安全保障技術研究推進制度　令和６年度終了課題　終了評価結果

1.　評価対象研究課題

（１）研究課題名：レーザー反射光を利用する海中海底ハイブリットセンシングの研究

（２）研究代表者：海洋研究開発機構　石橋　正二郎

（３）研究期間　：令和２年度～令和６年度

2.　終了評価の実施概要

日時　　：令和７年１１月１８日

場所　　：ＴＫＰ新橋カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所　理事長、上席研究員
東京大学　名誉教授
　平澤　泠（委員長）
筑波大学　数理物質系　物理工学域　教授
　岩室　憲幸
東京農工大学　名誉教授
　宇野　亨
長岡技術科学大学　名誉教授、産学連携研究員
福島国際研究教育機構　研究開発部門
　遠隔操作研究ユニット　ユニットサブリーダー
長崎総合科学大学　新技術創成研究所　特命教授
　大石　潔
東京科学大学　工学院　電気電子系　教授
　梶川　浩太郎
情報通信研究機構　主席研究員
　門脇　直人
産業技術総合研究所　サイバーフィジカルセキュリティ研究部門
　副研究部門長
　川村　信一
慶應義塾大学　名誉教授
　笹瀬　巌
東京工業大学（現　東京科学大学）名誉教授
　蜂屋　弘之
元　東海大学　教授
　森本　雅之
大阪大学　名誉教授、招へい教授
　渡邊　尚

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3. 研究と成果の概要

研究の概要

日本の水域に賦存する海底鉱物資源の一部は、海底面に表出し、特異な形状・形態を構成している。この特異点を広域にわたり短期かつ効率的に探査することが実現されれば、海底鉱物資源の発見および賦存量の把握に繋がり、その産業化にも寄与する。本研究では海底鉱物資源の探査技術に焦点を当て、レーザー反射光の海中伝搬特性を理解することで海底鉱物資源探査に資する複合的な海中・海底センシング技術の基礎研究について取り組む。海中・海底におけるレーザー反射特性に注目し、(1)レーザー反射から時間情報の取得および(2)レーザー反射率の検出、(3)レーザー反射からドップラ成分の抽出に関する各センシング技術に取組み、高精度化を図るとともにその有効性を実環境にて示す。下記に本研究における最終目標を示す。

【最終目標】

(1)実環境における長距離レーザー測距

・最大約 60m（往復約 120m）レンジを有するレーザー測距技術の実現を目指す。

・三次元海底可視化画像の生成（最大水平分解能 8000 画素[*1]）を目指す。

(2)実環境における海底の物性推定

・海底を含む既知物材に対して正解率約 70%[*2] の物性推定技術の実現を目指す。

(3)実環境におけるドップラシフトの抽出および移動速度の検出

・慣性航法装置[*3] とのレーザードップラ複合航法[*4] を実施し、純慣性航法[*5] と比較して約 10 倍の位置検出精度[*6] の実現を目指す。

(4)海中移動体に各実証機を搭載した実環境における有効性検証

・海中探査機[*7] に各技術実証機を搭載し実機および実環境下における上記目標の達成を目指す。

最終目標(1)は、長距離かつ高分解能を有する最先端となる海中レーザースキャナーの実用化に繋がり、広域かつ超高精細に海底三次元形状を可視化する。

最終目標(2)は、高精細に捉えた海底三次元形状（可視化画像）と海底に対するレーザー反射率による可視化画像から、海底の物性を自動推定する機能による海底鉱物資源探査の効率化に繋がる。

最終目標(3)は、海中探査機に代表される海中移動体の慣性航法性能の向上に繋がり、海底鉱物資源の賦存場所特定に対する高精度化に繋がる。

最終目標(4)は、最終目標(1)-(3)を達成する各要素技術が、海中探査機および実環境（深海環境）において有効であることを実証する。

成果の概要

上記最終目標 4 種の達成を目指し、本研究において実施項目 11 種について取り組

み、各項目に対して事前に設定した「達成目標（中間時)」および「達成目標（終了時)」の全てが達成され、これにより上記最終目標(1)-(4)の全てを達成した。

最終目標(4)に掲げたように、いずれの最終目標についても、各技術実証機を海中探査機実機に搭載し、実環境（深海環境）において取得したセンシング結果を用いることで数値目標の達成を示した。これら最終目標の達成はいずれも、各関連技術分野における世界最高水準あるいは世界初となる技術実証を意味し、海底鉱物資源探査のみならず、今後の海中光学分野および海中レーザー利用の発展に繋がる内容となる。

加えて、本研究を推進し最終目標を達成する過程において、本研究の計画時には想定していなかった副次的な成果も複数得られており、これら成果についても今後具体的な展開が期待される。

4. 終了評価の評点

ＡＡ　想定以上の成果をあげた。

5. 総合コメント

目標を上回る世界最高水準の高い成果を挙げている。開発品の市販化や新たな技術開発にもつながっているほか、懸濁物、海中生物の計測など他分野への波及効果も十分期待でき、高く評価できる。光学サイレント探査の確立や海底 SLAM 技術への応用などの発展性も期待できる。コストダウンなど実用化に向けた検討に展開することを期待する。

一方で、国費による研究であることを考慮し、知財登録は積極的に行っていただきたい。

今後は、今回の成果を利用した調査など、研究成果の活用方策を検討していただきたい。

6. 評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

研究開始時に設定した本研究における各最終目標の達成を目指し、各実施項目の成果を実証するための技術実証機（Green レーザー実証機｜UV レーザー実証機｜レーザードップラ実証機）を開発した。各実証機を海中探査機実機に搭載し、水深約 200-900m の深海環境下において実証試験（深海試験）を実施し、以下に示す各成果を創出することで、最終目標の全項目を達成した。

（※括弧内の数字は達成度）

(1)実環境における長距離レーザー測距

・〔目標〕最大レーザー測距レンジ：約60m（往復約120m）
・〔成果〕最大レーザー測距レンジ：64m（往復128m）　世界最高（100%）

・〔目標〕最大水平分解能：8,000画素の三次元可視化画像
・〔成果〕最大水平分解能：8,294画素（Greenレーザー実証機）
世界最高（100%）
8,457画素（UVレーザー実証機）世界最高（100%）

(2)実環境における海底の物性推定

・〔目標〕海底＋既知物材に対する物性推定正解率：約70%
・〔成果〕海底＋既知物材に対する物性推定正解率：83.1%　世界初（100%）

(3)実環境におけるドップラシフトの抽出および移動速度の検出

・〔目標〕レーザードップラ複合航法精度：10倍（純慣性航法比較）
・〔成果〕レーザードップラ複合航法精度：10倍以上（純慣性航法比較）
世界初（100%）

(4)海中移動体に各実証機を搭載した実環境における有効性検証　世界初（100%）

・〔目標〕実機＋実環境下における各最終目標の達成
・〔成果〕海中探査機＋レーザー実証機×3搭載＋深海環境(水深200-900m)における各最終目標の達成

【個々の委員によるコメント】(主題的成果)

・目標を上回る成果を出しており、世界初、世界一の性能を実現している。
・高い目標基準を定量的な数字を達成している。実証試験も十分になされており、成果が挙がっている。

6-2.　計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

① 高性能光電子増倍管の開発と製品化　市場展開

最終目標(1)の達成に資する長距離レーザー測距を実現するため、高性能な光検出器[*8]を新規開発した。この際、現行機搭載品と比較して 2 倍の光検出性能を目標としていたが、3 倍以上の光検出効率を達成するとともに、製品相当(50%@1C)以上の寿命を有するマイクロチャンネルプレート内蔵型光電子増倍管（MCP-PMT）の開発に成功した。当該 MCP-PMT を Green レーザー実証機に搭載するとともに、開発担当機関の製品として登録し、本研究にて創出された技術研

究成果を市場へと展開した。

② 光検出器 AGC の開発（PMT 増幅率高速制御） 世界初

最終目標(1)の達成に資する長距離レーザー測距を実現するため、海中におけるレーザー光の距離減衰を補正する AGC(Auto-Gain-Control)[*9] 機能を新規開発した。光電変換後のアナログ段における AGC ではなく、PMT への印加電圧（PMT 増幅率）そのものを高速制御することで、前記①の MCP-PMT に対する対雑音性能を飛躍的に向上させた。これにより、光学減衰が著しい海中における距離減衰を伝搬距離に応じて適切かつ効果的に補正する「光検出器 AGC」を開発し、その実用性を実環境（深海環境）にて示した。海中における長距離レーザー測距において、MCP-PMT 増幅率そのものを高速制御することで距離減衰補正に適用する手法は世界初となる。

③ UV レーザーによる海底可視化技術の実証 世界初＋世界最高

最終目標(2)を達成するため、非可視（UV｜355nm）レーザーを適用する海中レーザースキャナー（UV レーザー実証機）を新規に開発した。海中探査機に UV レーザー実証機を搭載し、海底に対する UV レーザー反射を適用した高精細な海底可視化画像の生成に成功した。併せて、UV レーザーによる最大レーザー測距レンジ 15m（往復 30m）を達成した。また、UV レーザー実証機により生成された海底可視化画像の最大水平分解能が 8,000 画素以上（8,457 画素）であることを実証した。非可視光である UV レーザー反射による深海底の可視化に成功した実例はなく、最大計測距離、最大水平分解能ともに世界最高水準を実証した。

④ 可視レーザー(Green)＋非可視レーザー(UV)による同時計測と海底特異点の可視化 世界初

最終目標(2)の達成に資する多様な海底可視化画像を取得するため、Green レーザー実証機および UV レーザー実証機を海中探査機に同時搭載し、可視レーザー（Green｜532nm）＋非可視レーザー（UV｜355nm）による深海底の同時計測（海底可視化の生成）を実施した。また、これによる両波長レーザーに対する海底反射の特性（海底可視化画像の差異）を比較・検証した。その結果、両波長レーザーの海底反射により生成された可視化画像から、底生生物（シロウリガイ）の群生域に対する UV レーザーの蛍光特性あるいは吸収特性と考えられる特異な差異が確認された。UV レーザーに対する海底特異点の顕著な特性を可視化した実例はなく、可視／非可視レーザーを同時適用する海底可視化技術（海底探査技術）の新たな可能性を実証した。

【個々の委員によるコメント】(副次的成果)
・光電子増倍管の高性能化原理が製品に適用されている（特許出願はない）。これ以外に、光検出器 AGC、UV レーザー可視化技術実証、海底特異点の可視化などの成果を挙げた。

6-3.　他の者により派生した成果（間接的成果）

本研究の成果発表を進める過程において、国内外の他分野の研究者より海中レーザーによる海底可視化技術に関する新たな可能性と知見を得た。海中鉱物研究あるいは海中環境評価に関する各研究分野においては、レーザー光の海底反射だけではなく、海底可視化技術において“計測ノイズ”とされる海中懸濁物からの微小な反射を可視化できていることが興味深く、当該研究分野の発展に繋がる可能性が示唆された。海水に含有する鉱物粒子の総量や密度・分布を推定し、海域・深度域・時刻・時期等における相対的変化を理解する指標として、海中懸濁物に対するレーザー反射を効果的に検出し計測ヒット数等を計測することは、当該研究分野において有効な手段となり得る。同様に海中微生物に関する研究分野においても、海水に生息する有機懸濁物（植物プランクトン・動物プランクトン）の生息密度・分布を理解する指標として、海中懸濁物に対するレーザー反射を検出し計測ヒット数等を把握することが有効な手段となり得る。本研究では、最遠にある海底に対するレーザー反射を計測することを目的として開発を進めたため、その過程にて発生する海中懸濁物に対するレーザー反射は“計測ノイズ”として除外することを前提とした。しかし各レーザー実証機において高感度・高性能な送受光系が確立されたことにより、積極的に海中懸濁物からのレーザー反射を検出することで、海底鉱物研究／海中環境評価および海中微生物に関する各研究分野に資する新しいセンシング技術への応用・展開が期待されることを確認した。

【個々の委員によるコメント】(間接的成果)
・新たに海底資源探査や海中生物の研究に資する観測法としても応用できる可能性があるなど、科学的な付加価値が高い。
・海中の植物プランクトンや動物プランクトンの生息密度・分布等への波及効果があること、また、国際会議での発表に基づいた UBC との photo acoustic に関する共同研究に発展していることなどの成果が出ている。

6-4.　科学技術上特筆すべき成果

① 国際会議における受賞（論文表彰｜Best Paper Award)

最終目標(2)を達成する取り組みにおいて、UV レーザースキャナー開発および可視化性能について言及した論文が、2024 年 6 月にシンガポールで開催された国際会議「43rd International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering

(OMAE2024)」において『Best Paper Award』(Ocean Space Utilization Symposium)を受賞した（※受賞式は 2025 年 6 月開催の OMAE2025)。

＜Paper Title＞

『Basic Research on Seabed Visualization Technology Applying UV-Laser』

② 研究成果の発信｜プレス発表

最終目標(1)の達成（最大レーザー測距レンジ：64m(Green)/15m(UV)｜最大水平分解能：8,294 画素(Green)/8,457 画素(UV))、および前記「2.2｜③｜UV レーザーによる海底可視化技術の実証」、「2.2｜④｜可視レーザー＋非可視レーザーによる同時計測と海底特異点の可視化」に記載する各成果についてプレス発表を実施した。

＜タイトル｜2025 年 3 月 18 日｜JAMSTEC プレスリリース＞

『可視光(緑)×非可視光(紫外)レーザーを適用する革新的海底可視化技術を実証　―高性能海中レーザースキャナーによる光学海底探査の新展開―』

③ 成果の発信｜新聞取材・記事掲載

上記「②｜プレス発表」における研究成果について取材を受け、当該各成果に関する内容が新聞記事（日刊工業新聞）として掲載された。

＜記事見出し｜2025 年 5 月 5 日／6 面｜日刊工業新聞＞

『海洋研究開発機構、海底をレーザースキャン　レアアースなど資源探査に期待』

④ その他｜研究成果の発信

上記②および③の発信に伴い、複数の Web 記事(5 件)に本研究の取り組みが紹介された。併せて 4 件の展示・講演を実施し、本研究内容および成果について紹介した。また、3 件のシンポジウム・ワークショップに参加し、本研究内容および成果について説明した。これら取り組みを通して本研究内容および成果を広く一般に情報発信するとともに、当該技術分野／関連分野／応用分野におけるニーズ等について要望・意見・思考を共有した。

【個々の委員によるコメント】(科学技術上特筆すべき成果)

・世界初の海底の鮮明な映像が得られた。
・目標に対して世界最高レベルの成果を出しており、成果の展開、波及効果も十分期待できる。新たに海底資源探査や海中生物の研究に資する観測法としても応用できる可能性があるなど、科学的な付加価値も高い。
・実環境における長距離レーザー測距において、世界最高を達成した。

・高分解能な長距離レーザー測距が実現されており、有用な三次元海底可視画像が得られている。また、ドップラ計測、海底物性推定なども成果が得られており、実証データも十分である。
・国際会議で優秀論文表彰を受けており、プレス発表や新聞報道もされている。

6-5.　論文（投稿中のものも含む），学会発表等

学術論文	・・・	4 件（国際会議｜Proceedings｜Full Paper 査読）
（投稿中）	・・・	1 件（国際学術誌｜2025 年 9 月に投稿依頼）
学会発表	・・・	7 件（国際会議｜Proceedings｜Abstract 査読）
学会発表	・・・	17 件（国内会議｜予稿集）
展示／講演	・・・	4 件
その他	・・・	3 件（ワークショップ／シンポジウム）

6-6.　特許（出願中のものも含む）

出願手続き中	・・・	1 件

【個々の委員によるコメント】（論文、特許、学会発表等の研究成果）
・多くない。例えば Science などに歓迎される成果が得られているので頑張っていただきたい。
・学術論文や学会発表もかなりあるが、トップレベルの国際学術誌への論文投稿をさらに期待する。
・国内外の学会発表、展示ワークショップ発表等を多数行っている一方で、学術論文が発表されていない。現在投稿準備中とのことであったが、是非近いうちに論文を投稿することを期待する。
・論文は会議録が中心である。学術論文として発表されることが望ましい。
・公的資金による成果は、企業の特許戦略とは別に取得すべき。
・企業の戦略上、特許化が難しいという点があるものの、他の観点での特許化の可能性を探求していただきたい。
・特許性があるものは、製造技術などをノウハウとして、構成、手法などで特許取得すべきである。公的な予算での研究であり、知財権を残すことが必要である。
・現在 1 件を準備中であるが物足りない。今後特許化できる部分を再検討して特許出願することを期待する。

6-7.　科学技術への波及効果

① 光学サイレント探査の確立

本研究による各技術の基礎が確立され、将来的に発展していくことにより、海底探査手法が一新される。従来技術（ソナー｜カメラ）では探査が困難だった海底

特異点を、効率的かつ高確率で探査することが可能となる。小規模でも海底に表出している特異点に対するレーザー反射が高精細に可視化され、その位置を特定し、海底の物性(底質)が類別される。それら全てを、レーザー反射光を利用した海中光学技術により実現するため、海中探査機が装備する音響機器類と完全にアイソレーションされた「音響ノイズゼロ＋サイレント探査」手法の確立が期待される。

② 海中 SLAM 技術への応用

本研究による長距離レーザー計測技術＋高精細画像技術を発展させることにより、海中 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [*10] 技術への応用が可能となる。本研究成果である最大計測距離 60m を有する Green レーザー実証機により実証されたように、例えば海中探査機を中心として距離 60m 圏内の海底地図作成と自己位置推定を同時に実施する。画素ズレ補正機能を含め高品質な海底レーザー測距結果（距離画像）を提供することで、未知の海底環境に対し、海中探査機が自己位置を把握 (Localization) しつつ周囲の環境地図が構築 (Mapping) され、将来的な海中探査機の完全自律化／高度自動化を実現する根幹技術に繋がる。

③ 従来海底可視化技術の補完

長距離レーザー計測技術や高精細海底可視化技術を組込む高性能海中レーザースキャナーは、従来の探査技術(海底)と組み合わせて適用することにより、より効果的な海底探査手法として成立する。ソナーによる海底探査では、可視化分解能が劣る一方、圧倒的な長距離・広レンジでの海底探査能力が提供される。一方、カメラによる海底探査では、海底のごく近傍まで接近し照明の届く狭いレンジの探査となるが、高精細かつ色彩を含む多くの情報が提供される。これに対し本研究成果を組込む高性能海中レーザースキャナーを展開することにより、ソナーよりも高い可視化分解能で、かつカメラよりも遠方から広範囲の海底探査が実現される。つまり、従来海底探査技術の長所・短所を補完する中距離からの高精細な海底探査能力を提供する。これにより、探査する海底域や深度域、探査期間、探査対象や搭載する海中探査機のタイプに応じて、これら各海底可視化技術を段階的に、あるいは同時に、または個別に適用することで、海底探査の効率性が飛躍的に向上する。また、当該レーザースキャナーが提供する計測レンジは、海中探査機が安全に海底探査を実施するのに要する航走高度と十分な計測範囲(計測幅)を提供し（例｜計測幅約 100m／航行高度約 30m)、探査効率だけでなく海中探査機運用における安全性と実用性を大きく向上させる。

④ 可視×非可視レーザースキャンによる同時計測（海底特異点探査）

本研究の顕著な副次的成果でもある UV レーザー反射を適用する海底可視化につ

いては、従来の光学利用にはない海底理解に資する新しい海底探査手法の確立に大きく貢献する。UV レーザーが有する海底に対する特異な反射と可視光に対する海底反射とを同時計測することで、可視／非可視レーザーによる両計測結果（海底可視化画像）の差異から海底特異点の存在を効率的に明確化することが期待される。今後、UV 波長に対する海底鉱物や底生生物の反射特性の理解が深まっていくことで、各波長における計測結果の差異により海底資源域や海底資源域周辺に生息する底生生物の有無が効果的に同定され、海底資源探査における新手法の確立が期待される。

⑤ ガス・気泡湧出現象の検出

高性能 MCP-PMT が実装され、内部光学系の改善により送受光系の総量が飛躍的に向上したことにより、ごく微小なレベルのレーザー反射を検出することが可能となった。これによりメタンハイドレート湧出などの海底湧出ガス・気泡に対する僅かなレーザー反射も検出が可能となり、従来技術では困難な資源域（例｜メタンハイドレート湧出域）の探査への応用が見込まれる。

⑥ 海底インフラの維持管理／保守点検および船底検査

可視／非可視レーザーを適用するレーザースキャナー技術は、海底ケーブルや海底構造物に対する非接触かつ高精度なレーザー反射測定を提供し、海底ケーブルや海底構造物等の海底インフラに対する劣化監視や損傷検出に有効となる。これら海底インフラの定期点検などの維持管理／保守点検、および当該作業の自動化への寄与も見込まれる。加えて、同技術を船舶の船底検査へ転用することも想定される。

⑦ 海洋生態系の調査・モニタリング

UV レーザーに対する底生生物の蛍光特性や吸収特性を理解(データベース化)し観測することで、深海生物種の同定や新種の発見、生物多様性の調査・モニタリングへの応用が見込まれる。これらデータベースを多角的に評価することで、環境影響評価や環境保全活動に資する。

⑧ 海底変動の観測

高精度レーザー測距技術に基づき、特定の海底域に対する詳細な形状、起伏、傾斜等を計測し、これらを時系列的に比較することで、当該海底域における海底変動の観測に資する。ミリオーダーの測距分解能、水平分解能が提供されるため、高精度な海底変動の理解が期待される。

⑨ 海中保安・セキュリティ分野への応用

暗所環境下でも高精度なレーザー測距、および高精細な可視化が可能なことから、夜間の港湾保安や水中監視、危険物探知など海中保安分野への転用が期待される。併せて、非可視（UV）レーザーは視認困難なため、水域全般に対するセキュリティ分野への応用も想定される。

⑩ 海中・海底流体場の計測（流速計測｜流量計測）

レーザードップラ速度を計測する技術を利用して、海中・海底における高性能な流速計測が可能となる。音響ドップラ速度計(DVL)もしくは音響流速計(ADCP)では計測精度を担保することが困難な環境（例｜音響干渉・音響反射の影響が顕著な狭域環境など）での利用に効果的である。

⑪ 港湾移動体監視／生態調査

レーザードップラ速度を計測する技術を利用して、船舶や海中探査機・水中ドローンなどの海上／海中移動体の速度を外部より非接触で計測することが可能なため、海中からの港湾監視（移動体速度の監視）に資するセンシング技術としての転用が想定される。また、海洋生物の移動速度を非接触で計測することも可能なため、魚群などの生物挙動の監視（生態調査）への転用が想定される。

【個々の委員によるコメント】（発展性と波及効果）

・センサを追加することによる海中海底の実態把握が大いに期待できる。
・当該分野の発展に大きく寄与するものと考えられる。また、レーザー装置の小型・軽量化が達成できれば波及効果も大きい。
・海中資源探査、海中生物研究への応用の可能性がある。レーザースキャン時に発生する音響を利用する可能性がある。
・海底資源探索などへの具体的発見に向かい、装置化するように期待する。

6-8.　効率的な研究実施体制とマネジメント

本研究では、代表研究機関（海洋研究開発機構）が各要素課題の進捗とともに本研究課題の全体を統括した。各分担研究機関が担当する研究（実施項目）の進捗を、各試験結果および研究成果とともに都度判断し、要すれば研究方針・手法について分担研究機関と協議し決定した。併せて、代表研究機関が仲介に入り分担研究機関同士の交流を積極的に推進させることで、特に本研究課題において開発する光学システムのレーザー実証機への実装性・実用性の向上を図った。代表研究機関の管理のもと、月 1 回の頻度で進捗会議を開催することで、各研究機関が担当する実施項目の進捗詳細を報告し、現況や生じた課題・問題について情報共有することに努めた。進捗会議を通じ、本プロジェクトの参加機関（参加者・関係者）全体にて、それぞれ

の実施項目の状況を把握し情報共有することで、問題解決・試験方法の策定、各実施項目とプロジェクト全体のスケジュールの整合を判断した。併せて、当年度目標、中間評価時の目標および最終目標の達成を前提とした目的意識を参加者・関係者に熟慮させるとともに、プロジェクト全体の進捗を俯瞰して評価した。

本研究の遂行および最終目標の達成において最重要事項となる各環境試験（水槽試験・岸壁試験)、海域試験（浅海試験・深海試験）においては、代表研究機関のリーディングのもと、基本的には 3 研究機関（代表研究機関＋分担研究機関×2）が共同で実施し、試験結果の詳細を共有するとともに、不具合発生時における現場対処能力を担保した。これにより各実施項目の問題点・改善点が次年度の取組みに正確にフィードバックされ、これに応じた評価機・実証機の改良および理論の再構築が効果的に実施された。この際、浅海試験および深海試験の実施に際して、円滑かつ安全に遂行することを目的として、代表研究機関に設置される 3 回以上の安全審査を受けることで、使用機器・機材、プラットフォームおよび参加人員に対し事故が生じないよう、安全に関する万全の準備と注意を払った。加えて、船舶・海中探査機の運用管理部門、運航従事者を交えての航海会議を深海試験の事前に実施し、試験目的と試験手法について協議することで安全運航と成果創出に努めた。これらの体制により、本研究における深海試験×4 回の航海（計 32 日間｜計 17 潜航）が事故なく安全に実施され、これら深海試験の安全実施が最終目標の達成に大きく寄与した。

本研究において、より技術的・専門的に掘下げた議論を要する場合は、各研究機関の担当者・関係者・有識者を招聘し、別途、技術専門会議（個別会議）を開催することで、技術的方針の整合と技術的ボトルネックの解決を図った。また要すれば、関係する研究分野・技術分野の有識者あるいはアドバイザーから助言を得る機会（有識者会議・アドバイザー会議）を設け、本研究課題の方針・手法および技術的アプローチ等について客観的な見解を得た。本研究の基本的方針として、進捗会議および各種試験を 3 機関で共同して実施することで、研究期間を通して情報・認識・目的の共有化を図るとともに本研究に要する知見を蓄積し､3 機関が統一した見解のもと同じ目標に向かって各研究分担（実施項目）を遂行することで各実施項目の「達成目標（終了時)」の達成を実現した。併せて本研究では、実環境下における各技術研究の実証を最終目標に掲げており、その前段階において各技術の妥当性と有効性を事前試験（水槽試験・浅海試験・連接試験）にて段階的に徹底して確認することで、時間・費用を要する深海試験における調整事項の軽減と成功率の向上に注力した。

【個々の委員によるコメント】（効率的な研究実施体制とマネジメント）
・効果的な実施体制であり、優秀なマネジメントが行われている。
・海洋研究開発機構を中心にポテンシャルの高い２社が参画しており、マネジメントは良好であった。

6-9.　研究推進時に生じた問題への対応

上記 6-8 項の実施体制に示すように本研究では、参加機関が常時に情報共有する場（進捗会議）を設けるとともに、各環境試験や海域試験においては、基本的に参加機関（代表研究機関＋分担研究機関×2）が共同で実施する体制を構築した。そのため、研究推進に際し生じた重要問題に対して、可能な限り早急かつ共通認識のもと、問題把握と解決法について協議する体制を敷いた。これにより、生じた問題の原因とその後の対応について、各実施項目・分担における関与および影響を含め共同で協議し取り組むことが実現された。またこの際、技術的に再考を要する問題が生じた場合は、別途、関係機関において個別会議および要すれば個別試験を実施することで原因の抽出と問題解決を図り、その結果についても参加機関全体で共有した。また、生じた問題がプロジェクトのスケジュールに影響を与えることが想定された場合、当該スケジュールの副案を早急に策定し、参加機関と認識を共有するとともに、当該問題の解決に要する期間を勘案した全体スケジュール管理に注力した。これは、本研究において最重要項目である深海試験の確実な実施と試験結果（研究成果）の創出が最優先事項と定めていることにあり、深海試験に伴う航海期間および日程変更は至極困難なため、深海試験を基軸とする研究推進と全体スケジュール管理が最重要となる。そこで、生じた問題を深海試験の実施と最終目標の達成に関連付けてランク付けすることで、解決を要する優先度を参加機関の協議により決定し、効率的かつ効果的な対応・対処に努めた。併せて、当該対応・対処の妥当性について、深海試験の事前試験（岸壁試験・水槽試験・浅海試験等）にて必ず確認し、深海試験にて得られる結果を基に更なる解決の要否を適切に判断できるようにした。

【個々の委員によるコメント】（研究推進時に生じた問題への対応）
・体制内で情報共有もされており、十分な対応をしていると思われる。

6-10.　経費の効率的な執行

本研究では、要素技術のフィージビリティ確認および根幹となるシステムあるいはアルゴリズムの詳細調整を実施するための技術評価機を製作した。併せて、当該評価機で取得された基礎データや知見を基に、実環境下における有効性を実証する技術実証機を製作した。この際、各技術評価機において、各技術実証機に流用・利用が可能な部材・部品、電気電子機器、通信機器、光学系等を設計当初より事前に選定し、当該実証機の開発経費の軽減と効率化（開発期間の短縮）に努めた。

水槽試験においては、研究代表機関が所有するファシリティ（多目的水槽・多目的プール）を効果的に利用することにより、当該試験費用を抑制した。併せて、研究期間を通して何度となく水槽試験を繰り返し実施することを事前に勘案し、継続的に利用可能な試験装置・試験治具・評価装置等を含む試験用セットアップを構成することで試験費用の節減に努めた。

海中探査機実機に搭載し、深海試験にて使用する各技術実証機の耐圧容器およびビューポートに関する耐圧試験についても、研究代表機関が所有するファシリティ（耐圧試験水槽）にて実施することを前提として設計・製作＋試験系を構築し、当該耐圧容器の製作費（耐圧性能評価に要する費用等）の節減に努めた。

深海試験においては、各最終目標を達成することを第一目的とし、かつ試験費用（船舶運用経費・探査機運用経費等）が節減できるよう、成果の創出に効果的な近海域を選定し実施した。4 度の深海試験においては気象・海象の悪化により、目的の海域にて海中探査機が潜航できない場合も多く発生したが、船舶および海中探査機の運航従事者と事前に協議・検討を重ね、安全に試験が実施可能な海域、かつ移動時間（移動距離≒燃料費）が軽減される海域を複数設定した。併せて、当該海域への移動が最も効率的な試験スケジュール（仮泊地、避航地の選定と潜航計画）を策定することで、船舶運用経費（燃料費）の抑制に努めた。また基本的に同じ試験海域を選定することにより、試験手法の確立と効率化を図るとともに試験費用を抑制する一方、得られる各試験結果（計測データ）を比較することで研究成果を明確に評価した。

浅海試験・深海試験において、試験海域の状態（試験環境）を評価するセンサ類（CTD 計・濁度計・蛍光光度計など）については、代表研究機関が所有する機器を流用したほか、海中探査機が具備するセンサ類を効果的に用いることで当該機器類の購入費用を節減した。

不慮の故障や破損が想定される高額な開発品（例｜光検出器）については、製作コストの削減と効率化を鑑み、単品製作ではなく予備品を含む複数台を事前に製作し、不具合発生時の換装や個体差による仕様選定等、新規製作に要する経費と時間の抑制に努めた。

【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）

・経費削減にも努力しながら効率的な執行に努めている。

・非常に大きな成果が得られていると思う。経費執行に関しても問題ないと思われる。

---

*1　水平分解能 8000 画素：水平方向におけるレーザー測距点数が 8000 点を意味する。

*2　正解率 70%：事前に選定した自然海底および既知物材に対し 70%を指標する回数の類別に成功する。

*3　慣性航法装置：移動体が運動する際の慣性力（加速度＋角速度）を慣性センサ（加速度計・ジャイロ）にて検出し、これを用いて航法演算することで移動体の位置・姿勢・速度等の状態量を推定する装置。

*4　レーザードップラ複合航法：慣性航法装置にて実施する航法演算にレーザードップラ速度を適用することで、内蔵する慣性センサの誤差や航法演算誤差を推定し、これを反映して航法演算精度を向上させる航法。

*5　純慣性航法：慣性航法装置が内蔵する慣性センサ（加速度計・ジャイロ）の出力のみで航法演算する手法。

*6　位置検出精度 10 倍：位置検出誤差の要因となる地球固有周期等を考慮した任意の航行時間における純慣性航法演算結果の精度に対するレーザードップラ複合航法演算結果の精度が約 10 倍を意味する。

*7　海中探査機：任意の海中域あるいは海底域に潜航し、海中の状態や海底地形等を計測するとともに、要すれば着底してサンプルの採取やセンサの設置等を実施する海中移動体。
*8　光検出器：可視光（Green レーザー｜532nm）および非可視光（UV レーザー｜355nm）の海底反射を受光するために Green レーザー実証機、UV レーザー実証機に搭載された光検出器。光電子増倍管（Photomultiplier Tube｜PMT）と、当該 PMT を制御する駆動電源から構成される。
*9　AGC(Auto-Gain-Control)：入力信号のレベルに応じて増幅率を自動制御することで出力レベルを適切に調整する機能。本研究においては、海中を伝搬したレーザーの距離減衰（伝搬距離に応じた海中光学減衰）を補正し、受光レベルを適切に調整する機能。
*10 海中 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)：移動体が未知環境下において、自己位置を把握(Localization)しつつ同時に(Simultaneous)、周囲の環境地図を作成(Mapping)する技術。海中探査機に適用する場合、レーザースキャナーを用いて未知の海底域をスキャニングすることで、レーザー反射（レーザー測距）データから三次元海底可視化画像（環境地図）を作成しつつ、それらデータから相対的な自己位置を推定する技術を意味する。