptual Design of the Platform, *Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (2010), OMAE2010-20836.
- 50) Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry: Plan for the Development of Marine Energy and Mineral Resources, [https://warp.da.ndl.go.jp/collections/info:ndljp/pid/11253807/www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen\\_nenryo/pdf/report01\\_01\\_00.pdf](https://warp.da.ndl.go.jp/collections/info:ndljp/pid/11253807/www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen_nenryo/pdf/report01_01_00.pdf) (2013) (in Japanese).
- 51) JOGMEC NEWS, Vol.52, <https://www.jogmec.go.jp/content/300353355.pdf> (2018) (in Japanese).

- 52) J. Yamamoto: Research on the Essential Technologies for the Development of Seafloor Massive Sulfides, Proceedings of 18th Research Presentation Meeting of National Maritime Research Institute (2018), pp.16-24 (in Japanese).
- 53) K. Otsubo, M. Watanabe, K. Ishida, M. Araki, K. Hasegawa, M. Saito, H. Sato, K. Yukawa, R. Iwashita, S. Kawano: On availability analysis for pilot test of excavating and ore lifting conducted for seafloor polymetallic sulphides, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.29 (2019), pp.147-162 (in Japanese).
- 54) E. Ishimura, H. Itoh, S. Takano: Safety Assessment of Pilot Test on Excavating and Ore Lifting of PMS, Journal of the Japan Institute of Marine Engineering, Vol.56, No.1 (2021), pp.155-161 (in Japanese).
- 55) T. Sano, M. Reclari, T. Nonaka, J. Suematsu, M. Shimokawa, M. Komatsu: Development of Simulation Tool for the Prediction of Large Particles Transport in Liquid Flow, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol.55, No.2 (2018).
- 56) K. Hasegawa, S. Uto, H. Shimoda, D. Wako, T. Matsuzawa: Non-smooth Discrete Element Method simulation on Single Ice Floe-Structure Interaction and Comparison with Result of Ice Tank Test, Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans (2018), pp.187-190.
- 57) K. Hasegawa, S. Uto, H. Shimoda, D. Wako, T. Matsuzawa: Numerical and Experimental Investigations of Managed Ice Loads acting on Fixed Conical Structure, Proceedings of the 28th International Ocean and Polar Engineering Conference (2018), pp.1672-1678.
- 58) K. Hasegawa, S. Uto, H. Shimoda, D. Wako, T. Matsuzawa: Non-smooth DEM Simulation for Interaction of Conical Structure and Managed Ice Floes using Breakable Ice Element, Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (2019).
- 59) K. Hasegawa and T. Matsuzawa: Influence of the Constraint Force Mixing Parameter in Non-smooth DEM Simulation on Global Ice Load by Managed Ice Floes, Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (2021).
- 60) K. Hasegawa, S. Uto, H. Shimoda, D. Wako, T. Matsuzawa: Influence of Initial Arrangement of Ice Floes on Ice Loads in Non-smooth Discrete Element Method Simulation, Proceedings of the 34th International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans (2019), pp.126-129.
- 61) K. Hasegawa, S. Uto, H. Shimoda, D. Wako, T. Matsuzawa: Ice Tank Test of Moored Conical Structure Model in Managed Ice, Proceedings of the 35th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (2020).
- 62) TRAFI, Ice Class Regulations “Finnish-Swedish Ice Class Rules” (2010), TRAFI/31298/03.04.01.00/2010.
- 63) S. Matsui, Y. Yamada, S. Uto, T. Matsuzawa, S. Watanabe: Analysis of Structural Response of Ice-class Vessel due to impact of Ice and Energy-saving Device, Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (2016), pp.167-170.
- 64) S. Matsui, S. Uto, Y. Yamada, S. Watanabe: Numerical study on the structural response of energy-saving device of ice-class vessel due to impact of ice block, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.10, No.3 (2018), pp.367-375.
- 65) R. E. Gagnon: A numerical model of ice crushing using a foam analogue, Cold Regions Science and Technology, Vol.65, No.3 (2011), pp.335-350.
- 66) J. O. Sanderson: Ice Mechanics: Risks to Offshore Structures (1988), Springer.
- 67) K. Otsubo, K. Ishida, H. Sato, K. Hasegawa, M. Araki: Evaluation of wave-induced coupled dynamics between multi-purpose offshore supply vessel and suspended load during crane lifting operation, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.30 (2019), pp.187-200 (in Japanese).
- 68) K. Otsubo, K. Hasegawa: Evaluation of Wave-induced Coupled Dynamics Between Multi-purpose Offshore Supply Vessel and Suspended Load During Crane Lifting Operation – Part 2 Analysis for Wave-induced Coupled Dynamics Right After Suspended Load Entry into the Water –, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.33 (2021), pp.173-190 (in Japanese).
- 69) K. Otsubo: On Wave-induced Coupled Motion During Cooperative Multi-crane Lifting Operation with Two Vessels, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vo.33, No.2(2023), pp.204-214.

- 70) A. H. Alshareef: Asphaltenes: Definition, Properties, and Reactions of Model Compounds, *Energy and Fuels*, Vol.34, No.1 (2020), pp.16-30.
- 71) A. Alhosani and N. Daraboina: Modeling of Asphaltene Deposition during Oil/Gas Flow in Wellbore, *Fuel*, Vol. 280 (2020), 118617.
- 72) J. Yamamoto, M. Yamamoto, Y. Nakajima, S. Takano, S. Kanada, M. Ono, K. Otsubo: Experimental Study on Plugging Inside a Pipe Using Carbonated Ice as a Substitute for Methane Hydrate, *Proceedings of the ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2021)*, OMAE2021-62164.
- 73) Y. Nakajima, J. Yamamoto, S. Takano, M. Yamamoto, M. Ono, S. Kanada, K. Otsubo: Observation of Gas Hydrate Formation at Gas-Liquid Interface, *Proceedings of International Conference on Power Engineering-2021 (2021)*, ICOPE-2021-0202.
- 74) Y. Nakajima, J. Yamamoto, S. Takano, M. Yamamoto, M. Ono, S. Kanada, K. Otsubo: Morphological Observations of Gas Hydrate Formation in Gas-Seawater Systems, *Proceedings of the 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference (2023)*, ISOPE-2023-TPC-0343.
- 75) J. Yamamoto, Y. Nakajima, M. Yamamoto, S. Takano, M. Ono, S. Kanada, K. Otsubo: Preliminary Experiment for Construction of an Evaluation Model for Methane Hydrate Transportation, *Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (2022)*, OMAE2022-80247.