別紙２

令和６年度　防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書
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

令和７年５月

国立研究開発法人海洋研究開発機構

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立研究開発法人海洋研究開発機構が令和２年度から令和６年度にかけて実施した「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」の成果を取りまとめたものです。

O．研究背景

自然資源を利用する産業は急速に減少しており、これを打開するためにも、科学技術により資源産業の生産性を向上することが求められる。そのなか、日本における海底鉱物資源は、領海ならびに排他的経済水域に相当量の賦存が確認されており、これを新産業として発展させることは、資源産業の活性化に繋がる。しかし現時点において、長期的な産業ベースに載せられるほどの賦存量は確認されてなく、海底鉱物資源を産業化させるためには、今後その賦存量を短期かつ効率よく低コストにて把握し、産業としての具体的な計画を立てる統合的な仕組みが必要となる。その実現には、現状性能を上回る海底アクセス手段と、海中海底において位置情報を高精度に検出し、併せて資源探査とその賦存計量に資するセンシング技術の確立が必須である。

ソナー技術は、海底を可視化することで海底探査に最も広く使われてきたセンシング技術であり、サイドスキャンソナー(SSS)、マルチビームソナー(MBS)などが代表的とされる。しかしソナー技術による可視化は、広レンジを有するもののその分解能は低く、基本的には広域における大規模な特異点の探査に効果的である。高分解能とされるソナー技術として、SSSに合成開口処理を施した合成開口ソナー(SAS)であるが、高価で利便性が比較的に低く使用条件が限られるが、その分解能は十数cm～数十cmとなる。一方、海底鉱物を詳細に分析するためには、更に高い可視化分解能を有するカメラ技術が最適である。しかし、海水中におけるカメラの有効レンジは僅か数mであり、広域の探索には最も不向きな技術となる。つまり海底鉱物資源を効率よく探査するためには、従来のソナー技術より高い分解能を持ち、カメラ技術より圧倒的に広い探査レンジを有する可視化技術が必要とされ、併せて、可視化した海底の特徴（どのような物性をもつ海底か）を評価するとともに、検出した特異点の正確な場所（位置）を特定する新たな探査技術が求められる。

これら背景を受け近年、ソナー技術とカメラ技術の長所短所を補完する新たな海底可視化技術として海中レーザースキャナーが注目されている。これは2000年代以降の青色半導体レーザーの普及により、海中におけるレーザー光利用が積極的に行われ出したことに起因し、2010年頃には、海中海底のオイル・ガス設備の点検を目的として、数メートルレンジでcmオーダーの分解能を有する海中レーザースキャナーが市販化された。2015年には我々の研究グループが開発した海中レーザースキャナー試作機を海中無人探査機に搭載し、高度15mから幅50m、距離600mに渡る範囲の海底探査（海底可視化）を行った。また欧米においては、比較的長レンジの海中レーザースキャナーが主に防衛利用（危険物探査）を目的として開発されている。一方で、その計測レンジはいずれも限定されており、従来のカメラ技術と比較すると高い遠達性を有するもののソナー技術に遠く及ばなく、実用的な海底探査を提供するためには、性能不十分と言わざるを得ない。またこれまで、当該技術において反射対象の物性を評価・識別する決定的な手法は確立されてなく、仮に海底地形が可視化されても、探査する対象の特徴を同定あるいは類別することは難しい。

１．委託業務の目的

日本の鉱業規模は縮小の一途を辿り、探査・採鉱・揚鉱・選鉱・精錬の技術は大きく衰退し、特に海底鉱物資源に対しては、石油・ガスを除けば世界的にも殆ど実施例が無い。一方、日本に賦存する海底鉱物資源のうち、賦存量さえ把握できれば産業化の可能性が高いものは、メタンハイドレート、熱水鉱床、マンガンクラスト、レアアース泥がある。当該賦存量を把握するための前提かつ最重要となるのは各海底鉱物資源に対する“探査技術”である。レアアース泥を除く多くの海底鉱物資源はその一部が海底面に表出し、特有な形状・形態を構成しており、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、海底鉱物資源の賦存量の把握に繋がり、その産業化に大きく貢献する。

本研究課題では、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複合的な海中海底センシング(海中海底ハイブリットセンシング)を実現する。各センシング項目が本研究課題における要素課題であり、いずれの要素課題も海中におけるレーザー反射光（散乱光）の異なる物理量あるいは物理反応を検証・解析するものとなる。

本研究課題では、海底鉱物資源の探査機技術を確立させるために、海中におけるレーザー反射光（散乱光）の特性に注目し、反射光（散乱光）から時間情報の取得、反射光（散乱光）からの反射率の検出、反射光（散乱光）からドップラ成分の抽出についてそれぞれ取組み、その高精度化を図るとともに、各要素課題の有効性を実環境にて示す。これにより、海底鉱物資源探査に資する重要技術の基礎が確立される。

【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※1：8000画素）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

- 慣性航法装置との複合航法を実施し、純慣性航法と比較して約10倍の位置検出精度※3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

- 海中探査機等に各技術の実証機を搭載し、実機および実環境下における上記目標の達成を目指す。

※1 水平分解能：水平方向のレーザー測距点数が8000点を意味する。

※2 正解率70%：事前に類別した底質種あるいは既知物材種に対し70%を指標する回数の類別に成功する。

※3 位置検出精度においては、地球固有周期等を考慮した任意の測線長（航行時間）にて計測する。

最終目標(1)の実現は、長レンジかつ高分解能を有する海中レーザースキャナーの実用化に繋がる。スキャニング画角に依存して広域かつ超高精細な海底三次元形状が可視化される。最終目標(2)の実現は、高精細に捉えた三次元可視化画像とレーザー光の海底反射率から、海底の物性を推定することによる海底鉱物資源探査の高効率化に繋がる。最終目標(3)の実現は、海中探査機に代表される海底アクセス用移動体の慣性航法性能の向上をもたらし、これによる位置検出精度は海底鉱物資源域の位置把握（賦存場所特定）の高精度化に繋がる。最終目標(4)の実現は、最終目標(1)-(3)の各成果が、実機および実環境下において有効な技術の基礎となることを意味する。

２．研究開始時に設定した研究目標の達成度

本研究では前記「１．委託業務の目的」に示す【最終目標】(1)-(4)に対し、「3. 委託業務における研究の方法及び成果」に後記する各実施項目を定め、当該【最終目標】の達成を目指した。その結果、全ての【最終目標】の達成が確認された。以下に本研究の【最終目標】に対する達成度を示す。

【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

  ⇒ 達成度：100% **達成**

  ＜概要＞
  Greenレーザー実証機を海中探査機に搭載した深海試験において、最大計測距離**64m**（海底を経由する往復伝搬距離：128m）を達成した。（「3.(1)-A」｜「3.(5)」 参照）

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

  ⇒ 達成度：100% **達成**

  ＜概要＞
  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搭載した深海試験において、海底レーザースキャンによる三次元海底可視化画像の最大水平分解能**8,294画素**（Greenレーザー実証機）および**8,457画素**（UVレーザー実証機）を達成した。
  （「3.(1)-A」｜「3.(5)」参照）

【最終目標｜(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%**の物性推定技術の実現を目指す。

  ⇒ 達成度：100% **達成**

  ＜概要＞
  Greenレーザー実証機およびUVレーザー実証機が生成した深海底の強度画像および距離画像を用いる物性推定アルゴリズムを構築し、実際の深海底および既知物材を対象として推定正解率**83.1%**を達成した。（「3.(1)-C」｜「3.(2)-A」｜「3.(5)」参照）

【最終目標｜(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】

- 慣性航法装置との複合航法を実施し、純慣性航法と比較して約**10倍**の位置検出精度の実現を目指す。

  ⇒ 達成度：100% **達成**

  ＜概要＞
  ドップラ実証機を海中探査機に搭載した深海試験において、海中懸濁物からのレーザードップラシフトを抽出することで、海中探査機の移動速度（レーザードップラ速度）の検出に成功した。当該レーザードップラ速度と海中探査機が装備する慣性航法装置との複合航法演算を試行し、純慣性航法と比較して**10倍以上**の位置検出精度を達成した。
  （「3.(4)-A」｜「3.(4)-B」｜「3.(5)」参照）

【最終目標｜(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】

- **海中探査機等**に各技術の実証機を搭載し、**実機**および**実環境下**における**上記目標の達成**を目指す。

  ⇒ 達成度：100% **達成**

＜概要＞
上記の最終目標(1)-(3)を目指す各取り組みにおいて、実運用されている**海中探査機**に開発した**各技術実証機を実装**し、**深度200m－900mの深海環境下**（実環境下）において深海試験を実施した。その結果、当該**最終目標を全て達成**させ、実環境下における各技術の有効性を実証した。（「3.(5)」参照）

３．委託業務における研究の方法及び成果

前記「１．委託業務の目的」に示す【最終目標】(1)-(4)を達成するため、各実施項目およびその達成目標（達成目標（終了時））を定め、当該達成目標の実現を目指した。その結果、全ての実施項目における達成目標（終了時）の達成が確認された。以下に、本研究の各実施項目における研究方法および成果を示す。

(1)-A 送受光系制御の最適化

[(1)-A｜目的]

送受光系制御を最適化する回線設計に取り組む。海中伝搬場における物体反射率に起因する損失を解析するとともに、光検出器での距離減衰補正機能（→光検出器高速AGC：Auto Gain Control）、光検出器後段のアナログアンプ部での距離減衰補正機能※4（→高速AGC）および反射率補正機能（→ワンパルスAGC）の3種類のAGCを組み込む光学システムを構築する。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(1)-A｜達成目標（終了時）]

送受光系の総和としてレーザー測距現行機※5の約32dB※6以上の性能改善を目指す。当該系を実証機に組込み水槽試験において基本性能を評価し、海域試験により実用性を確認する。

[(1)-A｜達成目標（終了時）の達成状況]

■送受光系の総和としてレーザー現行機の約 32dB 以上の性能改善　：　**達成**
■当該系を実証機に組込み水槽試験において基本性能を評価　：　**達成**
■海域試験により実用性を確認　：　**達成**

※4　距離減衰補正機能：
レーザー光伝搬距離に応じて減衰率を推定し補正する機能。事前に実施する試験結果を基に複数種の減衰補正曲線が構築され当該機能に組込まれる。

※5　レーザー測距現行機：
JAMSTEC「海中 3D レーザースキャナー」もしくは三菱電機特機システム「U4LE」を意味する。

※6　32dB 根拠：
レーザー測距レーザー測距現行機から得られた知見および蓄積された基礎データを基に試算した最終目標（レーザー計測距離 60m）を達成するのに要する光学系性能の改善量。下式の試算に示す送受光系の向上により満足させる。
レーザー出力向上(約 6dB) ＋ 光検出器感度向上(約 6dB) ＋ アナログアンプ NF 向上(約 10dB)
＋ 集光性能向上(集光面積拡大｜約 10dB) ＝ 約 32dB

[(1)-A｜実施内容①｜光学システム(伝搬時間評価機)の基本設計]

(a)ワンパルスAGCの基本設計

ワンパルスAGCはターゲットに照射されたレーザー光の反射（受信信号）を適切に補正することを目的とする。レーザー測距現行機による過去実績から、本研究にて適用する光検出器（光電子増倍管｜Photomultiplier Tube｜PMT）の出力が20dB程度変動することが想定され、この信号の強度を自動で制御（Auto Gain Control｜AGC）する。レーザー測距現行機に適用されるAGCでは、連続した受信信号に対しAGCするために、過去に受信した信号に対してゲインが設定される。そのため、受信毎に変動する信号への応答性は低く、光学系の性能を劣化させる要因となる。そこで、受信信号を検出した際に当該信号をディレイラインにて遅延させ、ディレイライン出力にゲインの異なる複数のアンプを並列配置し、当該出力に対し高速スイッチにて任意のアンプを選択する方式を採用する。これにより、照射したレーザー光（ワ

表 3-(1)-A-①-1　基本仕様（ワンパルス AGC）

LN	項目	仕様
1	GAIN	0dB（AGC GAIN：0dB 時）
2	AGC 幅	0dB, 7dB, 14dB, 21dB（4 段階）
3	AGC 出力	3 ビット
4	入力信号	50Ω SMA 雑音｜PMT ショットノイズ：MAX 7Vp-p（パルス幅 1ns） 信号｜PMT 信号：MAX 1Vp-p（パルス幅 1ns）
5	強度情報出力	50Ω SMA a　0～1V 出力　Z=1kΩ b　LOGAMP により 40dB のダイナミックレンジを確保 c　PMT/GATE と連動した AGC/GATE 信号からピークホールドを実施 d　AGC/GATE から 300ns（距離換算で 60m：2way で 30m）～500ns（距離換算で 100m：2way で 50m）間のピークホールドを実施し次の送信タイミングまで電圧保持。

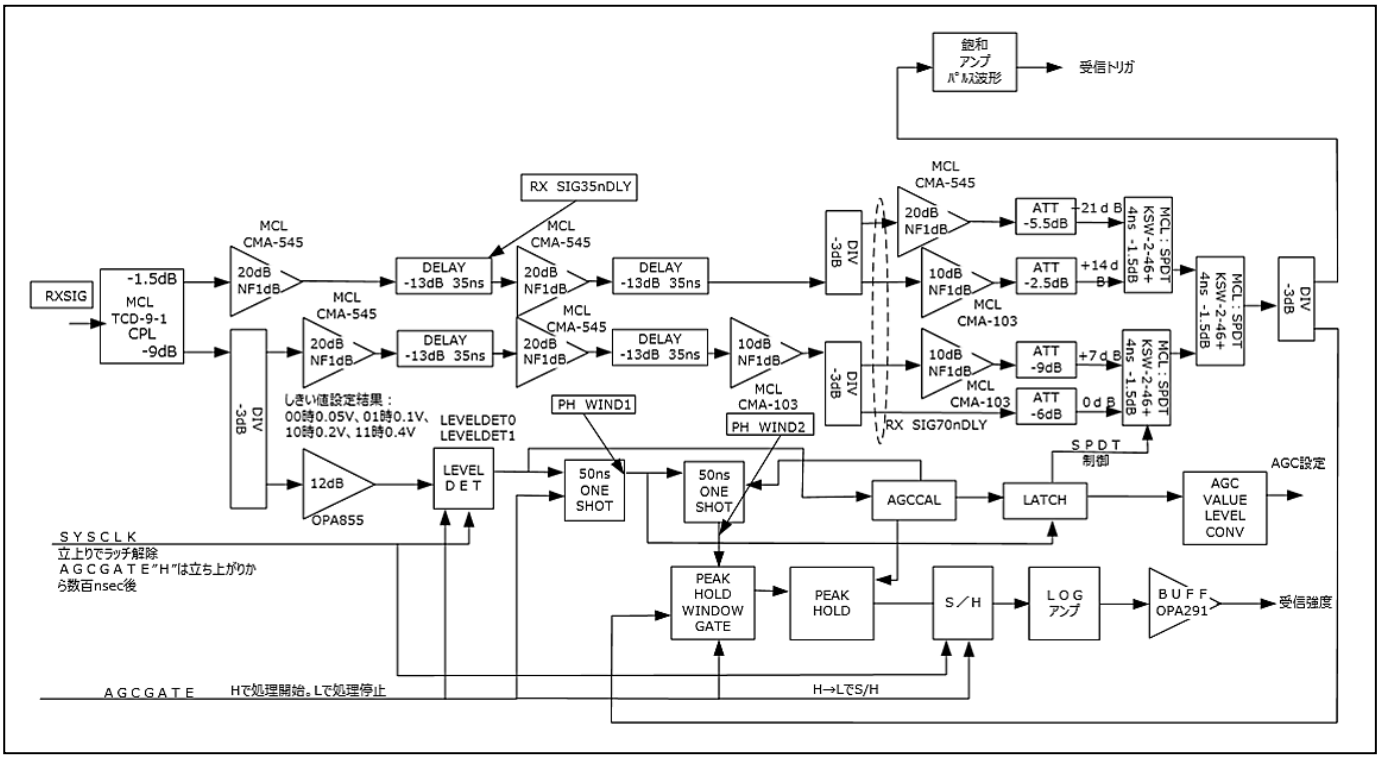


図 3-(1)-A-①-1　システムブロック図（ワンパルス AGC）

ンパルス）毎に、ターゲットの反射率に対し最適となる増幅率が設定可能となる。ワンパルスAGCの基本仕様を表3-(1)-A-①-1に、システムブロック図を図3-(1)-A-①-1に示す。

(b)高速AGCの基本設計

高速AGCは、水中（海中）におけるレーザー光の伝搬に対する光学損失（減衰量）を補正する。レーザー測距現行機では光電子増倍管（PMT）出力のアナログアンプを使用して20dBの補正を行った。一方、本研究における最終目標となる最大計測距離60m（往復伝搬距離：120m）を実現するためには、距離減衰量の差は正面（0deg）からのレーザー反射と視野端（60deg）からのレーザー反射とでは、往復伝搬距離として60mの差（2倍の距離差）が生じる。そのた

	要素												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	LIMIT	FIL	ATT	LNA	ATT	LNA	ATT	LNA	DIV	LNA	ATT	LNA	
			NOT	GVA-84+	HMC346	GVA-84+	HMC346	NOT		HMC311		HMC311	
単体NF	1.0	1.0	0.0	6.5	21.0	6.5	21.0	0.0	3.0	5.0	5.0	5.0	3.0
単体GAIN	-1.0	-1.0	0.0	23.6	-21.0	23.6	-21.0	0.0	-3.0	14.0	-5.0	14.0	-3.0
トータルNF	1.0	2.0	2.0	8.5	9.0	10.4	10.6	10.6	10.8	11.5	11.5	11.6	11.6
トータルGAIN	-1.0	-2.0	-2.0	21.6	0.6	24.2	3.2	3.2	0.2	14.2	9.2	23.2	20.2

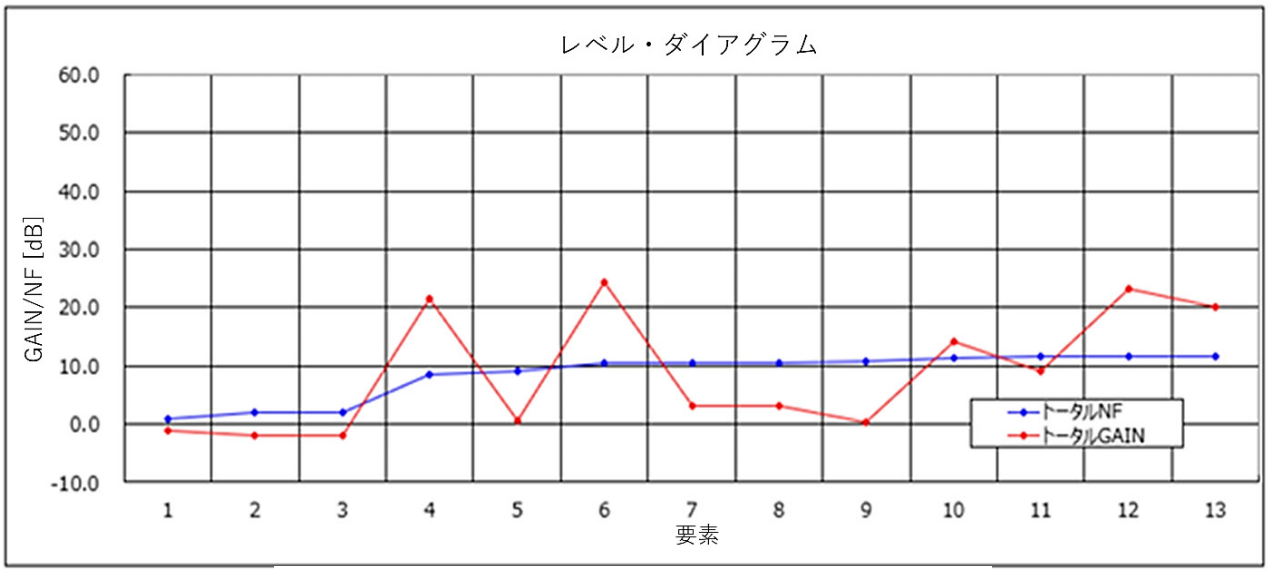


図 3-(1)-A-①-2　ノイズレベル（現行機）

め、当該距離差に応じた拡散差、受信開口差（視野端の受信開口面積は減少する）を勘案すると、概算で36dB以上の距離減衰補正が必要である。

最大計測距離60ｍを実現するためには、レーザー測距現行機と比較して32dBの送受光系の性能改善が必要であるため、これを前提に光学システム基本設計を実施した。その結果、高速AGCをレーザー測距現行機と同じPMT出力のアナログアンプで実施した場合、レーザー測距現行機と比較してノイズフィギュア（雑音指数｜Noise Figure：NF）が大きく劣化することで所望の受信性能を保障することが困難であると判断した。そこで、32dB以上の光学系性能の改善を図るため、高速AGCによる距離減衰補正はPMT後段で実施するのではなく、PMTの増幅率を高速で制御することで保障する方針とした。これにより、レーザー測距現行機のアナログアンプによる高速AGCのNFが11．6dBに対し、アナログアンプで実施するワンパルスAGCのNFは3.5dBとなり、NFの改善目標である10dBに対し8.1dB改善となる。不足分の1.9dBに対しては別の改善項目で実現する。図3-(1)-A-①-2にレーザー測距現行機のNFレベルを、図3-(1)-A-①-3にアナログアンプによる高速AGCを除外した光学系のNFレベル（設計値）を示す。

距離減衰補正に対する高速AGCの機能をPMTにて実施した場合、PMTの増幅率に応じたショット雑音が増加することによる受信性能の劣化が懸念される。本研究にて採用するPMTのショット雑音のパルス幅は、過去実績から1nsec程度であることが分かっている。これに対しレーザー測距現行機の受信信号のパルス幅は2nsec（送信レーザー光パルス幅：2nsec）であるため、フィルタ処理によるショット雑音と受信信号との分離が困難であった。そこで、レーザー測距現行機と比較して送信レーザー光パルス幅をレーザー測距現行機の2倍となる4nsecとすることで、当該ショット雑音の増加による受信性能の劣化を抑制する帯域制限フィルタを追加する。

(c)光学システムの基本設計

最大計測距離60ｍを実現するため、送受光系の総和としてレーザー測距現行機の約32dB以

	要素								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	CPL	LNA	DLY	LNA	DLY	DIV	LNA	ATT	SW
単体NF	1.5	1.0	13.0	1.0	13.0	3.0	1.0	5.5	3.0
単体GAIN	−1.5	20.0	−13.0	20.0	−13.0	−3.0	20.0	−5.5	−3.0
トータルNF	1.5	2.5	3.1	3.3	3.4	3.5	3.5	3.5	3.5
トータルGAIN	−1.5	18.5	5.5	25.5	12.5	9.5	29.5	24.0	21.0

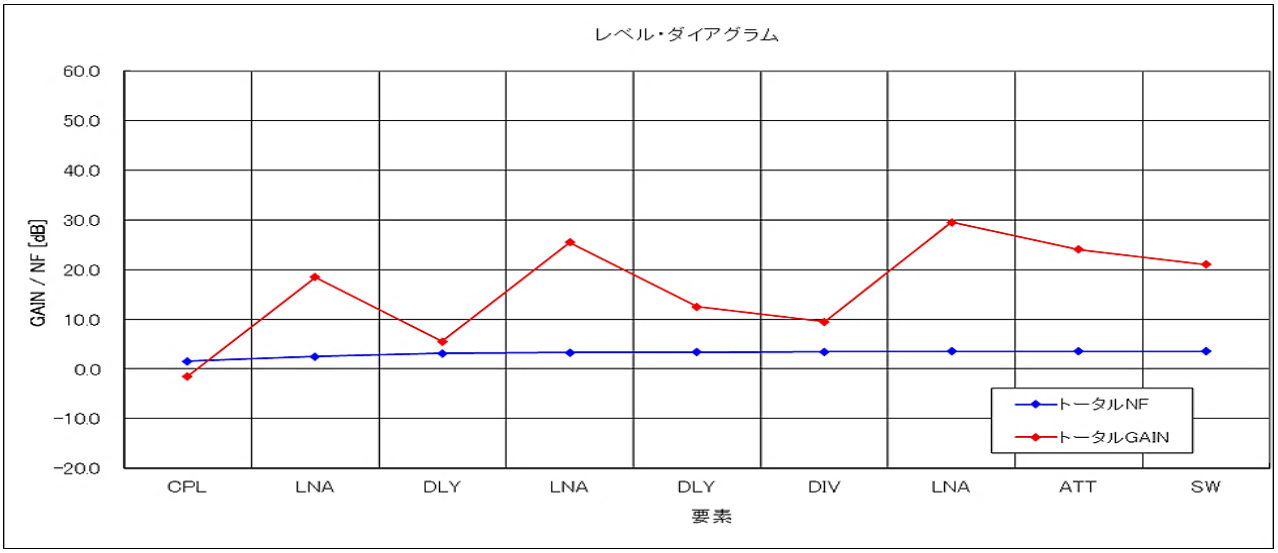


図 3-(1)-A-①-3　ノイズレベル（設計値）

上の性能改善を提供する手法について検討する。PMT感度2倍（設計値：+6dB）、送信光源（レーザー光源）出力2倍の設計値に対し、当該レーザー光源のカタログ値では2.4倍（レーザー測距現行機ピーク5kWに対し評価機では12kWの2.4倍＝+7.6dB）であり、設計目標6dBの性能向上に対し、7.6dB の性能向上となり、1.6dB上回った。一方、NFに関しては、設計値10dBの性能向上に対し、高速AGCを光検出器（PMT増幅率の高速制御）にて実施することで8.1dBの性能向上に留まり、1.9dB下回った。残る性能改善はレーザー測距現行機の受信開口面積を700mm^{2}増加することにより実現する。設計目標は10dBの性能向上であるが、不足分の0.3dB（レーザー光源出力改善+1.6dB｜NFレベル改善：-1.9dBNF｜改善効果：+1.6-1.9＝-0.3dB）を考慮すると、10.3dB以上の性能改善が必要となる。システム設計した光学系配置と光線挙動のシミュレーション結果を図3-(1)-A-①-4に示す。また、視野角と受信開口面積との関係を図3-(1)-

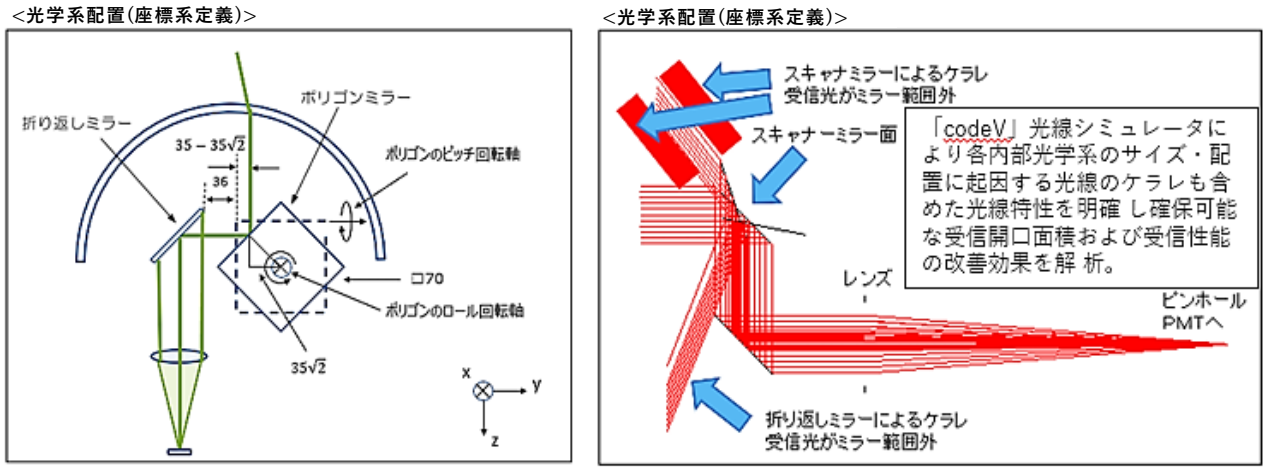


図 3-(1)-A-①-4　光学系配置および光線シミュレーション

表 3-(1)-A-①-2　光学系視野角に対する受信感度想定

視野角	受信開口面積	受信感度向上
視野角-5deg～35deg （中心+20deg，幅 40deg）	6,000mm^2	+18.66dB
視野角-22deg～58deg （中心+18deg，幅 80deg）	5,000mm^2	+17.07dB
視野角-35deg～65deg （中心+18deg，幅 99deg）	4,000mm^2	+15.14dB
視野角-52deg～68deg （中心+8deg，幅 120deg）	3,000mm^2	+12.64dB

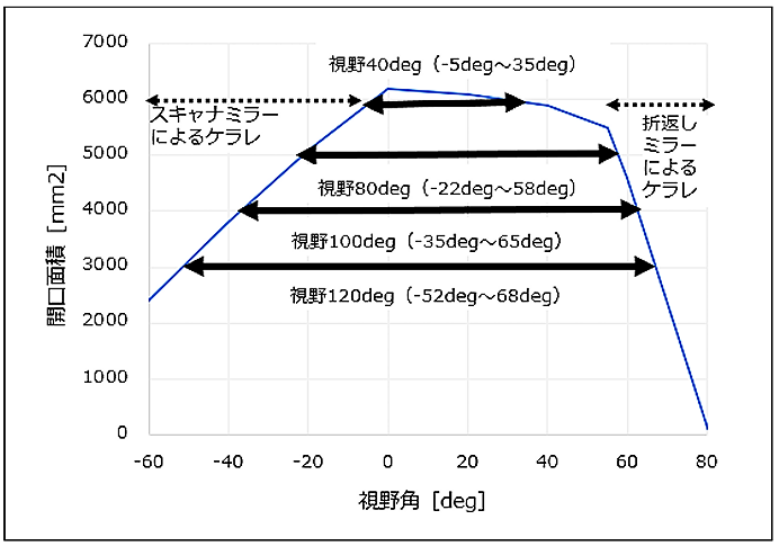
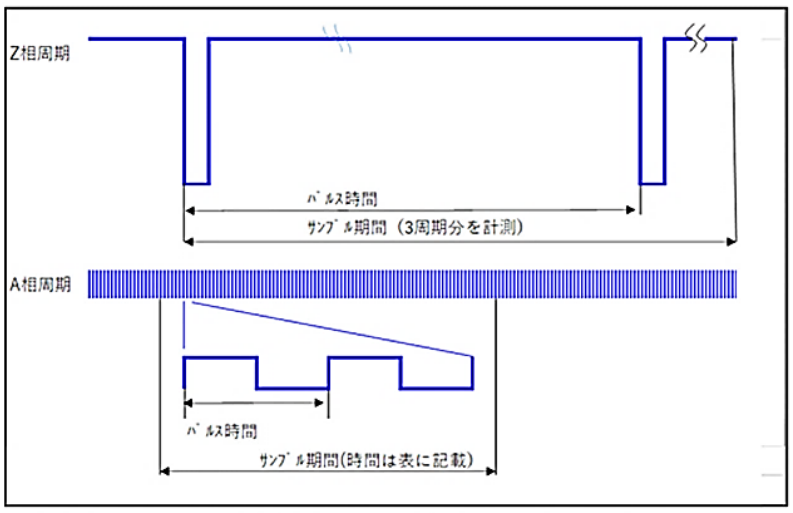


図 3-(1)-A-①-5
視野角と受信開口面積との関係

A-①-5に示す。受信開口面積は視野角によって変化する。併せて、光学系視野角とこれに伴う受信感度向上との関係を表3-(1)-A-①-2に示す。同表に示すように、いずれの視野角においても10.3dB以上の受信感度の向上が見込まれ、これにより送受光系の総和としてレーザー測距現行機の約32dB以上の改善が担保される。

所望の受信開口面積を確保するため、光学システムの機構設計において各光学系の実装検討および慣性モーメントについて検討した。最大計測距離60mの実現を目指し、広視野における受信開口面積を担保するため、4面直方体の回転ポリゴンミラーを大型化させる必要があり、加えて最大水平分解能8,000画素（最終目標）を実現するため、レーザー測距現行機（最大水平分解能：2,160画素）と比較して当該ポリゴンミラーの最低回転速度を1/4まで減速させることが必須となる。大型化した当該ポリゴンミラーを安定して低速・低速回転させることは、モーター制御においてレーザー測距現行機より厳しい条件とな



A 相：　モーター1 回転当たり 72000 パルス（72000pulse/rpm）
Z 相：　モーター1 回転当たり 1 パルス（1pulse/rpm）

図 3-(1)-A-①-6　エンコーダーパルス特性

表 3-(1)-A-①-3　モーター回転速度安定性に関する検証結果

設定回転数（rpm）	Z 相				A 相		
	サンプル周期	パルス平均時間（s）	パルス時間の変動率（%）+最大/-最小	パルス平均時間から求めた実回転速度（rpm）	サンプル周期（s）	パルス平均時間（μs）	パルス時間の変動率（%）+最大/-最小
30	Z パルス 3 周期分	2.075046167	0.02710	28.91506112	0.05241750	28.89608600	27.52592
			-0.01779				-17.80894
60	Z パルス 3 周期分	1.035849333	0.01223	57.92348179	0.05241525	14.41563531	28.33288
			-0.00911				-20.22551
120	Z パルス 3 周期分	0.517880750	0.01806	115.8567875	0.05242130	7.19776191	29.90149
			-0.02497				-18.72474
300	Z パルス 3 周期分	0.207228183	0.00394	289.5359069	0.0524280	2.88095840	26.69395
			-0.00303				-14.95886
600	Z パルス 3 周期分	0.103668667	0.00080	578.7669691	0.05242795	1.44073048	28.46058
			-0.00064				-16.67422

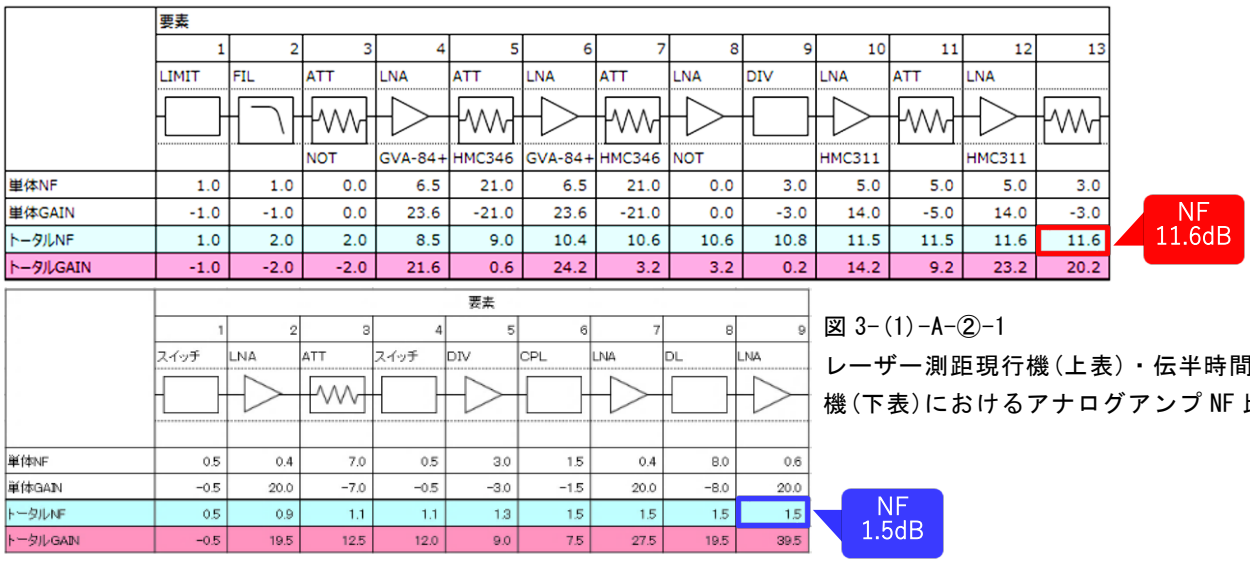
る。そのため、機構設計により試算された慣性モーメント値を基に疑似負荷を製作し、モーター制御に対する基本性能検証を実施した。その結果、新たに構築した回転制御システム（速度制御システム）を組込むことで、当該ポリゴンミラーを安定動作させることが確認された。回転制御システムに適用したエンコーダーのパルス特性を図3-(1)-A-①-6に、基本性能検証にて確認したモーター回転速度安定性に関する検証結果を表3-(1)-A-①-3に示す。

[(1)-A｜実施内容②｜ワンパルスAGC基板の開発]

(a) ワンパルスAGCの詳細設計

光検出器における距離減衰補正機能（→光検出器高速AGC）、光検出器後段のアナログアンプ部における距離減衰補正機能（→高速AGC）および反射率補正機能（→ワンパルスAGC）の3種類のAGCを組み込む光学システム評価機（伝搬時間評価機）を構築する。そのうち、光検出器高速AGCでの距離減衰補正機能に関しては新規開発する光電増倍管（Photomultiplier Tube｜ PMT）および駆動用電源の開発と並行して実施し、光学系システム実証機（伝搬時間・反射率実証機）へ組み込まれる。

前項「(1)-A｜実施内容①｜光学システム(伝搬時間評価機)の基本設計」における基本設計に従いワンパルスAGC基板および高速AGC基板に関する詳細設計および試作を実施する。PMT出力後段のアナログアンプにおけるノイズフィギュア（雑音指数｜Noise Figure：NF）低減と



要素	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	LIMIT	FIL	ATT	LNA	ATT	LNA	ATT	LNA	DIV	LNA	ATT	LNA	
			NOT	GVA-84+	HMC346	GVA-84+	HMC346	NOT		HMC311		HMC311	
単体NF	1.0	1.0	0.0	6.5	21.0	6.5	21.0	0.0	3.0	5.0	5.0	5.0	3.0
単体GAIN	-1.0	-1.0	0.0	23.6	-21.0	23.6	-21.0	0.0	-3.0	14.0	-5.0	14.0	-3.0
トータルNF	1.0	2.0	2.0	8.5	9.0	10.4	10.6	10.6	10.8	11.5	11.5	11.6	11.6
トータルGAIN	-1.0	-2.0	-2.0	21.6	0.6	24.2	3.2	3.2	0.2	14.2	9.2	23.2	20.2

NF 11.6dB

要素	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	スイッチ	LNA	ATT	スイッチ	DIV	CPL	LNA	DL	LNA
単体NF	0.5	0.4	7.0	0.5	3.0	1.5	0.4	8.0	0.6
単体GAIN	-0.5	20.0	-7.0	-0.5	-3.0	-1.5	20.0	-8.0	20.0
トータルNF	0.5	0.9	1.1	1.1	1.3	1.5	1.5	1.5	1.5
トータルGAIN	-0.5	19.5	12.5	12.0	9.0	7.5	27.5	19.5	39.5

NF 1.5dB

図 3-(1)-A-②-1
レーザー測距現行機(上表)・伝半時間評価機(下表)におけるアナログアンプ NF 比較

して、前項に示す基本設計の結果では8.1dBの性能向上が試算された。一方、詳細設計において、各回路および実装素子を見直した結果、当初目標値である約10dBの性能向上が確認された。図3-(1)-A-②-1に伝搬時間評価機に組み込まれる光学系NFレベルとレーザー測距現行機との比較を示す。アナログアンプ部のNFを10dB以上の性能向上させることを目的とし、レーザー測距現行機におけるNF11.6dBに対し、伝搬時間評価機では当該NFは1.5dBと大幅に低減（10.1dB向上）することに成功した。レーザー測距現行機では距離減衰補正用アッテネータ（図中｜上表5・7）の影響が全体系におけるNFの劣化をもたらしていたが、伝搬時間評価機では光検出器高速AGC（「3.(1)-B」参照）を用いて距離減衰補正をおこなうことにより、当該NFの大幅改善が実現された。

(b) ワンパルスAGC基板の試作

ワンパルスAGC基板はレーザー照射対象からの反射率を補正する機能を有す。レーザー測距現行機の運用にて得られた知見（過去実績）から、本研究で構築する光学系（伝搬時間・反射率評価機／同実証機）に適用する光電子増倍管の出力値が20dB程度の変動幅を有すると仮定し、この出力値（受信信号）に対してAGCを行う。レーザー測距現行機に組込まれている従来のAGCでは時系列的に連続した受信信号に対してAGCを行うため、受信毎に変動する信号レベルには対応できてい。そこでこれを改善するため、新たにワンパルスAGC基板を試作した。受信信号レベルを検出したのちにディレイラインで受信信号を遅延させて、ディレイラインの後段（出力）にGain設定が異なる複数のアンプを並列に配置することで、高速スイッチで最適なアンプ（Gain）を選択する方式を採用する。図3-(1)-A-②-2、図3-(1)-A-②-3に試作したワンパルスAGC基板を示す。ワンパルスAGC基板では、増幅率がパルスの立ち上がり（周波数）で変化するため、つまり受信信号の強度（強度情報）で増幅率が変化し、反射率の補正に不向きである。そのためワンパルスAGCに関しては、信号の歪みや増幅率の不安定さに対してロバストな距離減衰補正機能として適用する。併せて、ワンパルスAGCの目的であるレーザー反射（光電子増倍管の出力値）が20dBの変動幅を有する対策にも取り組む。レーザー測距現行機における強度情報は、ディジタル基板のA/Dコンバータで取り込んでおり、その際のノイズレベルは20～30mV程度ある。そこで新たに開発したワンパルスAGC基板では、A/Dコンバータをアナログアンプに移し、アナログフィルタによる帯域制限および光電子増倍管からのショット雑音を狭帯域信号除去回路により除外することで、当該ノイズレベルを1/10まで軽減させ、ダイナミックレンジを20dB増やすことで対応する。これら技術改善を施したワン

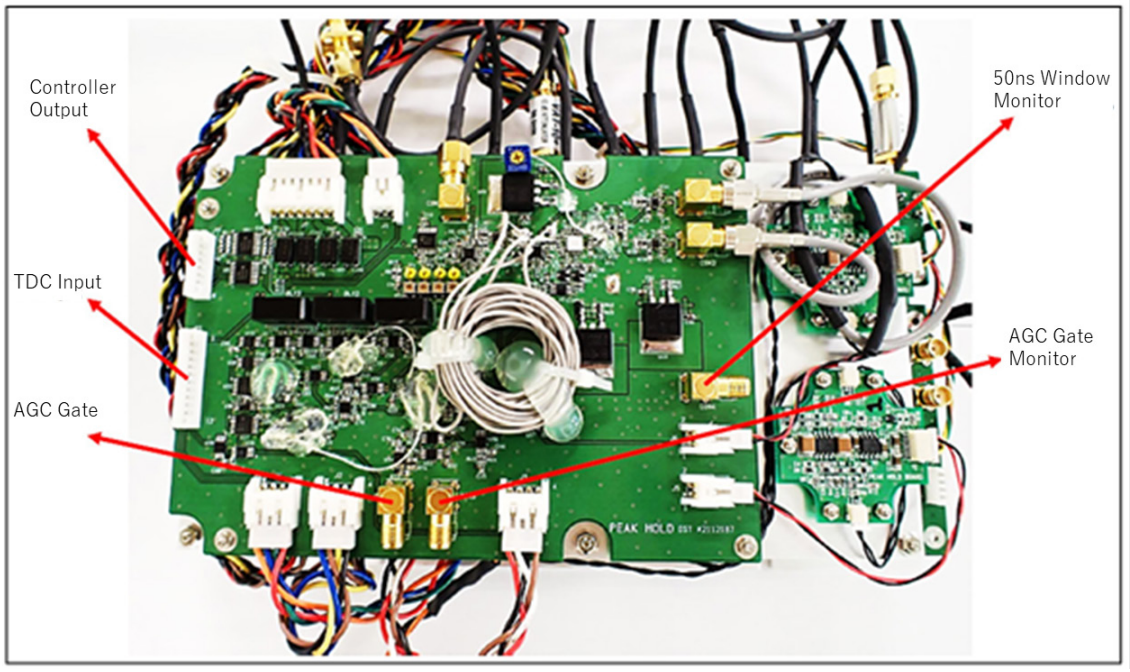


図 3-(1)-A-②-2　ワンパルス AGC 基板（表面）

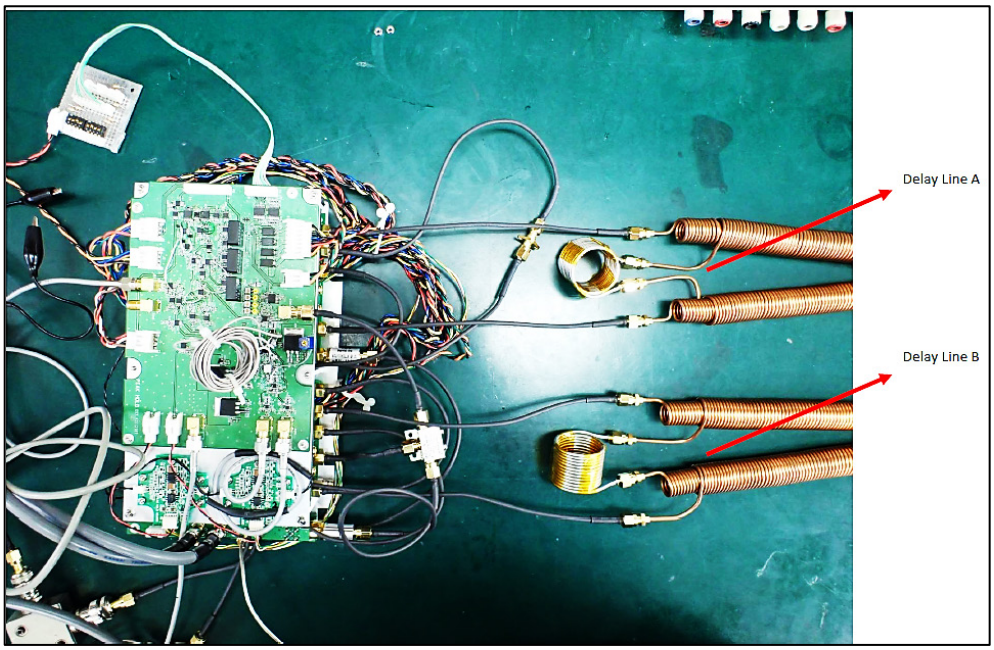


図 3-(1)-A-②-3　ワンパルス AGC 基板（裏面）

パルスAGC基板を伝搬時間評価機に組込むことにより、レーザー測距現行機におけるNF(ノイズフィギュア) 11.6dBと比較して、伝搬時間評価機のNFは1.7dBにまで抑制させることに成功しており、アナログアンプノイズ低減効果としてNF約10dB以上（≒9.9dB）の改善（性能向上）が確認された。

(c)ワンパルスAGC基板の動作検証

図3-(1)-A-②-4にワンパルスAGC基板のタイミングチャートを示す。入力レベルに合わせワンパルスAGC基板内のアンプを最適に設定するため、入力レベルをCOMPにて閾値を超えた信号を検出させる。これを信号長50nsec（受信信号：6nsec｜PMT ショット雑音：1nsec）に伸ばす（図3-(1)-A-②-4｜PHWND1）。PHWND1内の最大信号をピークホールドし、この信号レベルから設定すべきアンプを選択する。この選択時間だけ受信信号を遅延させ、受信信号レベルに応じたアンプGAINを選択する。また選択したアンプ情報を外部出力する。AGCGATE内で最大レベルの信号を残し、これを強度信号として出力する。

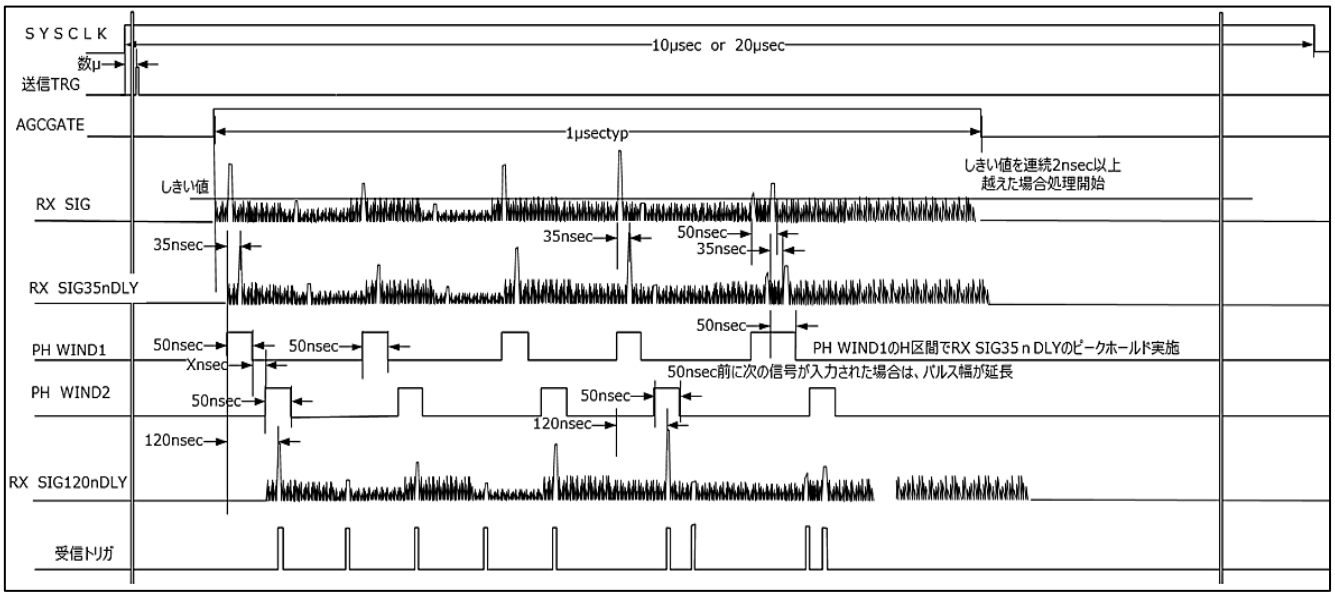


図 3-(1)-A-②-4　タイミングチャート（ワンパルス AGC 基板）

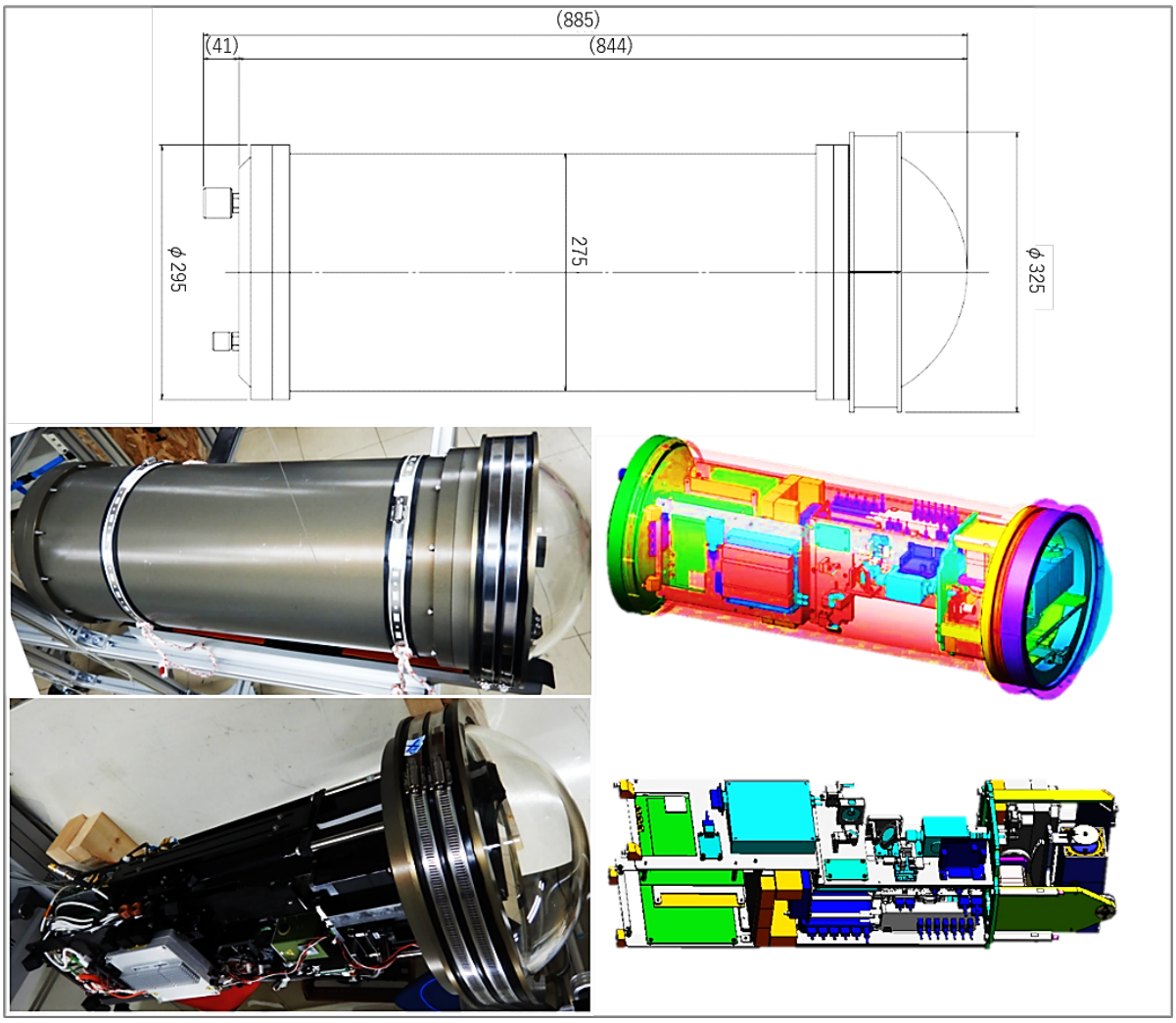


図 3-(1)-A-③-1　伝搬時間・反射率評価機

[(1)-A｜実施内容③｜伝搬時間評価機による基礎試験]

(a)伝搬時間評価機の試作

アナログアンプ部での高速AGCおよびワンパルスAGCを組み込んだ評価機を試作し、これを適用した基礎試験（水槽試験｜浅海試験）を実施することで基礎データを取得する。当該データを分析した結果を、各AGC機能（高速AGC・ワンパルスAGC基板）の改良設計に反映し、Greenレーザー（波長：532nm）を適用する伝搬時間・反射率実証機（「Greenレーザー実証機」）に組み込む。図3-(1)-A-③-1に試作した伝搬時間評価機を示す。光学システムおよび各AGCの補正機能を評価するため、伝搬時間評価機を試作し、基本機能について検証した。当該評価機は送受光系の総和として32dB以上の性能向上（レーザー測距現行機比較）を設計値として試作し、下記結果を得た。

- レーザー出力向上　：7.6dB　（設計値：7.6dB）
- 光検出器感度　：6dB　（設計値：6dB）
- アナログアンプNF向上　：9.9dB　（設計値：8.1dB）
- 受信開口面積拡大　：10.64dB　（設計値：12.64dB）

ここで上記イ項に関しては、当該評価機を基本構成として、後記「3.(1)-B」および「3.(2)-B」における各取組みにて構築される光検出器（光電子増倍管＋駆動電源）の搭載を仮定とす

る。これにより、レーザー測距現行機と比較して34dB超の性能向上（設計目標）が実現される。当該32dB以上の性能改善において、大きな役割を果たす4面回転ポリゴンミラーの大型化に伴う受信開口面積の拡大では、基本設計において下記の受信感度向上が試算された（表3-(1)-A-①-2）。

＜設計値＞

視野角：-5deg～35deg（中心+20deg、幅40deg）　⇒ 18.66dB感度向上
視野角：-22deg～58deg（中心+18deg、幅80deg）　⇒ 17.07dB感度向上
視野角：-35deg～65deg（中心+18deg、幅99deg）　⇒ 15.14dB感度向上
視野角：-52deg～68deg（中心+8deg、幅120deg）　⇒ 12.64dB感度向上

一方、レーザー測距現行機と異なり伝搬時間評価機においては、送信光と受信光の視野の分離（送受信光の経路分離）を実施したために、当該ポリゴンミラーに対する約20%の光学視野（受信開口面積）が犠牲となり、この影響により2dBの感度劣化が生じた。これにより各視野角における感度向上は下記となる。

＜実際値＞

視野角：-5deg～35deg（中心+20deg、幅40deg）　⇒ 16.66dB感度向上
視野角：-22deg～58deg（中心+18deg、幅80deg）　⇒ 15.07dB感度向上
視野角：-35deg～65deg（中心+18deg、幅99deg）　⇒ 13.14dB感度向上
視野角：-52deg～68deg（中心+8deg、幅120deg）　⇒ 10.64dB感度向上

設計値より下回りしたものの、何れの視野角においておいても10.3dBを上回っており、送受光系の総量として32dB以上の性能改善を満足している。

(b)伝搬時間評価機による水槽試験／浅海試験

高速AGCおよびワンパルスAGCを組み込んだ伝搬時間評価機の性能を、水槽試験／浅海試験にて確認した。各試験においては、図3-(1)-A-③-2に示すグレースケールの評価用パネル13枚を、8枚組と5枚組のフレームに分けて水中／海中に投入し、各パネルに対するレーザー（波長：532nm）の反射強度を5mの計測距離にて測定した。これらの試験は、物性推定アルゴリズム（「3.(3)-A」参照）構築に際し、可視化画像におけるターゲットの色差による識別・類別性能について定量的に評価することを目的としている。図3-(1)-A-③-3に水槽試験および浅海試験のセットアップ（試験環境）を示す。

水槽試験において、グレースケールの中で最も暗い色（黒色｜パネル番号：13F｜マンセル値：N1）では反射光を計測することが出来なかった。また、グレースケールのうち3枚のパネルについては、明度と反射強度（強度情報）が逆転していることが確認された。図3-(1)-A-③-4に水槽試験における各評価用パネルの計測結果（反射強度）を箱ひげ図にて示す。本事象は、伝搬時間評価機と評価用パネルの位置関係が正対したことで、特異的に強い反射光が戻ったことに起因すると考えられる。そこで、その後に実施した浅海域試験において、当該事象について確認した。図3-(1)-A-③-5に浅海試験における各評価用パネルの計測結果（反射強度）を箱ひげ図にて示す。浅海域試験においても水槽試験同様に、グレースケールの中

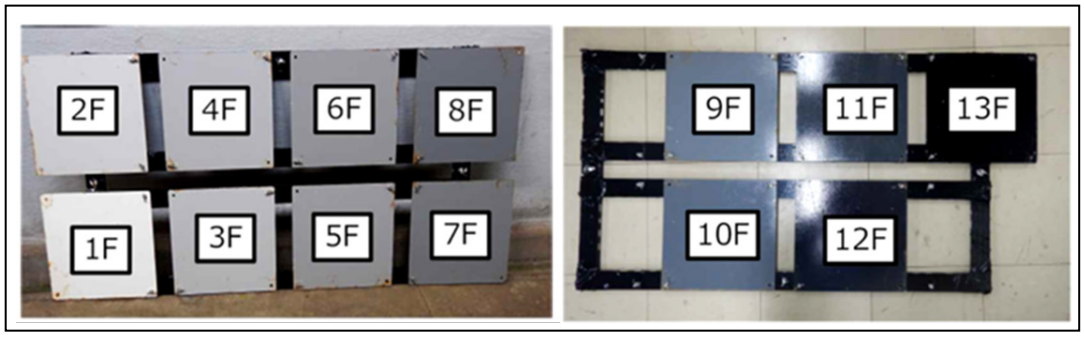


図 3-(1)-A-③-2　グレースケール評価用パネル（水槽試験・浅海試験用ターゲット）

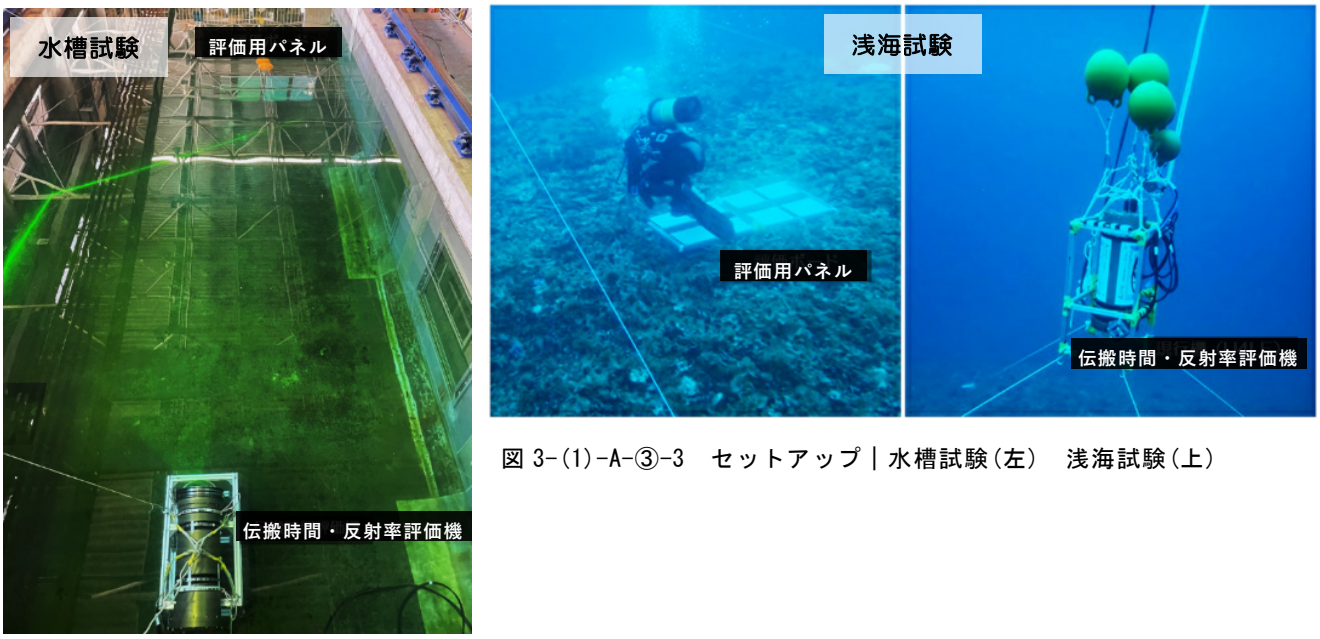


図 3-(1)-A-③-3　セットアップ｜水槽試験(左)　浅海試験(上)

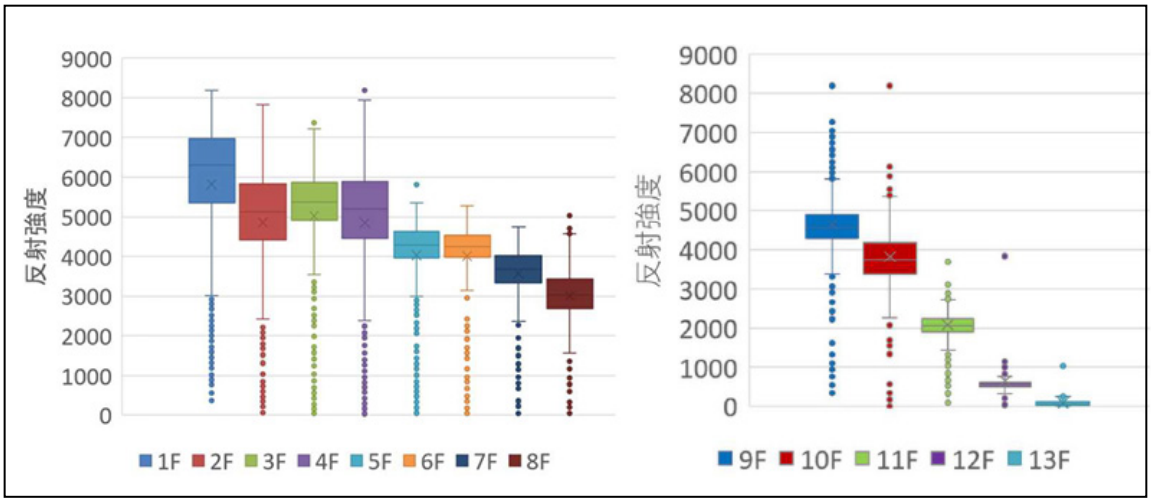


図 3-(1)-A-③-4　水槽試験結果（伝搬時間・反射率評価機｜評価用パネル｜反射強度測定@5m）

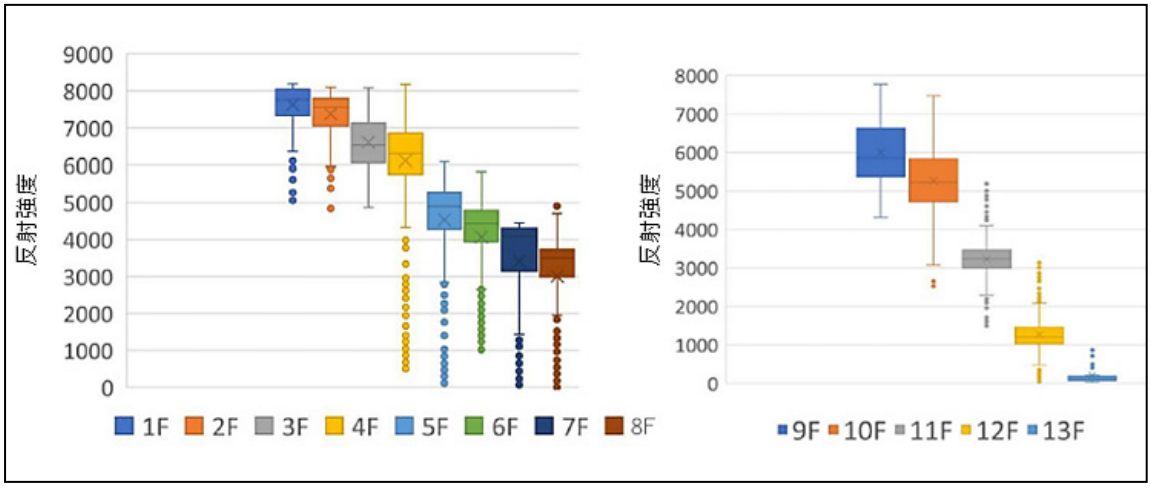


図 3-(1)-A-③-5　浅海試験結果（伝搬時間・反射率評価機｜評価用パネル｜反射強度測定@5m）

で最も暗い色（黒色｜パネル番号：13F｜マンセル値：N1）に関しては反射光を計測することが出来なった。一方、水槽試験にて生じた明度と反射強度の逆転現象は確認されず、各評価

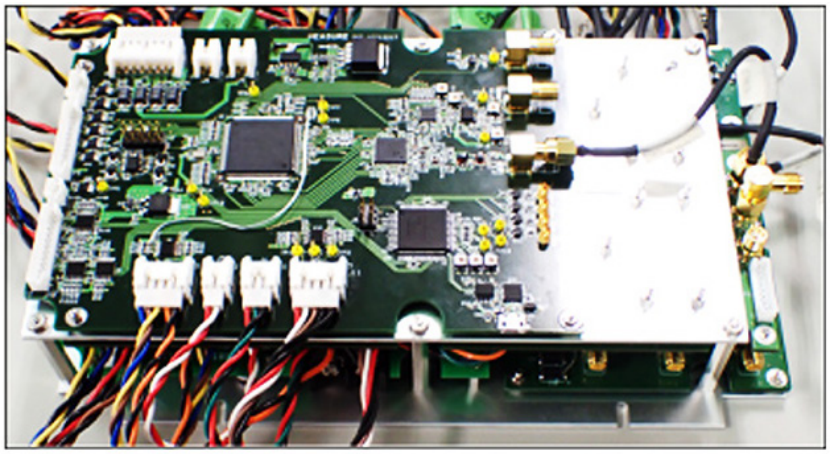


図 3-(1)-A-④-1
Green レーザー実証機用ワンパルス AGC 基板

用パネル間の微小な色差（グレースケールの僅かな差異）まで、反射強度の差異として判別することが可能であった。伝搬時間評価機で確認した技術的知見と成果を反映させて開発する同実証機(Greenレーザー実証機)では、当該評価機と比較し、新規開発の光電子増倍管(PMT)および光検出器AGCの適用も含め、送受光系の性能（感度）が大幅に向上するため、黒色パネルのようなごく微弱な反射強度に関しても、計測可能となることが期待される。

[(1)-A｜実施内容④｜伝搬時間・反射率実証機（Greenレーザー実証機）の開発]

(a)Greenレーザー実証機用ワンパルスAGC基板の製作

伝搬時間評価機に組み込んだワンパルスAGC基板で得られた知見・基礎データを基に、Greenレーザー実証機に組み込むワンパルスAGC基板を製作した。図3-(1)-A-④-1に当該AGC基板の外観を示す。伝搬時間評価機とGreenレーザー実証機に組み込まれる各ワンパルスAGC基板において、異なる機能・性能は、強度出力のマルチヒット化と高感度化である。伝搬時間評価機では、1パルスレーザー（送信光）に対して複数の反射光（受信光）を検出し、距離情報を取得することが可能である一方、強度情報についてはそれら反射光のうち最大の反射強度の取得していた。そのため、強度情報は1パルスレーザーに対し1データのみ出力となる。これに対しGreenレーザー実証機では、最大計測距離60mの長距離レーザー測距を目的とすることから、近傍のマリンスノー等の海中懸濁物からの強反射から、遠方にある反射物体からの弱反射までを同時に扱う必要があり、複数の強度情報を取得する（マルチヒットかする）必要がある。複数の強度情報を取得する手段としては、全受信データをA/Dでサンプリングし、デジタル信号処理により強度信号を出力する方法があるが、Greenレーザー実証機の信号パルス幅は数nsであり、数GHzサンプリングのデータをリアルタイム処理するためには、これを実現する電子システムの電力増加を含め海中探査機に搭載するサイズに許容することは困難となる。このため、Greenレーザー実証機用ワンパルスAGCでは、アナログ信号処理で複数の強度情報を取得できるように設計する。Greenレーザー実証機用ワンパルスAGC基板のシステムブロック図を図3-(1)-A-④-2に示す。併せて、当該AGC基板のタイミングチャートを図3-(1)-A-④-3に示す。また、Greenレーザー実証機用ワンパルス基板に実装される処理フローを以下に示す（アルファベットは図3-(1)-A-④-2および図3-(1)-A-④-3と対応している）。

＜ワンパルスAGC処理フロー＞

[A] 入力信号。PMT（光電子倍増管）からの RX 信号で、電圧レベル不定で半値幅 1～4ns のパルスが複数入力される。

[B] コンパレータのしきい値以上の受信入力があった場合に出力。信号とノイズを切り分ける。

[C] 受信信号を受け付けない期間。システム上に必要なデッドタイム。

[D] AGC により一定化したトリガ出力信号。利得の異なる 4 つの経路から SW で出力を切替える。

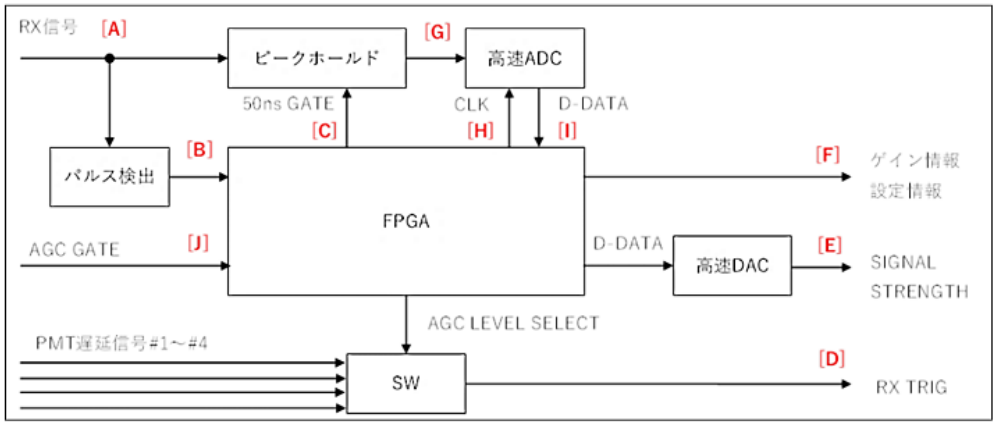


図 3-(1)-A-④-2　ブロックシステム図（Green レーザー実証機用ワンパルス AGC 基板）

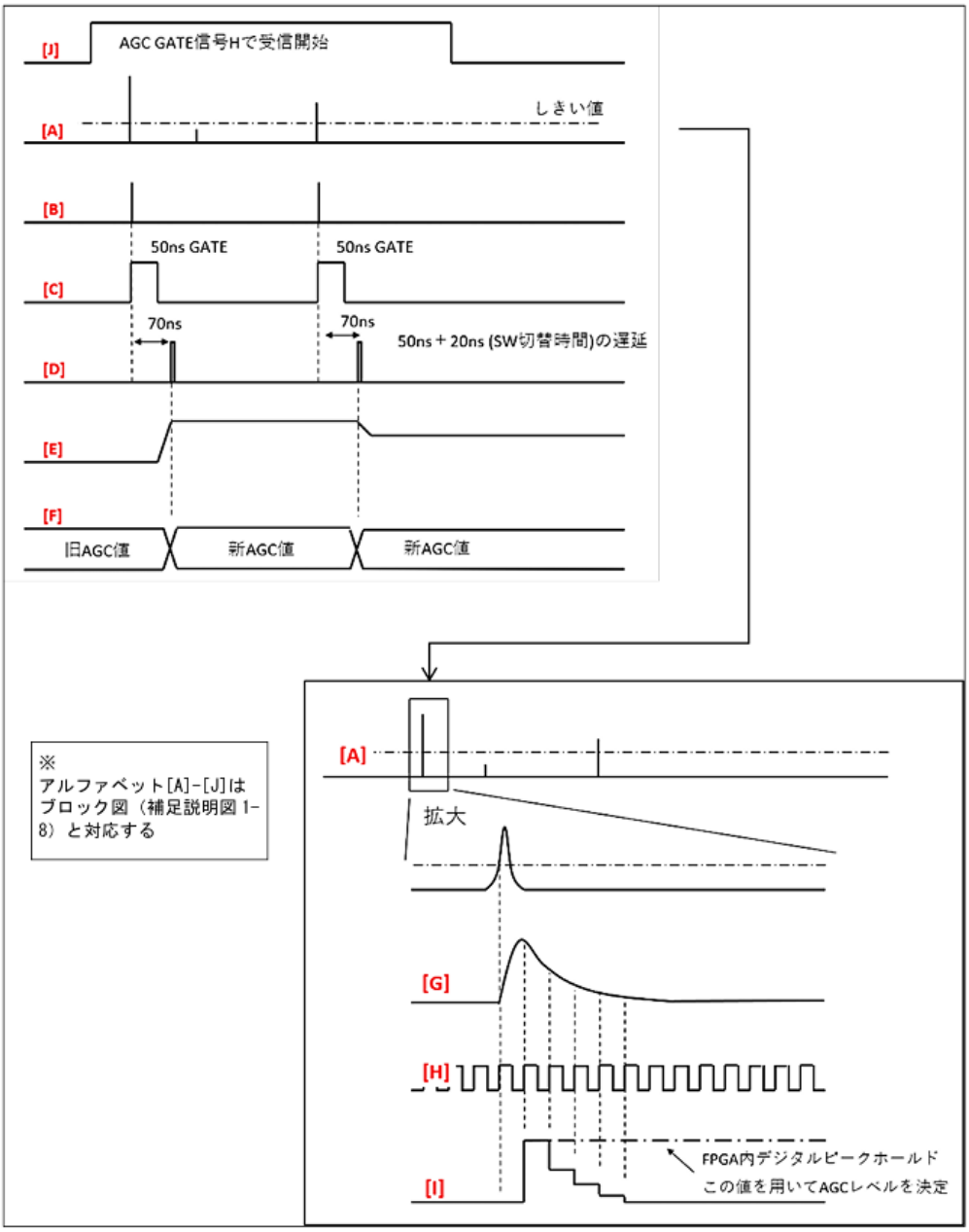


図 3-(1)-A-④-3　タイミングチャート（Green レーザー実証機用ワンパルス AGC 基板）

[E] RX 信号の強度情報を出力。新たな受信信号があるまで出力を保持する。
[F] FPGA で処理した AGC 設定情報等を出力する。

[G] RX 信号のピークホールド出力。ホールド期間は最大 20ns。
[H] FPGA と同期した CLK 信号（250MHz）。
[I] [H]信号により[G] を量子化したディジタル信号。
[J] AGC GATE 入力が H で受信を開始する。

高感度化を実現する効果的な手段として2案が挙げられる。第1案は、現在デジタル基板にてA/D変換している信号処理を、残留雑音レベルが約1/10となるワンパルスAGC基板に移設する方法である。第2案は、光検出器から出力される高出力電圧のショット雑音（インパルス波形）を除去するインパルスブランカの追加である。A/D変換処理の移設に関しては比較的にリスクが少ないため、最初の試行としてインパルスブランラの追加を実施した。パルス幅4nsec以上の信号は通過させ、PMTからのショット雑音となる狭パルス幅（パルス幅約3nsec以下）の雑音を除去するインパルスブランカを製作し、所望の仕様において正常動作することを確認した。Greenレーザー実証機を適用した深海試験において、長距離レーザー測距性能を評価した後、A/D変換処理の移設に対する実施要否を検討する。

(b)Greenレーザー実証機用ワンパルスAGC基板の試験結果（実測データ）
製作したGreenレーザーワンパルスAGC基板の基本性能・機能を確認するため、試験系を構築し、当該基板に対する各入出力信号を実測した。図3-(1)-A-④-4および図3-(1)-A-④-5にGreenレーザー実証機用ワンパルス基板の各実測値をそれぞれ示す(各図中に示すアルファベットは、図3-(1)-A-④-2および図3-(1)-A-④-3と対応している)。Greenレーザー実証機用ワンパルスAGCのマルチヒット化のキーとなるタイミング信号は、強度情報を収集するタイミングの[D]と強度信号の出力信号[E]である。入力信号[A]は、インパルス発生治具（試験系）によるもので、入力信号条件は以下となる。

＜入力信号[A]の発生条件＞
- 3ショットのパルスを入力させる。
- 第1ショットー第2ショットの間隔はデッドタイム約70ns分の最小間隔とする。
- 第2ショットと第3ショットは強度差を設け、第1と第3ショットの強度は同じとする。

図3-(1)-A-④-4および図3-(1)-A-④-5に示すように、マルチヒット化により強度情報を複数回保存できることを確認した。当該マルチヒット化は、深海環境下における長距離レーザー測距(最大計測距離:60m)における効果を期待しており、深海試験において性能を評価する。

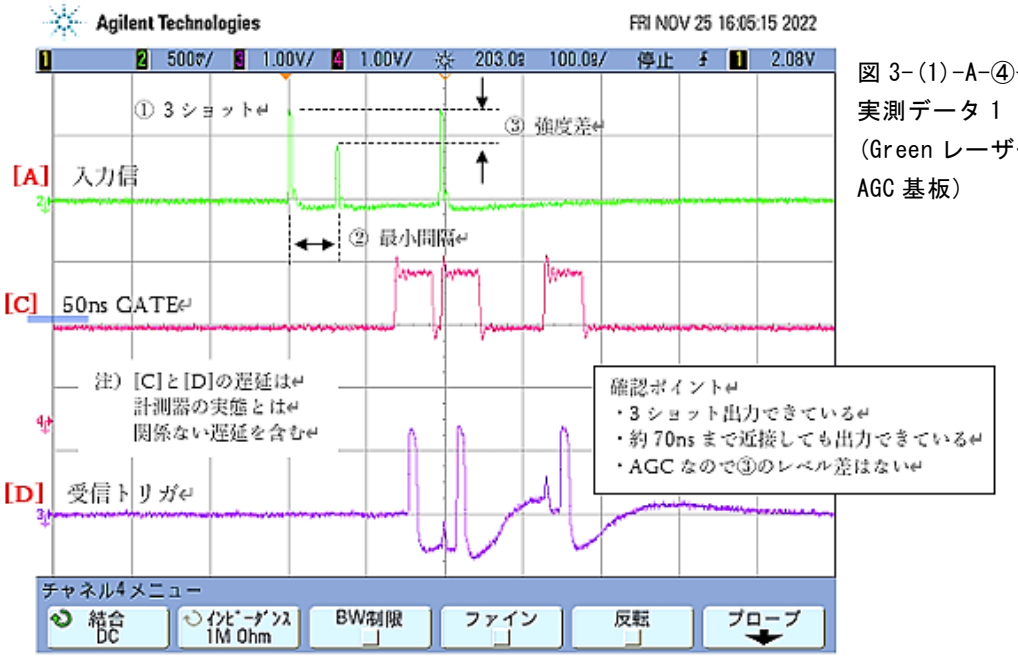


図 3-(1)-A-④-4
実測データ 1
(Green レーザー実証機用ワンパルス AGC 基板)

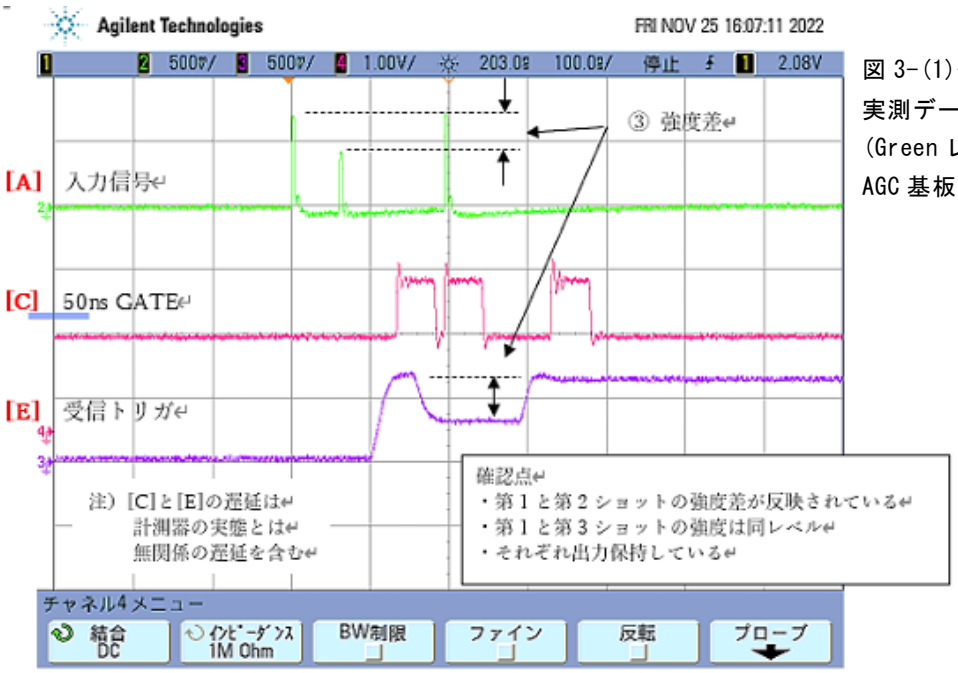


図 3-(1)-A-④-5
実測データ 2
（Green レーザー実証機用ワンパルス AGC 基板）

(c)Greenレーザー実証機用インパルスブランカの製作

Greenレーザー実証機用ワンパルスAGCは光検出器からの信号をアナログ的に処理するが、光検出器は原理的に狭パルス幅のインパルス雑音を発生する。当該インパルス雑音の特徴は、受信信号のパルス幅が約4nsに対し、インパルス雑音のパルス幅が約1nsであり、併せて信号レベルが高いため、リンギングを含めるとパルス幅は3ns程度で発生することもある。加えて、当該インパルス雑音はマイナス方向にしか現れない（受信信号もマイナス方向の信号）。当該インパルス雑音の波高値は-1V～-7Vに対し、受信信号は-数mV～-1Vである。そこで、これら条件下において受信信号を通過させ、インパルス雑音を遮断するインパルスブランカを開発した。インパルスブランカの外観を図3-(1)-A-④-6に示す。雑音と信号のパルス幅が異なるため、帯域制限フィルタで除去することが一般的であるが、図3-(1)-A-④-7に示すように、DC成分の残りが影響することで微弱信号の検出が困難となる課題があり、帯域制限フィルタでショット雑音を除去することはできないため、インパルスブランカの組込が効果的と考える。インパルスブランカは、ショット雑音の入力を検知するとRFスイッチをOFFしてRF出力を遮断する機能を有する（図3-(1)-A-④-8）。制御回路の増設を要するためシステムは複雑化するが、RF出力をOFFすることでショット雑音を除外（ノイズフロアまで減衰）することができる。入力信号を分岐させ、分岐した回路でショット雑音かどうか判定する。この判定は電

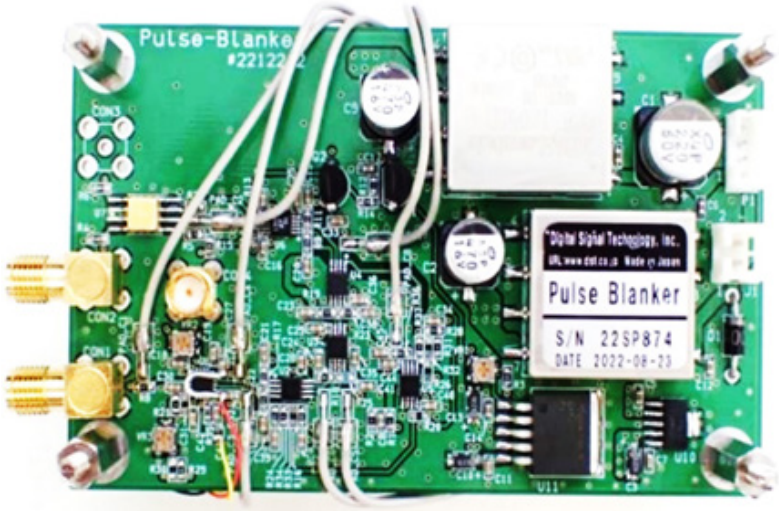


図 3-(1)-A-④-6
Green レーザー実証機用インパルスブランカ

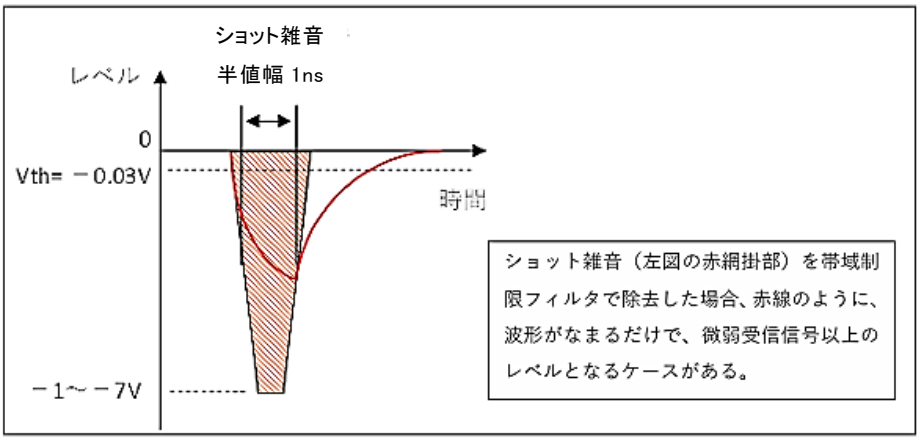


図 3-(1)-A-④-7
ショット雑音に対する帯域フィルタの効果（概略図）

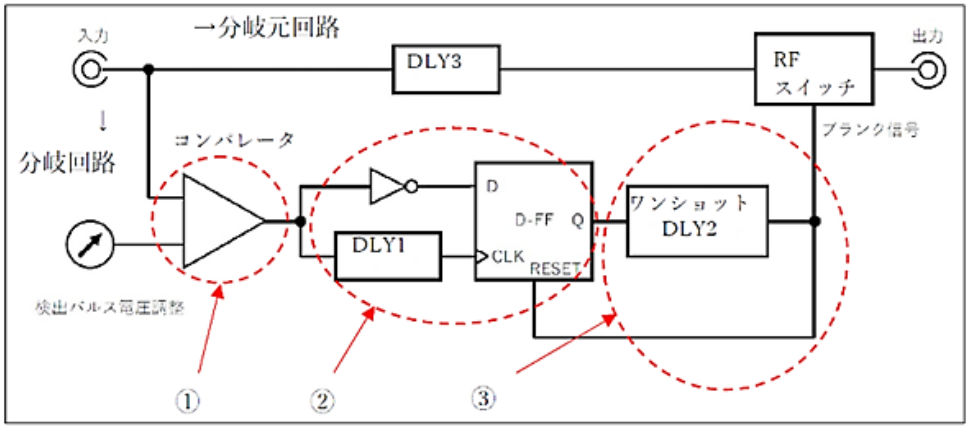


図 3-(1)-A-④-8　システムブロック図（Green レーザー実証機用インパルスブランカ）

圧レベルとパルス幅の2段階で行う。電圧レベル判定は①コンパレータで行い、パルス幅判定は②遅延回路とD型フリップフロップ(D-FF)で実施する。3ns以下のショット雑音と判定した場合にD-FFから信号を出力し、RFスイッチをOFFする制御信号③を出力する。本方式のインパルスブランカにより、3ns以下の信号はRFスイッチで遮断し、3ns以上の信号を出力することでインパルスノイズを除去し、微弱な受信信号の検出を行う。

(c)Greenレーザー実証機用インパルスブランカの試験結果（実測データ）

製作したインパルブランカの基本性能・機能を確認するため、当該インパルスブランカに対する信号の入出力をオシロスコープにて観測した。パルス幅が受信信号相当の4ns時には、ブランクされずに信号が出力されており（図3-(1)-A-④-9｜左図）、パルス幅がショット雑音相当の1ns時においては、雑音がブランクされ、出力されていないことが確認された（図3-(1)-A-④-9｜右図）。長距離レーザー測距に対する高感度化の取組みとして、当該インパルスブランカを適用することにより、深海環境下における最大計測距離60mに対する効果を期待しており、深海試験において性能を評価する。

(d)Greenレーザー実証機用光検出器による距離減衰補正機能（光検出器高速AGC）の開発

各高速AGCの目的は36dB以上の距離減衰の補正にあり、光検出器での距離減衰補正機能（→光検出器高速AGC）、光検出器後段のワンパルスAGC基板に搭載されているアナログアンプ部での距離減衰補正機能（→高速AGC）にて実施する。光検出器高速AGCと高速AGCは信号処理として異なる機能であり、光検出器高速AGCは、レーザー光の伝搬距離に応じた減衰量（伝搬損失)を補正することが目的であり、nsオーダーの応答速度を要求する。これに対し高速AGCは、36dB以上の距離減衰補正を光検出器高速AGCで実施した際、当該補正値が不足した場合を想定して、更にオフセットする目的で設けているため、応答速度の規定はない。本取組みによる光検出器高速AGCの単体性能としては、目標の36dB以上を大幅に超える80dB以上の距離減衰補

〔受信信号：4ns 入力模擬〕　　〔ショット雑音：1ns 入力模擬〕

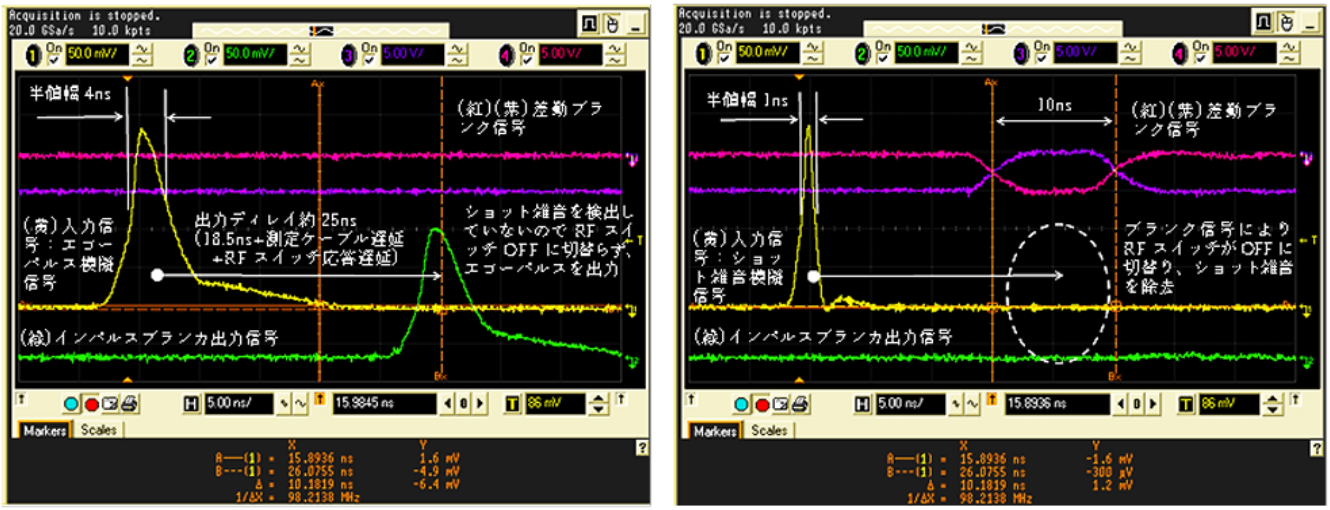


図 3-(1)-A-④-9　実測データ（Green レーザー実証機用インパルスブランカ）

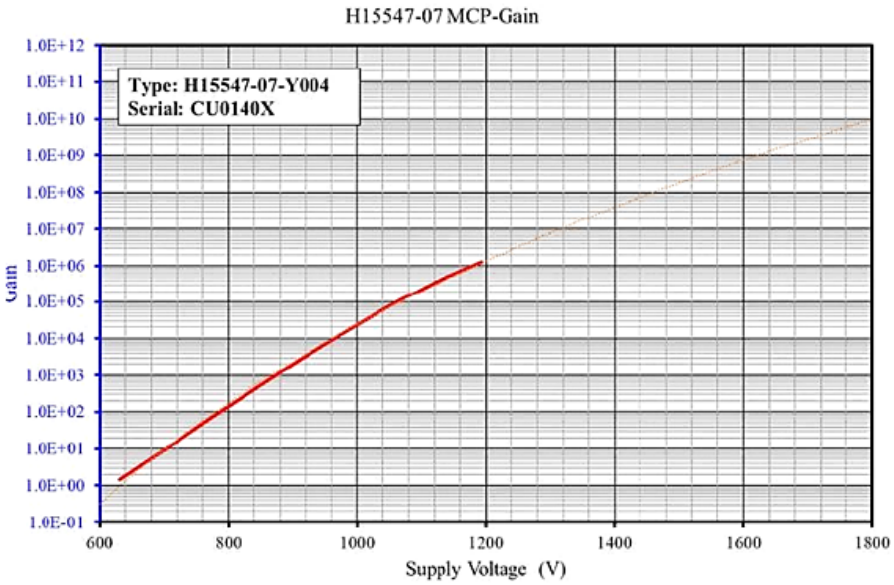


図 3-(1)-A-④-10　電圧対 GAIN 特性（Green レーザー実証機用光検出器）

正が期待される基礎データが得られている。図3-(1)-A-④-10にGreenレーザー実証機用へ適用する光電子増倍管（Photomultiplier｜PMT）の電圧対ゲイン特性を示す。同図より、バイアス値（印加電圧）が700V～800Vの時はGAINが1E+01～1E+02まで変化しており、20dB（電流Gain１桁）の補正が実現される。800V～1200Vの時はGAINが1E+02～1E+06まで変化するので80dB（電流Gain4桁）の補正が実現できる。これにより、目標とする36dB以上の距離減衰の補正に関しては、光検出器での距離減衰補正（光検出器AGC）により実現可能と判断する。光検出器AGCの機能・性能は、光検出器の性能（仕様）に依存し、これは、光電子増倍管の高感度化および駆動電源の高速制御化により提供される。当該取組みについては「3.(1)-B」および「3.(2)-B」に示す。

(e)Greenレーザー実証機の製作

伝搬時間評価機にて得られた技術的知見および基礎データを基盤として、改良後のワンパルスAGC、高速AGCおよび光検出器高速AGCを組込むGreenレーザー実証機を製作した。Greenレーザー実証機のシステムブロック図と内部構造を図3-(1)-A-④-11、図3-(1)-A-④-12に示す。併せて、仕様諸元を表3-(1)-A-①-4に示す。

図3-(1)-A-④-11において、送信光は、クロックボードで生成された送信タイミングに同期し

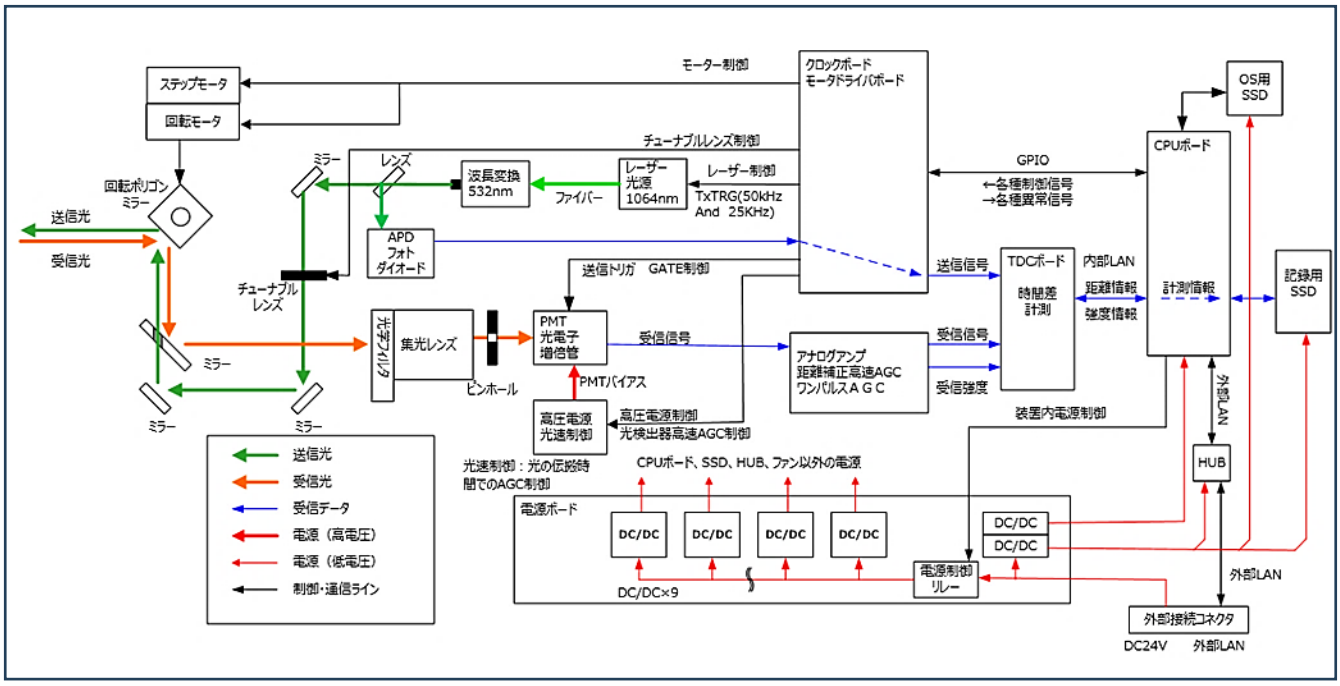


図 3-(1)-A-④-11　システムブロック図（Green レーザー実証機）

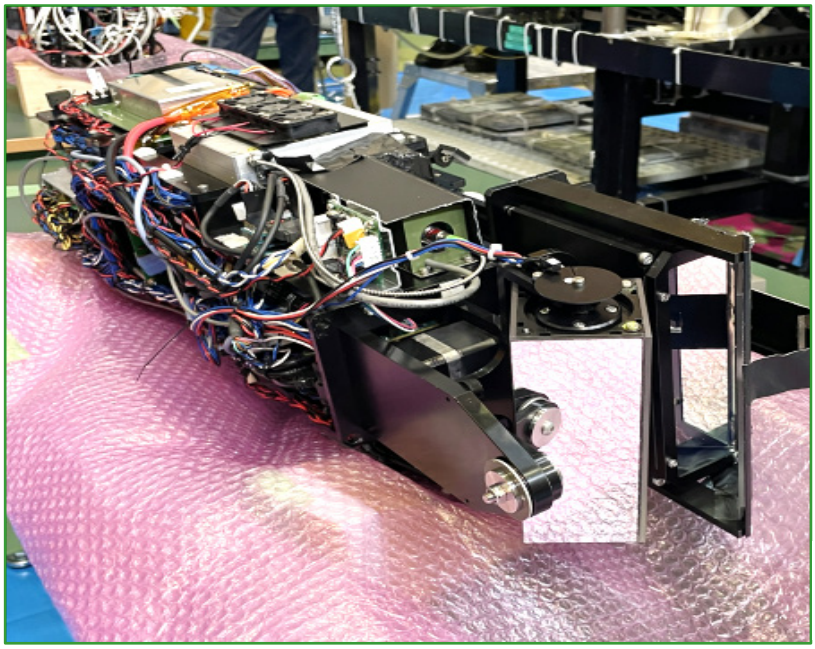


図 3-(1)-A-④-12
内部構造（Green レーザー実証機）

てレーザー光源より1064nmの赤外パルス光が出力される。その後、波長変換にて532nm波長（緑色）に変換され、複数の固定ミラーとレンズを経由して回転ポリゴンミラーにより指向制御され外界（海中）に射出される。ターゲットに反射した受信光は、回転ポリゴンミラーと複数の固定ミラーを経由して光学フィルタ（波長フィルタ）に入力され、532nm波長光のみが集光レンズに入力される。集光された受信光は、視野角以外の光を遮断するためのピンホールを経由してPMT（光電子増倍管）に入力され、受信光が電気信号（受信信号）に変換される。この際、クロックボードに同期して、PMTバイアスを光速に対応して高速制御すること（光検出器AGC）により距離減衰補正される。一方、送信光の一部を分岐させAPDにて取り出し、これをTDC（time to digital converter）ボードの時間差計測の計測開始トリガとして適用する。PMTからの受信信号をアナログアンプ（高速AGC／ワンパルスAGC）にて増幅後（補正後）、タイミング情報と強度情報の2種類の受信信号として出力する。TDCボードにおいて、送信光の送信タイミングから受信光の受信タイミングまでの時間差と、受信光の強度を出力することで、距離情報と強度

表 3-(1)-A-①-4　主仕様（Green レーザー実証機）

LN	項目	諸元
1	レーザー波長	532nm（Green 帯）
2	レーザー出力	12kW（peak）
3	送信パルス幅	4ns
4	周波数	50kHz／25kHz
5	光検出	MCP-PMT（新規開発品｜浜松ホトニクス）
6	光電面	GaAsP
7	視野角 （レーザー照射角度）	水平：120deg　垂直：30deg
8	解像度(@距離:10m)	水平 32.1/16.0/8.0/4.0 mm 垂直 179.0/…/53.6/35.7/17.9 mm
9	測距分解能	4.5mm
10	スキャン速度	＜２Ｄスキャンモード＞ 水平｜8,640 画素・垂直｜300 画素： 77.8s 水平｜4,320 画素・垂直｜300 画素： 38.9s ＜ラインスキャンモード＞ 水平｜8,640 画素： 0.26s 水平｜4,320 画素： 0.13s
11	耐圧	1,000m
12	寸法	φ325×914mm
13	質量	約 80kg

情報が取得され、記憶領域（SSD）に保存される。これにより、距離情報により距離画像が生成され、強度情報により強度画像が生成される。Greenレーザー実証機の開発は、実環境下（深海）において60mの最大計測距離（往復伝搬長：120m）を実現するために、レーザー測距現行機にて蓄積した基礎データを基に、送受光系の総量として32dB以上の性能改善を目指した。その結果、当該実証機における各項目の性能向上として下記を実現した。

□ レーザー出力　　＝ 20log(実証機12kW/現行機5kW)　＝ 7.6dB向上
□ 光検出器感度　　＝ 20log(3.26倍)　＝ 10.2dB向上
□ アナログアンプＮＦ　＝ 10.1dB向上
□ 集光面積拡大　　＝ 20log(3000*08/700)　＝10.6dB向上

□ 送受光系総量　　＝ 7.6dB + 10.2dB + 10.1dB + 10.6dB ＝ 38.5dB向上

本性能向上により、合計38.5dBの性能改善が図られ、目標とする32dBを6.5dB上回るGreenレーザー実証機を製作した。当該実証機を用いて、浅海試験、水槽試験および海中探査機へ搭載した深海試験を実施し、最終目標となる最大計測距離（深海探知距離）60mの達成を目指す。

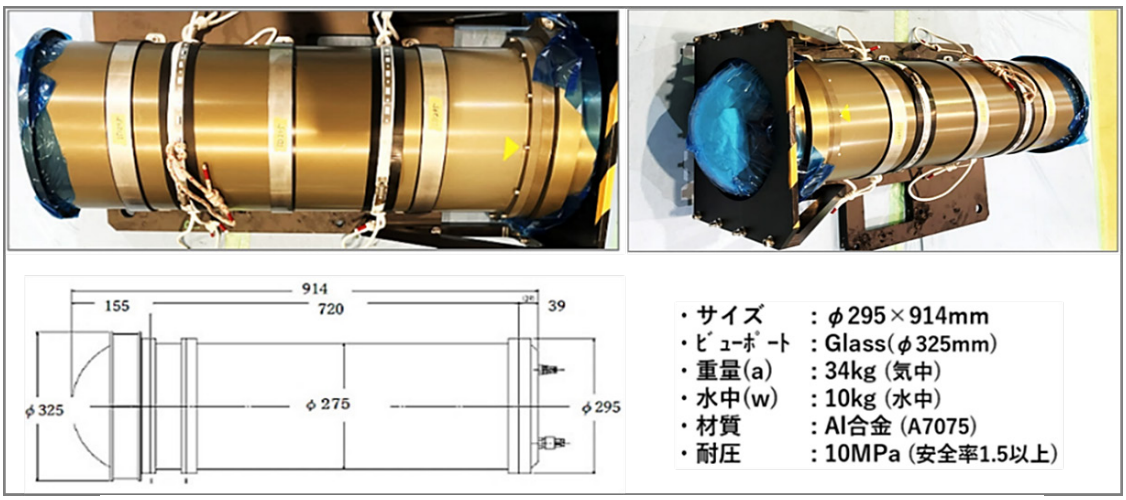


図 3-(1)-A-⑤-1　耐圧容器（Green レーザー実証機）

[(1)-A｜実施内容⑤｜Greenレーザー実証機の深海仕様構築および実環境試験]

＜概要＞

深海試験用耐圧容器を設計・製作し、実証機システム（伝搬時間｜Greenレーザー実証機）へ組込みを実施した。水槽試験に加え、浅海試験、深海試験を含む実環境試験を実施し、Greenレーザー実証機の性能評価に要する各基礎データを取得すると共に、実海域にて最大計測距離の評価を実施した（水槽:30m｜浅海域:27m｜深海域:33m）。併せて、海底可視化画像の水平最大分解能が8000画素以上（最終目標）を満足していることを確認した。当該評価結果から得られた知見・データを整理し、顕在化した課題を抽出・分析することで、課題解決に向けたGreenレーザー実証機の性能向上に取り組み、改良方針を策定した。

(a)深海試験用耐圧容器の設計・製作（Greenレーザー実証機）

深海試験にて使用するGreenレーザー実証機用の耐圧容器(耐圧性能:10MPa≒1,000m水深相当圧｜安全率1.5以上）を製作した。製作したGreenレーザー実証機用耐圧容器の外観・仕様を図3-(1)-A-⑤-1に示す。全長914mm（ビューポート含む）、胴部径φ275mm、ビューポート径φ325mmであり、海中探査機に搭載する耐圧容器サイズとしては大型である。海水との光学インタフェースとなるビューポートは、当該実証機の光学系（光路・光軸・光開口等）および内部機器配置の最適化を考慮し新たに開発している。海中探査機への搭載を鑑み、内機（内部構成品）を実装した状態において形状・サイズ・重量が、対象とする海中探査機のペイロード仕様を満足することを前提として設計している。

図 3-(1)-A-⑤-2
試験海域・石垣島周辺海域
（Green レーザー実証機｜浅海試験）

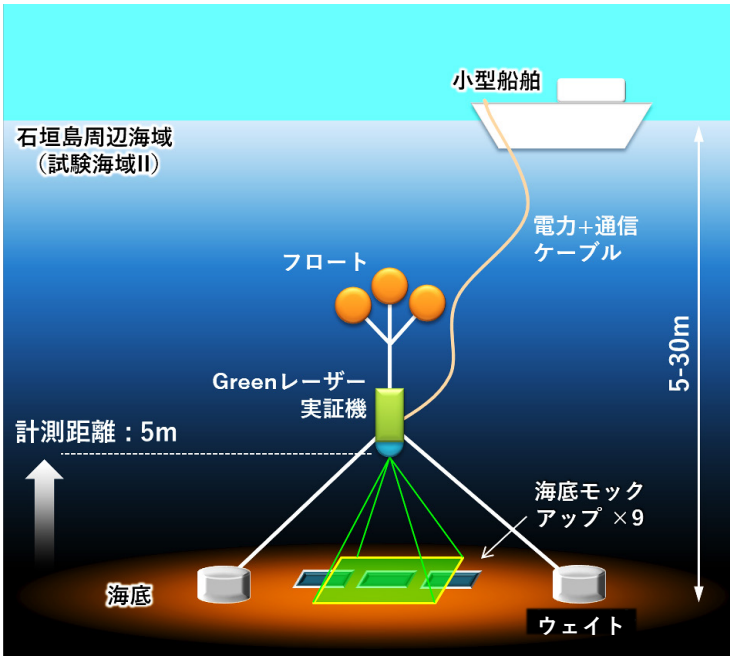


図 3-(1)-A-⑤-3
計測系コンフィギュレーション｜浅海試験
（Green レーザー実証機｜海底モックアップ計測）

(b)浅海試験（Greenレーザー実証機｜海底モックアップ計測｜令和5年5月｜石垣島周辺海域）

Greenレーザー実証機の基本性能を確認することを目的として、海底設置した既知物材（海底モックアップ）を計測した。試験海域は、本研究課題を含めレーザー計測機器のフィールド試験で実績のある石垣島周辺海域を選定した。図3-(1)-A-⑤-2に試験海域を示す。海底モックアップに対するレーザー反射データを取得する目的は、機械学習による物性推定アルゴリズム構築(学習データの取得)のためでもある。当該アルゴリズムの詳細については「3.(3)-A」に記載する。浅海試験では、Greenレーザー実証機を構成するハードウエア（内部・外部光学系を含む統合化システム）に対する基本性能を評価する指標として、当該海底モックアップの計測を実施した。本計測は海底面が比較的平坦かつ透明度の高い試験海域IIにて実施した。フロートとウェイトを用いることで、Greenレーザー実証機を鉛直下向き（海底に向けレーザー照射する向き）に設置し、海底からの高度（計測距離）約5mを保持させた。レーザー照射範囲となる海底面上に海底モックアップ（×9種）を並べて配置した。図3-(1)-A-⑤-3に本計測系のコンフィギュレーションを示す。併せて、図3-(1)-A-⑤-4、図3-(1)-A-⑤-5に海底モックアップの外観および海底設置状態をそれぞれ示す。本計測は2Dスキャンモード(ラインレーザー＋スウィープ動作)にて実施しており、Greenレーザー実証機が固定された状態においても、海底モックアップ全体を包括するようにレーザー光が照射される。

海底モックアップ計測結果の一例として各海底モックアップの強度画像を図3-(1)-A-⑤-6に示す。強度画像は、距離減衰補正を施した各レーザー光の反射強度を2D描画した画像となる。当該例示では、計測距離5mにおけるレーザー反射強度の測定結果となり、各海底モックアップを含む可視化画像のコントラストが後記「(d)水槽試験」と比較して弱くなっている（計測した各反射強度の差異が小さい）。これは、環境光（太陽光）の反射をGreenレーザー実証機が計測してしまうことの影響が大きいと考えられる。太陽光は全波長成分の光電磁波を含み、エネルギー（光量）も膨大であることから、浅海域の海底に到達し、その反射光をもたらす。Greenレーザー実証機では、Blue-Green波長域に感度を有する光検出器を採用しているため、当該実証機が照射したGreenレーザーに加え、同波長成分を含む太陽光反射を捉えてしまう。これにより、ターゲット（海底モックアップ）に対する反射強度の差異を正確に捉えることが困難となったことが想定される。深海域においては、太陽光のような外乱光は存在しないため、各海底モックアップの形状あるいは内容物の特徴がより明確に表現されている可能性は高い。これら海底モックアップ計測にて得られた計測データは、物性推定アルゴリズムの構築・性能向上検討においても使用される。

図 3-(1)-A-⑤-4
海底モックアップ外観
（海底モックアップ計測では MK01-09 を使用）

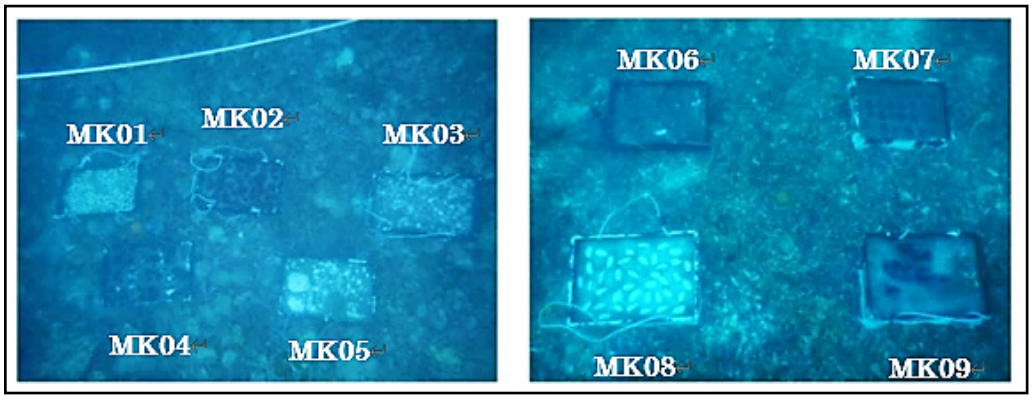


図 3-(1)-A-⑤-5　海底モックアップ｜海底設置状態

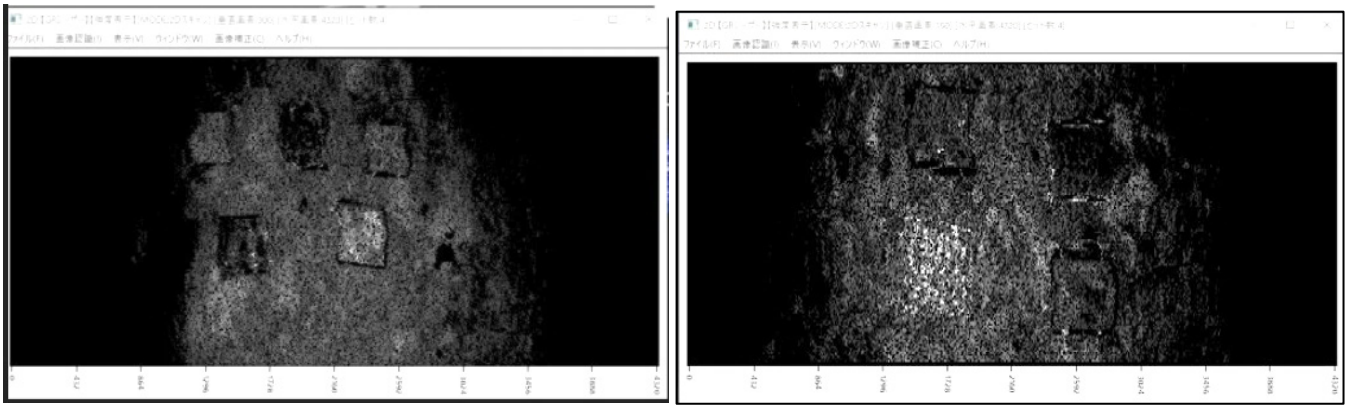


図 3-(1)-A-⑤-6 浅海試験結果｜例示｜2D 強度画像｜海底モックアップ（(左)MK01-05　(右)MK06-09）

(c)浅海試験（Greenレーザー実証機｜最大計測距離評価｜令和5年5月｜石垣島周辺海域）

Greenレーザー実証機の最大計測距離を把握することを目的として、浅海域における海底計測を実施した。当該計測では、小型船舶の舷側にGreenレーザー実証機を固定設置し、小型船舶が航走することで海底計測を実施する。図3-(1)-A-⑤-7に本計測系のコンフィギュレーションを示す。Greenレーザー実証機を鉛直下向きに設置した状態で、水深15m～30mの試験海域を低速・定速にて航走しつつレーザー光を海底に照射した。この際の海底反射を検出するとともにTOF(Time Of Flight)測距を実施することで、当該実証機の浅海域における最大計測距離を計測した。

最大探知距離の計測結果を図3-(1)-A-⑤-8に示す。図中各白丸で囲われた距離範囲のカラースケールにおいてピンク色のエリアは、鉛直下方向距離において約25mとなる計測結果を示す。実際には、Greenレーザー実証機から最大120度の視野角において、各レーザー光は角度を持たせて照射されており、当該25m地点のレーザー照射角度は24degとなる。そのため、

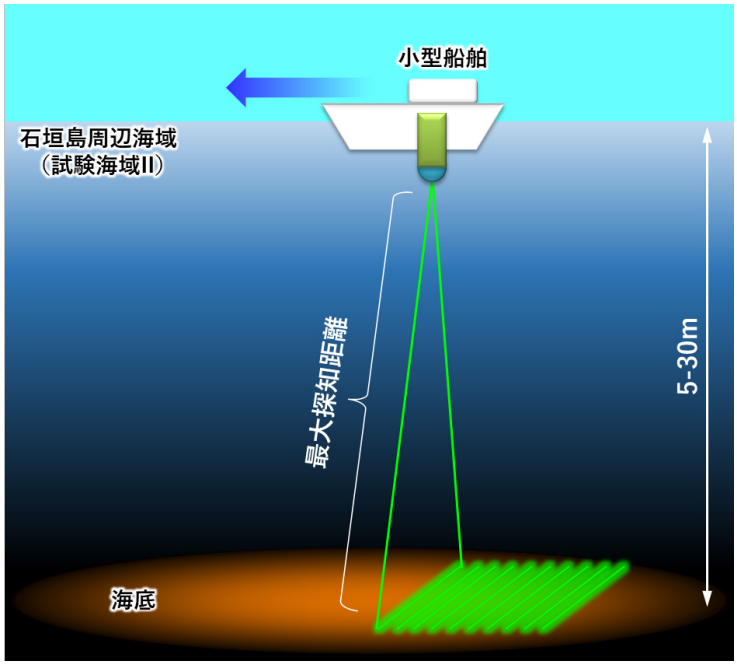


図 3-(1)-A-⑤-7
計測系コンフィギュレーション｜浅海試験
（Green レーザー実証機｜最大計測距離評価）

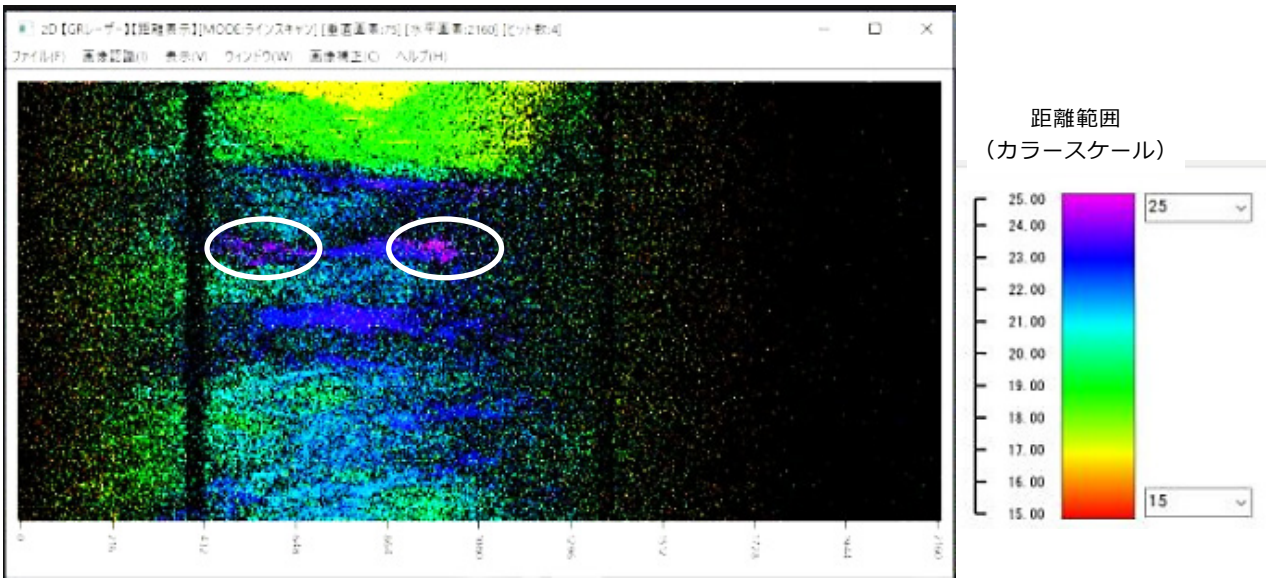


図 3-(1)-A-⑤-8 浅海試験結果｜例示｜2D 距離画像｜距離範囲カラー描画
（Green レーザー実証機｜最大計測距離評価）

実際のレーザー測距値（最大計測距離）は27m（≒25m×1/cos(24deg)）が試算される。ここで、石垣島周辺海域におけるレーザー測距現行機(三菱電機ﾃﾞｨﾌｪﾝｽ&ｽﾍﾟｰｽﾃｸﾉﾛｼﾞｰｽﾞ製「U4LE」)の過去実績は、最大計測距離20m（晴天）である。また「U4LE」と姉妹機で同等性能を有する海洋研究開発機構（以降、JAMSTEC）が所有する海中3Dレーザースキャナー（U3DLS）の過去実績は、2015年大室ダシ/大室海穴（水深約200m）において計測した35mである。

●現行機（U4LE）　｜最大探知距離 ：20m｜浅海域（石垣島周辺海域）
●現行機（U3DLS）　｜最大探知距離 ：35m｜深海域（大室ダシ/大室海穴）

Greenレーザー実証機は、当該過去実績（基礎データ）を基盤とし、最大計測距離60mを仕様性能として回線設計を行っている。上記の通り、Greenレーザー実証機を使用した石垣島周辺海域での最大計測距離27m（曇天）の結果は、深海環境ならば現況性能においても40-50m程度の最大計測距離が期待される。同海域の過去実績における計測環境（海水濁度/気象・天候/季節）も異なり、一概にレーザー測距現行機の実績からGreenレーザー実証機の現況性能を

比較は出来ないが、深海環境下における最大計測距離を下記のように試算する。

●伝搬損失(深海)　　：0.3dB/m（過去実績より｜設計条件）
●最大計測距離(深海)　：47.3m（≒35m/20m×27m）｜期待値

●不足感度　　：9.7dB（≒{60-47.3)×2×0.3dB/m＋20log(60/47.3)[※7]}）
●性能改善(目標値)　：32dB以上（現行機比較）
●性能改善(設計値)　：38.5dB（現行機比較）
●性能改善(現況値|推定)：28.8dB（≒38.5-9.7）

※7：拡散損失：20log(60/47.3)

本計測結果より、現況性能における深海域での最大計測距離を約47mと試算すると、最終目標（最大計測距離：60m）の実現には、更なる改善を要する。当初回線設計では、レーザー測距現行機の性能と比較して32dB以上の改善を目標としており、これに対し現況性能では9.7dBの感度不足が試算される。Greenレーザー実証機を用いて、深海域にて60mの最大計測距離を満足させるためには、現行機比32dB以上の性能改善が求められ、開発時における設計値では38.5dBと要求仕様（32dB）を上回る送受光系を構築した。一方、本計測結果より、性能改善に要する設計値が実現されていないことが推定される。そこで当該実証機の電気・電子・光学系を含む全体システムについて調査をした結果、Greenレーザー実証機が有する実際のノイズレベルと当該設計値とに乖離があることが判明した。特に受光系ノイズレベルの影響が支配的でなることが分かっており、当該受信系ノイズの特性を把握するための評価試験を実施する。これにより、当該受信系ノイズレベルを抑制し、設計値を満足する性能向上（当該ノイズレベルを約1/3以下まで抑制）に取り組む。

(d)水槽試験1（Greenレーザー実証機｜海底モックアップ計測｜令和5年6月｜多目的水槽）

前記「(b)浅海試験」による海底モックアップ計測の結果より、太陽光の影響と考えられる2D強度画像にコントラストの低下が確認された。そこで、太陽光の影響が少ないJAMSTEC所有の多目的水槽(屋内水槽)において海底モックアップ計測を実施した。併せて、当該水槽において最大探知距離計測の評価を実施した。本試験により、浅海試験における太陽光の影響を把握するとともに、水槽環境におけるGreenレーザー実証機の基本性能を確認する。図3-(1)-A-⑤-9に多目的水槽を示す。併せて、図3-(1)-A-⑤-10に本計測系のコンフィギュレーション

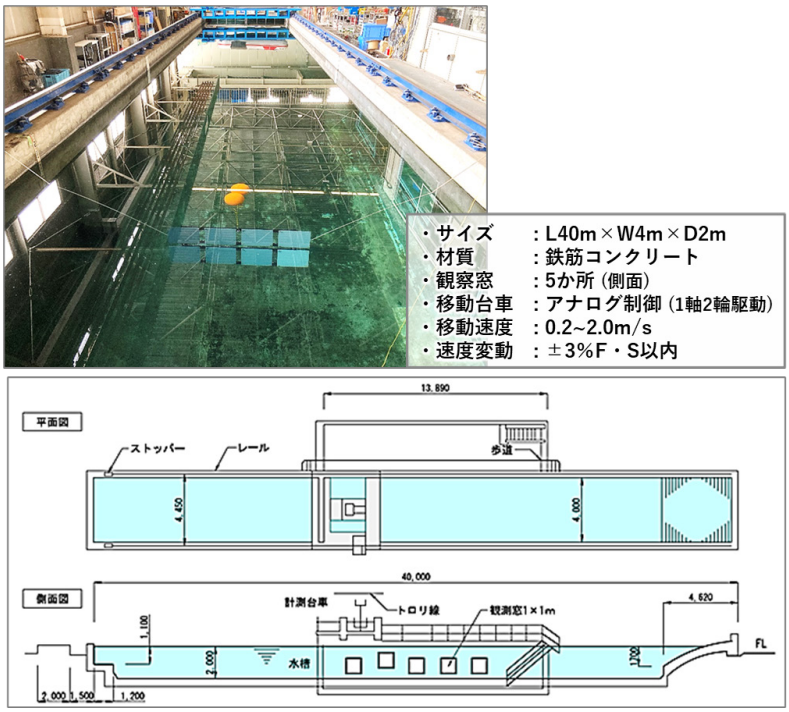


図 3-(1)-A-⑤-9
試験環境｜水槽試験｜多目的水槽
（JAMSTEC 所有屋内水槽）

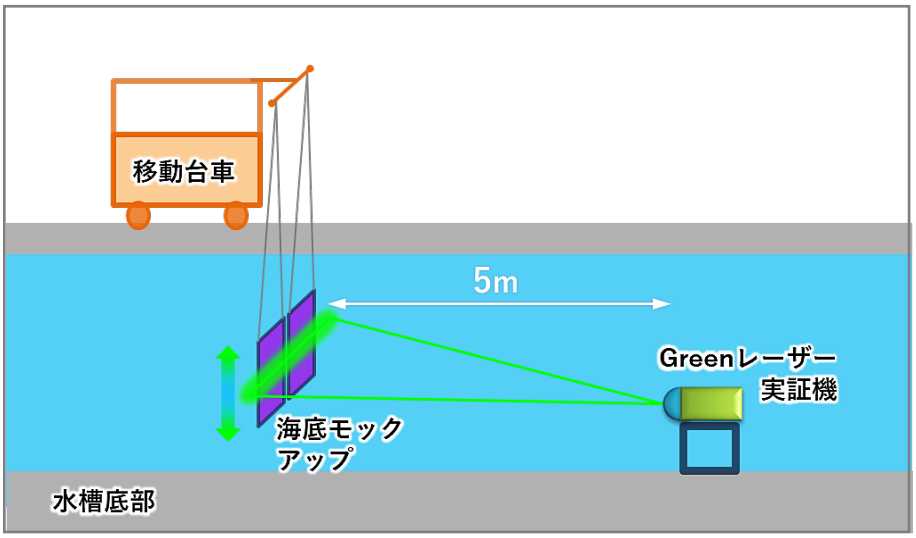


図 3-(1)-A-⑤-10　計測系コンフィギュレーション｜水槽試験 1｜Green レーザー実証機｜海底ﾓｯｸｱｯﾌﾟ計測

を示す。前記「(b)浅海試験」による海底モックアップ計測結果と比較・評価するため、多目的水槽内に各海底モックアップを設置し、当該浅海試験と同様の計測距離（5m）にてGreenレーザー実証機を用いて計測した。多目的水槽は太陽光が些少入る環境ではあるが、浅海試験と比較するとその影響は大幅に軽減される条件となる。海底モックアップの計測面が垂直となるように移動台車から吊下げた状態にて索固定し、当該海底モックアップと相対する位置にGreenレーザー実証機を設置した。1度の計測において海底モックアップは最大2個配置され、Greenレーザー実証機との距離（計測距離）は5mである。移動台車、Greenレーザー実証機ともに固定（静止状態）されており、両機材の相対位置・姿勢は浅海試験時と凡そ同様となる。併せて、本件計測で浅海試験時と同様に2Dスキャンモード（ラインレーザー＋スウィープ動作）にて実施しており、Greenレーザー実証機が固定された状態においても、海底モックアップ全体を包括するようにレーザー光が照射される。

海底モックアップ計測の結果を図3-(1)-A-⑤-11に例示する(海底モックアップMK07/MK04)。図中の海底モックアップを含め、各海底モックアップに対する可視化画像のコントラストが相対的に向上しており、海底モックアップの形状や内容物が判定できる品質が確認された。本結果より、浅海試験における可視化画像のコントラスト劣化は、太陽光の影響（光検出器

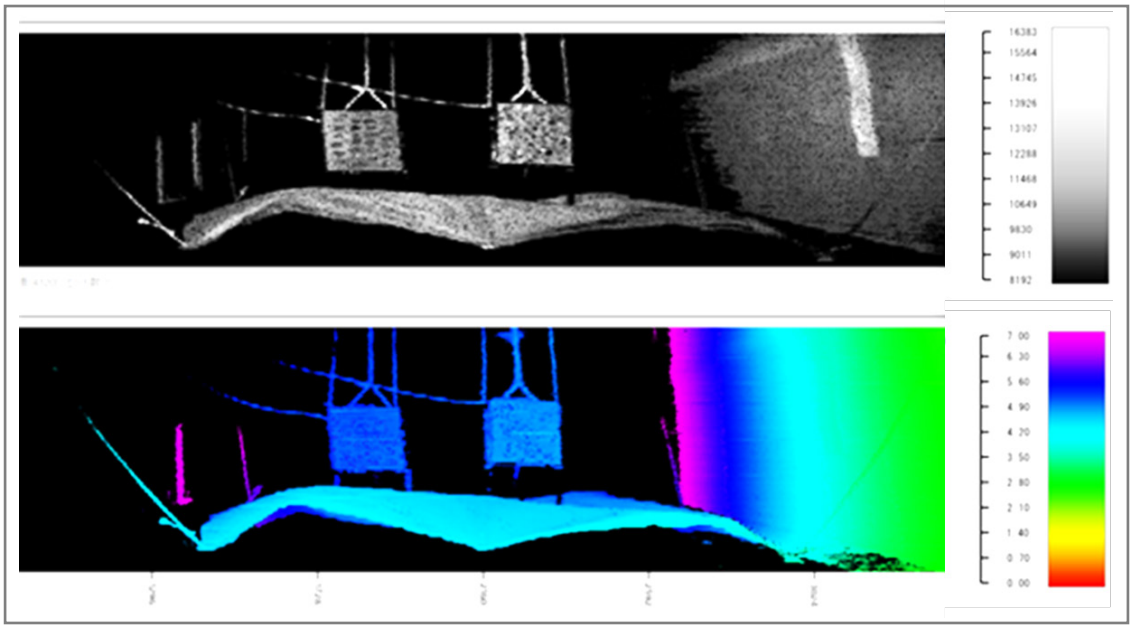


図 3-(1)-A-⑤-11 水槽試験 1｜試験結果｜例示｜強度画像(上)・距離画像(下)｜
海底モックアップ（(左)MK07　(右)MK04）

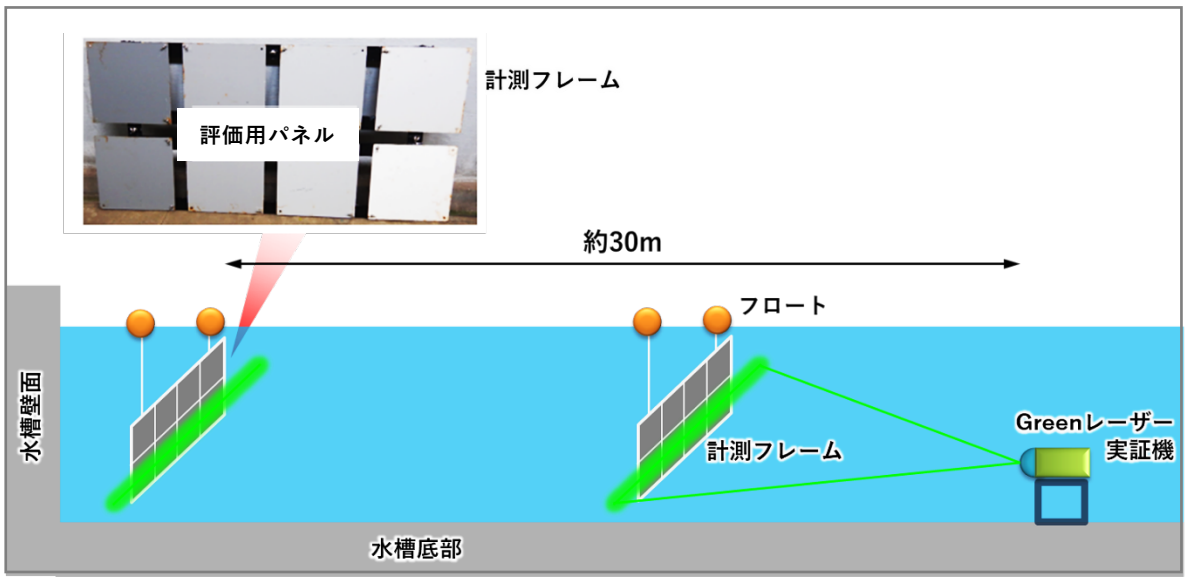


図 3-(1)-A-⑤-12 計測系コンフィギュレーション｜水槽試験 2｜Green レーザー実証機｜最大計測距離評価

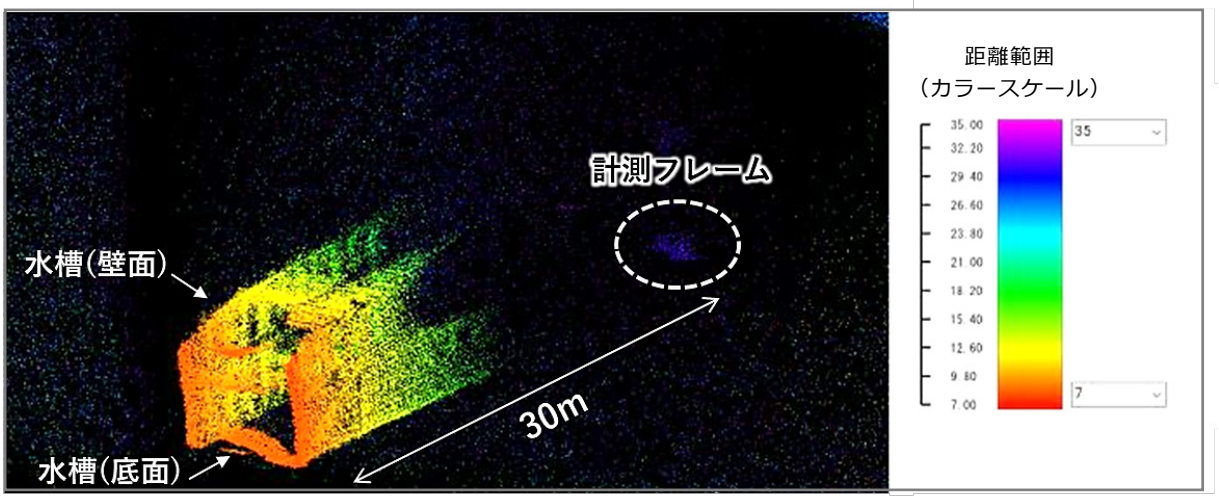


図 3-(1)-A-⑤-13 水槽試験結果｜3D 強度画像／距離範囲カラー描画（Green レーザー実証機｜最大探知距離計測）

の検出感度近傍の波長光が入力されること）である可能性が示唆された。屋内水槽を適用した水槽試験においては、太陽光反射の総量が低下したことにより、可視化性能が向上したと考えられる。これにより本事象については、深海試験時においては影響ないと想定される。

(e)水槽試験2（Greenレーザー実証機｜最大計測距離評価｜令和5年6月｜多目的水槽）

評価用パネル(グレースケール×8)が取付けられる計測フレームを計測対象として、多目的水槽内に設置した。Greenレーザー実証機から計測フレームまでの距離を段階的に離しながら、最大探知距離計測の評価を行った。図3-(1)-A-⑤-12に本計測系のコンフィギュレーションを示す。

最大計測距離評価の結果、本計測系においてGreenレーザー実証機から最大30m遠方に設置した計測フレームの反射光を検出していることが確認された（図3-(1)-A-⑤-13）。過去の研究結果・計測結果等から、水槽用水を含む一般的な水道水の伝搬損失は凡そ0.6dB/m程度と想定している。一方、深海域にて60mの最大探知距離を実現するため、Greenレーザー実証機は海水の伝搬損失を0.3dB/mとして設計されている。仮に伝搬損失が0.3dB/mの時、30mの光学伝搬路における計測マージンは概算で18dB（＝(0.6－0.3)×30m×2(往復)）となり、当該マージンを距離換算すると、深海域では22mの距離延長が試算される。

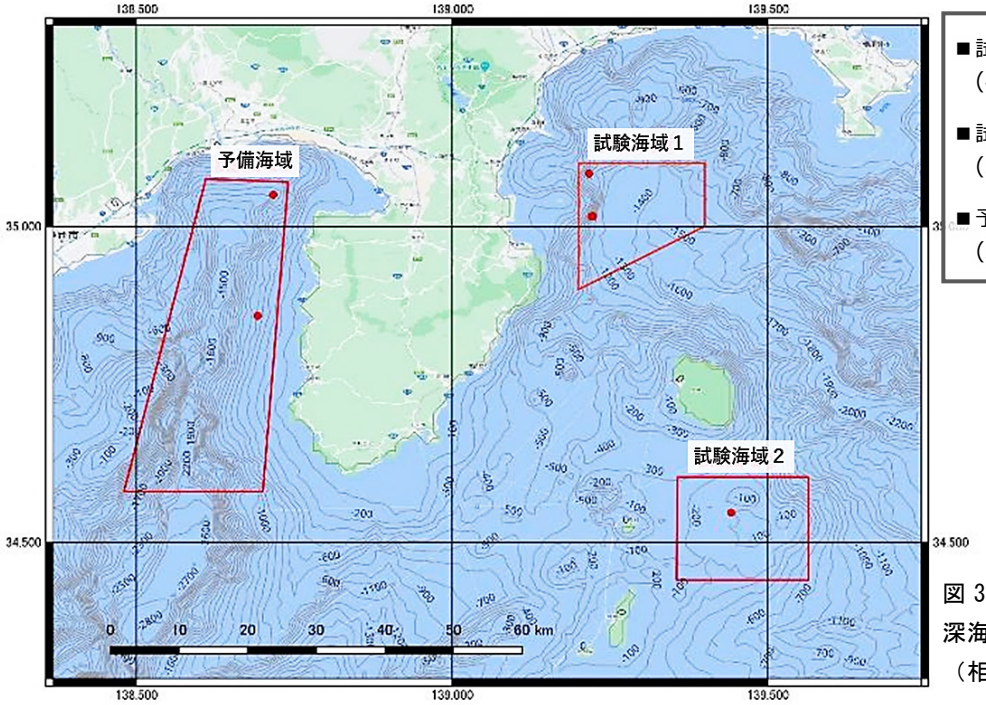


図 3-(1)-A-⑤-14
深海試験｜試験海域｜水深 800m 以深
（相模湾・初島東方ほか）

18dB＝延長距離×2(往復)×0.3dB＋20log｛(延長距離＋30m)/30m｝　∴ 延長距離＝22m

これにより、この本計測結果から期待されるGreenレーザー実証機の最大探知距離は52m（＝30m(実測分)＋22m(計測マージンの距離換算分)）となり、目標値(60m)に対し8m不足していることが試算される。当該不足分の探知距離を感度(dB)換算すると、約5dB(＝0.3×2×8＋20log（60/52））となる。前記「(c)浅海試験」における計測結果から試算した最大探知距離の期待値は約47m（約13m不足）であり、不足感度の試算は9.7dBであった。各試験における最大探知距離計測の結果を下記に整理する。

●最大探知距離(浅海試験)　：47.3m(期待値|深海域)　⇒ 不足感度 9.7dB
●最大探知距離(水槽試験)　：52m(期待値|深海域)　⇒ 不足感度 5dB

●期待値｜不足感度誤差　：5m｜4.7dB(＝9.7-5.0)

以上の通り、過去知見・実績を前提とした浅海試験および水槽試験における最大計測距離の各結果（試算）を比較すると、光の感度換算で6dB(＝2倍｜20log2倍)以内の誤差であり、両計測は同等の結果を示していると考える。

考えられる。これにより本事象については、深海試験時においては影響ないと想定される。

(f)深海試験〔R5年度〕(Greenレーザー実証機｜海底モックアップ計測｜令和6年2月｜相模湾他)

Greenレーザー実証機の深海域における基本性能の評価に要する基礎データを取得するとともに、前記水槽試験・浅海試験にて取得したデータと比較することにより、深海環境における課題の抽出を目的として深海試験を実施した。JAMSTECが所有する海中探査機「かいこうmk-IV」（以降、「かいこう」）にGreenレーザー実証機を搭載し、支援母船としてJAMSTECが所有する「新青丸」を用いて、相模湾・初島東方の800m以深の海域においてレーザー計測を実施した。本試験はGreenレーザー実証機を海中探査機に搭載し深海域で計測する初試験となる。本試験において、Greenレーザー実証機の深海域における最大計測距離（最終目標｜60m）の評価、最大水平分解能（目標｜8000画素以上）の評価、および物性推定アルゴリズム構築に要する学習データ取得（海底モックアップ計測）を実施する。

深海試験のおける試験海域を図3-(1)-A-⑤-14に示す。試験海域は、相模湾・初島東方の水

図 3-(1)-A-⑤-15　深海試験｜「かいこう」試験装備（Green レーザー実証機｜海底モックアップ計測）

深8000-900mのエリアを試験海域1とし、大島南方の大室ダシ・大室海穴周辺のエリアを試験海域2、および両海域の予備海域として駿河湾の水深1,000m以浅のエリアを選定した。試験海域はいずれも、陸域からのアクセスが容易な近海域を選定しており、船舶運用費を含む試験コストを勘案している。試験海域1は、複数種類の底生生物が群生で棲息している地点が点在しており、海底質も大小の岩石帯や軟泥帯があるため、比較的多様な深海底の計測が期待される。試験海域2は、水深約200mの大室海穴（海穴高：約100m）内部であり、小規模な熱水域やチムニーが点在し、他の周辺海域と比較して海水中の有機・無期懸濁物の種類・総量が異なる。予備海域は、試験海域1、試験海域2が気象・海象を含む何かしらの事由により潜航が困難となった場合のバックアップとなる海域である。伊豆半島を挟んで相模湾周辺と駿河湾周辺では、気象・海象が異なる場合があり、特に駿河湾内は比較的に海象が安定していることもあり、また陸域から深海域まで距離が短いため、船舶運用の利便性が高い。

物性推定アルゴリズム構築に要する学習データ取得を目的として、海底モックアップ計測を実施した。「かいこう」の左舷後部にGreenレーザー実証機を搭載し、海底モックアップを「かいこう」前部装備のサンプルバスケット内部の設置する治具（収納ラックフレーム）に収納した。図3-(1)-A-⑤-15にGreenレーザー実証機および海底モックアップを実装した「かいこう」外観を示す。海底モックアップは、軟泥や傾斜地等を含む様々な底質・地形の海底に設置すること考え、金属製の特殊なケース（格納ケース）に格納しており、「かいこう」装備のマニピュレータを用いて海底に設置する。収納ラックフレームに収納する格納ケースのサイズ・形状を鑑み、1潜航につき3器とした（1度に収納ラックフレームに収納可能な格納ケースを3器とした）。収納ラックフレーム、格納ケースについては、「3.(3)-B」にて示す。本計測では、「かいこう」を海底モックアップの上方約5mの高度を保持し、縦方向30deg、横方向120degのスキャン範囲にてレーザー光を照射することで海底に設置されてある海底モックアップを計測した。この際、海底モックアップ設置場近傍の海流の影響、テザーケーブルからの張力の影響等もあり、「かいこう」の位置/姿勢を適宜制御（補正）しながら計測を実施した（計測中、「かいこう」位置/姿勢は完全に定保持はされていない）。図3-(1)-A-⑤-16に本計測系のコンフィギュレーションを示す。

海底モックアップ計測の結果を図3-(1)-A-⑤-17に例示する。本計測において取得された強度画像のコントラストは非常に低く、各海底モックアップの特徴を明確に可視化するに至っ

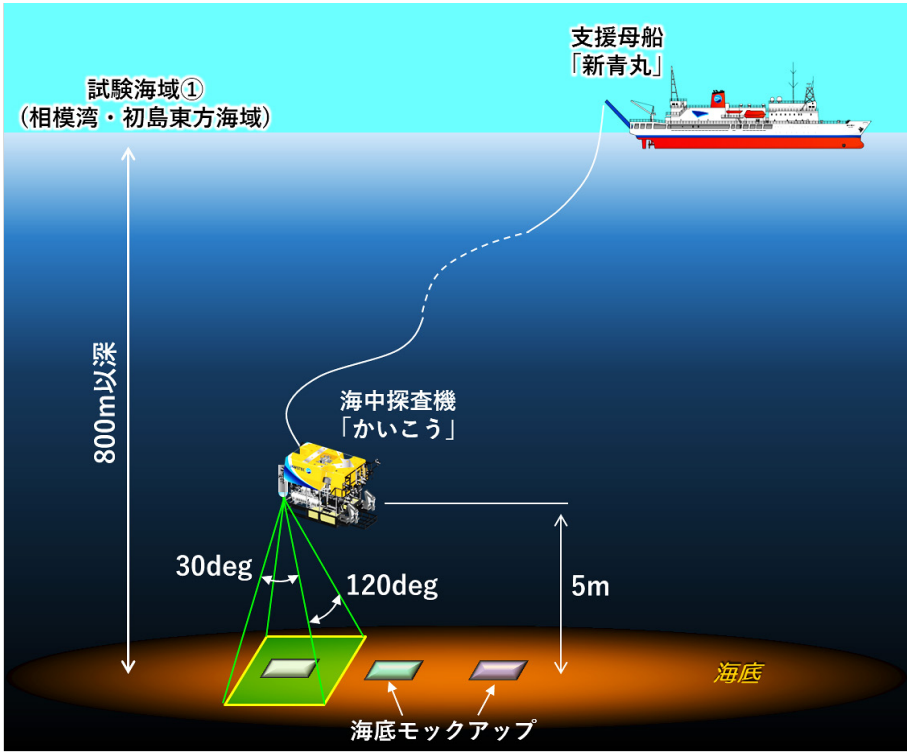


図 3-(1)-A-⑤-16　計測系コンフィギュレーション｜深海試験〔R5 年度〕
（Green レーザー実証機｜海底モックアップ計測）

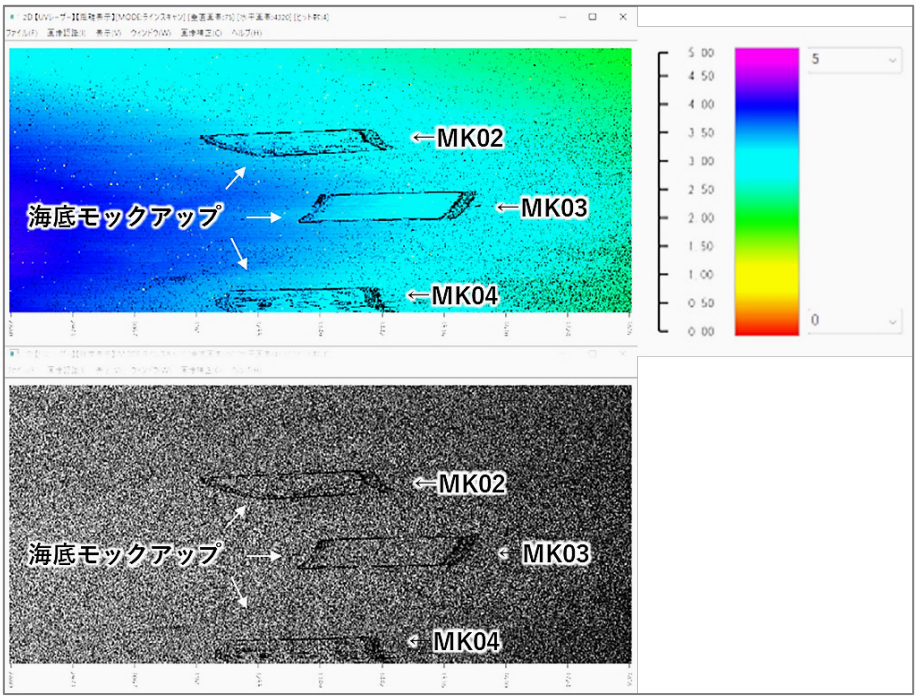


図 3-(1)-A-⑤-17　深海試験〔R5 年度〕｜試験結果｜例示｜2D 距離画像（上）2D 強度画像（下）
（Green レーザー実証機｜海底モックアップ計測｜MK02-04）

ていない。各海底モックアップの形状・物性に応じた反射強度の差異を正確に捉えることが困難であったため、可視化画像の品質が劣化したことを意味する。当該結果は計測距離の遠近を変化させても、顕著な改善傾向は確認出来なった。これは、当該海域・深度域の海水の状態が、光伝搬場として不適であったことが推定される。深海試験の期間中、試験海域となる相模湾・初島東方海域の海象は終始悪く、そのため潜航回数は大幅に削減された。本計測の実施日においても、現場海水の透明度が低かった（濁度が高かった）と推測する。併せて、計測

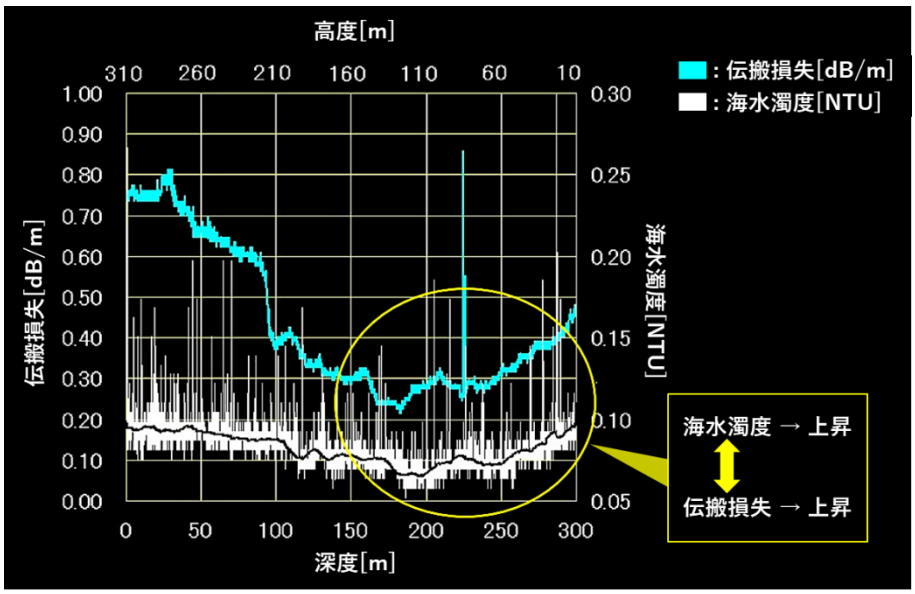


図 3-(1)-A-⑤-18
伝搬損失－海水濁度｜過去計測実績｜相模湾・初島周辺海域｜水深 300m
（2010 年｜平成 22 年度海洋理工学会春季大会にて発表）

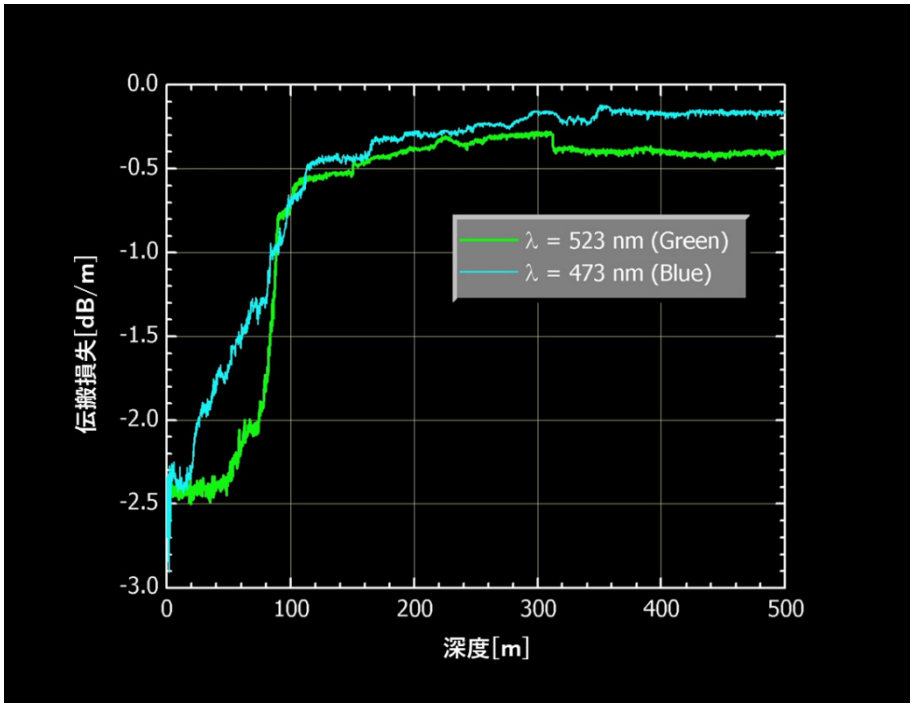


図 3-(1)-A-⑤-19
伝搬損失－深度｜過去計測実績｜相模湾・初島周辺海域｜水深 500m
（2011 年｜The 10th SEGJ International Symposium にて発表）

現場の海流がごく緩やかであったことにより、海底モックアップ設置時を含めた海底泥の巻き上げ状態が解消されず、海底近傍の濁度を更に悪化させたことが原因と考える。

(g)深海試験〔R5年度〕（Greenレーザー実証機｜最大計測距離評価｜令和6年2月｜相模湾他）

深海域における最大計測距離60mの実現を目標として、Greenレーザー実証機の現況性能を確認するため海底計測を実施した。JAMSTECと三菱電機ディフェンス＆スペースステクノロジーズ（以降、MEDS）は、本深海試験の試験海域と同エリアとなる初島周辺海域（水深:約300m）にて、レーザー光（波長：532nm）の海中伝搬損失と海水濁度を計測した実績を有する。図3-(1)-A-⑤-18に当該計測結果を示す。これより分かるように、海水濁度とレーザー光の伝搬損失は強い相関を有しており、濁度が上昇するに伴い伝搬損失も上昇する。当該計測結果を基盤として、最大計測距離60mに対する伝搬損失の条件を0.3dB/m以下（NTU換算｜0.1以下）と設定している。本深海試験は水深800m以深の深度域において実施しており、200m以深を前提として大水深になるほど伝搬損失は軽減される傾向にある。図3-(1)-A-⑤-19に同海域において500m深度までにおける伝搬損失を計測した結果を示す。太陽光の到達が想定される100m以

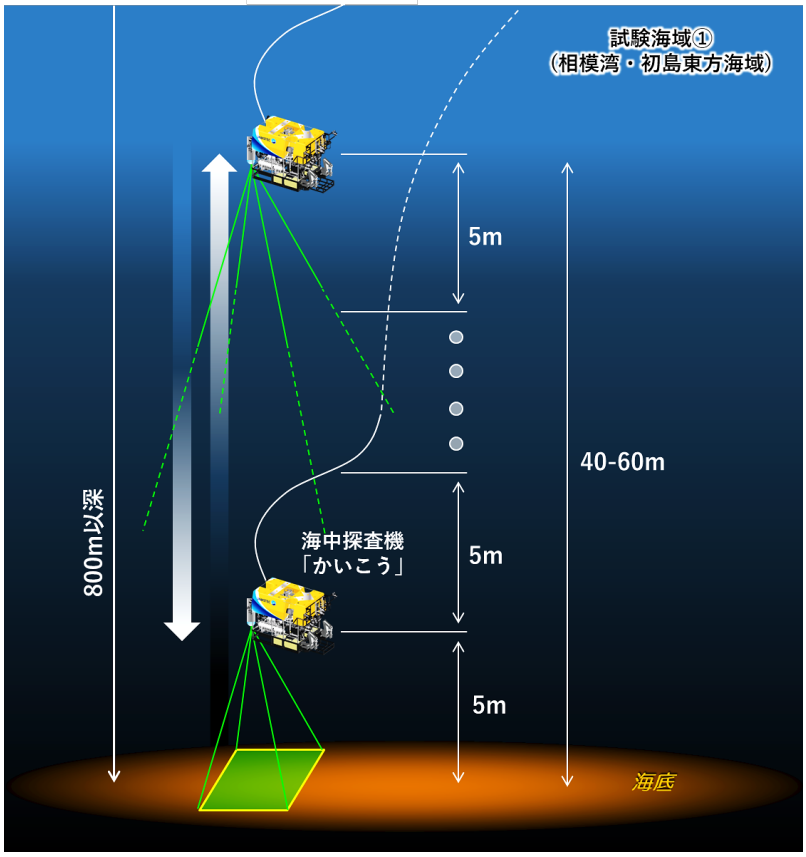


図 3-(1)-A-⑤-20
計測系コンフィギュレーション｜深海試験
〔R5 年度〕
(Green レーザー実証機｜最大探知距離計測系)

浅では、有機懸濁物（植物プランクトン・動物プランクトン）の総量が多いため伝搬損失が大きい。一方、100m以深において伝搬損失は著しく軽減され、太陽光の到達が困難とされる200m以深では0.3dB/m前後の低い水準で落ち着く。以上の両計測結果において、深度が進むにつれ伝搬損失は軽減される傾向がある一方、海底が近づくと海底泥が巻き上がることが想定され、これにより海底付近では濁度が高くなる傾向も確認される。本研究では、海底資源探査技術に資することを前提として200m以深の深海域を実環境と想定しており、上記知見を踏まえ、最大探計測離60mに対する深海域における伝搬損失の代表値を0.3dB/mとして、Greenレーザー実証機を設計している。

「かいこう」の高度を、海底より5m程度を最低高度とし、約5m程度の間隔にて段階的に上昇・下降を繰返し実施した。海底までの直下高度40-60mを最大として、現況性能における探知距離の確認を実施した。Greenレーザー実証機は水平方向120度の角度をもってレーザー照射するため、理想的なレーザー伝搬を検出した場合、直下高度30mにおいて最端方向のレーザー伝搬長（計測長）が60mとなる。一方、通常は直下方向からのレーザー反射強度が最も大きいため、直下高度60ｍにおける海底反射の計測も実施した。図3-(1)-A-⑤-20に本計測系のコンフィギュレーションを示す。

前記「(c)浅海試験」および「(e)水槽試験」における計測結果から試算した深海域での最大計測距離の期待値は、47.3m～52mであった。しかし、本計測系（深海試験）にて確認された最大計測距離は約33mとなり、当該期待値を大きく下回る結果となった(図3-(1)-A-⑤-21)。これは、前記「(f)深海試験〔R5年度〕｜海底モックアップ計測」の場合と同様に、深海試験期間中の当該海域・深度域の海水状態が悪く（濁度が高く）、光伝搬場として不適であったと推定される。先に言及した通り、伝搬損失と海水濁度は強い相関を有し、最大探知距離60mに対する伝搬損失条件（設計値）である0.3dB/m以下（NTU換算｜0.1以下）の環境が提供されてなく、レーザー光の伝搬距離減衰が想定以上であったことが考えられる。浅海試験、水槽試験および本計測系（深海試験）の各計測結果（最大計測距離）より、深海試験時の伝搬損失を試算した。

●最大探知距離(浅海試験) ：47m(期待値|深海域)からの試算

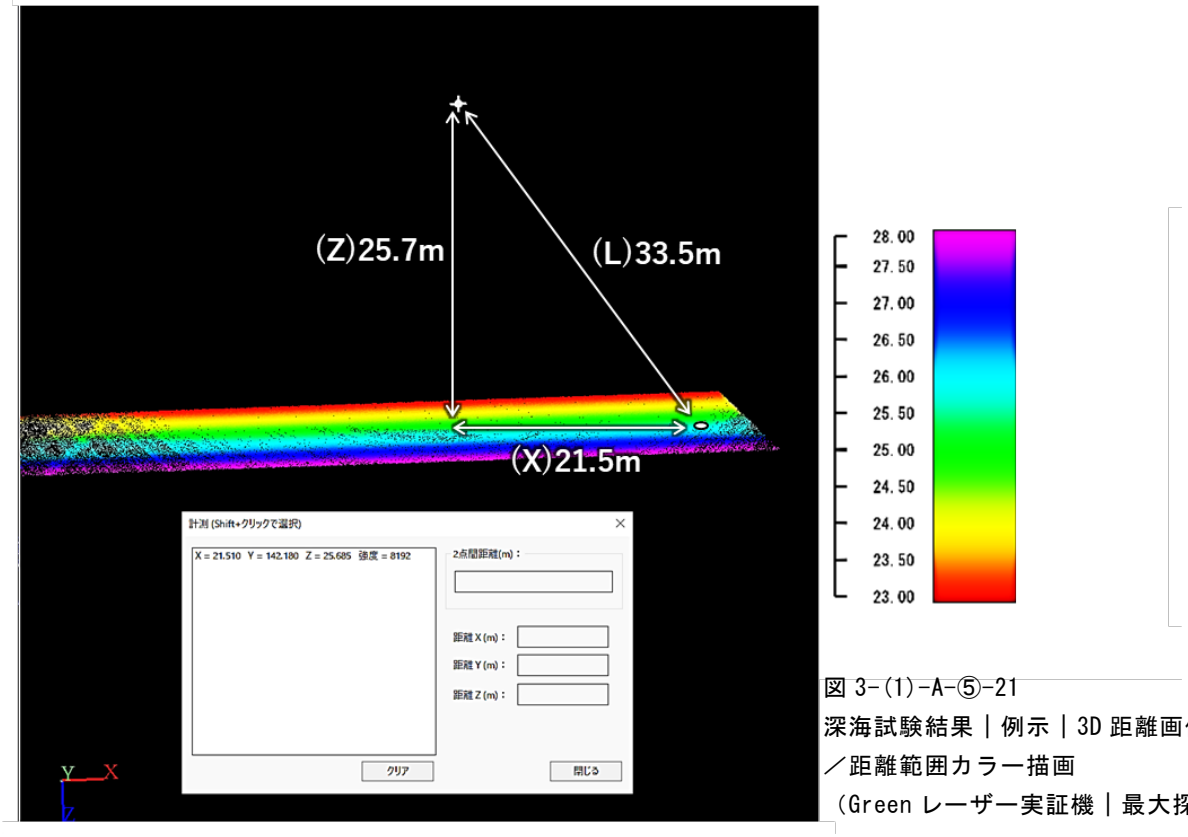


図 3-(1)-A-⑤-21
深海試験結果｜例示｜3D 距離画像
／距離範囲カラー描画
（Green レーザー実証機｜最大探知距離）

(47m)×2×0.3dB/m+20log(47m/33m)＝33m×2×αdB/m
∴α＝0.48dB/m

●最大探知距離(水槽試験) ：52m(期待値|深海域)からの試算
(52m)×2×0.3dB/m+20log(52m/33m)＝33m×2×αdB/m
∴α＝0.53dB/m

以上の試算より、Greenレーザー実証機を適用した深海試験における伝搬損失は、回線設計値である0.3dB/mを上回る0.48～0.53 dB/m（NTU換算｜約0.1）程度と想定される。

(h)深海試験〔R5年度〕(Greenレーザー実証機｜最大水平分解能計測｜令和6年2月｜相模湾他)

本研究課題における最終目標の1つである「三次元海底可視化画像の生成｜最大水平分解能：8000画素以上」について評価した。ここで最大水平分解能とは、水平方向におけるレーザー計測点数を意味し、Greenレーザー実証機ではポリゴンミラーの回転速度を厳密に制御することにより、当該計測点数が設定される。Greenレーザー実証機における最大計測点数は8,640点（設計値）となり、これは計測不能なく全てのレーザー計測が実現された場合、海底可視化画像の最大水平分解能は8,640画素となる。

図(1)-A-⑤-22は本深海試験において、Greenレーザー実証機の計測結果より生成された水深800m以深の海底可視化画像の例示である。同図上部に示す表は、水平方向に各レーザー計測した際のTOF測距値（任意の1ラインを構成するレーザー計測値｜距離データ）を示しており、表中の番号は生成された海底可視化画像の横方向画素数を意味する。当該画像では、1画素目の距離データ（3.34m）から始まり、8,294画素目の距離データ（0.84m）まで、全8,294点/ラインのレーザー計測に成功しており、これら計測点数の3次元座標点群により海底可視化画像が構成されている。これにより、当該画像の水平分解能が8,294画素であることが確認され、生成された三次元海底可視化画像が最終目標「最大水平分解能：8000画素以上」を満足していることが示された。

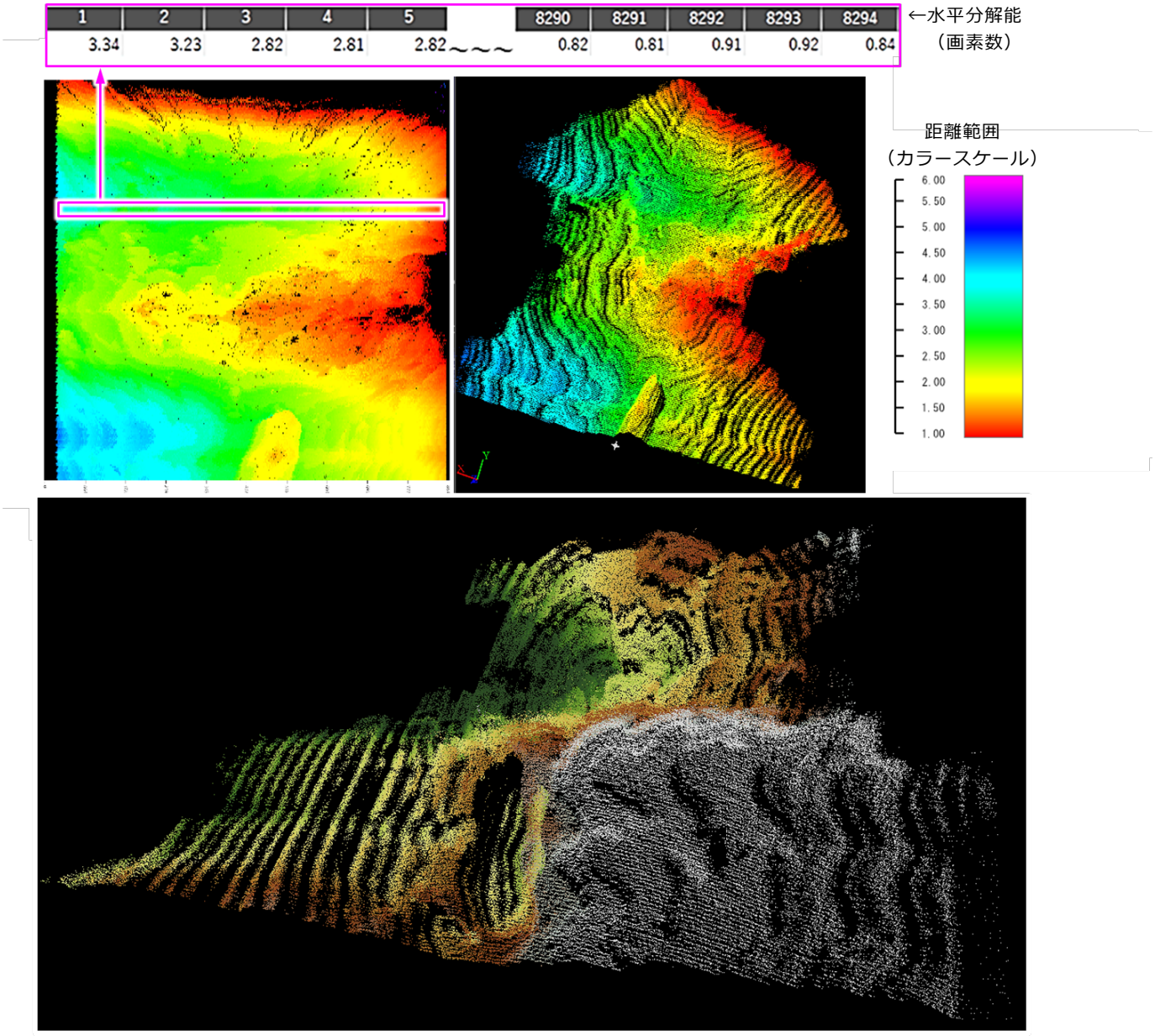


図 3-(1)-A-⑤-22 深海試験結果｜例示｜2D 距離画像(左上)　3D 距離画像(右上・下)
(Green レーザー実証機｜最大水平分解能計測)

(i)水槽試験2（Greenレーザー実証機｜海底モックアップ計測｜令和5年11月｜多目的水槽）

Greenレーザー実証機を使用して海底モックアップを計測し、「(3)-A｜物性推定アルゴリズムに構築」に要する学習データ、評価データを取得した。本試験は「(2)-A｜③水槽試験〔UVレーザー実証機〕」に後記するUVレーザー実証機と共抱きにて実施しており、両実証機を用いて海底モックアップを計測した。本項ではGreenレーザー実証機の計測結果のみを記載する（UVレーザー実証機の計測結果については「3.(2)-A｜④」を参照）。

海底モックアップを計測する目的は、物性推定アルゴリズムの構築・評価・調整（性能向上）に要する学習データ、評価データを取得することにある。基本的な試験構成、手順、計測対象（海底モックアップ）配置等は、「(d)水槽試験1｜令和5年6月｜多目的水槽）」と同様であるが、1度に海底モックアップ×3器を計測できるように水槽に横並びで設置し、Green実証機とUVレーザー実証機を水槽底面に並列配置することで同時計測を実施した。図(1)-A-23に本計測系のコンフィギュレーションを示す。各実証機と海底モックアップとの距離は「③-イ｜海底モックアップ計測(水槽1)」と同様に5mとし、2Dスキャンモードにて計測すること

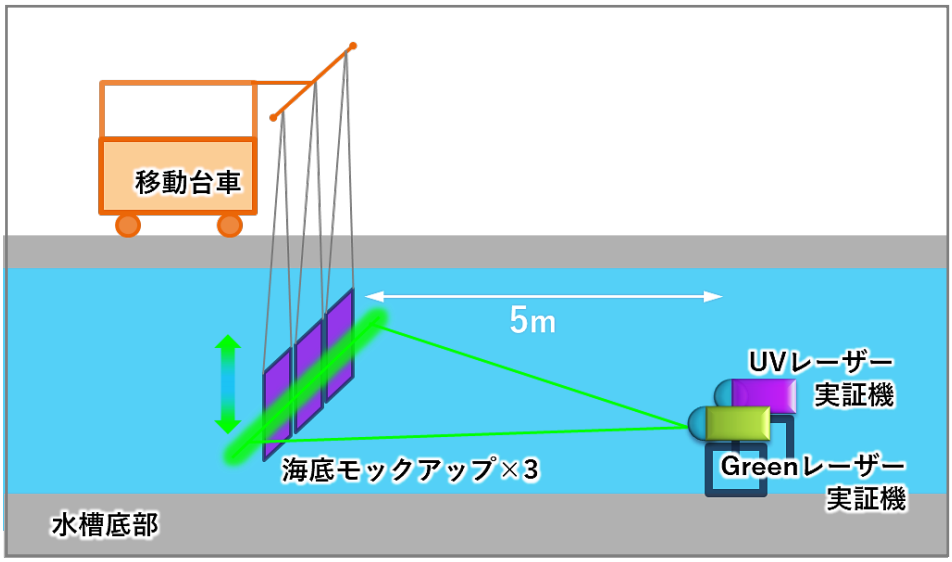


図 3-(1)-A-⑤-23　計測系コンフィギュレーション｜水槽試験 2｜多目的水槽
（Green レーザー実証機｜海底モックアップ計測）

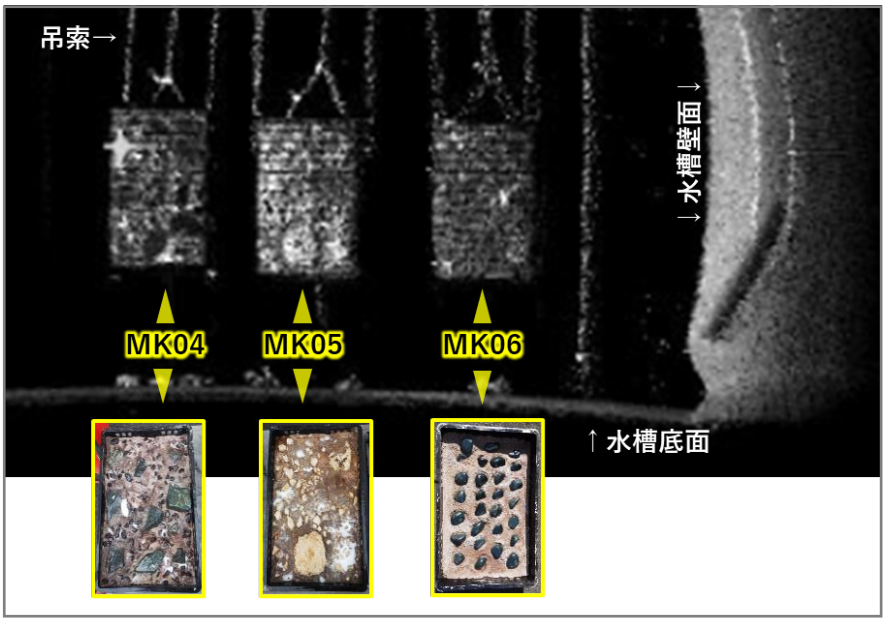


図 3-(1)-A-⑤-24
水槽試験 2｜試験結果｜例示｜2D 強度画像
（海底モックアップ｜MK04／MK05／MK06）

で、各海底モックアップ全体を包括するようにレーザー光が照射される。

海底モックアップ計測の結果を図3-(1)-A-⑤-24に例示する。Greenレーザー実証機の強度情報に関しては、機械学習に適用可能な良好なコントラストを有する強度画像が得られた。浅海試験と比較して太陽光の影響が軽減されるため、比較的に可視化画像の品質が向上する。外乱光のない深海域を模倣した学習データの取得には、海水環境とは異なるものの、水槽環境が浅海試験と比較して適していることがわかる。また、深海環境とは大きく異なるため、学習データの多様性を担保するためにも水槽試験における海底モックアップ計測は良い手段と考える。

[(1)-A｜実施内容⑥｜Greenレーザー実証機の性能改善および最終評価]

＜概要＞

これまで実施した深海試験の結果より、Greenレーザー実証機に関する課題を抽出・分析し、当該課題を解決することで性能改善を図り、「達成目標（終了時）」の実現を鑑みた最終評価を実施した。送受光系の総和として32dB以上の性能改善について、これまでに単体性能の向上は確認されており、新規開発の光検出器（光電子増倍管＋駆動電源）を適用するシステム連接

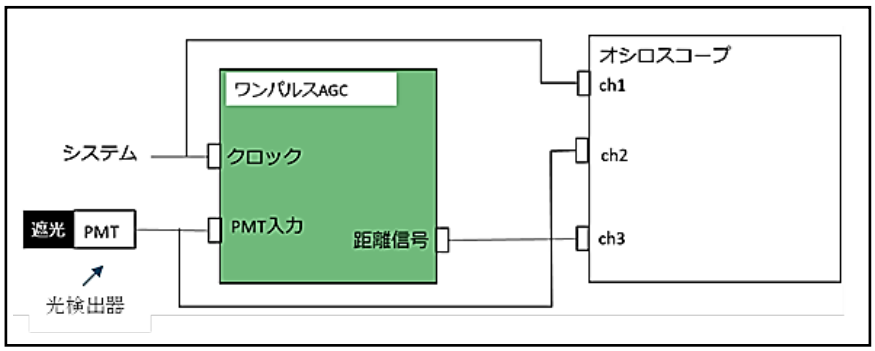


図 3-(1)-A-⑥-1
試験系接続図｜受光系連接試験
（光検出器－ワンパルス AGC 基板）

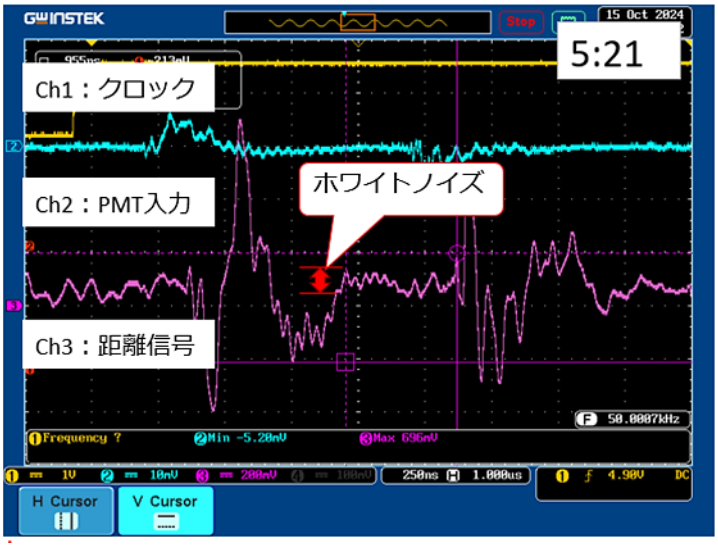


図 3-(1)-A-⑥-2
測定結果｜オシロスコープ｜例示｜受光系連接試験
（光検出器－ワンパルス AGC 基板）

試験を実施した。これにより、当該光検出器の高性能化により、後段のワンパルスAGCが飽和され、設計値に対して電圧概略10倍程度のノイズが生じていることを確認した。そこで、光検出器の性能を考慮したワンパルスAGC感度について調整し、当該ノイズレベルを設計仕様(設計値)と等価となるようにシステムの改善を実施した。その結果、海中探査機を適用する深海試験（深海環境）において、最大計測距離64m（往復伝搬距離：128m）を確認し、最終目標「最大約60m（往復伝搬120m）レンジを有するレーザー測距技術の実現」を達成した。

(a)光検出器を適用する受光系連接試験（光検出器-ワンパルスAGC基板ノイズ測定）

先に実施した水槽試験・浅海試験・深海試験における最大探知距離評価において判明した感度不足について、光検出器を含む全体系のSNR低下（特に受光系ノイズレベルの影響）を勘案し、光検出器とワンパルスAGC基板との連接試験を実施した。光検出器の受光部を遮光し、ワンパルスAGC基板と接続した状態にて、距離情報（距離信号）に重畳するノイズレベルを測定した。試験系を図3-(1)-A-⑥-1に、本試験における測定結果を表3-(1)-A-⑥-1に示す。併せて、本試験系におけるオシロスコープによる測定結果を図3-(1)-A-⑥-2に例示する。

表 3-(1)-A-⑥-1　ワンパルス AGC 基板ノイズレベル（改善前）

ホワイトノイズ [mV]		ワンパルス AGC[dB]			
		+0	+7	+14	+21
高速 AGC[dB]	-5	14	41	104	288
	+0	19	52	106	360
	+5	14	42	94	320
	+10	25	61	140	400

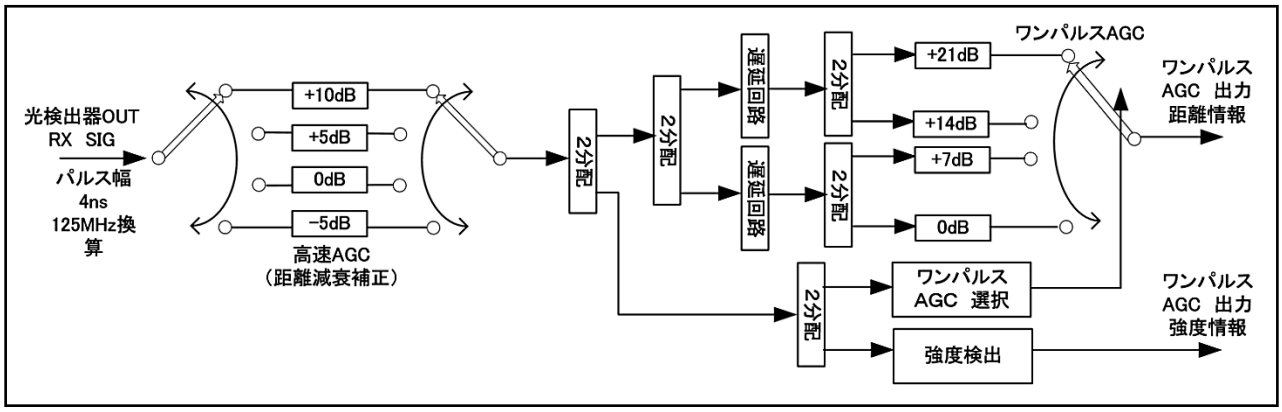


図 3-(1)-A-⑥-3　信号処理フロー｜ワンパルス AGC 基板

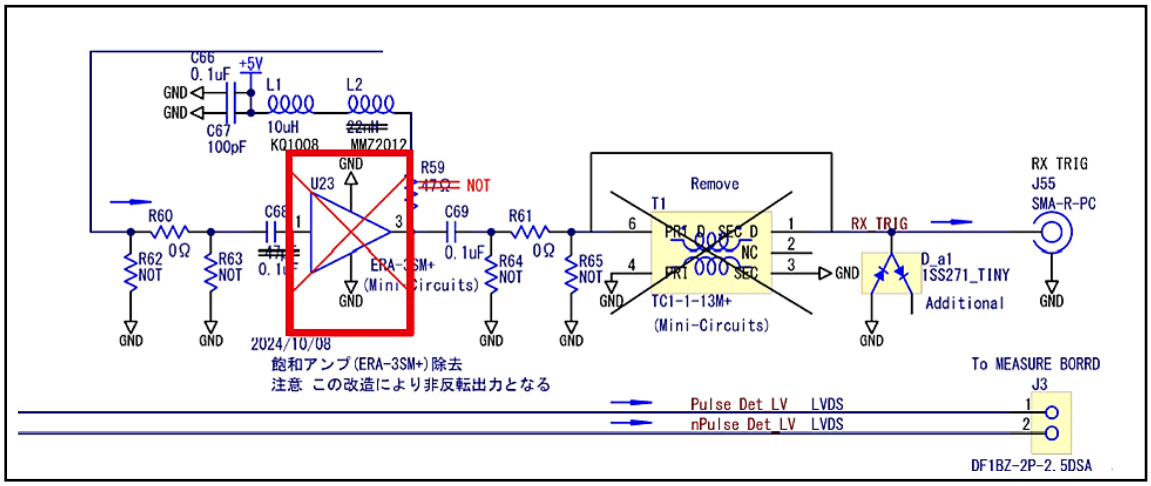


図 3-(1)-A-⑥-4　最終段回路図｜ワンパルス AGC 基板

設計値に対して、概算で約10倍（約20dB）のノイズレベルが確認された。同試験系において本事象の要因を調査した結果、光検出器の増幅率が設計仕様より約20dB高く、光検出器の高性能化によりワンパルスAGCが飽和していたことが判明した。そこで、光検出器の性能を考慮し、ワンパルスAGCの感度を下げることにより当該飽和事象を回避し、ノイズレベルが設計仕様となるようにシステムの改善を図る。図3-(1)-A-⑥-3にワンパルスAGCの処理フローを示す。光検出器出力（光検出器AGC後の受信信号）に対し、高速AGCとワンパルスAGCを経由することで、計測対象の反射率と距離減衰を補正するが、光検出器の性能が設計仕様より大幅に向上したことで受信信号が飽和してしまい、距離情報を適切に出力することが出来なくなっていた。そこで、ワンパルスAGC基板の最終段に配置されるアナログアンプを削除することで、受光系の総和を最適化し当該ノイズを抑制する。図3-(1)-A-⑥-4にワンパルスAGC基板の最終段回路を示す。図中赤枠のアナログアンプを削除し、ワンパルスAGCの感度を低減させ、これにより受光系における光検出器の性能が優位になることで、システムを改善させる。表3-(1)-A-⑥-2に改善後の測定結果を示す。表中の括弧内の数値は改善前のノイズレベル（表3-(1)-A-⑥-1と同値）である。ワンパルスAGC基板を改善することにより、改善前におけるノイズレベルと比較して1/10まで抑制させている。本改善を施した受光系をGreenレーザー実証機に組込み、深海試験を実施した。

(b)深海試験1〔R6年度〕（Greenレーザー実証機｜最大計測距離評価｜令和6年9月｜相模湾他）

システム改善後のGreenレーザー実証機を「かいこう」に搭載し、深海試験を実施した。本試験では、前記「(1)-A｜実施内容⑤」に記載する深海試験と同様に、最大計測距離（最終目標｜60m）の評価および物性推定アルゴリズム構築に要する学習データ取得（海底モックアップ計測）を実施した。「かいこう」の支援母船としてJAMSTECが所有する「かいめい」を用い

表 3-(1)-A-⑥-2　ワンパルス AGC 基板ノイズレベル（改善後）

ホワイトノイズ [mV]		ワンパルス AGC[dB]			
		+0	+7	+14	+21
高速 AGC[dB]	-5	(14) ⇒ 2	(41) ⇒ 5	(104) ⇒ 11	(288) ⇒ 28
	+0	(19) ⇒ 2	(52) ⇒ 6	(106) ⇒ 13	(360) ⇒ 27
	+5	(14) ⇒ 3	(42) ⇒ 5	(94) ⇒ 14	(320) ⇒ 30
	+10	(25) ⇒ 3	(61) ⇒ 7	(140) ⇒ 18	(400) ⇒ 38

た以外、先の深海試験と同様の試験海域および各計測系コンフィギュレーションにて実施する。本試験においては、各計測項目に対して試験海域を区別して実施した（図3-(1)-A-⑤-14参照）。試験海域1（相模湾・初島東方）では、実際の深海底および既知物材（海底モックアップ）を計測対象として、物性推定アルゴリズム構築に要する学習データを取得した。物性推定アルゴリズムに関するデータは、「3.(1)-C｜三次元可視化画像からの特定形状認識」に記載する。試験海域2（大室ダシ・大室海穴）では、最大計測距離を評価した。受光系（光検出器－ワンパルスAGC基板）の改善により距離データに重畳するノイズレベルが大幅に抑制されたGreenレーザー実証機を適用し、最大計測距離60m以上を目指す。当該海域は過去実績において、近海の他海域と比較してレーザー伝搬性が高く、本計測項目に適する。

◆[試験結果｜最大計測距離評価｜9月17日｜大室海穴] ◆

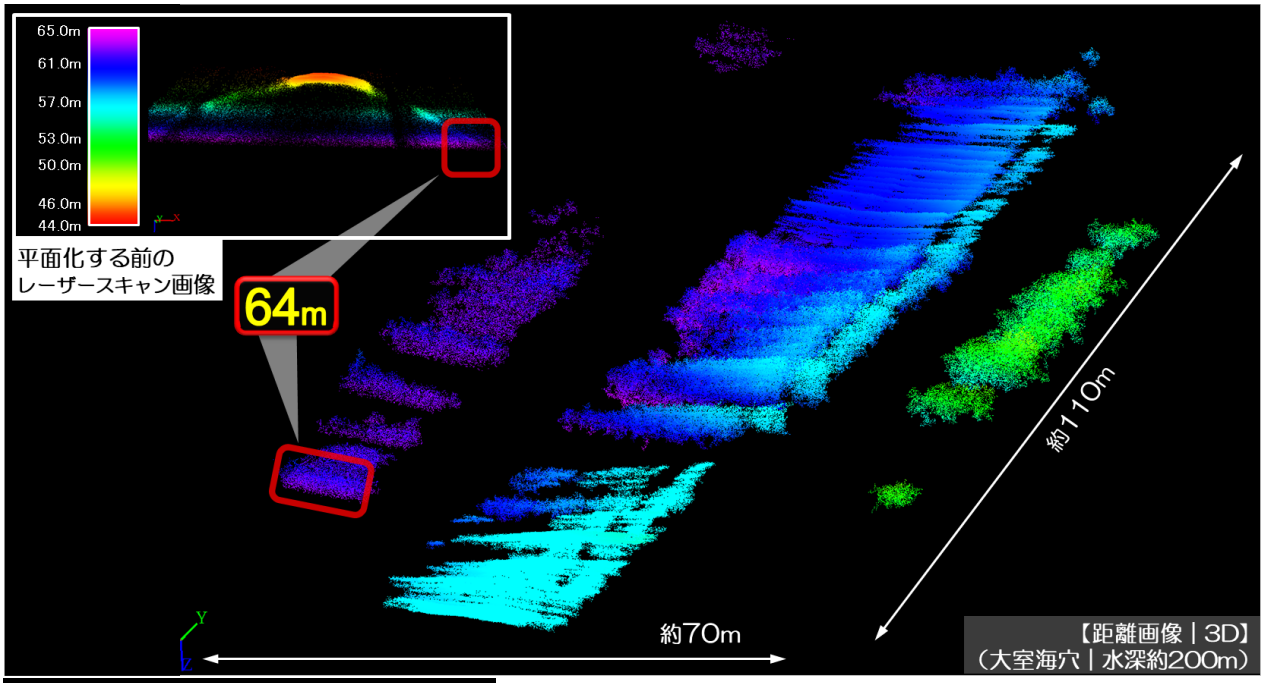
光検出器およびワンパルスAGCとの連接試験にて確認されたノイズレベル低減効果を評価するため、光検出器AGCを適用することなく、Greenレーザー実証機の最大計測距離を評価した。その結果、この条件において最大計測距離64m（往復伝搬距離：128m）が確認され、最終目標「最大約60m（往復伝搬120m）レンジを有するレーザー測距技術の実現」を達成した。図3-(1)-A-⑥-5に当該計測により生成された海底可視化画像（距離画像）を示す。図中赤枠で囲われたエリアが最大計測距離として64mを示す。当該エリアは計測中心から水平距離として35mに位置し、この際の深度（鉛直距離）は54mを示しているため、スラント長（レーザー測距長）は64m（≒$\sqrt{(35^2+54^2)}$）となる。

◆[試験結果｜最大計測距離評価｜9月22日｜初島東方] ◆

最大計測距離の評価に際し、試験海域（計測環境｜大室海穴／初島東方）による計測性能の差異について検証することを目的として、初島東方の深海底を計測した。大室海穴との比較のため、試験条件は上記試験（9月17日）と同様に光検出器高速AGCを適用せずに実施した。その結果、最大探知距離として44mが確認された。図3-(1)-A-⑥-6に当該計測により生成された海底可視化画像(距離画像)を示す。図中赤枠で囲われたエリアが最大計測距離44mを示す。当該エリアは、計測中心と同位置にあり、深度と最大探知距離は同じ約44mとなる。

(c)光学システムの最適調整（光検出器調査＋換装工事｜ピンポールサイズ調整他）

前記「(b)深海試験1」が終了後、Greenレーザー実証機の健全性確認等を踏まえ、光学系の現況性能を精査した。その結果、光検出器の感度が大幅に劣化していることが確認された。感度劣化の要因は、現況に至る各試験における計測の際、送信光の一部（送信光による内部散乱）が光検出器に直接入力したことが考えられる。そこで、劣化した光検出器を換装するとともに、光検出器に入力する受信光を制限するピンホール機構を再調整した。調整以前は受信光への入力量を出来るだけ確保することを優先し、理想値より大径に設定していたため、これにより強いレベルの送信光の“漏れ”（内部散乱光）が若干入力していたことが想定される。そこで、当該光検出器の感度劣化を受け、光検出器に入力する信号が適切な光路を経由したものに限られるよう、ピンホールサイズを理想値（調整以前と比較して小径）に設定



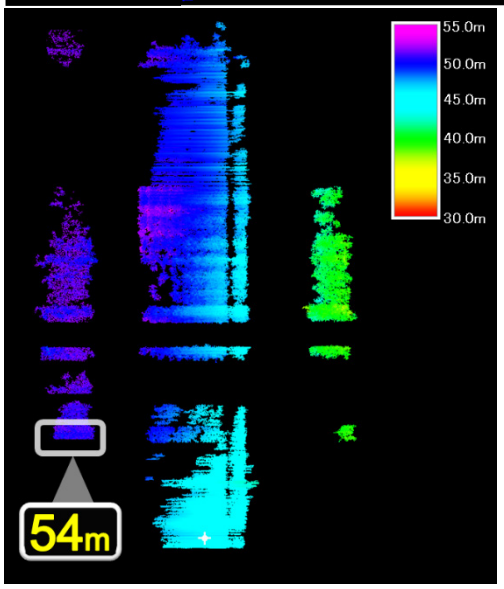


図 3-(1)-A-⑥-5
深海試験結果｜深海試験 1〔R6 年度〕｜3D 距離画像｜大室海穴
（Green レーザー実証機｜最大計測距離：64m｜上図
Green レーザー実証機｜鉛直換算距離：54m｜左図）

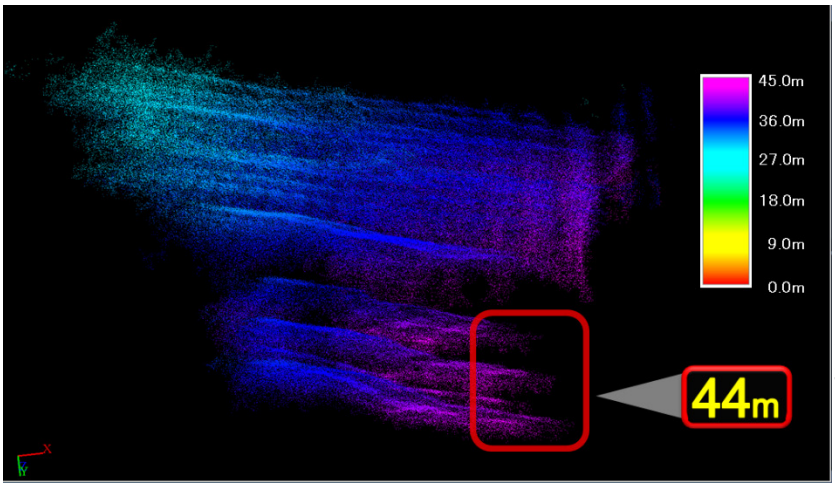


図 3-(1)-A-⑥-6
深海試験結果｜深海試験 1〔R6 年度〕｜
3D 距離画像｜初島東方沖
（Green レーザー実証機｜最大計測距離：44m）

し、当該“漏れ”による入力が極力抑制されるように調整した。最終評価となる次回深海試験「(d)深海試験2」において、前回深海試験「(d)深海試験1」にて達成した最大計測距離(64m)以上を目指し、本調整を含むシステムの最適調整を実施するとともに、光検出器高速AGCの動作を確認した。

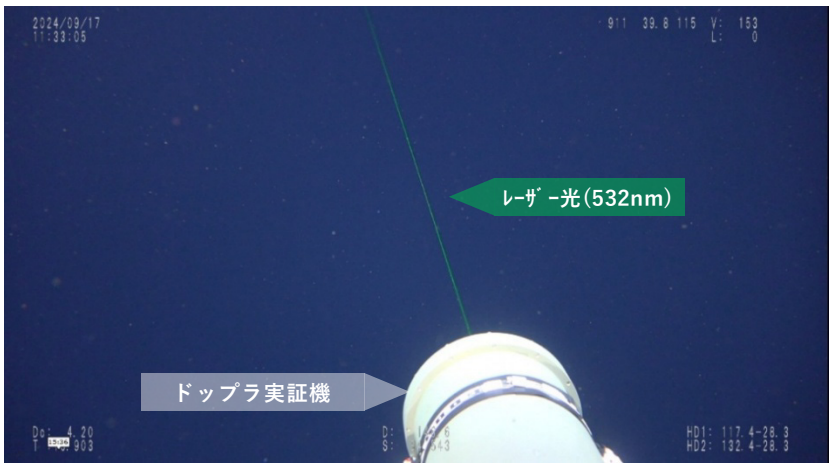


図 3-(1)-A-⑥-7
「かいこう」4K カメラ映像キャプチャ
深海試 1｜大室ダシ・大室海穴
（2024 年 9 月 17 日｜水深 153m）

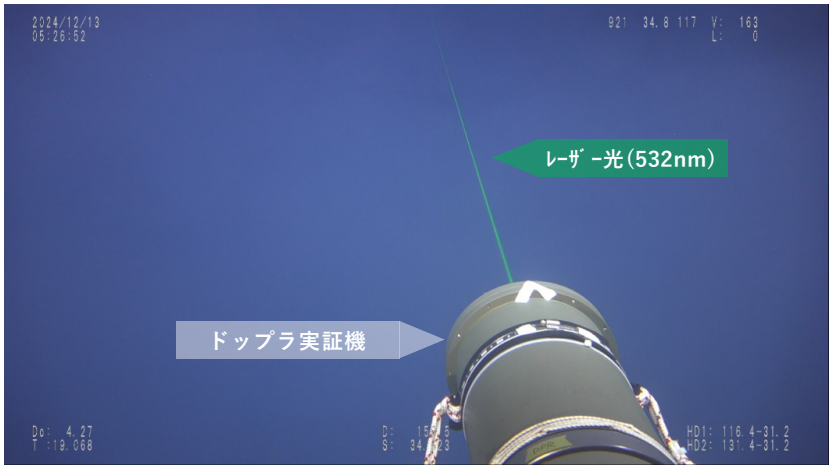


図 3-(1)-A-⑥-8
「かいこう」4K カメラ映像キャプチャ
深海試 2｜大室ダシ・大室海穴
（2024 年 12 月 13 日｜水深 163m）

(d)深海試験2〔R6年度〕(Greenレーザー実証機｜最大計測距離評価｜令和6年12月｜相模湾他)

「(c)光学系システム最適調整」を実施したGreenレーザー実証機を「かいこう」に搭載し、深海試験を実施した。試験海域、海中探査機、支援母船および試験系コンフィギュレーションは「(b)深海試験1」と同様である。本試験の主目的は、最大計測距離の記録更新にある。既に最終目標である最大計測距離60m以上を達成しているが、当該記録は劣化した状態の光検出器を適用しており、かつ光検出器AGCを適用することなく達成した。そこで、光検出器の劣化を改善し、光学系を最適調整したGreenレーザー実証機において、光検出器AGCの性能を確認するとともに、レーザー測距性能を評価する。

「(b)深海試験1」と同じく、過去実績にてレーザー伝搬性が比較的に高いと想定する試験海域2（大室ダシ・大室海穴）において最大計測距離評価を実施した。本試験期間通して、当該海域の気象・海象が悪く短時間潜航を2度実施したのみだが、60mを超える最大計測距離は確認されなかった。PMT換装による性能改善、光学系の最適調整を実施したにもかかわらず、「深海試験1」の記録に及ぶことがなかった根本的な要因は、現場海水に対するレーザー光の減衰が大きかったことが推察される。図3-(1)-A-⑥-７に、「深海試験1」(2024年10月実施)における大室海穴内部にてドップラ実証機(「3.(3)-A」参照)から照射されたレーザー光を、「かいこう」が装備する4Kカメラで撮影した映像のスクリーンショットを示す。合わせて、図3-(1)-A-⑥-8に、「深海試験2」(2024年12月実施)における同実証機から照射されたレーザー光を示す。ドップラ実証機は「かいこう」前部のサンプルバスケット内に固定設置されており、「かいこう」進行方向に向けてレーザー光を照射する。両図に示す映像は、計測時期が異なる以外、ほぼ全て同じ条件（試験海域・海中探査機・計測深度域等）で撮影されているが、視認される海水の濁り具合は明らかに異なり、ドップラ実証機から照射されるレーザー光が見切れる状況も異なる。「深海試験2」では、海水が白濁して見えるほどの悪条件下での計測となり、最大計測距離の評価に適する環境ではなかったことがわかる。大室海穴の水

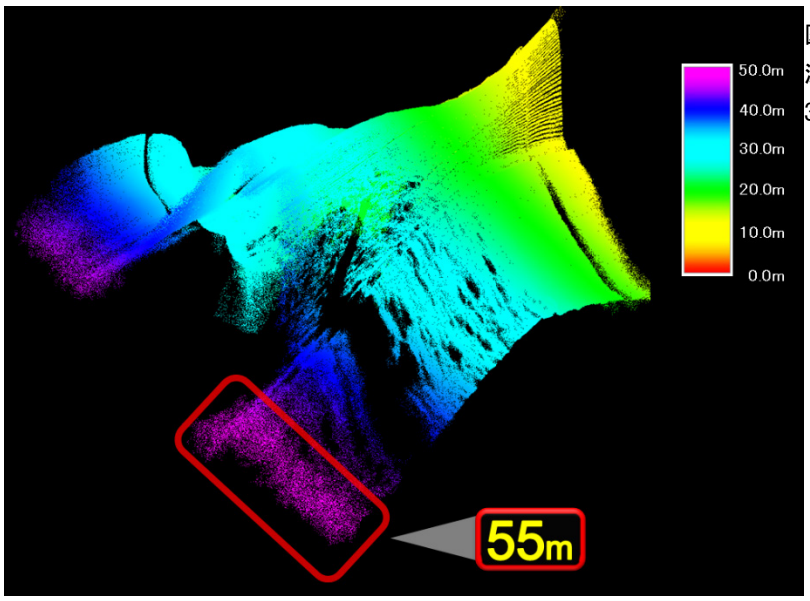


図 3-(1)-A-⑥-9
深海試験結果｜深海試験 2〔R6 年度〕｜
3D 距離画像｜初島東方沖
（Green レーザー実証機｜最大計測距離：55m）

深は200m程度と大深度ではないことから、当該海域の当時の気象・海象の影響が海穴内部の海水条件を悪化させたと推察する。

試験海域2（大室ダシ・大室海穴）周辺の気象・海象が悪く、「かいこう」を潜航できる諸条件がと整わないことから、試験海域1（相模湾・初島東方）に移動し、最大計測距離を評価した。過去実績より、初島東方の深海域はレーザー伝搬性は悪いが、「深海試験1」において44mの最大計測距離を記録している。そこで、当該海域の同じエリア・深度域において、光学系を改善・調整後のGreenレーザー実証機の性能を評価した。図3-(1)-A-⑥-9に、「深海試験2」における初島東方での最大計測距離を示す。最大計測距離として結果55m（往復伝搬距離：110m）を記録しており、本計測においては光検出器AGCが適用されている。図中赤枠で囲われたエリアが最大計測距離として55mを示しており、当該エリアは計測中心から水平距離として27mに位置し、この際の深度（鉛直距離）は48mであることから、スラント長（レーザー測距長）は55m（≒$\sqrt{(27^2+48^2)}$）となる。

レーザー光の伝搬性が低い初島東方において、55mもの最大計測距離が確認されたのは、光検出器AGCにおいて距離減衰補正が適切に実施されたことを意味する。前記「(1)-A｜実施内容⑤｜(g)深海試験〔R5年度〕」にて、当該海域の伝搬損失を0.48～0.53dB/m(代表値:0.5dB/m)と試算している。令和6年度に実施した「深海試験1」および「深海試験2」ともに、初島東方の伝搬損失が当該試算と同値と仮定すると、最大計測距離が11m（＝55m-44m）伸長したことから、計算上12dB程度の性能向上が見込まれる（12dB ≒ 20log（55/44）（拡散損失)+0.5dB（濁度）×11m（伸長）×2（往復））。この性能でのGreenレーザー実証機を適用して「深海試験1」における試験海域2（大室ダシ・海穴）にて計測を実施した場合、最大計測距離として70m超を記録する可能性が示唆される。

(1)-B 光検出器の高度化

[(1)-B｜目的]

反射光の検出時間精度を向上する為に、測定距離に応じた検出器の感度を極小時間に変化させる必要がある。これを目的とし光検出器の駆動電源を検討試作し反射光伝搬時間の高精度化に取組む。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(1)-B｜達成目標（終了時）]

高速ゲート機能を組込む高精度光検出器（光電子増倍管と駆動電源）を構築する。光検出器の特性として実施項目「3.(1)-A」を達成するために使用されるレーザー光源の発振周期（50kHz以上）に対応したゲート動作を目指す。

[(1)-B｜達成目標（終了時）の達成状況]

■高精度光検出器（光電子増倍管と駆動電源）の構築　：　**達成**
■レーザー光源の発振周期（50kHz 以上）に対応したゲート動作の構築　：　**達成**

[(1)-B｜実施内容①｜光電子増倍管(現行機採用)の特性検証]

レーザー測距現行機に採用されている浜松ホトニクス（株)製光電子増倍管「R5916U-64(HAMAMATSU)」の課題を確認する為、同装置を製作し検証試験を行う。図3-(1)-B-①-1に「R5916U-64」を示す。「R5916U-64」の課題は、光電子増倍管使用時におけるゲート動作時おいてノイズ（ゲートノイズ）が確認されていることにある。ゲート動作の目的は、光電子

■Signal Photon Detector：
Microchannel Plate Photomultiplier Tube (MCP-PMT)
■Quantum Efficiency：
25%(min.), 35%(typ.), 43%(as measured)
■Rise Time：200ps
■Fall Time：700ps
■I.R.F.(FWHM)：110ps
■Supply Voltage：-2800 to -3000V

図 3-(1)-B-①-1　浜松ホトニクス（株)製光電子増倍管「R5916U-64(HAMAMATSU)」

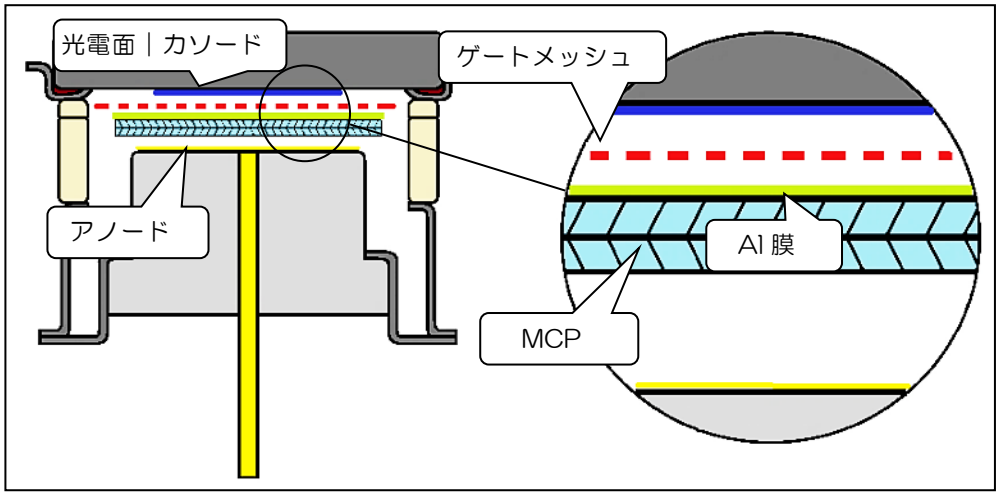


図 3-(1)-B-①-2　基本構成｜「R5916U-64(HAMAMATSU)」

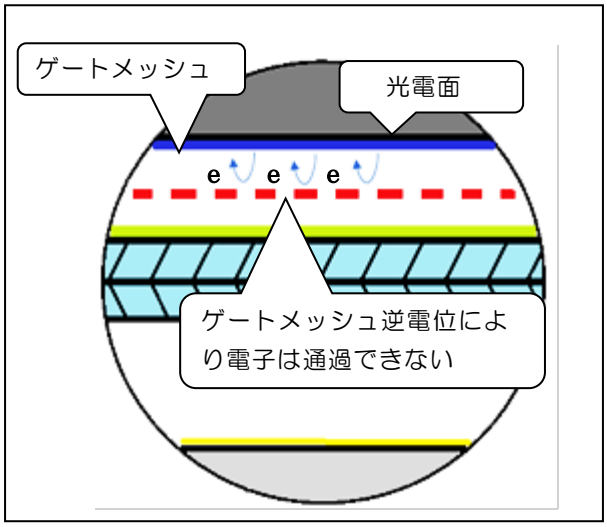


図 3-(1)-B-①-3　ゲート OFF 時の電子の挙動
（ゲートメッシュ逆電位印加）

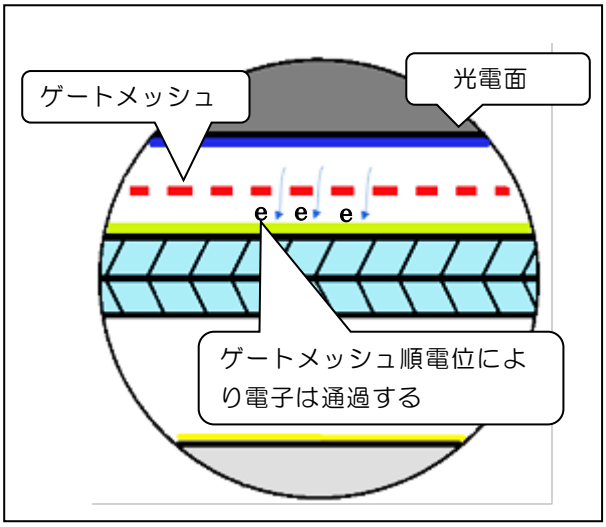


図 3-(1)-B-①-4　ゲート ON 時の電子の挙動
（ゲートメッシュ順電位印加）

増倍管を微小時間動作させることにより、目的時間の光計測を可能にすることにある。「R5916U-64」の基本構成は、光電面（カソード）、ゲートメッシュ、マイクロチャンネルプレート（Microchannel Plate：MCP）、アノードからなる。図3-(1)-B-①-2に「R5916U-64」の基本構成を示す。ゲート機能は、光電面と近接したゲートメッシュの制御によって行われる。光電面の電位に対しゲートメッシュに逆電位を印加することで、光電面から放出された電子は、ゲートメッシュを通過できずにMCPへ到達しない（図3-(1)-B-①-3）。これに対して、光電面の電位に対しゲートメッシュに順電位を印加することで、光電面から放出された電子は、ゲートメッシュを通過してMCPへ到達し、最終的に信号出力される（図3-(1)-B-①-4）。

製作した「R5916U-64」を用いて検証試験を実施し、試験結果を解析することにより、当該ゲートノイズの要因は、光電子増倍管の光電面－MCP 間に配置されているゲートメッシュの電子チャージが原因との結論を得た。ゲート動作には高電圧および高速での制御を要し、安定した高速制御を可能とする電圧は 200 V 以下とされる。一方、「5916U-64」では、低寿命化対策として MCP 上に Al 膜を配置しているが、光電面から放出された電子が一定以上のエネルギーを保持していないと当該 Al 膜を通過することができない。そのため、光電面－MCP 間には 800 V 以上の電位差を要し、これにより光電面－MCP 間での高速制御が困難となる。この問題を解決するために「5916U-64(HAMAMATSU)」では、光電面－MCP 間にあるゲートメッシュを利用しており、光電面－ゲートメッシュ間にて+20V以下の電位差を提供できれば、高速制御できる構造となっている。

以上より、光電子増倍管の低寿命化問題が解決されれば、Al膜を除去することで光電面－MCP 間の高速制御によるゲート動作が実現し、ゲートメッシュを除去することでゲートメッシュの電子チャージに起因するゲートノイズが抑制されるとの検証結果を得た。当該結果を基に、本研究における長距離レーザー測距（最終目標｜最大計測距離：60m）における適切なゲート時間を設定し、新規開発する光電子増倍管の詳細設計へ反映させる。検証試験において確認されたゲート動作時に生じるノイズ（ゲートノイズ）は、ゲートパルス（トリガー信号）の立上り（rise）／立下り（fall）の挙動に起因して表出することが判明している。そこで、トリガー信号より20ns程度まで測定してゲートノイズの発生状態を検証した結果、トリガー信号より20ns以降の計測値にはゲートノイズが発生していないことが判明した。図3-(1)-B-①-5に当該ゲートノイズとトリガー信号の相関を示す。

[(1)-B｜実施内容②｜PMT用駆動電源の試作と性能検証]

＜概要＞

「(1)-B｜実施内容①」にて得られた結果より、Greenレーザー実証機に搭載する光検出器

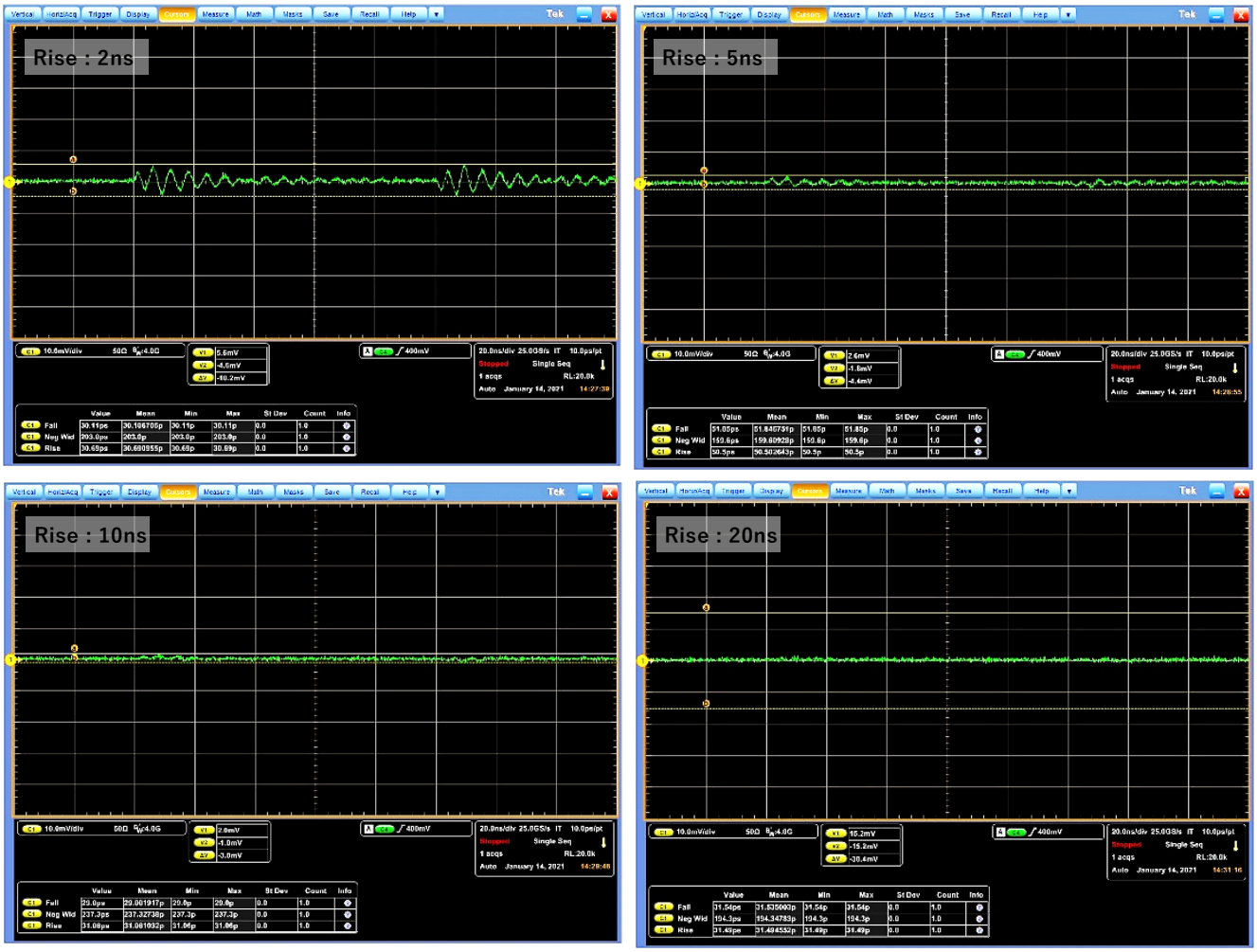


図 3-(1)-B-①-5　ゲートノイズ｜光電子増倍管「R5916U-64(HAMAMATSU)」

に組み込む光電子増倍管の構造が確定した。そこで当該構造に対応する駆動電源の試作及び性能検証を実施する。Greenレーザー実証機への組み込むことを前提として、参画機関と光検出器の仕様詳細を検討し、「(1)-B｜実施内容①」にて製作した光電子増倍管の駆動電源「BL239」を試作した。図3-(1)-B-②-1に「BL239」を示す。当該試作機を用いて性能検証を実施した。

(a)高速カソードゲート機能の動作検証

試作した光電子増倍管用駆動電源「BL239」における高速カソードゲート機能の動作を検証するため、測定系を構築した。当該測定系の構成は、「BL239」、パルスジェネレータ、DC電源（BL239駆動用一次電源）となる。図3-(1)-B-②-2に当該測定系のシステムブロック図を示す。当該測定系において、Greenレーザー実証機のレーザー発振周波数を模擬するパルス信号

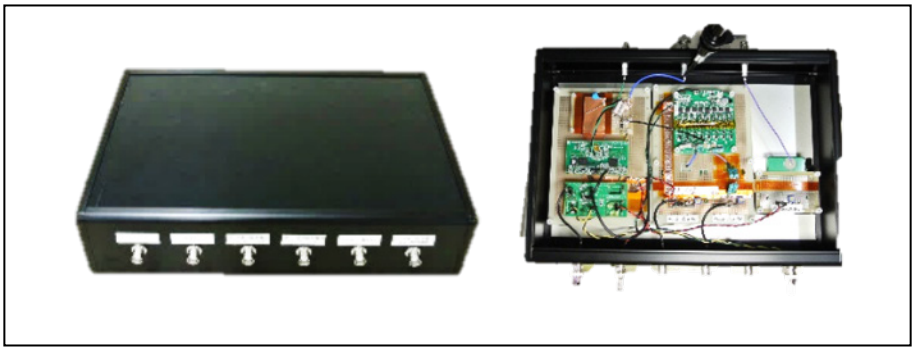


図 3-(1)-B-②-1　光電子増倍管用駆動電源｜試作機（BL239/HAMAMATSU）

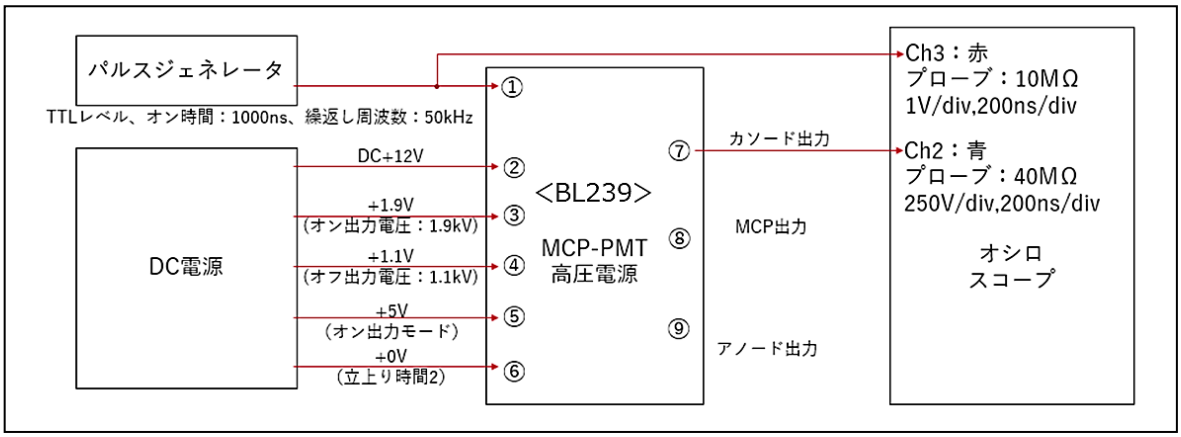


図 3-(1)-B-②-2　「高速カソードゲート機能」測定系

（50kHz）を、パルスジェネレータにて生成し「BL239」に入力させ、この際のカソード出力をオシロスコープにて計測する。図3-(1)-B-②-3に本測定系による測定結果（オシロスコープ表示）を例示する。TTL正論理ゲート信号を50kHzにて入力し（図3-(1)-B-②-3｜紫線）、カソードゲート出力電圧+20Vから-200V出力（図3-(1)-B-②-3｜水色線）が追従していることを確認した。この時、出力遅延時間は94ns、立上り時間は34ns、立下り時間は36nsを確認した。ゲート信号を入れる遅延時間を考慮するとで、Greenレーザー実証機において問題となる近距離反射の過大光の抑制に繋がる。以上の検証結果より、「カソードゲート方式」がレーザー測距システムにて有効な手法であることを確認した。

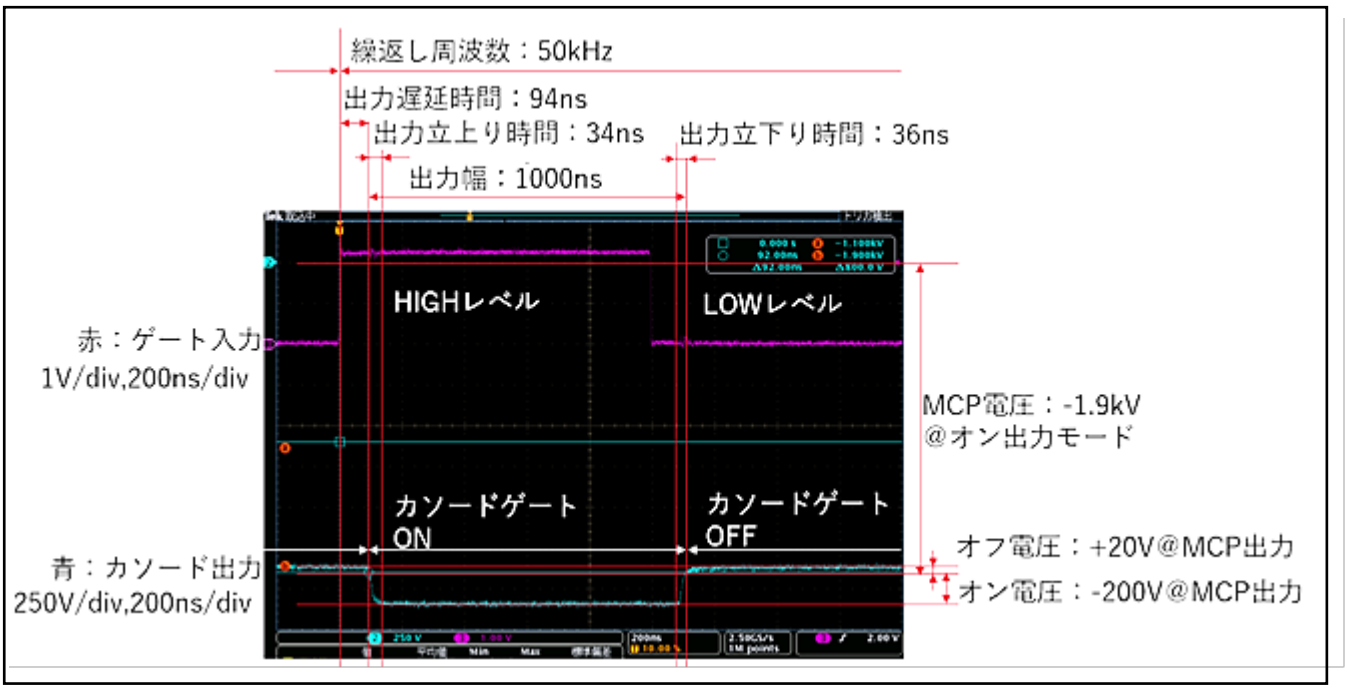


図 3-(1)-B-②-3　「高速カソードゲート機能」測定結果｜（オシロスコープ）

(b) 高速増幅率可変機能の動作検証

試作した光電子増倍管用駆動電源「BL239」における高速増幅率可変機能の動作を検証するため、測定系を構築した。当該測定系の構成は、「BL239」、パルスジェネレータ、DC電源（BL239駆動用一次電源）となる。図3-(1)-B-②-4に当該測定系のシステムブロック図を示す。ゲート信号入力による「BL239」のMCP出力電圧をオシロスコープにて計測する。図3-(1)-B-②-5

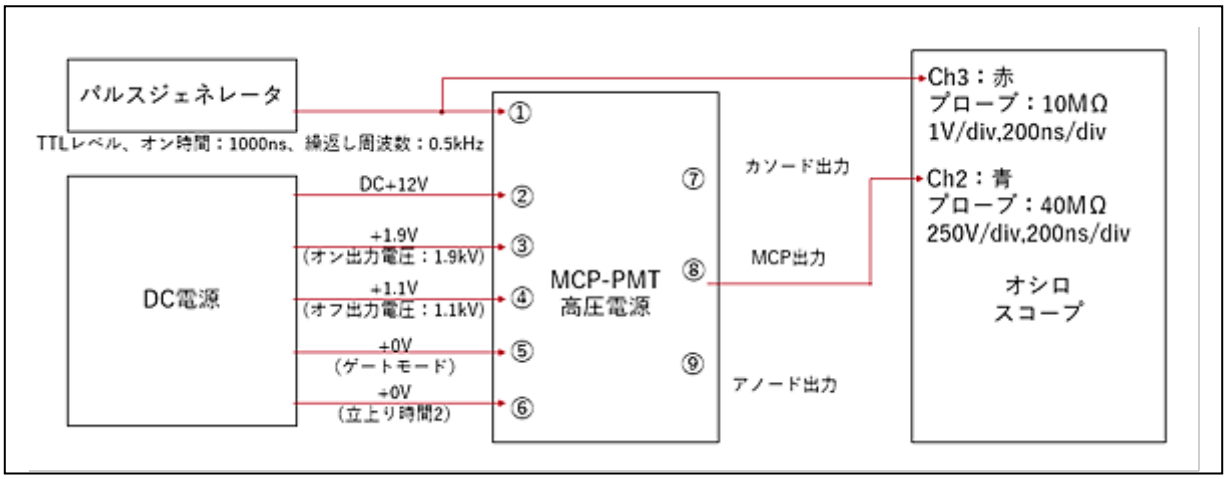


図 3-(1)-B-②-4　「高速増幅率可変機能」測定系

に本測定系による測定結果(オシロスコープ表示)を例示する。TTL正論理ゲート信号を「BL239」へ入力し（図3-(1)-B-②-5｜紫線）、MCP出力電圧0Vから-1900V（図3-(1)-B-②-5｜水色線）へ可変していることを確認した。この時、出力遅延時間は96ns、立上り時間400nsとなった。ゲート信号を入れる遅延時間を考慮するとで、Greenレーザー実証機（長距離レーザー測距）が求める指定近距離から指定遠距離に対応した信号増幅率を極短時間で可変できることを確認した。

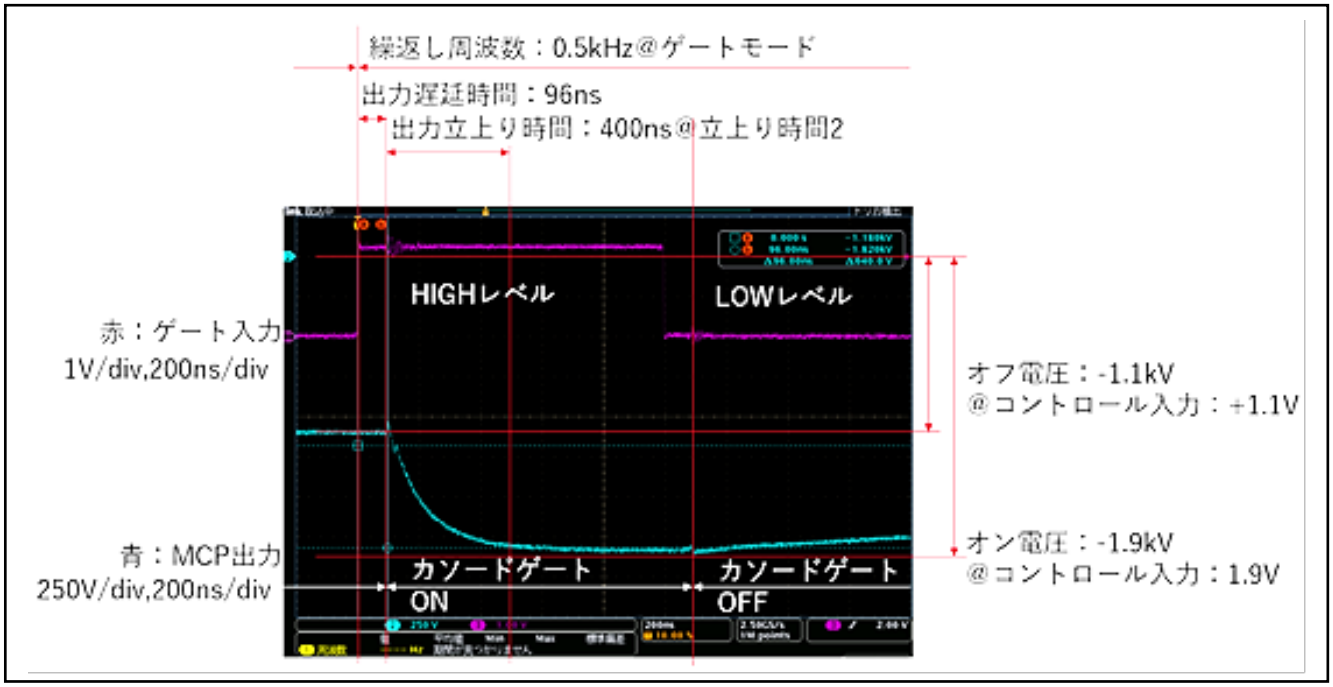


図 3-(1)-B-②-5　「高速増幅率可変機能」測定結果｜例示（オシロスコープ）

[(1)-B｜実施内容③｜MCP-PMT用駆動電源・実装用試作機の製作と性能評価]

＜概要＞

以上までのPMT用駆動電源に対しる取り組みで得られた各検証結果より、当該駆動電源の基本機能・性能が実証されたことから、実装機の試作および性能検証を行った。本研究課題にて開発を進める光検出器はマイクロチャンネルプレート（Micro Channel Plate：MCP）内蔵型光電子増倍管（MCP-PMT）およびその駆動電源から構成され、本研究項目における要求仕様

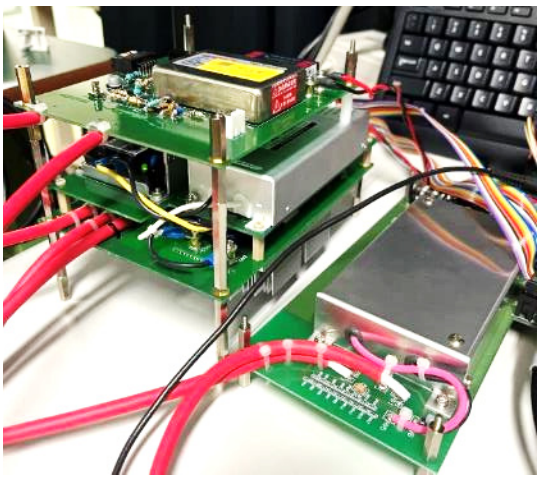


図 3-(1)-B-③-1
MCP-PMT 用駆動電源｜実装用試作機「BL239-01」

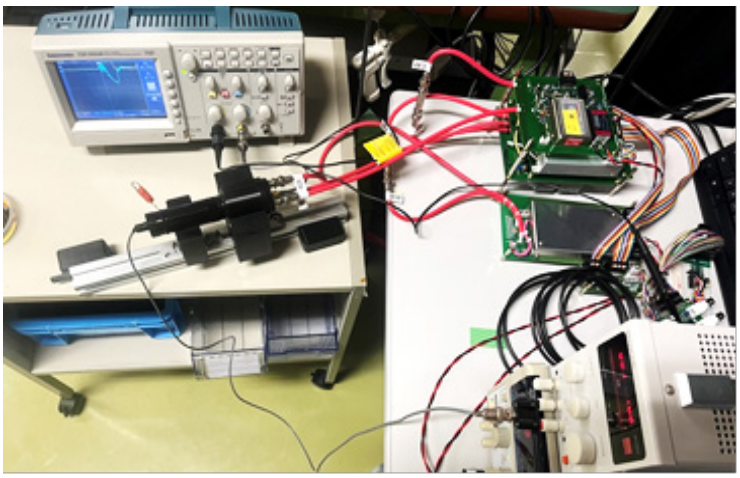


図 3-(1)-B-③-2
MCP-PMT 用駆動電源｜実装用試作機「BL239-01」性能評価試験

として、光検出器高速AGCの根幹を成す駆動電源の詳細について、Greenレーザー実証機への実装を前提として開発を進めた。これにより、駆動電源「BL239-01」（実装用試作機｜図3-(1)-B-③-1）を試作し、当該試作機を用いて光検出器高速AGCが具備すべき所望性能について評価・検討した（図3-(1)-B-③-2）。

(a)MCP-PMT用駆動電源「BL239-01」（実装用試作機）

Greenレーザー実証機へ実装する光検出器において、これを構成する駆動電源・実装用試作機「BL239-01」を試作し、光検出器高速AGCに資する所望性能について評価試験を実施した。「BL239-01」は、ベース電源、MCPゲートGain高速可変部（以降、「高圧ランプモジュール」）、カソードゲートPMT動作ON/OFF部（以下、「高圧パルスモジュール」）より構成されている（図3-(1)-B-③-3）。高圧パルスモジュールは、入射した微弱な光を指定時間内のみ検出することを考慮し、MCP-PMTのカソードーMCPin間の電位を高速で切替える。また高圧ランプモジュールは、MCP-PMTのアンプGainを高速で可変する。ベース電源は、MCPout-Anode間の電圧を供給する。これら3種類の各電源系統を独立して構成することで、MCP-PMTへの高速電源制御が

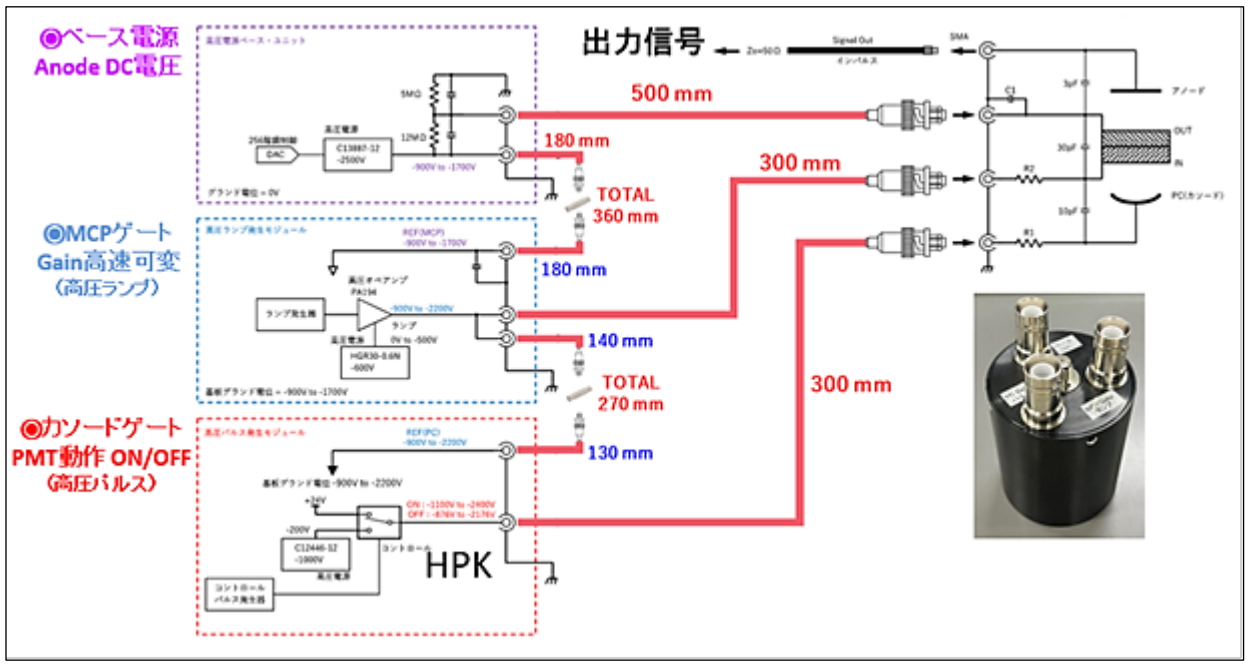


図 3-(1)-B-③-3　システムブロック図｜駆動電源・実装用試作機「LB239-01」

図 3-(1)-B-③-4
MCP-PMT 内部基板｜沿面放電箇所

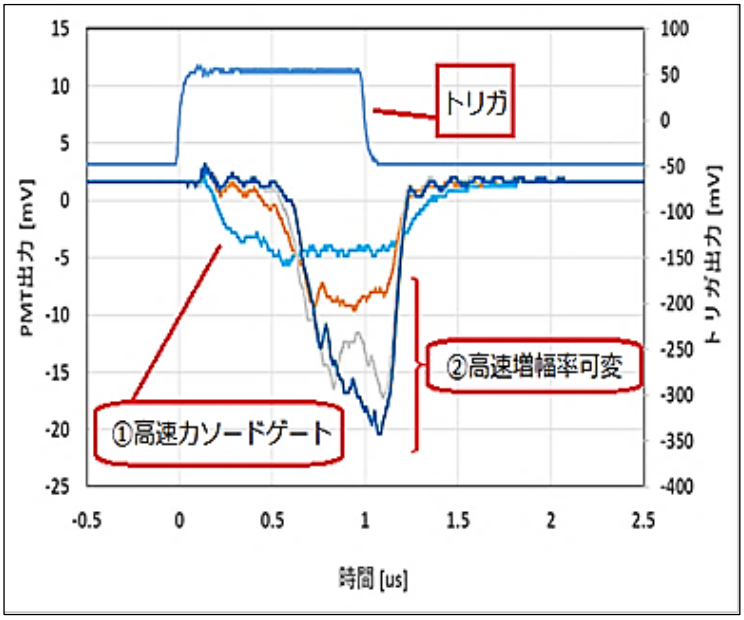


図 3-(1)-B-③-5
沿面放電対策後の実装用駆動電源「BL239-01」動作検証結果

可能となり、これによりGreenレーザー実証機への光検出器高速AGCが実装される。光検出器高速AGCは、駆動電源が具備する高速カソードゲート機能と高速増幅率可変機能により構成される。高速カソードゲート機能により、50kHzのゲート信号に対してカソードゲート出力電圧を追従させる。高速増幅率可変機能において、当該ゲート信号を駆動電源へ入力することでMCP出力電圧をゲイン最小から最大まで高速で可変させる。これらにより、アナログアンプ部とは全く独立した高品質なAGCが提供され、レーザー伝搬距離に応じて信号増幅率をごく短時間で可変させることが可能となる。

(b)「BL239-01」開発時における不具合事象・対策

駆動電源・実装用試作機「BL239-01」の開発過程において不具合事象が発生したため、原因の特定と対策を講じその効果を検証した。以下に実施内容を示す。

〔基盤沿面放電｜対策〕

「BL239-01」の試運転時において、電源基板に沿面放電による故障事象が発生した（図3-(1)-B-③-4）。これは、MCP-PMT内部基板の耐圧設計に主要因があることが判明し、その対策として電源側の回路素子を耐サージ仕様に変更した。

〔対策後の検証項目〕

◆高速カソードゲート◆

PMT変更構造にて高速カソードゲート動作が可能である電圧出力を確認する。要求値として、カソード電圧を+30Vから-200Vで制御できることを確認する。MCP-PMT高圧電源、DC電源にて50kHzにてパルスジェネレータの信号をMCP-PMT高圧電源に入力させ、この時の出力をオシロスコープにて計測する。

◆高速増幅率可変機能◆

PMT変更構造にて高速増幅率可変に対応できる電圧出力を確認する。要求値として、MCP電圧を400nsにて可変できることを確認する。

〔検証結果〕

カソード電圧を+30Vから-200Vで切替え、PMT出力が追従することを確認した（図3-(1)-B-

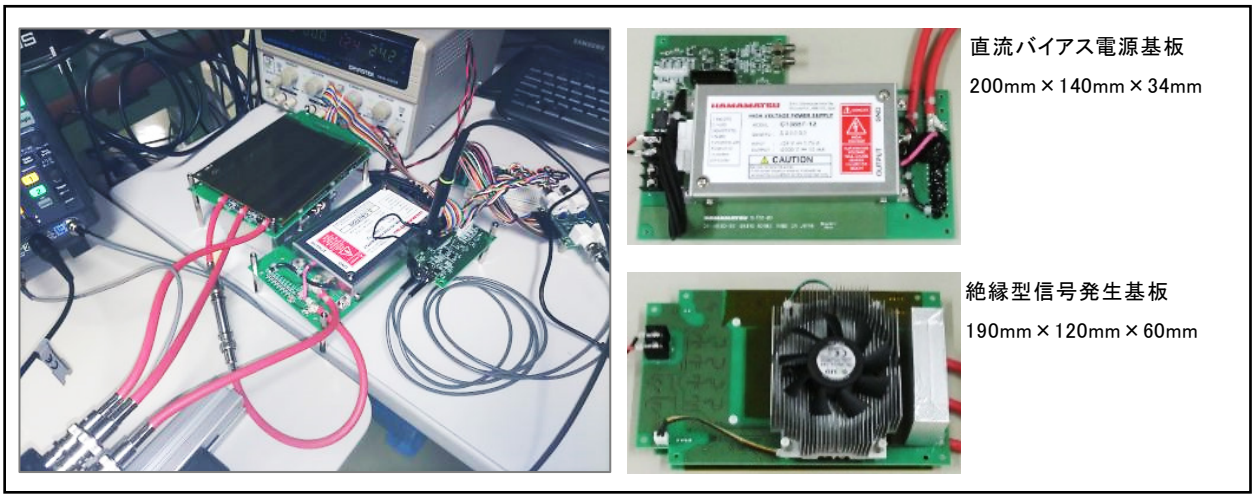


図 3-(1)-B-④-1　駆動電源・実装機「BL239-02」

③-5）。正信号のトリガ入力信号に対して、負信号の各波形がMCP-PMTの出力となっている。高速カソードゲートのみを掛けた場合が図中①、高速増幅率可変を掛けた場合が図中②である。②に関してはMCP-PMTへの電源電圧を段階的に調整可能で、段階に応じて出力されている。①と②にはタイムラグがあるが、測定系によるタイムラグに加えて、MCP-PMTの増幅率は非線形であることに起因するもので、正常な動作となる。

[(1)-B｜実施内容④｜MCP-PMT用駆動電源(実装機｜BL239-02)の製作と性能評価]

＜概要＞

MCP-PMT用駆動電源・実装用試作機「BL239-01」の性能評価により得られた基礎データ・知見を基に、同実装機「BL239-02」（図3-(1)-B-④-1）を製作し、基本性能を評価した。その結果、目的とする性能特性を有することが確認された。この際、Greenレーザー実証機が具備すべき最大計測距離（最終目標:60m）の達成に要する「BL239-02」の改善事項（リップルノイズの軽減｜カソードゲート制御タイミング等）を抽出し、改善方針について検討した。

(a)MCP-PMT用駆動電源「BL239-02」(実装機)｜改善項目・内容

MCP-PMT用駆動電源・実装用試作機「BL239-01」について、実施項目「3.(2)-B」にて試作したMCP-PMTを用いた性能評価を実施した。評価結果に基づき、Greenレーザー実証機への実装を前提とした仕様詳細について検討し、同駆動電源改良版「BL239-02」を製作し基本性能を評価した。図3-(1)-B-④-2に「BL239-02」のシステムブロック図を示す。「BL239-01」からの改善項目として、〔取扱改善・安全対策〕と〔EMI対策〕を実施し、「BL239-02」の仕様に反映した。改善項目とその内容について下記に示す。

〔取扱改善・安全対策〕

◆モニター端子追加

出力電圧確認を目的として、アノード用DC／カソードゲート／MCPゲートにモニタ端子を追加する。

◆保護機構追加

高圧電源部端子の接触防止を目的として、保護機構を追加する。

◆SHVケーブル短縮

耐圧容器内および内部シャーシの限られたスペースへの安全実装を目的として、高圧電源系ケーブルを短縮する。

◆電位変更

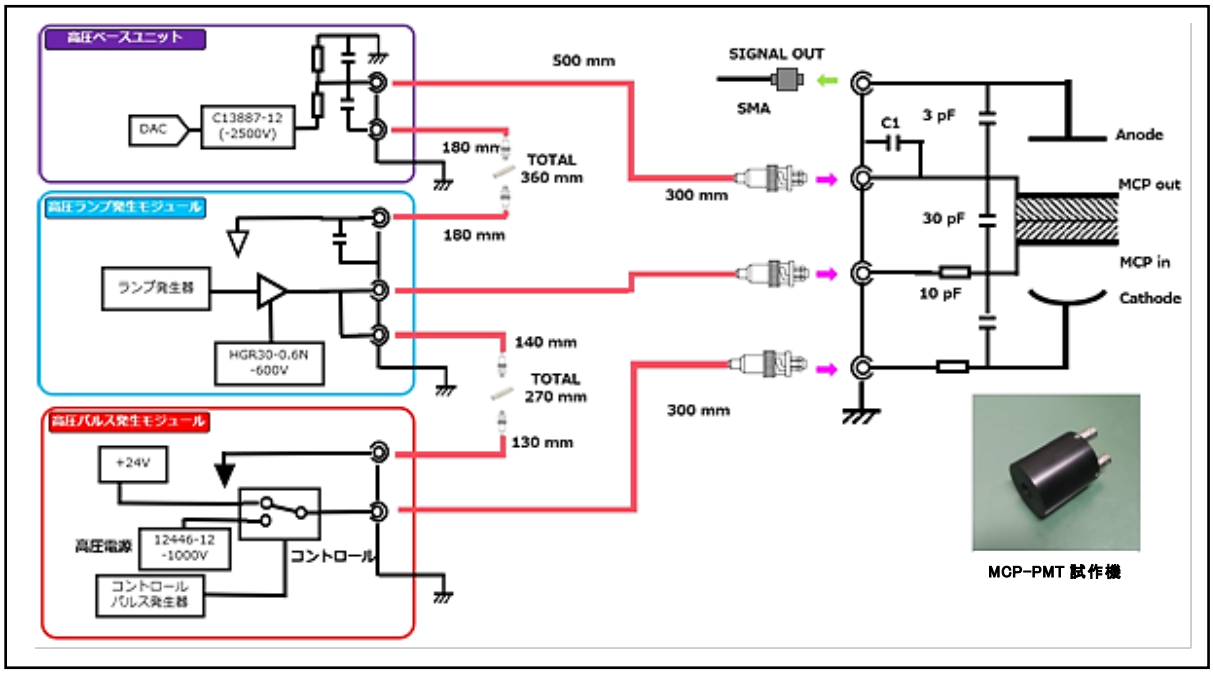


図 3-(1)-B-④-2　システムブロック図｜駆動電源・実装機「LB239-02」

RAMP発生基板のDC-DC変換部／ヒートシンク部の高圧電位に対する危険回避を目的として、GND電位へ変更する。

◆電源取出し口移動
実装時における作業利便性を目的として、ベース電源のSHVケーブル取出し口を基板中央付近とする。

〔EMI対策〕

◆EMIフィルタ追加
環境ノイズを抑制することを目的として、電源ラインへのEMIフィルタを追加する。

◆電源供給ライン変更
他システムとの電源分離を目的として、主電源+24Vからの電源供給とする。

◆電源起動シーケンス制御
突入電流抑制を目的として、電源起動シーケンス制御を追加する。

◆ソフトスタート機能追加
突入電流抑制を目的として、ソフトスタート機能を追加する。

◆RCフィルタ追加
電動ノイズ改善を目的として、TTL制御ラインへのRCフィルタ（時定数|1μs程度）を追加する。

◆静電シールド追加
放射ノイズ改善を目的として、静電シールドを追加する。

(b)MCP-PMT用駆動電源「BL239-02」（実装機）｜単体性能評価

MCP-PMT用駆動電源「BL239-02」の単体性能を評価した。評価結果を図3-(1)-B-④-3[※8]示す。当該評価は、本実施項目の「達成目標（終了時）」である「光検出器の特性として実施項目「3.(1)-A」を達成するために使用されるレーザー光源の発振周期（50kHz以上）に対応したゲート動作」について検証したものとなる。本評価により、トリガー信号によってカソードゲート動作、ランプ動作が正常に機能している（要求仕様を満足する）ことが確認された。

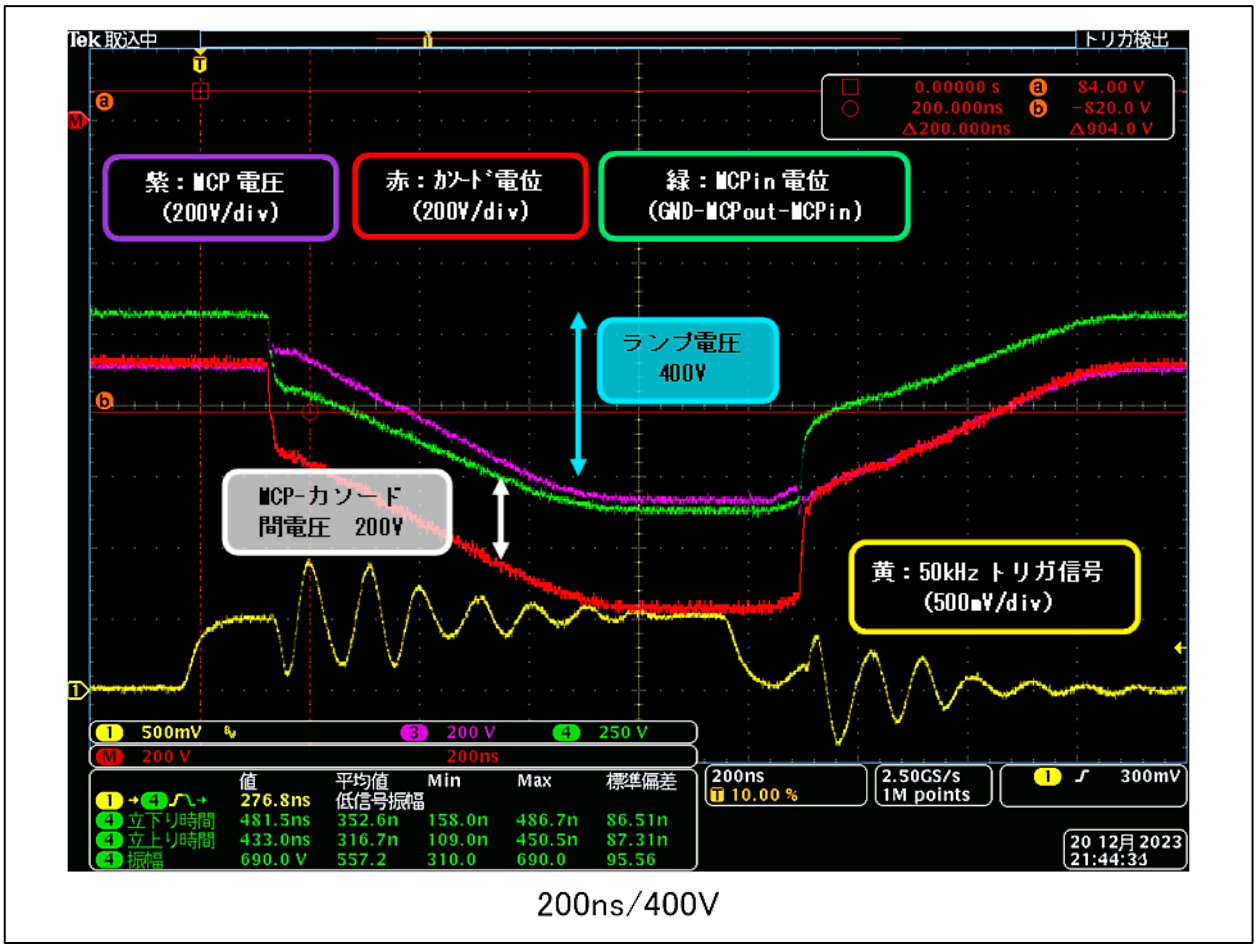


図 3-(1)-B-④-3　単体性能評価結果｜駆動電源・実装機「LB239-02」｜例示（オシロスコープ）

図中50kHzトリガー信号（黄線）により、カソード電位（赤線｜GND-MCP-カソード間電位）が追従しており、当該カソード電位（赤線）とMCPin電位（緑線）との差は-200Vを維持している。これにより、カソードゲート機能が正常に動作していることが確認される。また、当該ゲート信号に応じて、MCP電圧（紫線）が変化しており、指定のランプ電圧である400Vまで可変している。併せて、MCPin電位（緑線）とカソード電位（赤線）もこれに追従している。以上の挙動より、「BL239-02」の単体におけるランプ動作が正常に機能していることが確認された。 これにより本実施項目の達成目標(終了時)である「レーザー光源の発振周期（50kHz以上）に対応したゲート動作」が実証された。

※8 黄線：50kHzトリガー信号｜500mV（500mV/div）
緑線：MCPin電位（GND-MCPout-MCPin）
紫線：MCP電圧（MCPin-MCPout間電圧|-500V/div）
赤線：カソード電位（GND-MCPout-MCPin-カソード電圧|-200V/div）

(c)MCP-PMT用駆動電源「BL239-02」（実装機）｜カソードゲートノイズ評価

図3-(1)-B-④-4※9に、MCP-PMT用駆動電源「BL239-02」を電源単体で動作したときのカソードゲートノイズ（アノード信号ノイズ）を評価した結果を示す。トリガー信号を入力することにより15mVp-p程度のカソードゲートノイズが発生する確認した。図中トリガー信号(黄線)によりカソードゲートがONされ、その後約200ns経過すると、最大値として15mVp-pのノイズが確認される。Greenレーザー実証機への実装を前提として、参画機関との協議における当該ノイズの当初要求値は15mVp-pであり、本結果より「BL239-02」がカソードゲートノイズの許容を満足していることが確認された。一方、光検出器の更なる高感度化に取り組むためには、当該ゲートノイズ（リップルノイズ）は可能な限り抑制することが望まれる。

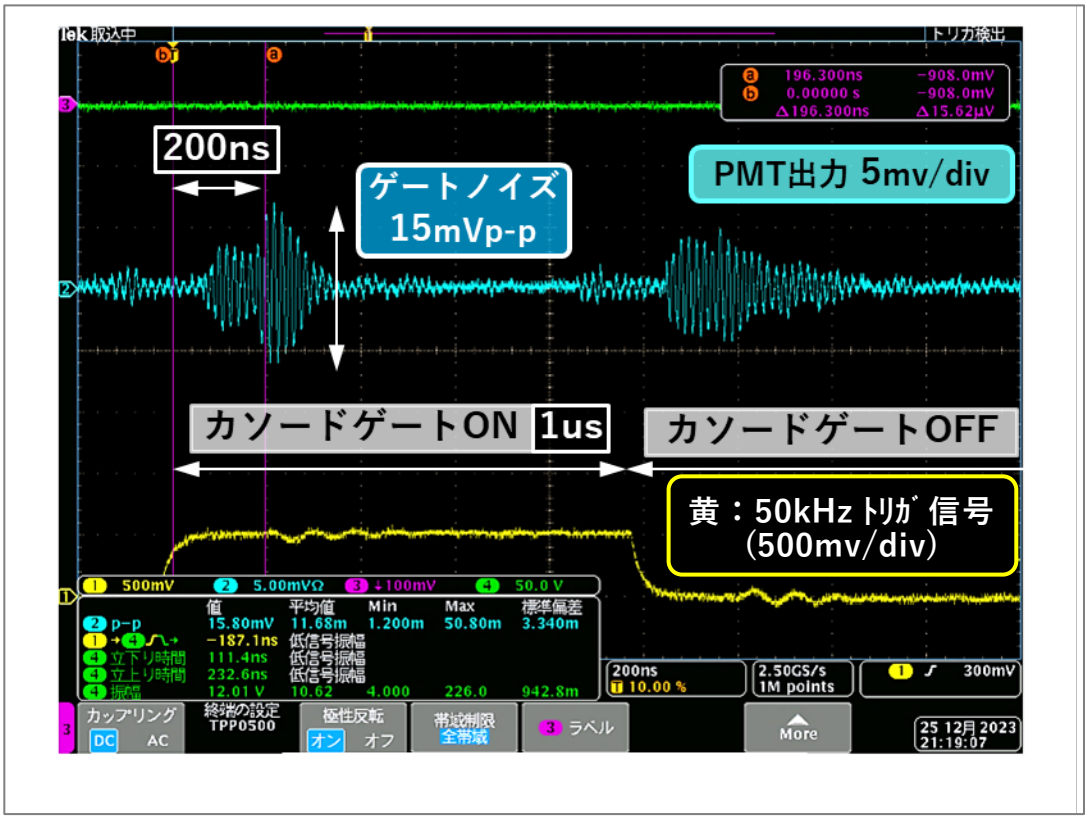


図 3-(1)-B-④-4　カソードゲートノイズ評価結果｜駆動電源・実装機「LB239-02」｜例示（オシロスコープ）

※9 黄線：50kHzトリガー信号｜500mV（500mV/div）
青線：アノード信号（光入力なしの状態）

(d)MCP-PMT用駆動電源「BL239-02」（実装機）｜光検出器評価（MCP-PMT＋駆動電源 接続評価）

MCP-PMT用駆動電源にMCP-PMTを接続し、光検出器（MCP-PMT+駆動電源）としての評価を実施した。図3-(1)-B-④-5に本評価の計測系を示す。MCP-PMT用駆動電源「BL239-02」と光電子増倍管「H15547-Y007」（「3.(2)-B」参照）とを接続し、光検出器へ微弱光を入力させた状態にて計測を実施した。図3-(1)-B-④-6※10に評価結果を示す。

トリガー信号 が入力されることによりカソードゲート（赤線）が動作し、ランプ動作（緑線）が正常に機能していることが確認された。カソードゲートON後、300ns以降においてMCP-PMTからの信号（青線）が確認される。その後、MCP電圧（緑線）の上昇に追従して、MCP-PMT信号レベルが増加していくが、900ns付近から増加しないことが確認された。MCP-PMT信号

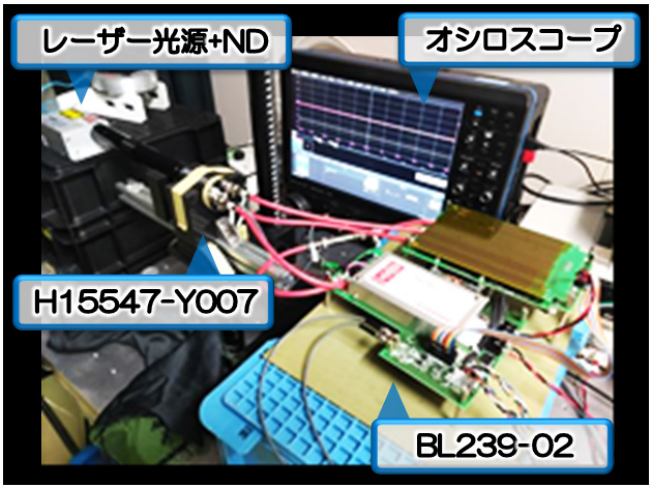


図 3-(1)-B-④-5
計測系｜光検出器評価｜MCP-PMT＋駆動電源
（「H15547-Y007」＋「BL239-02」）

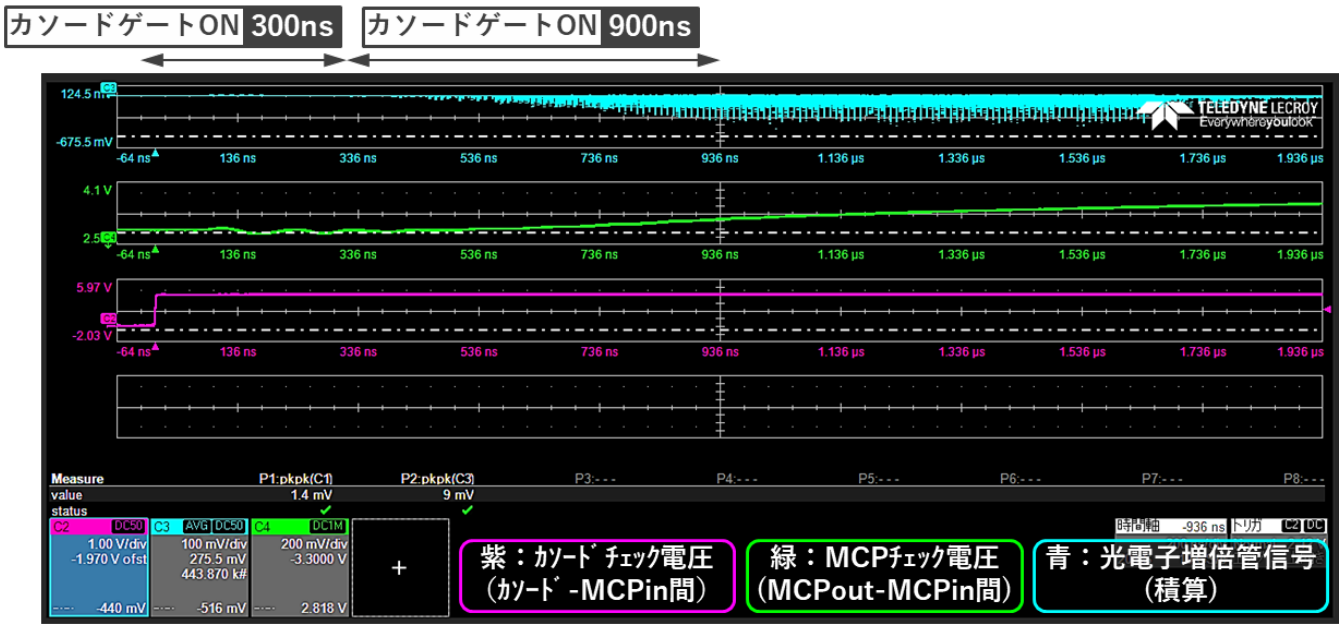


図 3-(1)-B-④-6　光検出器評価結果｜MCP-PMT＋駆動電源｜「H15547-Y007」＋「BL239-02」

（MCP-PMT信号の積算）が増加しない理由は、MCP抵抗による電流供給不足にあるが、当該事象は光検出器の仕様であり、光電子増倍管および駆動電源の不具合に依るものではない。MCP-PMT用駆動電源「BL239-02」と光電子増倍管「H15547-Y007」から構成される光検出器をGreenレーザー実証機に組込み実施する深海試験の結果を受け、カソードゲートのタイミングとGreenレーザー実証機の制御プロセスとの関連について、対処法を策定する。

※10 青線：光電子増倍管信号｜積算
緑線：MCPチェック電圧（MCPout-MCPin間）
紫線：カソードチェック電圧（カソード-MCPin間）

[(1)-B｜実施内容⑤｜MCP-PMT用駆動電源(実装機｜BL239-03)の製作と性能評価・実装評価]

＜概要＞

「(1)-B｜実施内容④」にて、光検出器（光電子増倍管／駆動電源）のGreenレーザー実証機への実装、および深海試験での動作確認を実施した。R6年度にて実施する深海試験における最終評価に備え、光電子増倍管用駆動電源の改良を実施した。本実施項目の最終目標である「レーザー光源の発振周期（50kHz以上）に対応したゲート動作」については、前項「(1)-B｜実施内容④」にて達成しているため、本項では、Greenレーザー実証機への実装性の向上について取り組んだ。

(a)MCP-PMT用駆動電源「BL239-03」（実装機）｜製作(実装性向上)および性能評価

先に製作したMCP-PMT用駆動電源「BL239-02」は電源基板×3枚から構成されており、Greenレーザー実証機への実装性に課題があった。そこで、実装性の向上を目的として当該電源の小型化を実施した。基板回路配置を再設計することにより、電源基板×2枚構成となる「BL239-03」を製作した。

製作した「BL239-03」と「3.(2)-B」に後記する光電子増倍管「H15547」とを組み合わせた光検出器（実装機）を使用し、高速増幅率可変機能について基本性能を評価した。カソードゲート信号（50kHz）を駆動電源へ入力し、この際の MCP 出力電圧を確認した。その結果、MCP アンプゲイン 2×10^3 に相当する MCP 印加電圧 1,000V から、MCP アンプゲイン 1×10^6 に相当する MCP 印加電圧 1,400V までの可変域を、設計仕様となる 400ns の間に実行していることが確認された(図 3-(1)-B-⑤-1)。Green レーザー実証機

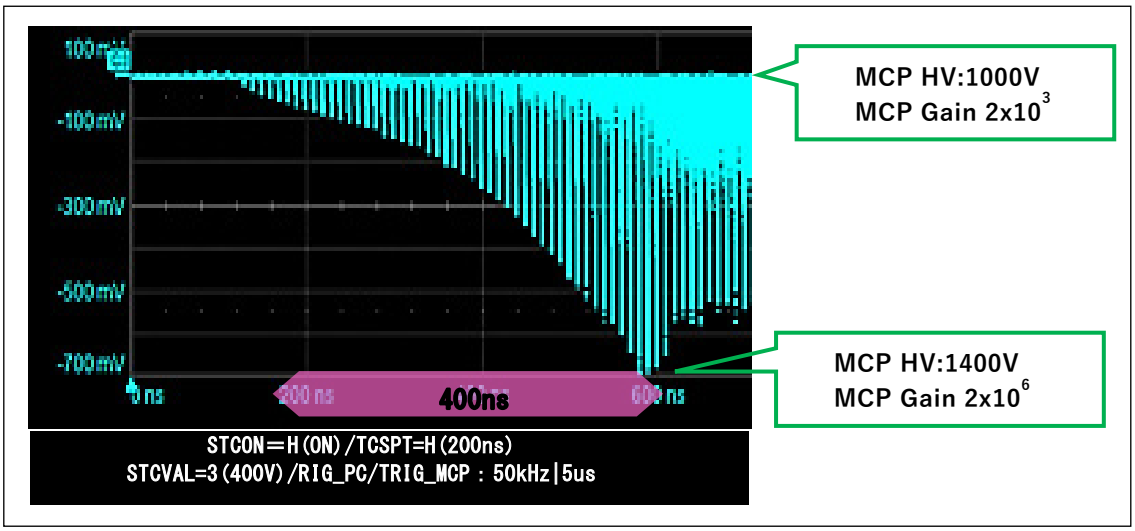


図 3-(1)-B-⑤-1　性能評価（MCP 印加電圧）｜駆動電源・実装機「BL239-03」｜例示（オシロスコープ）

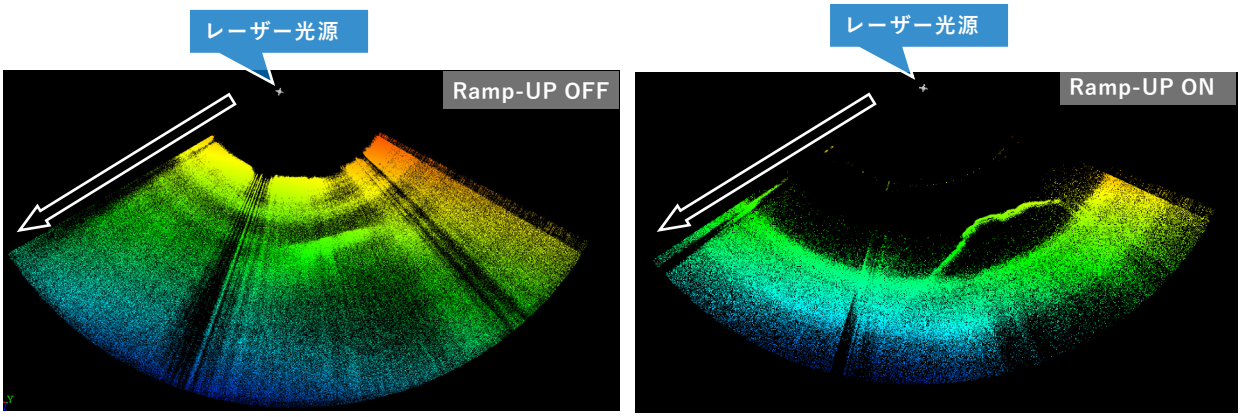


図 3-(1)-B-⑤-2　性能評価（MCP-PMT 増幅率の高速制御｜光検出器 AGC 動作(ランプアップ)動作評価）｜駆動電源・実装機「BL239-03」｜例示（Green レーザー実証機計測モニタ）

による最終評価（深海試験）では、当該駆動電源「BL239-03」を実装する。

(b)深海試験における機能検証｜Green レーザー実証機（光検出器 AGC）

後記する MCP-PMT「H15547」および MCP-PMT 用駆動電源「BL239-03」にて構成された光検出器を Green レーザー実証機に実装し深海試験を実施した（「3.(1)-A」参照）。レーザー光の海中伝搬における遠達性と検出性の向上を目指し、当該光検出器による距離減衰補正（光検出器 AGC）を実施する。海底に反射した微弱信号を適切に増幅させ、近傍散乱を含むその他の外乱光を除外することで、効果的に海底を検出する。図 3-(1)-B-⑤-2 に、深海試験における当該 AGC 機能（ランプアップ動作）の効果を示す。各図中の中心にレーザー発光点（レーザー光源）がある。当該発光点から各計測点までの直線長が伝搬距離を意味する。図中膨大数プロットされている各点がそれぞれレーザー反射に対する計測点であり、光検出器により検出した反射光の分布を表す。左図はランプアップ動作を行っていない場合（光検出器 AGC｜OFF）における計測点の分布となる。レーザー発光点近傍の反射も計測されており、海底反射を区別することが難しいことがわかる。右図はランプアップ動作を行っている場合（光検出器 AGC｜ON）における計測点の分布となる。レーザー発光点近傍の反射が計測されていなく、また海底反射に対して適切な減衰補正が施されることで、海底からの反射が明確化されている。本結果より、MPC-PMT 用駆動電源における MCP 印加電圧の高速制御（MCP-PMT 増幅率の高速制御）の効果が確認された。

(1)-C 三次元可視化画像からの特定形状認識

[(1)-C｜目的]

三次元可視化画像を構成する三次元情報の精度向上に取り組む。レーザー指向制御用ミラーの回転誤差に起因する画素ズレを補償することを目的とし、当該ズレ量を推定→補正するアルゴリズム（画像高精細化機能）を構築する。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(1)-C｜達成目標（終了時）]

レーザー指向制御用ミラーの回転誤差に起因する三次元可視化画像の画素ズレについて、本項目で構築する補正アルゴリズム（画像高精細化機能）の適用により、物性推定正解率約70%を目指すために必要なレベルまで当該画素ズレ量を改善することを目指す。

[(1)-C｜達成目標（終了時）の達成状況]

■画像高精細化機能により物性推定正解率約 70%に必要なレベルまで画素ズレ量を改善

：　**達成**

[(1)-C｜実施内容①｜画像補正アルゴリズム（画像高精細化機能）の構築]

＜概要＞

三次元可視化画像に生じる画素ズレの発生メカニズムを検証し、当該画素ズレを自動で補正するアルゴリズム（画像補正アルゴリズム）を試作した。当該アルゴリズムを実証機に適用し、実測データを用いて効果を確認した。

(a)画素ズレ発生メカニズムの検証

各実証機（グリーンレーザー実証機／UV レーザー実証機(「3.(2)-A」参照)）において、光源から照射されたレーザー光は折り返しミラーを介して回転機構となる 4 面ポリゴンミラーに照射される（図 3-(1)-C-①-1）。当該 4 面回転ポリゴンミラーは等角速度にて回転しており、各ミラー面に照射されたレーザー光がラインレーザーを形成して外界に照射（ラインスキャン）される。図 3-(1)-C-①-2 に当該画素ズレの概要を図示する。図中上側に示すように、仮に実証機をスキャン対象の直上に配置し、真上からスキャン対象をラインスキャンしていった場合、図中下側①に示すように白黒の境界部が直線的に二次元描画されることが理想である。しかし実際は、各ミラー面の製造精度に起因する機構アライメントの誤差

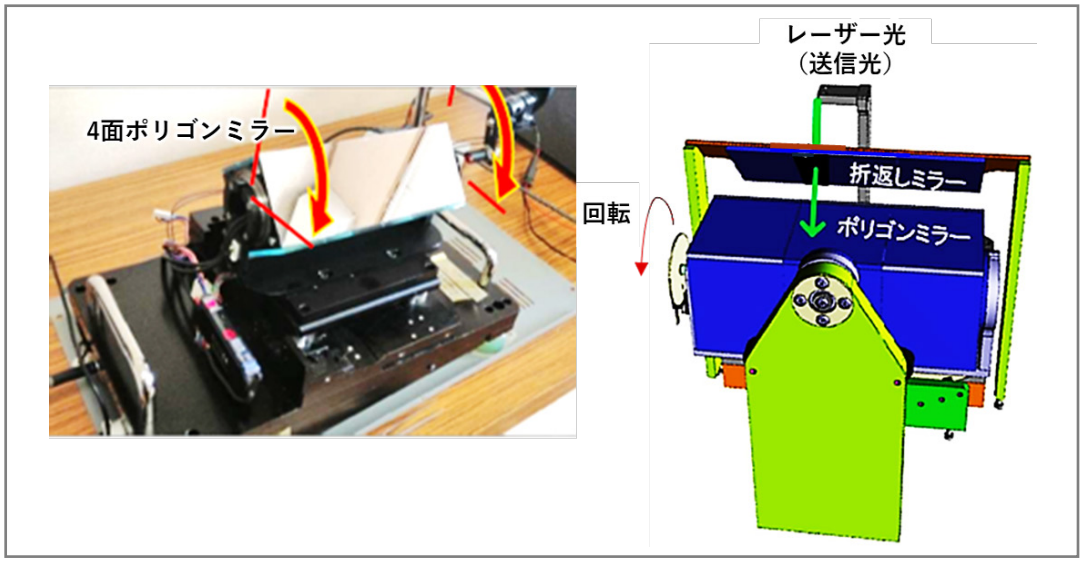


図 3-(1)-C-①-1 4 面回転ポリゴンミラー（等速回転機構）

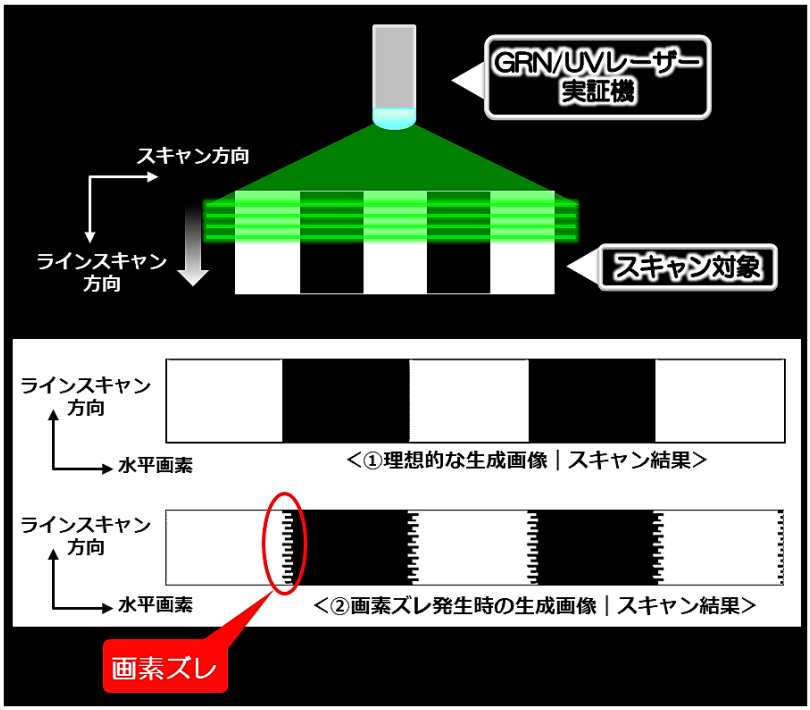


図 3-(1)-C-①-2
4 面回転ポリゴンミラーの機構精度に起因する画素ズレ

や、実証機の設置姿勢変化に伴うポリゴンミラーの僅かなアライメント変化等により、各ラインスキャンの計測開始位置（各ミラー面へのレーザー照射タイミング）が不定となり、図中同②に示すような画素ズレを発生させる。以上より、当該画素ズレは、4 面回転ポリゴンミラーの機構精度に起因しており、各ミラー面に対応するラインスキャン（4 本）毎に生じるズレパターンが繰り返し表れる。

(b)画像補正アルゴリズム（画像高精細化機能）の実装

4 面ポリゴンミラーの各ミラー面に対応した 4 本のラインスキャンに相対的に生じる画素ズレを補正することを目的として、画素ズレ補正アルゴリズ（画像高精細化機能）および補正用治具を設計・製作した。当該アルゴリズムを実行するためのユーザインタフェースは作業性を考慮し、各実証機（Green レーザー実証機／UV レーザー実証機）の制御ソフトウェア

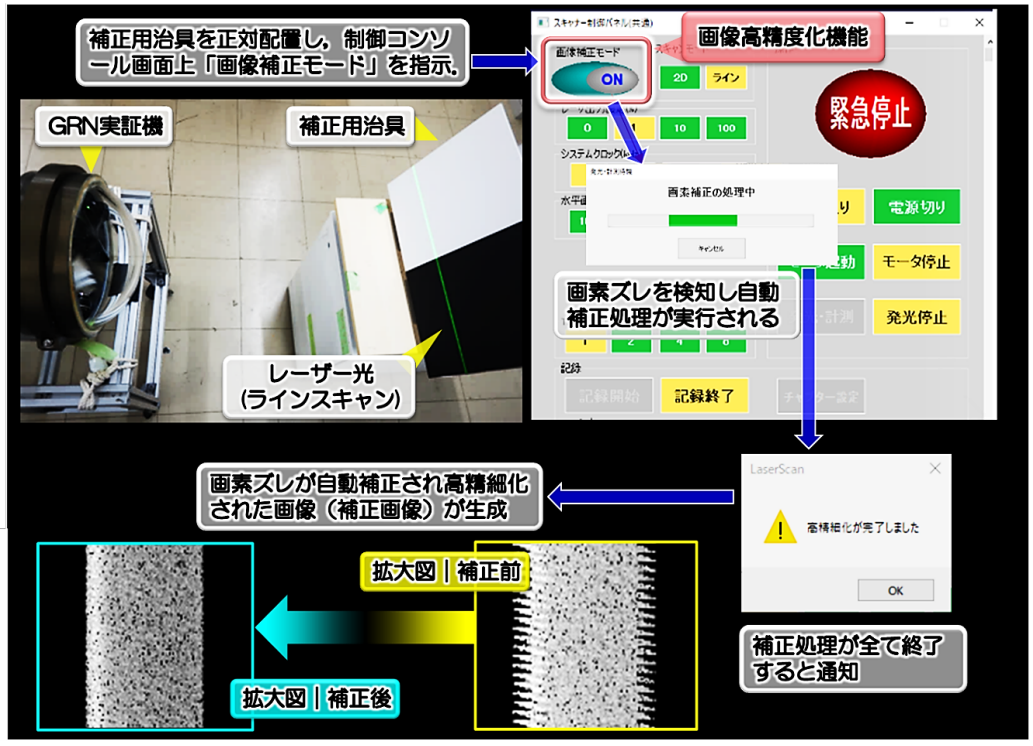


図 3-(1)-C-①-3
画像補正アルゴリズム（画像高精細化機能）の実行プロセス

のコンソール画面に組み込む構成とした。当該コンソール画面を含む画像補正アルゴリズムの実行プロセスを図 3-(1)-C-①-3 に示す。本機能を実行する事前に、各実証機のレーザー照射方向と正対するように補正用治具が配置される（図 3-(1)-C-①-3｜左上）。補正用治具は反射率の高い白色のパネルと反射率の低い黒色のパネルから構成され、正対配置した補正用治具の白色と黒色の境界とラインスキャンとが直交する。当該コンソール画面の左上にある「画像補正モード｜ON」をクリックすると、「画素補正の処理中」のダイヤログが表示され、自動的に補正処理（画像補正アルゴリズム）が実行される。処理が終了すると、このダイヤログが閉じて、「高精細化が完了しました」のダイヤログが表示され（図 3-(1)-C-①-3｜右下）、補正処理を終了する。これにより、コンソール画面からの簡便な操作のみで、画素ズレを自動的に補正する機能が実装された。

(c)画像補正アルゴリズム（画像高精細化機能）の処理フロー

4 面回転ポリゴンミラーの機構精度に起因する画素ズレを、自動的に補正するアルゴリズム（画像補正アルゴリズム）の処理フローを図 3-(1)-C-①-4 に示す。補正用治具を 2D スキャンモードにより計測することで、当該治具の白黒境界に画素ズレが表出された可視化画像（2D 強度画像）が生成される（図中｜a）。当該強度画像に対して二値化処理することで、画素ズレの境界を明確化させ、境界を構成する画素を検出し、その位置を取得する（図中｜b・c）。4 面ポリゴンミラーの最終ミラー面（4 番目のミラー）に照射されるレーザー光の照射タイミングを大きく変更することにより、当該ミラー面に対応する計測結果（大きく変

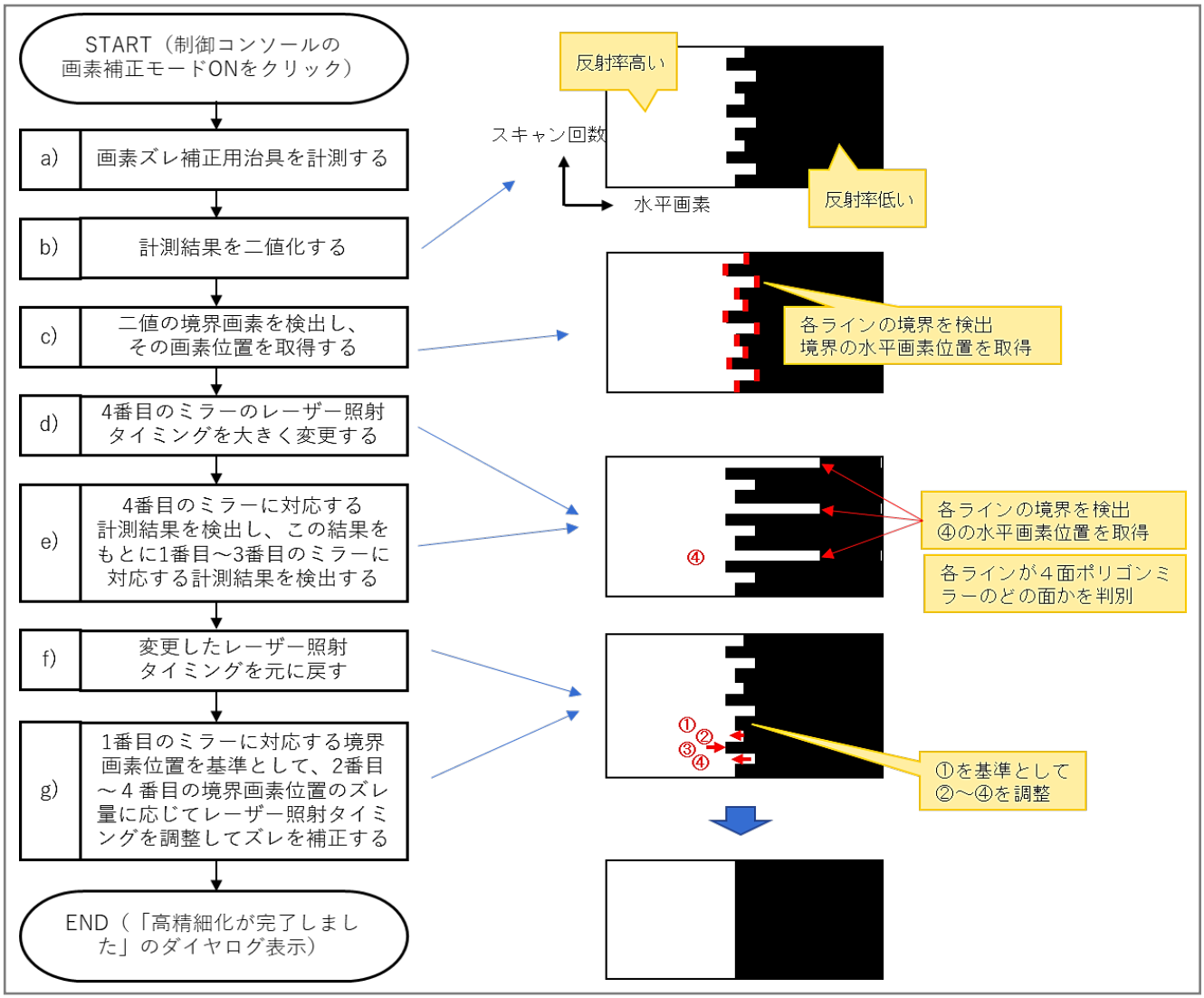


図 3-(1)-C-①-4 画像補正アルゴリズム（画像高精細化機能）の内部処理フロー

化したラインスキャン結果）を検出する。これによりその他のミラー面（1 番目～3 番目のミラー）に対応するラインスキャン結果をそれぞれ検出する（（図中｜d・e）。これにより全てのミラー面に対応するラインスキャン結果が把握される。変更したレーザー照射タイミング（4 番目ミラーに対応するレーザー照射タイミング）を元に戻す（図中｜f）。1 番目のミラーに対応する計測結果において、境界画素となる画素位置を基準位置として定義する。2 番目～4 番目のミラーに対応するラインスキャン結果の境界画素の位置と基準位置とのズレ量を取得する。当該ズレ量に応じて、2 番目～4 番目のミラーに対応するラインスキャンのレーザー照射タイミングを調整する（図中｜g）。補正治具の計測結果より以上の処理を自動で実施することで、画素ズレが補正される。

(d)実測データを用いた効果の確認｜画像補正アルゴリズム（画像高精細化機能）

画像高精細化機能の効果を、実海域での実測データを用いて確認した。実施項目「3.(2)-A｜複数レーザーにおける海中伝搬特性」に示す UV レーザー実証機を適用した深海試験の計測結果（生成画像）に対し、当該機能による画素ズレ補正を実施した。深海試験では、水深約 850-900m の深海底に設置した海底モックアップ 5 器（MK02｜MK03｜MK04｜MK05｜MK06）を、UV レーザー実証機にて計測した。当該試験において UV レーザー実証機により生成された画像（2D 強度画像）を図 3-(1)-C-①-5～図 3-(1)-C-①-9 にそれぞれ例示する。各図において(i)は補正処理前の強度画像を、(ii)は補正処理後の強度画像である。補正処理前の画像(i)では、各海底モックアップ・格納ケースの両端部に波状の画素ズレが確認される。一方、補正処理後の画像(ii)を確認すると、どちらの海底モックアップについても、画像高精細化機能による画素ズレ補正の効果は顕著であり、当該格納ケースの両端部にみられた画素ズレが改善されている。また、画素ズレにより元画像（補正前の画像）に生じていた全体的な歪みも効果的に補正されている。実際の海底および既知物材を適用する物性推定において、計測結果（可視化画像）の品質向上は、推定性能そのものの向上に繋がり、本結果より本機能の有効性および実用性が示された。

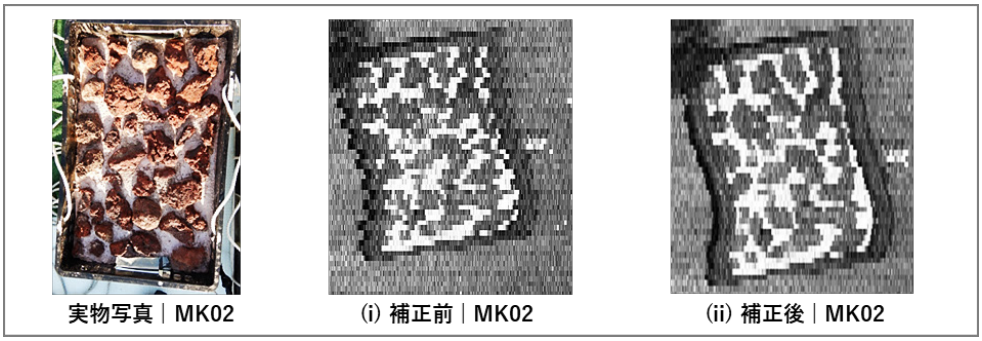


図 3-(1)-C-①-5 画像高精細化機能による画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ UV レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK02）

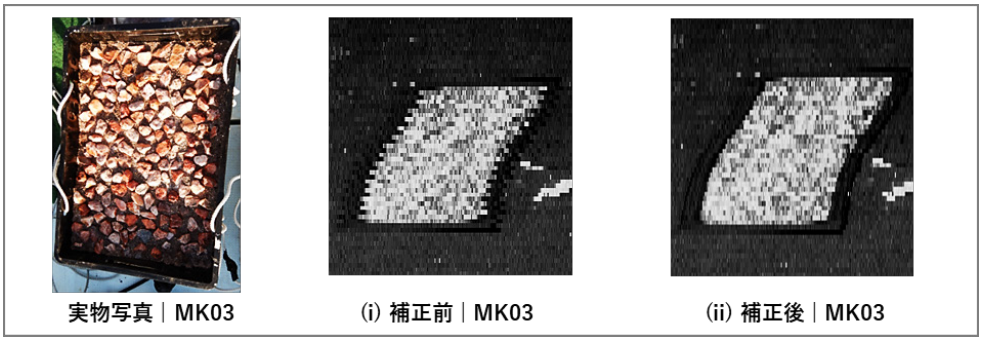


図 3-(1)-C-①-6 画像高精細化機能による画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ UV レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK03）

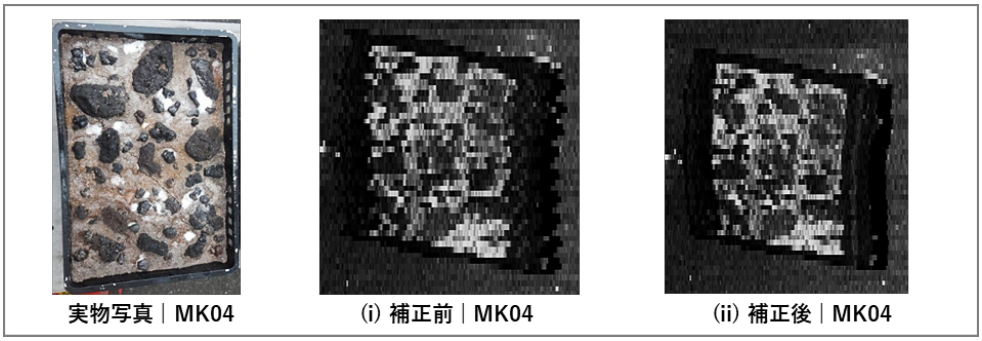


図 3-(1)-C-①-7 画像高精細化機能による画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ UV レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK04）

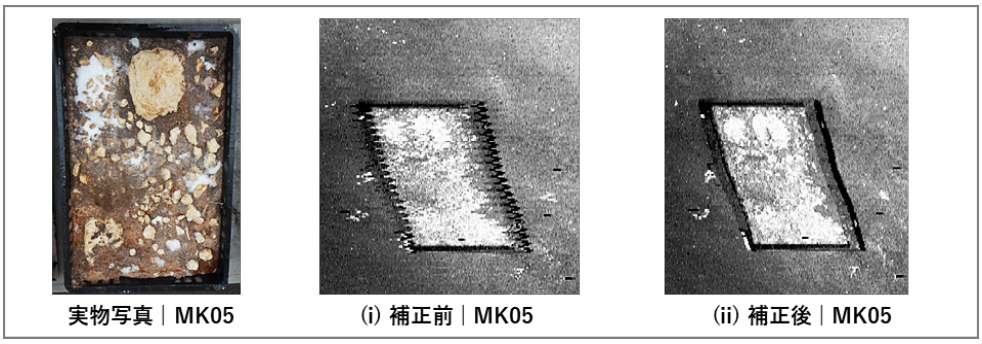


図 3-(1)-C-①-8　画像高精細化機能による画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ UV レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK05）

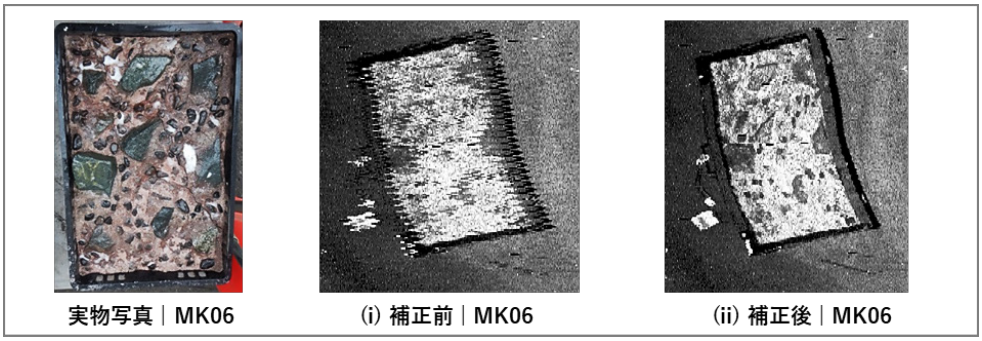


図 3-(1)-C-①-9　画像高精細化機能による画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ UV レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK06）

[(1)-C｜実施内容②｜深海試験用補正治具とオフライン画素ズレ補正機能]

＜概要＞

「(1)-C｜実施内容①」において、所定の補正用治具を計測したデータから画素ズレ量を自動検出し、当該ズレ量に応じて計測時のレーザー照射タイミングを調整するアルゴリズム（画像補正アルゴリズム）を構築した。当該アルゴリズムを深海試験において適用する際に課題となる太陽光の影響について、大幅に軽減する専用の画素ズレ用補正治具を新たに製作し、深海試験時の作業効率を向上させた。また、光学系の製造精度以外の原因により生じる画像の歪み（ex｜海中探査機の振動／動揺に起因する画素ズレ等）について適宜対応できるよう、オフラインによる画素ズレ補正機能を追加実装した。これにより当該画像歪みが補正される。これら各実施内容について、実海域での実測データにおいて効果を確認した。

(a)深海試験用の画素ズレ補正治具の製作

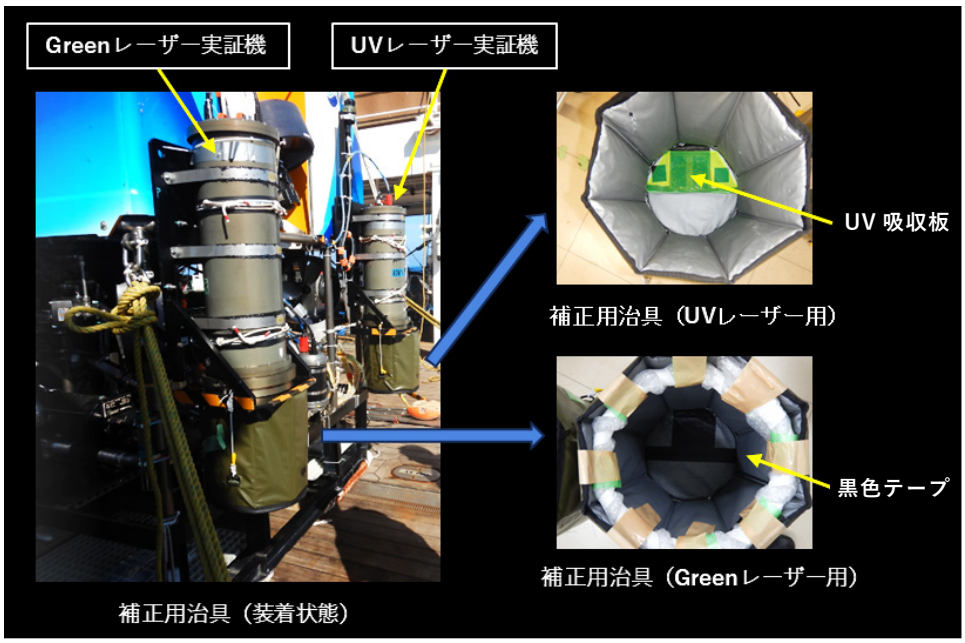


図 3-(1)-C-②-1 深海試験用の画素ズレ補正用治具（Green レーザー用／UV レーザー用）

深海試験において Green レーザー実証機および UV レーザー実証機は、暴露甲板（屋外）に配置される海中探査機に固定設置される。そのため、従来の画素ズレ補正用治具では太陽光の影響により、白黒の境界部の検出が比較的に困難となり、適切な画素ズレ補正ができない状況が示唆される。そこで、深海試験専用（屋外専用）の画素ズレ補正用治具を検討・製作した。当該治具は、図 3-(1)-C-②-1 に示すように、各実証機のドームレンズ（レーザー照射インタフェース）を完全に覆うカバー構造にしており、太陽光がドームレンズ内部（内部光学系）に侵入しないようにした。画素ズレ補正を行うには計測した強度画像を二値化処理して画素ズレの境界を明確化することが必要になる。そのため、Green レーザー用の補正用治具では、黒色テープにて境界部を作成し、Green レーザーに対する境界部での反射強度の差が明確化するようにした。一方、UV レーザー用の補正治具では、UV 波長光を減衰させる吸収板にて境界部を作成し、UV レーザーに対する境界部での反射強度の差が明確するようにたした。これにより、Green レーザーおよび UV レーザーそれぞれにおいて、深海試験専用の画素ズレ補正治具を適用することにより、気象・海象に影響することなく船上（屋外）において、境界部を明確に検出することが可能となり、画素ズレ補正が適切に実施される。

(b)オフラインによる画素ズレ補正機能の追加実装

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搭載して深海底を計測する際、海中探査機の振動・動揺により、生成された画像に歪み（画像歪み）が生じる場合がある。当該画像歪みを可能な限り軽減するため、計測結果（生成画像）に対してオフラインにて、PC 上に表示された生成画像を確認しながら、当該画像歪みを補正する機能（画像歪み補正機能）について検討し、追加実装した。

当該補正機能を実行するためのユーザインタフェースは、作業性を考慮し、各実証機の描画ソフトウェアに組み込む構成とした。描画ソフトウェアの表示画面を図 3-(1)-C-②-2 に例示する。「生成画像表示画面」のメニューより「画素ズレ補正」を選択すると、同図上部に示すような「画素ズレ補正」ダイヤログが表示され、生成した画像に対してオフラインによる画素ズレ補正が実行できる。画素ズレ補正の手順は、「↑」「↓」ボタン押下によって補正したいスキャンラインを選択し（「生成画像表示画面」上に黄色線にて表示される）、「◂」「▸」ボタン押下によって該当ラインの画素を左右に任意に移動させて画素ズレをマニュアルにて補正する。これにより画素ズレに起因する画像歪みが補正される。

図 3-(1)-C-②-2 描画ソフトウェアの生成画像表示画面と画素ズレ補正ダイヤログ

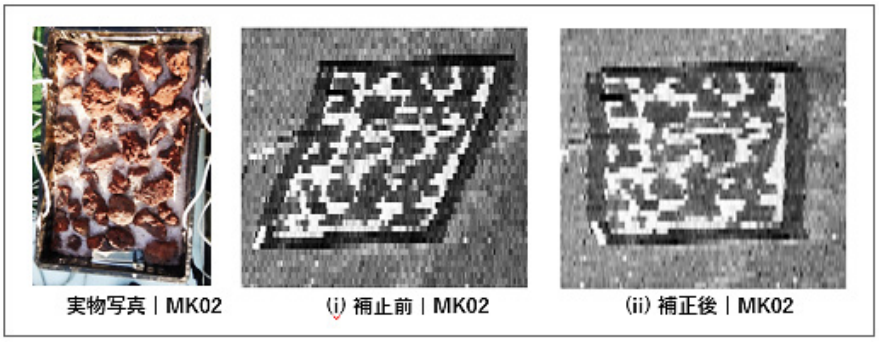


図 3-(1)-C-②-3　深海試験データでのオフライン画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ UV レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK02）

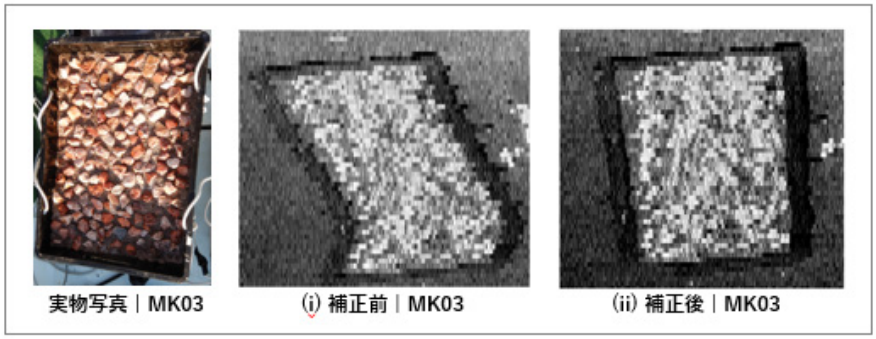


図 3-(1)-C-②-4　深海試験データでのオフライン画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ Green レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK03）

(c)実測データを用いた効果の確認｜オフライン画素ズレ補正機能

深度約 850-900m に設置した海底モックアップ 6 器（MK02｜MK03｜MK04｜MK05｜MK06｜MK10）を Green レーザー実証機および UV レーザー実証機で計測した強度画像を図 3-(1)-C-②-3～図 3-(1)-C-②-8 にそれぞれ例示する。左の画像(i)がオフラインでの画素ズレ補正を行う前の画像で、右の画像(ii)がオフラインでの画素ズレ補正を行った後の画像である。各図において補正処理前の画像(i)は、計測時の海中探査機の動揺により、画像に歪みが生じ

ている。一方、オフラインでの補正処理後の画像(ii)では、画素ズレ補正により動揺の影響が軽減されていることがわかる。当該機能により、実際の計測対象をより高品質に再現できること期待され、物性推定アルゴリズム（「3.(3)-A」参照）に適用する上で有効なデータとなる。

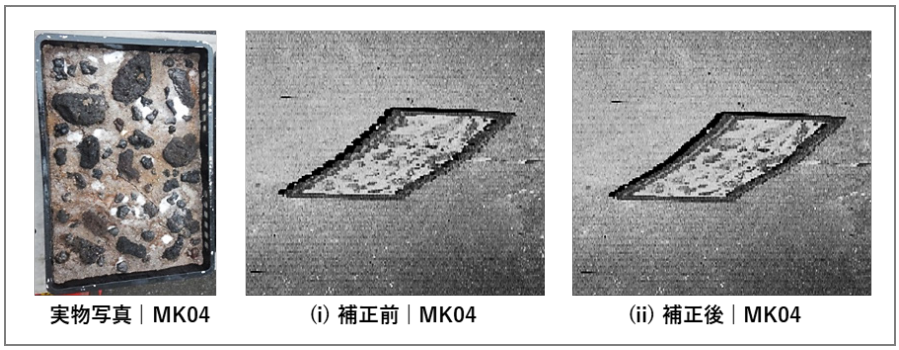


図 3-(1)-C-②-5　深海試験データでのオフライン画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ Green レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK04）

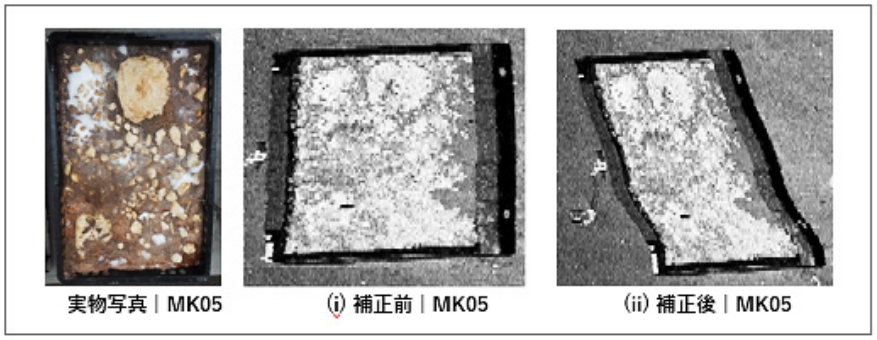


図 3-(1)-C-②-6　深海試験データでのオフライン画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ UV レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK05）

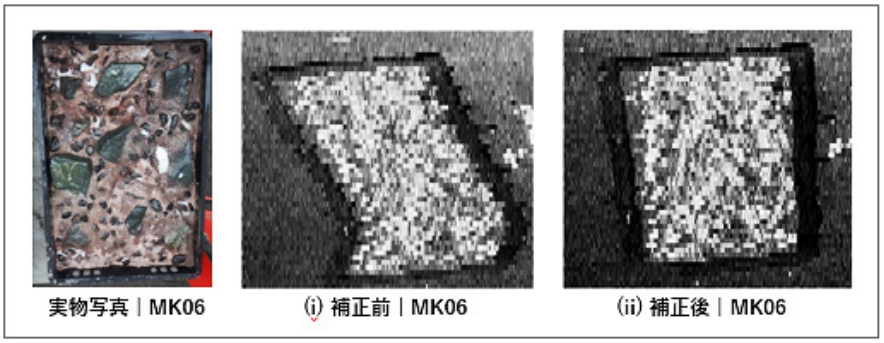


図 3-(1)-C-②-7　深海試験データでのオフライン画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ UV レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK06）

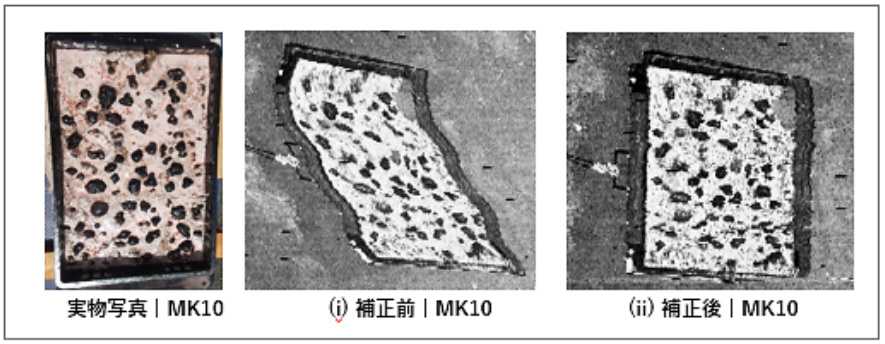


図 3-(1)-C-②-8　深海試験データでのオフライン画素ズレ補正の効果
（深海試験結果 ｜ UV レーザー実証機 ｜ 海底モックアップ MK10）

(2)-A 複数レーザーにおける海中伝搬特性解析

[(2)-A｜目的]

反射率を解析するためには受信信号の飽和を抑制するために各AGCの調整が必須であり、距離減衰補正は環境パラメータに依存するため、試験結果に基づき適切な減衰補正曲線を構築し組み込む。これによる受信出力と各AGC設定量から反射率の推定を行う。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(2)-A｜達成目標（終了時）]

実証機を構築し実環境において試験を実施する。各AGCを適用して補正演算することにより、環境パラメータに依存しないレーザー反射率データを生成させる。これを物性推定アルゴリズムに適用することで機械学習の最適化を行い、約70%の物性推定正解率を目指す。

[(2)-A｜達成目標（終了時）の達成状況]

■実証機を構築し実環境において試験を実施する。 : **達成**
■環境パラメータに依存しないレーザー反射率データの生成 : **達成**
■生成したデータを物性推定アルゴリズムに適用して機械学習の最適化 : **達成**

[(2)-A｜実施内容①｜レーザー反射率に関する基礎データの取得]

(a)評価用パネルを用いた基礎データ取得

レーザー測距現行機を使用し、水槽試験・浅海試験によりレーザー反射率の基礎データを取得した。浅海試験では、金属板を使用した滑らかな表面パターンと、金属板に凹凸素材を張り付けた表面パターンの 2 種類の評価用パネルに対し、13 階調のグレースケールに加え、27 種類のカラー色を塗装した（計 40 色×2 種表面パターン）。図 3-(2)-A-①-1 に基礎データ取得に用いた評価用パネルを示す。当該評価用パネルを 8 色組毎にフレームに取り付け、レーザー反射率を強度情報として計測した。水槽試験ではグレースケールの 13 色×2 種表面パターンのみを測定し、浅海試験では 40 色×2 種表面パターンを複数の組み合わせで測定した。各測定では基準パネル（基準色＋基準表面パターン）を定め、当該基準パネルと他の評価用パネルとの反射率を相対的に比較・評価することで、環境条件（濁度や太陽光の反射等）や測定距離の差異、その他外乱要因による差異についての定量性を担保した。

ここで、評価用パネル 1～13（N95～N10）はグレースケールであり、番号(数字)は明度を示す。明度は純黒(0)～純白(100)を意味し、番号が大きいほど明度が高い。評価用パネル 14～40 に関して、最初の数字 2 桁が色相を示し、赤、黄、緑、青、紫などの色彩を意味する。色相はマンセル表色系・色相環図（図 3-(2)-A-①-2）において、5R＝0～9、5YR＝10～19、5Y＝20～29、5GY＝30～39、5G＝40～49、5BG＝50～59、5B＝60～69、5PB＝70～79、5P＝80～89、5RP＝90～99 に相当する。5R が赤色系中心であり、この近傍の 5YR、5RP にそれぞれ赤色成分が含有される。また、5R と対向するのが緑色計の 5BG となる。

当該評価用パネルを用いた水槽試験・浅海試験の計測結果（強度情報）を、マンセル表色系・色相関図中に例示する（図 3-(2)-A-①-3）。レーザー測距現行機における強度情報の最大値は 10,000（≒0.61V）であり、ハイフン前の数値は強度値を、ハイフン後の数値は明度を示す。以下に、取得した各基礎データから得られた知見を示す。

- レーザー測距現行機の最小強度は平均値で A/D 入力 0.1Ｖ程度が限界となる。
  （→ レーザー測距現行機が計測可能な強度情報の最大値は 10,000(≒0.61V)であり、最少強度出力は約 2,000 程度のため「0.61/{(10000)/2000}＝0.122V」となる。）
- 同一の評価用パネルであっても、取得される強度情報（計測値）の差は半分以下から数倍まで変化するため（計測結果には大きなバラつきが生じるため)、計測対象に対して単一の強度情報で反射率を特定することは困難である。
  （→ 図 3-(2)-A-①-4 に当該バラのつきある計測結果を例示する。）

図 3-(2)-A-①-1 塗装色（40 色）＋表面パターン（2 種類）｜評価用パネル（計 80 種類）

- 強度情報の変動幅は、強度値（反射強度）が高い場合は小さく、強度値（反射強度）が低い場合は大きい。
  （→ 後記[(2)-A｜実施内容②] 図 3-(2)-A-②-2 ／図 3-(2)-A-②-3 参照）
- 強度情報の平均値では、色差と強度情報に相関がある一方で、±10%程度の変動幅を有するため、微細な色差との相関を強度情報で判断することは困難である。
  （→ 図 3-(2)-A-①-4 参照）
- 「白色系・明色系・薄青色」の反射強度が高く、「黒色系、暗色系、赤色系」の反射強度が低い傾向が明確にある。

図 3-(2)-A-①-2
マンセル表色系・色相環図

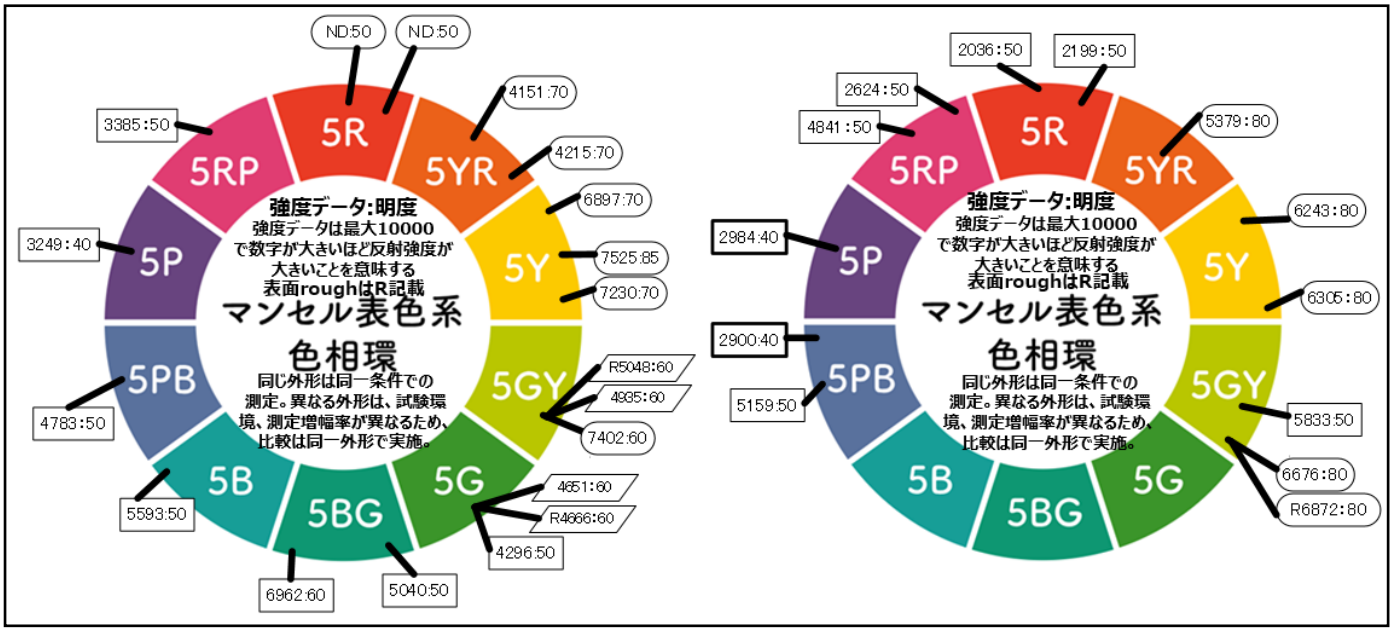


図 3-(2)-A-①-3 評価用パネル計測結果｜例示｜水槽試験・浅海試験｜マンセル表色系・色相環図

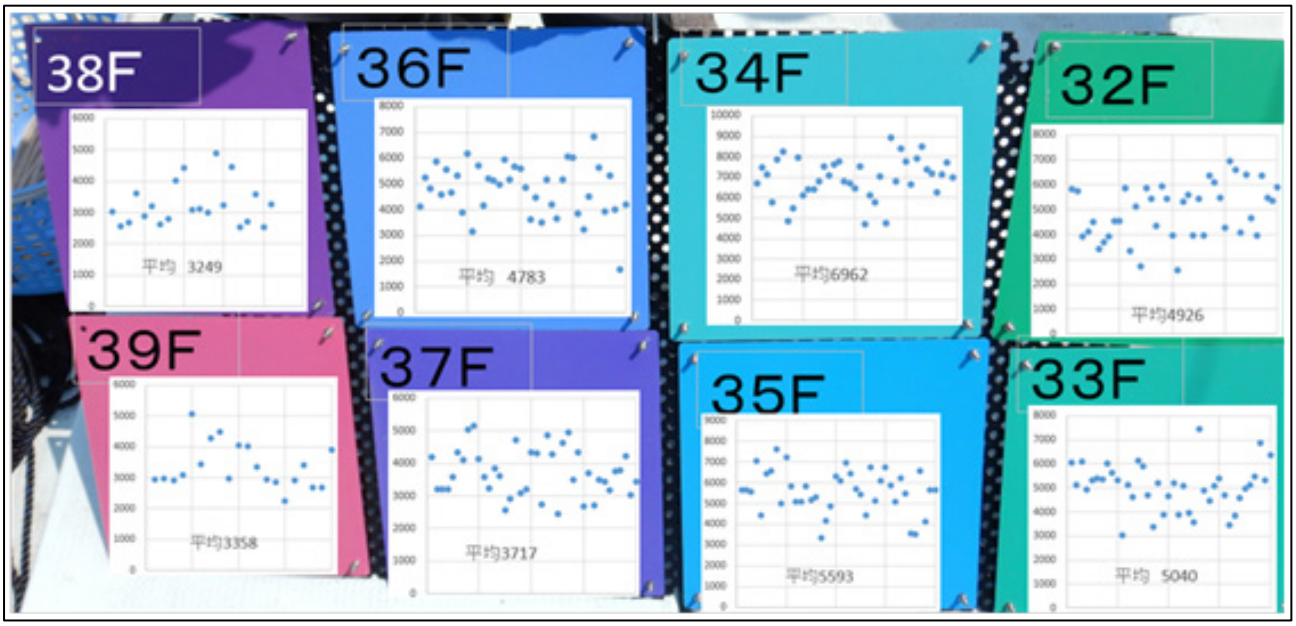


図 3-(2)-A-①-4　計測結果｜例示｜評価用パネル 32―39（F:滑らか）｜浅海試験

（→ マンセル表色系・色相環図+強度情報（図 3-(2)-A-①-3）から、5BG に対する反射強度（強度情報）が最も強く、これに対向する 5R が最も反射強度が弱い。）

- 補完色あるいは同系統の色彩であっても、赤色系が多く含まれている程度により、反射強度は低くなる。
  （→ マンセル表色系色相環図+強度情報（図 3-(2)-A-①-3）より、例えば、5YR や 5RP よりも 5R の反射強度が低く、5YR よりも 5RP のほうが反射強度は低い。）

[(2)-A｜実施内容②｜光学システム（反射率評価機）の製作]

＜概要＞

光学系システム（反射率評価機）の詳細設計と試作を実施し、当該評価機において距離減衰値を信号処理部で取り込む機能を構築した。当該評価機を用いて反射率の物理特性について水槽試験を実施することで評価するとともに、基本機能について確認した。併せて、レー

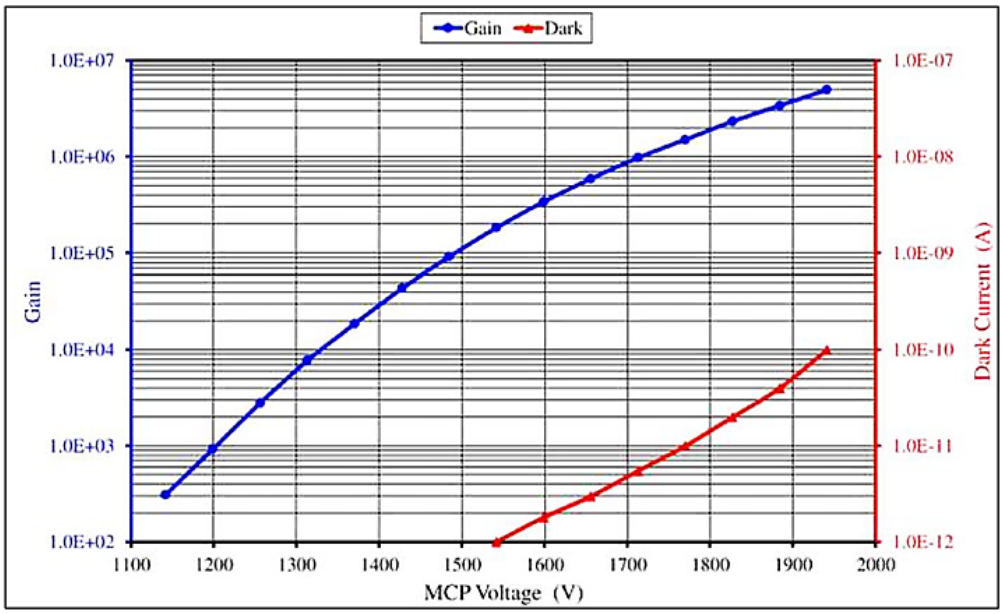


図 3-(2)-A-②-1 MCP-PMT 特性

ザー測距現行機を適用した浅海試験を実施し、海水環境における反射率の基礎データを取得した。当該基礎データを解析することで、環境条件に対する適切なパラメータ調整に対する知見を得た。併せて、反射率評価機に組込まれる高速 AGC 基板の効果により、15dB 以上の距離減衰補正性能を確認した。ここで、反射率評価機と「(1)送受光系制御の最適化」に記載する伝搬時間評価機とは、ハードウェアとして同機を意味している。

(a)高速 AGC 基板の試作

高速 AGC の目的は 36dB 以上の距離減衰補正を担保することであり、当該補正は光検出器での距離減衰補正機能（→光検出器高速 AGC）および光検出器後段におけるアナログアンプ部での距離減衰補正機能（→高速 AGC）にて実施する。図 3-(2)-A-②-1 に本研究において新規に開発・実装を進めている MCP-PMT のゲイン特性を示す。当該 MCP-PMT 特性から 20dB（電流 Gain1 桁）～40dB（電流 Gain2 桁）の補正が実現可能な仕様とした。高速 AGC に要求されるアナログアンプ部での距離減衰補正仕様は 16dB（36dB-20dB）以上とされる。他方、光検出器高

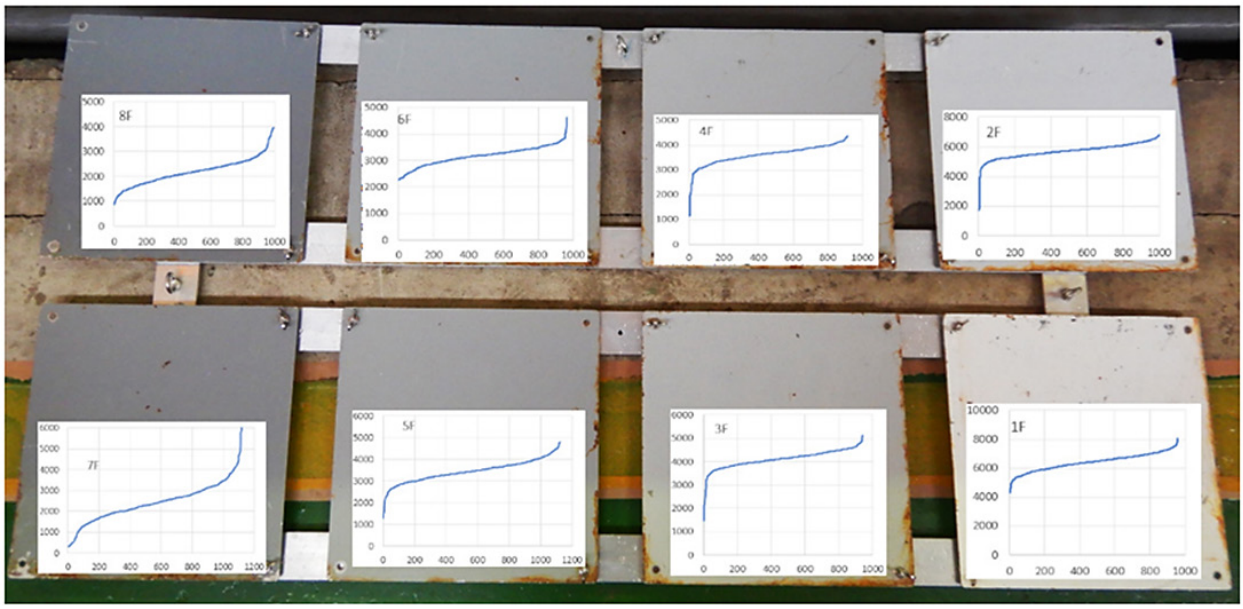


図 3-(2)-A-②-2　試験結果｜水槽試験｜評価用パネル・グレースケール
（縦軸：反射強度　横軸：測定点数(降順)）

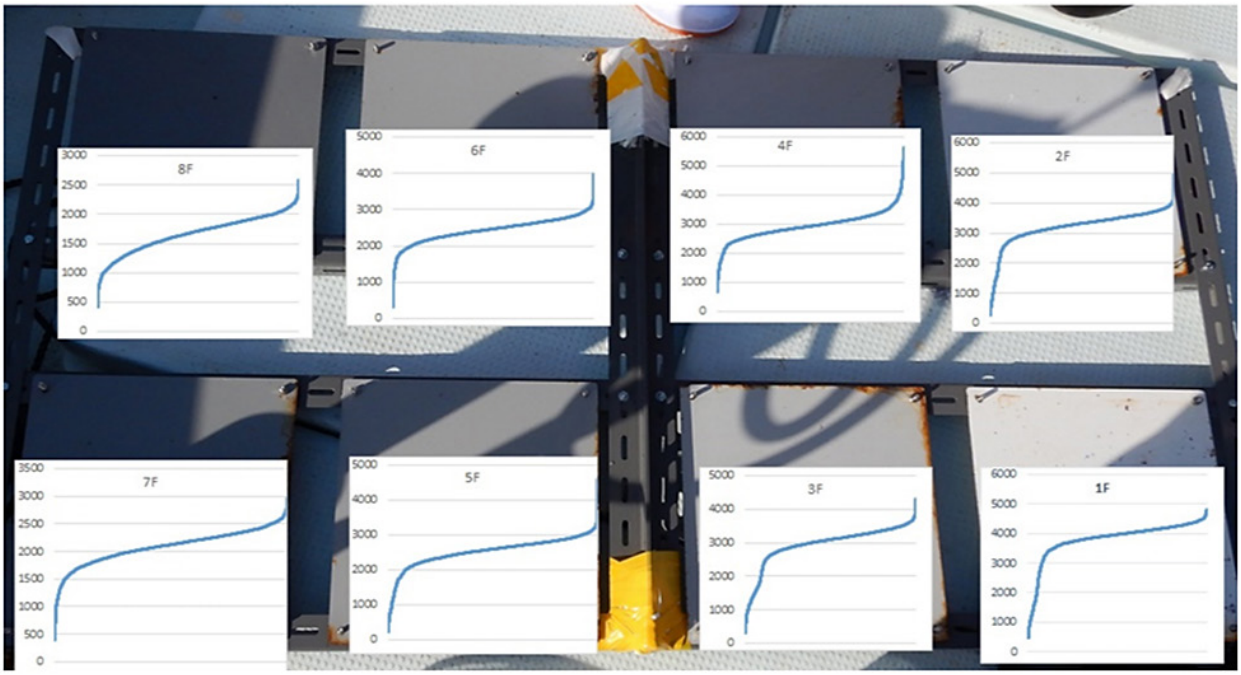


図 3-(2)-A-②-3　試験結果｜浅海試験｜評価用パネル・グレースケール
（縦軸：反射強度　横軸：測定点数(降順)）

速 AGC の性能が満足できない可能性を考慮し、高速 AGC の設計段階における補正仕様を 30dB 以上と設定した（要求仕様 16dB に対し 14dB のマージンを確保）。結果として試作した高速 AGC では、33dB の距離減衰補正が可能であることを確認した。光検出器高速 AGC の増幅率（実際性能）が明確になった後（完成・実装した後）、全体系として適切な増幅率を調整する。

(b)反射率評価機の水槽試験／浅海試験

光検出器後段のアナログアンプ部での距離減衰補正機能（→高速 AGC）および反射率補正機能（→ワンパルス AGC）を組み込んだ反射率評価機の機能確認、および当該評価機による反射対象の色差に起因する反射率傾向を評価することを目的として、水槽試験および浅海試験を実施した。評価用パネルを計測対象とし、反射光検出が困難（光学吸収が高い）なグレースケールの色差（黒色程度）による反射率の計測を実施した。各試験にて使用した評価用パネル（グレースケール）およびセットアップは図 3-(1)-A-③-2、図 3-(1)-A-③-3 と同様である。水槽試験の結果を図 3-(2)-A-②-2 に、浅海試験の結果を図 3-(2)-A-②-3 に示す。各試験の結果、当該系統色の色差を良好に検出することが実現され、併せて検出値の分散程度も、「(2)-A｜実施内容①」に示すレーザー測距現行機を適用した試験結果と比較すると大幅に改善されることを確認した。

(c)実証機光源の検討

異なる波長のレーザーを使用した実証機（伝搬時間・反射率実証機）を製作する。そこで 2 種類のレーザー光利用について検討を進めた。1 種類は伝搬時間・反射率評価機に採用し各技術検証を進めている 532nm 波長帯のグリーンレーザーであり、もう 1 種類は 355nm 波長帯の紫外レーザーである。紫外レーザーを採用する理由としては第一に、既にレーザー測距現行機および伝搬時間・反射率評価機を含め、これまでに多くの実績と知見を有する 532nm 波長帯のグリーンレーザーに対して、十分に波長が離れていることが挙げられる。実施項目「3.(2)-A｜複数レーザーにおける海中伝搬特性解析」の成果利用先として、「3.(3)-A｜機械学習による物性推定アルゴリズムの構築」「3.(3)-B｜複数種の物材に対する物性推定試験」があり、異なる波長のレーザーを適用した海底反射を検出・分析することにより、海底の物性を推定（海底質を類別）することがある。当該物性推定では、採用が決定している 532nm 波長レーザーとは明確に異なる反射特性が取得されることが期待され、532nm 波長レーザーと近接する波長域

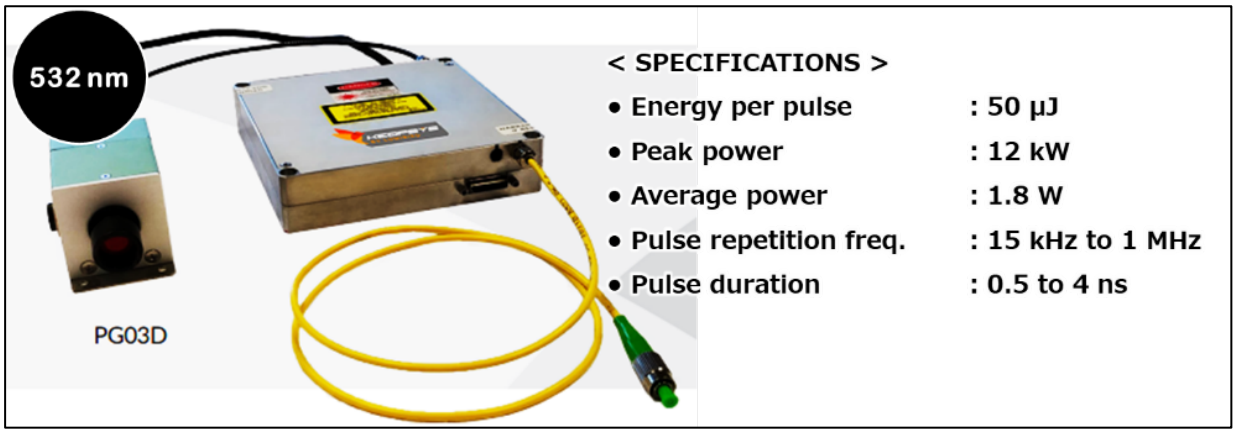


図 3-(2)-A-②-4　レーザー光源（532nm｜伝搬時間・反射率実証機搭載用｜Green レーザー実証機）

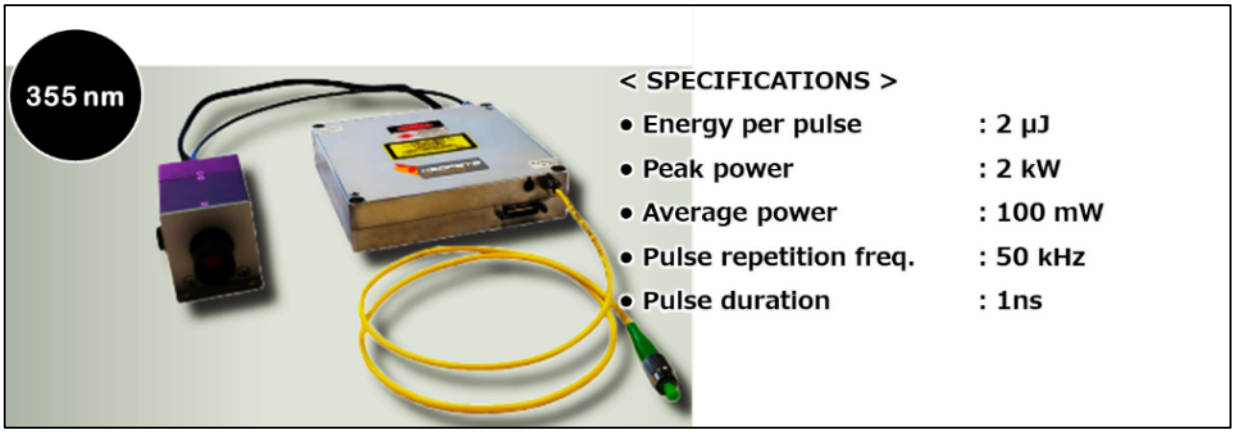


図 3-(2)-A-②-5　レーザー光源（355nm｜伝搬時間・反射率実証機搭載用｜UV レーザー実証機）

ではなく、出来るだけ離れた波長域のレーザー光源が望ましい。併せて、実証機への実装可能性（耐圧容器格納｜電源管理等）と、これに応じる光源仕様（大出力、小型・軽量、寸法、入手性等）について検討を重ね、355nm 波長レーザーの選定に至った。また気中では、紫外光を用いた物材の探傷利用例などがあることから、海底の微小な特異点検出等、気中に類異した効果について期待している。併せて、紫外光に対する蛍光特性などの海底の特異な反射が検出されることが期待される。図 3-(2)-A-②-4、図 3-(2)-A-②-5 に伝搬時間・反射率実証機への採用を予定する各レーザー光源を示す。両レーザー光源ともにピークパワーが kW クラスの大出力レーザーであり、最大約 60m（往復 120m）の長距離レーザー測距に対しては 12kW（Peak-PW）というレーザー光の海中利用としては最大レベルの出力となる 532nm 波長レーザーが適用される（レーザー測距現行機：Peak-PW：5kW）。物性推定に適用される 355nm 波長レーザーに関しても、2kW（Peak-PW）もの高出力レーザー光源の適用を想定しており、可視光外となる紫外レーザーの海中における伝搬特性（反射率特性・距離減衰特性）の検証と平行して実証機開発を進めてく。

[(2)-A｜実施内容③｜UVレーザー実証機の製作]

＜概要＞

紫外線レーザー光源（波長：355nm）を組込む伝搬時間・反射率実証機（以降、「UV レーザー実証機」）を製作し、水槽試験および浅海試験を実施した。その結果、距離減衰補正性能として 33.09dB の向上（目標：15dB）を実現した。

(a)UV レーザー実証機

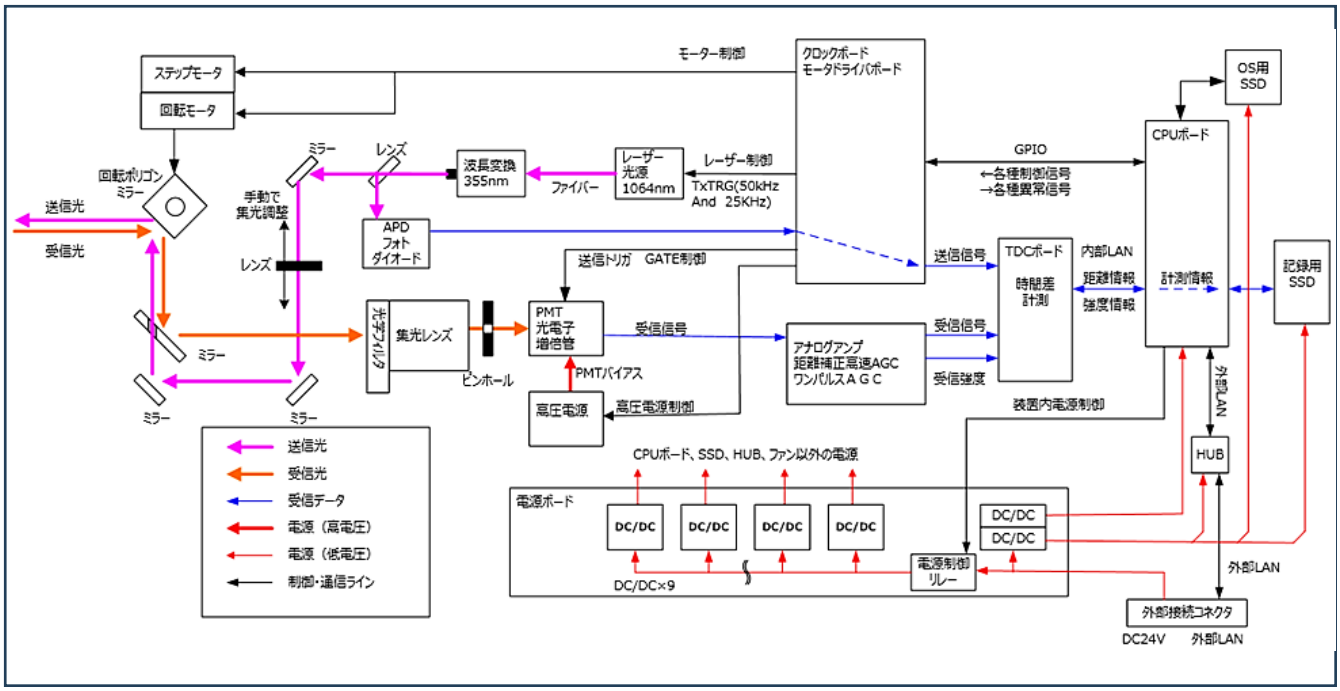


図 3-(2)-A-③-1　システムブロック図（UV レーザー実証機）

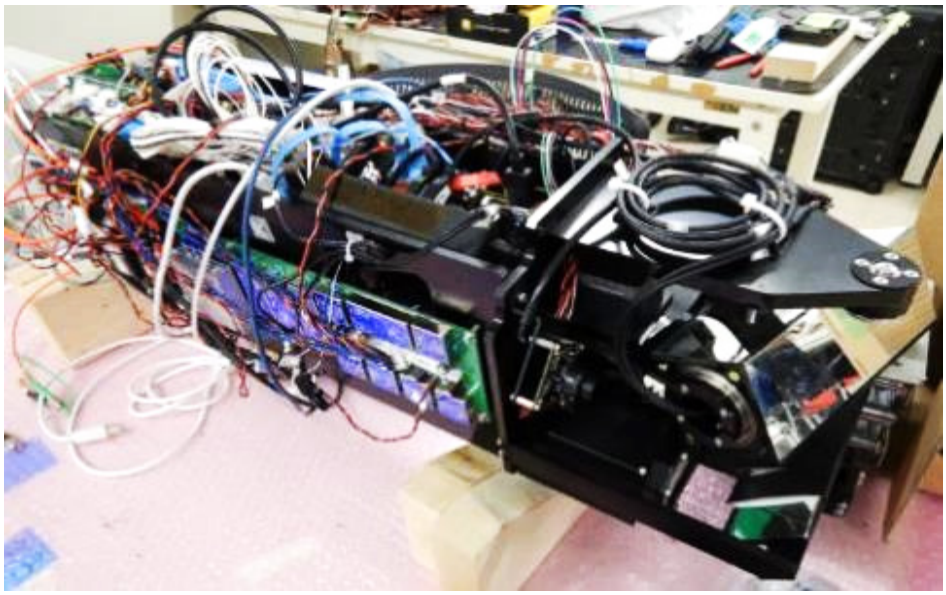


図 3-(2)-A-③-2　内部構造（UV レーザー実証機）

UV レーザー実証機のアナログアンプ部での距離減衰補正性能を表 3-(2)-A-③-1 に示す。目標となる 15dB 以上に対し、33.09dB（＝26.02dB－(－7.07dB)）を達成しており、大幅な性能向上が実現された。UV レーザー実証機は、先に開発した Green レーザー評価機を基盤として技術転用されている。Green レーザー実証機から UV レーザー実証機への主となる変更箇所は、レーザー光源を 532nm(12kW) → 355nm(2kW)への変更、355nm レーザー光源に対応するための内部光学系（レンズ／ミラー仕様）の変更となる。内部光学系に関しては一部特注を要し、開発当初はカタログ品を実装し、その後特注品を実施することで性能向上を確認するとともに、深海試験を実施する。UV レーザー実

3-(2)-A-③-1 距離減衰補正量（利得計算｜dB）

設定値[dB]	電圧[mV]	倍率	利得計算
0	100		
-5	44.3	0.443	-7.07193
5	500	5	13.9794
10	2000	20	26.0206

表 3-(2)-A-③-2　主仕様（UV レーザー実証機）

LN	項目	諸元
1	レーザー波長	355nm（UV 帯）
2	レーザー出力	2kW（peak）
3	送信パルス幅	2ns
4	周波数	50kHz
5	光検出	MCP-PMT（R5916U-50｜浜松ホトニクス）
6	光電面	マルチアルカリ
7	視野角 （レーザー照射角度）	水平：120deg　垂直：30deg
8	解像度(@距離:10m)	水平 32.1/16.0/8.0/4.0 mm 垂直 179.0/…/53.6/35.7/17.9 mm
9	測距分解能	4.5mm
10	スキャン速度	＜2D スキャンモード＞ 水平｜8,640 画素・垂直｜300 画素： 77.8s 水平｜4,320 画素・垂直｜300 画素： 38.9s ＜ラインスキャンモード＞ 水平｜8,640 画素： 0.26s 水平｜4,320 画素： 0.13s
11	耐圧	1,000m
12	寸法	φ325×885m
13	質量	約 70kg

証機のシステムブロック図を図 3-(2)-A-③-1 に、内部構造を図 3-(2)-A-③-2 に示す。併せて、仕様諸元を表 3-(2)-A-③-2 に示す。

図 3-(2)-A-③-1 において、送信光は、クロックボードで生成された送信タイミングに同期してレーザー光源にて、1064nm 赤外パルス光を出力する。その後、波長変換にて 355nm（紫外）波長に変換され、複数の固定ミラーとレンズを経由して回転ポリゴンミラーにより指向制御され、外界（海中）に射出される。ターゲットに反射した受信光は、回転ポリゴンミラーと複数の固定ミラーを経由して光学フィルタ（波長）に入力され、355nm 波長光のみが集光レンズに入力される。集光された受信光は視野角以外からの反射光を遮断するためのピンホールを経由して PMT（光電子増倍管）に入力され、受信光が電気信号に変換される。この際、レンズを介して分岐された送信光の一部は APD にて取り出され、TDC（time to digital converter）ボードの時間差計測の計測開始トリガとして適用される。PMT からの受信信号をアナログアンプ（高速 AGC／ワンパルス AGC）にて増幅後（補正後）に、タイミング情報と強度情報の 2 種類の受信信号として出力する。TDC ボードにおいて、送信光の送信タイミングから受信光の受信タイミングまでの時間差と、受信光の強度を出力することで、距離情報と強度情報が取得され、記憶領域（SSD）に保存される。距離情報により距離画像が生成され、強度情報により強度画像が生成される。

(b)UV レーザー実証機の水槽試験／浅海試験

UV レーザー実証機の基本性能を確認するため、水槽試験／浅海試験を実施した。水中／海中において減衰の著しい非可視光波長（UV 波長）のレーザー光源を用いたレーザー測距

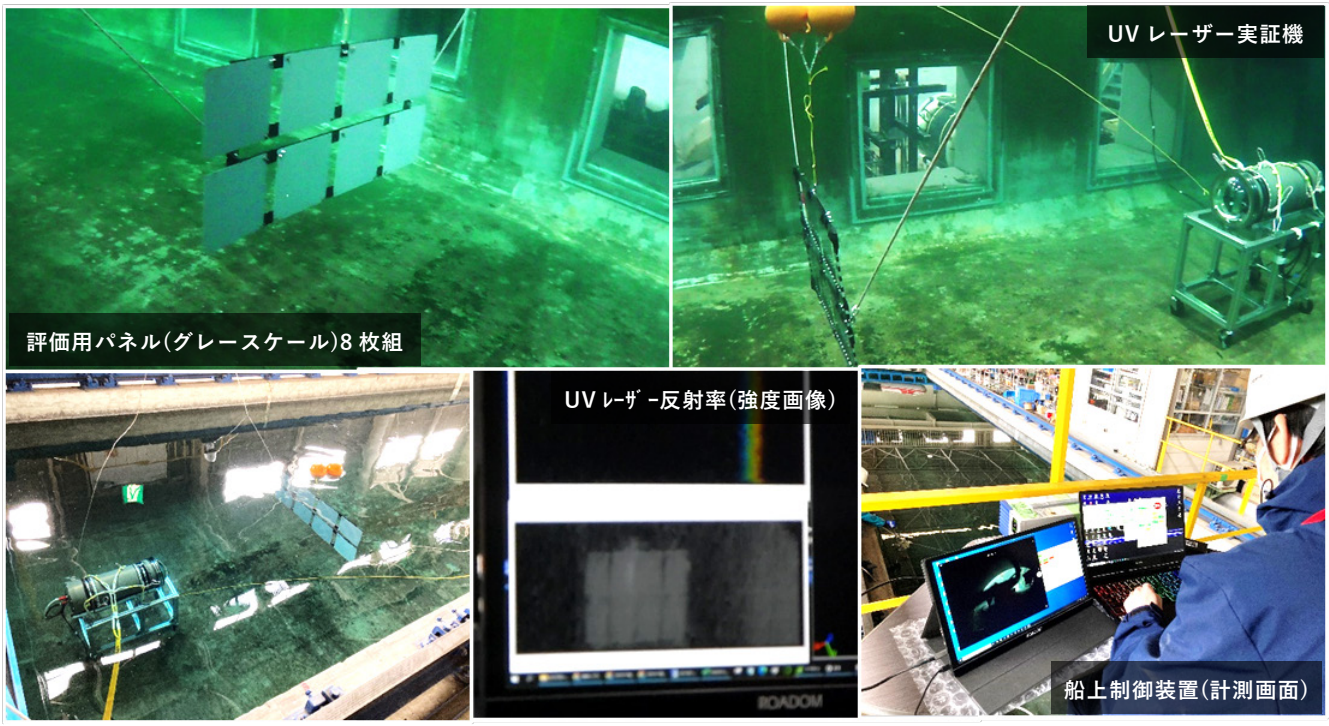


図 3-(2)-A-③-3　水槽試験｜UV レーザー実証機

および反射率測定は初の試みであり、海中光学分野においても当該実証機の性能検証は重要な意義を持つ。

水槽試験では、伝搬時間評価機の水槽試験と同様に、グレースケールのパネル 13 枚を 8 枚組と 5 枚組に分けて水中に入れ、計測距離 2m においてレーザーの反射強度を測定した（図 3-(2)-A-③-3）。その結果、グレースケールの中で最も暗い色（黒色）のパネルに関しては伝搬時間評価機同様に強度情報が取得することが出来ず、またその他のパネル色に関しても、顕著な強度情報（反射率）の差異を確認することが出来なかった。

続いて実施した浅海試験では、伝搬時間評価機の浅海試験と同様の測定系、評価対象を用いて、計測距離 2m において実施した。この際、グレースケールの評価用パネルに加え、物性推定アルゴリズム構築に資する学習用データ取得の試行として、複数種の海底域を模擬したモックアップ 5 種（海底モックアップ）を海底に配置して計測した。その結果、評価用パネルでは水槽試験とは異なりグレースケール間の僅かな色差を判別することが確認され、各海底モックアップについても、UV レーザーによる反射を捉え可視化することが確認された。浅海試験結果については「3.(3)-A」に記載する。

[(2)-A｜実施内容④｜UV レーザー実証機の深海仕様構築および深海試験]

＜概要＞

水槽試験および実海域試験（深海試験×2 回）を実施し、物性推定アルゴリズムの学習用データ・評価用データを取得すると共に、最大探知距離の評価を実施した（深海域：11m）。UV レーザー反射を適用した深海底可視化技術として、高品質な海底可視化画像（距離画像｜強度画像）が生成され、本技術の有効性が示された。また、海底可視化画像の水平最大分解能が 8000 画素以上（最終目標）を満足していることを確認した。

(a)深海試験用耐圧容器の設計・製作（UV レーザー実証機）

深海試験で使用する UV レーザー実証機用耐圧容器（耐圧性能：10MPa≒1,000m 水深相当圧｜安全率：1.5 以上）を製作した。製作した UV レーザー実証機用耐圧容器の外観・仕様を図 3-(2)-A-④-1 に示す。全長 885mm（ビューポート含む）、胴部径φ275mm、ビューポート径φ325mm であり、Green レーザー実証機用耐圧容器より些少短縮化されている。海水と

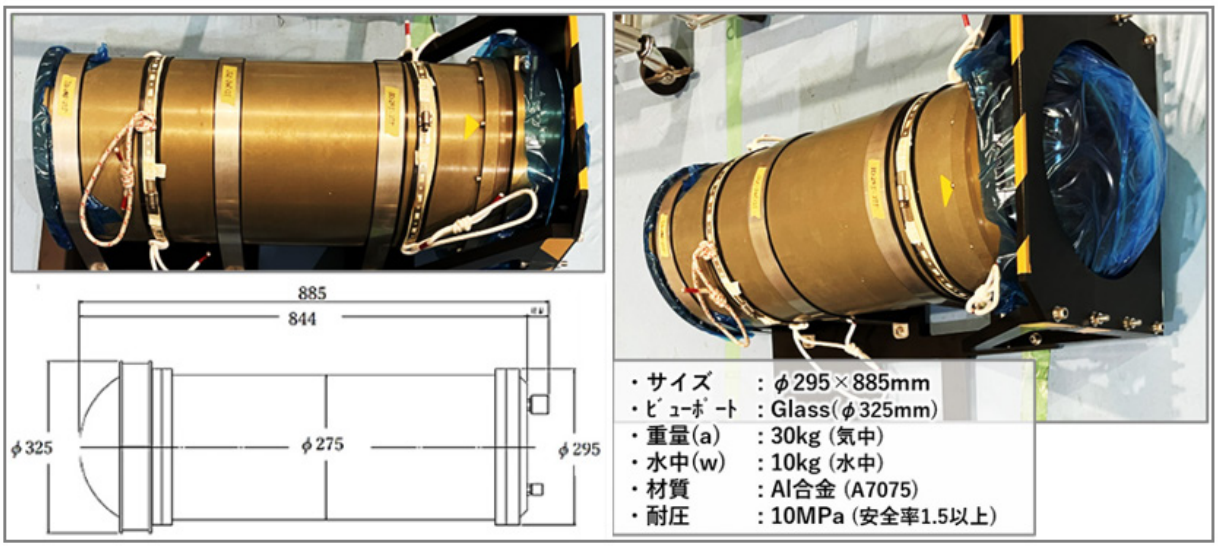


図 3-(2)-A-④-1　水槽試験｜UV レーザー実証機

の光学インタフェースとなるビューポートは、当該実証機の光学系（光路・光軸・光開口等）および内部機器配置の最適化を考慮し新たに開発している。海中探査機への搭載を鑑み、内機（内部構成品）を実装した状態において形状・サイズ・重量が、対象とする海中探査機のペイロード仕様を満足することを前提として設計している。

(b)深海試験 1〔R5 年度〕(UV レーザー実証機｜海底 MU・特異点｜令和 5 年 10 月｜初島東方)

UV レーザー実証機の深海域における基本性能を評価するため深海試験を実施した。JAMSTEC が所有する海中探査機「かいこう」に UV レーザー実証機を搭載し、支援母船として「新青丸」を用いて、相模湾・初島東方の 800m 以深の海域において海底計測を実施した。試験海域、海中探査機、支援母船および試験時のセットアップは「(1)-A｜実施内容⑤」に記載する深海試験と同様である。本試験は UV レーザー実証機を海中探査機に搭載し深海域で計測する初試験となる。本試験において、UV レーザー実証機の深海域における最大計測距離（目標｜10m）の評価、最大水平分解能（目標｜8000 画素以上）の評価、および物性推定アルゴリズム構築に要する学習データ取得（海底モックアップ計測／海底特異点計測）を実施した。

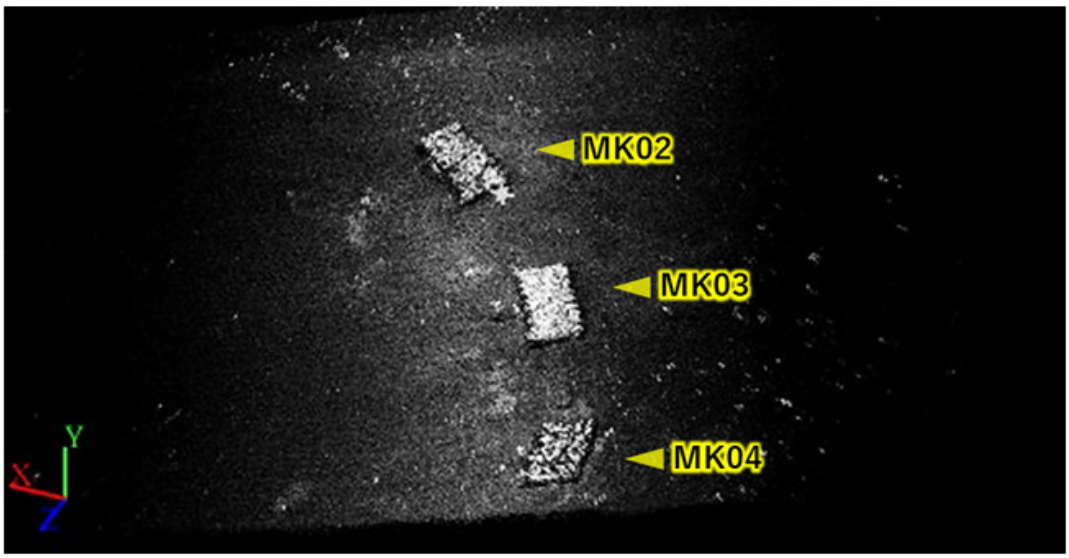


図 3-(2)-A-④-2　深海試験 1｜UV レーザー実証機｜2D 強度画像｜海底モックアップ MK02/03/04

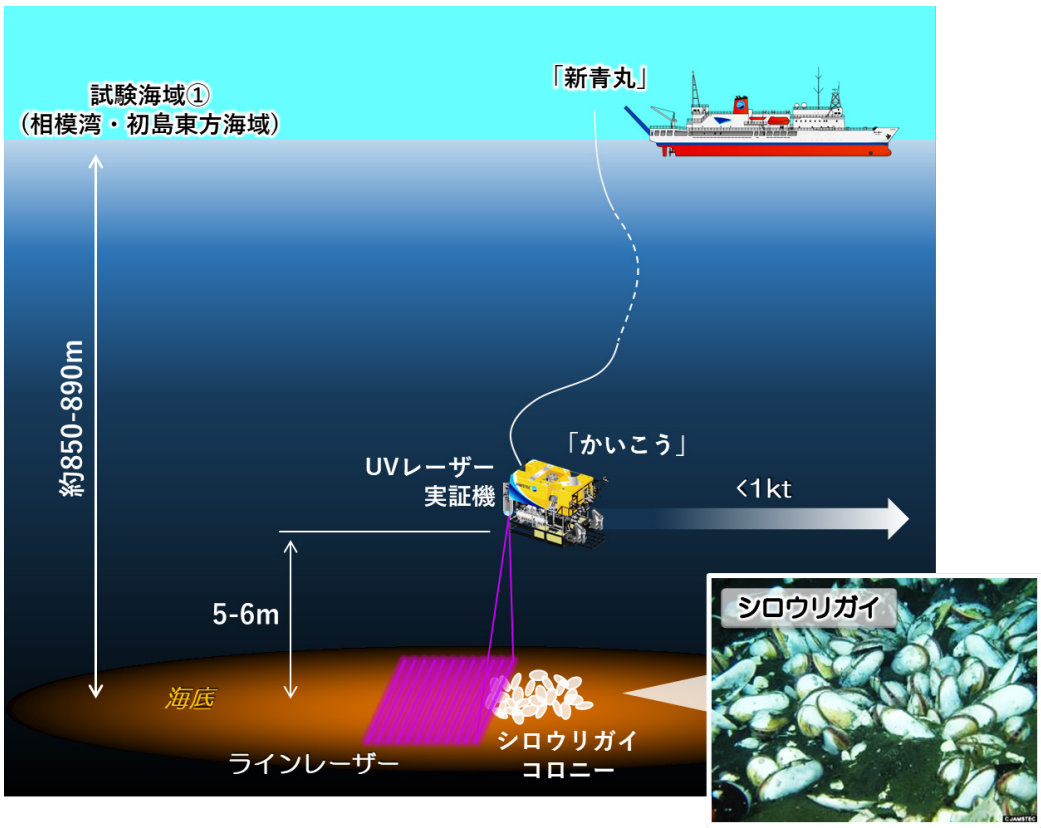


図 3-(2)-A-④-3　深海試験 1〔〕｜UV レーザー実証機｜試験系コンフィギュレーション
（相模湾・初島東方海域｜海底特異点｜シロウリガイ生息域）

〔(b)-ア｜深海試験 1〔R5 年度〕｜海底モックアップ計測〕

物性推定アルゴリズム構築に要する学習データの取得を目的として、海底モックアップ計測を実施した。海底に海底モックアップ 3 種（MK02｜MK03｜MK04）を設置したのち、当該海底モックアップの上方約 5m の高度を保持しつつ、2D スキャンモード（縦方向 30deg｜横方向 120deg）にて海底モックアップに向け UV レーザーを照射し計測した。UV レーザーは海中減衰が大きく、Green レーザーと比較して海水伝搬性（遠達性）は著しく低い。そのため、深海環境下において UV レーザーの海底反射を検出することで海底可視化することは難しい。海底モックアップ計測の結果を図 3-(2)-A-④-2 に例示する。本計測により生成された強度画像のコントラストは明確であり、各海底モックアップの特徴が確認できる。これは、各海底モックアップ内容物の形状・物性に応じた UV レーザー反射強度の差異を捉えたことを意味する。本計測で取得された各海底モックアップの可視化画像は、物性推定アルゴリズムを構築（学習・評価）するのに適した高品質なデータとなる。

〔(b)-イ｜深海試験 1〔R5 年度〕｜海底特異点計測〕

物性推定アルゴリズム構築に要する学習データ取得を目的として、試験海域の海底に生息する底生生物コロニーの計測を実施した。水深 850m 以深の海底に生息するシロウリガイのコロニーの上方を約 5m の高度にて航走（速力:1kt 以下）した。「かいこう」航走中において海底に向け UV レーザーを照射し、海底をラインスキャンした。図 3-(2)-A-④-3 に本計測系のコンフィギュレーションを示す。海底特異点計測（シロウリガイ生息域計測）の結果を図 3-(2)-A-④-4 に例示する。同図左はシロウリガイ生息域周辺の海底を計測した 3D 距離画像となる。同図右は同じ計測結果の 3D 強度画像（3D 距離画像に強度情報を重畳した画像）となる。両画像とも海底の微細な起伏・形状を鮮明に可視化しており、UV レーザーの海底反射が高精度に検出されたことを意味する。シロウリガイは白色系の 2 枚貝で海底に群生（コロニーを形成）している。1 個体のサイズは数 cm～10cm 前後と大型生物ではないが、

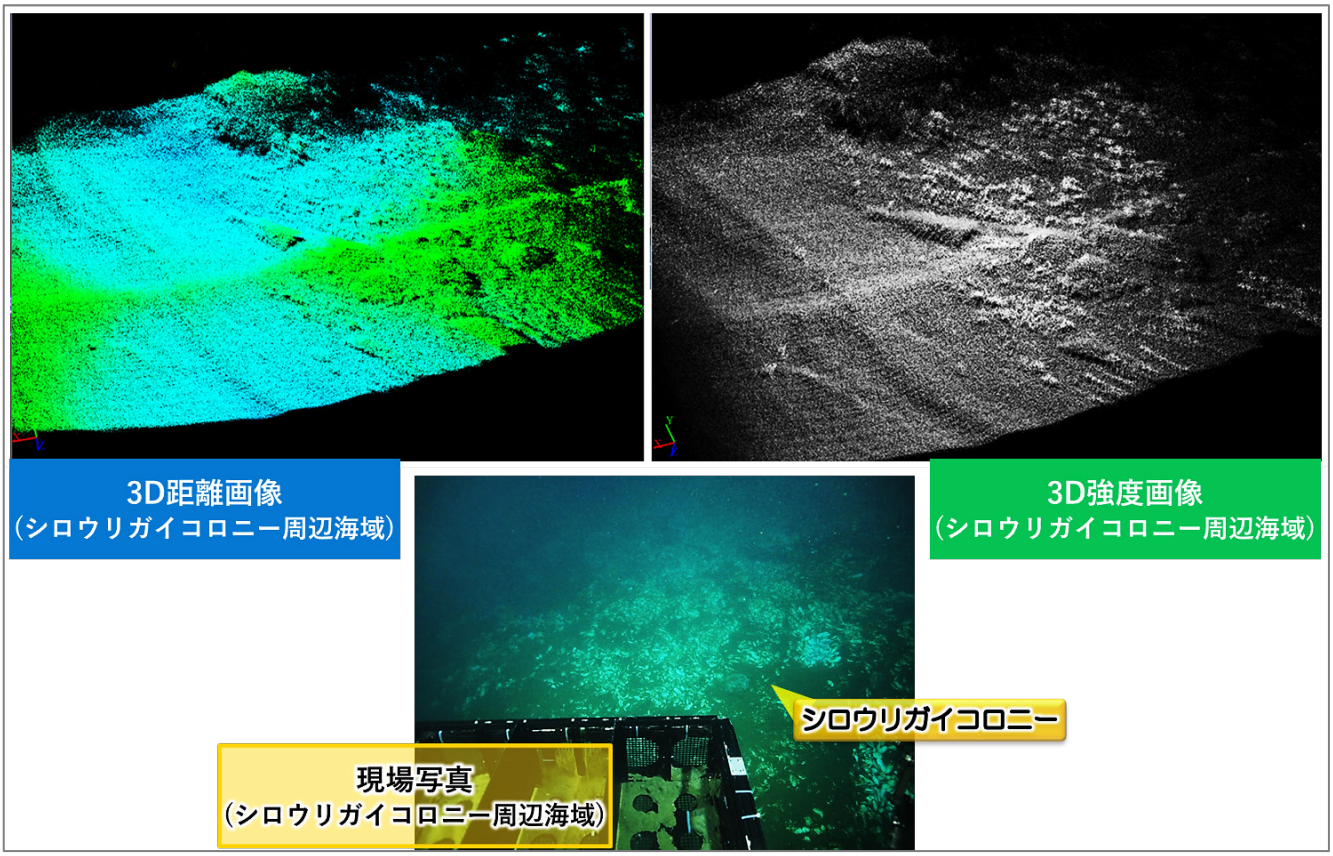


図 3-(2)-A-④-4 深海試験 1｜UV ﾚｰｻﾞｰ実証機｜試験結果｜例示｜3D 距離画像(左)／3D 強度画像(右)／現場写真(下)
(相模湾・初島東方海域｜海底特異点｜シロウリガイ生息域)

白色であるため海底面と比較して反射強度が大きいことが想定される。そのため、距離画像（左図）ではシロウリガイコロニーと海底地形とを切り分けることが困難だが、強度画像（右図）ではシロウリガイコロニーが存在するであろう箇所（図中白色部）が明確に確認できる。シロウリガイを含むある種の底生生物は、海底から湧水する硫化物を食するため、熱水域の周辺にコロニーを形成する場合がある。海底資源域を特徴づける側面として、海底資源域に生息する底生生物を特異点として効果的に可視化することが実現すれば、海底資源探査の効率化に繋がる。本計測結果では、底生生物に対する UV レーザー反射を高精度に検出し、これを適用した鮮明な強度画像と距離画像が生成され、本技術（UV レーザー実証機）の実用性が示された。

〔(b)-ウ｜深海試験 1〔R5 年度〕｜最大計測距離計測〕

深海域におけるUVレーザー実証機の最大計測距離を確認するため海底計測を実施した。これまでに、深海域におけるUVレーザーの伝搬距離（海底反射を経由する往復伝搬距離）に関する知見はなく、本計測にて取得される計測値が初実績となる。UVレーザー実証機を開発する過程で実施した基本試験（水槽試験）の結果と、レーザー測距現行機の深海域実績とから概算されたUVレーザー実証機の最大探知距離の目標値は10m（往復伝搬距離:20m）である。図3-(2)-A-④-5に最大計測距離を記録した際の海底可視化画像（3D距離画像）を示す。当該計測系にて取得された計測結果から確認された深海域におけるUVレーザー実証機の最大探知距離は11m（往復伝搬距離：22m）であった。当該最大計測距離を試算する際、深海域によるUVレーザーの伝搬損失を基礎試験結果から約0.74dB/mと仮定した。これに対し、本計測において最大探知距離の目標値である10mを達成したことから、現場海水の伝搬特性およびUVレーザー実証機の現況性能（光学的収支）が、凡そ設計値を満足していたことが想定される。

(c)水槽試験〔R5 年度〕(UV レーザー実証機｜海底ﾓｯｸｱｯﾌﾟ計測｜令和 5 年 11 月｜多目的水槽)

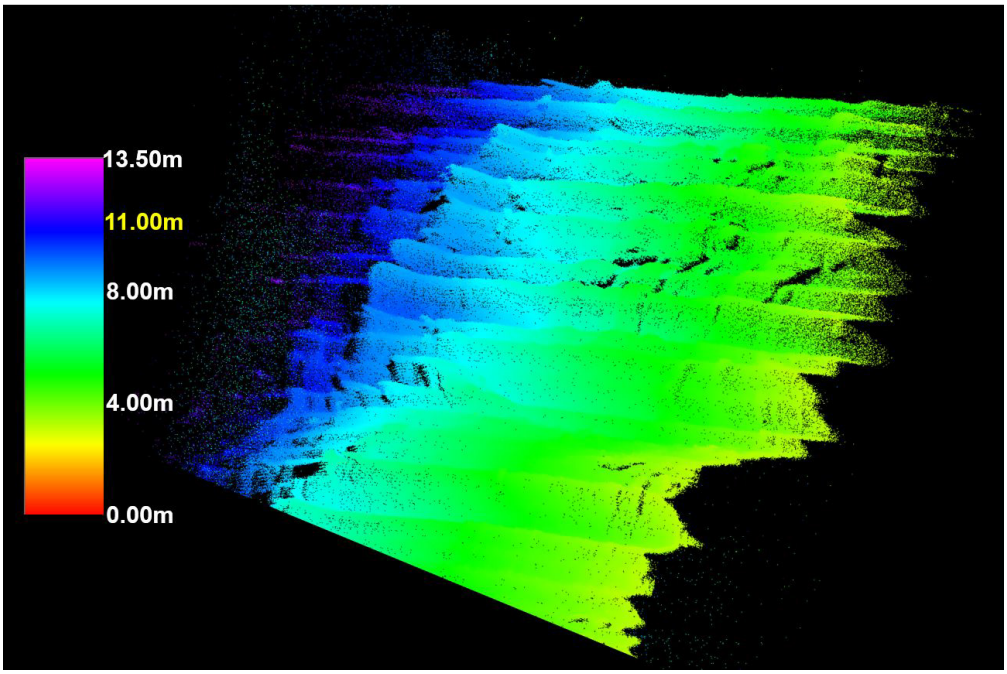


図 3-(2)-A-④-5 深海試験 1〔R5 年度〕｜UV ﾚｰｻﾞｰ実証機｜試験結果｜最大計測距離(11m)｜3D 距離画像
（相模湾・初島東方海域｜水深 850-900m 海底）

UV レーザー実証機を使用して海底モックアップを計測し、「3.(3)-A｜物性推定アルゴリズムに構築」に要する学習データ、評価データを取得した。本試験は実施事項「3.(1)-A｜送受光系制御の最適化」に記載する Green レーザー実証機と共抱きにて実施しており、両実証機を用いて海底モックアップを計測した。本項では UV レーザー実証機の計測結果のみを記載する。（Green レーザー実証機の計測結果については「3.(1)-A｜⑤」を参照）

〔(c)-ア｜水槽試験〔R5 年度〕｜海底モックアップ計測〕

海底モックアップを計測する目的は、物性推定アルゴリズムの構築・評価・調整（性能向上）に要する学習データ、評価データを取得することにある。本試験は Green 実証機と UV レーザー実証機を水槽底面に並列配置することで同時計測を実施している。本水槽試験のコンフィギュレーションは「3.(1)-A｜⑤」に示す図 3-(1)-A-⑤-23 と同様である。UV レーザー実証機による海底モックアップ計測の水槽試験結果を図 3-(2)-A-④-6 に例示する。Green レーザー実証機により計測された強度情報に関しては、機械学習に適用可能な良好なコント

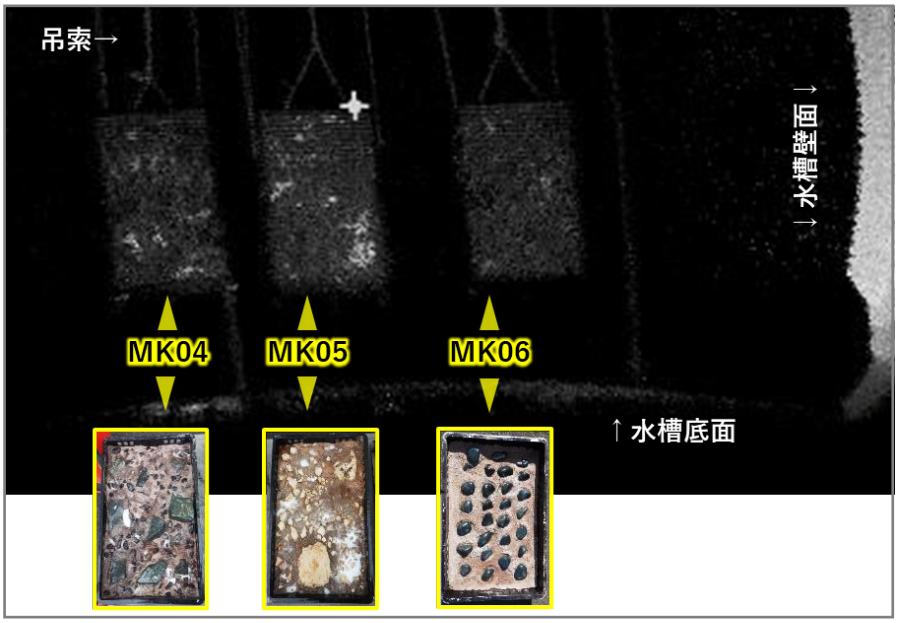


図 3-(2)-A-④-6
水槽試験〔R5 年度〕｜UV ﾚｰｻﾞｰ実証機｜試験結果｜例示｜海底ﾓｯｸｱｯﾌﾟ｜2D 強度画像
((左)MK04 (中)MK05 (右)MK06)

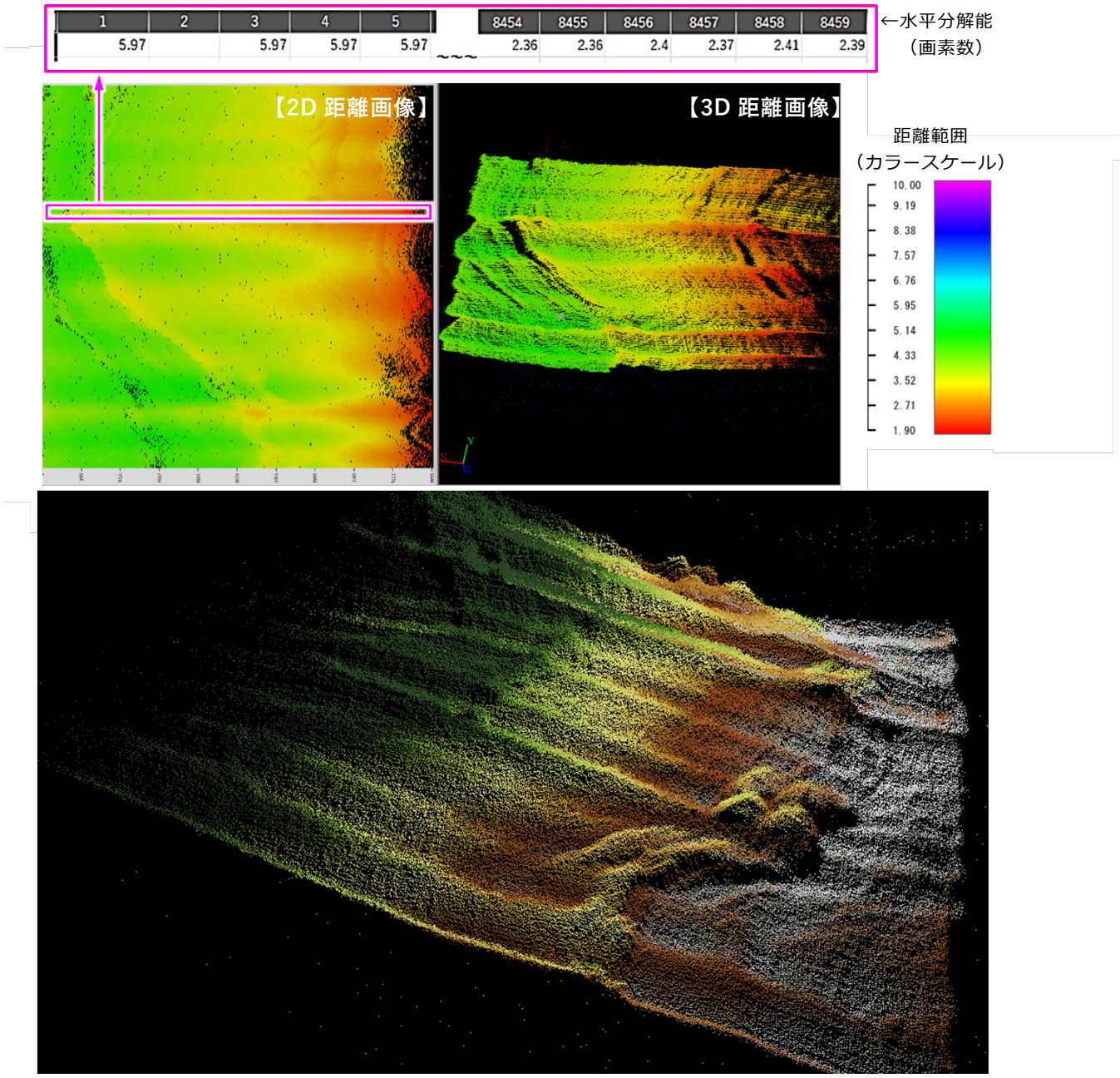


図 3-(1)-A-④-7 深海試験 2〔R5 年度〕｜試験結果｜例示｜2D 距離画像（左上） 3D 距離画像（右上・下）
（UV レーザー実証機｜最大水平分解能計測）

ラストを有する強度画像が得られた（図(1)-A-24 参照）のに対し、UV レーザー実証機による計測結果は、前記「②深海試験〔1 回目｜UV レーザー実証機〕」に記載する深海試験相当のコントラストが得られなかった。海底モックアップの外形やある程度の特徴量は検出されているが、内容物の差異を明確に区別することが可能な品質はない。この要因として、試験環境となる多目的水槽に入射される太陽光の影響によるものと推察される。浅海試験と比較すると水槽試験は太陽光の影響が大幅に軽減される一方、少なからず水槽水に入射される外乱光の影響は計測結果に反映され、深海試験 1 における計測結果と比較すると品質が大きく劣化する。本試験結果により太陽光の影響に関して、UV レーザー実証機は Green レーザー実証機と比較して影響を強く受けやすいことが判明した。

(d)深海試験 2〔R5 年度〕(UV レーザー実証機｜海底 MU・特異点｜令和 6 年 2 月｜初島東方)

UV レーザー実証機の深海域における基本性能の評価に要する基礎データを取得するとともに、海底可視化画像の最大水平分解能（目標 8000 画素以上）を評価するために、深海試験を実施した。本深海試験は、実施事項「3.(1)-A｜送受光系制御の最適化」に記載する

Green レーザー実証機を海中探査機「かいこう」に同時搭載して実施しており、試験海域、海中探査機、支援母船および試験時のセットアップは「(1)-A｜実施内容⑤」に記載する深海試験と同様である。

本研究課題における最終目標の 1 つである「三次元海底可視化画像の生成｜最大水平分解能：8000 画素以上」について評価した。ここで最大水平分解能とは、水平方向におけるレーザー計測点数を意味し、Green レーザー実証機と同様に UV レーザー実証機では、4 面ポリゴンミラーの回転速度を厳密に制御することにより、当該計測点数が設定される。UV レーザー実証機における最大計測点数は 8,640 点（Green レーザー実証機と同様）となり、計測不能なく全てのレーザー計測が実現された場合、海底可視化画像の最大水平分解能は 8,640 画素となる。

図 3-(2)-A-④-7 に本深海試験において UV レーザー実証機の計測結果より生成された海底可視化画像（水深 800m 以深）を例示する。同図上部に示す表は、水平方向に各レーザー計測した際の TOF 測距値（任意の 1 ラインを構成するレーザー計測値｜距離データ）を示しており、表中の番号は生成された海底可視化画像の横方向画素数を意味する。当該画像では、1 画素目の距離データ（5.97m）から始まり、8,459 画素目の距離データ（2.39m）まで、全 8459 点/ラインのレーザー計測に成功しており、これら計測点数の 3 次元座標点群により海底可視化画像が構成される。これにより、当該画像の水平分解能が 8,459 画素であることが確認され、生成された三次元海底可視化画像が最終目標「最大水平分解能：8000 画素以上」を満足していることが示された。

[(2)-A｜実施内容⑤｜UVレーザー実証機の性能改善および最終評価]

＜概要＞

UV レーザー実証機に関しては、「(2)-A｜実施内容④」までの取り組みにより、深海試験において、最大計測距離 10m（設計目標）の達成、最大水平分解能 8,000 画素以上の達成、物性推定アルゴリズムに適用する計測データの取得、海底特異点の計測、海底モックアップや底生生物コロニーに対する多様なレーザー反射率データの生成等、本実施項目の「達成目標（終了時）」を含む各目標を満足している。これを踏まえ本実施内容では、物性推定アルゴリズムの構築に資する多様かつ品質の高いデータを更に取得することを目的として、深海試験を実施した。その結果、底生生物コロニーを含む、実際の深海底、および海底モックアップの基礎データを取得した。またこの際、UV レーザー波長に対する海底の特異な反射が確認された。併せて、取得した計測データを解析することで、UV レーザー実証機の最大計測距離として 15m（往復伝搬距離：30m）を達成していることが確認された。

(a)深海試験 1〔R6 年度〕(UV レーザー実証機｜海底 MU・特異点｜令和 6 年 9 月｜初島東方)

本試験は実施事項「3.(1)-A｜送受光系制御の最適化」に記載する Green レーザー実証機を海中探査機「かいこう」に同時搭載して実施しており、試験海域、海中探査機、支援母船および試験時のセットアップは「(1)-A｜実施内容⑥」に記載する深海試験と同様である。

物性推定アルゴリズムに適用する機械学習用の学習データについて、「(2)-A｜実施内容④」にて実施した深海試験と同様に、海底モックアップおよび底生生物群生域を含む複数地点の海底を計測し、学習データを取得した。この際、Green レーザー実証機については、長距離レーザー測距（最大計測距離）の記録更新を目的とした各パラメータ設定としたため、比較的近距離における計測データでは可視化画像の輪郭がぼやけてしまい、学習データの品質には至らなかった。

本深海試験において、UV 波長に対する海底反射特性に関して特記すべき成果を得た。本深海試験では、Green レーザー実証機を「かいこう」に同時搭載しており、両実証機による海底の同時計測を実施した。その結果、各実証機により生成された海底可視化画像から興味深い差異が確認された。図 3-(2)-A-⑤-1 に当該計測のコンフィギュレーションを示す。本試験では初島東方の 850-900m 水深の深海底に生息するシロウリガイ群生域を、両実証機にて同時計測し、図 3-(2)-A-⑤-2 に示す海底画像を取得した。上段左右の図は、当該群生域

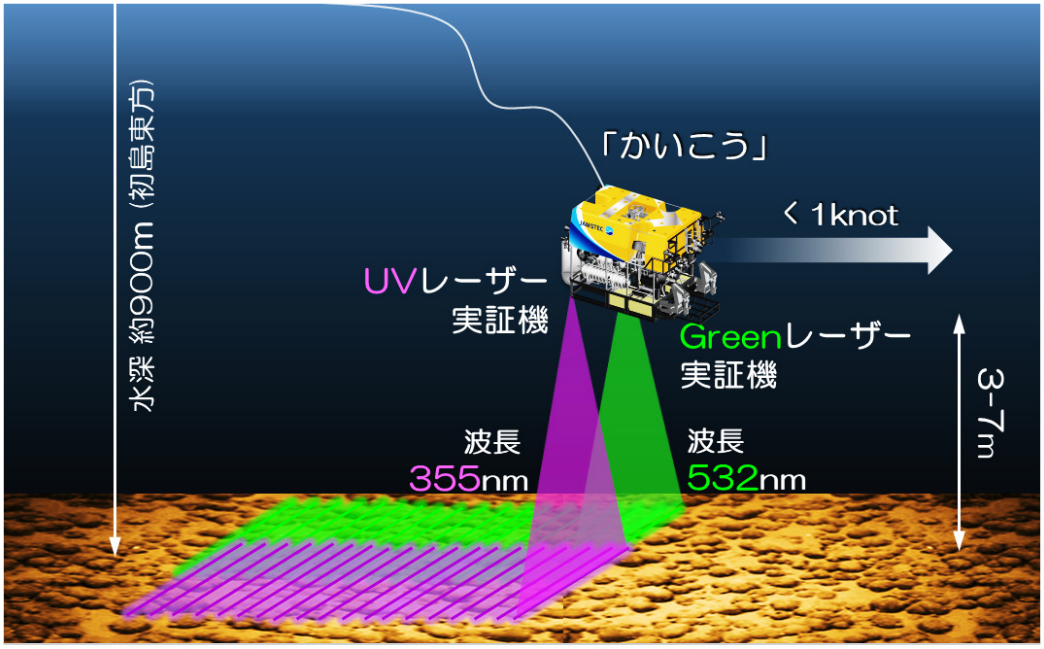


図 3-(2)-A-⑤-1　深海試験 1〔R6 年度〕｜UV レーザー実証機｜試験系コンフィギュレーション
（相模湾・初島東方海域｜海底特異点｜シロウリガイ群生域）

に対する Green レーザー実証機および UV レーザー実証機の合成画像（距離画像＋強度画像）である。中段左右の図は当該各画像の拡大画像、下段は当該計測箇所を「かいこう」が搭載する TV カメラで撮影した映像のキャプチャである。強度画像は、海底に対するレーザー反射の強弱を可視化しており、レーザー反射が強い箇所は明るく（白色化）、弱い箇所は暗く（黒色化）することで、白黒の濃淡（グレースケール）にて表示される。この強度画像に海底の三次元形状（距離画像）を合成して表示することにより、合成画像では海底形状とともに海底反射の強弱が同時に可視化される。各合成画像に示されるように、Green レーザー実証機では海底反射が計測できている（白色化している）箇所が、UV レーザー実証機では計測できていない（黒色化している）箇所が確認された（中段図の赤枠箇所）。これは、可視光（Green｜532nm）と非可視光（UV｜355nm）を適用し深海底を同時に計測することで、深海底（底生生物）の特異な反射特性が可視化された実例となる。当該箇所を TV カメラで撮影すると白色系の底生生物（シロウリガイ）の群生が分布している海底域であることが分かる（下段図の赤枠箇所）。この現象が生じた仮定として、当該箇所が UV 波長を吸収してしまう特性を有していた可能性が考えられる。あるいは、当該箇所が蛍光特性を有していたことにより UV 反射光の波長がシフトした可能性が想定される。両実証機ともに、MCP-PMT の前段に光学フィルタ（図 3-(1)-A-④-11／図 3-(2)-A-③-1）を搭載しており、送信光から波長がシフトすると反射強度が極端に弱まり、強度画像が暗くなる。また、当該反射強度が検出限界（閾値）を下回った場合は、強度画像は黒色となる。これにより当該現象が、UV 波長光に対する吸収特性あるいは蛍光特性のいずれかに起因している可能性が考えられる。底生生物の中には熱水域等の海底資源域近傍に生息している種もあり、このような UV 波長に対する底生生物の反射特性を明確化することで、可視・非可視レーザーによる深海底の同時計測が、海底資源探査に有効な手段となりえる可能性を示した。

(b)深海試験 2〔R6 年度〕(UV レーザー実証機｜最大計測距離)

[(2)-A｜実施内容④]にて実施した深海試験に引き続き、初島東方の水深 850-900m の深海底において、UV レーザー実証機の最大計測距離を評価した。図 3-(2)-A-⑤-2 に計測結果を示す。本深海試験における最大探知距離は、図中赤枠で囲われたエリアとなり、15m を確認した。当該エリアは計測中心から水平距離として約 7m に位置し、この際の深度（鉛直距離）は約 13m を示しているため、スラント長（レーザー測距長）は 15m（$\fallingdotseq\sqrt{(7^2+13^2)}$）となり、[(2)-A｜実施内容④]にて実施した深海試験時の記録（＝設計目標）である 10m を大幅に更新した。海底反射を含む非可視光レーザーの往復伝搬距離として 30m を実証した記録

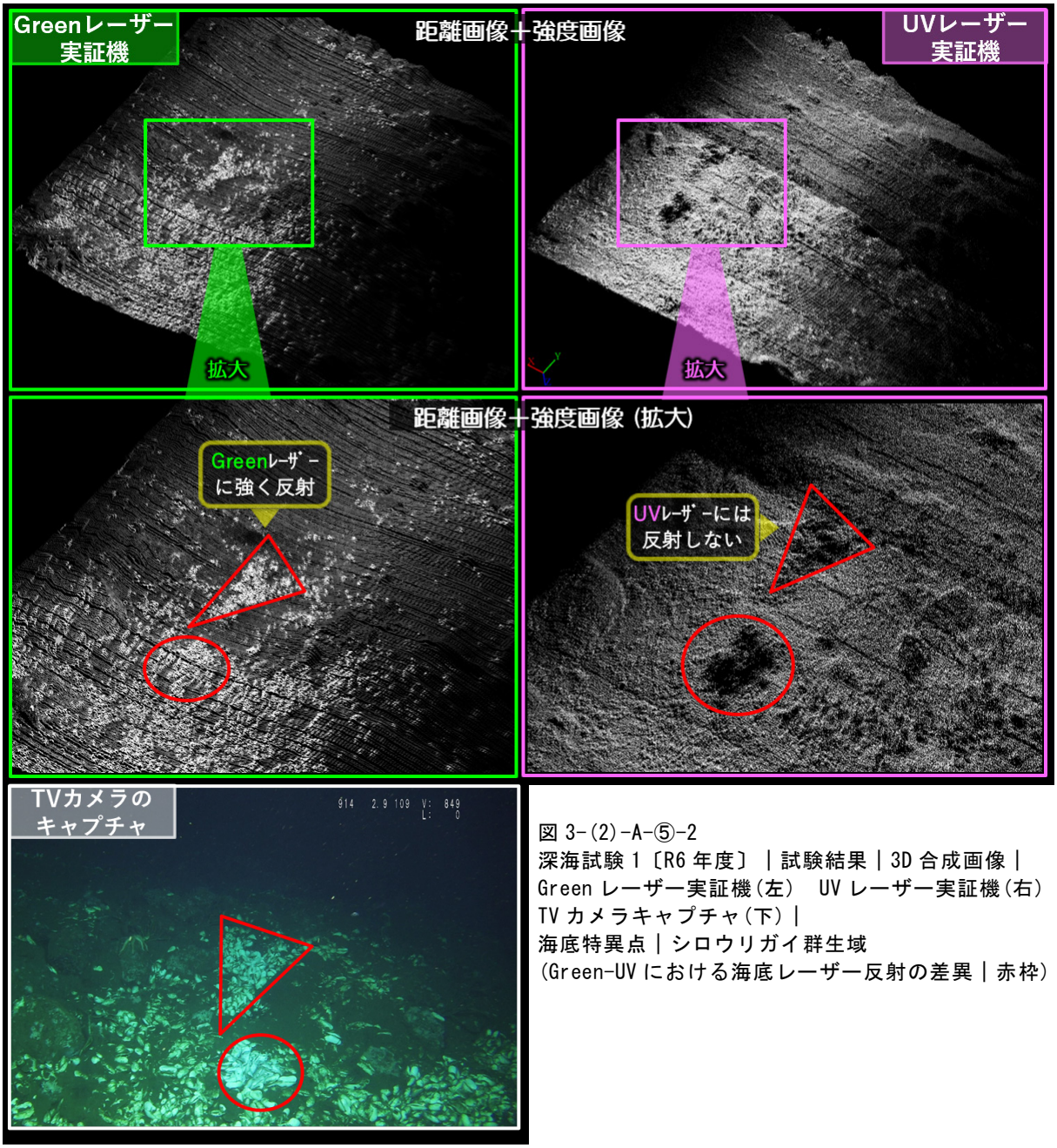


図 3-(2)-A-⑤-2
深海試験 1〔R6 年度〕｜試験結果｜3D 合成画像｜
Green レーザー実証機(左)　UV レーザー実証機(右)
TV カメラキャプチャ(下)｜
海底特異点｜シロウリガイ群生域
(Green-UV における海底レーザー反射の差異｜赤枠)

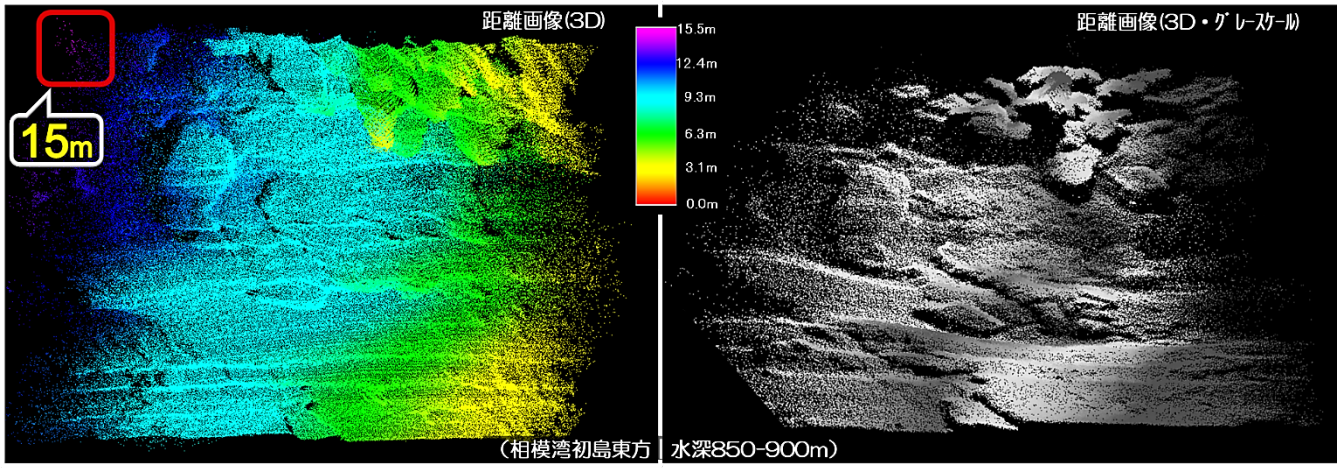


図 3-(2)-A-⑤-2 深海試験 2〔R6 年度〕｜UV ﾚｰｻﾞｰ実証機｜試験結果｜最大計測距離(15m)｜3D 距離画像
（相模湾・初島東方海域｜水深 850-900m 海底）

はなく、本結果はレーザー光の海中利用において特記すべき成果であり、UV レーザー（非可視光レーザー）の海底可視化利用に対する実用性が示された。

(2)-B 光検出器の高度化

[(2)-B｜目的]

目標測定距離を向上する為には光検出器の高感度化が必要である。そこで光検出器の高寿命化を考慮し、光検出効率に着目した高感度化に取組む。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(2)-B｜達成目標（終了時）]

中間評価で達成した約2倍以上の光検出効率を保障し、且つレーザー測距現行機に採用されている光電子増倍管「R5916(HAMAMATSU)」と同等の寿命を維持する光検出器を構築する。目標特性として寿命試験1C（クーロン）にて50%以内の変動を目指す。

[(2)-B｜達成目標（終了時）の達成状況]

■「R5916」の約 2 倍以上の光検出効率＋同等寿命を維持する光検出器の構築　：　**達成**

■目標特性として寿命試験 1C（クーロン）にて 50%以内の変動　：　**達成**

[(2)-B｜実施内容①｜光検出効率の改善検討]

(a)収集効率の改善（Al膜有無による比較検証）

光検出効率が 2 倍となる GaAsP（ガリウム・ヒ素・リン）光電面を有する光電子増倍管の設計を行うため、光収集効率 が2 倍の光電面を有する光電子増倍管の試作検証を行った。図3-(2)-B-①-1に試作した光電子増倍管を示す。光電子増倍管の光検出効率（D.E.）は、光電面の量子効率（Q.E.）と光電面から放出された電子が信号出力に寄与する収集効率（C.E.）の積（下式）にて表される。

D.E.=Q.E.×C.E.

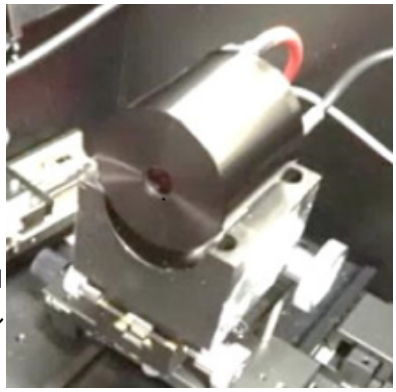


図 3-(2)-B-①-1
試作した光電子増倍管モジュール
(H15547-01-Y001/H15547-01-Y001)

「光検出器の高感度化」への取組みは、上式で求められる光検出効率(D.E.)向上の取組みと等価であり、 Q.E.（量子効率）｜C.E.(収集効率)の高効率化により実現する。MCP-PMT（マイクロチャンネルプレート内蔵型光電子増倍管)は、低寿命化対策としてMCP上にAl膜を配置している。しかしこのAl膜の配置により光収集効率（C.E.）は大幅に下がり、光検出効率(D.E.)そのものを劣化させる要因と考えられる。そこで MCP上に成膜されたAl膜の有無による光検出効率を検証することを目的として、Al膜装備・非装備した光電子増倍管モジュール(H15547-07-Y001｜H15547-07-Y002）をそれぞれ試作した。図3-(2)-B-①-2にそれぞれの光電子増倍管モジュールの概略図を示す。当該各光電子増倍管モジュールを使用し、Al膜の有無による収集効率（C.E.）を比較検証した。その結果、Al膜装備の光電子増倍管（H15547-07-Y001）の収集効率（C.E.）は22.9 %に対して、Al膜非装備の光電子増倍管（H15547-07-Y001）は52.2 %であり、約2.28倍の収集効率向上を確認した。表3-(2)-B-①-1に比較検証結果を示す。これによりAl膜を除去することの効果が確認され、当該結果を光検出効率2倍のGaAsP光電面を有する光電子増倍管の設計に反映させる。併せて、Al膜除去による光電子増倍管の低寿命化対策として、処理装置（洗浄装置、成膜複合処理装置）の仕様を検討した。

＜光電子増倍管モジュール｜H15547-07-Y001＞　　＜光電子増倍管モジュール｜H15547-07-Y002＞

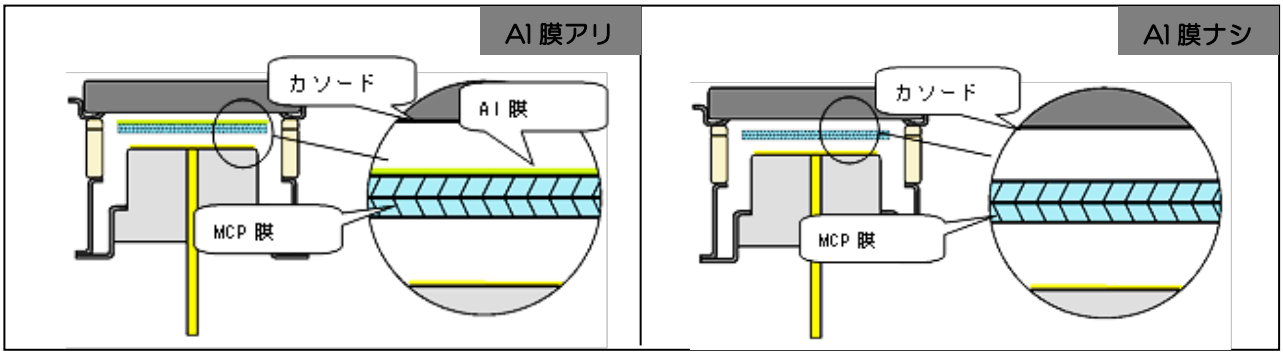


図 3-(2)-B-①-2　試作した光電子増倍管モジュールの構造｜Al 膜有無の構造

表 3-(2)-B-①-1　Al 膜有無による収集効率(C.E.)の比較検証結果

試作型番	SN	Al 膜	印加電圧 [V]	収集効率 C.E. [%]
H15547-07-Y002	YA0151	無	2000	52.2
H15547-07-Y001	YA0153	有	3200	22.9

(b)量子効率（Q.E.）の測定〔補足資料〕

図3-(2)-B-①-3に光電子増倍管のQ.E.測定系を図示する。タングステン光から出射された光は、ダブルモノクロメーターを通している分光器より出射される。出射される光量は、量子効率が考慮されているSiフォトダイオードにて更正されている。MCP-PMTは、カソード-MCPIn間のみに電圧を印加する。モノクロメータにより各波長を設定しそれぞれの波長にて出力信号より量子効率を算出する。

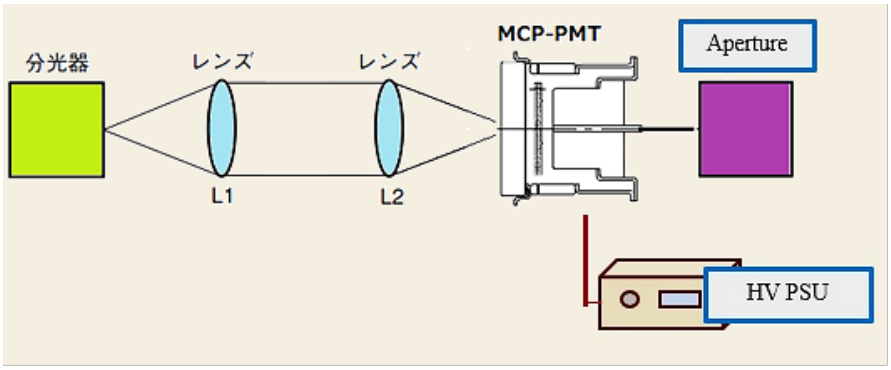


図 3-(2)-B-①-3　光電子増倍管 Q.E.測定系 c

(c)収集効率（C.E.）の測定〔補足資料〕

図3-(2)-B-①-4に光電子増倍管のC.E.測定系を図示する。タングステン光から出射された光は、減光フィルタと特定波長のみ通すバンドパスフィルタを通してPMTへ入射される。PMTには電子増倍率が1×106になる電圧を印加している。PMTが出力した信号は、マルチチャンネルアナライザ（MCA）にて波高計測される。波高値には、計測されるカソードの分光感度が反映されており、計測するPMTの分高感度情報から収集効率を算出する。

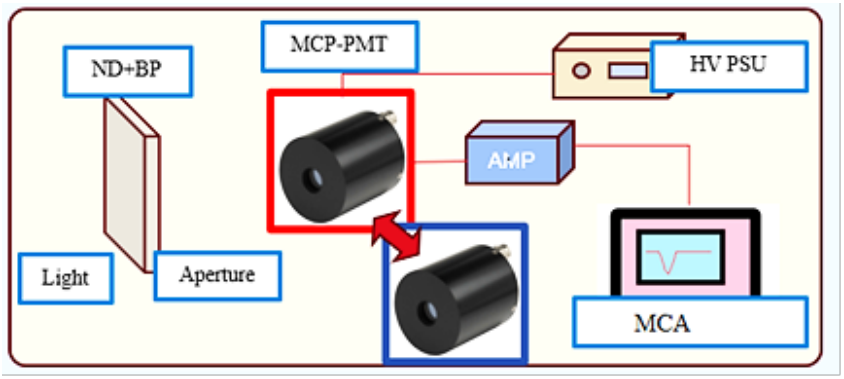


図 3-(2)-B-①-4　光電子増倍管 C.E.測定系

[(2)-B｜実施内容②｜光検出効率の向上／低寿命化対策の検討]

＜概要＞

光検出器の高感度化について検討を行い、光検出効率が2倍以上のGaAsP光電面を有した光電子増倍管を試作した。当該試作では光電子増倍管の低寿命化対策（検出効率の改善検討）として、洗浄装置および成膜複合処理装置を開発し、脱イオン処理を実施することで大幅に延命することを示した。

(a)内部構造変更による光検出効率評価

光電子増倍管の光検出効率（D.E）は、光電面の量子効率（Q.E.）と光電面から放出された電子が信号出力に寄与する収集効率（C.E.）の積で表される。MCP-PMTでは、低寿命対策としてMCP上にAl膜を配置することでPMT光電面を保護しているが、一方で当該Al　膜はC.E.を大幅に低下させる主要因となる。図3-(2)-B-②-1にMCP-PMTの内部構造を示し、Al膜（＋ゲート

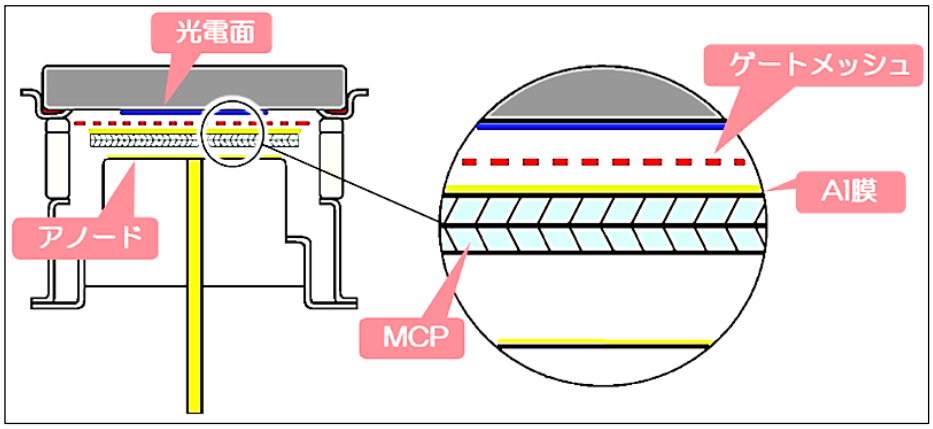


図 3-(2)-B-②-1　光検出器内部構造(MCP-PMT｜GaAsP 光電面)

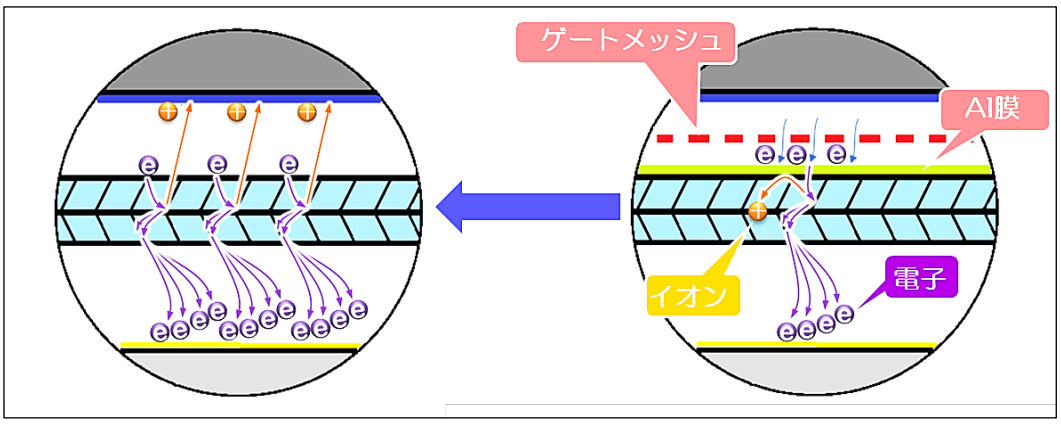


図 3-(2)-B-②-2　Al 膜＋ゲートメッシュ有無による電子とイオンの挙動

表(2)-B-②-1　光収集効率比較評価（ゲートメッシュ有無／Al 膜有無）

試験体・種別	試作体・型番	メッシュ電極	Al膜	収集効率 C.E. [%]	現行機搭載PMT C.E. 比較 [倍]
現行機搭載 PMT	R5916U-64	有	有	16.0	1
変更構造 PMT	H15547-07-Y002	無	無	52.2	3.26
比較用 PMT	H15547-07-Y001	無	有	22.9	1.43
〔備考〕 試験体（PMT）の光電面は全てGaAsP					

※11：表(2)-B-②-1 中の「メッシュ電極」は「ゲートメッシュ」を意味する。

メッシュ)有無による電子とイオン発生の影響を図3-(2)-B-②-2に示す。Al膜を有する場合、光電面から放出された電子は、Al膜を通過できるものと通過できないものに分かれる。この現象が収集効率に大きく影響し、Al膜を通過できない電子はMCPに到達することがなく、信号検出に寄与しない。そこで、Al膜およびゲートメッシュを除去することで収集効率を担保し、光検出効率の向上を図る。

前項「(2)-B|実施内容①」の取組みにおいて、マルチアルカリ光電面を有したMCP-PMTを用いて、MCP上に製膜されたAl膜有無の収集効率に対する効果を比較検証した。その結果、Al膜「無」の収集効率がAl膜「有」の収集効率の2.28 倍であることが確認された。これを踏まえ、レーザー測距現行機にて採用されるPMT（R5916U-64｜GaAsP光電面）に対し、ゲートメッシュを含めた収集効率の測定を実施した。併せて、Al膜およびゲートメッシュを除去した内部構造のMCP-PMTを試作し、比較評価した。表3-(2)-B-②-1にAl膜およびゲートメッシュの有無による収集効率の比較評価を示す。その結果、レーザー測距現行機に搭載されているMCP-PMT（R5916U-64｜Al膜有・ゲートメッ シュ有）の光収集効率は16%であった。これに対し、PMT構造変更（試作機｜Al膜無・メッシュ電極無）の収集効率は52.2%となり、従来構造に対し約3.26 倍もの収集効率の向上が確認された。同種光電変換面に対する比較のため、量子効率（Q.E.）は同等となり、当該結果は光検出効率の3.26倍の向上を意味する。これは、Al膜およびゲートメッシュを除去するPMT構造変更により、本実施項目の「達成目標（終了時）」である「「R5916U-64」の約2倍以上の光検出効率」が達成されたことを示す。

(b)光電子増倍管の低寿命化対策検討（脱イオン処理）

光検出器の低寿命化対策（検出効率の改善検討）として、洗浄装置および成膜複合処理装置を用いた PMT内の脱イオン処理（超臨界乾燥処理／成膜複合処理）について検討した。これまでの知見として、PMTの寿命は「光電面の種類」「イオン抑制膜の有無」および「PMT内部のイオン低減」に大きく関係することが分かっている。「光電面の種類」は、光電面として使用される物材種によりアルカリ系と半導体系とに大別される。本研究では、アルカリ系としてマルチアルカリ光電面を、半導体系としてGaAsP光電面を試験体として検証を進めている。一般的に、半導体系はアルカリ系と比較して高い量子効率（Q.E.）を有する反面、低寿命という欠点が知られている。これに反してアルカリ系は、長寿命であることが知られる。そこで本実施項目では、より量子効率の高い半導体系光電面（GaAsP 光電面）の低寿命改善について取り組み、その評価指標としてアルカリ系光電面（マルチアルカリ光電面）の寿命と比較検証する。

「イオン抑制膜の有無」は、イオン抑制膜のよる光電面の保護を意味する。前述の通りMCP-PMTは低寿命対策として、MCP上にAl膜を有しており、当該Al膜はPMT内部で発生した陽イオンによる光電面へのダメージを防ぐ役割を果たす。しかし当該Al膜は光検出効率を劣化させる要因でもあり、本実施項目では当該Al膜およびゲートメッシュを除去することで2倍以上（3.26倍）の光検出効率を実現させている。そのため、半導体系光電面の低寿命化が促進され、その改善が大きな課題となる。

図 3-(2)-B-②-3　洗浄装置

図 3-(2)-B-②-4　成膜複合処理装置

これを踏まえ本実施項目では、Al膜除去に起因する低寿命化を抑制させるため、「PMT 内部のイオン低減」について取り組む。PMT 内部で発生する陽イオンの発生源となる残留物質の低減、および材料から脱離する陽イオンの放出確率を低減させる脱イオン処理により、陽イオンによる光電面へのダメージを防ぐことを考えた。脱イオン処理には、新規に開発した洗浄装置および成膜複合処理装置を使用した。図3-(2)-B-②-3、図3-(2)-B-②-4に当該各装置の外観を示す。洗浄装置はMCP製造工程におけるイオン源残渣の除去、成膜複合処理装置（処理室）はMCP表面の電子による洗浄、成膜複合処理装置（成膜室）は MCP内部からのイオン脱離の予防、をそれぞれ狙っている。目標寿命としては、1C（クーロン：1 秒間に 1 アンペアの電流によって運ばれる電荷量）における劣化率で 50%以上を設定している（比較値として、50%劣化時の電化量（C:クーロン）にて表現する）。これまでに、上記各装置による脱イオン処理を実施したPMTを試作し、限られた試験体ではあるが脱イオン処理の効果を寿命試験にて検証した。その結果、脱イオン処理により大幅な延命効果が確認された。図3-(2)-B-②-5に、GaAsP光電面およびマルチアルカリ光電面を有した各PMT試験体の寿命試験経過を示す。同図より、Al膜を有するGaAsP光電面 PMT（図中｜緑線）とマルチアルカリ光電面PMT（図中｜ピンク線） とを比較すると、GaAsP光電面PMTの大幅な低寿命傾向が確認される。またマルチアルカリ光電面PMTについては、Al 膜の有無に関係なく寿命の劣化傾向が鈍いこと

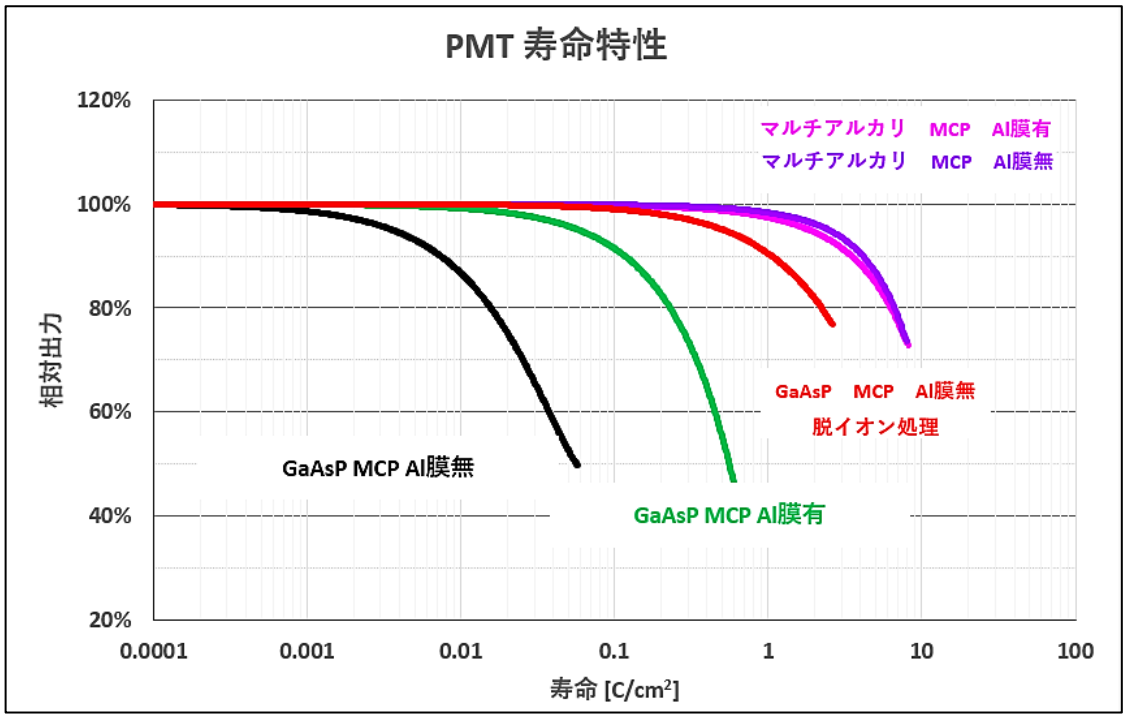


図 3-(2)-B-②-5　MCP-PMT 寿命試験（H15547-07-Y003/Y004 | HAMAMATSU）

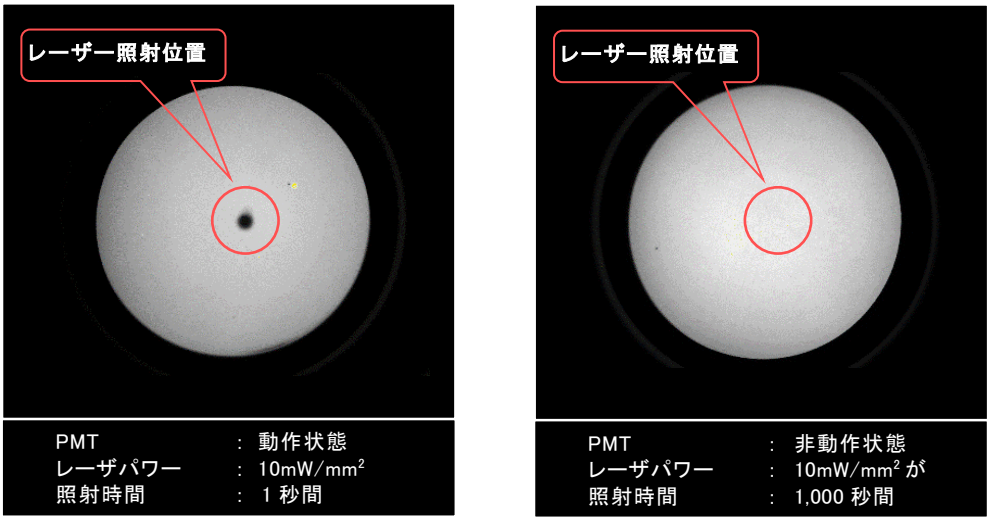


図 3-(2)-B-②-6　寿命試験
（「R5916U-64」と同じ光電子変換材料を適用するイメージインテンシファイアを用いた寿命試験）

がわかる（図中 ｜ピンク線・青線）。GaAsP光電面PMTについて、Al膜の有無による寿命傾向を確認すると、Al膜を有するGaAsP光電面PMT（図中｜緑線）に対し、Al膜を除去したGaAsP光電面PMT（図中｜黒線）の寿命は大きく劣化し、50%劣化時の電気量（寿命）が0.1C/cm^2 にも満たない。そこで、Al膜を除去したGaAsP光電面PMTの低寿命化改善を目的として、成膜複合処理および超臨界乾 燥処理などの脱イオン処理の効果を確認した。その結果、脱イオン処理を実施していない試験体（図中｜緑線）は50%劣化時の電荷量（寿命）が1C/cm^2 に満たないが、脱イオン処理を行うことで1C/cm^{2}以上の寿命が確認された（図中｜赤線）。これにより、従来構造のMCP-PMT（脱イオン処理無し｜Al膜有り）と比較して、構造変更したMCP-PMT（脱イオン処理有り｜Al膜無し）の寿命が大幅に向上することが確認された。

(c) レーザー光照射によるPMTの劣化

本研究にて取組む光学システム（伝搬時間・反射率評価機／実証機）では、近距離から反射する過大な励起光が光検出器に入射することが想定される。この時、PMTが動作状態にある場合、信号処理系を飽和させ測定に影響を与えるばかりか、PMTの寿命を大きく劣化させる。図3-(2)-B-②-6にレーザー光照射によるPMT寿命試験※12を示す。本研究にて取組む光学システムと同波長である532nm波長レーザーを、強度10mW/mm^{2}の連続光として動作状態にあるPMTへ1 秒程度照射した。その結果、PMTが1秒程度、当該レーザー連続光を受光するだけで、レーザー照射部が大きく劣化することが確認された（図3-(2)-B-②-6｜左図）。図中の黒色部が、レーザー光を受光した位置であり、PMT光電面の劣化箇所となる。レーザー照射を終了しても、基本的に当該劣化箇所（黒色部）が復旧することはなく、寿命だけでなく性能も含めPMTそのものの劣化をもたらす。一方、 同レーザー連続光を、非動作状態にある同じ仕様のPMTへ1,000秒間照射し続けても、劣化箇所は確認されないことを確認した（図3-(2)-B-②-6｜右図）。つまり、PMT動作状態におけるレーザー光照射（レーザー光の受光）自体が、PMTの劣化要因を意味する。当該症状は、本実施項目における光検出器の延命化対策と大きく関連する重要な知見である。

※12
レーザー測距現行機用 PMT(R5916U-64)と光-電子変換材料が同じであるイメージインテンシファイアを用いた寿命試験
＜イメージインテンシファイア＞
入射光により光電面から放出された光電子を加速，集束して蛍光面に結像，発光させ，光学 像を得る真空管。

(d) 寿命の測定〔補足資料〕

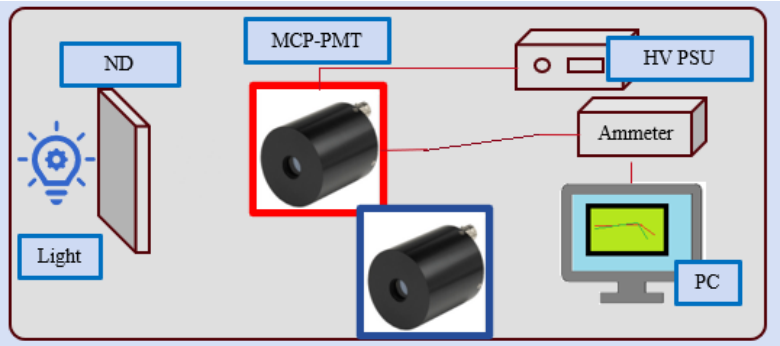


図 3-(2)-B-②-7　光電子増倍管寿命測定系

図3-(2)-B-②-7に光電子増倍管の寿命試験の測定系を図示する。減光フィルタを通した微弱光をPMTへ入射する。PMTには電子増倍率が1×106になる電圧を入力している。PMTの出力が指定の値になるように光量を調整する。PMTからでてきた信号は、PCで読み込まれ経時時間計測される。

[(2)-B｜実施内容③｜光電子増倍管の低寿命化対策と寿命試験]

＜概要＞

光検出器の高感度化について、Greenレーザー実証機に実装するMCP-PMTの仕様詳細を整理し、光検出効率が2倍以上となるGaAsP光電面を有したMCP-PMTを製作した。当該MCP-PMTの高感度化により生じる寿命劣化に対し、成膜複合処理装置および洗浄装置を用いた低寿命化対策を実施することで、大幅な延命効果を確認した。

(a)光電子増倍管の延命対策（低寿命化対策）

前記「(2)-B｜実施内容②」において、Al膜およびゲートメッシュを除去することにより、約3.26倍の光検出効率が向上した。一方、Al膜は、光電子増倍管の低寿命化対策として光電面を保護するためにMCP上に配置されており、PMT内部で発生した陽イオンによる光電面へのダメージを防ぐ役割を果たす。そのため、Al膜を除去したことで、当該陽イオンに起因する大幅な寿命劣化が見込まれる。そこで、PMT内部に発生するイオン源となる残留物質の低減、および構成材料から脱離するイオンの放出確率を低減させることにより、陽イオンの発生そのものを抑制することを考える。洗浄装置および成膜複合処理装置を開発し、これを用いてMCP-PMT内部の脱イオン処理（超臨界乾燥処理／成膜複合処理）を実施することで、陽イオン

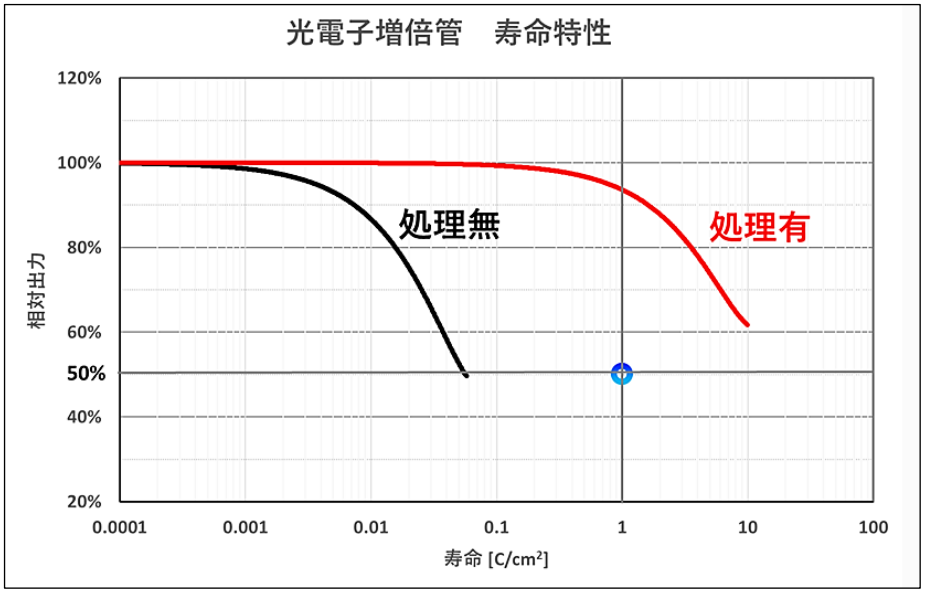


図 3-(2)-B-③-1　寿命試験｜脱イオン処理の実施有無｜構造変更後の光電子増倍管

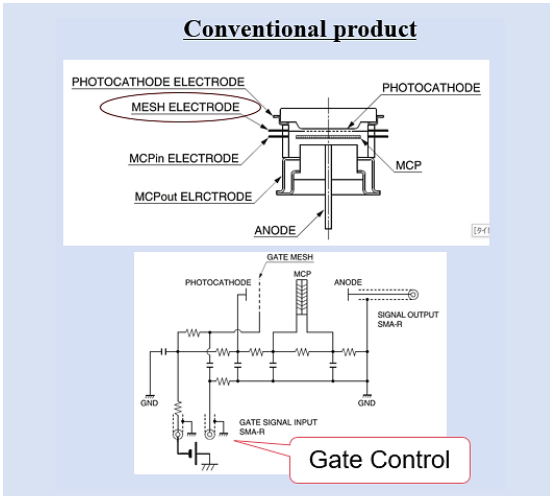


図 3-(2)-B-③-2　内部構造｜MCP-PMT「R5916U-64」
（レーザー測距現行機実装品）

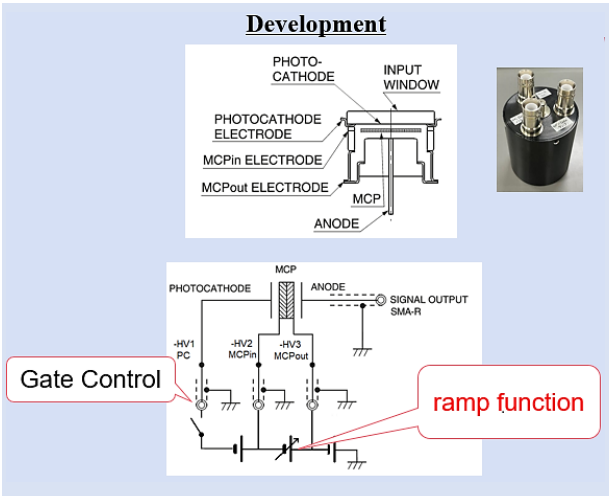


図 3-(2)-B-③-3　内部構造｜MCP-PMT「H15547-07」
（新規開発品）

の発生を抑制した。

脱イオン処理を実施したMCP-PMTの延命効果を確認するため、寿命試験を実施した。目標寿命として、1C（クーロン：1 秒間に1アンペアの電流によって運ばれる電荷）における劣化率で50%以上を設定した。構造変更（Al膜＋ゲートメッシュ除去）後のMCP-PMTを適用した寿命試験において、脱イオン処理の実施有無による延命効果をに示す（図3-(2)-B-③-1）。脱イオン処理を実施しなかったMCP-PMTの寿命（図3-(2)-B-③-1｜黒線）は劣化率50%における寿命が0.1Cにも満たないが、当該処理を実施することで劣化率50%における寿命が目標寿命である1C（目標）を大きく上回ることが確認された（図3-(2)-B-③-1｜赤線）。これはレーザー測距現行機に組み込まれるMCP-PMT（カタログ品）以上の寿命特性を示しており、当該処理により製品レベルの延命化が実現したことを示している。併せて、構造変更後のMCP-PMT（光検出効率：3.262倍）に対し、当該延命効果（寿命試験1C（クーロン）にて50%以内）が確認されたことより、本実施項目の「(2)-B｜達成目標（終了時）」が達成されたことを意味する。

(b)MCP-PMTの構造変更

本実施項目にて新規開発したMCP-PMT「H15547-07」をGreenレーザー実証機への実装する為には、実施項目「3.(1)-B」で製作したMCP-PMT用駆動電源「BL239-02」と組合せ、光検出器として構成する必要がある。一方、レーザー測距現行機に実装されたMCP-PMT「R5916U-64」と「H15547-07」とでは、基本構成および内部回路が異なる。図3-(2)-B-③-2、図3-(2)-B-③-3に、「R5916U-64」および「H15547-07」の基本構成と内部回路をそれぞれ示す。「R5916U-64」はカソード、ゲートメッシュ、MCP、アノードで構成されており、ゲートメッシュに印加する電圧を制御することでゲート機能を実現している。しかしこの構造では、ゲート制御用以外の電位が、全て単一の電源と分割抵抗により生成しているため、仕様目標とするレーザー光源の発振周期（50kHz）に応じて信号増幅率を変化させることができない。そこで「H15547-07」では、カソード、MCPin、MCPoutに対し個別に電位を供給する高圧端子をそれぞれ設けた。図3-(2)-B-③-4に当該高圧端子を具備する「H15547-07」の外観を示す。 MCP-PMT「H15547-07」に対し、MCP-PMT用駆動電源「BL239-02」を組合わせることにより、MCP部に対し個別に電位が供給さ

図 3-(2)-B-③-4
MCP-PMT「H15547-07」

れ、レーザー光源の発振周期に応じて高速に信号を増幅することが可能となる。

[(2)-B｜実施内容④｜光電子増倍管の低寿命化対策と最終評価]

＜概要＞

光検出効率が2倍以上のGaAsP光電面を有する光電子増倍管について、当該目標を上回る3.26倍を達成するMCP-PMTを製作した。併せて、当該MCP-PMTに対して低寿命化対策を実施することで、製品寿命相当（50%@1C/cm2）を上回る寿命改善効果を得た。当該MCP-PMTをGreenレーザー実証機に実装し、浅海試験・深海試験およびその他の事前動作確認等において使用した。その結果、長期・長時間の使用により量子効率の劣化が確認された。

(a)MCP-PMTの製作（Greenレーザー実証機実装用）

「(2)-B｜実施内容③」に製作したMCP-PMT「H15547-07」により得られた成果に基づき、Greenレーザー実証機へ実装するMCP-PMTを新たに2器製作した(「H15547-07-01」「H15547-07-02」)。「(2)-B｜実施内容③」の成果より、MCP-PMTが低寿命対策として具備するMCP上のAl膜およびその前段に配置するゲートメッシュを除外することで、収集効率（C.E.）を大幅に向上させた。併せて、ゲートノイズ対策の一環としてPMTのシステム構成を見直すことで、一部素子の変更を実施した。これにより、GaAsP光電面が提供する高い量子効率（Q.E.）に加え、Al膜・ゲートメッシュ除去に伴う収集効率（C.E.）の向上により、光検出効率（D.E.＝Q.E×C.E.）が要求値（2倍）以上を満足するMCP-PMTを製作した。当該MCP-PMTでは、Al膜・ゲートメッシュを除去したことにより、収集効率の向上が図られた一方、MCP-PMT内部で発生した陽イオンによる光電面への深刻なダメージ（短命化）を促進させる。そこで、短命化の原因物質となる陽イオンの抑制を目的として、イオン源となるMCP-PMT内部の残留物質の低減と、PMT内部材料から脱離するイオンの放出確率を低減させた。「(2)-B｜実施内容②-③」までの成果においてその実用性が確認されている「洗浄装置」および「成膜複合処理装置」を使用して、MCP製造工程におけるイオン源残渣除去を実施するとともに、MCP表面の電子洗浄、MCP内部からのイオン脱離の防止を実施した。これにより、本実施項目で製作したMCP-PMTには、製品寿命相当（50%@1C/cm2）を上回る延命効果が提供された。

(b)量子効率評価（Greenレーザー実証機への実装＋試験後）

新規開発したMCP-PMTをGreenレーザー実証機に実装し、基本性能を評価するために各試験（水槽試験・浅海試験・深海試験）を実施した。併せて、当該MCP-PMTをGreenレーザー実証機に実装する前、および実装解除後における量子効率を測定した。これにより、Greenレーザ

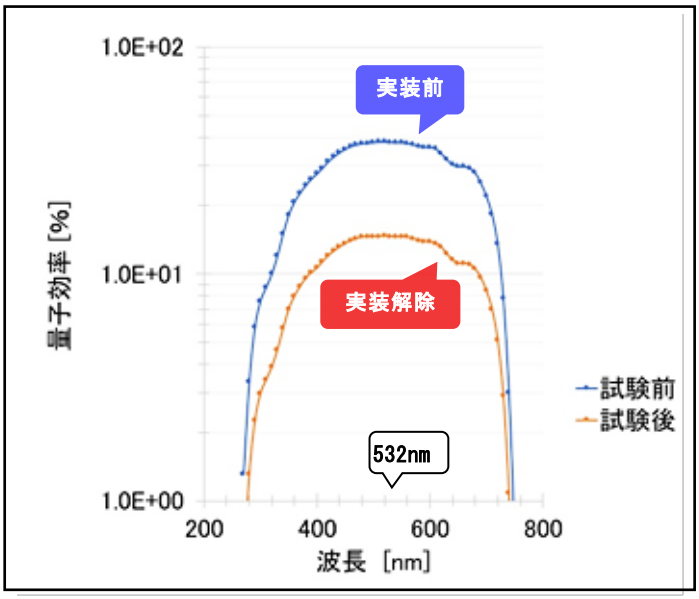


図 3-(2)-B-④-1　量子効率評価｜MCP-PMT｜Green レーザー実証機に

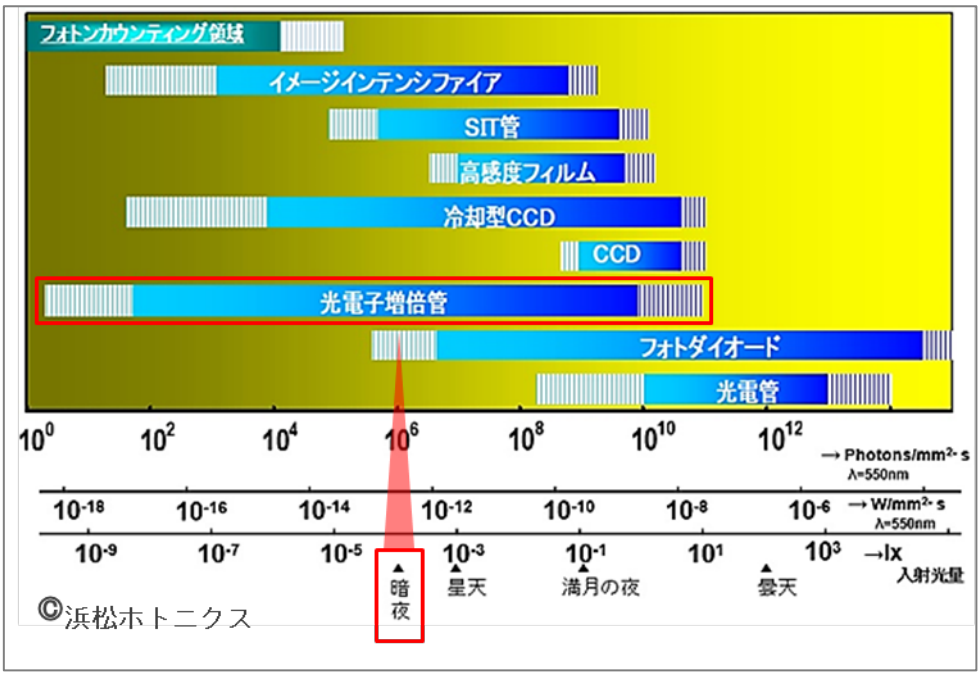


図 3-(2)-B-④-2　光強度・光量｜例示

一実証機へ実装したことによるMCP-PMTの劣化程度が評価される。

図3-(2)-B-④-1にMCP-PMT「実装前」と「実装解除後」の量子効率の特性（測定結果）を示す。測定結果より、「実装解除後」の量子効率（光電面感度）は「実装前」と比較して４割程度まで劣化していることが確認された。本結果は、これまでに実施してきた寿命試験から推定すると、10C/cm^{2}以上の負荷が入力されたことを意味する。これは約10^{-4}lx（≒暗夜状態の光量）において、5000時間以上動作させた状態と同等である（図3-(2)-B-④-2）。実際に、当該MCP-PMTをGreenレーザー実証機に実装後、石垣島周辺海域における浅海試験、初島東方海域における深海試験、多目的水槽における水槽試験×2回を実施している。それら各試験の期間中、およびその前後の期間におけるシステム調整や事前動作確認等を含むと、当該MCP-PMTを実装後にGreenレーザー実証機を動作させた時間は膨大である。そのため、気中・水中・海中（浅海／深海）の区別なく、内部散乱を含め、当該MCP-PMTには多大なストレス（相当量の光入力）が負荷されたことが考えられる。これらにより、想定よりMCP-PMTの量子効率の劣化が促進されたと推測され、製品相当の延命化は保持されていたと推察される。

[(2)-B｜実施内容⑤｜MCP-PMT実装機の製作｜まとめ]

＜概要＞

「(2)-B｜実施内容①-④」までに実施した成果を踏まえ、Greenレーザー実証機に実装する光検出器の高感度化について検討を行い、光検出効率がレーザー測距現行機搭載品の2倍以上および製品相当の寿命特性を有するMCP-PMTを製作した。併せて、Greenレーザー実証機への実装性について検討を行い反映した。当該MCP-PMTと実施項目「3.(1)-B」にて製作した駆動電源とで構成される光検出器をGreenレーザー実証機に搭載し、最終評価を実施する。

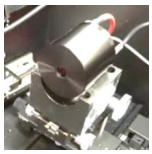
(a)MCP-PMT実装機の製作（Greenレーザー実証機用｜最終評価仕様）

「(2)-B｜実施内容③-④」の取り組みにおいて製作した Green レーザー実証機へ実装された MCP-PMT の評価に基づき、実装性を向上させ同レベルの光検出効率を有する MCP-PMT「H15547-07」を製作した。表 3-(2)-B-⑤-1 に当該 MCP-PMT「H15547-07」の性能仕様を示す。当該 MCP-PMT「H15547-07」は、実施項目「3.(1)-B」の取り組みにて製作した MCP-PMT 用駆動電源「BL239-03」と組合わされ、光検出器として Green レーザー実証機へ搭載に実装される。当該光検出器を適用した。

表 3-(2)-B-⑤-1　MCP-PMT「H15547-07」性能仕様

QE at530nm (μA/lm)	Gain (x10^6 times)	Anode Dark Current (nA)	Maximum Supply Voltage to MCP (V)
42.39	1.03	8.19	-1350

表 3-(2)-B-⑤-2　まとめ（MCP-PMT 製作過程と検証・評価）

年度	タイプ （数量）	目的	形状	検証項目	評価結果
R2 年度	H15547-07-Y001（1）	収集効率試験		Al 膜有	Al 膜を除去することで収集効率が 2.28 倍向上 （PMT ゲートメッシュ無構造）
	H15547-07-Y002（3）			Al 膜無	
R3 年度	H15547-07-Y003（6）	脱イオン装置条件出し		MCP 脱イオン処理	収集効率が R5916U-64 の 3.3 倍であることを確認
R4 年度	H15547-07-Y004（6）	脱イオン装置条件出し 深海試験用		MCP 脱イオン処理 高電圧入力 3 端子型	Life 試験にて製品レベル以上であることを確認
R5 年度	H15547-07-Y005（2）	深海試験用 （Green ﾚｰｻﾞｰ実証機）		MCP 脱イオン処理 高電圧入力 3 端子型	令和 6 年 3 月/9 月深海試験にて正常動作確認
R6 年度	R5916U-64	深海試験用 （UV ﾚｰｻﾞｰ実証機）		UV 実証機検証	令和 6 年 12 月深海試験にて正常動作確認済
	H15547-07-Y005（2）	深海試験用 （Green ﾚｰｻﾞｰ実証機）		MCP 脱イオン処理 高電圧入力 3 端子型	令和 6 年 12 月深海試験にて正常動作確認済

(b)MCP-PMT 製作の経緯とまとめ（検証・評価）

実施項目「3.(2)-B」において製作した MCP-PMT および検証項目、評価結果について、表 3-(2)-B-⑤-2 にまとめる。実施項目「3.(1)-B」の取り組みにおいて製作した MCP-PMT 用駆動電源と、本項にて製作した MCP-PMT とを組み合わせた光検出器を構築し、Green レーザー実証機に実装する。海中探査機に Green レーザー実証機に搭載した深海試験において、当該光検出器の性能と効果を確認した。深海試験の結果については実施項目「3.(1)-A」「3.(2)-A」「3.(1)-B」に示す。

(3)-A 機械学習による物性推定アルゴリズムの構築

[(3)-A｜目的]

海底を含む複数種の既知の物材に対して、三次元情報（形状データ）および異なる複数のレーザー光に対する反射率を実測し、環境パラメータ等を入力項とする機械学習を適用した物性推定アルゴリズムを検討・構築する。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(3)-A｜達成目標（終了時）]

機械学習を適用した物性推定アルゴリズムを用いて海底を含む複数種の既知物材の推定（類別）を海域試験にて行う。約70%の推定正解率を目指す。

[(3)-A｜達成目標（終了時）の達成状況]

■海底を含む複数種の既知物材の推定（類別）を海域試験にて行う　：　**達成**
■機械学習を適用した物性推定アルゴリズムを用いて約 70%の推定正解率　：　**達成**

[(3)-A｜実施内容①｜物性推定アルゴリズムの事前検討]

(a)物性推定アルゴリズムの概念設計

物性推定には、海底の三次元情報（形状データ｜距離データ）と海底の色差情報（反射率）とを利用する。反射率は色差に基づくデータであり、階調数は異なるがグレースケール画像に類似した特徴を有する。一方、三次元情報（形状データ｜距離データ）は反射率とは異なり、対象の空間的位置関係に特徴を持つ情報であることから、形状に特徴を有する海底域を効果的に抽出する方法として有効と考えられる。これらの情報から、一般的な海底底質である砂、岩、礫などと区別しつつ、海底資源の種類を分類できることが望ましい。しかしながら、これらの情報を分析し各識別対象の特徴を一般化することは困難である。分類を実現するためには、実際のレーザー計測により得られる情報を用いて学習し、学習により得られた識別対象の特徴からこれらを分類する教師有り機械学習手法を適用することが妥当である。以上から、物性推定アルゴリズムは教師有りの機械学習手法を適用し、正解率を指標として最適アルゴリズムを構築する。

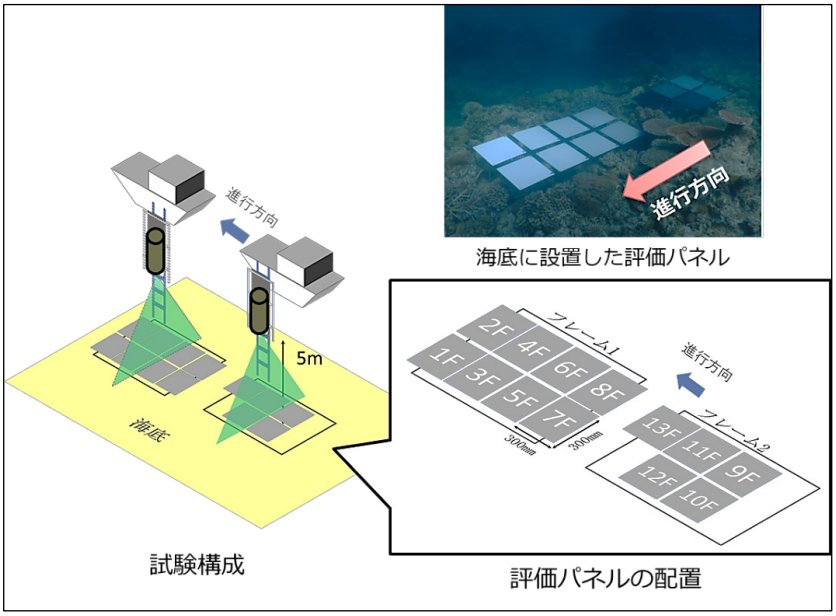
(b)学習データの取得方法

海底資源域は、一般的な海底底質である砂、岩、礫に紛れて存在することが多く、海底資源域の探索においては、これらと区別できることが重要となる。これを踏まえ学習データを取得する際は、海底資源域とその周辺とを包括して計測し、各情報を取得することを検討した。基本検討の段階で、実際の海底資源域に赴き、多様かつ大量の学習データを取得することは現実的ではなく代替として実際の海底鉱物サンプルを利用することが有効である。しかし、海底鉱物サンプルを入手することは難しく入手可能な量にも限界があり、また実際の海底資源域と同じ状態で保管できているものは少ない。併せて、海底鉱物サンプルのなかには毒性のものも多く、扱いが難しく極めて限定的となる。このため、海底資源域を模擬するモックアップを製作し、当該モックアップを用いて機械学習に要する学習データを取得することにした。

[(3)-A｜実施内容②｜物性推定アルゴリズムの設計]

＜概要＞

既知物材に対して三次元情報および反射率を実測し、物性推定アルゴリズムの基本設計に要するデータを取得した。データ抽出を含む機械学習に関する基本設計書を作成した。レーザー光の伝搬時間を計測することにより得られる三次元情報（形状データ｜距離データ）と推定対象の色差に起因するレーザー光の反射率は、対象物の輪郭や反射率分布など、各観測



図(3)-A-②-1 評価用パネルによる色差に応じた反射率(分離性)の確認｜浅海試験
(Green レーザー評価機｜UV レーザー実証機)

点の空間的位置関係に特徴を持つ情報であることから、特徴を空間的かつ多角的に自動抽出して識別する能力を有する畳み込みニューラルネットワークを適用した。

(a)物性推定アルゴリズムの基本設計に要するデータ取得

レーザー反射光を利用して物性推定を行う上で有効性の高い情報は、レーザー照射対象からの反射率（強度情報）である。三次元情報（形状データ｜距離データ）は、熱水域のよう

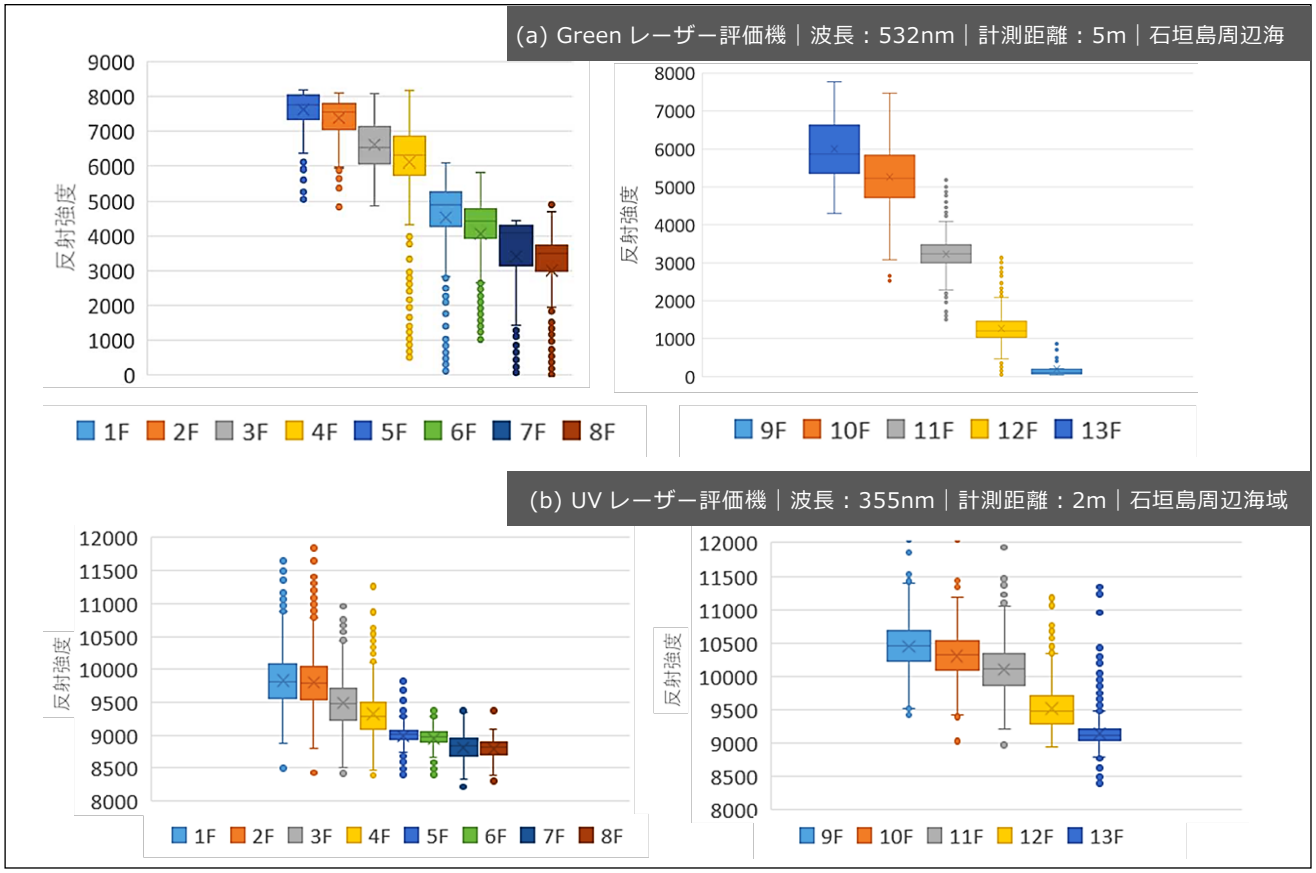


図 3-(3)-A-②-2　浅海試験｜評価用パネルによる色差に応じる反射率（分離性）の確認｜評価用パネル

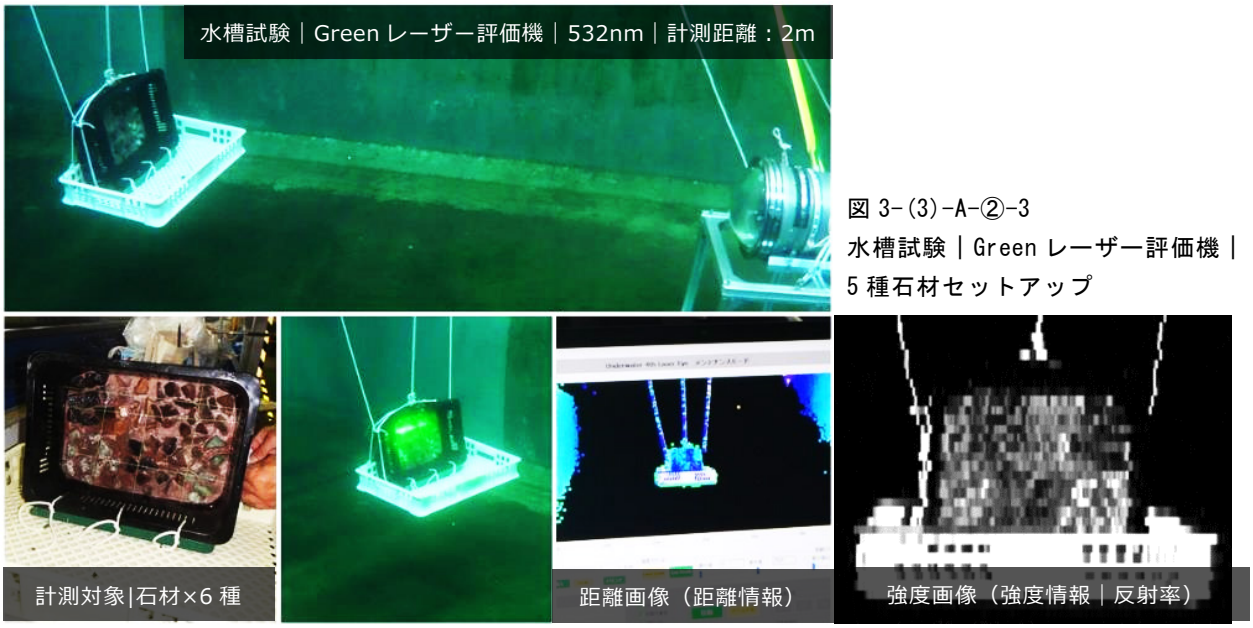


図 3-(3)-A-②-3
水槽試験｜Green レーザー評価機｜5 種石材セットアップ

な隆起構造を形成する三次元形状そのものに特徴のある海底域を識別する場合には有効と推測されるが、大概において資源域の海底は、色彩や模様のような外観に特徴を有するケースが多いため、これら特徴の差異を表現する反射率から生成される強度画像が重要となる。この確認のため、グレースケールの評価用パネルを浅海域にて計測し、色差の分離性を確認した。図 3-(3)-A-②-1 に浅海試験における計測系のコンフィギュレーションを示す。Green レーザー評価機（波長｜532nm）および UV レーザー実証機（波長｜355nm）による反射率データの強度分布を図 3-(3)-A-②-2 に示す。レーザーの波長により色差の分離性は異なるが何れの波長も概ねパネルの色差に応じた強度分布となっており、色彩や模様のような外観の違いを見分けられる可能性が示唆される。また、色彩の異なる 6 種類の石材を配置した小型の海底モックアップを作成し、水槽試験において反射率を計測した結果、各種石材の明暗の差異が表現されていることが確認された（図 3-(3)-A-②-3）。

(b)物性推定アルゴリズムの開発方針

波長の異なる 2 種類のレーザー光で海底面を計測して得られるレーザー光の反射率およびレーザー光の伝搬時間を計測する。これにより得られる三次元情報（形状情報）を利用することで、資源域を含む海底の底質を自動的に識別する物性推定アルゴリズムについて検討した。日本の産業界にとって有益な海底鉱物資源として、メタンハイドレート、熱水鉱床、マンガンクラスト、レアアース泥等が確認されている。しかし、レーザー光に対する海底面の物理反応からこれらの海底鉱物資源域の種類の識別ならびに海底鉱物資源域以外の海底面との分別に有効な特徴量を分析し抽出することは容易ではない。このように解析的に一般的な特徴量を抽出することが困難な分類問題に対して、近年急速に発展を遂げている教師有りの機械学習を適用することで、データに潜在する特徴量を学習によって自動的に抽出して識別を行う方法が有効と考える。

開発を進めている Green レーザー実証機、UV レーザー実証機による海底計測は、120 度の画角を有するラインスキャンの中心照射方向を鉛直下向きとして、当該各実証機を搭載する海中探査機の進行方向と直交する方向のラインスキャンを行いながら、海中探査機を水平に移動（直進）させるこ

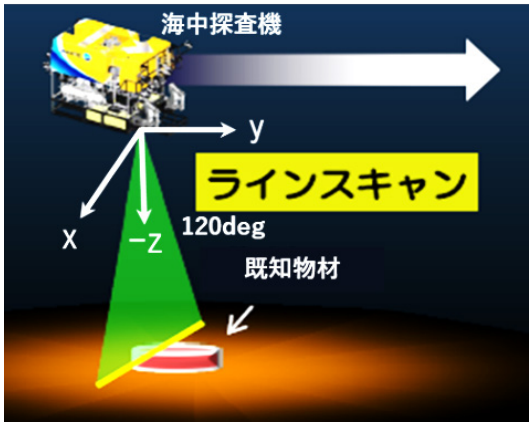


図 3-(3)-A-②-4
海中探査機の移動によるラインスキャン
（概念図｜レーザー実証機搭載状態）

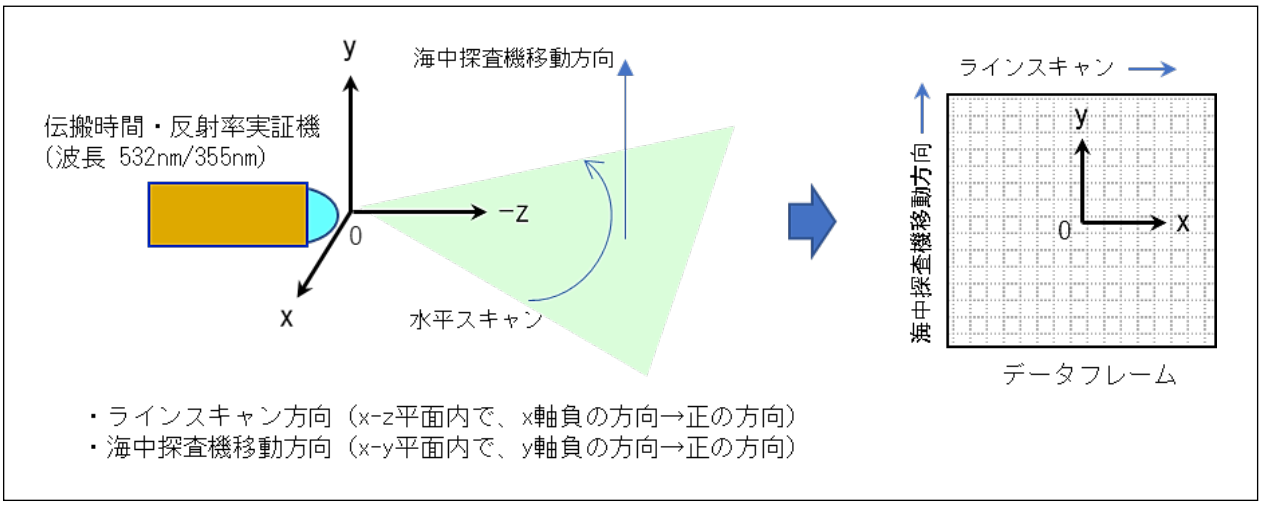


図 3-(3)-A-②-5　レーザー実証機によるスキャニング出力とデータフレーム（2 次元配列）

とにより海底面を走査する（図 3-(3)-A-②-4）。海底面上の各走査点からは、各実証機の位置を基準とした 3 次元直交座標の z 座標（ラインスキャン中心の照射方向）と、反射率の強度画像がペアで得られ、ラインスキャン方向と海中探査機進行方向の走査の順に並べた 2 次元のデータフレーム（2 次元配列）が出力される（図 3-(3)-A-②-5）。この際、各レーザー実証機には、ラインスキャンに連動してラインスキャンと直交する軸でのスキャン機能（エレベーション機能）も有しており、これにより、海中探査機を静止させた状態でも 2 次元の空間スキャンが可能であるが、この機能を使用して海底面を走査する場合でも同様に、データは 2 次元配列として提供される。各レーザー実証機が計測する反射強度は 8,192 段階で色差を表現したデータであり、階調数は異なるがグレースケール画像に類似した特徴を有する。そのため、反射率の二次元配列となる強度画像から海底鉱物資源域やその他の海底を識別するのは、一般的な画像認識の問題と同様に、データフレーム（可視化画像）上の対象物の輪郭や反射率の強度分布など、可視化画像に対する潜在的な特徴を学習により自動抽出する方法を適用するのが効果的かつ妥当な手段と考えられる。一方、3 次元情報（形状データ｜距離データ）は反射率データ（強度情報）と評価する物理量が異なり、対象の空間的位置関係に特徴を持つ情報であることから、形状に特徴を有する海底域を効果的に抽出する方法として有効と考える。

画像認識の分野で近年最も評価が高い技術として、人間の網膜と視覚野の神経ネットワーク構造を模倣してモデル化された畳み込みニューラルネットワーク（CNN：Convolutional Neural Network）がある。CNN は教師有りの機械学習の 1 手法であるディープラーニングの

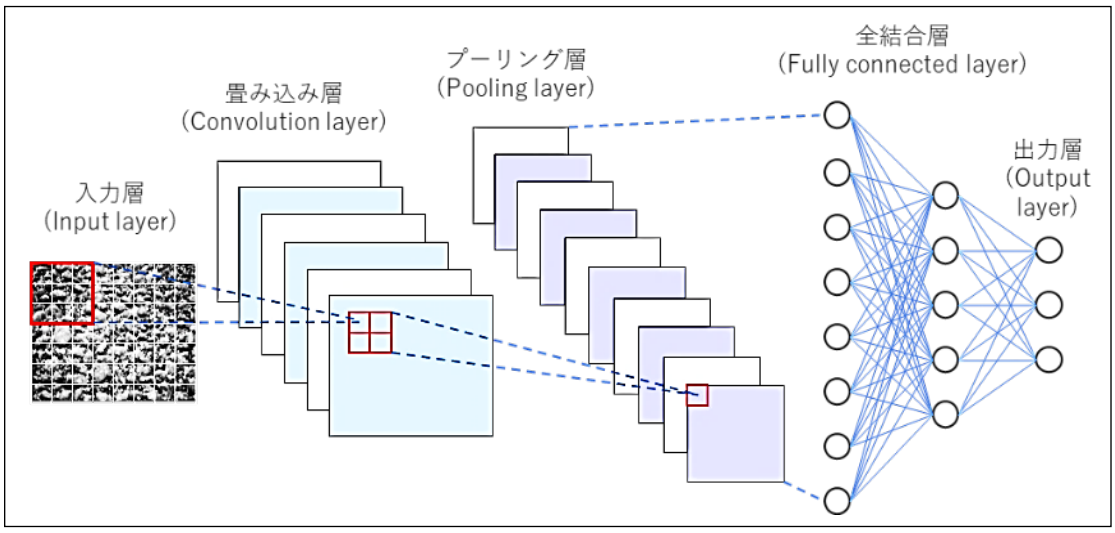


図 3-(3)-A-②-6　畳み込みニューラルネットワーク基本構成｜例示

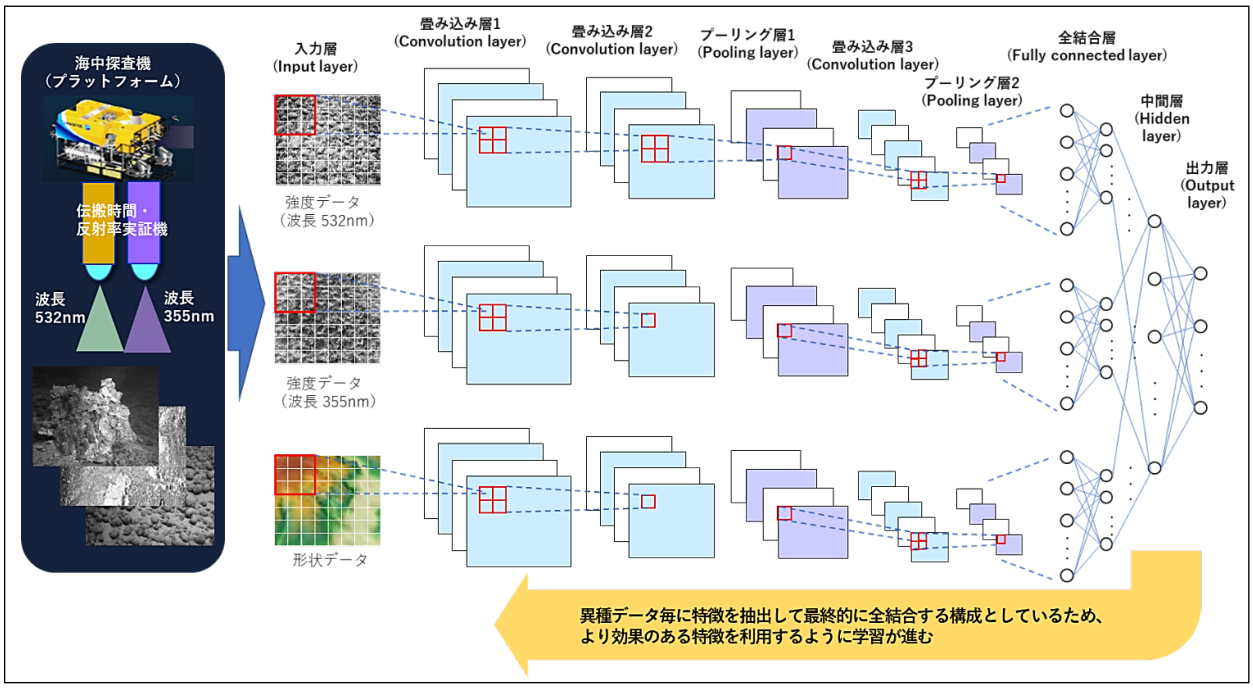


図 3-(3)-A-②-7　CNN をベースとした多入力複合型ニューラルネットワーク構成概念図

アーキテクチャーの１つで、入力画像フレームに対してフィルタの役割を果たす畳み込み処理によって画像の特徴を多角的に抽出する層を有することを特徴としている。画像フレーム内での対象物の位置ずれや遠近によるサイズ差異への対応能力にも優れ、現在では画像認識の標準的な技術となっている。CNN の基本構成を図 3-(3)-A-②-6 に例示する。CNN では、畳み込み層およびプーリング層を多重に組み合わせて、よりディープなネットワーク構造に拡張することにより、複雑な問題への対応能力を高めることが可能である。以上を踏まえ、海底の底質を識別する物性推定アルゴリズムは、 CNN をベースとして設計・構築した。

(c)物性推定アルゴリズムの基本設計

異なるレーザー波長（532nm｜355nm）に対する反射率（強度情報）と三次元情報（形状データ｜距離データ）のそれぞれから異なる特徴が得られた場合、単独情報だけからでは分離できない対象でも、複数の情報を同時に使用して学習を行ったネットワークを用いて総合的に判定することにより分離できるようになる可能性がある。そこで、物性推定アルゴリズムは、教師有り機械学習の１手法である CNN をベースとし、複数の入力ソースに対応した多入力統合型のニューラルネットワーク構造とした。本構造の概念図を図 3-(3)-A-②-7 に示す。CNN は主に畳み込み層とプーリング層を有することを特徴としている。畳み込み層は、学習により獲得する複数種類のフィルタとの畳み込み処理により対象物の輪郭や反射率の強度分布などの潜在的特徴を多角的に抽出した複数の特徴画像を出力する（図 3.5(6)-8）。プーリング層はデータの圧縮を行うことで畳み込みにより抽出された特徴画像を荒く整理し、データフレームにおける対象物の位置ずれ、遠近によるサイズ差異、ゆがみ、変形等の影響を軽減して、対象分類の汎化能力を高める能力を有する。Green レーザー実証機が出力する反射強度データおよび距離データ並びに UV レーザー実証機が出力する反射強度データについて、前述の処理を各データで個別に行うことで、それぞれ

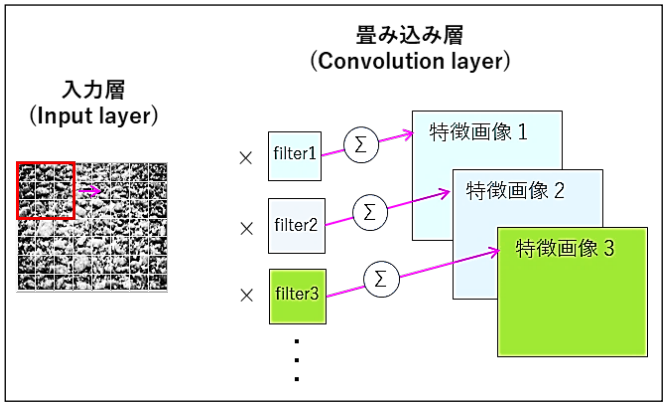


図 3-(3)-A-②-8　畳み込み処理による特徴画像の獲得

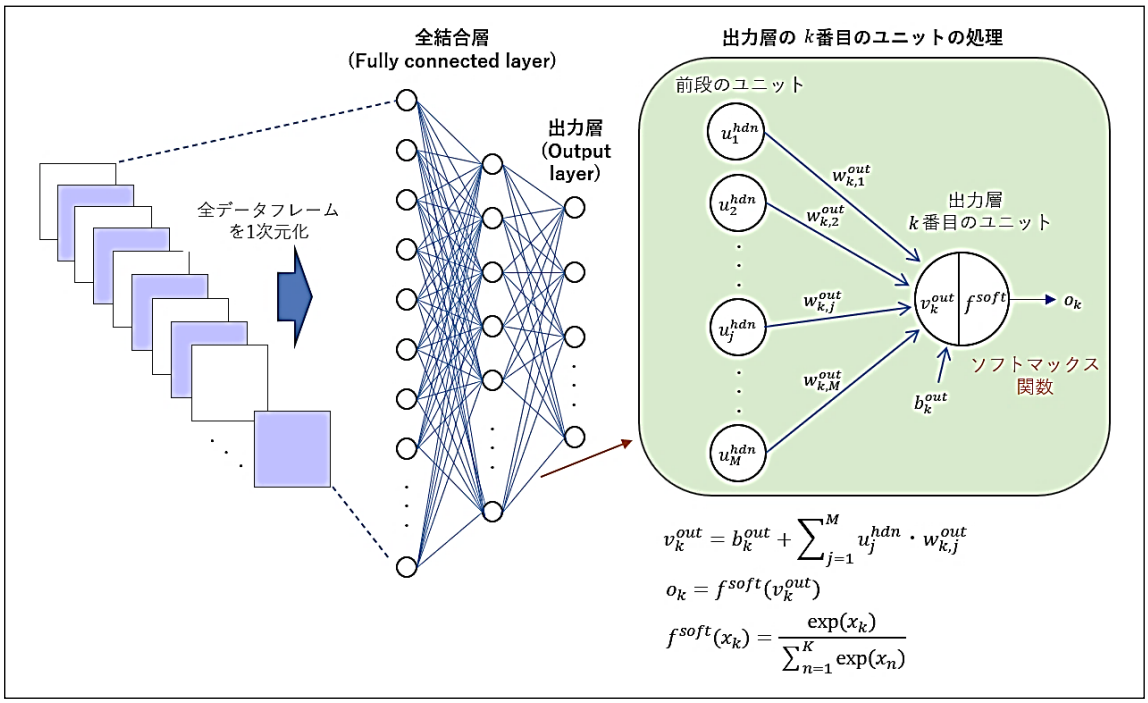


図 3-(3)-A-②-9　出力層の k 番目のユニットの処理｜概略図

のデータからの特徴抽出と汎化能力の向上を行う。これにより、各データから個別に抽出されたこれらの情報の全てが後段の全結合層に展開され、ユニット（図 3-(3)-A-②-7｜○印）が全て結合された従来の階層型のニューラルネットワーク構造により、前段で得られた全ての特徴情報を用いて識別処理を行い、出力層から識別結果を出力する。図 3-(3)-A-②-9 に示すように、出力層の k 番目のユニットの出力 o_k は、前段のユニットの出力 u_jˆout (j=1, 2, …, N)とネットワークパラメータ w_(k, j)ˆout 等から、ソフトマックス関数 fˆsoft を経由して演算処理される。

出力層から出力される識別結果は、One-Hot エンコーディング方式とした。この方式では、識別対象と同数のユニットを出力層に設けて各ユニットを各識別対象と一対一に対応付け、正解の識別対象のみが 1 を出力し、それ以外が 0 を出力するように学習を行う。例えば、鉱物 A、鉱物 B および鉱物 C を識別対象とした場合のそれぞれの正解出力は、図 3-(3)-A-②-10 となるように定義する。識別結果は必ずしも正解出力とはならないが、ソフトマックス関数により出力の合計は 1 になるように調整されるため、出力層の各ユニットの出力は

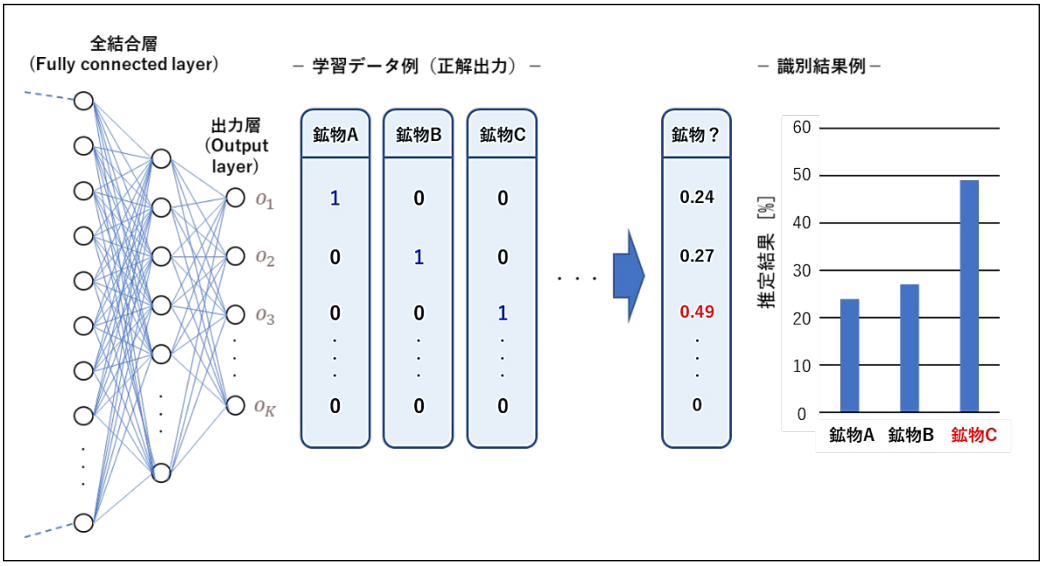


図 3-(3)-A-②-10 One-Hot エンコーディング方式の正解出力例と識別結果例

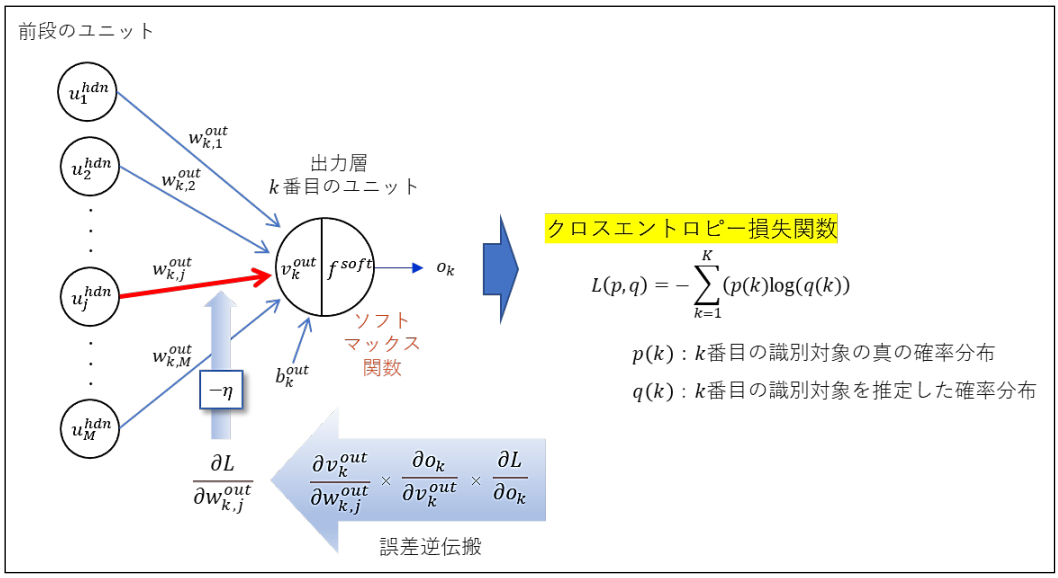


図 3-(3)-A-②-11 誤差逆伝搬法による出力層の k 番目のユニットに対するネットワークパラメータの更新

対応する識別対象の確率分布として表現することができる。図 3-(3)-A-②-10 の識別結果の例では、鉱物 A の確率が 24%、鉱物 B の確率が 27%、鉱物 C の確率が 49%であることを意味する。この場合の識別結果は、確率が最も高い値となっている鉱物 C と判定する。

学習は、識別対象の入力データと One-Hot エンコーディングされた正解出力をペアで与え、クロスエントロピー誤差関数を評価指標とした誤差逆伝搬法により、出力層から入力層に向かって畳み込み処理のフィルタ係数を含む全てのネットワークパラメータを更新することで行う（図 3-(3)-A-②-11）。誤差逆伝搬法による学習の効果を左右するパラメータとして、ネットワークパラメータの更新割合である学習率（図 3-(3)-A-②-11 における η）があるが、これを含めたネットワークパラメータの更新方法の最適化手法として Adam を採用した。Adam は現在最も評価の高い最適化手法の 1 つであり、誤差関数の勾配と勾配の二乗から算出した指数移動平均を使用することでローカルミニマム付近での修正量の振動を抑制しつつ収束を加速する能力を有する。また、過学習による教師データへの過剰適合を防止して般化能力を高める方法としては、ドロップアウト処理を採用した。ドロップアウト処理は、

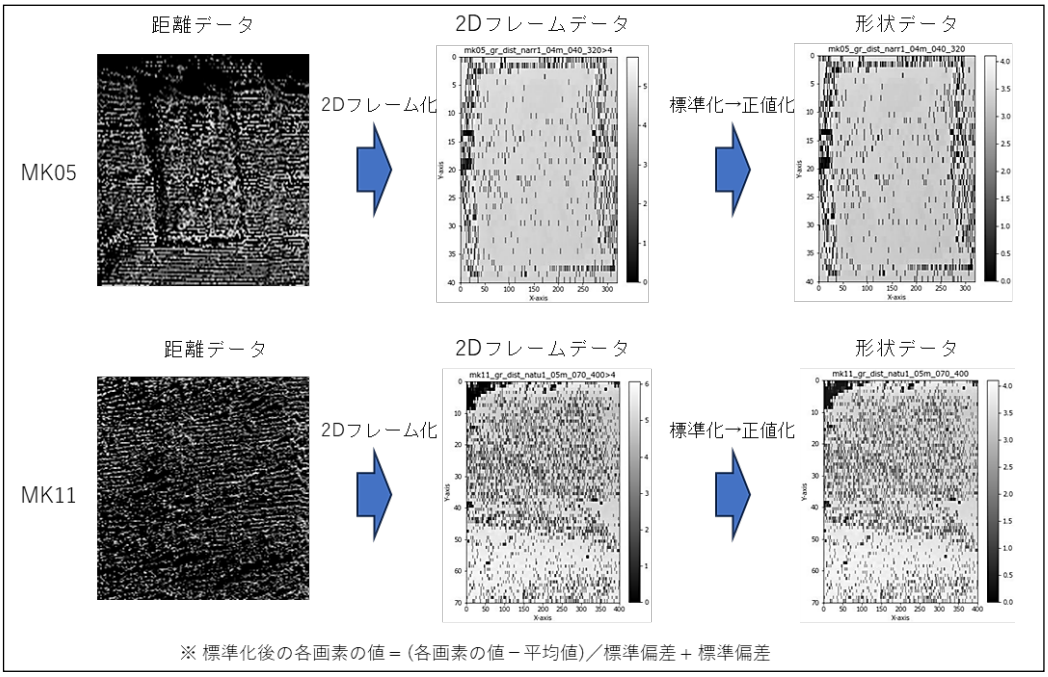


図 3-(3)-A-②-12 距離データの前処置（形状データ化までの流れ）

総結合層の入力段で全ユニットの結合に対し、一定割合の結合を不活性化させながら学習を行う方法で、具体的には設定した割合でランダムに対象となる結合を選択して、その結合の出力を一時的に 0 に置き換える処理を行う。これによって学習データへの過剰適合を防ぎ、般化能力を向上させる。なお、CNN の入力データは一般的に正規化または標準化されたデータを使用する。ここでは、強度データは識別対象の性質がなるべく失われないよう正規化（＝各画素の値／全画素の最大値）を行い、距離データは距離の大きさによって識別対象の形状の性質が失われないよう標準化（＝(各画素の値－平均値)／標準偏差）を行うこととした。特に、距離データの標準化は、同じ対象の画像が距離の大きさに寄らずに形状としての特徴を抽出するために重要な前処理となる。形状データは、さらに、活性化関数（ReLU）の関数領域に合わせ、-σ ～ σ の分布を 0～2σ となるように正方向に σ だけ平行移動して正値化した。後述する識別対象の海底モックアップ MK05 および MK11 を例に、形状データ化の流れを図 3-(3)-A-②-12 に示す。以降、CNN の入力データはこれらの前処理が行われている前提で記述し、前処理後の距離データを形状データと呼ぶ。

[(3)-A｜実施内容③｜物性推定アルゴリズムの構築と性能評価]

＜概要＞

物性推定アルゴリズムを実行するソフトウェアを構築し、既知物材による計測データを用いて物性推定を実施した。当該ソフトウェアは、近年、画像の識別に有効な手法として高い評価を得ている畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network｜CNN）をベースとして構成しており、Green レーザー実証機および UV レーザー実証機が計測する異なる波長（532nm｜355nm）の複数レーザーに対する反射率（強度情報）と三次元情報（距離情報｜形状データ）の何れかを選択、もしくは全てを入力し、これらの情報から計測対象の特徴を自動抽出して識別することを目的として構築した。水槽内に既知物材（海底モックアップ）を配置し、各実証機にて計測した結果（可視化画像）を用いて、当該ソフトウェアによる物性推定アルゴリズムの基本的な識別性能を評価した。その結果、正解率 92.5%の高

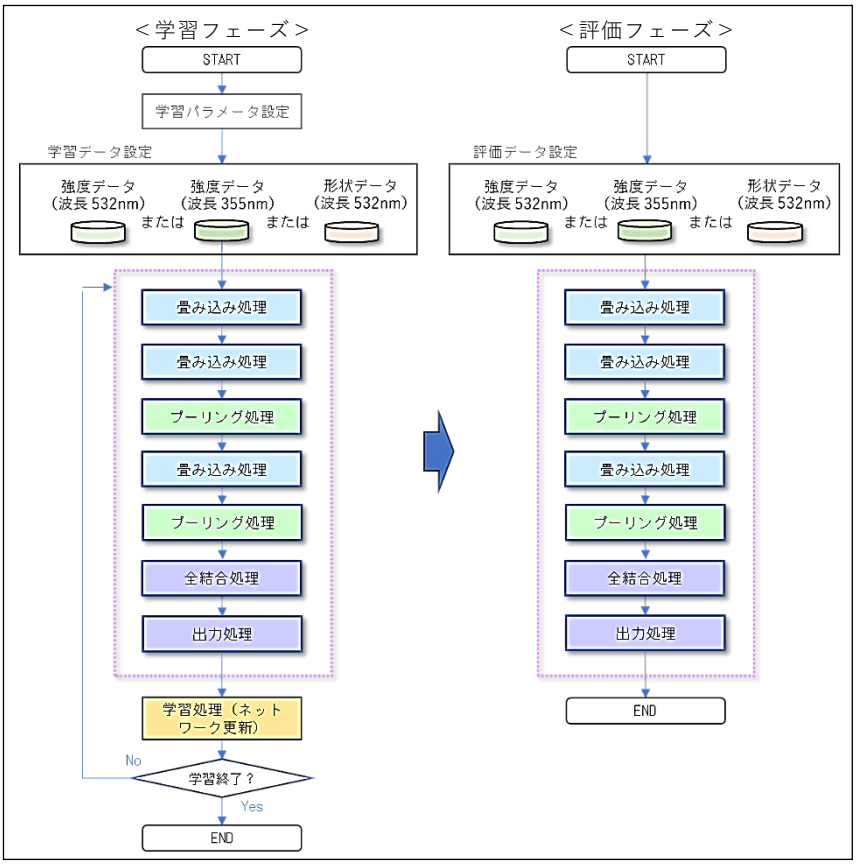


図 3-(3)-A-③-1　単独情報のみを使用するアルゴリズムの処理フロー

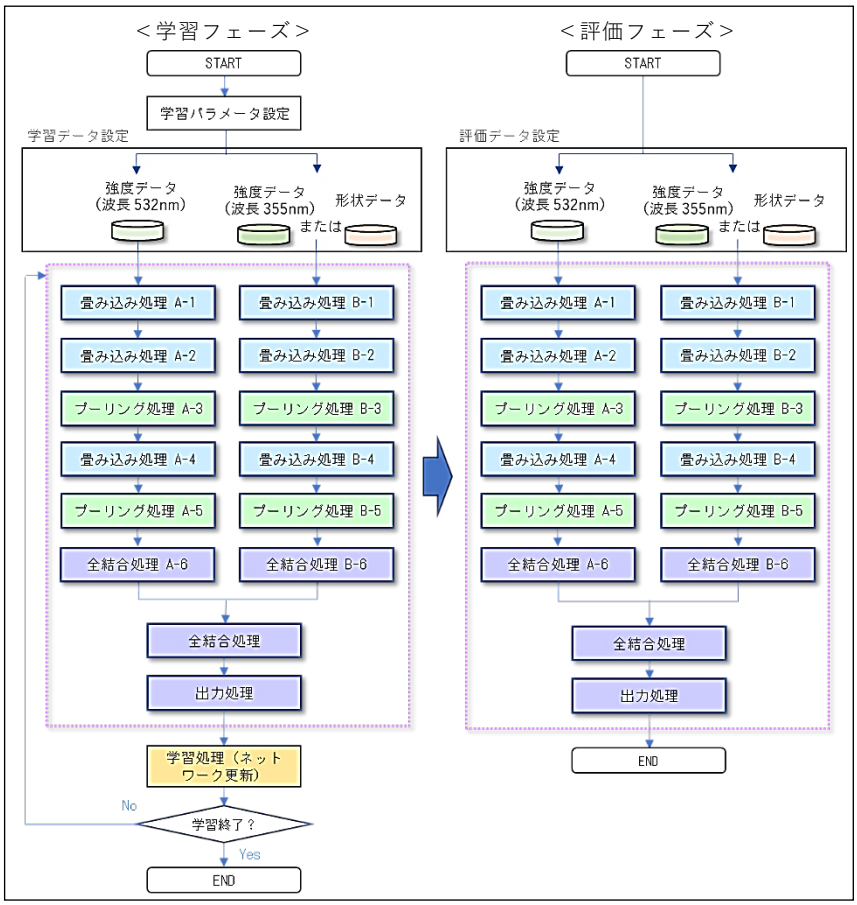


図 3-(3)-A-③-2　2 種類の波長の強度情報を同時に使用する統合型アルゴリズムの処理フロー

い識別性能が確認された。また、深海底に配置した海底モックアップと自然の海底域とを対象として、物性推定アルゴリズムの実環境下における有効性を評価した結果、正解率 86.3%の高い識別性能が確認された。本成果は、「海底を含む既知物材に対して正解率 70%」（最終目標）を満足していることを示す。当該アルゴリズムの類別性能を評価することで改良点を整理した。

(a)物性推定アルゴリズムを実行するソフトウェアの構築

複数の入力ソースに対応した多入力複合型のニューラルネットワーク構造の概念図を図 3-(3)-A-②-7 に示したが、どの入力ソースが正解率に寄与するか、入力ソースの統合が高い正解率をもたらすかの予測は困難である。そこで、物性推定アルゴリズムを実行するソフトウェアは Green レーザー実証機の計測する反射率（強度情報）のみ使用して識別する場合、UV レーザー実証機（波長 355nm）の計測する反射率（強度情報）のみ使用して識別する場合、Green レーザー実証機または UV レーザー実証機の計測する三次元情報（距離情報｜形状データ）のみ使用して識別する場合、および、これらの情報の何れかまたは全てを同時に使用して識別する場合のいずれにも対応可能なソフトウェアとし、これらを比較評価できるようにした。単独情報のみを使用するアルゴリズムの処理フローを図 3-(3)-A-③-1 に、2 種類の波長の強度情報を同時に使用する統合型アルゴリズム処理フローを図 3-(3)-A-③-2 に示す。2 種類の波長の強度情報と形状情報を同時に使用する統合型アルゴリズム処理フローを図 3-(3)-A-③-3 に示す。何れのアルゴリズムも、各入力情報に対するネットワーク構成として、「畳み込み層」が 3 層、プーリング層が 2 層、全結合層が 1 層として、畳み込みニューラルネットワークの基本構成を拡張し、より複雑な分類問題への適用力を高めた。更に、統合型アルゴリズムでは、各情報に対してこれらのネットワーク構成を並列に処理し最終段に更に全結合層を 1 層設けることで、識別に有効な情報を利用するよう学習が進むようにしている。なお、これらの処理フロー図において、学習データは学習のみに使用

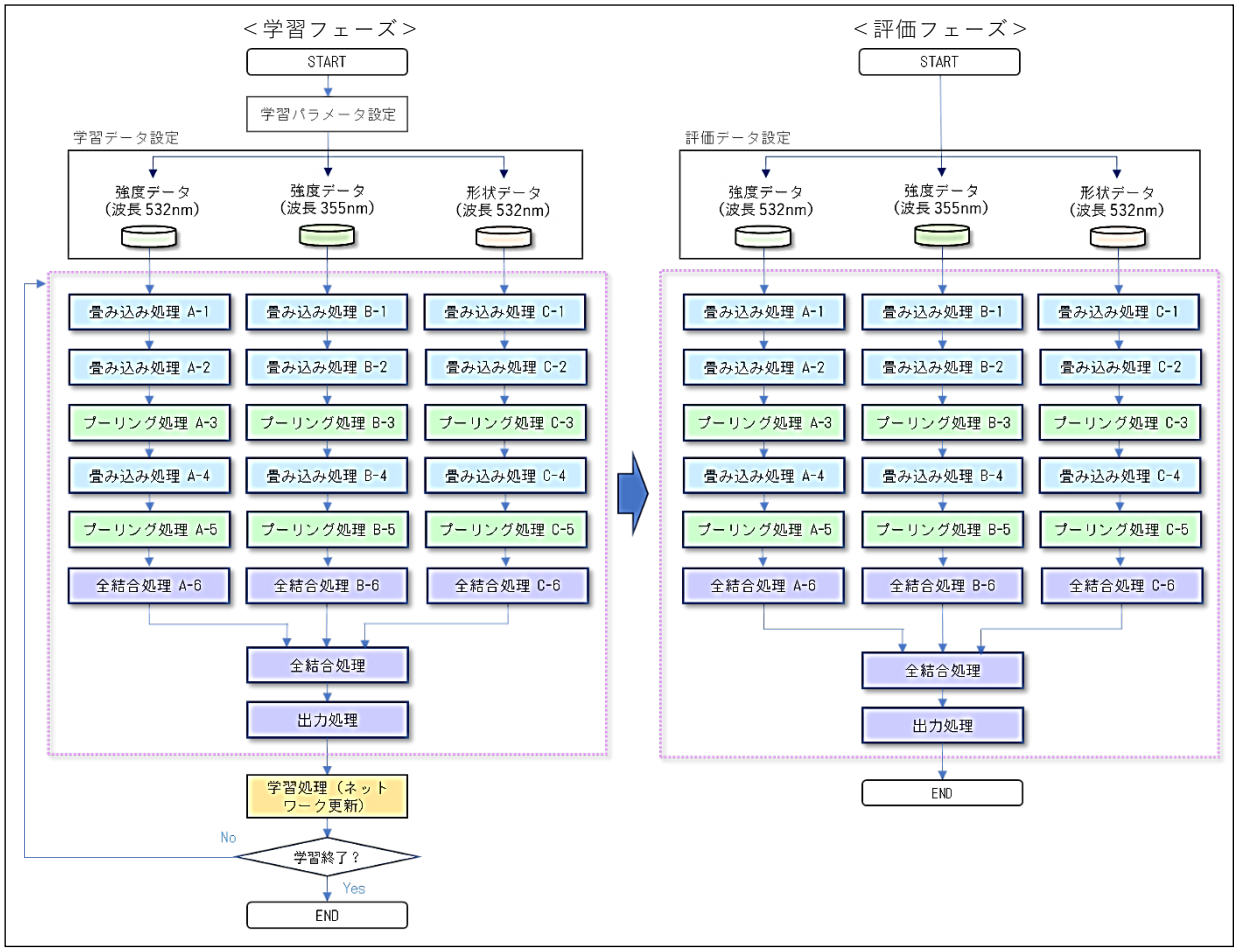


図 3-(3)-A-③-3　2 種類の波長の強度情報と形状情報を同時に使用する統合型アルゴリズムの処理フロー

し、評価データは評価のみに使用され、学習データと評価データは完全に分離される。これらのアルゴリズムの学習パラメータの設定値はいずれも定評の高いものや値を採用した（表 3-(3)-A-③-1）。学習回数は今回の識別問題においてほぼ収束が見られた 500 回とした。物

表 3-(3)-A-③-1　構築した各アルゴリズムの学習パラメータ設定値

学習パラメータ	設定
活性化関数（出力層以外）	ReLU
活性化関数（出力層）	Softmax 関数　(One-hot Encoding)
目的関数	交差エントロピー損失関数
学習の最適化アルゴリズム	Adam
ドロップアウト率	50%
畳み込み処理のフィルタサイズ	3×3
プーリング処理	Max pooling（2×2）
学習回数	500 回（正解率最大値を採用）
試行回数	100 回

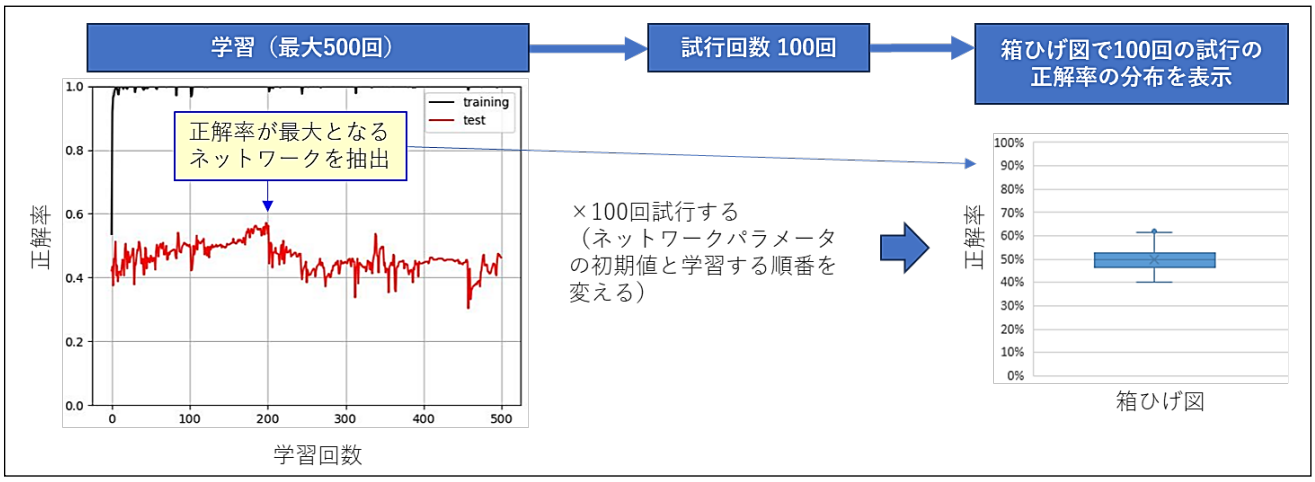
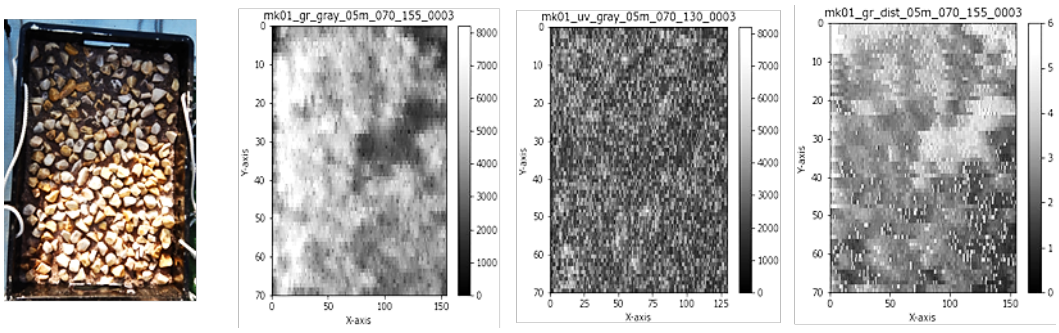


図 3-(3)-A-③-4　物性推定アルゴリズムの評価方法

性推定アルゴリズムの評価方法を図 3-(3)-A-②-4 に示す。各評価対象（ネットワーク構造や学習データのバリエーション）に対して、500 回の学習過程において評価データの正解率が最も高いネットワークを抽出する。これを 1 試行とする。次に、ネットワークパラメータの初期値と学習データの処理順序を変えて学習を実行する。この試行を 100 回繰り返す。これにより、100 種類のネットワークが構築されることになり、これらのネットワークの正解率の分布を箱ひげ図で表す。この分布はあくまで参考情報であり、最大値が最も重要であり最大値を評価対象の正解率の結果と判断した。

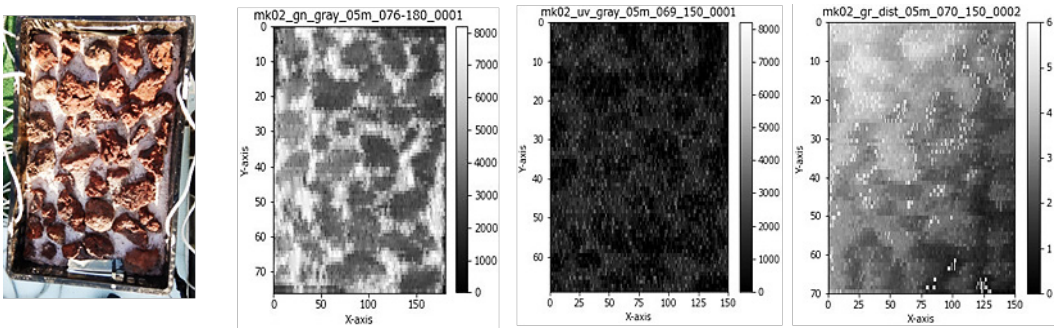
(b)物性推定アルゴリズムの基本性能評価（水槽試験）

物性推定アルゴリズムの基本性能を確認するため、10 種類の海底モックアップを識別対象として水槽試験を実施した。なお、海底モックアップ（MK10）は、実際の海底から採取されたマンガン団塊の一部からマンガン団塊を模擬して作成したものである。各海底モップアップは「3.(1)-A｜実施内容⑤」図 3-(1)-A-⑤-4 に、本水槽試験の計測系コンフィギュレーションは図 3-(1)-A-⑤-23 に示している。海底モックアップは金属製のイーゼルに固定して移動台車からロープで吊り下げて、レーザーに対して石貼面が正面を向くように配置させた。Green レーザー実証機と UV レーザー実証機を海底モックアップから 5m 離して並列配置させ、海底モックアップを 2D スキャン計測した（水平 4,320 画素×垂直 300 画素）。海底モックアップの計測結果を図 3-(3)-A-③-5～図 3.5(6)-14 に示す。Green レーザー実証機の強度画像はグレースケールながらモックアップの輪郭や形状を比較的よく捉えているが、UV レーザー実証機の強度画像はダイナミックレンジが狭く Green レーザー実証機の強度画像に劣る結果となっている。この原因としては、水槽のある建屋の窓ガラスからの太陽光の漏れ込みがあり、これが影響して UV 帯のレーザー光が相対的に減衰した可能性が高い。一方、後記する深海試験では、UV レーザー実証機についても Green レーザー実証機の強度画像に近いダイナミックレンジが得られているため、深海域の運用には問題ないと考える。



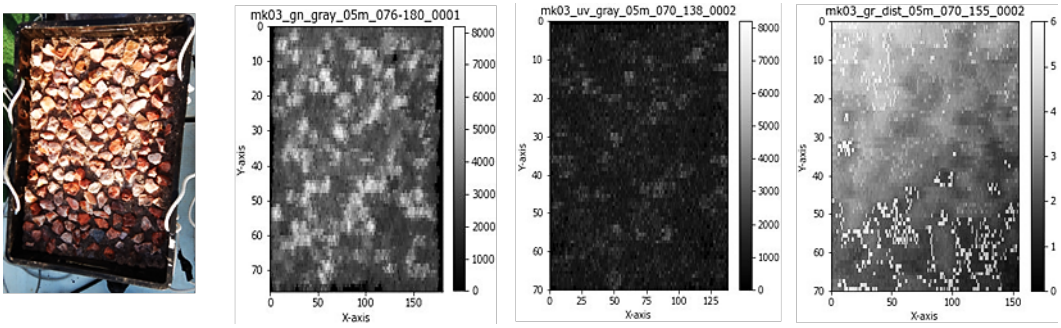
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-③-5　水槽試験｜計測結果｜海底モックアップ（MK01）



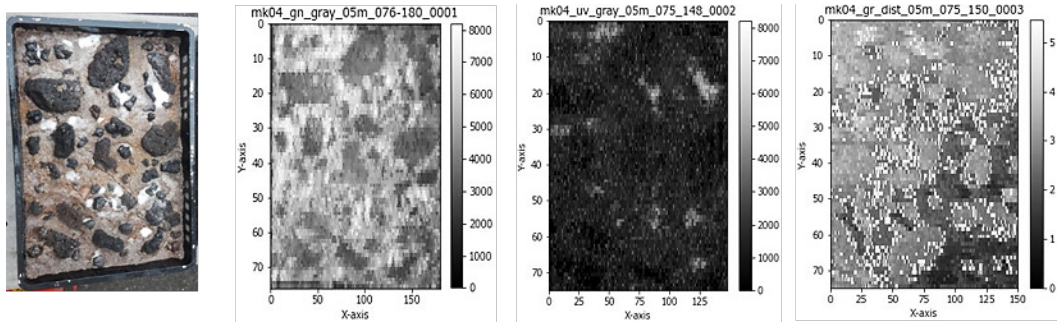
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-③-6　水槽試験｜計測結果｜海底モックアップ（MK02）



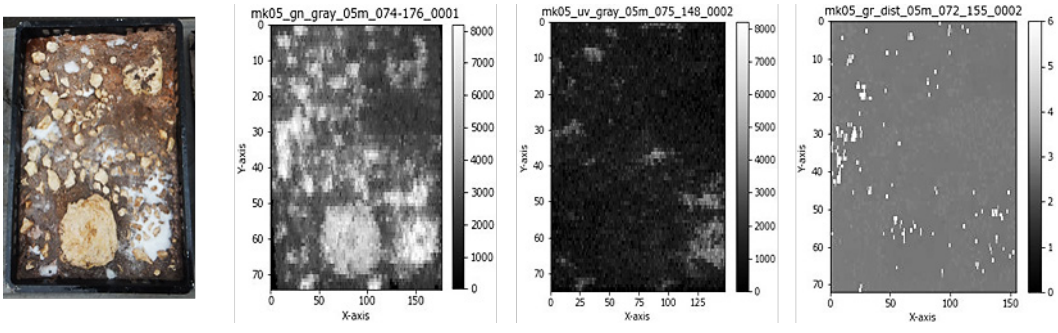
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-③-7　水槽試験｜計測結果｜海底モックアップ（MK03）



(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

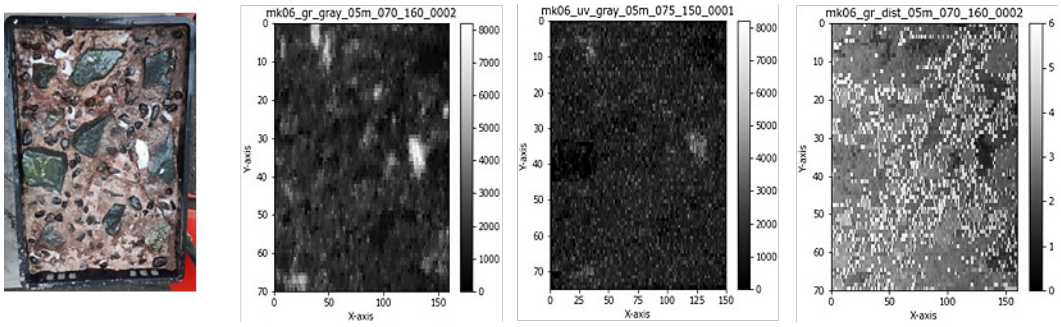
図 3-(3)-A-③-8　水槽試験｜計測結果｜海底モックアップ（MK04）



(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

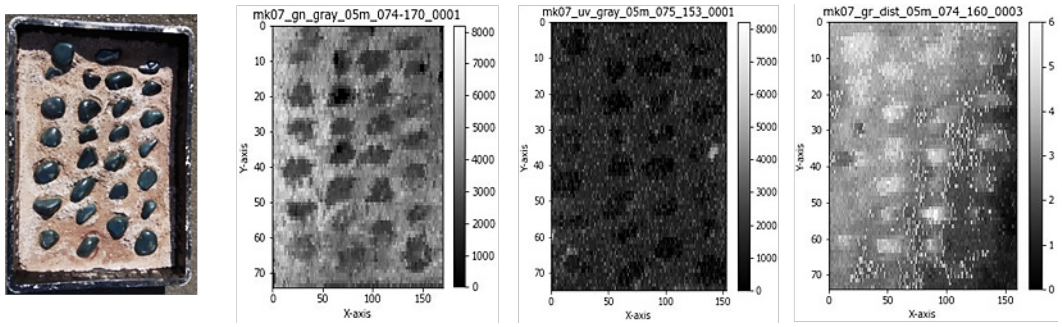
図 3-(3)-A-③-9　水槽試験｜計測結果｜海底モックアップ（MK05）

物性推定アルゴリズムの基本性能評価では、これらの水槽で計測した可視化画像を使用する。ここで、学習で使用する画像と評価で使用する画像を異なるものとするため、図 3-(3)-A-③-15 に示すように、画像を 2 分割し各海底モックアップで異なる部位の画像を学習用画像と評価用画像に分けて使用した。また、海底モックアップを異なる視点から計測した場合



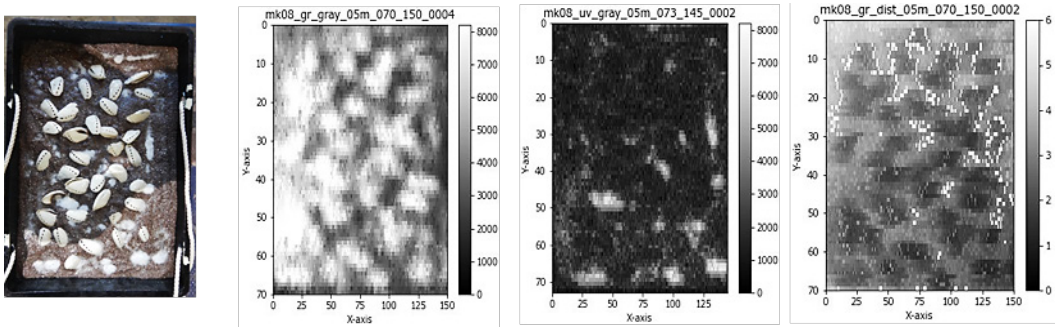
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-③-10　水槽試験｜計測結果｜海底モックアップ（MK06）



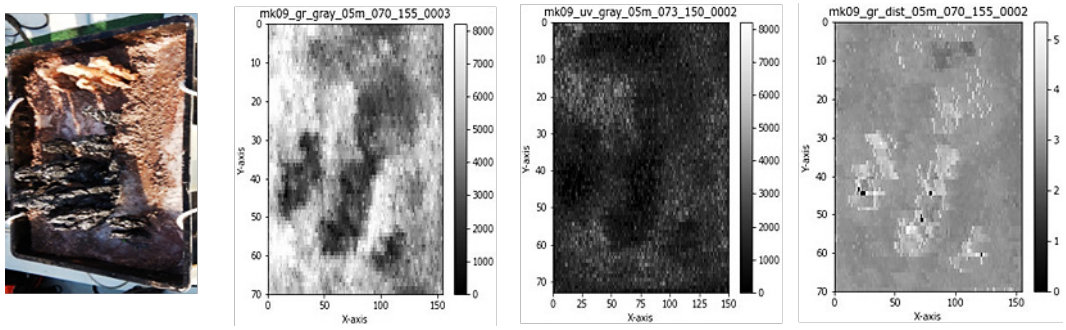
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-③-11　水槽試験｜計測結果｜海底モックアップ（MK07）



(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

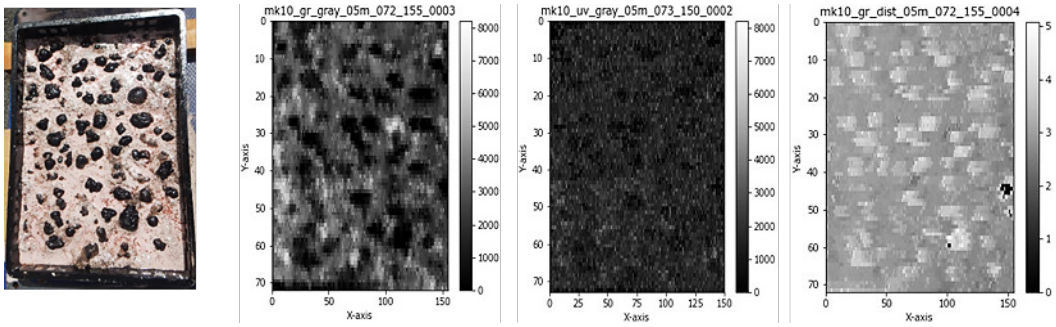
図 3-(3)-A-③-12　水槽試験｜計測結果｜海底モックアップ（MK08）



(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-③-13　水槽試験｜計測結果｜海底モックアップ（MK09）

のバリエーションを想定するため、分割した画像のそれぞれに対して縦方向および横方向に視点を 0[deg]から 45[deg]まで変更させた画像をアフィン変換により生成し、1 種類の海底モックアップあたり 16 パターンの画像を生成した。これらの学習用画像全 160 画像と評価用画像全 160 画像で物性推定アルゴリズムを評価した場合を CASE 1 とする。さらに、物性推



(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-③-14　水槽試験｜計測結果｜海底モックアップ（MK10）

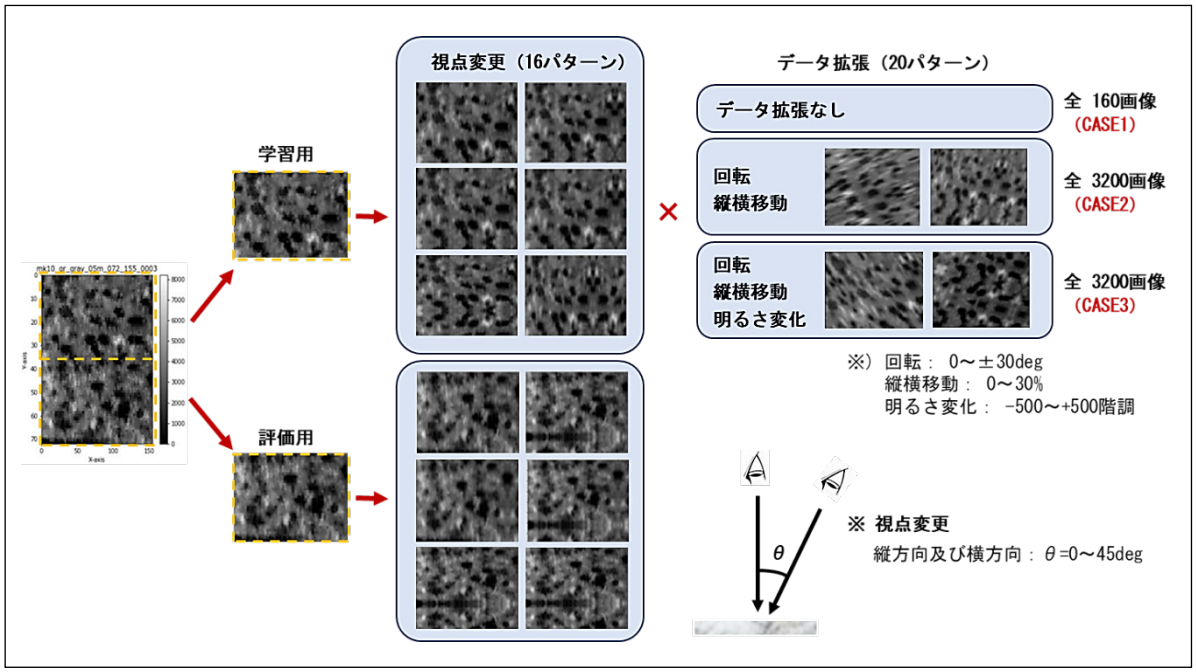


図 3-(3)-A-③-15　水槽試験｜物性推定アルゴリズム｜学習用画像・評価用画像

定アルゴリズムの汎化能力を向上させるため、データ拡張技術により学習用の画像を 1 つの視点変更画像あたり 20 パターンの水増しを行った。データ拡張の方法は 2 種類とし、1 つは画像回転（0～±30deg）と縦横移動（0～30%）をランダムに組み合わせた場合（CASE2）、もう 1 つは画像回転（0～±30deg）と縦横移動（0～30%）に明度変化（-500～500）をランダムに組み合わせた場合（CASE3）とした。CASE2 および CASE3 では何れも、全海底モックアップを合計すると 3,200 画像である（海底モックアップ数 10×視点変更 16×データ拡張 20＝3,200）。

評価を行った 5 種類の物性推定アルゴリズムと使用したデータの関係を表 3-(3)-A-③-2 に示し、これらのアルゴリズムのネットワーク規模（学習で更新されるウエイト数）を表 3-(3)-A-③-3 に示す。また、5 種類の物性推定アルゴリズムに対する識別結果（推定正解率）を図 3-(3)-A-③-16～図 3-(3)- A-③-20 に示す。物性推定アルゴリズムは、確率的勾配降下法に基づき学習を行うことから学習開始時のネットワークの初期値や学習する画像の順序により学習結果が異なる。このため、識別結果は、初期値や学習順序の異なる 100 回の試行の分布を箱ひげ図で表しており、それぞれが異なる学習過程で形成された異なるネットワークの識別結果であり、箱の右の数値は上が最大値、下が平均値である。これらの結果から、3 画像統合型 CNN による CASE2 の学習が最もよい結果となっており、92.5%の高い正解率が実現できていることが確認できる（図 3-(3)-A-③-19）。Green レーザー強度画像を使用した単独型 CNN による識別結果でも CASE3 の場合に 90.0%の高い正解率が得られているが（図 3-(3)-

表 3-(3)-A-③-2　評価した物性推定アルゴリズムと使用したデータ（水槽試験）

LN	ネットワーク形式	処理フロー	使用したデータ（画像）	結果
1	単独型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-1	Green レーザー強度画像	図 3-(3)-A-③-16
2	単独型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-1	UV レーザー 強度画像	図 3-(3)-A-③-17
3	単独型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-1	Green レーザー 形状画像	図 3-(3)-A-③-18
4	2 画像統合型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-2	Green レーザー 強度画像 UV レーザー 強度画像	図 3-(3)-A-③-19
5	3 画像統合型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-3	Green レーザー 強度画像 UV レーザー 強度画像 Green レーザー 形状画像	図 3-(3)-A-③-20

表 3-(3)-A-③-3　物性推定アルゴリズムのネットワーク規模（水槽試験）

LN	ネットワーク形式	ネットワーク規模 （ウエイト数）
1	単独型 CNN ネットワーク	5，624，026
2	2 画像統合型 CNN ネットワーク	13，335，978
3	3 画像統合型 CNN ネットワーク	23，155，322

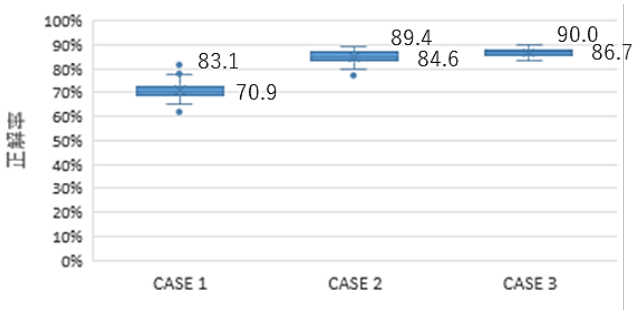


図 3-(3)-A-③-16　単独 CNN による識別結果（水槽試験）
（Green レーザー 強度画像）

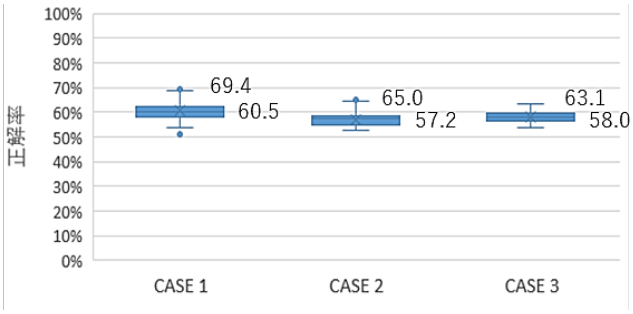


図 3-(3)-A-③-17　単独 CNN による識別結果(水槽試験)
（UV レーザー 強度画像）

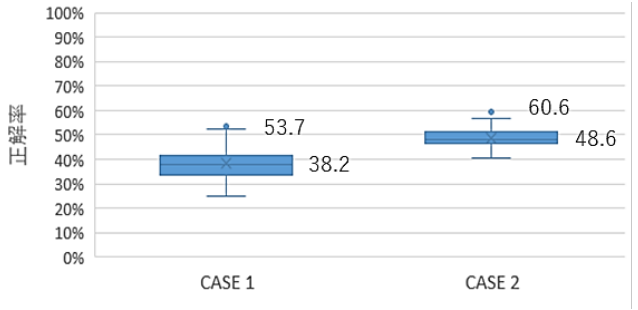


図 3-(3)-A-③-18　単独 CNN による識別結果(水槽試験)
（Green レーザー形状画像）

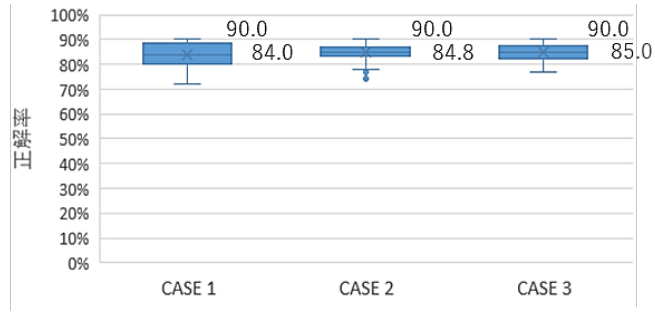


図 3-(3)-A-③-19　単独 CNN による識別結果(水槽試験)
（Green レーザー強度画像＋UV レーザー強度画像）

A-③-16）、これに正解率が 69.4%程度の UV レーザー強度画像を統合することにより、更に

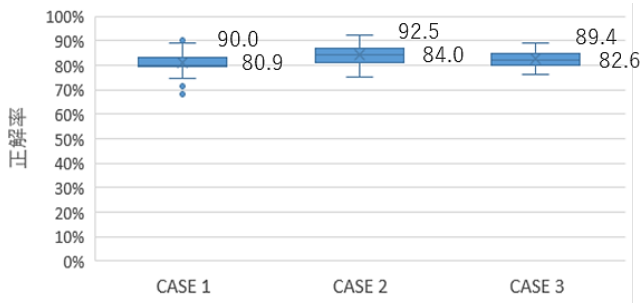


図 3-(3)-A-③-20　3 画像統合型 CNN による識別結果（水槽試験）
（Green レーザー強度画像＋UV レーザー強度画像＋Green レーザー形状画像）

識別性能の向上が確認された。これら試験結果より、異種情報（異なるレーザー波長画像）を統合することによる効果が示された。

(c)物性推定アルゴリズムの実海域性能評価（深海試験1｜R5年度｜相模湾・初島東方海域）

物性推定アルゴリズムの実海域での性能を確認するため、海中探査機「かいこう」に Green レーザー実証機、UV レーザー実証機および海底モックアップを搭載して、初島東方の水深 850-900m の海底において深海試験を実施した。各実証機および海底モックアップを搭載した「かいこう」のセットアップは図 3-(1)-A-⑤-15 に、本深海試験の計測系コンフィギュレーションは図 3-(1)-A-⑤-16 に示している。Green レーザー実証機と UV レーザー実証機は、「かいこう」後方の左右のフレームに鉛直下向きに取り付けており、「かいこう」可能な限り水平姿勢を保った状態で直進させながら、レーザーを鉛直下向きを中心として左右方向にスキャンすることで海底および海底に設置した海底モックアップを計測する。本深海試験では、海象が悪く試験期間が半減したことから、Green レーザー実証機は最大計測距離の評価に専念し、UV レーザー実証機の強度情報と距離情報を使用して物性推定アルゴリズムの実海域性能評価を実施した。

各海底モックアップは「かいこう」前部のサンプルバスケットに搭載し、マニピュレータを使用して海底に設置した。海底モックアップは前記水槽試験で使用したものと同じものを使用したが、気象・海象による潜航計画の制約およびサンプルバスケットの搭載量の制約により、MK02-MK06 および MK10 の 6 種類を選定し使用した。これらを海底に設置した状態の写真を図 3-(3)-A-③-21 に示す。本試験海域の海底には、シロウリガイ（以降、「MK11」）とシンカイヒバリガイ（以降、「MK12」）の群生域が複数存在しており、これら特徴的な海底の計測も行い、物性推定アルゴリズムにおける識別対象に追加した。なお、シロウリガイ

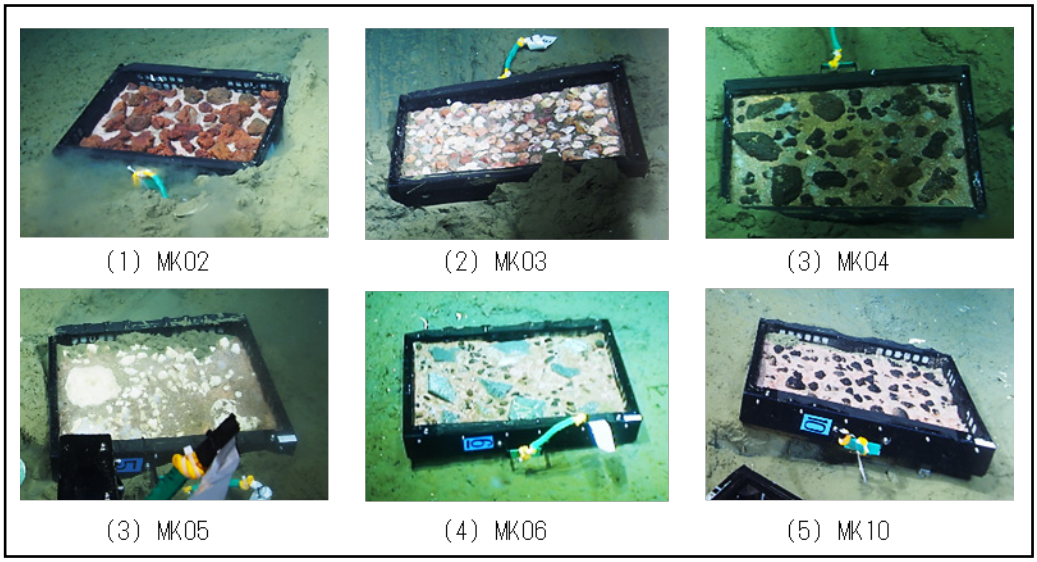


図 3-(3)-A-③-21　計測対象（識別対象）｜海底に設置した海底モックアップ｜全 6 種類

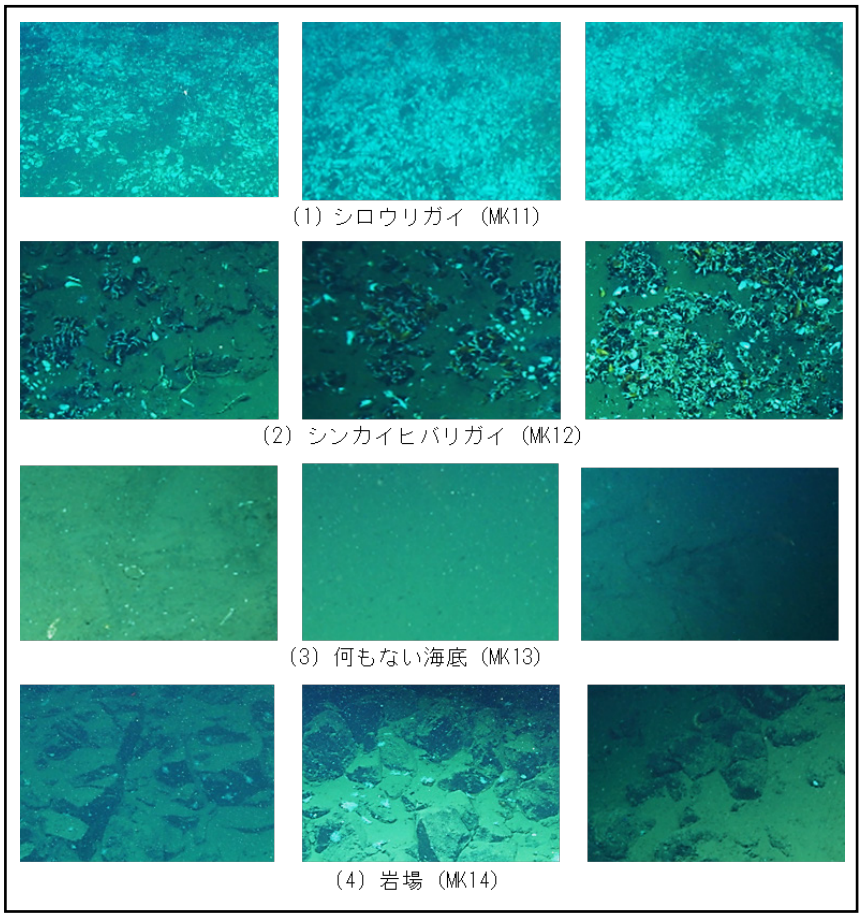


図 3-(3)-A-③-22　計測対象（識別対象）｜自然海底｜全 4 種類

は、メタンなどを多く含む熱水域に密集して生息する白色の二枚貝で、付近に有効な鉱物資源域が存在する可能性を示唆する重要な目標物である。また、特徴のない海底（以降、「MK13」）と岩場（以降、「MK14」）は本試験海域の海底に広く存在する一般的な底質であり、特徴的な海底とこれら特徴のない海底とを区別できることが重要と考え、新たな識別対象として加えた。これらの自然海底のカメラ画像を図 3-(3)-A-③-22 に例示する。選定した海底モックアップ 6 種類（MK02/MK03/MK04/MK05/MK06/MK10）に加え、自然海底 4 種類（MK11/MK12/MK13/MK14）の計 10 種類を、物性推定アルゴルリズムにおける識別対象として計測する。

計測は、水平分解能 4,320 画素設定のラインスキャンを行いつつ、「かいこう」を速度約 0.5knot 以下の低速で航行させながら実施した。このときの UV レーザー実証機と計測対象の距離は 5m 程度を予定したが、実際は海底の傾斜や凹凸、支援母船と連結するためのテザーケーブルの影響等により、3～6m 程度であった。本計測において UV レーザー実証機の水平最大分解能である 8,640 画素を設定しなかった理由は、画素数を増やすと同一範囲の計測時間が増えることから、限られた潜航時間内でより多くの対象を計測することを選択したためである。自然海底全体の強度画像と形状画像を図 3-(3)-A-③-23～図 3-(3)-A-③-26 に示

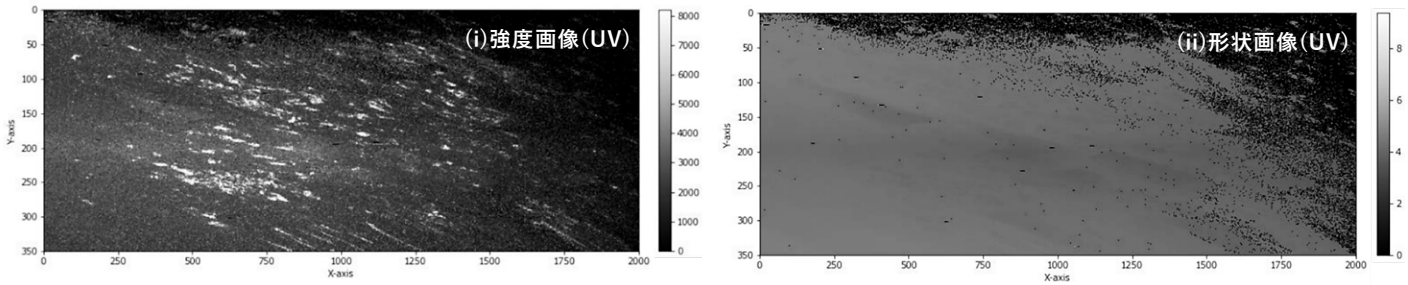


図 3-(3)-A-③-23　計測結果｜深海試験 1｜シロウリガイ｜MK11

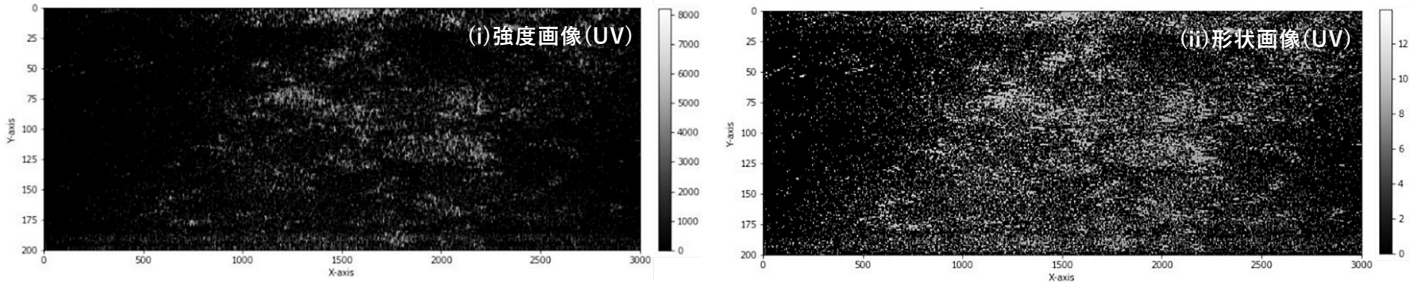


図 3-(3)-A-③-24　計測結果｜深海試験 1｜シンカイヒバリガイ｜MK12

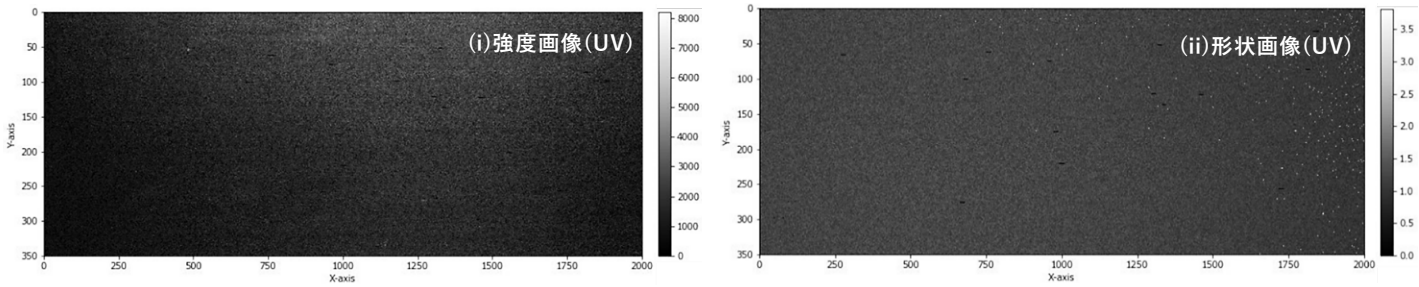


図 3-(3)-A-③-25　計測結果｜深海試験 1｜何もない海底｜MK13

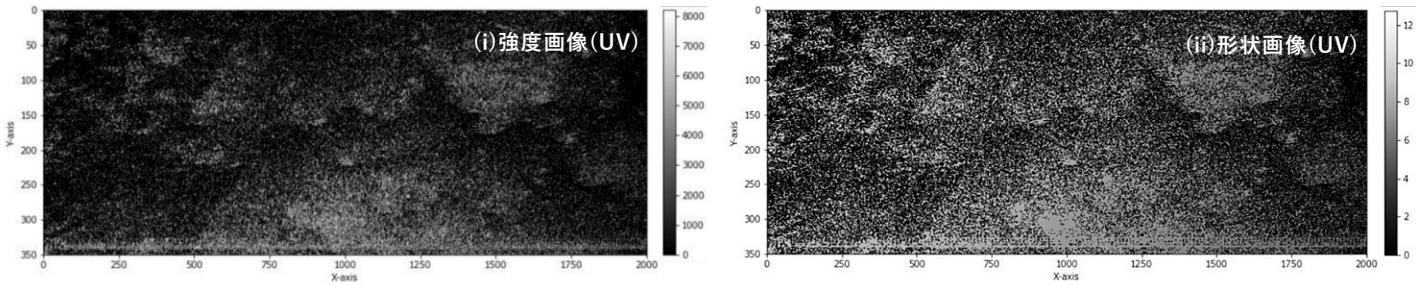
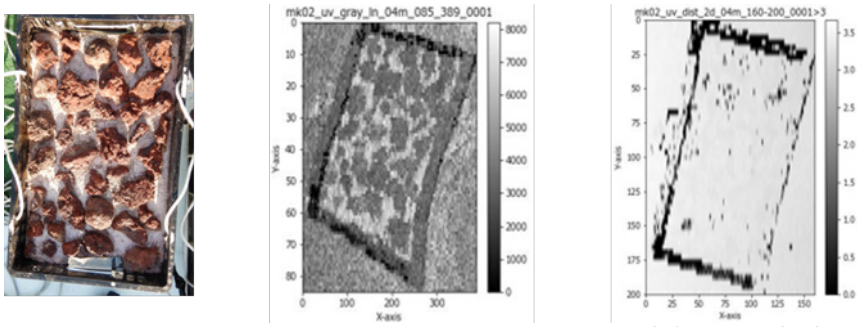


図 3-(3)-A-③-26　計測結果｜深海試験 1｜岩場｜MK14

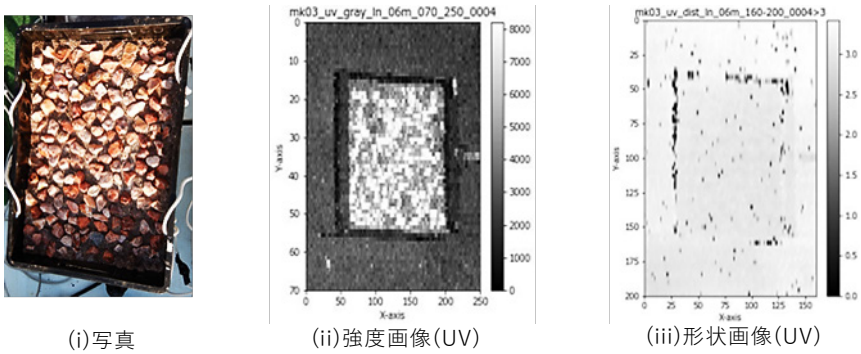
す。物性推定アルゴリズムの評価（識別）に使用する画像は、海底モックアップの画像サイズと同程度のサイズに切り出して使用した。またこの際、学習に使用する画像と評価に使用する画像が同一とならないように、場所を変えて切り出している。６種類の海底モックアップと４種類の自然海底の計測結果に対する切り出し画像の図 3-(3)-A-③-27～図 3-(3)-A-③-36 に例示する。

学習用画像および評価用画像ともに縦方向および横方向に視点を 0～45[deg]まで変更させた場合を想定し、アフィン変換により１つの画像あたり 16 パターンの画像を生成した。学習用画像全 160 画像と評価用画像全 160 画像で物性推定アルゴリズムを評価した場合を



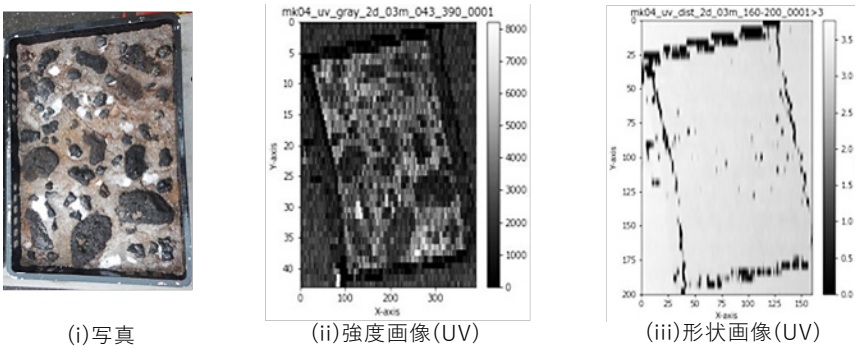
(i)写真　(ii)強度画像(UV)　(iii)形状画像(UV)

図 3-(3)-A-③-27　計測結果｜深海試験 1｜海底モックアップ（MK02）



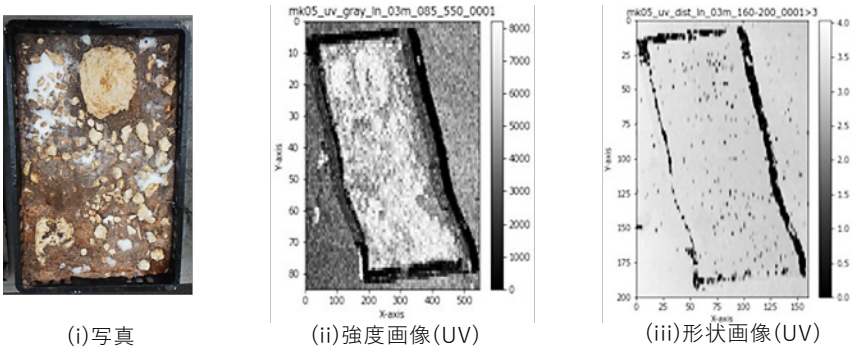
(i)写真　(ii)強度画像(UV)　(iii)形状画像(UV)

図 3-(3)-A-③-28　計測結果｜深海試験 1｜海底モックアップ（MK03）



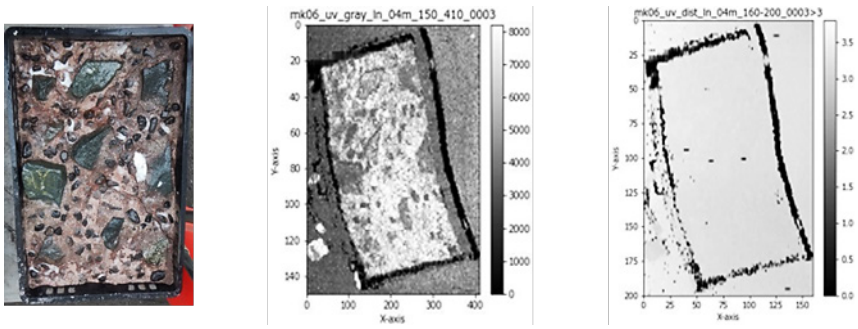
(i)写真　(ii)強度画像(UV)　(iii)形状画像(UV)

図 3-(3)-A-③-29　計測結果｜深海試験 1｜海底モックアップ（MK04）



(i)写真　(ii)強度画像(UV)　(iii)形状画像(UV)

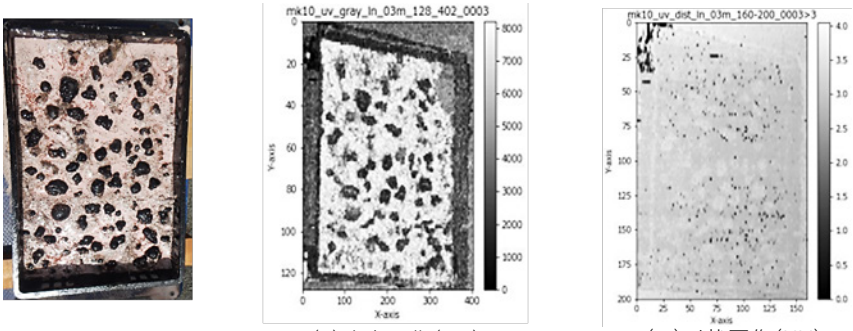
図 3-(3)-A-③-30　計測結果｜深海試験 1｜海底モックアップ（MK05）



(i)写真　(ii)強度画像(UV)　(iii)形状画像(UV)

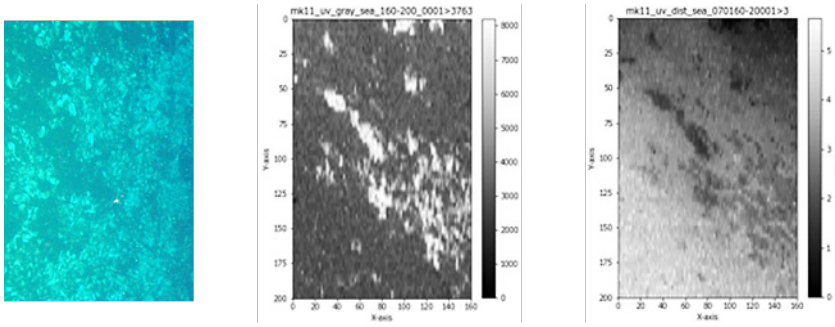
図 3-(3)-A-③-31　計測結果｜深海試験 1｜海底モックアップ（MK06）

CASE 1 とする。更に、物性推定アルゴリズムの汎化能力を向上させるため、データ拡張技術により学習用画像数を水増しすることにした。１つの視点変更画像あたり 20 パターンのデータ拡張を行った。データ拡張の方法は 2 つのタイプとした。１つは、画像回転（0～±30deg）と縦横移動（0～30%）を組み合わせた場合（CASE2）、もう１つは、画像回転（0～



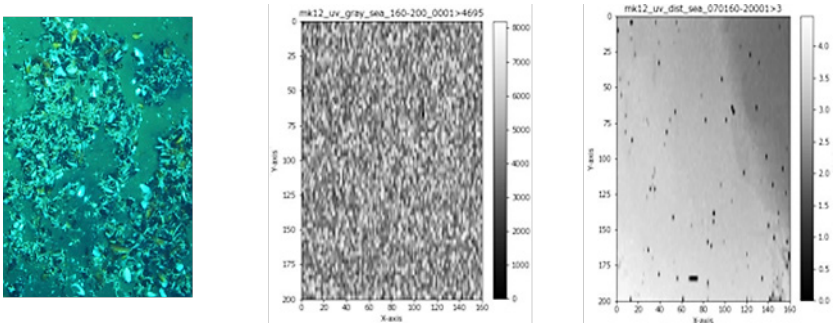
(i)写真　(ii)強度画像(UV)　(iii)形状画像(UV)

図 3-(3)-A-③-32　計測結果｜深海試験 1｜海底モックアップ（MK10）



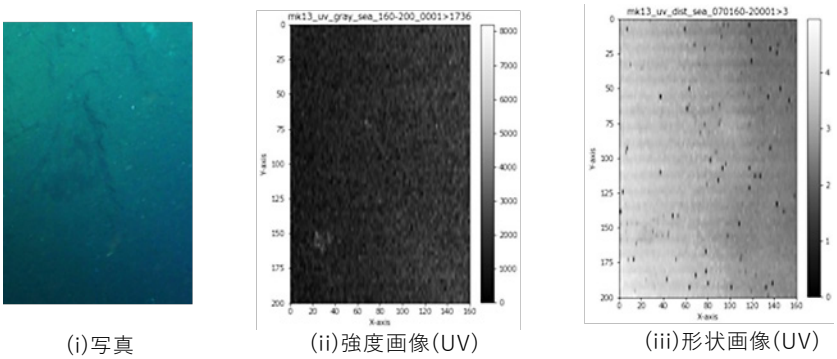
(i)写真　(ii)強度画像(UV)　(iii)形状画像(UV)

図 3-(3)-A-③-33　計測結果｜深海試験 1｜シロウリガイ（MK11）



(i)写真　(ii)強度画像(UV)　(iii)形状画像(UV)

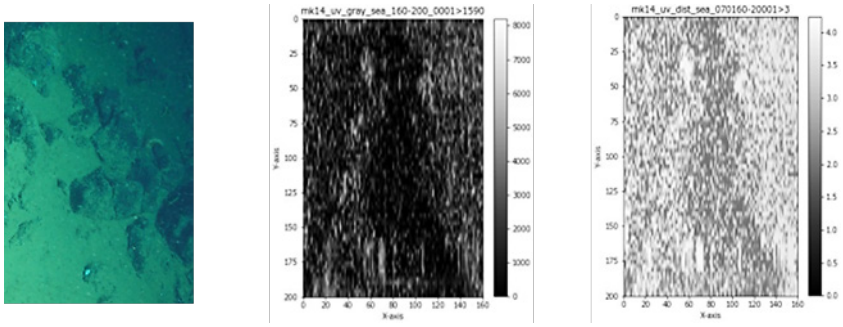
図 3-(3)-A-③-34　計測結果｜深海試験 1｜シンカイヒバリガイ（MK12）



(i)写真　(ii)強度画像(UV)　(iii)形状画像(UV)

図 3-(3)-A-③-35　計測結果｜深海試験 1｜何もない海底（MK13）

±30deg）と縦横移動（0～30%）に明るさ変化（-500～500）を加えた場合（CASE3）とした。更に、画像回転量をより増やして 0～±90deg とし、縦横移動を逆に減らして 0～10%とした場合（CASE4）も行った。CASE2、CASE3 および CASE4 は、何れも全モックアップを合計



(i)写真　(ii)強度画像(UV)　(iii)形状画像(UV)

図 3-(3)-A-③-36　計測結果｜深海試験 1｜岩場（MK14）

すると 3200 画像である（モックアップ数 10×視点変更 16×データ拡張 20＝3200）。学習用画像を図 3-(3)-A-③-37 に学習用画像および評価用画像の概要について示す。

評価を行った 3 種類の物性推定アルゴリズムと使用したデータの関係を表 3-(3)-A-③-4 に示し、これらのアルゴリズムのネットワークの規模（学習で更新されるウエイトの数）を表 3-(3)-A-③-5 に示す。また、3 種類の物性推定アルゴリズムに対する識別結果（推定正解率）を図 3-(3)-A-③-38～図 3-(3)-A-③-40 に示す。識別結果は、学習開始時のネットワークの初期値の異なる 100 回の試行の分布を箱ひげ図で表現しており、それぞれが異なる学習過程で形成された異なるネットワークの識別結果であり、箱の右の数値は上が最大値、下が平均値である。これらの結果から、2 画像統合型 CNN による CASE4 の学習が最もよい結果となっており、86.3%の高い正解率を達成した（図 3-(3)-A-③-40｜CASE4：最大値）。UV レーザー強度のみを使用した単独型 CNN による識別結果では CASE3 の場合に 74.4%の正解率が得られているが（図 3-(3)-A-③-38）、これに正解率 56.3%程度の UV レーザー形状であっても、これを統合することにより更に識別性能が向上することが確認できた。以上により、深海試験（実海域｜深海底）においても異種情報を統合するアルゴリズムが優れた結果を示しており、推定正解率 86.3%を達成した。

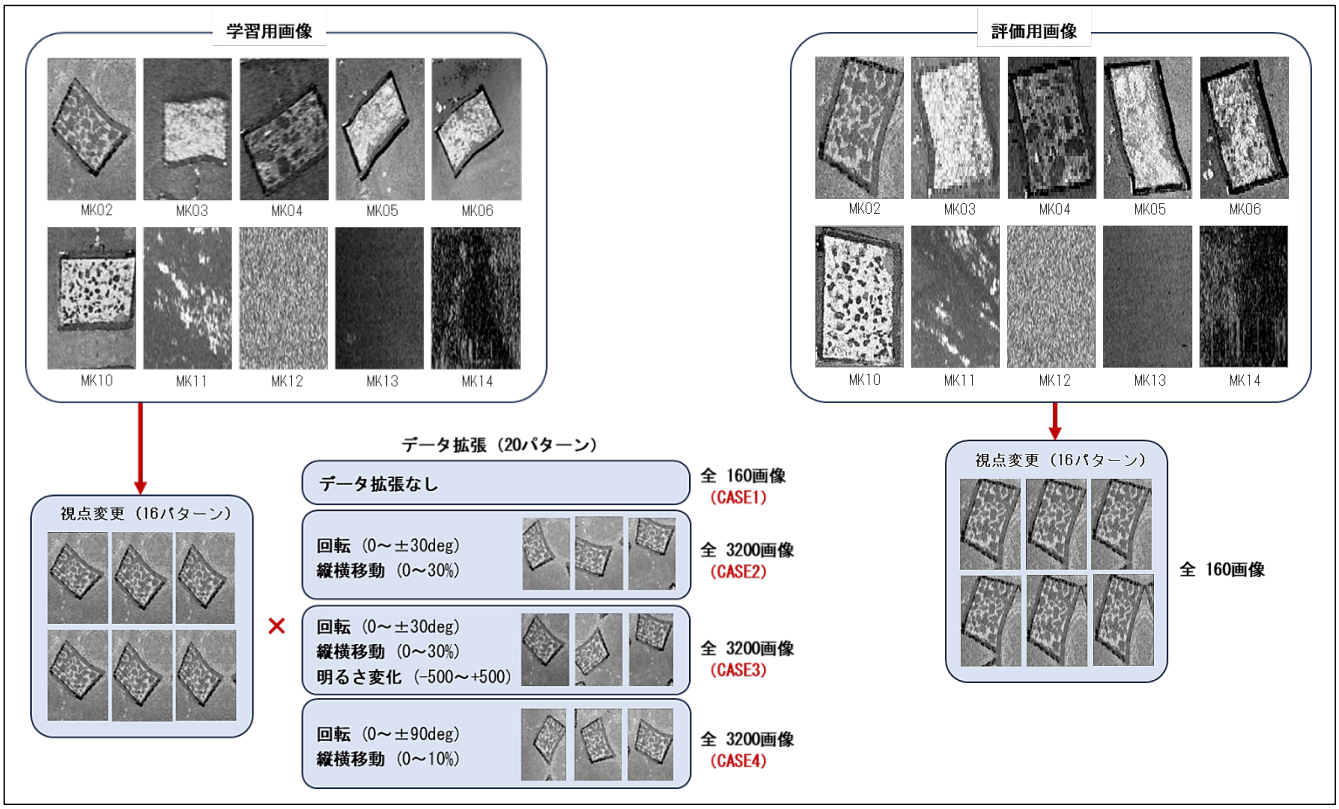


図 3-(3)-A-③-37　深海試験 1｜物性推定アルゴリズム｜学習用画像・評価用画像

表 3-(3)-A-③-4　評価した物性推定アルゴリズムと使用したデータ（深海試験 1｜R5 年度）

LN	ネットワーク形式	処理フロー	使用したデータ（画像）	結果
1	単独型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-1	UV レーザー強度画像	図 3-(3)-A-③-37
2	単独型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-1	UV レーザー 形状画像	図 3-(3)-A-③-38
3	2 画像統合型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-2	UV レーザー 強度画像 UV レーザー 形状画像	図 3-(3)-A-③-39

表 3-(3)-A-③-5　物性推定アルゴリズムのネットワーク規模（深海試験 1｜R5 年度）

LN	ネットワーク形式	ネットワーク規模 （ウエイト数）
1	単独型 CNN ネットワーク	32，788，698
2	2 画像統合型 CNN ネットワーク	67，665，322

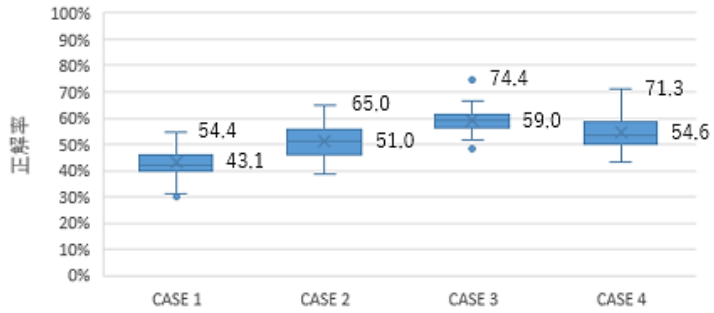


図 3-(3)-A-③-38　単独型 CNN による識別結果｜深海試験 1｜R5 年度｜UV レーザー強度画像

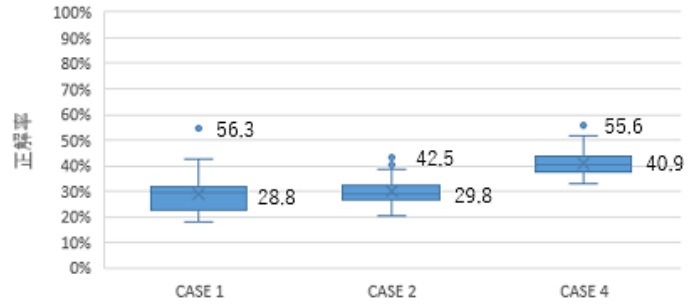


図 3-(3)-A-③-39　単独型 CNN による識別結果｜深海試験 1｜R5 年度｜（UV レーザー形状画像）

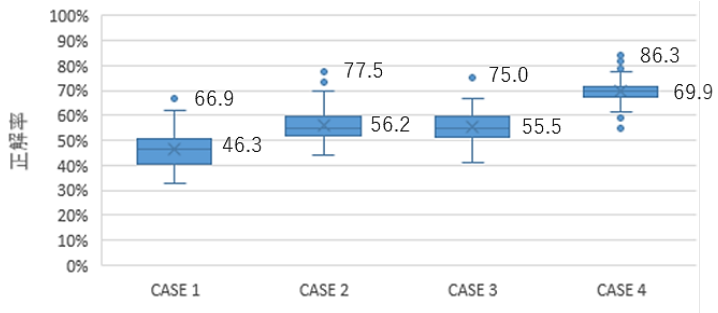


図 3-(3)-A-③-40　2 画像統合型 CNN による識別結果｜深海試験 1｜R5 年度｜UV 強度画像＋UV 形状画像

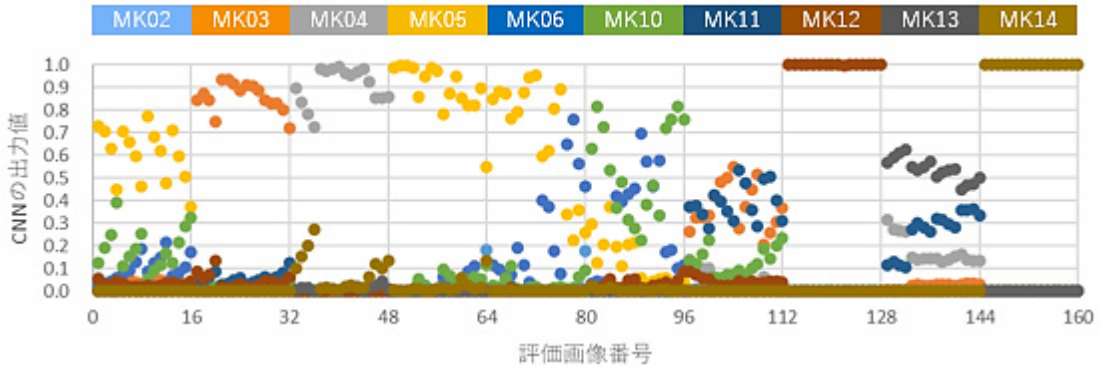


図 3-(3)-A-③-41　単独型 CNN の出力値｜深海試験 1｜UV レーザー強度画像｜CASE3
（正解率 74.4%）

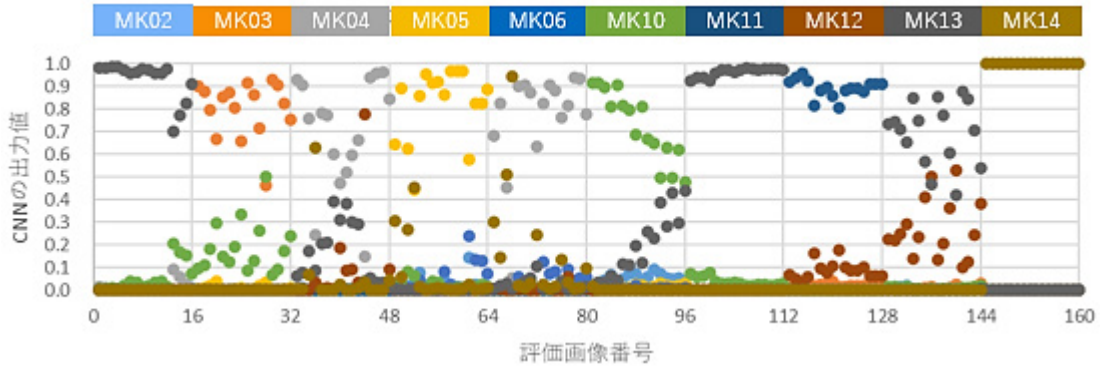


図 3-(3)-A-③-42　単独型 CNN の出力値｜深海試験 1｜UV レーザー形状画像｜CASE1
（正解率 56.3%）

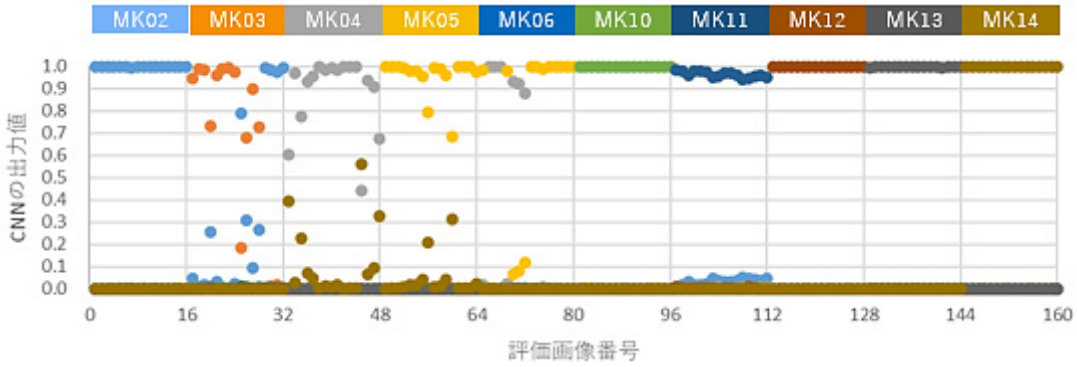


図 3-(3)-A-③-43　2 画像統合型 CNN の出力値｜深海試験 1｜UV レーザー強度画像＋形状画像｜CASE4｜
（正解率 86.3%）

図 3-(3)-A-③-41～図 3-(3)-A-③-43 は、それぞれ図 3-(3)-A-③-38～図 3-(3)-A-③-40 において最も高い正解率となった CASE の出力値である。ネットワークの出力値は識別対象の数だけあり（本評価試験では 10 個）、正解の識別対象が 1、他の識別対象が 0 となるように学習され、出力値の合計は 1 になるように Softmax 関数により調整される（図 3-(3)-A-②-10 および表 3-(3)-A-③-1 参照）。このため、正解か不正解かは、出力値の最大値が正解の識別対象のものか他の識別対象のものかであり、正解の識別対象の出力値が 1 に近いほどその安定度が高いことを意味する。これらの図の横軸は評価用画像の番号となっており、1～16 までが MK02 の画像、17～32 が MK03 の画像、33～48 が MK04 の画像、…となっており、グラフの上の色帯にその正解となるモックアップ番号と、そのドットの色を示している。例えば、図 3-(3)-A-③-40 では評価用画像番号 1～16 の正解は MK02 で水色のドットがその出力値であるが、この番号範囲の全画像とも黄色のドットの MK05 が最大値となっているため識別結果は MK05 であり、この番号範囲の評価用画像の全てが不正解となっていることを示している。一方、同図の評価用画像番号 129～144 の画像については、正解の MK13

のドットの色が最大値となっており全て正解ではあるが、その値は 0.5 前後となっており、他の識別対象の出力値（MK4 のグレーおよび MK06 の青色）とも近い値となっていることから、安定した結果でないことがわかる。これに対し、図 3-(3)-A-③-42 の同じ評価用画像番号の結果は正解の MK13 のドットの色がほぼ 1 になっており、同じ正解率でも非常に安定した結果であることがわかる。これを踏まえ、これらの図を俯瞰すると、2 画像統合型 CNN による識別結果は 86.3%の高い正解率が得られているだけでなく、多くの識別対象において安定性の高い結果となっている。本解析からも、異種情報を統合するアルゴリズムの有効性が確認された。

(d)課題の分析と改善点の整理

水槽試験で取得した Green レーザー実証機および UV レーザー実証機の反射率（強度情報）と三次元情報（距離情報｜形状データ）を用いて、海底モックアップ×10 種類に対する物性アルゴリズムの基本性能を評価した。この結果、両実証機で計測した全ての情報（Green 強度／UV 強度／Green 形状）を統合して使用することで正解率 92.5%（最大値）の高い識別性能が得られることを確認した。当該結果は、海底鉱物を模擬した識別対象（海底モックアップ）ではあるものの、“模様の相違”とも捉えられる自然海底の特徴量を、強度画像および形状画像（距離画像）のエッジや明暗情報から抽出し、高確率で識別することの可能性を示唆している。より実用的な性能評価を目的とした海域試験（深海試験）では、海底モックアップ×6 種類に加え、自然海底×4 種類の計 10 種類の対象を識別する試験を実施した。この結果、水槽試験結果と比較して正解率が低下した（86.3%｜最大値）ものの、異種情報を統合するアルゴリズムの効果が示された。これらを踏まえ次段階の取り組みとして、Green レーザー実証機と UV レーザー実証機が取得する深海域での計測データを使用して、改めて統合型 CNN（物性推定アルゴリズム）の評価を行うことが必要である。今後、本アルゴリズムの実用性評価を考慮した場合、有用かつ多様な自然海底の計測データを取得し、識別対象（学習データ・評価データ）に加えることが有効と考える。一方、現在の物性推定アルゴリズムの統合型ネットワーク構成（図 3-(3)-A-②-7）は、各入力で結合層を設け、更にその後段に全入力を束ねる結合層を設け、その素子サイズは 1024 で共通としている。この構成方法及び素子サイズには調整の余地があり、ネットワーク統合の効果をより向上させるための調整を検討していく。 以下に改良点を整理する。

- Green レーザー実証機の深海域での計測データを適用した統合型 CNN の評価
- 有用な自然海底に対する計測データを追加することの実用性評価
- ネットワーク構成に対する最適化

[(3)-A｜実施内容④｜物性推定アルゴリズムの最終評価と最適化]

＜概要＞

本実施項目では、海底を含む複数種の既知の物材に対して、三次元情報（形状データ）および波長の異なる 2 種類のレーザー光に対する反射率を実測した情報から既知物材の種類を類別する物性推定アルゴリズムを構築し、実海域で取得した情報を用いてアルゴリズムの有効性を評価する。

「(3)-A｜実施内容①」では、物性推定アルゴリズムの構築に先立ち、物性推定アルゴリズムの概念設計および学習データの取得方法について検討を行った。検討の結果、物性推定アルゴリズムには「教師有り機械学習」を適用することとし、正解率を指標として最適アルゴリズムを構築することにした。また、学習データを取得する際には海底資源域を模擬する海底モックアップを製作し、実際の運用を想定して海底資源域とその周辺とを包括して計測することにした。更に、自然海底も類別対象に加えることでより実際的な評価となるよう考慮した。

「(3)-A｜実施内容②」では、製作した Green レーザー実証機および UV レーザー実証機を使用して、海底モックアップ（既知物材）および評価用パネル（グレースケールパネル）を計測した。これにより、各対象の三次元情報（距離情報｜形状データ）および異なるレーザ

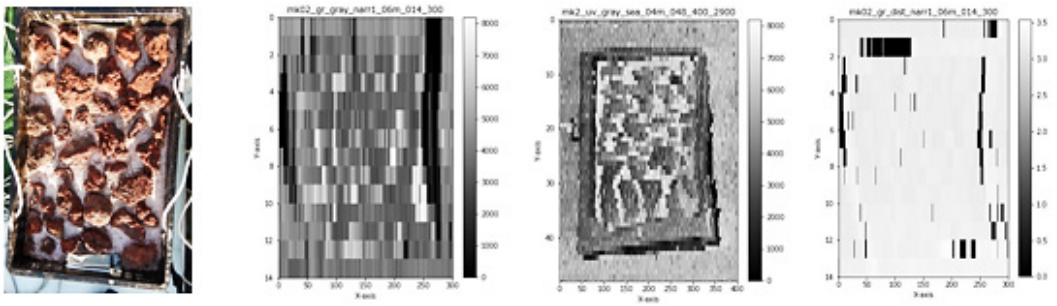
一波長（532nm｜355nm）に対する反射率（強度情報）を実測し、物性推定アルゴリズムの基本設計に要するデータを取得した。レーザー光の伝搬時間を計測することにより得られる三次元情報（形状データ）と推定対象の色差に起因するレーザー光の反射率は、対象物の輪郭や反射率分布などの各観測点の空間的位置関係に特徴を持つ画像として捉えた。そこで、物性推定アルゴリズムは、これらの特徴を空間的かつ多角的に抽出して識別する能力を有する畳み込みニューラルネットワークをベースに設計された。

「(3)-A｜実施内容③」では、前年度に設計した物性推定アルゴリズムを実行するソフトウェアを構築した。同ソフトウェアは、Green レーザー実証機および UV レーザー実証機の計測する異なるレーザー波長（532nm｜355nm）に対する反射率（強度情報）と三次元情報（距離情報｜形状データ）の何れかの情報を個別に入力して学習および識別を行うネットワーク構成と、これらの情報を組み合わせて入力して学習および識別を行う多入力統合型のネットワーク構成を構築した。これらの構成の基本性能を検証するため、既知物材（海底モックアップ）を水槽内に配置してこれらアルゴリズムの識別性能を評価した。その結果、3 種類の情報全てを使用した 3 入力統合型のネットワーク構成により正解率 92.5%の高い識別性能が得られ、当該構成の有効性が確認された。また、実海域において、2 回の深海試験を実施し、深海域に配置した海底モックアップ 6 種と自然海底 4 種の全 10 種に対する深海域における識別性能を評価した。その結果、統合型のネットワーク構成により正解率 86.3%の高い識別性能が得られることを確認した。

これら成果を踏まえ「(3)-A｜実施内容④」では、更に 2 回の深海試験を実施し、前項と合わせ計 4 回の深海試験における計測データを基に、物性推定アルゴリズムの性能を最終評価した。基本的に、異なる深海試験・海中探査機潜航において計測した画像を学習用と評価用に分け、より実際的な条件により最終評価を行った。その結果、3 種類の情報全てを使用した 3 入力統合型のネットワーク構成により正解率 82.8%の高い識別性能が得られた。これにより、本研究の最終目標および本実施項目の「達成目標（終了時）」を達成するとともに、最終評価においても 3 入力統合型のネットワーク構成の有効性が示された。更に、重要なネットワークパラメータである学習率と 3 入力統合型のネットワーク構成の全結合部分の中間層のユニット数について最適化を行った。結果、中間層のユニット数が 512 の場合に、最高正解率の改善が見られ、最終的な正解率として 83.1%を実現した。

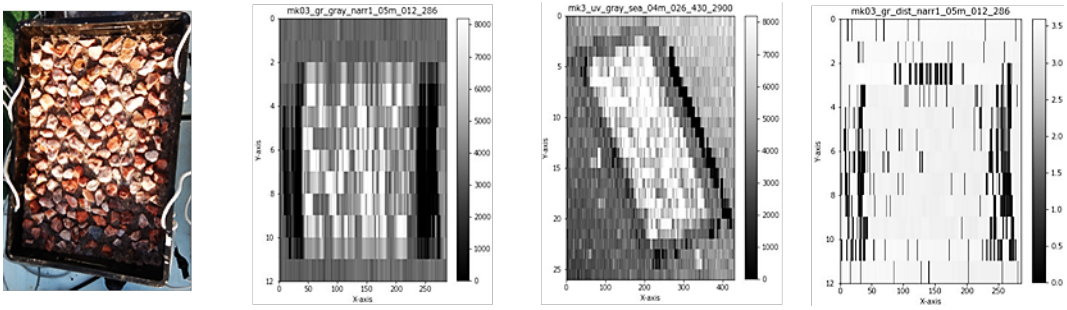
(a)物性推定アルゴリズムの実海域性能評価（深海試験2｜R6年度｜相模湾・初島東方海域）

R6 年度において R5 年度（「(3)-A｜実施内容③」）との同海域、同要領において「かいこう」に Green レーザー実証機、UV レーザー実証機および海底モックアップを搭載し、初島東方の水深 850-900m の海底において深海試験を実施した。計測する海底モックアップは、R5 年度（「(3)-A｜実施内容③」）の深海試験にて選定し計測した 6 種類（MK02/MK03/MK04/MK05/MK06/MK10）とした。自然海底も同様に、シロウリガイ（MK11）、シンカイヒバリガイ（MK12）、何もない海底（MK13）および岩場（MK14）の 4 種類とした。計測は、4,320 画素のラインスキャンを行いつつ、「かいこう」を速度約 0.5knot 以下の低速にて航行させながら実施した。このときの UV レーザー実証機と計測対象の距離は 5m 程度を予定したが、実際は海底の傾斜や凹凸、支援母船と連結するためのテザーケーブルの影響等により、3～6m 程度の幅を持っての航走となった。6 種類の海底モックアップと 4 種類の自然海底の切り出し画像を図 3-(3)-A-④-1～図 3-(3)-A-④-9 に例示する。本深海試験においては、海象・海象が悪く試験期間が短縮となったことから、MK05、MK06 に対する UV レーザーの強度画像の取得ができなかった。また MK10 においては、Green レーザーの強度画像・距離画像および UV レーザーの強度画像のいずれも取得ができなかった。これまでの深海試験と比較して MK02、MK03 および MK04 の Green レーザーの強度画像と形状画像の分解能の劣化が見られた。この理由として、試験海域の潮流・海流の速度が速く、「かいこう」の遠隔操縦の難易度が上がり、海底モックアップの上方を低高度および低速かつ低速度にて航走することが困難であったことが原因と考えられる。



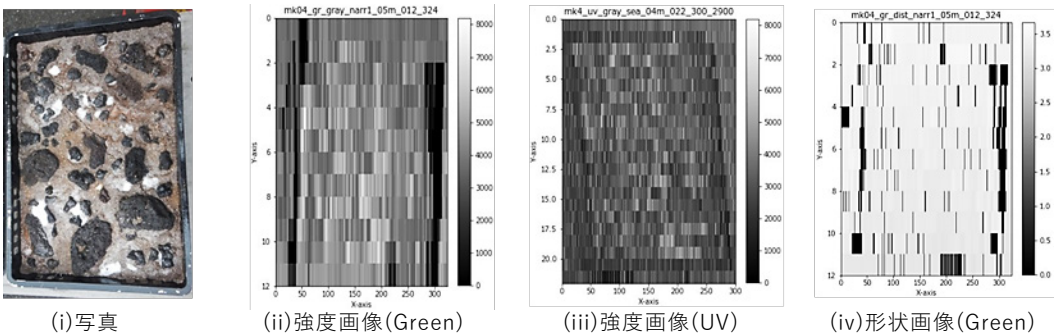
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-④-1　計測結果｜深海試験 2｜海底モックアップ（MK02）



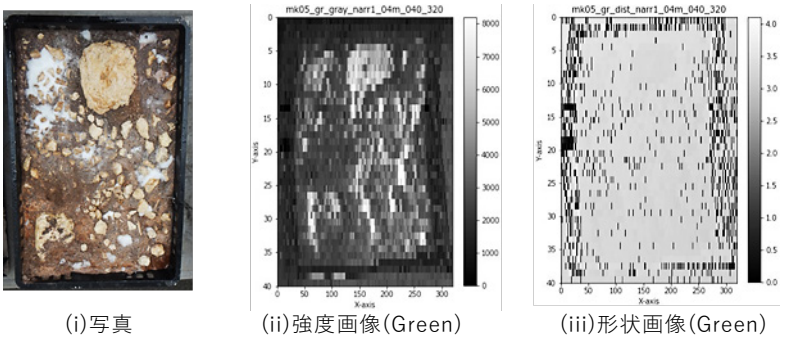
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-④-2　計測結果｜深海試験 2｜海底モックアップ（MK03）



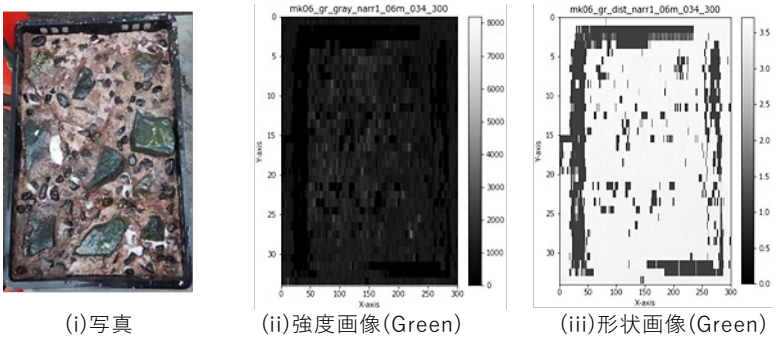
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-④-3　計測結果｜深海試験 2｜海底モックアップ（MK04）



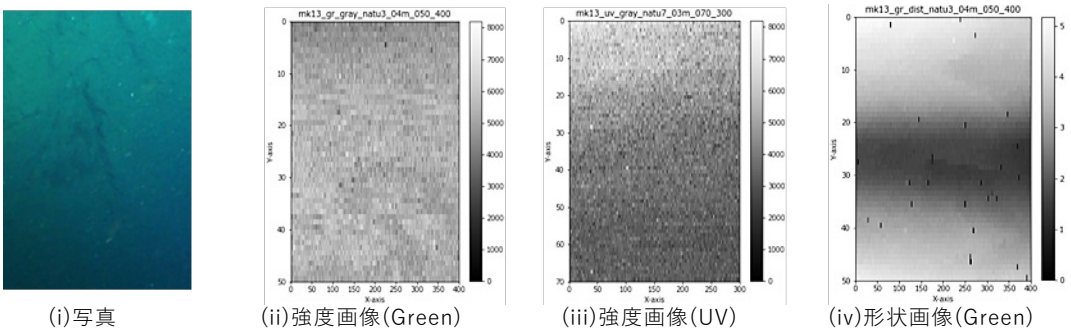
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-④-4
計測結果｜深海試験 2｜
海底モックアップ（MK05）



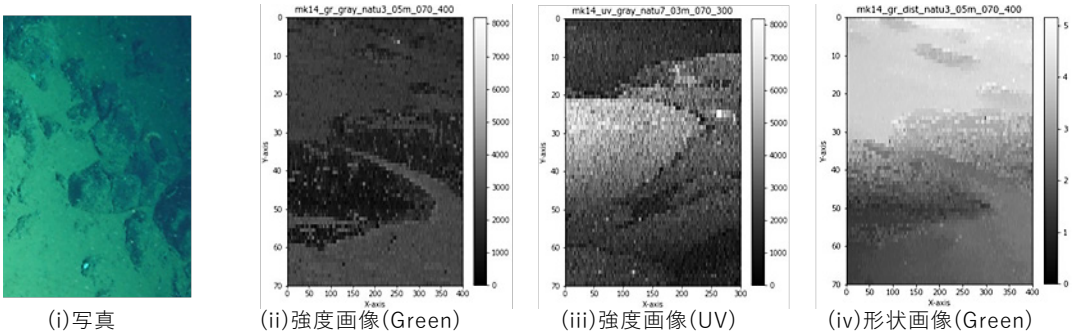
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-④-5
計測結果｜深海試験 2｜
海底モックアップ（MK06）



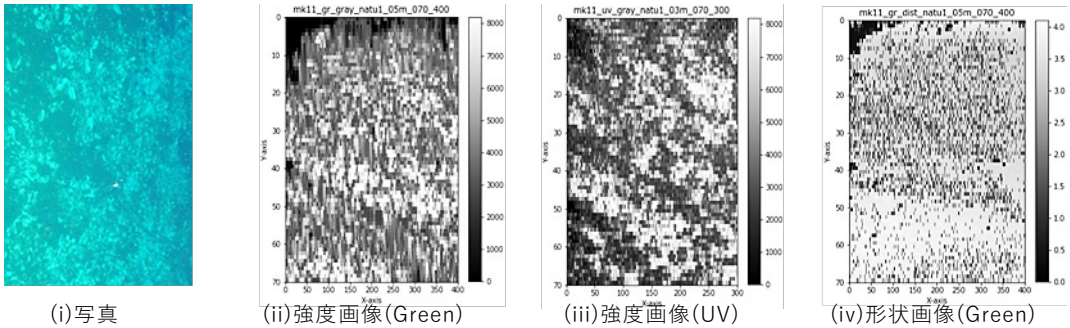
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-④-6　計測結果｜深海試験 2｜何もない海底（MK13）



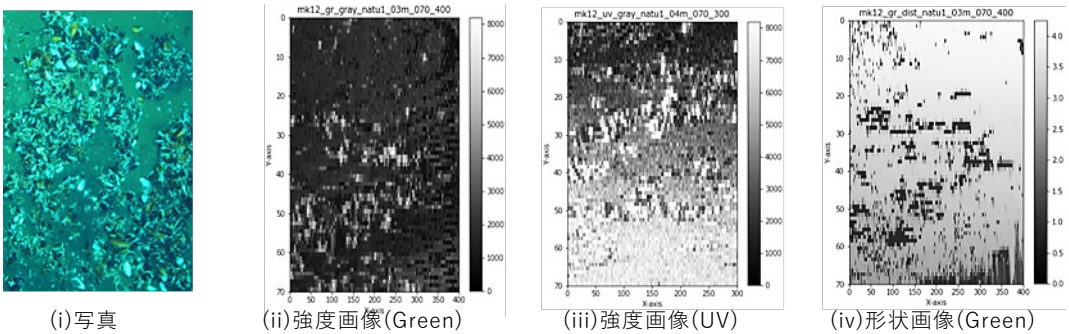
(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-④-7　計測結果｜深海試験 2｜岩場（MK14）



(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-④-8　計測結果｜深海試験 2｜シロウリガイ（MK11）



(i)写真　(ii)強度画像(Green)　(iii)強度画像(UV)　(iv)形状画像(Green)

図 3-(3)-A-④-9　計測結果｜深海試験 2｜シンカイヒバリガイ（MK12）

(b)物性推定アルゴリズムの最終評価

構築した物性推定アルゴリズムの最終評価を実施した。最終評価では、より実際的な評価となるように R5 年度（「(3)-A｜実施内容③」）および R6 年度（(3)-A｜実施内容④」）に実施した計 4 度の深海試験において取得した Green レーザー実証機および UV レーザー実証機の強度情報ならびに距離情報を使用した。異なる深海試験潜航にて計測した各画像（計測条件が異なる各画像）に対する識別性能を検証することで、物性推定アルゴリズムの実際的

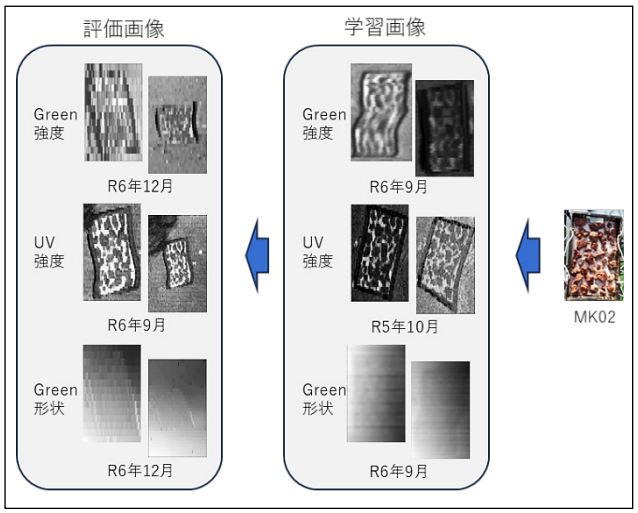


図 3-(3)-A-④-10　異なる深海試験で取得した画像｜例示｜MK02｜最終評価

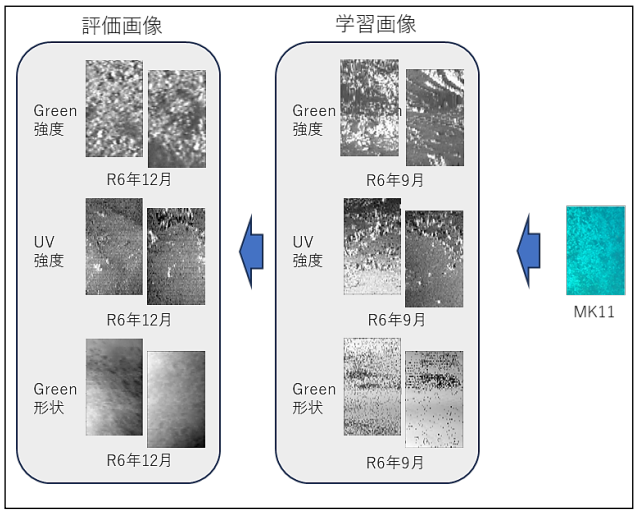


図 3-(3)-A-④-11　異なる深海試験で取得した画像｜例示｜MK11｜最終評価

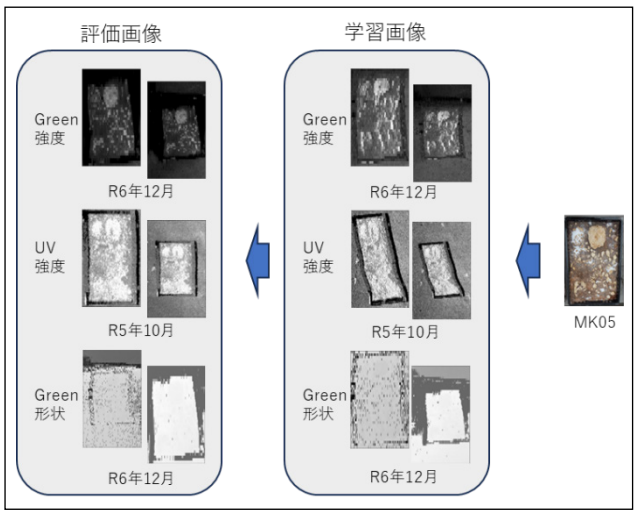


図 3-(3)-A-④-12
同じ深海試験で異なる計測点にて取得した画像｜例示｜MK05｜最終評価

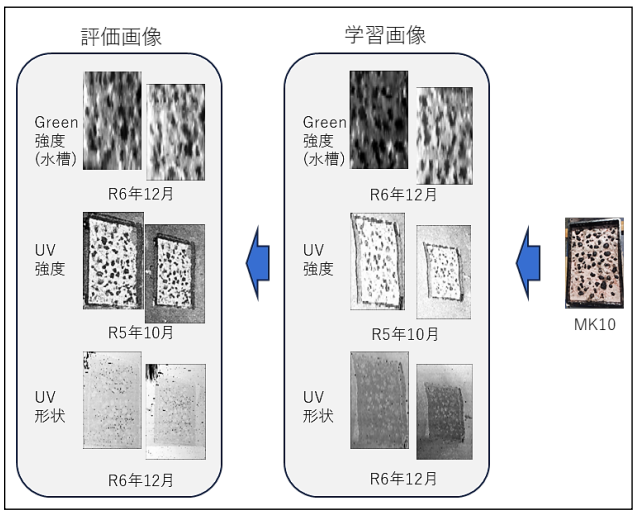


図 3-(3)-A-④-13
Green 強度のみ水槽試験でその他は異なる深海試験で取得した画像｜例示｜MK10｜最終評価

な性能を検証する。これまでの評価では、同一航海で取得した情報を使用して、計測点の異なるスキャン画像を学習用と評価用に分けて識別性能の評価を実施したが、より実際の運用に近い厳しい条件での評価とするため、異なる深海試験にて取得した海底可視化を学習用と評価用に分けて識別評価を行った。図 3-(3)-A-④-10 および図 3-(3)-A-④-11 に、異なる深海試験にて取得した画像（モックアップ：MK02・MK11）を例示する。気象・海象の悪化により異なる深海試験において計測データが得られなかった MK05、MK06 および MK10 においては、同じ深海試験における異なる計測点にて取得した画像を、学習用と評価用に分けて識別評価を行った（図 3-(3)-A-④-12）。また、MK10 においては、Green レーザー実証機の強度画像のみが深海試験にて計測できていないため、水槽試験時の強度画像に対して、水槽試験と同じ要領で上下分割した画像を学習用と評価用に分けて識別評価を行った（図 3-(3)-A-④-13）。

図 3-(3)-A-④-14 に示すように、学習画用像および評価用画像ともに縦方向および横方向に視点を 0～45[deg]まで変更させた場合を想定し、アフィン変換により 1 つの画像あたり 16 パターンの画像を生成した。またこの際、学習画用像には当該視点変更を行わないものも加えた。学習用画像全 209 画像と評価用画像全 320 画像で物性推定アルゴリズムを評価した場合を CASE 1 とする。更に、物性推定アルゴリズムの汎化能力を向上させるため、デー

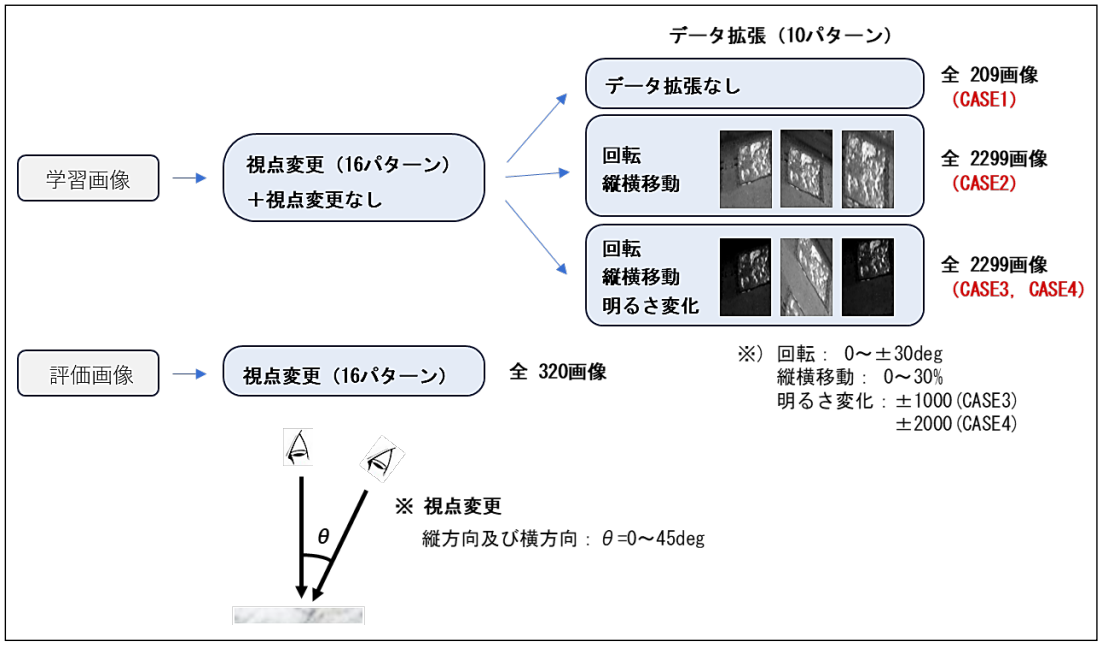


図 3-(3)-A-④-14　最終評価｜物性推定アルゴリズム｜学習用画像・評価用画像

タ拡張技術により学習用画像数を水増しした。１つの視点変更画像あたり 10 パターンのデータ拡張を行い、データ拡張の方法は２つのタイプとした。1 つは、画像回転（0～±30deg）と縦横移動（0～30%）を組み合わせた場合（CASE2）、もう１つは画像回転（0～±30deg）と縦横移動（0～30%）に明るさ変化（-1000～1000）を加えた場合（CASE3）とした。更に、CASE3 における明るさ変化のふり幅を大きくした場合（-2000～2000）を加えた（CASE4）。

評価を行った３種類の物性推定アルゴリズムと使用したデータの関係を表 3-(3)-A-④-1 に示し、これらのアルゴリズｆムのネットワークの規模（学習で更新されるウエイトの数）

表 3-(3)-A-④-1　評価した物性推定アルゴリズムと使用したデータ（最終評価｜R6 年度）

LN	ネットワーク形式	処理フロー	使用したデータ（画像）	結果
1	単独型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-1	Green レーザー強度画像	図 3-(3)-A-④-15
2	単独型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-1	UV レーザー 強度画像	図 3-(3)-A-④-16
3	単独型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-1	Green レーザー 形状画像	図 3-(3)-A-④-17
4	3 画像統合型 CNN ネットワーク	図 3-(3)-A-③-3	Green レーザー 強度画像 UV レーザー 強度画像 Green レーザー 形状画像 (+UV レーザー 形状画像)	図 3-(3)-A-④-18

表 3-(3)-A-④-2　物性推定アルゴリズムのネットワーク規模（最終評価｜R6 年度）

LN	ネットワーク形式	ネットワーク規模 （ウエイト数）
1	単独型 CNN ネットワーク	12，568，108
2	2 画像統合型 CNN ネットワーク	37，693，050

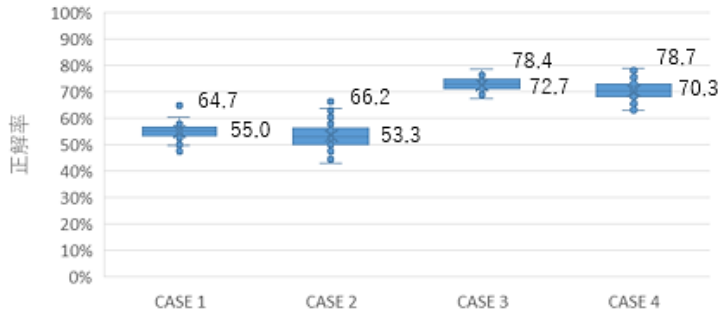


図 3-(3)-A-④-15　単独型 CNN による識別結果｜最終評価｜R6 年度
（Green レーザー強度画像）

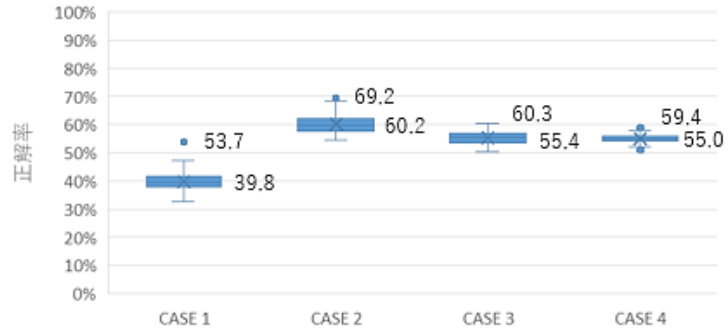


図 3-(3)-A-④-16　単独型 CNN による識別結果｜最終評価｜R6 年度
（UV レーザー強度画像）

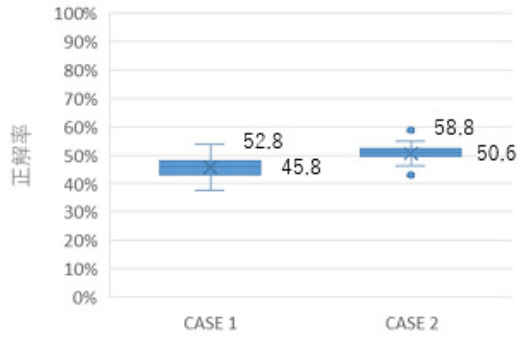


図 3-(3)-A-④-17　単独型 CNN による識別結果｜最終評価｜R6 年度
（Green(/UV)レーザー形状画像）

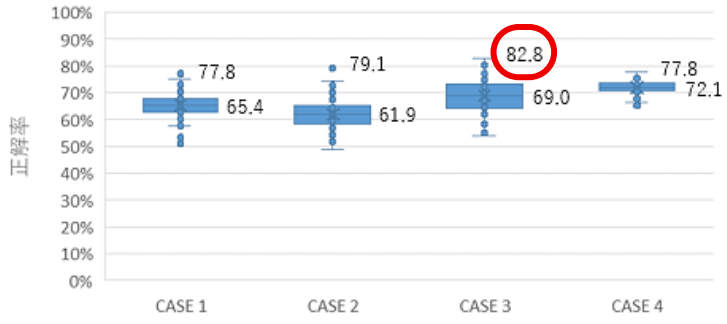


図 3-(3)-A-④-18　統合型 CNN による識別結果｜最終評価｜R6 年度
（Green レーザー強度画像＋UV レーザー強度画像＋Green/UV 形状画像））

を表 3-(3)-A-④-2 に示す。また、4 種類の物性推定アルゴリズムに対する識別結果を、図 3-(3)-A-④-15～図 3-(3)-A-④-18 に示す。識別結果は、学習開始時のネットワークの初期値の異なる 100 回の試行の分布を箱ひげ図で表現しており、それぞれが異なる学習過程で形

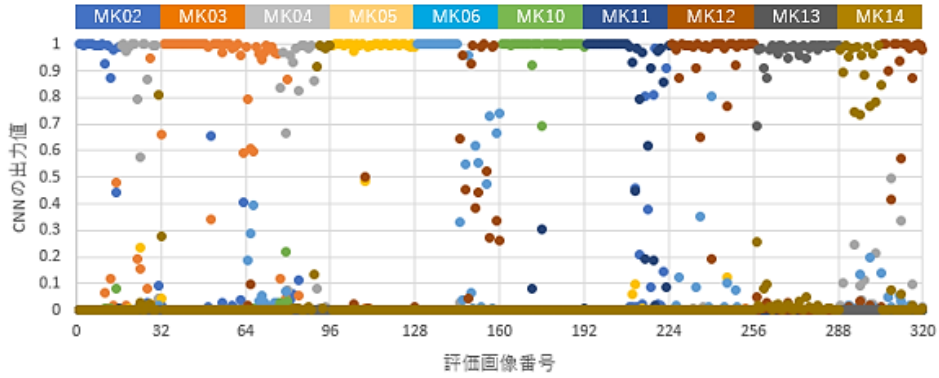


図 3-(3)-A-④-19　単独型 CNN の出力値｜最終評価｜Green レーザー強度画像｜CASE4（正解率 78.7%）

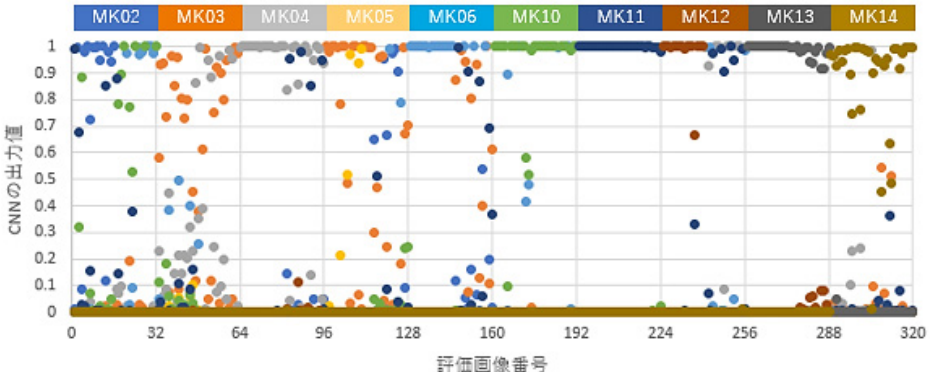


図 3-(3)-A-④-20　単独型 CNN の出力値｜最終評価｜UV レーザー強度画像｜CASE2（正解率 69.2%）

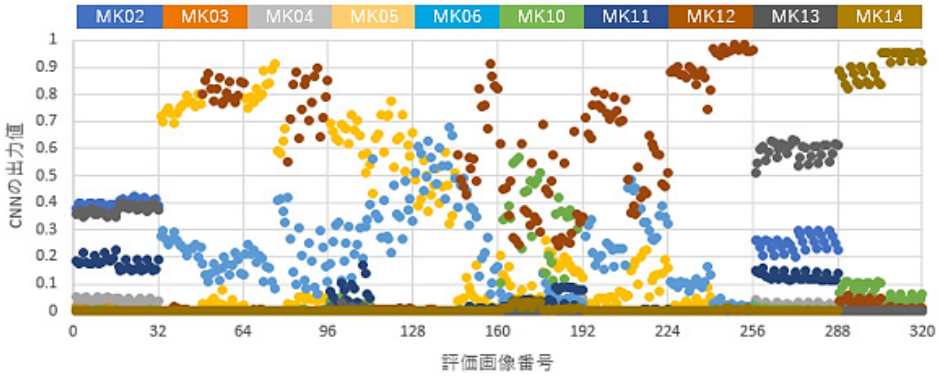


図 3-(3)-A-④-21　単独型 CNN の出力値｜最終評価｜Green レーザー形状｜CASE2（正解率 58.8%）

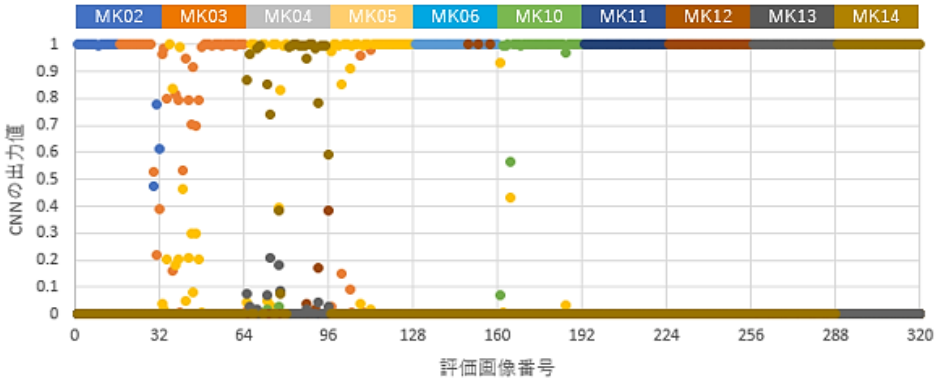


図 3-(3)-A-④-22　3 画像統合型 CNN の出力値｜最終評価｜Green 強度＋UV 強度＋Green 形状｜CASE3（正解率 82.8%）

成された異なるネットワークの識別結果であり、箱の右の数値は上が最大値、下が平均値である。これらの結果から、3 画像統合型 CNN による CASE3 の学習が最もよい結果となっており、82.8%の高い正解率を達成した（図 3-(3)-A-④-18｜CASE3：最大値）。実際的な評価と

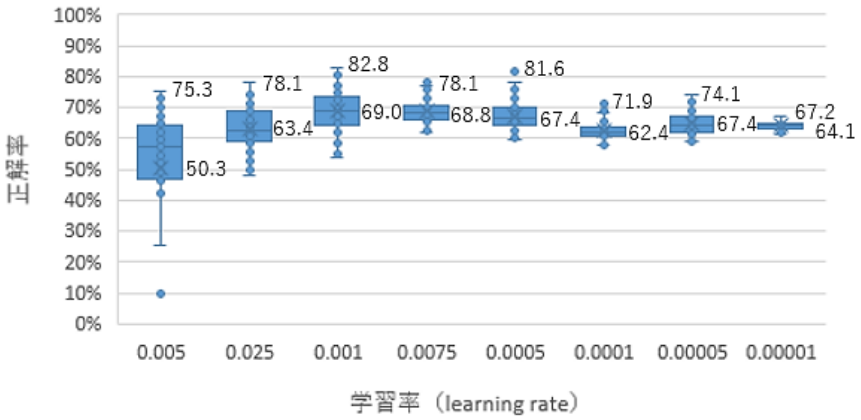


図 3-(3)-A-④-23　学習率の最適化｜物性推定アルゴリズム｜推定性能の向上

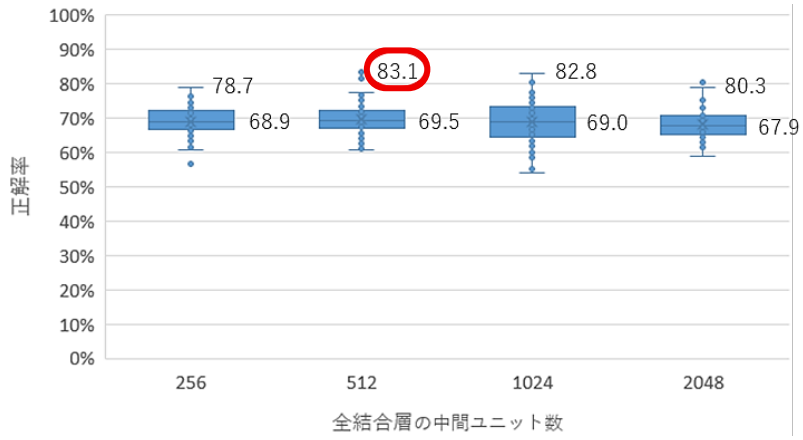


図 3-(3)-A-④-23　中間層ユニット数の最適化｜物性推定アルゴリズム｜推定性能の向上

して異なる深海試験にて計測した画像を用いて識別性能を評価した結果においても、異種情報を統合するアルゴリズムが優れた結果となることが確認できた。

図 3-(3)-A-④-19～図 3-(3)-A-④-22 は、それぞれ図 3-(3)-A-④-15～図 3-(3)-A-④-18 において最も高い正解率となった各 CASE の出力値である。ネットワークの出力値は識別対象の数だけあり（本評価試験では 10 個）、正解の識別対象が 1、他の識別対象が 0 となるように学習され、出力値の合計は 1 になるように Softmax 関数により調整される（図 3-(3)-A-②-10 および表 3-(3)-A-③-1 参照）。このため、正解か不正解かは、出力値の最大値が正解の識別対象のものか他の識別対象のものかかであり、正解の識別対象の出力値が 1 に近いほどその安定度が高いことを意味する。これらの図の横軸は評価用画像の番号となっており、1～32 までが MK02 の画像、33～64 が MK03 の画像、65～96 が MK04 の画像、…となっており、グラフの上の色帯にその正解となるモックアップ番号と、そのドットの色を示している。例えば、図 3-(3)-A-④-19 では評価用画像番号 97～128 の正解は MK05 で黄色のドットがその出力値であり、全数が黄色のドットの MK05 が最大値となっているため識別結果は MK05 であり、この番号範囲の評価用画像の全てが安定して正解となっていることを示している。これを踏まえ、これらの図を俯瞰すると、3 画像統合型 CNN による識別結果は 82.8%の高い正解率が得られているだけではなく、多くの識別対象において安定性の高い結果となっていることがわかる。実際的な評価を鑑みた本解析からも、異種情報を統合するアルゴリズムの有効性が確認された。

(c)物性推定アルゴリズムの最適化

深海試験にて取得した計測データを適用した最終評価において、最高正解率 82.8%となった 3 画像統合型 CNN の CASE3 のネットワークに対し、学習率の最適化および全結合層の中間層ユニット数の最適化行うことで、更なる推定性能の向上を検討した。学習率は今回採用し

た「学習の最適化アルゴリズム｜Adam」のパラメータの１つで、識別性能に影響を与える重要なファクターである（図 3-(3)-A-②-11｜η）。また、全結合層は従来のニューラルネットワーク構造の部分であり、中間層のユニット数（図 3-(3)-A-②-7｜○印数）は識別性能に影響を与える。

学習率と正解率の関係を評価した結果を図 3-(3)-A-④-23 に示す。これまでの評価で採用している学習率の値は 0.001 であるため、学習率をこの前後の値で変化させたところ、学習率 0.001 を頂点に大きくても小さくても正解率が低下し、改善は見られなかった。次に、全結合層の中間層ユニット数と正解率の関係を評価した結果を図 3-(3)-A-④-24 に示す。これまでの評価で採用している中間層のユニット数は 1025 であるため、ユニット数をこの前後の値で変化させたところ、ユニット数 512 を頂点に 0.3 ポイントの改善がみられた。その結果、本実施項目における最高正解率 83.1%が確認された。これにより、最終目標「海底を含む既知物材に対して正解率約 70%の物性推定技術の実現」を達成していることが示された。

(3)-B 複数種の物材に対する物性推定試験

[(3)-B｜目的]

水槽および海域において、海底を含む複数種の既知物材に対する評価試験を実施する。上記実施項目(3)-Aで構築した物性推定アルゴリズムを用いて、既知物材の推定を行いその正解率を評価する。併せて、当該アルゴリズムの性能向上に要する良好な学習データを取得する（試験を実施する）。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(3)-B｜達成目標（終了時）]

実環境において試験を実施し、構築した物性推定アルゴリズムを用いて海底を含む既知物材の物性推定を行う。

[(3)-B｜達成目標（終了時）の達成状況]

■実環境下において試験を実施　：　**達成**
■構築した物性推定アルゴリズムを用いて海底を含む既知物材の物性推定　：　**達成**

[(3)-B｜実施内容①｜計測対象および計測系コンフィギュレーションの検討]

(a)計測対象（試験物材）の検討

実施項目「3.(3)-A」において、当該アルゴリズムの基盤を成す機械学習を設計・構築するために、品質の高い学習データを取得する試験手法を策定する。当該項目では、実証機の測定結果を適用した「教示あり学習」による機械学習を想定しており、これに要する学習データ取得手段について検討する。物性推定アルゴリズムの構築を進捗させるためには、各機械学習に要する学習データの取得が必須であり、その品質が推定性能に直結する。しかし周知とされる「教示あり学習」では、多様かつ大量の学習データを必要とするが、海底物性に関してこれを実現することは困難である。そこで、限定的ではあるものの品質の高い学習データの取得を目的として、評価用ボード、類似鉱物、鉱物サンプル（実物の鉱物）および資源域を模倣した海底モックアップを計測対象（試験物材）として利用することを検討した。図 3-(3)-B-①-1 に各試験物材の検討案を例示する。評価用ボードは、レーザー評価機・実証機の設計・製作にあたり、反射物の色差に対する反射強度（強度情報）との差異あるいは相関を把握するために使用する。類似物材については、海底鉱物資源現物とは異なるが、形状あるいは色彩が類似する比較的に入手性の高い鉱物（天然石）を代替として使用し、併せて深海底に存在する礫地や岩地に対する代替として想定される。鉱物サンプルは、海底鉱物資源の現物となる。JAMSTEC がこれまでの研究航海にて採取した鉱物資源サンプルそのものを試験物材として使用する。しかし鉱物サンプルは、採取する過程で組成が破壊・破損されているのが通常であり、また人体に有害な物質を含有するものも多いため、ごく限られた状態・種類のもののみの使用となる。現況の想定ではマンガン団塊を想定している。資源域モックアップは、JAMSTEC がこれまでの研究航海にて撮影した海底鉱物資源域の画像・映像を基に、海底鉱物資源域に似せて製作することを想定した海底モックアップとなる。材質は実物と異なるものの、色彩や形状などを再現することを想定する。これら計測対象をそれぞれ

図 3-(3)-B-①-1　計測対象（検討案）｜物性推定アルゴリズム・学習用データ

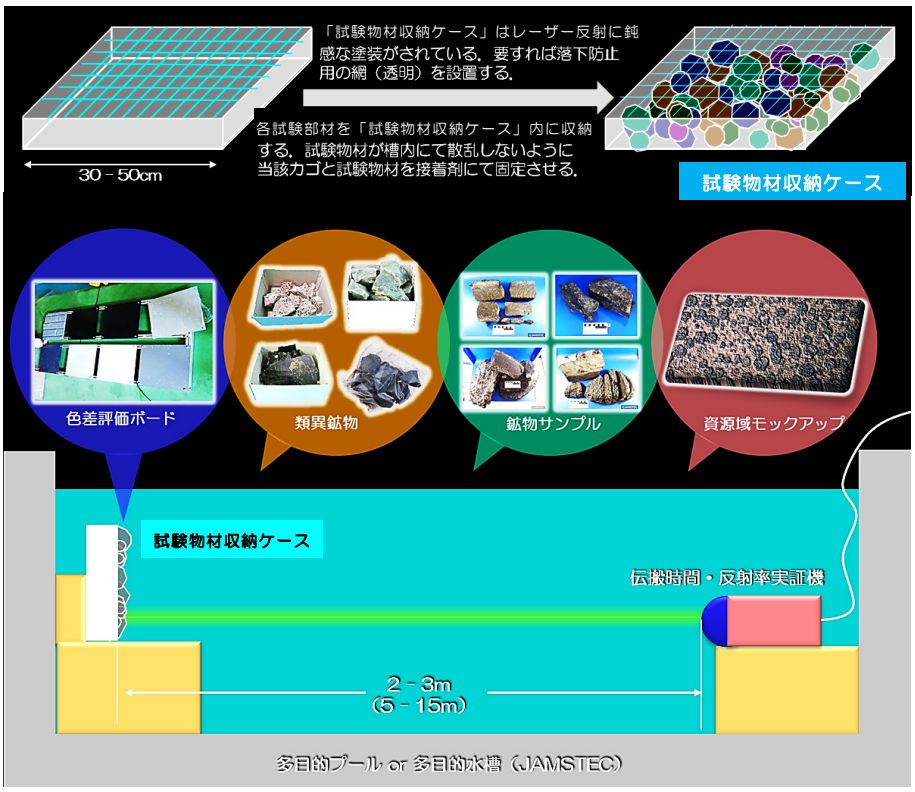


図 3-(3)-B-①-2　計測系コンフィギュレーション｜水槽試験（物性推定｜機械学習データ）

構築し、水槽試験・浅海試験・深海試験における運用性、実装性、および取得される学習用データの品質等を考慮し、最適となるものを選択する。

(b)計測系コンフィギュレーションの検討（水槽試験）

前項に示した各計測対象（試験物材）を利用した水槽試験を実施し、物性推定アルゴリズムの基盤を成す機械学習の設計・構築に要する学習データを取得する。併せて、深海試験にて実施する物性推定アルゴリズムの評価・検証試験の前段階として、当該アルゴリズムの初期学習およびその性能向上を目的とする水槽試験を実施する。図 3-(3)-B-①-2 に当該物材を利用した試験コンフィギュレーション案を示す。水槽試験において各試験物材を収納するケース（図中、試験物材収納ケース）を準備する。当該収納ケースは光学的にレーザー反射に鈍感な材質・塗装で製作し、試験物材によっては落下防止用の透明な網等（光学的に反射性より透過性が支配的な材質にて構築）を設置する。当該収納ケースへ各試験物材を収納する際は、試験物材が落下しないように収納部と試験物材とを接着させ、試験時（測定時）の姿勢変化に対して安定を図る。評価用ボード以外の試験物材については、当該収納ケースに収納した状態にて水槽試験を実施する。JAMSTEC が所有する多目的プールもしくは多目的水槽を試験環境とし、伝搬時間・反射率評価機／実証機に対して距離 5-15m のレンジにて測定を実施することを想定する。各試験物材については、水槽試験における初期学習データの取得に使用されるほか、浅海試験や深海試験においても、海中環境および深海環境における学習データ品質の比較評価にも使用することが想定される。

(c)深海試験海域の検討・選定

R5 年度、R6 年度にて実施を予定する深海試験の海域について検討した。物性推定においては、「海底を含む既知物材に対して正解率約 70%の物性推定技術の実現を目指す」ことを最終目標としている。しかし、本研究において多数の深海試験を実施すること、代表的な海底資源域が確認されている遠方海域にて深海試験を実施すること、1 回の深海試験期間において複数海域にて試験を実施すること、などは全体スケジュール、船舶・海中探査機運航経費、製作物の工期等を鑑みると現実的でない。そこで、深海試験を実施する際の利便性・容

易性、経済性、海底環境の特異性等の諸条件を踏まえ、併せて海底資源専門家へのヒアリングも実施することで、図 3-(3)-B-①-3～図 3-(3)-B-①-5 に示す 3 海域を深海試験海域の候補として検討した。候補海域①の大室ダシ・大室海穴は大島の南方に位置しており、JAMSTEC が所有する船舶を利用する際にアクセスが良い（JAMSTEC 専用岸壁から近距離に位置する）。そのため、回航日数、運航経費を抑えることが可能であり、相対して試験期間を確保できるため、本研究における深海試験に適した海域となる。また、大室海穴内部には小規模な熱水域も点在しており、海底資源域を模擬する特異性も備える。一方、海底の特徴量（形状、色彩、底生生物・特異点有無）としての多様性は低い。実海域の海底において学習データを取得する場合や、実海域において既知物材（試験物材）を用いて学習データの取得する場合、および構築した物性推定アルゴリズムの初期推定性能を確認するフィールドとしては適している。

候補海域②の海形（かいかた）海山は、硫黄島 210km に位置し東峰と西峯列（3 峰構成）から成る大規模な海山である。大深度の基部から数百メートル深度の頂部まで様々な水深域を有するだけでなく、東峰にはカルデラ地形が認められており熱水活動が確認されている。各峰において様々な特異点を有し、複数種の海底鉱物も確認されており、1 航海あるいは 1 海域試験にて多様な学習データを取得するには効果的な海域といえる。しかし、遠方に位置する海域であるため、JAMSTEC が所有する船舶を利用した場合、回航だけでも長期間を要し、限られた経費、スケジュールにて当該海域で深海試験を実施するのは難しい。海底鉱物資源の特徴量だけに注目すると、物性推定に関する取組みとして更に効果的な候補海域も挙げられるが、豊富な資源域は大深度域も多く、試験装置（実証機）をより大規模・大型化させてしまい海底までの潜航時間も大幅に費やすことから、1,000m 以深の大深度海底域は本研究における深海試験海域として適さないと判断する。

候補海域③の初島東方は、JAMSTEC 専用岸壁から最も近距離に位置し、また初島の島影に位置することから風浪の影響を受けにくい。相模湾に近く黒潮からも外れているため、海中探査機の潜航回数を最も保障できる海域となる。また、底生生物の群生域が点在しており、多様な海底反射を取得するには適する。一方、海底が長く急斜面となっているため、海中探査機の航走方法や計測対象（試験物材）の海底設置には工夫を要する。

以上を踏まえ深海試験の候補海域については、海底資源研究有識者の意見を参考にしつつ、候補海域①および候補海域②に対し、深海試験期間の気象・海象および試験内容等の諸条件を現場で判断し、適宜選択することが費用対効果を含め、本研究の成果創出に適すると考える。

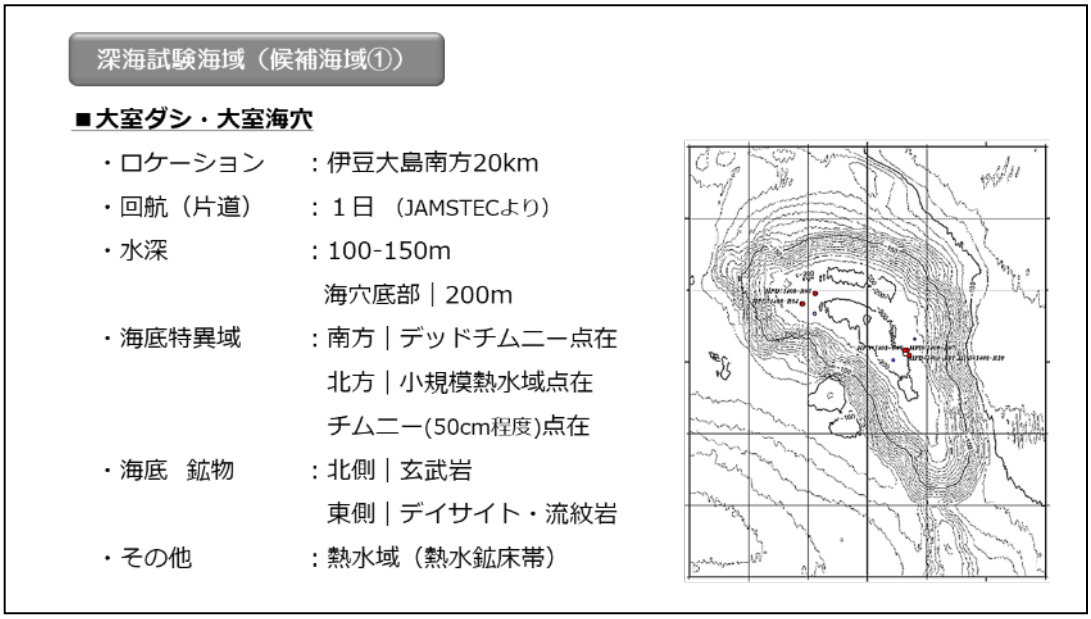
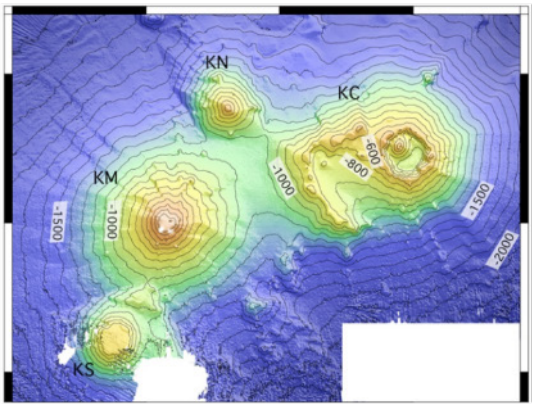


図 3-(3)-B-①-3　深海試験｜候補海域①（大室ダシ・大室海穴）

深海試験海域（候補海域②）

■海形海山

・ロケーション　：東京南方980km／硫黄島北北西210km
・回航　（片道）　：３日（JAMSTECより）
・水深　：3,500m(基部)　930m(東峰カルデラ)
　448m（東峰火口頂部）
・海底特異域　：東峯-西峯列3峰構成）
　東峰｜カルデラ地形在り
　東峰火口付近｜活発な熱水域
　西・北斜面｜側火山
・海底　鉱物　：東峰｜カンラン石・玄武岩
　中央・西峯｜安山岩・玄武岩・石英
・その他　：熱水域（熱水鉱床帯）



＜参照＞
海形海山｜海域火山データベース｜海上保安庁・海洋情報部(mlit.go.jp)
https://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/kaiikiDB/kaiyo19-2.htm

図 3-(3)-B-①-4　深海試験｜候補海域②（海形海山）

深海試験海域（候補海域③）

■初島東方沖

・ロケーション　：初島東方3-6km
・回航　（片道）　：0.5日（JAMSTECより）
・水深　：約1,000m
・海底特異域　：底生生物群生域が点在
　岩場／砂地などが広く分布
・海底　鉱物　：玄武岩／花崗岩
・その他　：急傾斜が続く海溝部端

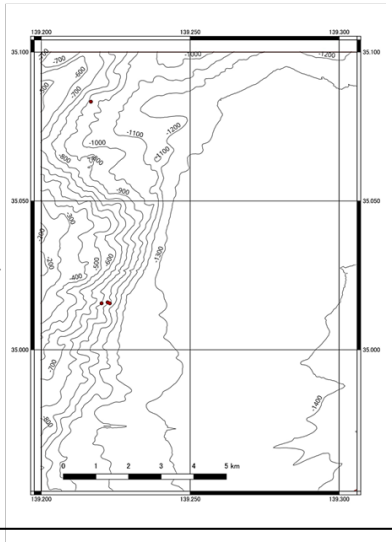


図 3-(3)-B-①-5　深海試験｜候補海域③（初島東方沖）

[(3)-B｜実施内容②｜海底モックアップの製作および試験セットアップ検討]

(a)海底モックアップの製作

性推定アルゴリズムの学習や評価には実際の海底資源を使用することが望ましいが、鉱物資源サンプルは採取する過程で破壊され実際の形状を維持するのは難しく、硫化化合物に代表される毒性を有する鉱物も多く、その取り扱いは特殊な条件を要す。これを踏まえ、形状や色彩が類似する比較的入手性の良い天然鉱物や自然物等を利用して、幾つかの海底域およびその周辺域を模擬することとし、10 種類の海底モックアップを製作した（図 3-(3)-B-②-1）。図中海底モックアップ「MK01」～[MK06]は色やサイズの異なる天然石を利用して製作したもので、海底鉱物の色やサイズの差異による識別の可能性を評価することを目的としている。海底モックアップ「MK07」は、鉄やマンガンのほか、銅、ニッケル、コバルトも含有するマンガン団塊域を模倣して製作したものである。海底モックアップ「MK08」は、深海底に生息する白色系底生生物（シロウリガイ）を模倣して製作したものである。シロウリガイ

図 3-(3)-B-②-1　海底モックアップ×10 種類
（MK01-06:自然石　MK07:マンガン団塊模擬
MK08:シロウリガイ模擬　MK09:熱水域模擬
MK10:マンガン団塊実物）

はメタンを含有する熱水湧出域に密集して生息するため、近傍に熱水鉱床等の資源域が存在する可能性を示唆し、海底資源域の探索対象として有効と考える。海底モックアップ「MK09」は、鉱物の沈殿により形成されたチムニーを代表とする熱水鉱床域の外観を模倣して製作したものである。海底モックアップ「MK10」は、JAMSTEC が所有する実際のマンガン団塊サンプル（破片）を使用して作成しており、マンガン団塊実物からの反射特性を把握することで、実際の海底鉱物資源域の識別性能を評価する。これら海底モックアップは、樹脂製ケース（サイズ：W645×D428×H95mm｜図 3-(3)-B-②-2）にレーザーの反射を抑える黒色塗装を施し、当該ケース内に簡易セメントを敷き詰めた中に模擬物材を埋めて強度を保持して外観を形成している。更にその上からスプレー式の接着材を塗布して固定することで、水槽試験・浅海試験・深海試験での使用に耐え得る構造としている。

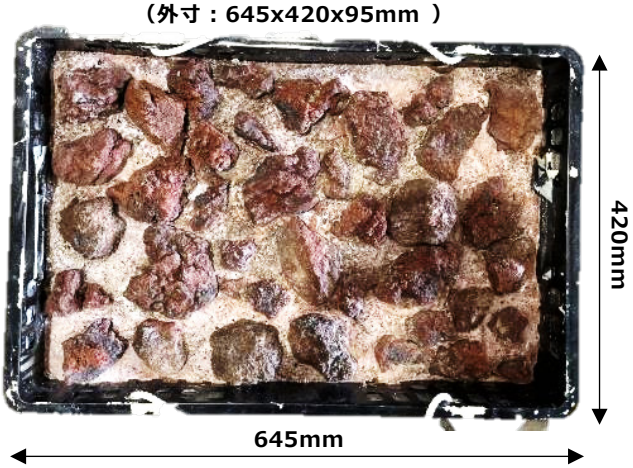


図 3-(3)-B-②-2　樹脂製ケース（海底 MK 格納用）

物性推定アルゴリズムにおいて推定対象（識別対象）の数は最終的に 10 種類を予定している。前記 10 種類の海底モックアップに加え今後、深海試験において選定する試験海域の海底から、特徴的な自然海底および特徴のない自然海底を複数選択し、海底モックアップと

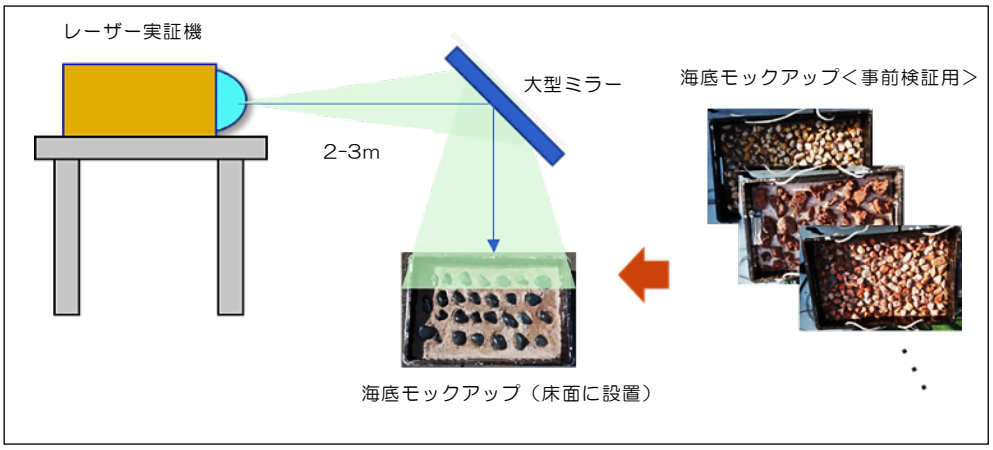


図 3-(3)-B-②-3　学習用データの取得方法（気中｜事前検証用）

自然海底を合わせて 10 種類の識別対象が選定される。基本的に海底モックアップは、深海試験前の物性推定アルゴリズムの設計・構築・事前評価に要する学習用データ、評価用データを取得するために使用する。物性推定アルゴリズムの識別対象として選出された海底モックアップは、深海試験において実際に海底配置され、同じく選出された自然海底ともに各実証機を用いて計測する。当該計測値を適用した物性推定アルゴリズムの識別性能（海底の類別性能）の評価、および当該アルゴリズムの性能向上に使用される。

深海試験の事前において当該アルゴリズムの妥当性および識別性能を、気中で取得した計測データを適用して検証する。上記海底モックアップとは別に、それぞれ同じ物材でサイズが異なるもの（外観が異なるもの）を使用して構成し、接着等は行わずに樹脂ケースを床に置いた状態で内容物の配置を変えて外観のバリエーションを増やす。この際、計測時の便宜性を鑑み、樹脂ケースを床に置いた状態で各実証機を適用した計測ができるよう、大型ミラーを利用してレーザー光を 90 度曲げて計測する方法をとる（図 3-(3)-B-②-3）。これにより、海底モックアップの内容物のサイズや配置の異なる複数の学習用データが事前に気中にて取得される。併せて、事前に取得したこれら学習用データのバリエーションが十分に得られない場合は、画像加工技術を適宜利用することでデータ拡張（水増し）することで学習用データ数の不足を補う。

(b) 水槽試験／浅海試験

物性推定アルゴリズムの基本設計に要する既知物材を用いた水槽試験、浅海試験を実施した。計測対象は、532nm レーザー波長および 355nm レーザー波長による色差に応じた反射率を定量評価するために、複数種のグレースケール評価用パネルを使用した（図 3-(3)-B-②-4）。併せて、物性推定アルゴリズムの識別性能を評価するために製作した海底モックアップを使用した（図 3-(3)-B-②-5）。各試験において取得された計測データ（距離情報｜強度情報）を評価することで、物性推定アルゴリズムの開発方針および推定手法を検討し、基本設計書を作成した。各水槽試験・浅海試験に関する試験手法・計測系コンフィギュレーション、計測結果等の詳細については「3.(2)-A」および「3.(3)-A」に示す。

(c) 深海試験セットアップ／計測系コンフィギュレーションの検討

深海試験において、海中探査機を使用した物性推定アルゴリズムの識別性能（海底の類別性能）評価を実施する。当該試験においては、海底モックアップを実際の海底に配置し、これを Green レーザー実証機、UV レーザー実証機にて計測することで、得られた距離情報、強度情報（反射率）を用いて、物性推定アルゴリズムによる既知物材の類別を実施する。そこで、深海試験に要する各セットアップおよび計測系コンフィギュレーションについて検討する。図 3-(3)-B-②-6 に深海試験の概要を示す。各レーザー実証機を搭載した海中探査機

図 3-(3)-B-②-4　評価用パネル｜グレースケール（マンセル値）

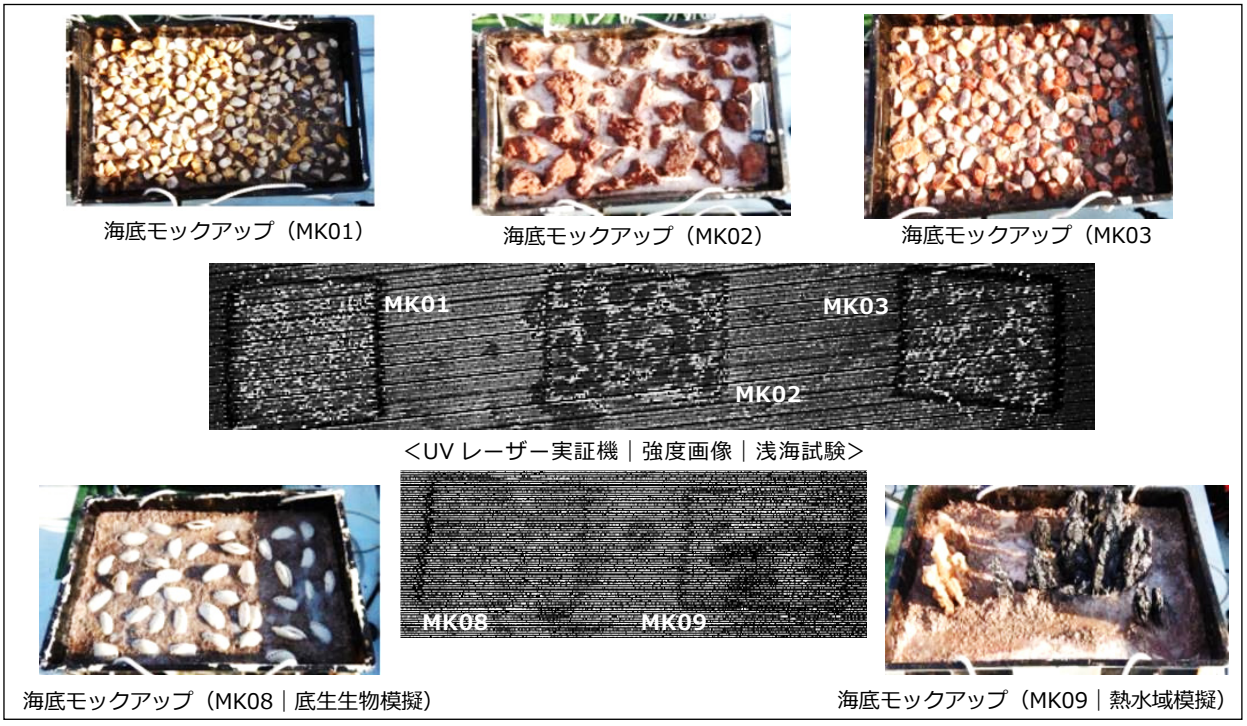


図 3-(3)-B-②-5　海底モックアップ（5 種｜浅海試験）

を適用し、一定高度（深度）において海底に配置した既知物材（海底モックアップ）を計測する。この際、ホバリング状態からの 2D スキャン、もしくは低速航走状態からのラインスキャンを想定する（探査機性能／気象・海象／現場環境等の諸条件に依る）。併せて、各レーザー実証機の諸設定、海中探査機高度（深度）、位置・姿勢等を変更しながら同対象を計測し、多種条件における多様な計測値を取得する。これを海底に配置した各海底モックアップそれぞれに対して実施する。この際、海底モックアップと同時にその周辺の海底を合わせて計測する。ここで取得された計測データはオフラインにて、物性推定アルゴリズムの学習用データとして利用し、当該アルゴリズムの性能向上に繋げる。これにより、次回の深海試験における海底類別性能（推定性能）の向上が期待される。性推定アルゴリズムは、基本的

図 3-(3)-B-②-6　**深海試験｜試験概要｜海底類別性能評価（学習用データ取得）**

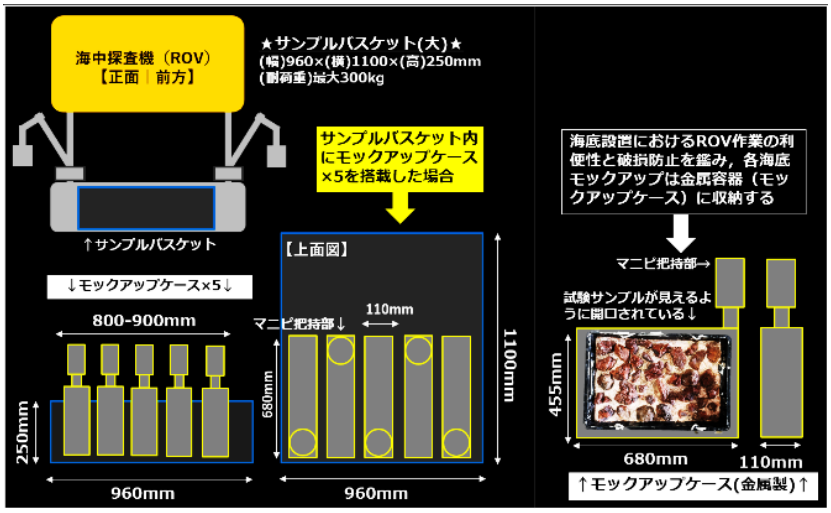


図 3-(3)-B-②-7　**深海試験セットアップ｜海中探査機搭載仕様**

に気中にて取得した多様な学習データによりネットワークを更新したものとなる。当該アルゴリズムに対して、海底に設置した未知物材（海底モックアップ）の計測結果（計測データ）を入力することで、海底の類別性能が評価される。併せて、その入力データを新たな学習データとしても利用することで、当該アルゴリズムの更なる性能向上に努める。ごく限られた機会となる深海試験においては、物性推定性能を評価する評価用データを取得すると共に、より品質の高い効果的な学習用データを取得することを考える。

深海試験を効率的に実施するために、海中探査機のセットアップおよび計測系コンフィギュレーションについて検討した。海底に複数の海底モックアップを配置するために、海中探査機が具備するサンプルバスケットを利用し、海底モックアップを格納する。この際、海底設置における作業利便性、および海底モックアップの破損防止を鑑み、各海底モックアップを金属容器（モックアップケース）に収納する（図 3-(3)-B-②-7）。モックアップケースはマニピュレータ用の把持部を付属する剛性のとれた金属容器で、サンプルバスケット内に最大 5 セット収納可能である（海底設置の利便性により格納数を変更）。サンプルバスケット内に当該モックアップケースを収納し、海中探査機が着底後にマニピュレータにてモックアップケースを取り出し、1 セットずつ海底に配置していく。全ての計測が終了した後、設置時と同様にしてマニピュレータにて 1 セットずつモックアップケースをサンプルバスケットに収納する。モックアップケースの配置間隔は、海中探査機の運動性と各実証機による計測時の効率を鑑み、3-5m を想定している。図 3-(3)-B-②-8 に、海中探査機によるモックアップケースの設置・回収作業の概要を示す。複数のモックアップケースを海底に設置した後、海中探査機は離底して計測行動をとる。海中探査機が具備する自動制御機能（状況によりマニュアル操縦）を適用し、一定高度を保持（実際には一定深度を保持）しつつ、姿勢を安定した状態で定度かつ低速（想定｜約 1kt 以下）にて各モックアップケースの出来るだけ直上を航走する。この際、計測結果の品質を保証するため、船首変化が極力少ない直線航走に留意する。Green レーザー実証機と UV レーザー実証機は、レーザー出力および光検出

図 3-(3)-B-②-8 モックアップケースの海底設置・回収

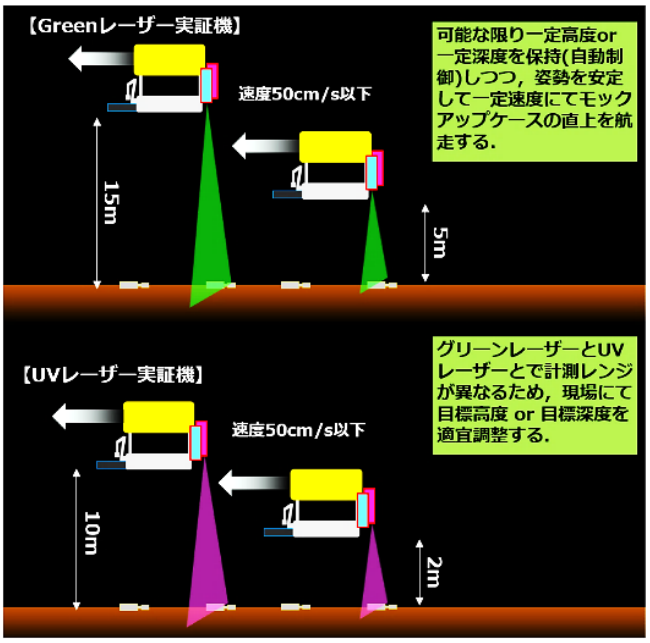


図 3-(3)-B-②-9　海中探査機による計測(航走)概要

器感度を含めた性能（計測距離）が異なるため、現場環境（濁度・潮流・流速等）を鑑み、目標高度もしくは目標深度を適宜調整する（図 3-(3)-B-②-9）。

[(3)-B｜実施内容③｜実海域試験（浅海試験・深海試験）における学習用データ取得]

＜概要＞

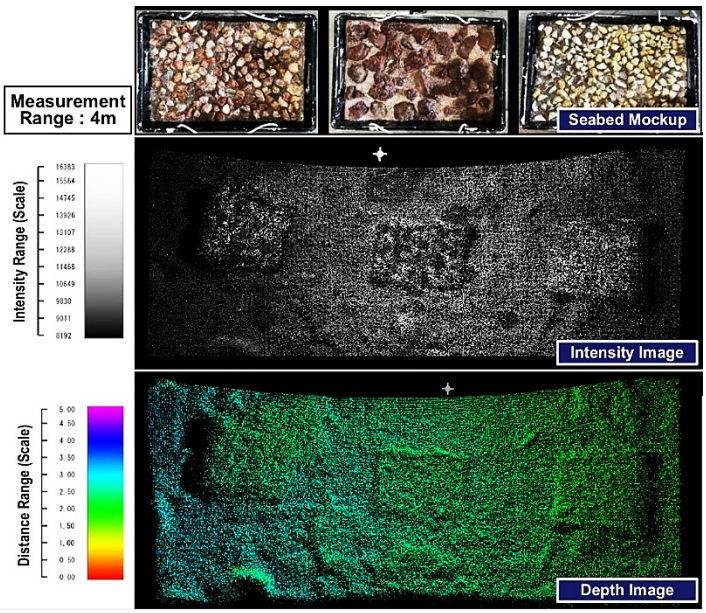
実施項目「3.(3)-A」にて構築した物性推定アルゴリズムの性能評価および性能向上に要する各種データの取得を目的として、実海域試験(浅海試験×１｜深海試験×2回)を実施した。各実海域試験において、評価用パネルおよび海底モックアップを海底に配置し、実際の海底とともに各実証機を適用して計測した。これにより、可視化画像（距離画像｜強度画像）が生成され、物性推定アルゴリズムの学習用データとして使用された。その他、同目的のために複数回の水槽試験を実施したが、本項では実海域試験のみを報告する。

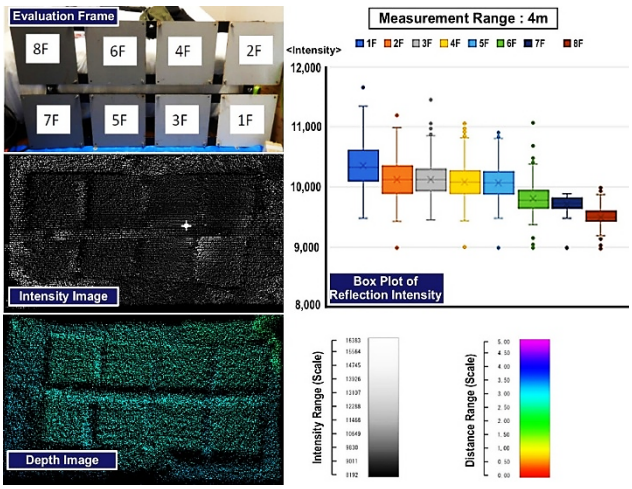
(a)浅海試験（Greenレーザー実証機｜評価用ﾊﾟﾈﾙﾙ・海底ﾓｯｸｱｯﾌﾟ計測｜令和5年5月｜石垣島〕

Green レーザー実証機による物性推定アルゴルリズムの性能評価および性能向上に資する学習データの取得を目的として、海底モックアップを使用した浅海試験を実施した。本試験の実施内容詳細については「(1)-A｜実施内容⑤」に記載している。Green レーザー実証機を海底から高度 5m の地点で固定し、海底モックアップ計測を実施した。図 3-(3)-B-③-1 に本試験における計測結果を例示する。併せて本試験では、海底モックアップとは別に評価用パネル（グレースケール）を海底の設置し、特に Green レーザー実証機における黒色系に対する反射率の差異について定量評価するための基礎データを取得した図 3-(3)-B-③-2。これら各計測データを適用し、物性推定アルゴリズムを構築するとともに学習を進捗させ、深海試験前の事前検証を実施した。

(b)深海試験（Green＋UV実証機｜令和5年10月/令和6年2月｜相模湾・初島東方海域）

UV レーザー実証機による学習データの取得を目的として、海底モックアップを計測対象とする深海試験（令和 5 年 10 月）を実施した。深海試験は令和 6 年 2 月にも実施し、両深海試験において、同海域、同海中探査機、同支援母船を用いた。海底モックアップ計測では、「かいこう」に搭載した Green レーザー実証機および UV レーザー実証機を用いて、水深 850-900m の海底に配置した海底モックアップに対するレーザー反射率を計測した。各深海試験では、「かいこう」はサンプルバスケット内部に海底モックアップ格納ケースを装備して潜航した。



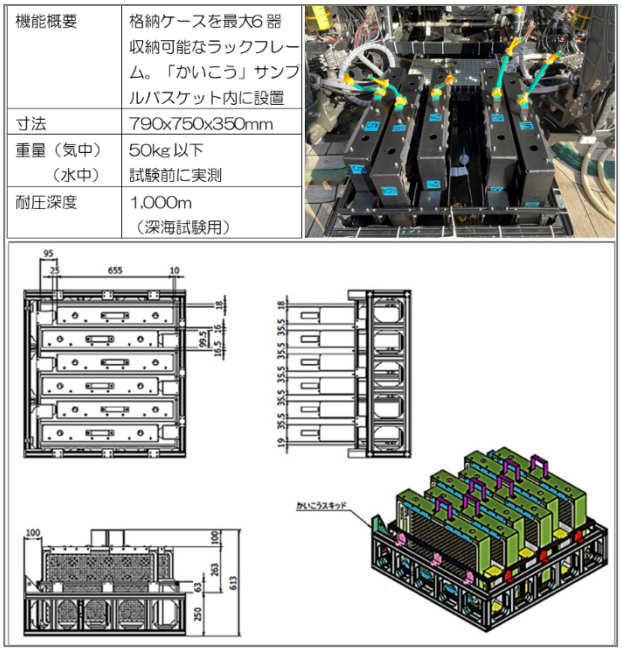


(↑)図 3-(3)-B-③-2　浅海試験結果｜Green｜評価用ﾊﾟﾈﾙ

(←)図 3-(3)-B-③-1　浅海試験結果｜Green｜海底ﾓｯｸｱｯ

海底モックアップ格納ケース（以降、格納ケース）は、海底モックアップが格納された金属製ケースであり、深海環境およびマニピュレータ作業に耐えうる剛性ケースとして製作した。各波長のレーザー反射率を定量的に評価する基礎データ（物性推定アルゴリズム・学習用データ）の取得に用いる。格納ケースは、「かいこう」サンプルバスケット内部に設置した収納ラックフレーム（以降、ラックフレーム）に収納され、最大 6 器の格納ケースの収納を可能とする。各深海試験では、海底設置に対する格納ケースへの追加工、およびマニピュレータ作業による簡便性を鑑み 3 器搭載を基本とした。図 3-(3)-B-③-3、図 3-(3)-B-③-4 に格納ケース、ラックフレームの概要を示す。

図 3-(3)-B-②-8 に示す通り、本試験では先ず、「かいこう」が任意の海底地点に着底し、ラックフレームから格納ケースを取り出し、海底に設置した。この際、格納ケースは 3-5m 程度の間隔を空けて設置した。3 器の格納ケースを海底に設置後に離底し、任意の高度から当該各格納ケースに向けレーザー光を照射し計測を開始する。ここで、Green レーザー実証機と UV レーザー実証機の計測レンジは異なるため、計測環境を鑑み、現場にて都度、目標高度を調整し計測を実施した（基本高度:5m）。「かいこう」は可能な限り任意の高度を保持することに留意し、併せて、1knot（≒50cm/sec）以下の低速かつ定速にて航行し、格納ケースの直上通過することに努めた。全ての計測を終了した後「かいこう」は着底し、マニピュレー



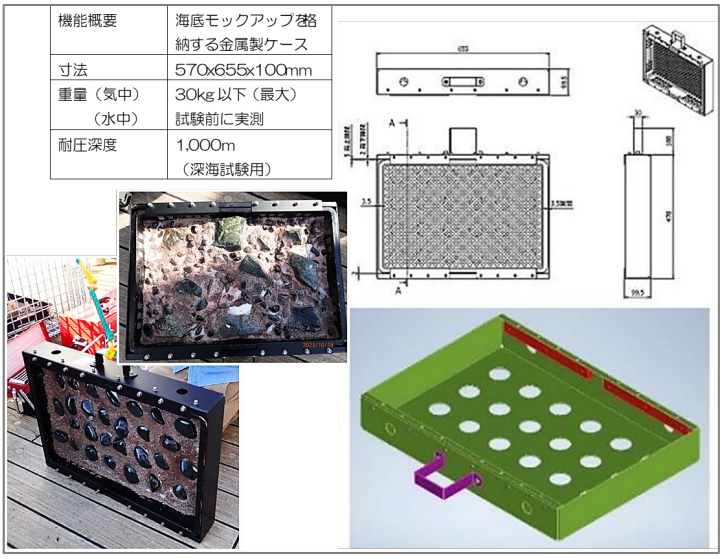


図 3-(3)-B-③-3 海底モックアップ格納ケース(↑)

(←) 図 3-(3)-B-③-4　収納ラックフレーム

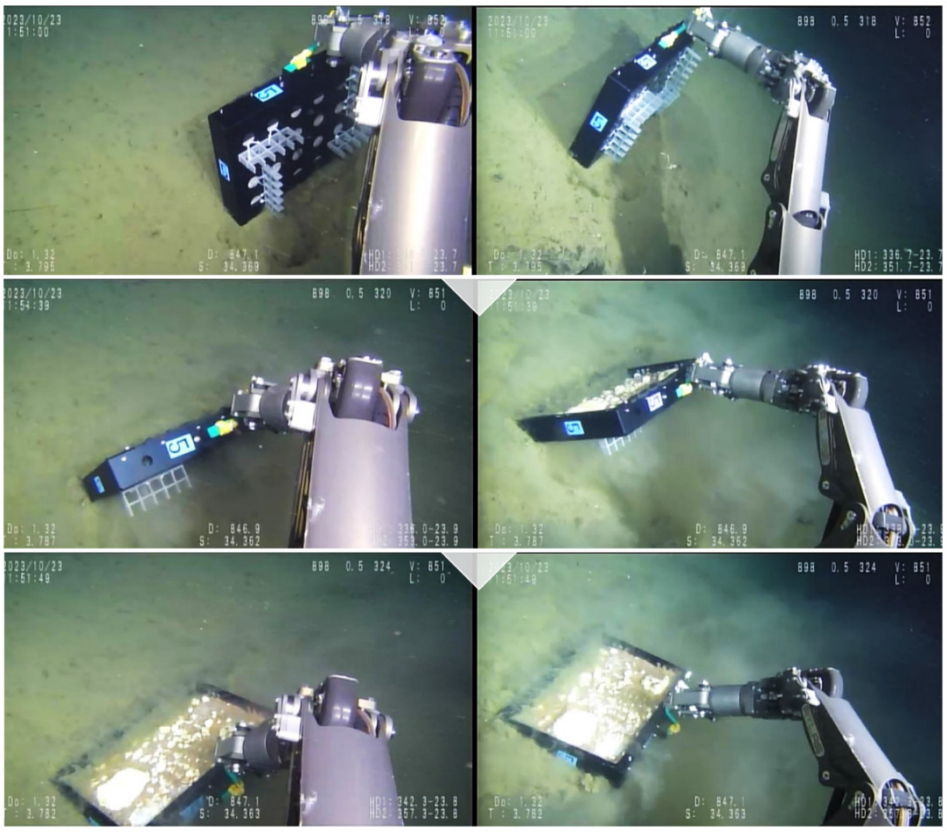


図 3-(3)-B-③-5
「かいこう」ﾏﾆﾋﾟｭﾚｰﾀ作業ｼｰﾝ｜深海試験｜海底モックアップ設置

タを用いて格納ケースを回収し、ラックフレームに収納する（図 3-(3)-B-②-9）。図 3-(3)-B--③-5 に本試験における「かいこう」マニピュレータの作業シーン（格納ケース設置作業）を、図 3-(3)-B-③-6 に「かいこう」によるレーザー計測シーン（海底モックアップ計測）をそれぞれ示す。2 度の深海試験では、当該海底モックアップの計測のほか、実際の海底（自然海底）の計測も実施している。試験海域に選定した相模湾・初島東方海域の海底は、浅水深から大水深に続く崖地形（急傾斜）が続いており、海中探査機が安定して着底するのが困難な海底域である一方、シロウリガイやシンカイヒバリガイなどの底生生物が生息する海域である（図 3-(3)-B-③-7）。当該底生生物の一部には、海底下から湧水される硫化物を食する種があり、熱水域の存在を間接的に示唆する海底特異点となり得る。本深海試験ではいずれも、それら底生生物のコロニー（群集域）の計測も実施しており、既知物材である海底モッ

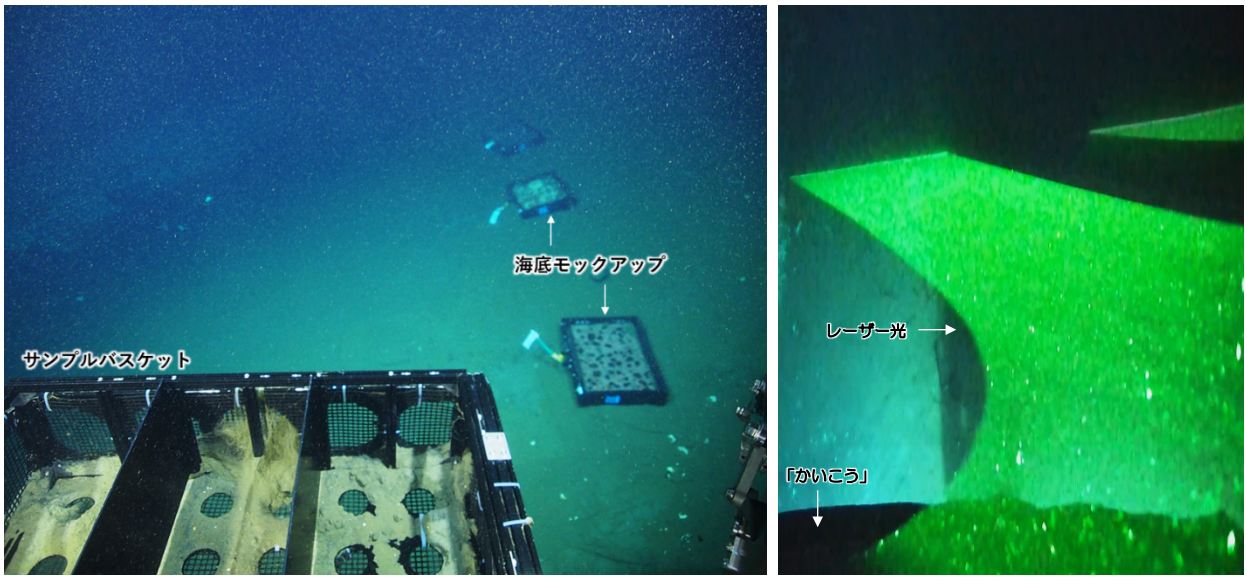


図 3-(3)-B-③-6　「かいこう」海底モックアップ計測｜深海試験
（左｜海底モックアップ設置後に離底時　右｜Green 実証機から照射されるレーザー光）

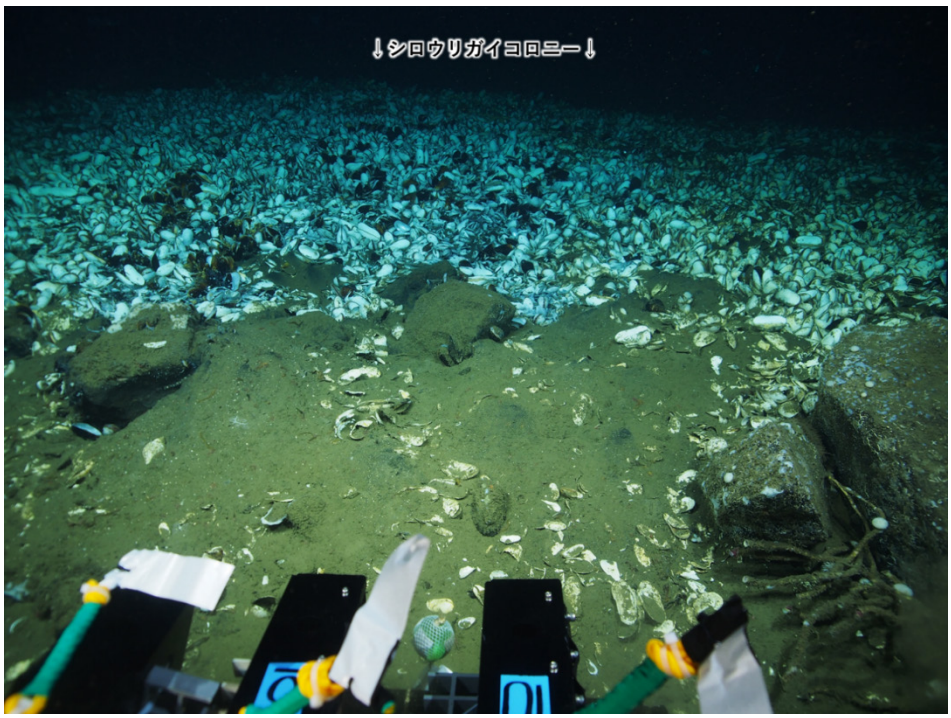


図 3-(3)-B-③-7
シロウリガイコロニー｜深海試験
（初島東方沖｜水深 850m 以深）

クアップに加え、2 種類の底生生物（シロウリガイ／シンカイヒバリガイ）の群生域を含む 4 種類の自然海底に関する学習データを取得した。

[(3)-B｜実施内容④｜深海試験における学習用データ・評価データの取得｜最終評価]

＜概要＞

「(3)-B｜実施内容③」の深海試験において取得された計測でータを基に、物性推定アルゴリズムの性能評価を実施するとともに、性能向上の方針を立てた。そこで、物性推定アルゴリズムの更なる性能向上に要する各種データの取得を目的として、深海試験×2 回を実施した。当該各深海試験が、Green レーザー実証機および UV レーザー実証機にて自然海底、海底モックアップを計測する最終機会となる。これまで実施した水槽試験・浅海試験・深海試験にて計測した各種データから物性推定アルゴリズムを最適化し、最終目標の達成を目指す。特に自然海底は深海試験でのみ取得可能な計測対象（識別対象）となるため、選定した自然海底の計測を重点的に実施した。併せて、多様かつ高品質な海底モックアップの計測データを取得するため、「(3)-B｜実施内容③」と同様の試験セットアップおよび計測系コンフィギュレーションにて計測データを取得した。

(a)深海試験｜最終計測（Green＋UV実証機｜令和6年9月/令和6年12月｜相模湾・初島東方）

令和6年9月および令和6年12月の2度にわたり、初島東方の水深850-900mの海底域において、物性推定アルゴリズムの改善に要する学習用データ・評価用データの取得を目的とて、海底モックアップおよび自然海底の計測を実施した。当該海域は浅水深から大水深に続く崖地形（急傾斜）が続いており、海底モックアップを設置することは不向きである。一方、底生生物の群生域（図3-(3)-B-④-1）が複数存在しており、併せて、岩場、砂地（何もない家庭）と自然海底（図3-(3)-B-④-2）として選定した計測対象（識別対象）が数百メートル圏内に点在しているため、効率的な計測が実施可能である。そこで、当該海底に海底モックアップを設置することで、物性推定アルゴリズムの改善に要する各種計測データを、包括的に取得できるように「かいこう」の航走シナリオを計画した。海底モックアップは1潜航において3器まで搭載可能（図3-(3)-B-④-3）であり、急傾斜域に設置することを考え、滑り止め（スパイク）を格納ケースに具備させている。これにより1度の潜航で、海底モックアップ×3種類、自然海底×4種類の各計測データを取得することが可能となる。自然海底×4種

類においては、複数の測線を計画し、異なる方向・高度から多角的に計測することで、計測データの多様性を考慮した。また、底生生物の群生域に関しては、同海底エリアに大小の群生域が点在しているため、異なる群生域を多く計測するよう留意した。

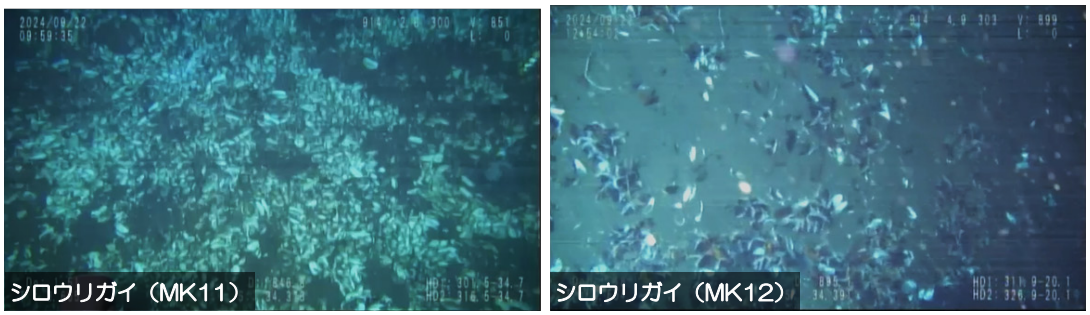


図 3-(3)-B-④-1　計測対象｜深海試験｜自然海底｜シロウリガイ群生域／シンカイヒバリガイ群生域

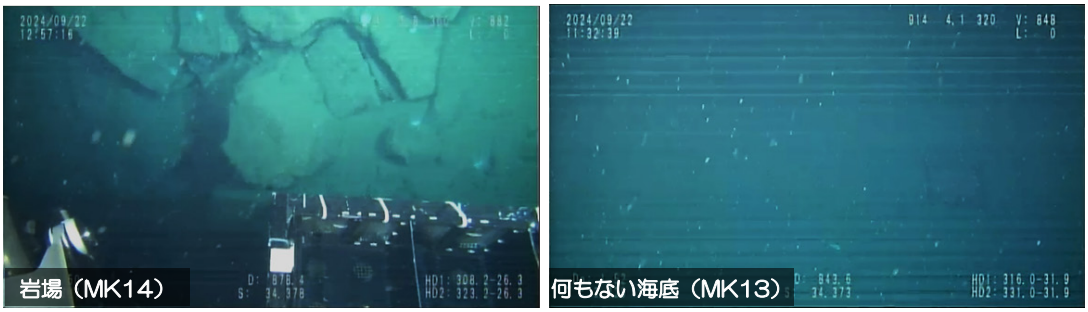


図 3-(3)-B-④-2　計測対象｜深海試験｜自然海底｜岩場／砂地（何もない海底）

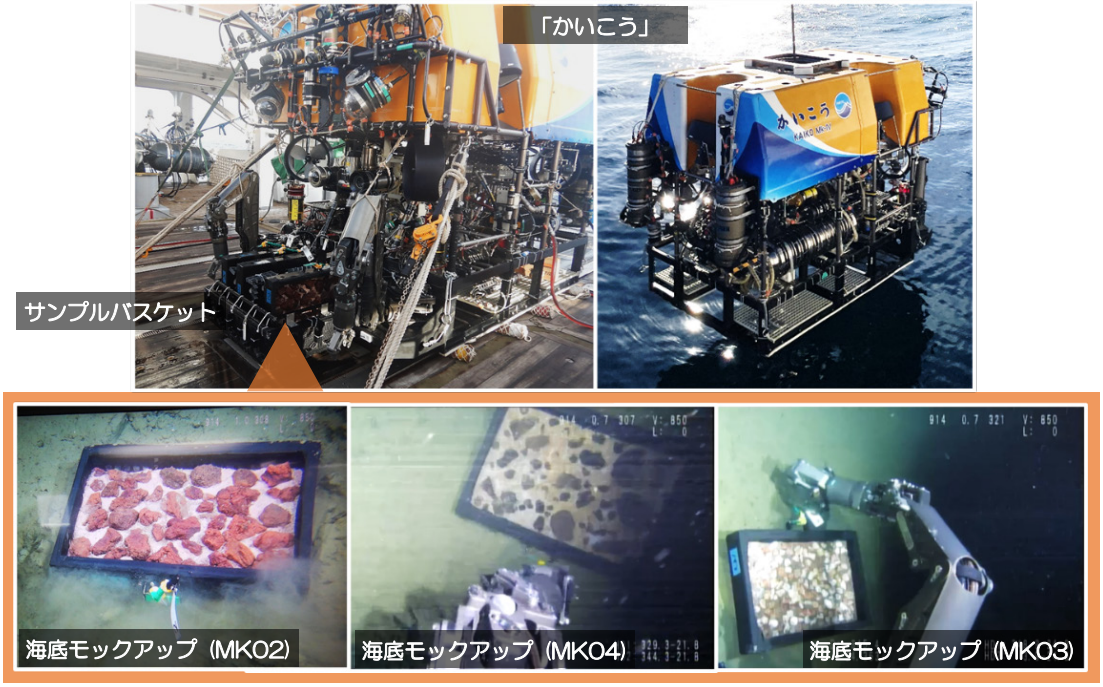


図 3-(3)-B-④-3　計測対象｜深海試験｜海底モックアップ｜MK02／MK03／MK04

(4)-A ドップラシフト解析による移動速度検出

[(4)-A｜目的]

海中懸濁物に対するレーザー反射光のドップラシフト量を計測することで、移動速度を検出する。海中探査機の移動速度に起因するドップラシフト量の誤差を解析する。海中探査機の抵抗値および速度・加減速パラメータから近傍流体場の挙動をシミュレーションし、これを海中懸濁物の挙動としてモデル化することで、距離に応じたドップラシフト誤差を補正する。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(4)-A｜達成目標（終了時）]

ドップラシフト誤差の補正アルゴリズムを含む移動速度検出機能を光学系システム(実証機)へ組み込み、実環境において試験を実施する。検出された速度と慣性航法装置との複合航法において、純慣性航法と比較して約10倍の位置検出精度を達成する速度精度を目指す。

[(4)-A｜達成目標（終了時）の達成状況]

■移動速度検出機能を実証機へ組み込み、実環境において試験を実施　：　**達成**

■検出された速度と慣性航法装置との複合航法にて、純慣性航法の約 10 倍の位置検出精度を達成する速度精度　：　**達成**

[(4)-A｜実施内容①｜物性推定アルゴリズムの事前検討]

＜概要＞

海中探査機の海中移動速度を算出するため、可視光帯を利用した海中探査機搭載用の海中レーザードップラ速度計を検討した。本項にて検討するレーザードップラ速度計は、ターゲット粒子に対してレーザー光を照射し、その反射光に付与されるドップラシフト量からターゲット粒子に対する相対速度を算出する方法となる。これは、レーザードップラ速度計が移動する場合にも適用可能となり、海中探査機に搭載した場合、海中探査機とターゲット粒子との相対的な移動速度が計測される。

運用が想定される深海域においては、海中探査機から十分に距離の離れた海水中の懸濁物を仮想的な静止ターゲットとみなすことを前提にしている。海中探査機前方の懸濁物からの反射光から移動速度を測定することが目的である。この際、ターゲット（海中懸濁物）までの距離は海中探査機から前方3-5m程度、ターゲットサイズは1mm以上、反射率は完全拡散体を前提条件とした。

(a)海中移動速度（海中レーザードップラ速度）の検出方式検討

既存のドップラ LiDAR（Light Detection And Ranging）の方式としてコヒーレントドップラライダ(CDL：Coherent Doppler Lidar) を想定し、FMCW(Frequency Modulated Continues Wave), Pulsed CDL, Bistatic CDL 方式の 3 方式について検討し、海中レーザードップラに対する検波方式と適用性についてトレードオフを行った。

◆「FMCW方式」の評価

本方式において距離分解能を向上させるためには、パルス幅を狭くあるいはチャープ周波数幅を狭くする必要がある。また速度分解能を向上させるためには、パルス幅を広く、あるいはチャープ周波数幅を広くする必要があり、相反する要求となっている。距離分解能に関しては、受信開口を拡大し測定距離を限定する光学系の実現化は可能であるが、波面精度（圧力による歪）をλ/8@532nm（他の方式も同一）以下にするためには、小口径のガラス（Φ15mm 程度）から送受信する必要があるため、「FMCW 方式」の採用は困難と判断する。

◆「Pulsed CDL方式」の評価

本方式は、レーザー光源をパルス変調してハードターゲットからの反射光(受信光) を受信し、距離分解能ごとのドップラ周波数を計測する。距離分解能を向上させるためにはパルス幅を極力狭くする必要があり、ドップラ周波数分解能を向上させるためには、パルス幅を極力広くする必要がある。

内部散乱による影響で近傍の距離分解能毎に有色雑音が重畳されるリスクを想定すると、複数の距離分解能に分離演算する必要がある。距離分解能は、過去の実績から 5ns（距離換算で 5m）と仮定し、これを 6 分割、つまりパルス幅は 30ns として計算する。30ns の場合、フーリエ変換による周波数分解能は 33MHz となる。積分によるピーク検出で、中心周波数の推定精度が 10 倍程度に上がることを期待すると約 3MHz が得られる見込みとなる。これに対応するドップラ速度分解能は約 0.9m/s である。速度分解能 0.01m/s が確保できないため「Pulsed CDL 方式」の採用は困難と判断する。

◆「Bistatic CDL方式」の評価

本方式は、図3-(4)-A-①-1に示されるよう送信側開口と受信側開口を独立に配置する。各々の光軸は距離Rtで交差するものとする。交差する交点に送信ビーム、受信視野をフォーカスする。交点にターゲット面を示しているが、ターゲット位置については、運用しながら距離を可変することは波面精度の面からできない。送信側からCW光源を発光し、受信側で交差した距離からの反射を受光しドップラ計測を行う。この時の距離分解能は送受信の離長距離と角度に依存する。交差範囲を狭くすると距離分解能は向上するが、ターゲット存在確立が減少するため、測定できない時間も多くなる。

速度分解能はレーザー光源のλで決まる。現在探査機に実装可能な光源のλは1064nmで線幅3MHzである。これを532nmに波長変換することで、λは6MHzとなり、この時のドップラ速度分解能は約1.8m/s である。積分によるピーク検出で、中心周波数の推定精度が10 倍程度に上がることを期待すると約0.6MHz が得られる見込みとなる。これに対応するドップラ速度分解能は約0.18m/s である。また、前提条件としてλを6MHz（光源は3MHz）としているが、ここを特注化することにより向上できる可能性もあり、速度分解能は0.1m/s 以下を目標と設定している。目標とする速度分解能0.01m/sを確保できていないが、本方式が最も速度分解能が高くなることが見込まれ、また今後の進捗により、性能向上できる見込みもあり、最適となるレーザー光源の選定とその特性等を鑑み、本方式を採用する。

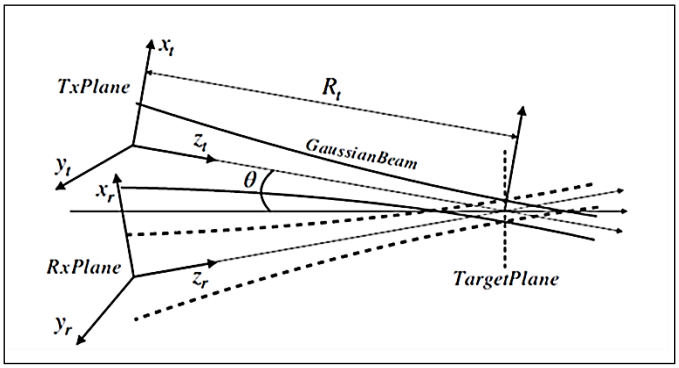


図 3-(4)-A-①-1
検出方法検討｜海中レーザードップラ速度｜
バイスタティック方式における光軸イメージ

[(4)-A｜実施内容②｜ドップラ評価機の試作と性能評価試験]

＜概要＞

光学系システム（ドップラ評価機）の詳細設計・試作を実施し、水槽試験および浅海試験においてドップラ評価機の性能評価／機能確認を実施した。各試験の結果に基づき、ドップラ評価機の改善検討を行い、ドップラ実証機の基本設計へ反映した。ドップラ評価機の詳細設計・試作においては、レーザー光のドップラシフト検出に重要となる波面安定性について検討した。

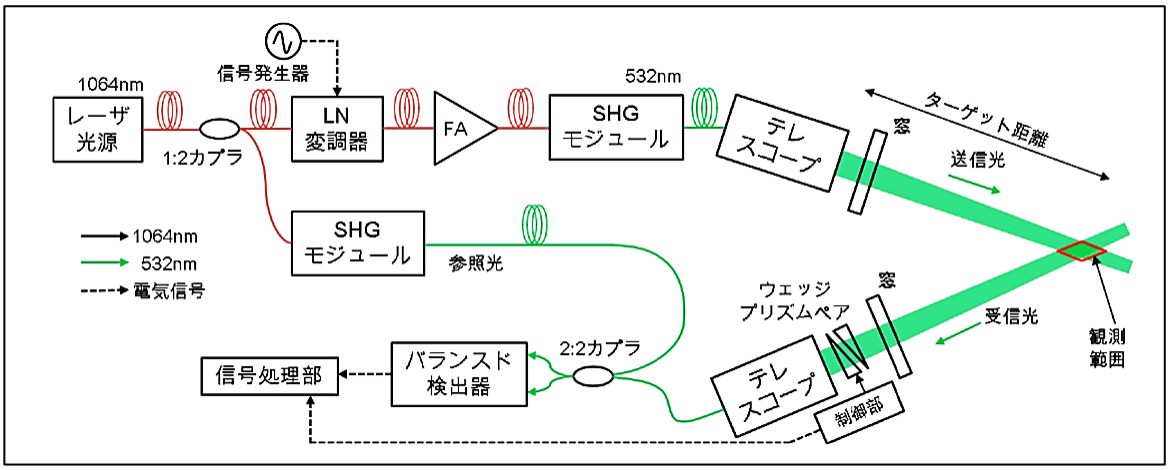
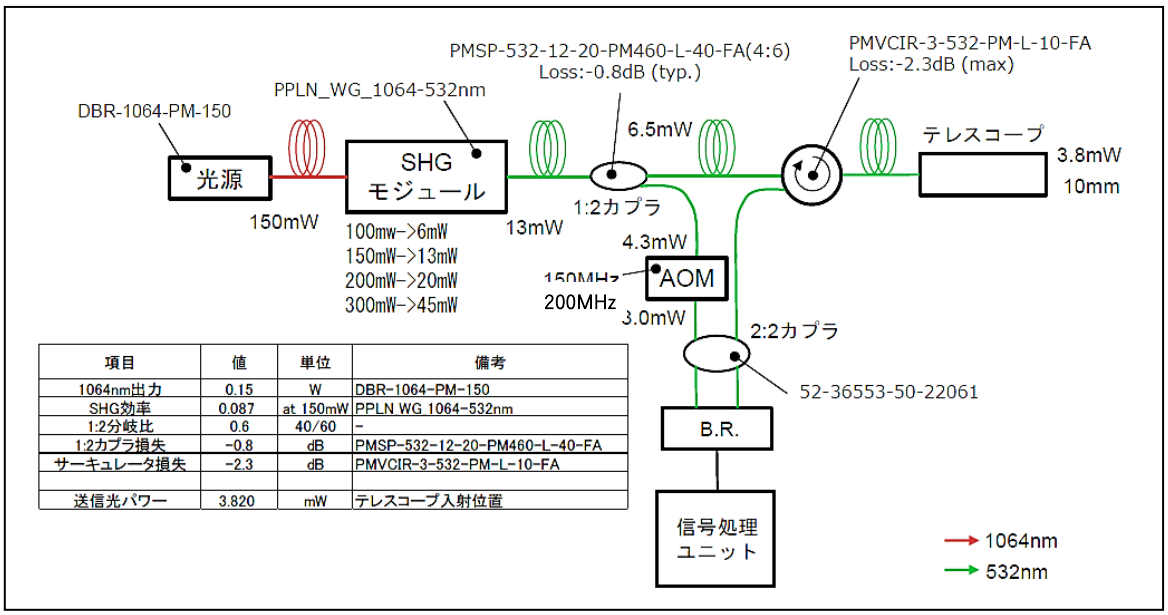


図 3-(4)-A-②-1　システムブロック図(設計)｜ドップラ実証機｜バイスタティック方式



項目	値	単位	備考
1064nm出力	0.15	W	DBR-1064-PM-150
SHG効率	0.087	at 150mW	PPLN WG 1064-532nm
1:2分岐比	0.6	40/60	-
1:2カプラ損失	-0.8	dB	PMSP-532-12-20-PM460-L-40-FA
サーキュレータ損失	-2.3	dB	PMVCIR-3-532-PM-L-10-FA
送信光パワー	3.820	mW	テレスコープ入射位置

図 3-(4)-A-②-2　システムブロック図(設計)｜ドップラ評価機｜モノスタティック方式

(a) ドップラ評価機の試作

ドップラ実証機ではバイスタティック方式（図 3-(4)-A-②-1）を採用する予定だが、送受信の光軸合わせが難しく光軸調整の難易度が非常に高い。このためドップラ評価機では、システムの機構がシンプルかつ理論的に送受光軸の調整が不要なモノスタティック方式を採用することで、実環境におけるドップラシフト検出の実現性検証を目的とした。図 3-(4)-A-②-2 にモノスタティック評価機のシステムブロック図を示す。モノスタティック方式のデメリットとしては、送信光の線幅に応じて不感帯が存在することであるが、当該方式によるドップラシフト検出に対する実現性検証には支障はない。

(b) ドップラ評価機｜性能評価試験（気中試験）

気中試験および水槽試験において、移動物標に対するレーザー光ドップラシフトを検出し、これを定量評価することを考え、ハードターゲットが一定速度（速度可変）にて移動する移動架台を製作した（図 3-(4)-A-②-3）。移動架台に固定設置されたターゲット（移動物標）に対し、レーザー光を照射するようにドップラシフト評価機を固定設置する。一定速度にて移動させたターゲットに対してレーザー光を照射し、その反射光（受信信号）のドップラシフトを検出することで移動速度を検証する。気中での移動物標速度計測試験のコンフ

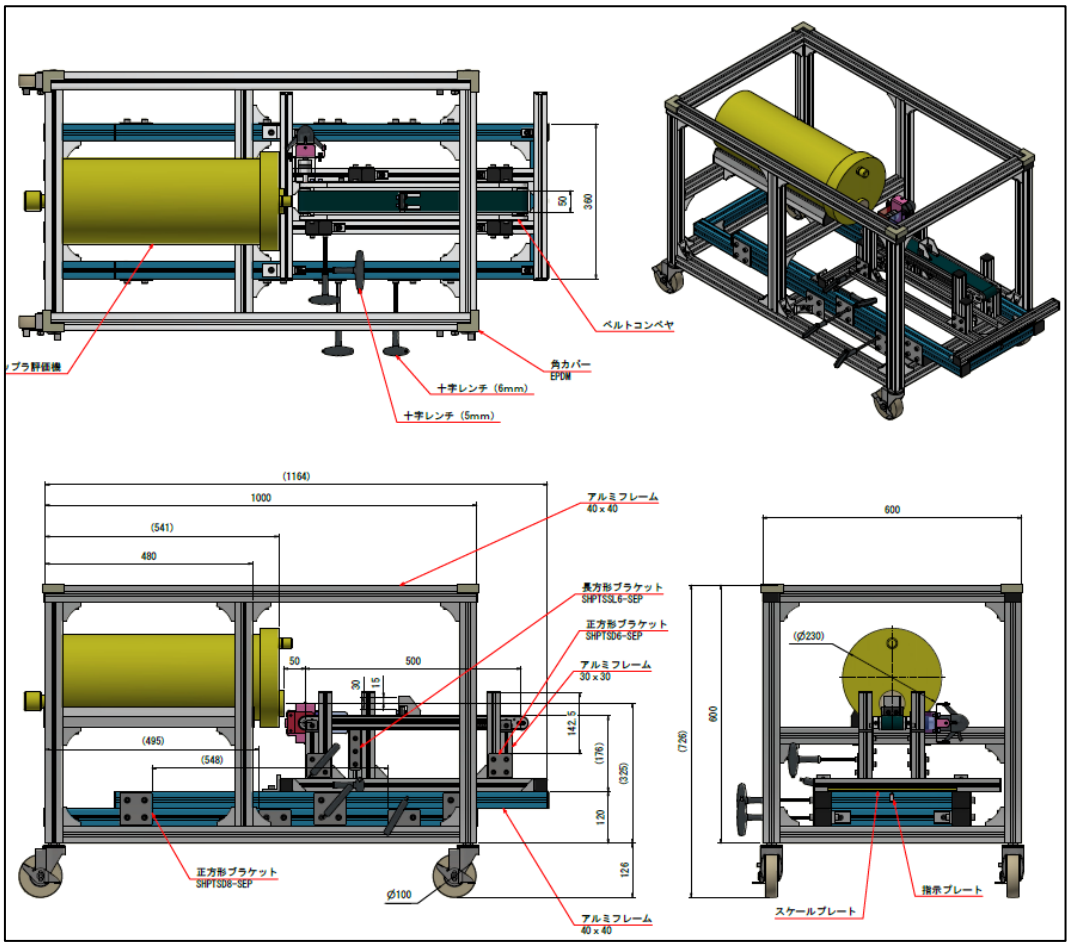


図 3-(4)-A-②-3　ドップラ評価機試験用治具（ベルトコンベア式移動物標設置）

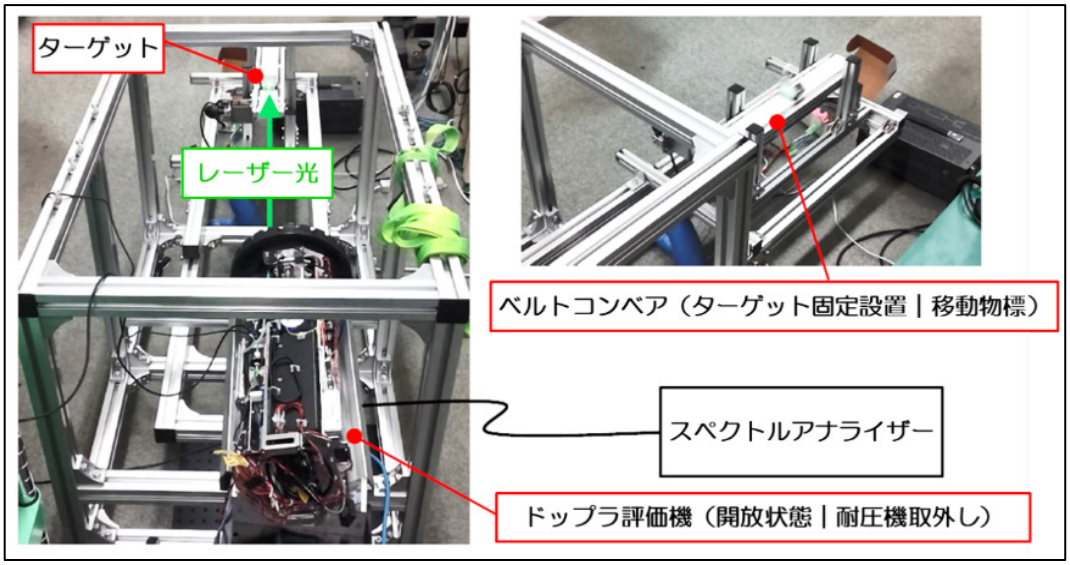


図 3-(4)-A-②-4　気中試験コンフィギュレーション（ドップラ評価機）

ィギュレーションを図 3-(4)-A-②-4 に示す。ドップラシフト計測においては、スペクトルアナライザを用いて当該評価機の受信信号を周波数解析することで評価した結果、図 3-(4)-A-①-5 のドップラシフトが得られた（中心が送信漏れ、中心から右が移動速度データ）。

(c) ドップラ評価機｜性能評価試験（水槽試験）

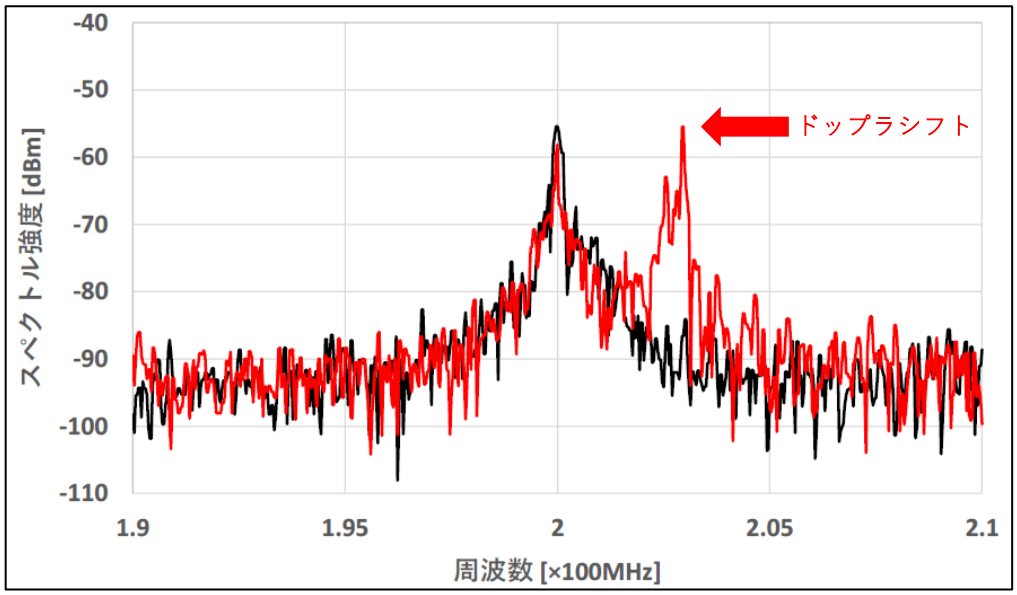


図 3-(4)-A-②-5　ドップラシフト検出結果｜気中試験｜例示｜スペクトルアナライザ波形

ドップラシフト評価機を固定設置したベルトコンベア式の試験治具を水槽内に設置して水槽試験を実施した。その結果、気中試験と同様に当該試験治具に設置したターゲット（移動物標）の反射光からドップラシフトが検出され、移動物標の移動速度が測定できることが確認された。気中試験と同様に、ベルトコンベアを等速回転させ、任意回転数に要する時間を計測することで、当該時間から回転速度（移動速度）を算出（推定）し、スペクトアナライザの実測データから移動物標の移動速度を測定・比較した。その結果、水中に置いてもドップラシフトが良好に検出され移動速度が測定された。図 3-(4)-A-①-6 に水槽試験における代表的な検出結果（スペクトルアナライザ波形）を例示する。

本水槽試験では、今後実施予定の海域試験（浅海試験・深海試験）を想定して計測系（垂直吊下げ状態）を構築し、ドップラ評価機とターゲットとの相対速度検出も実施した。電動クレーンを用いて水槽にドップラ評価機を垂直に入水させ、電動クレーンの動力により当該評価機を上下させることで、約 1.5m先のターゲットとの間に生じる相対速度に対するドップラシフト検出を行った。水槽での上下運動速度検出試験の試験系と速度検出結果を図 3-(4)-A-②-7 に示す。同図から上下動に伴うドップラシフト（中心から左側のスペクトラムピーク）が検出できていることが確認できる。

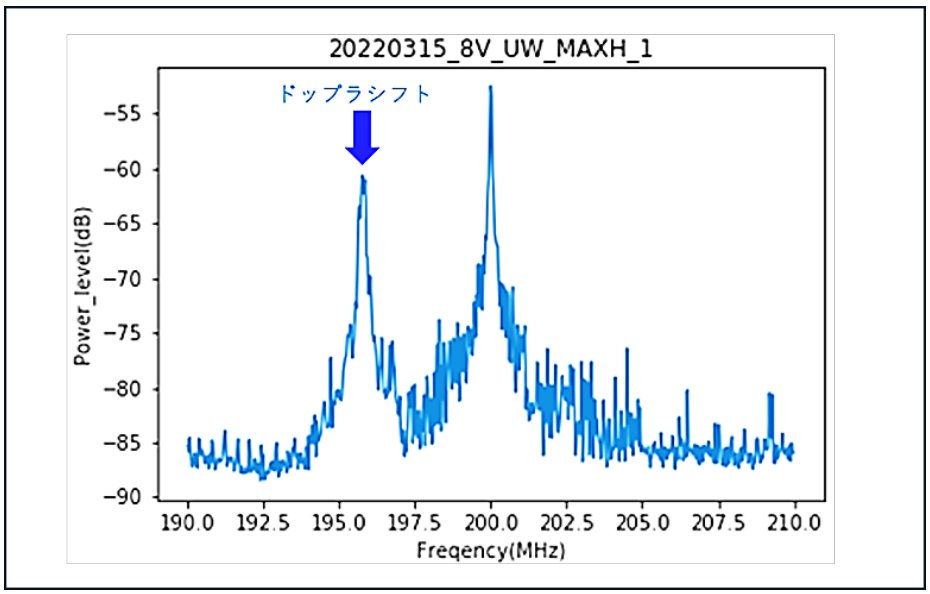


図 3-(4)-A-②-6　ドップラシフト検出結果｜水槽試験｜例示｜スペクトルアナライザ波形

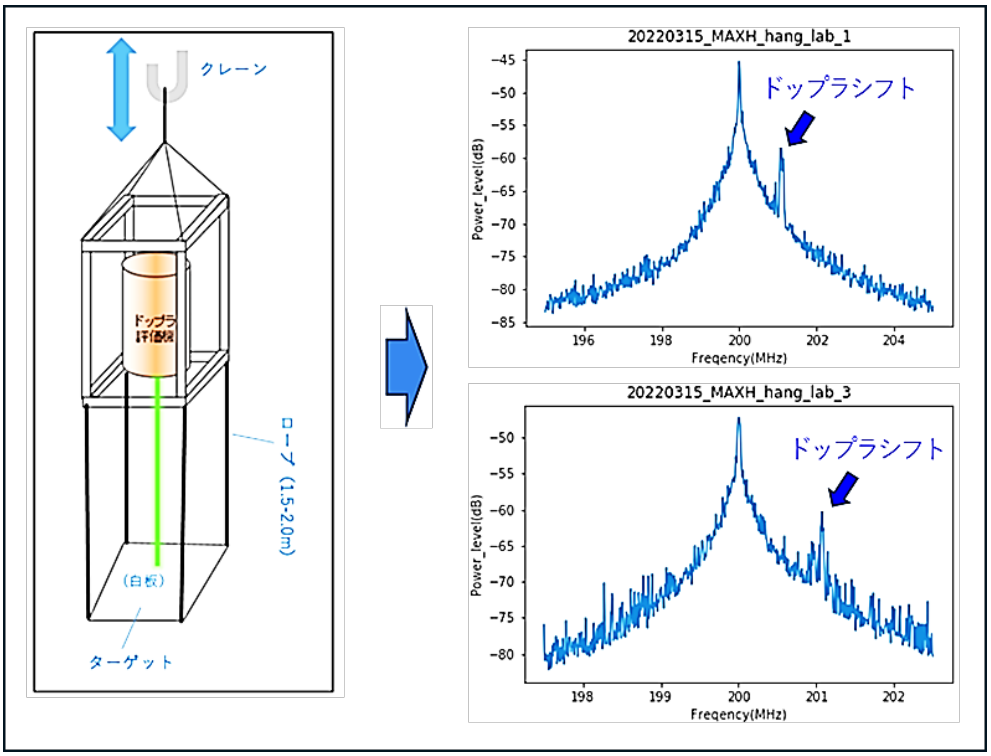


図 3-(4)-A-②-7　計測系＋ドップラシフト検出結果｜水槽試験（上下動速度検出試験）｜例示｜スペクトルアナライザ波形

(d) ドップラ評価機｜性能評価試験（岸壁試験）

前項の水槽試験と同様の計測系（図 3-(4)-A-②-7）を使用し、JAMSTEC 岸壁よりドップラ評価機を着水させ、ユニッククレーンの動力により当該評価機を上下させることで、約 1.5m 先のターゲットとに生じる相対速度を測定した。複数回の測定を実施した結果、ドップラシ

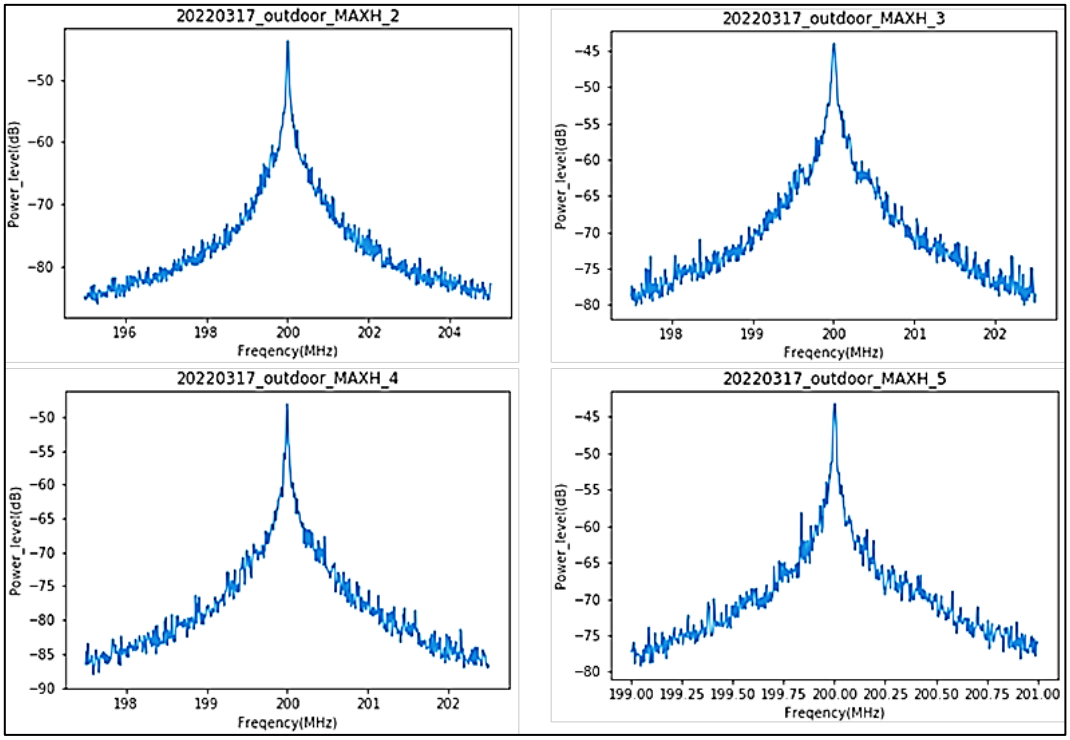


図 3-(4)-A-②-8　ドップラシフト検出結果｜岸壁試験（上下動速度検出試験）｜例示｜スペクトルアナライザ波形

表 3-(4)-A-②-1　集光レンズ仕様（0.5m 前方測定用）｜TS 平凸レンズ 50x500）

直径 (mm):	50.00 +0.0/-0.025	焦点距離 EFL (mm):	500.00 @ 587.6nm
バックフォーカス BFL (mm):	496.70	コーティング:	Uncoated
基板:	N-BK7	表面品質 (キズ-ブツ):	40-20
ニュートン (P-V) @ 632.8nm:	1.5λ	イレギュラリティ (P-V) @ 632.8nm:	λ/4
焦点距離公差 (%):	±1	偏芯公差 (分):	<1
中心厚 CT (mm):	5.00 ±0.10	コバ厚 ET (mm):	3.79
曲率半径 R_1 (mm):	258.40	有効径 CA (mm):	49
Fナンバー:	10	開口数 NA:	0.05
タイプ:	Plano-Convex Lens	面取り:	Protective bevel as needed
波長域 (nm):	350 - 2200		

フトの検出に至らなかった。計測結果を図 3-(4)-A-②-8 に例示する。当該評価機においては 1.5m 前方を測定エリアとして光学系を設計しており、測定エリアからの反射光（ターゲット反射光）を受光することによりドップラシフトを検出する。本岸壁試験は東京湾沿岸海域にて実施したため、水槽水や深海域の海水と比較して海水の濁度が大幅に高く、測定不能であった可能性が高い。ドップラ実証機では測定精度の高いバイスタティック方式が採用され、かつ当該評価機の約 100 倍の送信レベル（レーザー出力）仕様となるため、濁度に起因するドップラシフト検出性能の劣化は、大幅に改善されると予想する。

(d) ドップラ評価機｜改善検討（性能向上検討）

前記の気中試験、水槽試験、岸壁試験の各結果を踏まえ、送受光系の SNR 向上を目的として集光距離を約 0.5m 先に短縮し、ドップラシフトを検出できるよう光学系の再調整（測定エリアの再設定）を実施する。具体的には受信系レンズ（集光レンズ）を新規追加することを検討する。そこで当該評価機への追加実装が可能なレンズについて選定し、入手性を考慮しての表 3-(4)-A-②-1 に示すレンズ仕様を決定した。

[(4)-A｜実施内容③｜ドップラ実証機の試作と性能評価試験]

＜概要＞

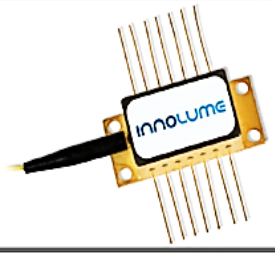
モノスタティック方式によるドップラ評価機の性能向上策として、受信感度向上のため集光距離を 3m から 1.5m に設定することで約 5dB の信号レベル向上を実現し、感度向上には観測距離の短縮が有効であることを確認した。また、バイスタティック方式によるドップラ実証機を製作し、水槽試験および浅海試験にて性能評価を行った。浅海試験では、海底面を計測対象とした航走試験において、プラットホーム（小型船舶）と海底面との相対速度が検出できることを確認した。併せて、ドップラ実証機を海中探査機に搭載した場合の近傍流体場の挙動に関してシミュレーションを実施し、ドップラ実証機の前方 3m～5m の距離における流体場の影響を調べた。

(a) ドップラ評価機の性能向上（レーザー光源）

ドップラ評価機ではシステム/機構が単純なモノスタティック方式を採用し、気中で約 1.5m 先のハードターゲット、水中で約 3m 先のハードターゲットによるドップラ計測を目的に光学調整を実施した。この結果、5dB の感度向上を確認した。ドップラ評価機の光源は 1064nm 換算で線幅 3MHz であり（表 3-(4)-A-③-1）、これを逓倍して使用するため、ドップラ評価機の線幅は 6MHz となる。ドップラ実証機で使用する光源は、1064nm 換算で線幅±10kHz を予定しており、これを逓倍して使用するため、実際の線幅は±20kHz となる（表 3-(4)-A-③-2）。ドップラ評価機で採用した光源の線幅 6MHz を速度換算すると±1 ノット以

表 3-(4)-A-③-1　レーザー光源仕様｜ドップラ評価機

LD-1064-DBR-150
Fiber Coupled Distributed Feedback Laser



Features:
- 150mW output power ex-single mode fiber
- Highly reliable Au/Sn-technology
- Polarization maintaining PM980 fiber
- Optional: external fiber isolator upon request
- Optional: monitor photodiode for power control

Application:
- Seeding
- Gas sensing
- Instrumentation/measurement equipment

Specification　DATE: 27th January 2015

SPECIFICATIONS
Test conditions: CW operation, chip temperature 25°C, the module is mounted on a room temperature heatsink.

Parameters	Symb.	Min.	Typ.	Max.	Unit
Output power	P_{out}		150		mW
Central Wavelength	λ_P	1062	1064	1066	nm
*Spectral Width at P_{out}	$\Delta\lambda$		3		MHz

表 3-(4)-A-③-2　レーザー光源仕様｜ドップラ実証機

Parameter	Unit	Specification		
		Min	Typ.	Max
Part no.		CoSF-D-YB-B-LP		
Center wavelength	nm	1010-1120nm fixed, other specify		
Output power	mW	20	-	100
Laser output		CW, Single frequency & Single longitudinal mode		
Beam quality	M^2	-	1.05	1.1
Linewidth	kHz	-	10	20

上となり、1 ノット以下の速度検出が困難になるのに対し、ドップラ実証機で採用を予定する光源の線幅±20kHz を速度換算すると±0.008 ノット（≒4mm/s）となり、ごく低速状態の速度検出も可能となる。一方、線幅が短くなったことから、他の誤差要因が支配的になる可能性もあり、ドップラ実証機を製作し、基本性能を評価していく。

(b) ドップラ実証機の製作

ドップラ実証機では送受信が分離しているバイスタティック方式を採用するが、計測対象から反射した受信光を光ファイバー伝送系（受信系）に入力するための光軸調整の難易度が非常に高いことがある。そこで、受信系にウエッジプリズムペアを組込むことで、精密な受信光の光軸調整を可能とする構成とした。

バイスタティック方式は、送受信光を光軸調整する難易度が高く、実環境下における実用性および将来の拡張性を考慮し、ドップラ実証機ではバイスタティック方式を適用しつつ、モノスタティック方式への変更が可能となるハイブリット型構成について検討を行った。前

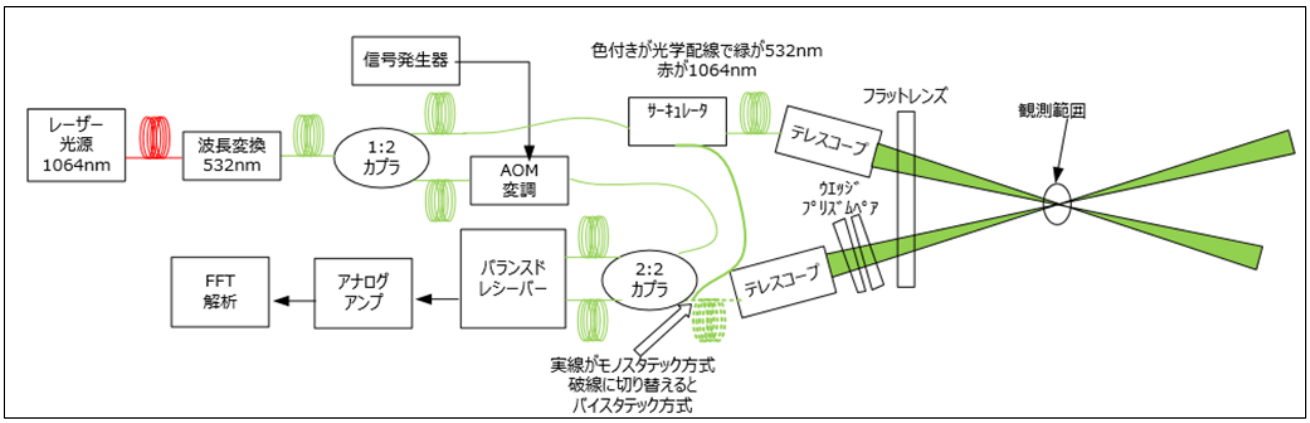


図 3-(4)-A-③-1　システムブロック図｜ﾄﾞｯﾌﾟﾗ実証機｜ハイブリット型

図 3-(4)-A-③-2
内部構造｜ﾄﾞｯﾌﾟﾗ実証機｜ハイブリット型

表 3-(1)-A-①-4　主仕様（ドップラ実証機）

LN	項目	諸元
1	レーザー波長	532nm（Green 帯）
2	レーザー出力	100mW（CW）
3	視野	前方ライン(焦点距離：1.5m-5.0m)
4	速度計測分解能	0.005m/s(理論値)
5	速度計測精度	0.04m/s(理論値)
6	計測周期	50ms～100ms
10	耐圧	1000m
11	寸法	φ267×978mm
12	質量	約 60kg

述の光源として、帯域幅が±20KHz（±10ｋ：1064nm を 2 逓倍して 532nm としており、カタログ値を 2 倍換算）の光源を選定した。±20KHz を速度換算すると、±0.008 ノットに相当するが、これは約±4mm/sec に対応する速度分解能である。モノスタティック方式に変更した場合でも、同様に±0.008 ノット（約±4mm/sec）の速度以上が検出できる。ドップラ実証機のハイブリット型構成のシステムブロック図を図 3-(4)-A-③-1 に、内部構造の外観を図 3-(4)-A-③-2 に示す。併せて、ドップラ実証機の仕様諸元を表 3-(4)-A-③-2 に示す。

(c) ドップラ実証機の性能評価（水槽試験）

陸上において焦点距離を 3m に調整していたが、水中では 5m を若干超える観測範囲になった。水の誘電率は 1.33（気中 1.0）なので 1.33 倍となると推測していたが、光軸がガラス製ビューポートを経由したことにより、倍率が 1.7 倍程度になるとの知見を得た。バイスタティック方式のため、気中で送受信光の光軸を±10μrad 単位で調整した後、水中で観測したが、光軸ズレが発生し計測不能となった。このため、実海域にて計測するための手段として、送受信系の光軸が数 deg 程度ずれていても観測可能な手段に関して検討した。水槽試験時の計測範囲は、調整前におい

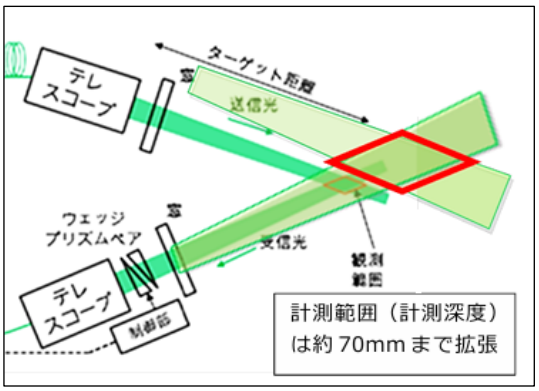


図 3-(4)-A-③-3　水槽試験｜ﾄﾞｯﾌﾟﾗ実証機｜テレスコープ調整｜計測範囲拡張

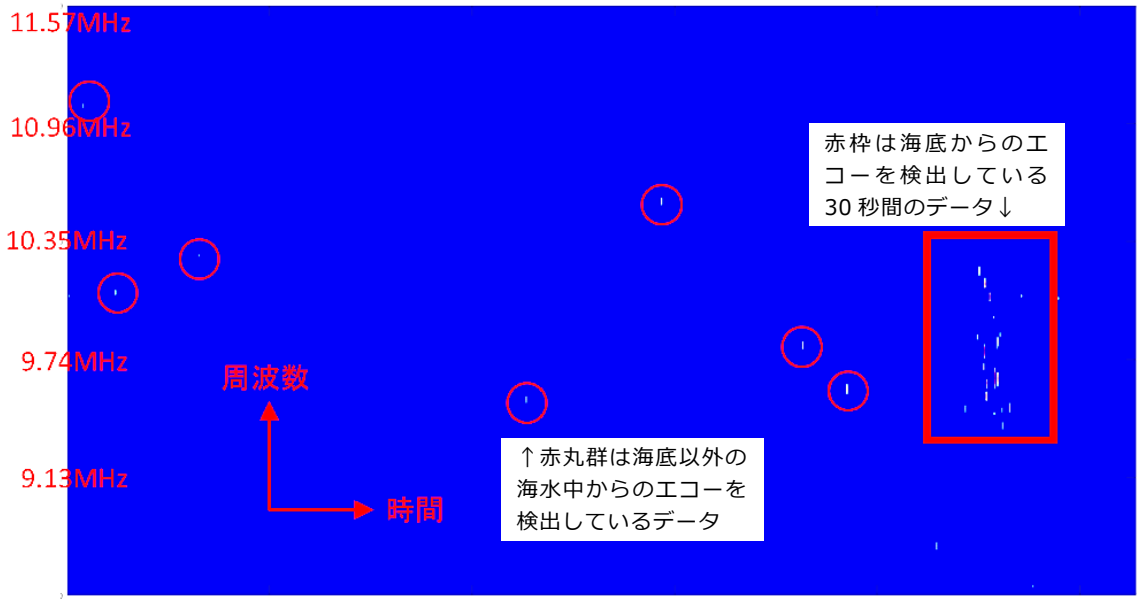


図 3-(4)-A-③-4　浅海試験｜ドップラ実証機｜計測結果（約 3 分間航走時）

て 5m 先で約 13mm に対し、テレスコープを再調整し視野角を約 5 倍とすることで 70mm 程度まで計測範囲を広げる調整を行い（図 3-(4)-A-③-3）、陸上試験において受信できることを確認した。

(d) ドップラ実証機の性能評価（浅海試験）

浅海試験における観測位置を約 5m 先とした。小型船舶の舷側に水平から 45 度海底側に傾けてドップラ実証機を海水中に展開し、小型船舶を航走させ海域を変更しながら海中および海底からの反射光（ドップラシフト）を計測した。約 3 分の計測時間において、IF｜15MHz に対し約 5MHz（約 1m/s の速度に相当）のドップラシフトが得られており、小型船舶の速度（約 3 ノット）とほぼ一致した海水（海中懸濁物）からのエコーが数点確認され、併せて海底面からのエコーと思われる計測値も確認された（図 3-(4)-A-③-4）。

(e) 近傍流体場の挙動シミュレーション

ドップラシフト検出機能は、海中探査機前方にレーザー光を照射し、海中懸濁物などの微小粒子からの反射光に対するドップラシフト量を計測することで、当該粒子に対する海中探査機の移動速度（相対速度）を検出する（図 3-(4)-A-③-5）。観測範囲は送受レーザー光の光軸調整により 1.5m～5m 程度の距離の調整幅を想定している。海中探査機が活動する深海環境下の流速は低速かつ安定していることを仮定し、検出された相対速度を海中探査機の移動速度と想定する。しかしながら、海中探査機自体の移動により生じる海水の圧力変化の影響で、レーザー計測地点（観測範囲）の流体場に乱れが生じることが考えられる。これにより懸濁物が速度を持つと、ドップラシフト量はこの速度との相対速度となるため、海中探査機の移動速度としての検出結果にも誤差が生じる。このため、海中探査機の近傍流体場の挙動をシミュレーションにより明らかにし、当該流体場の乱れの影響範囲と程度を確認する必要がある。

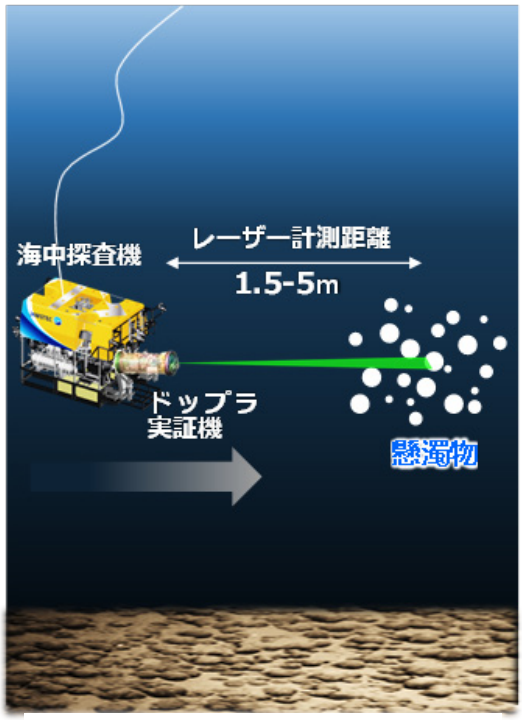


図 3-(4)-A-③-5
海中懸濁物に対するドップラシフト計測

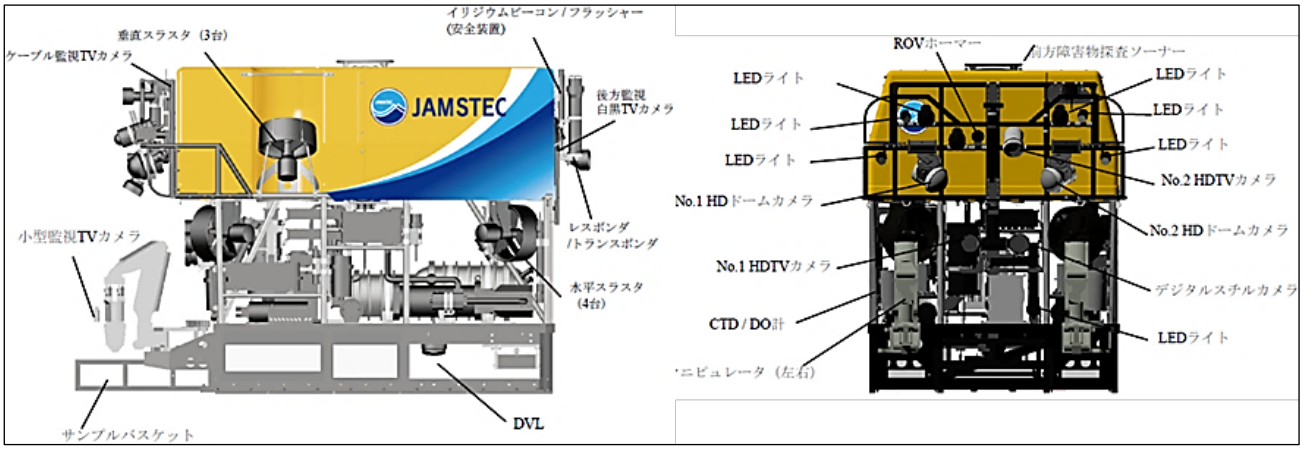


図 3-(4)-A-③-6　海中探査機「かいこう Mk-IV」｜外観図

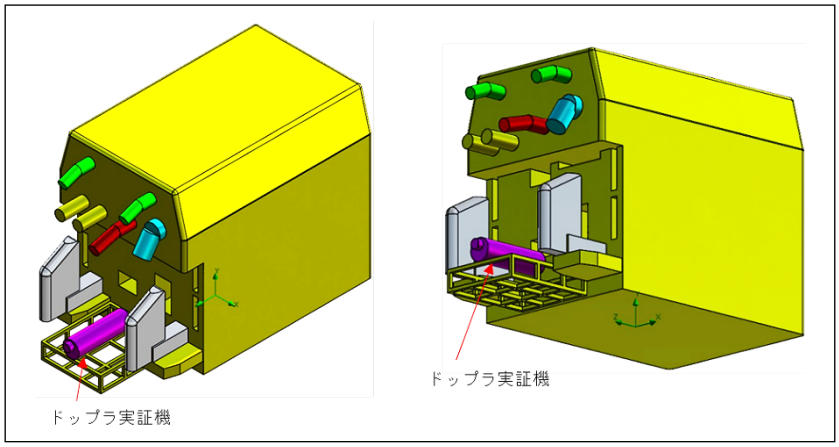


図 3-(4)-A-③-7
海中探査機｜三次元モデル（モデルＡ）

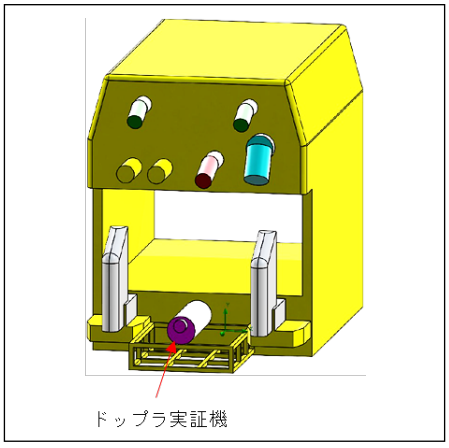


図 3-(4)-A-③-8
海中探査機｜三次元モデル（モデルＢ）

ドップラ実証機は、JAMSTEC が所有する海中探査機「かいこう」に搭載させ、深海試験を行う予定である。「かいこう」の外観図を図 3-(4)-A-③-6 に示す。海中探査機は上部の箱型構造と下部のフレーム構造を基本として、フレームの内と外に動力機器、マニピュレータ、照明機器、映像撮影機器、各種センサ等が露出した非常に複雑な構造をしており、これを忠実にモデリングすることは容易ではなく、またシミュレーション上の費用対効果の面でも得策ではない。このため、海中探査機の構造を簡略化した 2 つのタイプのモデルを作成し、各タイプの三次元モデルを用いてそれぞれシミュレーションすることにより近傍流体場への影響を考察する。モデルの１つは、問題となる海中探査機前方の海水速度に与える影響が実際の海中探査機より大きくなることを想定して構成した「モデルＡ」であり、もう１つは同影響が実際の海中探査機より小さくなることを想定して構成した「モデルＢ」である。「モデルＡ」及び「モデルＢ」の外観を、それぞれ図 3-(4)-A-③-7 および図 3-(4)-A-③-8 に示す。

実際の海中探査機の機体上部（図 3-(4)-A-③-6｜黄色部分）は箱型の浮力

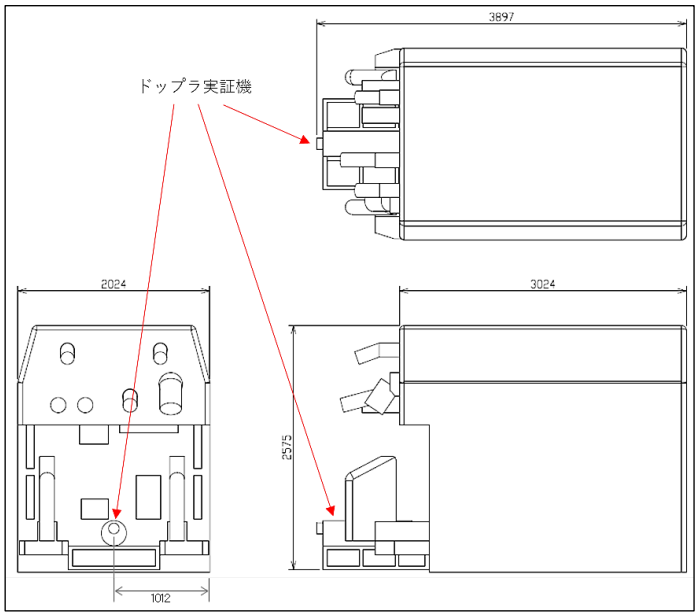


図 3-(4)-A-③-9　ドップラ実証機搭載位置｜シミュレーション

構造物で、海水が背後に抜ける部位はなく海中探査機の前進に対し海水から大きな抵抗を受ける。そのため、海中探査機前方の海水に与える影響も大きいと考えられ、両モデルの共通要素として忠実に形状を模擬した。また、この部位の前方に取り付けられているカメラやライト並びに下部に設置されているマニピュレータ及びサンプルバスケットは前方に突出しており、前方の海水に影響を与える可能性があるため、これらも両モデルの共通要素として模擬した。箱型構造より下の部分はフレーム構造となっており、各種機器類がフレーム内部に設置されているが、海水が背後に抜ける経路があり、機体前方の海水への影響（圧力の大きさ）はこの抜け具合による影響が支配的と考えられる。「モデルＡ」では、この抜けを模擬するため箱構造にスリットを設けているが、スリットを軽微にして海中探査機前方の海水に与える影響が実際より大きくなるように構成した。対して「モデルＢ」は、下部ボディを大きく開放することで抜け具合を実際より大きくし、海中探査機前方の海水に与える影響が実際の海中探査機より小さくなるように構成した。ドップラ実証機における深海用耐圧容器の外形寸法は、現状設計値に合わせ直径 267mm、長さ 978mm の円筒形状として海中探査機の前面下部のサンプルバスケットの中央に搭載した（図 3-(4)-A-③-9）。

表 3-(4)-A-③-1　シミュレーション条件（近傍流体場の挙動）

L/N	項目	内容
1	水深	100m, 400m
2	水温	10°C, 18°C
3	移動速度	0.25 m/s, 0.5 m/s
4	流速計測点	ドップラ実証機からの距離 3m, 4m, 5m（図(4)-A-9 参照）

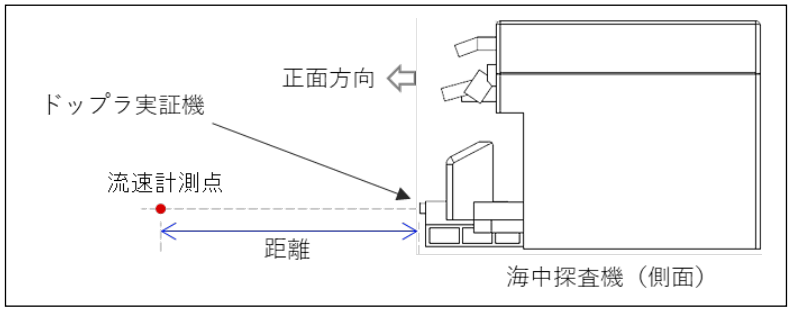


図 3-(4)-A-③-10　流速計測点｜シミュレーション定義

表 3-(4)-A-③-2　ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ結果｜まとめ（近傍流体場の挙動）

LN	移動速度	距離[m]	差異割合[%]（最悪値）	
			モデルＡ	モデルＢ
1	0.5m/s	3m	-4.4	-2.8
2		4m	-2.8	-1.6
3		5m	-2.0	-1.2
4	0.25m/s	3m	-4.4	-2.6
5		4m	-2.8	-1.6
6		5m	-1.8	-1.2

近傍流体場の挙動シミュレーションは、有限体積法に基づき実施した。有限体積法は、微分方程式を代数方程式で近似する数値解析手法の１つで、流体解析分野で幅広く使用されている標準的な離散化解析手法である。発散項を含む偏微分方程式の体積積分をガウスの発散定理を用いて表面積分に変換し、それらの項を有限体積の表面の流束として評価する。実施した流体場挙動シミュレーションの条件を表 3-(4)-A-③-1 に示す。流速は海中探査機が最大速力の 0.5m/s（1knot）で前進している場合、とその半分の 0.25m/s（0.5knot）で前進している場合の 2 ケースを想定した。流速計測点（図 3-(4)-A-③-10）は、ドップラ実証機がレーザーを出力して海中に浮遊する懸濁物等の粒子からの反射光を計測する際の反射点を想定し、レーザー発光面から前方の距離が 3m，4m，5m の 3 ケースとした。

シミュレーション結果および流速計測点において速度差異が発生した割合（速度差/移動速度）をまとめたものを表 3-(4)-A-③-2 に示す。併せて、実際の海中探査機に対する速度差異は、モデルＡの結果とモデルＢの結果の間の値になると考えられる。この際、水深及び水温の影響は殆ど無かったため、これらの条件は最悪値でまとめている。以上の結果から、流速点の距離は遠い方が、差異割合が小さいため、レーザー計測ポイントは約 5m を検討す

る。また、差異割合は移動速度の相違に対し概ね一定のため、ドップラ実証機の評価試験では、計測された速度に対し、-1.2%～-2.0%程度の係数補正について検討する。

[(4)-A｜実施内容④｜ドップラ実証機の深海仕様構築および実環境試験]

＜概要＞

ドップラ実証機の深海試験用耐圧容器および光学系調整治具を設計・製作し、ドップラ実証機に組み込んだ。光学系調整治具は、ウェッジプリズムレンズ回転制御システムを構成し、バイスタティック方式における送受光の光軸を簡便に調整できるようにした。水槽試験において、水中でのドップラ検出に要する基本機能・性能について評価した。併せて、気中試験、実海域試験を実施し、現況におけるドップラ実証機の課題を抽出した。近傍流体場の挙動シミュレーションモデルについては、要件満足のため現状維持とした。

(a)ドップラ実証機の現況整理と方針

本実施項目における初期の技術検証を目的として、ドップラ評価機ではモノスタティック方式を採用した。ドップラ評価機に内蔵するレーザー光源の帯域幅（線幅）は 6MHz であり速度換算にて約 1.2 ノット相当である。モノスタティック方式は送受軸調整が不要という大きな利点があるが、1.2 ノット以下の速度は検出できない決定的な欠点がある。ドップラ実証機では、1064nm 換算で線幅 20kHz の光源を使用しており、これを逓倍して使用することで、532nm レーザーを送信光とするドップラ実証機の線幅は 40kHz である。当該レーザー光源は、これまでに使用実績のない海外製品であり、入手性、仕様性能の面での信頼性が担保されていない。そのためドップラ実証機では、送受信系を分離することにより送信光が受信光に漏れ込まないバイスタティック方式を採用し製作した。バイスタティック方式は受信系に送信光が漏れ込まないため、送信周波数近傍の低速域の速度を検出できる利点があるが、送受光軸の調整が難しい。そこでドップラ実証機では、ウェッジプリズムペアレンズを内蔵することで、計測現場（水中・海中）にて光軸調整を行う計画であった。

「(4)-A｜実施内容③」までの成果では、モノスタティック方式、バイスタティック方式共に、強反射ターゲット（ハードターゲット）からのドップラ速度は検出できたが、水中懸濁物（極微小物標）に対するドップラ速度の検出性能について確定されなかった。このため、最適な検出方式について検討が進捗せずにいた。そこで、モノスタティック方式とバイスタティック方式の両方式を実装するハイブリット型にてドップラ実証機を構築し、水槽試験および深海試験において、両方式の基本性能と運用性（現場における実用性）を検証する。

(b) 深海試験用耐圧容器の設計・製作

深海試験で使用するドップラ実証機用の耐圧容器（耐圧性能：10MPa ≒1,000m 水深相当圧｜安全率 1.5 以上）を製作した。製作したドップラ実証機用耐圧容器の外観・仕様を図 3-(4)-A-④-1 に示す。全長 1038mm（ビューポート含む）、胴部径 φ224mm であり、Green・UV レーザー実証機と比較して若干細径ではあるが最も長尺となる。ドップラ実証機は、光軸合わせを含む受光精度の厳密性を要するため、ウェッジレンズを含む光学系と電子系（電源・信号処理）のフレームを分離構造とすることで、耐圧容器内部に機構ズレが生じることを極力回避している（光学分離機構）。併せて、内部シャーシ（フレームワーク）を前後部のフランジとそれぞれ外部からボルトアップさせることで、耐圧容器と内部シャーシとを一体型させている。これにより、内外部の機構的に不整合を抑制している。

(c)学系調整治具（ウェッジプリズムレンズ回転制御）

バイスタティック方式を実施する際、送信観測範囲と受信観測範囲とを厳密に一致させることが、要求する計測性能が担保される必要条件となる。送信光の集光位置（送信観測範囲）と受信光の集光位置（受信観測範囲）は事前に気中において粗調整されており、実環境下において精密な調整（微調整）を実施する。当該微調整を担う光学系調整治具として、ウェッジプリズムレンズによる光軸調整機構を設計・制作し、ドップラ実証機に実装した。図

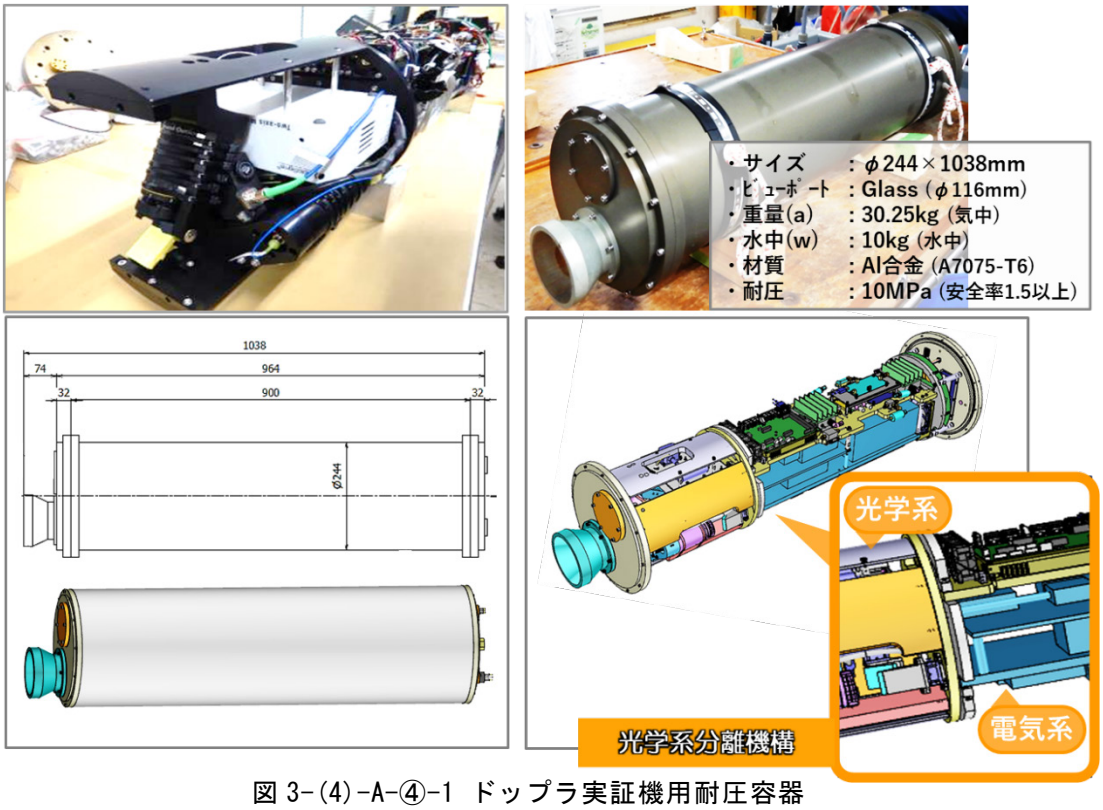


図 3-(4)-A-④-1　ドップラ実証機用耐圧容器

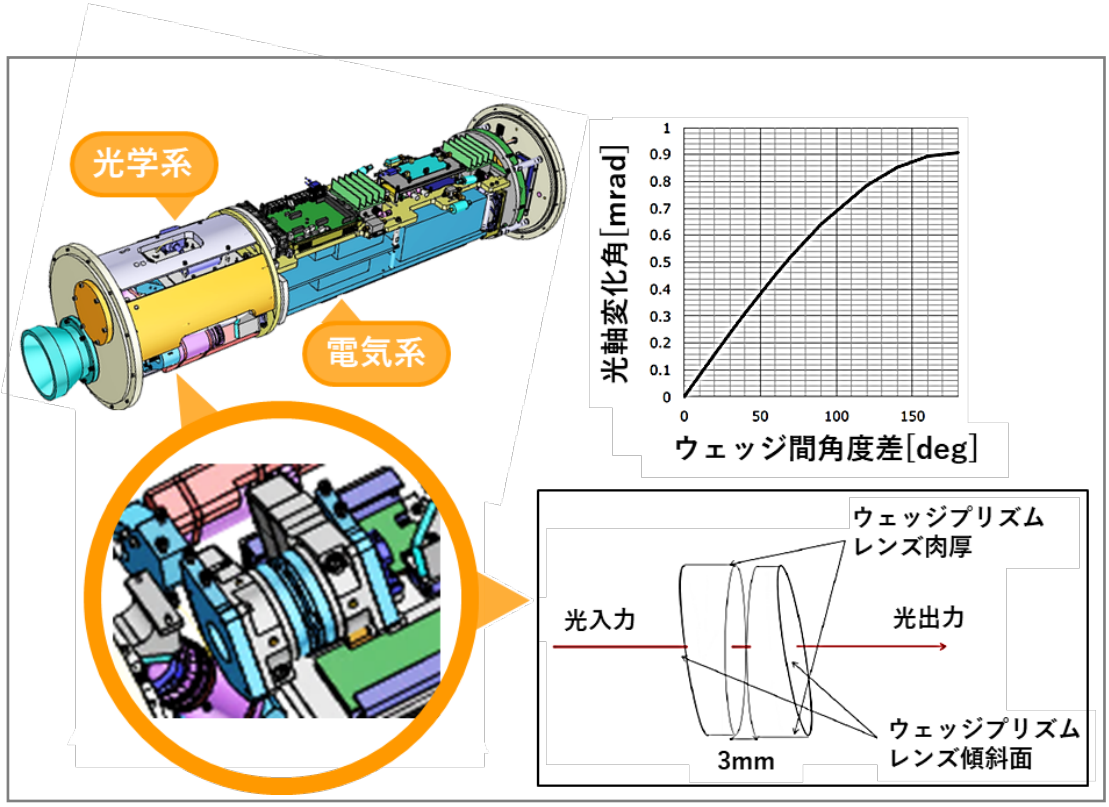


図 3-(4)-A-④-2　ウェッジプリズムレンジによる光軸調整機構

3-(4)-A-④-2 に光軸調整機構を示す。ウェッジプリズムレンズはモータ駆動で回転制御され、独立したウェッジプリズムレンズ×2 式が個別に回転動作することで光軸を全方向に傾けることができる。この機構を実環境下において制御することにより、精密な光軸調整（微調整）を簡便に行うことができる。

(d) 方式別性能比較試験（モノスタティック方式｜バイスタティック方式）

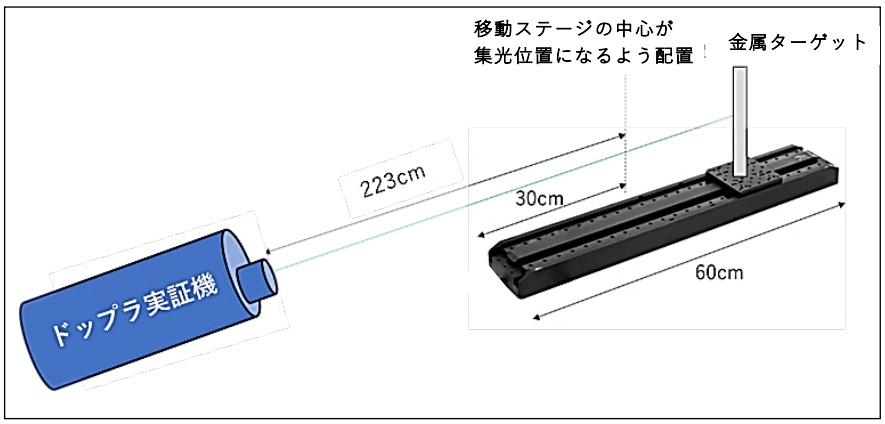


図 3-(4)-A-④-2　計測系｜気中試験方式別性能比較試験｜ドップラ実証機

モノスタティック方式とバイスタティック方式の基本性能を比較するため、気中において金属ターゲットを移動ステージに固定し、当該ターゲットを等速移動させながらレーザー光を照射することでドップラシフトを計測した。同試験の計測系を図 3-(4)-A-④-3 に示す。この移動ステージは 60cm 間を設定した速度で動かすことができるが、台形制御で移動するためステージの全長の半分である 30cm の位置を集光位置に合わせることで等速移動時の速度を測定するようにした。観測範囲は、ドップラ実証機レーザー照射面（ビューポート）から約 223cm 先で集光する状態に設定した。当該ターゲットの移動速度は、±2.5mm/s，±5mm/s，±10mm/s，±20mm/s，±30mm/s，±40mm/s の 6 ケースとした。モノスタティック方式における気中試験の結果を図 3-(4)-A-④-4 に、バイスタティック方式における気中試験の結果を図 3-(4)-A-④-5 にそれぞれ示す。気中試験における速度換算値（理論値）は「±100KHz＝±26.6mm/s」「＝±75KHz＝±20mm/s」であり、両試験結果とは理論値と若干異なっている。ドップラ実証機の測定精度（設計性能）を鑑みると、当該差異は移動ステージの速度誤差と考えられる。本試験では、距離 223cm の地点を通過する金属ターゲットからの強い反射光に対してドップラシフトを計測している。本試験結果より、バイスタティック方式では中心周波数 200MHz（送信光）からのダウンコンバータによるローカル漏れ（送信光が受信系に漏れ込むレベル）より、金属ターゲットからの反射光のレベルが比較的に大きく、ゼロドップラまでも検出することが確認された。一方、モノスタティック方式では±10mm/s 以下が検出できなかった。本試験結果より、気中試験ではバイスタティック方式がより高精度にドップラシフトを検出することが確認できた。

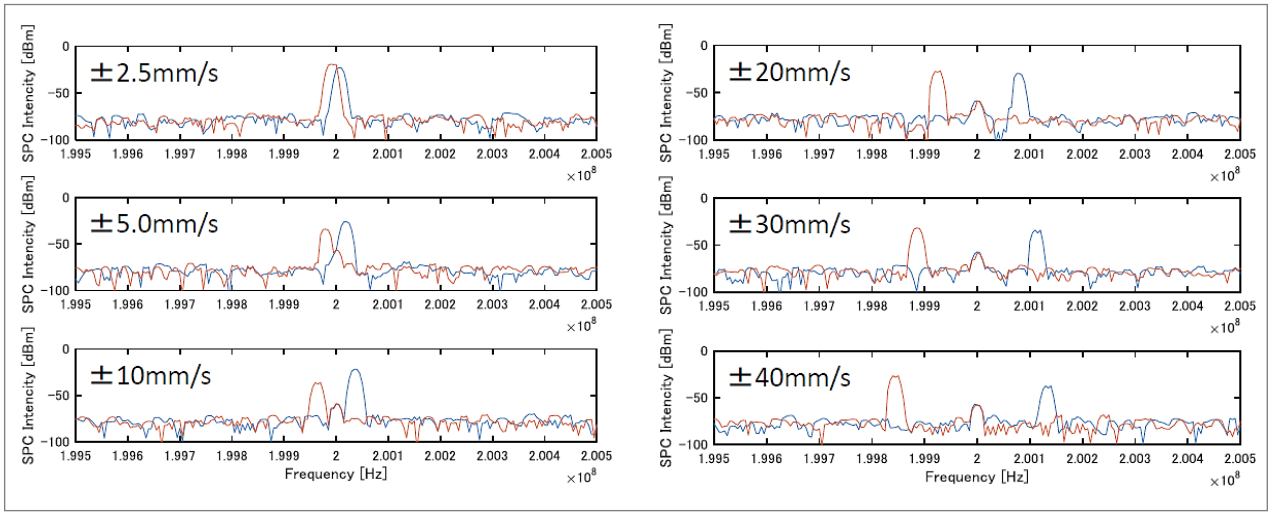


図 3-(4)-A-④-4　計測結果｜気中試験｜バイスタティック方式
（中心 2＝200MHz　1.999＝200MHz-100KHｚ　2.001＝200MHz+100KH）

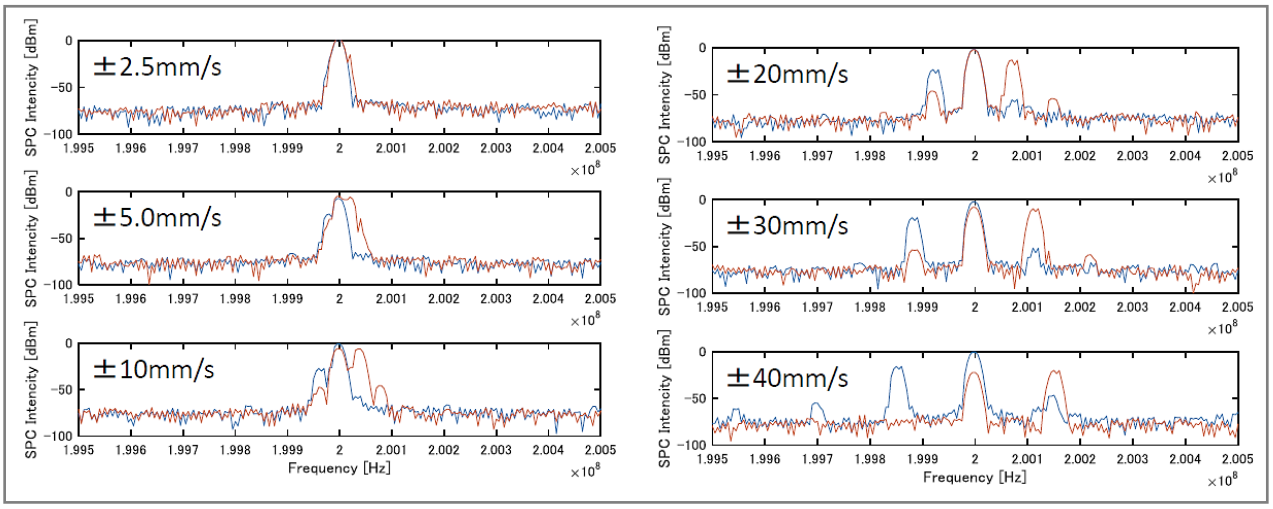


図 3-(4)-A-④-5　計測結果｜気中試験｜モノスタティック方式

（中心 2＝200MHz　1.999＝200MHz-100KHｚ　2.001＝200MHz+100KH）

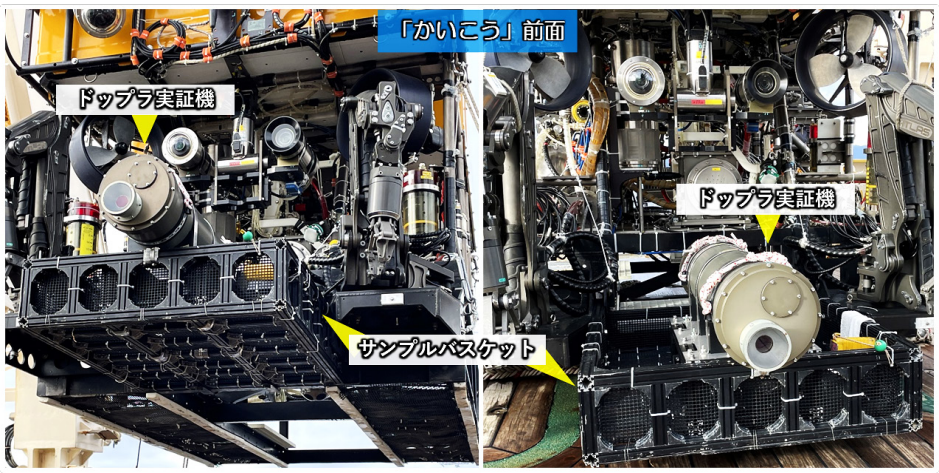


図 3-(4)-A-④-6　深海試験セットアップ｜ドップラ実証機｜「かいこう」搭載

(e)深海試験〔R5年度〕｜ドップラ実証機｜性能比較評価｜相模湾・初島東方海域

実環境下（深海域）におけるドップラ実証機の基本性能を評価するとともに、バイスタティック方式、モノスタティック方式の両方式による各計測性能を比較評価することを目的として、深海試験を実施した。試験海域は相模湾・初島東方海域（水深 800m 以深）である。本試験は、ドップラ実証機を深海域で使用する初試験となる。「かいこう」が装備するサンプルバスケット内部にドップラ実証機を設置し、「かいこう」が航行する方向（「かいこう」に正対する方向）の海中懸濁物に対する相対速度（対懸濁物速度）の計測を目的とする。図 3-(4)-A-④-6 にドップラ実証機を搭載した「かいこう」外観を、図 3-(4)-A-④-7 に本深海試験における計測系のコンフィギュレーションを示す。

深海試験の結果、モノスタティック方式、バイスタティック方式の両方式において、海中懸濁物からのレーザー反射（ドップラシフト）を検出することが出来なかった。深海試験時における「かいこう」が装備する前方カメラ映像とドップラ実証機の計測データを監視するモニタ画面を図 3-(4)-A-④-8 に示す。気中試験の結果から、海中懸濁物からのレーザー反射を全く計測できないことは考えにくく、何かしらシステムに不備・不具合等が生じている可能性が想定された。深海試験後にドップラ実証機の総点検を実施した結果、レーザー送信系の光源設定パラメータが気中計測値（1/10 出力）に設定されていたことが確認され、これによりレーザー出力が設計仕様を満足していないことが判明した。当該出力不足により、ドップラ実証機が受信したレーザー反射光が、ドップラシフトを検出することが可能なレベルを下回っていたと推定される。

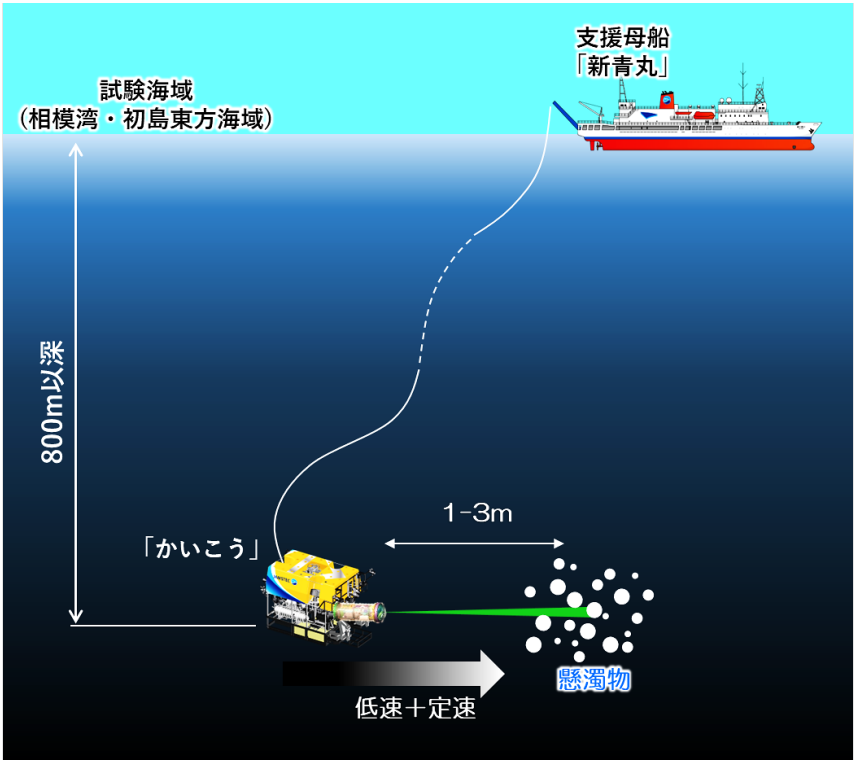


図 3-(4)-A-④-7
深海試験｜ドップラ実証機｜
計測系・コンフィギュレーション

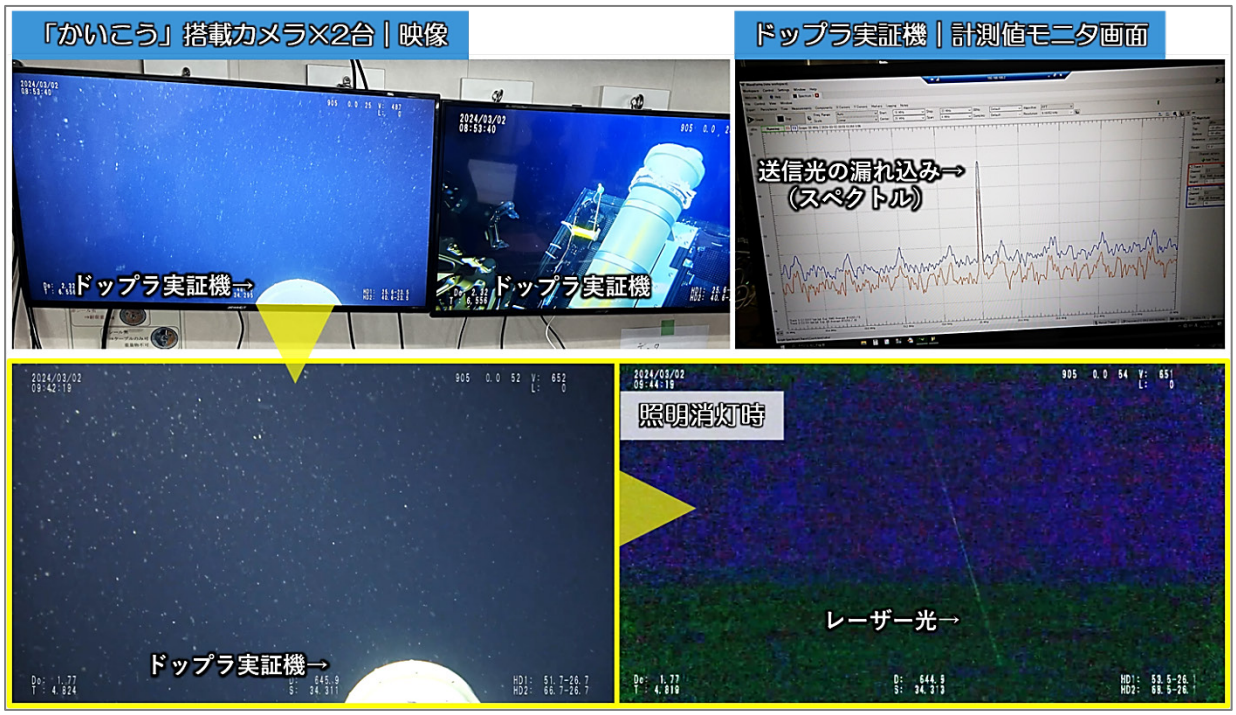


図 3-(4)-A-④-8　深海試験｜ドップラ実証機｜計測シーン＋計測結果
カメラ映像（左上）｜計測値モニタ・スペクトルパワー密度（右上）｜カメラ映像｜（右下・左下（消灯時））

(f)水槽試験｜ドップラ実証機｜基本性能評価（不具合改善後）

深海試験の結果、レーザー出力不足が原因となりモノスタティック方式、バイスタティック方式ともに海中懸濁物からのドップラシフトを検出することができなかったため、深海試験後に当該レーザー送信系の整備（不具合改善）および感度調整を実施し、水槽試験にて基本性能を評価した。本試験では比較的小型な直方形水槽（1.8m×0.5m）を使用し、水槽には水道水のみを注水して一般的な水道水に含まれる基本成分および水道水に通常含有するごく

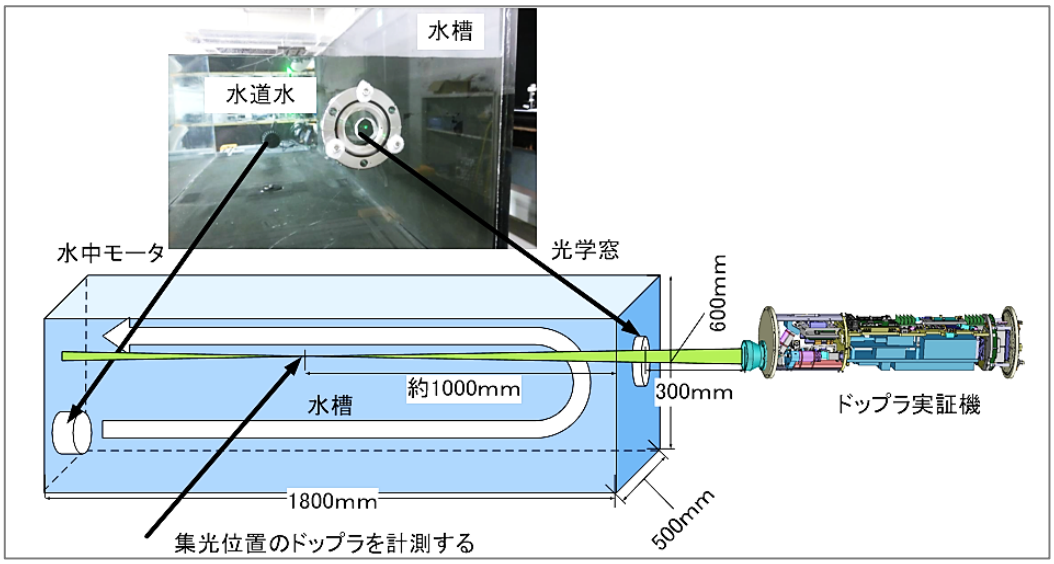
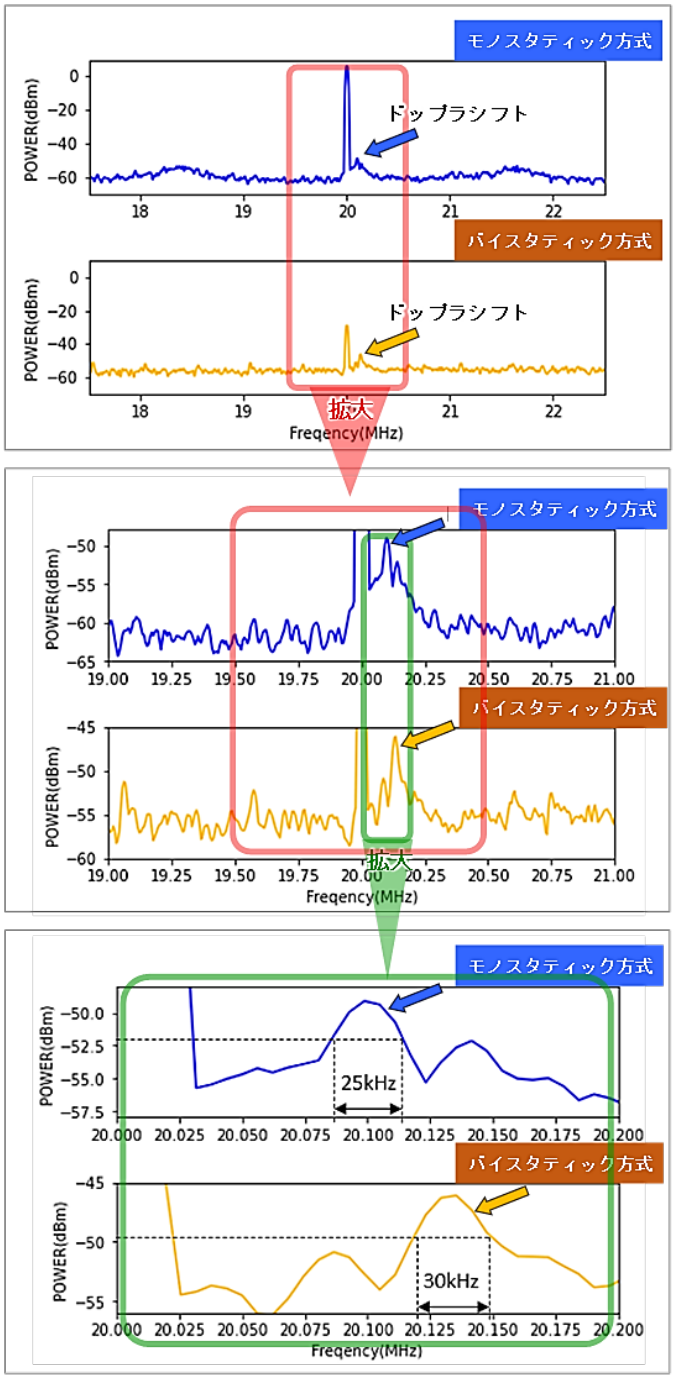


図 3-(4)-A-④-9
計測系 ・ｺﾝﾌｨｷﾞｭﾚｰｼｮﾝ｜水槽試験｜ドップラ実証機｜小型水槽
（水道水懸濁物の計測）



微小な懸濁物環境とした。水槽内には水中モーターを設置して水流を発生させ、水流と一緒に動く微小な懸濁物からのドップラシフトを検出する試験を実施した（水流の速度は未測定）。本試験環境（水道水）を実環境（海水）と比較すると、本試験環境では光伝搬路に存在する懸濁物は極端に少なく、またサイズも視認することが困難な微小な懸濁物しか存在していない。そのため、ドップラシフトを検出する条件としては非常に厳しい環境と考えられる。本試験の計測系を図 3-(4)-A-④-9 に、試験結果を図 3-(4)-A-④-10 に示す。本水槽試験の結果、当該条件において水中約 1m の集光点を通過する微小懸濁物からのレーザー反射が計測された。モノスタティック方式、バイスタティック方式ともに、ノイズレベルに対し 3dB～6dB 程度の向上が示された。送信光の中心周波数 200MHz に対し、送信光の受信系へ漏れ込みは、モノスタティック方式と比較してバイスタティック方式が約 30dB 低いことが確認された。一方、微小懸濁物からの反射光はノイズレベルから若干増えた程度の信号であり、バイスタティック方式の優位性は確認されなかった。光軸調整の難易度等を鑑み、探査機実装および海中適用の実用性を勘案すると、モノスタティック方式の方が有利と考える。また本結果より、光源の線幅（実測された反射光の線幅｜検出限界）が±25～30kHz であることが確認される。これを速度換算すると±5～6mm/sec

図 3-(4)-A-④-10
計測結果｜水槽試験｜ドップラ実証機｜小型水槽｜
（水道水懸濁物の計測）

（±0.0972～0.117knot）となり、この速度が最低計測速度であることを意味する。これは特にモノスタティック方式の検討当初の期待値（設計値）と比較すると、低速域の計測性能（実測値）が想定よりも向上したことを意味しており、バイスタティック方式と同等の検出性能（最低計測速度）を有していることが示された。

[(4)-A｜実施内容⑤｜ドップラ実証機の最終評価]

＜概要＞

「(4)-A｜実施内容④」に実施したドップラ実証機の水槽試験において、バイスタティック方式とモノスタティック方式の何れの方式でも、水道水に含まれる微小懸濁物からのドップラシフトの検出が可能であることを確認した。また、バイスタティック方式はモノスタティック方式と比較して、SNR で若干優位であるものの、光軸調整の難易度、ならびに探査機実装を含む海中適用の実用性を勘案すると、総合的にモノスタティック方式の方が有利と判断した。そこで、ドップラ実証機の深海利用において最適となる方式を最終判断するため、大型水槽において移動台車を利用したドップラシフト検出試験を実施した。当該試験の結果、バイスタティック方式は、事前確認（試験室レベル）では問題なくドップラシフトを検出できたが、試験室から輸送し水槽に設置するためのクレーン作業（吊上げ・吊下げ）後は、送受光系の光軸が僅かにズレることにより、ドップラシフトの検出が出来なくなっていた。このため、深海利用においてはモノスタティック方式を採用することに最終決定し、深海試験を実施した。2 度の深海試験において計測されたレーザードップラ速度は、音響対水速度とほぼ一致しており、ドップラ実証機により品質の高い耐懸濁物速度が検出されていることが示された。

(a) 水槽試験（移動台車の移動速度計測）

バイスタティック方式とモノスタティック方式のいずれを採用するかの最終判断のため、水槽試験を実施した。JAMSTEC 保有の多目的水槽にて、図 3-(4)-A-⑤-1 に示されるようにドップラ実証機を移動台車に固定設置し、移動台車を可動させさせることにより、水槽内の静水（水槽水に含まれるチリ・ホコリ等の微小粒子）に対する相対速度（≒移動速度）を確認した。水槽試験の結果、図 3-(4)-A-⑤-2 に示されるように、モノスタティック方式は安定してドップラシフトが検出できたが、バイスタティック方式ではドップラシフトを検出す

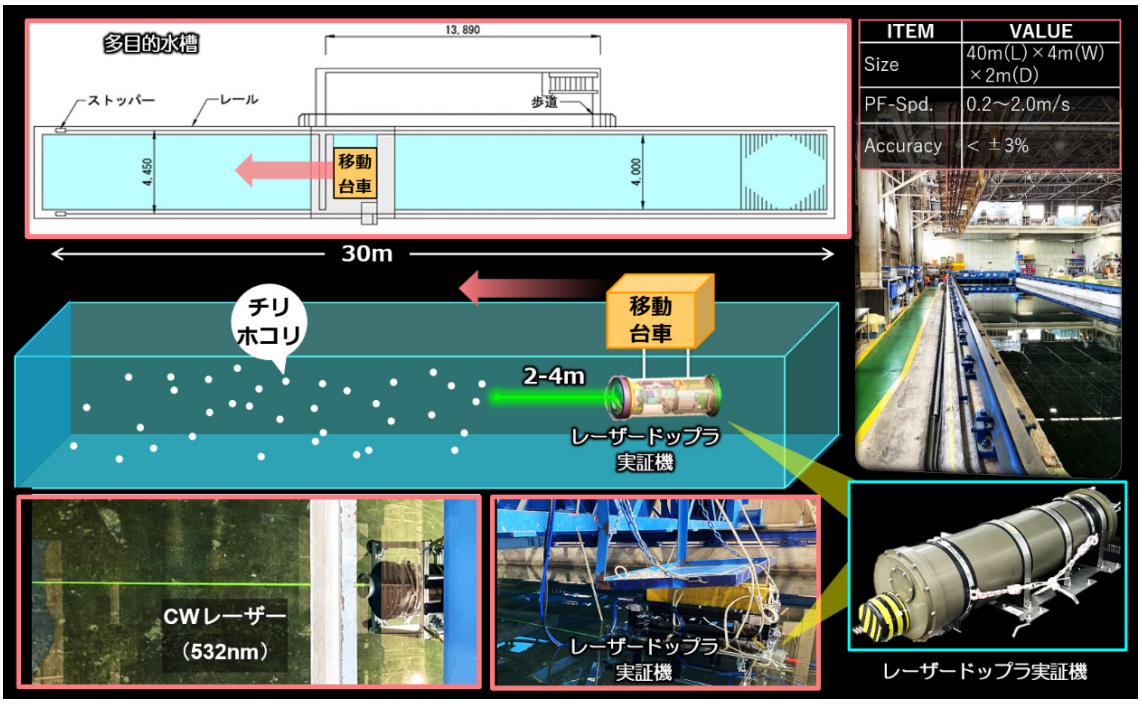


図 3-(4)-A-⑤-1　水槽試験｜ドップラ実証機｜移動速度計測｜多目的水槽＋移動台車

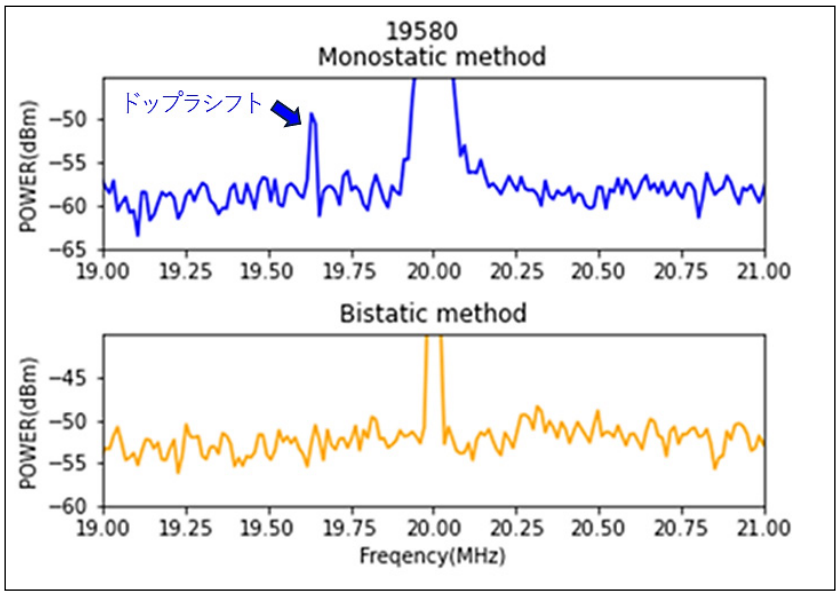


図 3-(4)-A-⑤-2
計測結果｜水槽試験｜ドップラ実証機｜
多目的水槽＋移動台車
（水道水懸濁物の計測）

ることが出来なかった。安定して計測データが取得されたモノスタティック方式に対し、台車に備え付けられた速度計の表示と、ドップラ実証機が計測したレーザードップラ速度とを比較し、速度性能を比較検証した（図 3-(4)-A-⑤-3）。台車装備の速度計の精度は不明であるため、移動速度真値に対する性能評価はできないが、台車速度計（橙線）とドップラ実証機が計測したレーザードップラ速度（青線）は、速度値および遷移傾向も概ね一致していた。これにより、海水と比較すると水槽水という懸濁物の総量が著しく少なく、また懸濁物のサイズも極小となる環境下においても、ドップラ実証機がレーザードップラ速度を検出する性能を有することが確認された。

一方、バイスタティック方式では、試験室レベルでは問題なく反射光を確認できたが、試験室から輸送、および当該多目的水槽に設置するためのクレーン作業などの僅かの振動により、送受光系の光軸調整が僅かにズレてしまい、その結果、計測が不能となった。本水槽試験後に原因を調査した結果、送受光系の光軸ズレが確認された。この要因として考えらえる輸送時の振動や、クレーン作業時の振動は、船舶の動揺や主機の振動も含め、深海試験においては回避が困難なプロセス（外力）である。以上を勘案すると、バイスタティック方式のドップラ実証機を深海利用（実運用）することは困難と判断する。そのため、ドップラ実証機においてはモノスタティック方式を採用することに決定した。

(b) ドップラ実証機の改修（最終構成｜モノスタティック方式）

前記水槽試験の結果より、深海利用に関するモノスタティック方式の総合的な有用性・有効性を確認した。これによりドップラ実証機の最終構成としてモノスタティック方式を採用することに決定した。光学系を含む内部構造を、ハイブリット型構成からモノスタティック

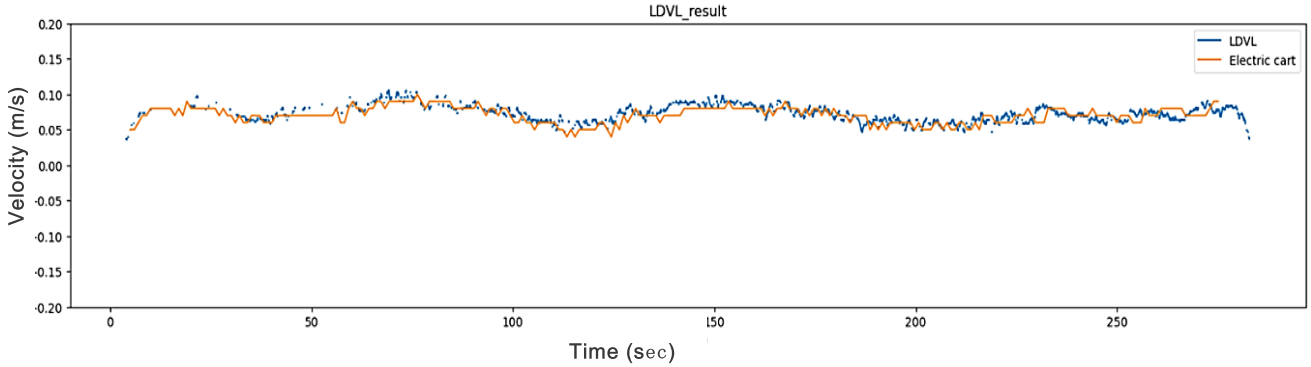


図 3-(4)-A-⑤-3　計測結果・移動速度｜水槽試験｜ドップラ実証機・ﾓﾉｽﾀﾃｨｯｸ式｜多目的水槽＋移動台車

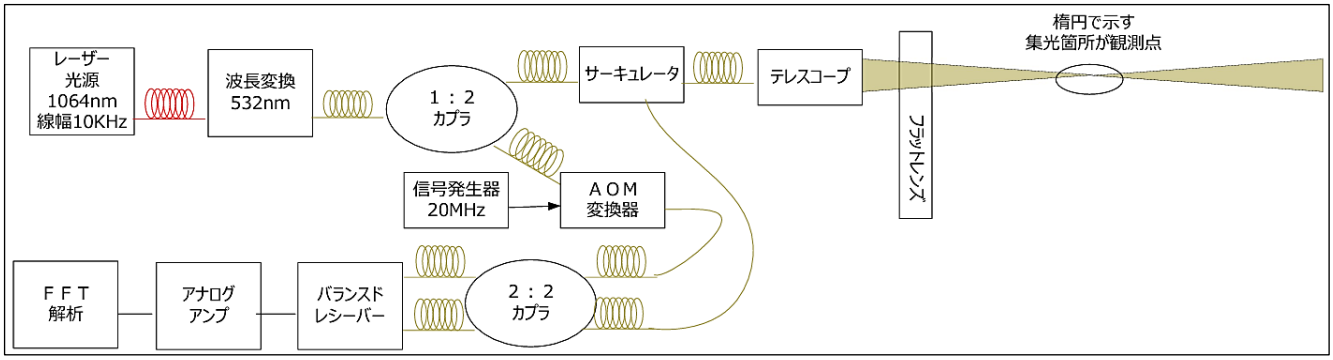


図 3-(4)-A-⑤-4　システムブロック図｜ドップラ実証機（最終構成）｜モノスタティック方式

方式のみの構成とすることで、内部スペースに余裕ができ、各光学系配置の最適化を図ることで集光効率を上げることができる。そこで、ドップラ実証機の改修を行い光学系の最適化を図った。改修後のドップラ実証機の最終構成におけるシステムブロック図を図 3-(4)-A-⑤-4 に示す。同図において送信レーザー光は、1064nm 赤外の高純度のレーザー光を出力する。その後、波長変換にて 532nm（緑）波長に変換され、1：2 カプラ、サーキュレータを経由してテレスコープにより海中にて数m先で集光するよう調整される。フラットレンズを介して海中に射出された送信光は、集光箇所にある計測対象に反射し受信光となる。受信光は、フラットレンズを介してテレスコープ、サーキュレータを経由し、2：2 カプラに入力される。波長変換出力にある 1：2 カプラから AOM 変換器に入力され、ここでレーザー光に対し 20MHz の強度変調が掛けられ 2：2 カプラに入力される。当該 2：2 カプラの出力がバランスドレシーバーに入力され、集光箇所からのドップラ周波数が 20MHz との差になってバランスドレシーバーから出力される。この信号を FFT 解析することで速度成分を抽出する。

(c)深海試験1〔R6年度〕（ドップラ実証機｜最終評価｜令和6年9月｜大室ダシ・大室海穴）

深海域においてドップラ実証機の性能評価を目的として、ドップラ実証機を「かいこう」に搭載し深海試験を実施した。計測系のコンフィギュレーションおよびドップラ実証機の搭載方法等のセットアップは図 3-(4)-A-④-5 と図 3-(4)-A-④-6 と同様である。但し、「かいこう」の支援母船が「新青丸」から「かいめい」に変更しており、併せて、本深海試験の試験海域は大室大/大室海穴となる。大室海穴の水深は約 200m であるため、航走深度（データ

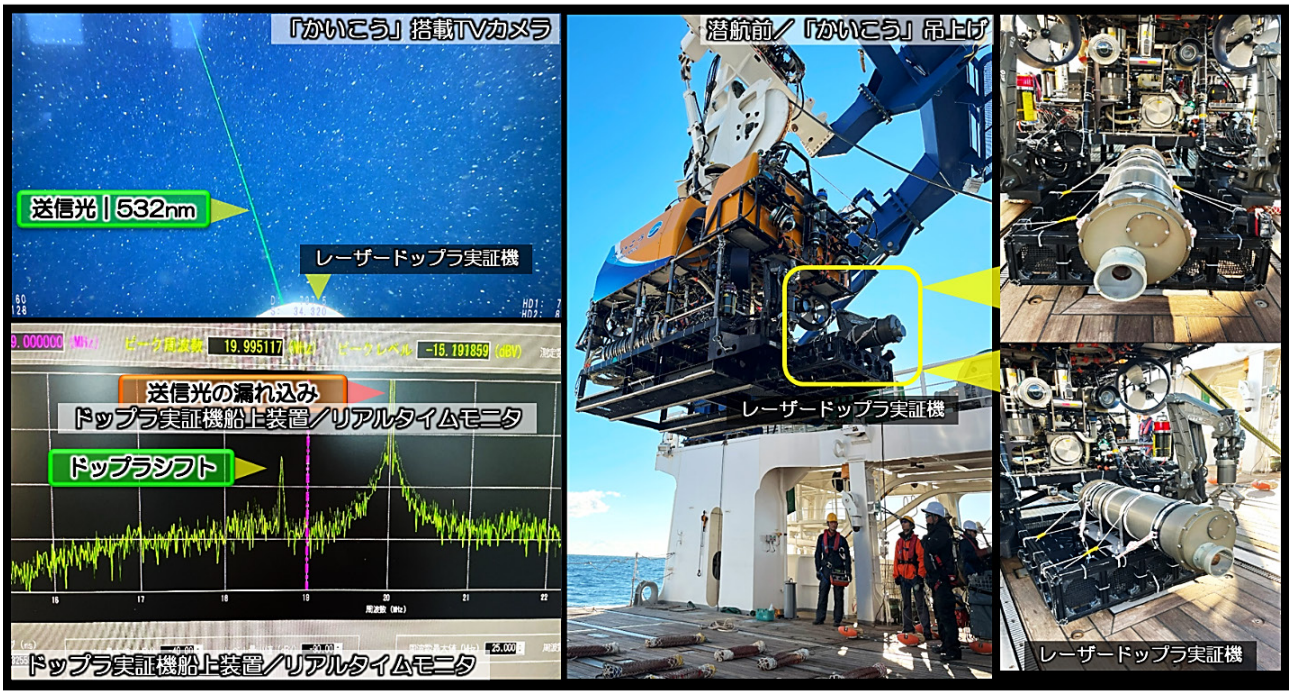


図 3-(4)-A-⑤-5　深海試験 1｜R6 年 9 月｜最終評価｜ドップラ実証機（最終構成）｜大室ダシ・大室海穴

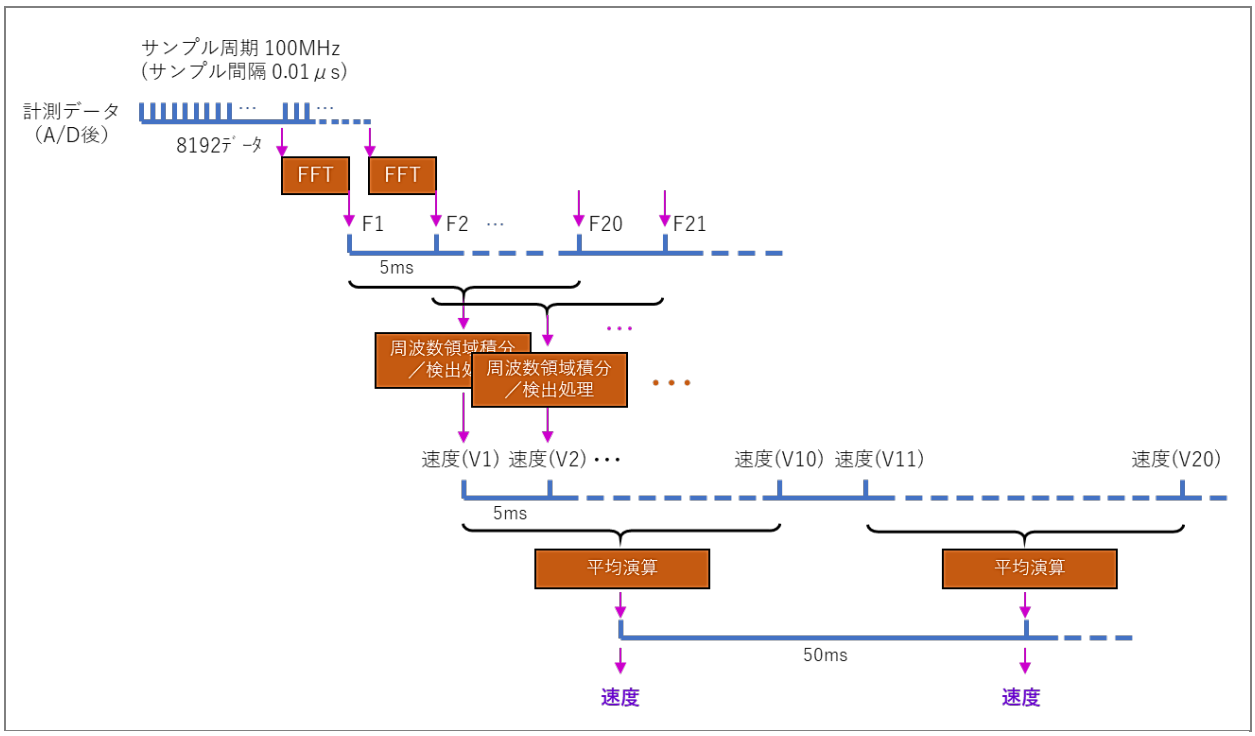


図 3-(4)-A-⑤-6　レーザードップラ速度（移動速度）の出力プロセス

取得時の深度）は 160m 前後とした。本深海試験では、「かいこう」に常備搭載されている音響ドップラ速度計（Doppler Velocity Log:DVL）の計測結果と比較評価した。音響 DVL は、海底に対する音響ドップラ速度（以降、音響対地速度）と海流に対する音響ドップラ速度（以降、音響対水速度）を計測することができる。また音響 DVL は海中探査機の前後、左右、上下の 3 方向の速度を計測できるが、ドップラ実証機は前後方向のみ速度計測となる。そのため、音響 DVL との比較は前後方向速度の計測結果のみとした。深海試験 1 の様子を図 3-(4)-A-⑤-5 に示す。ドップラ実証機が計測するレーザードップラ速度（移動速度）の出力プロセスを図 3-(4)-A-⑤-6 に示す。ドップラ実証機の計測データは、光のドップラ信号である IF 周波数 200MHz の信号を電気信号に変換した後に IF 周波数 20MHz にダウンコンバートした信号であり、100MHz の A/D でディジタル化される（サンプル間隔 0.01μs）。これにより、計測データが 8,192 データ数揃ったら時点で、8,192 データに対して FFT 処理を行い周波数領域に変換される。FFT 処理後のデータは 20 データ毎に 1 サンプルずらしながら周波数領域で積分を行うことで SNR を改善する。スレッショルド処理により最大パワースペクトル密度の周波数（速度）を検出する。検出された速度値は 10 データ毎に平均処理を行うことで計測値として出力される。深海試験 1 および深海試験 2（後記）では、50ms 毎に移動速度を計測している。この際、FFT の周波数分解能は 12.2kHz である。

図 3-(4)-A-④-7 に令和 6 年 9 月 17 日に実施した計測結果を示す。本計測では、試験海域（大室海穴）を「かいこう」が約 1 時間航走した。当該結果より、レーザードップラ速度（青線）、音響対水速度（赤線）、音響対地速度（緑線）を比較検証した。いずれの計測値（移動速度）についても、同様の速度変化の傾向を示しており、ドップラ実証機が「かいこう」の前後方向速度として妥当な計測結果（レーザードップラ速度）を取得していると推定される。図 3-(4)-A-④-8 に、音響対水速度とレーザードップラ速度の平均誤差を示す。また、データ変動が小さい安定領域（海中探査機が安定して航走している領域｜図中黒枠）における平均誤差を以下に示す。

◆音響対水速度 VS レーザードップラ速度（2024 年 9 月 17 日）

・全体誤差：－13.7%　　・データ安定域誤差：－6.0%

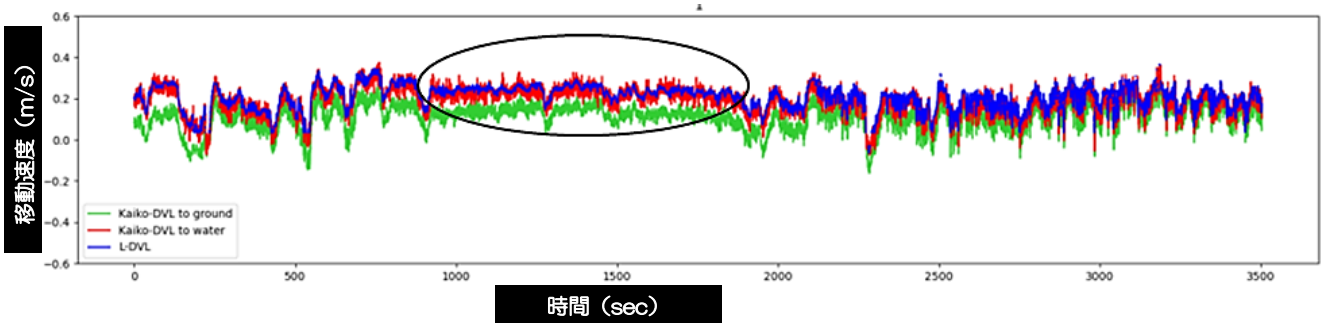


図 3-(4)-A-⑤-7　計測結果(約 1 時間)｜深海試験 1(9/17)｜移動速度(前後方向速度)｜ドップラ実証機｜大室海穴

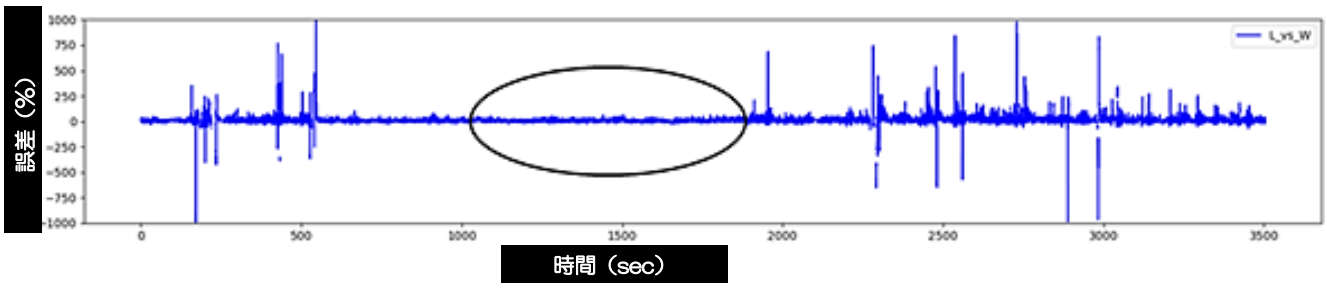


図 3-(4)-A-⑤-8　平均誤差｜深海試験 1(9/17)｜レーザードップラ速度—音響対水速度｜大室海穴

ドップラ実証機は、海水中の懸濁物に対するレーザー反射のドップラシフトから、移動体の進行方向速度（前後方向速度）を計測している。そのため厳密には対懸濁物速度を計測するセンシング技術であり、これは仮想的には対水速度に相当する。そのため、レーザードップラ速度の妥当性を比較する指標として、音響 DVL が計測する音響対水速度との比較が重要となる。「かいこう」が安定して航走した領域（安定領域）における両データを比較した結果、計測値の誤差は－6.0%であり、凡そ一致した移動速度を計測している。

(d)深海試験2〔R6年度〕（ドップラ実証機｜最終評価｜令和6年12月｜大室ダシ・大室海穴）

深海域においてドップラ実証機の性能評価を目的として、ドップラ実証機を「かいこう」に搭載し深海試験を実施した。計測系のコンフィギュレーションおよびドップラ実証機の搭載方法等のセットアップは上記深海試験 1 と同様である。本深海試験でも深海試験 1 と同様に、「かいこう」に常備搭載されている音響 DVL の計測結果と比較評価した。ドップラ実証機が計測するレーザードップラ速度（移動速度）の出力プロセスは深海試験 1 と同様（図 3-(4)-A-⑤-6）である。令和 6 年 12 月 13 日に実施した計測結果を図 3-(4)-A-④-9 および図 3-(4)-A-④-10 に示す。また、同年 12 月 14 日に実施した計測結果を図 3-(4)-A-④-11 および図 3-(4)-A-④-12 に示す。両計測結果は、「かいこう」が試験海域（大室海穴）を約 1 時間航走した時のものとなる。

図 3-(4)-A-④-9（令和 6 年 12 月 13 日計測結果）において、レーザードップラ速度（青線）、音響対水速度（赤線）、音響対地速度（緑線）を比較検証した。いずれの計測値（移動速度）についても、同様の速度変化の傾向を示しており、ドップラ実証機が「かいこう」の前後方向速度として妥当な計測結果（レーザードップラ速度）を取得していると推定される。図 3-(4)-A-④-12 は音響対水速度とレーザードップラ速度の平均誤差を示している。また、データ変動が小さい安定領域（海中探査機が安定して航走している領域｜図中黒枠）における平均誤差を以下に示す。

◆音響対水速度 VS レーザードップラ速度（2024 年 12 月 13 日）

・全体誤差：－3.4%　　・データ安定域誤差：－3.6%

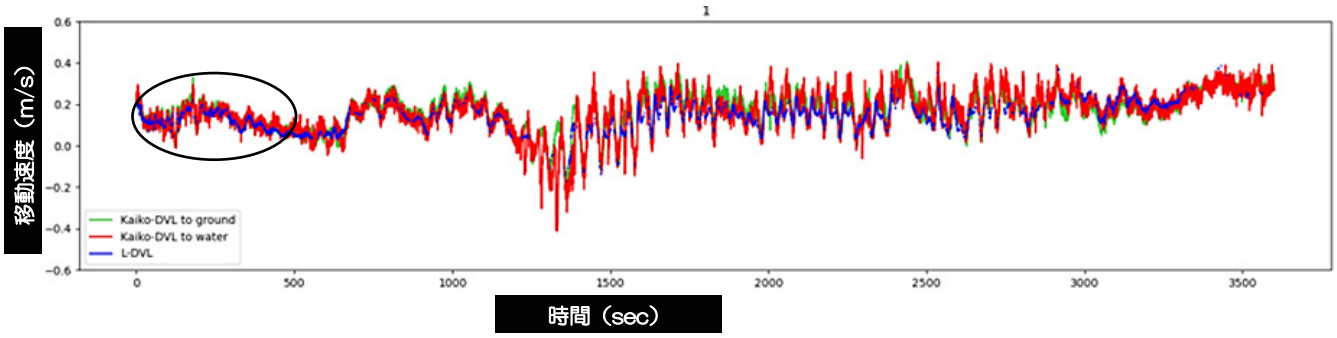


図 3-(4)-A-⑤-9　計測結果(約 1 時間)｜深海試験 2(12/13)｜移動速度(前後方向速度)｜ドップラ実証機｜大室海穴

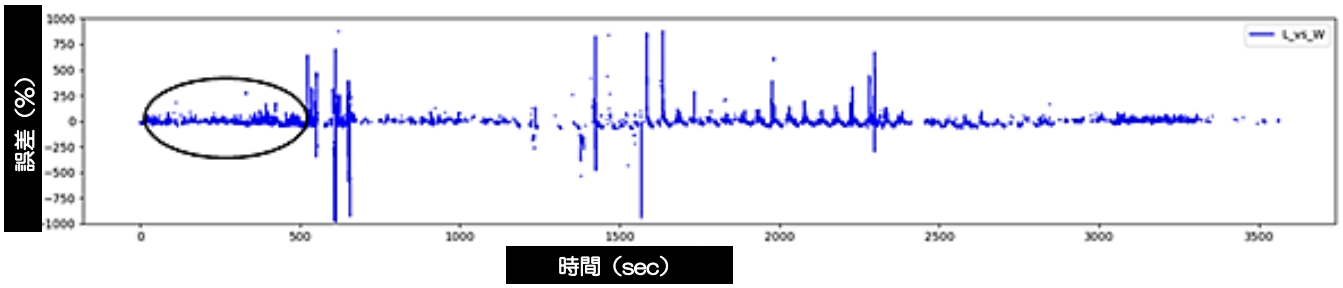


図 3-(4)-A-⑤-10　平均誤差｜深海試験 1(12/13)｜レーザードップラ速度—音響対水速度｜大室海穴

前記の通り、レーザードップラ速度の妥当性を比較する指標として、音響 DVL が計測する音響対水速度との比較が重要となる。「かいこう」が安定して航走した領域（安定領域）における両データを比較した結果、計測値の誤差は－3.6%であり、前記深海試験 1（9/17）の計測結果より、更に一致した移動速度を計測が確認され、全体的誤差もほぼ一致している。

図 3-(4)-A-④-11（令和 6 年 12 月 14 日計測結果）において、レーザードップラ速度（青線）、音響対水速度（赤線）、音響対地速度（緑線）を比較検証した。いずれの計測値（移動速度）についても、同様の速度変化の傾向を示しており、ドップラ実証機が「かいこう」の前後方向速度として妥当な計測結果（レーザードップラ速度）を取得していると推定される。図 3-(4)-A-④-12 は音響対水速度とレーザードップラ速度の平均誤差を示している。ま

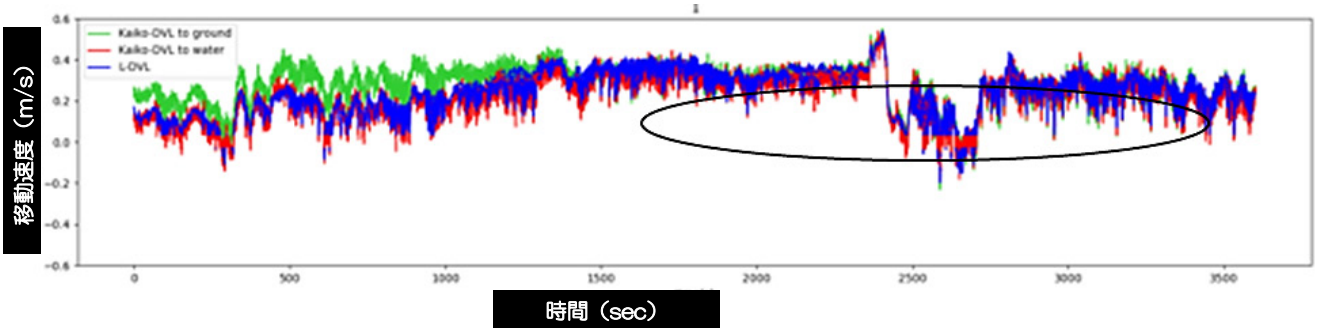


図 3-(4)-A-⑤-11　計測結果(約 1 時間)｜深海試験 2(12/14)｜移動速度(前後方向速度)｜ドップラ実証機｜大室海穴

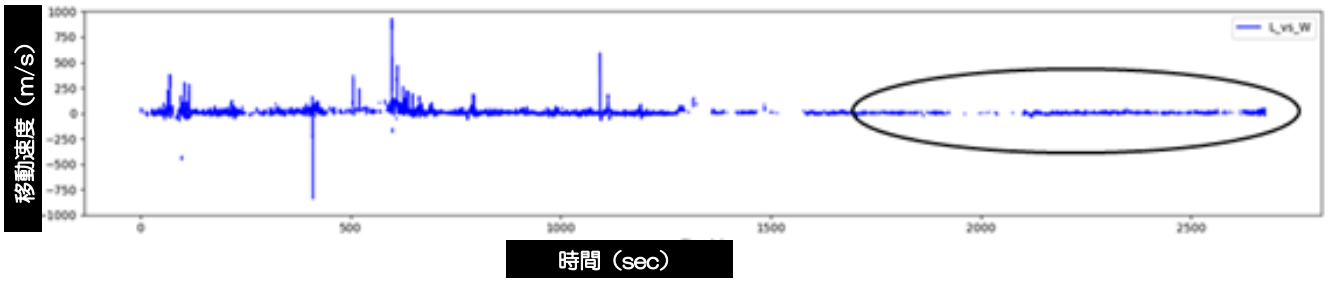


図 3-(4)-A-⑤-12　平均誤差｜深海試験 1(12/14)｜レーザードップラ速度—音響対水速度｜大室海穴

表 3-(4)-(A)-⑤-1　データ比較まとめ｜音響対水速度 vs レーザードップラ速度｜深海試験 1・2

	9 月 17 日／計測データ		12 月 13 日／計測データ		12 月 14 日／計測データ	
	全体誤差	安定域誤差	全体誤差	安定域誤差	全体誤差	安定域誤差
音響耐水速度 vs レーザードップラ速度	−13.7%	−6.0%	−3.4%	−3.6%	8.5%	2.5%

た、データ変動が小さい安定領域（海中探査機が安定して航走している領域｜図中黒枠）における平均誤差を以下に示す。

◆音響対水速度 VS レーザードップラ速度（2024 年 12 月 14 日）
・全体誤差：8.5%　　・データ安定域誤差：2.5%

前 2 測定の結果と同様に、レーザードップラ速度の妥当性を比較する指標として、音響 DVL が計測する音響対水速度との比較が重要となる。「かいこう」が安定して航走した領域（安定領域）における両データを比較した結果、計測値の誤差は 2.5%であり、深海試験 1 (9/17) の計測結果、および深海試験 2 (12/13) の計測結果を含め、最も一致した移動速度を計測が確認された。これはドップラ実証機が、音響 DVL の対水速度検出性能と同レベルの計測性能を有していることを示している。

(e)考察｜深海試験2〔R6年度〕計測結果

前記深海試験 1 および深海試験 2 にて示した音響対水速度とレーザードップラ速度の誤差について表 3-(4)-(A)-⑤-1 に示す。ドップラ実証機は、海水中の懸濁物に対するレーザー反射のドップラシフトから、移動体の進行方向速度（前後方向速度）を計測している。そのため厳密には対懸濁物速度を計測するセンシング技術であり、これは仮想的には対水速度に相当する。そのため、レーザードップラ速度の妥当性を比較する指標として、音響 DVL が計測する音響対水速度との比較が重要となる。同表に示す通り、3 回のレーザードップラ速度計測においていずれも、音響対水速度とほぼ一致しており、特に 12 月 14 日の計測においては、安定領域での誤差が 2.5%と極めて高い一致を示している。音響 DVL は、「かいこう」の底部に設置しており、複数の音響ビームを進行方向と直行した鉛直方向に角度を持って射出する。一方、ドップラ実証機は、進行方向に向かってレーザー光を射出する。反射する媒体、射出する方向が異なるにも関わらず、上記のように移動速度（対水速度）として各計測結果が良く一致している。

12 月 14 日の計測データにおけるドップラ実証機の SNR と、「かいこう」に装備させた濁度計の計測データ（濁度データ）を図 3-(4)-A-④-13 に示す。併せて、12 月 13 日の計測データにおけるドップラ実証機の SNR と濁度データを図 3-(4)-A-④-14 に示す。図 3-(4)-A-④-13 では、濁度が比較的高い場合は SNR と濁度の遷移傾向が一致している。相関係数は正の値を示しているため数値的にも遷移が一致している。一方、図 3-(4)-A-④-14 では、濁度が低く安定しており、このような環境では濁度と SNR の相関はほとんど確認されないが、レーザードップラ速度は安定して検出できている。まれに発生する SNR の高い箇所は、サイズが大きい海中懸濁物(マリンスノーなど)が影響している可能性が考えられる。

水槽試験および深海試験の結果から、ドップラ実証機は海中懸濁物が少ない環境でも、レーザー反射によるドップラシフトを安定して検出し、レーザードップラ速度を計測することが実証された。併せて、音響対水速度との誤差比較において、計測したレーザードップラ速度計の一致度が非常に高く、2.5～6.0%程度の差異であることが確認できた。本結果を踏まえ、深海試験において一致度の高いレーザードップラ速度を慣性航法演算に組み込むことによる複合航法を試行し、位置検出精度について検証する。

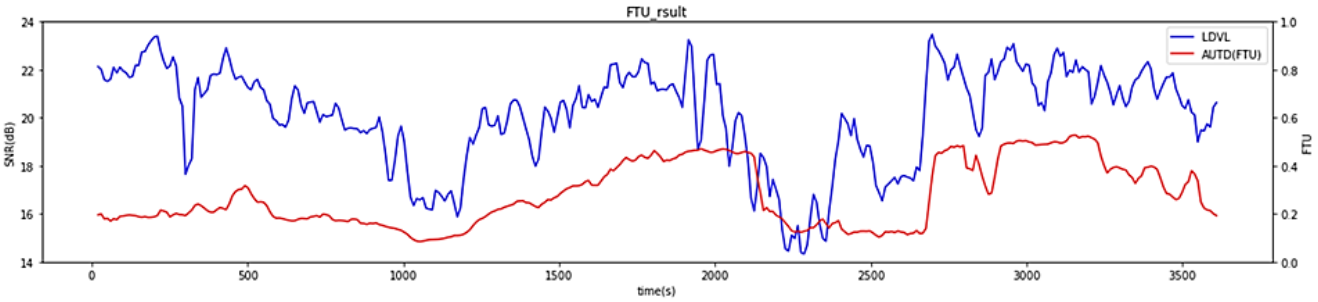


図 3-(4)-A-⑤-13　SNR(dB)-濁度(FTU)相関｜深海試験 1(12/14)｜大室海穴
（ドップラ実証機 SNR：青　濁度：赤）

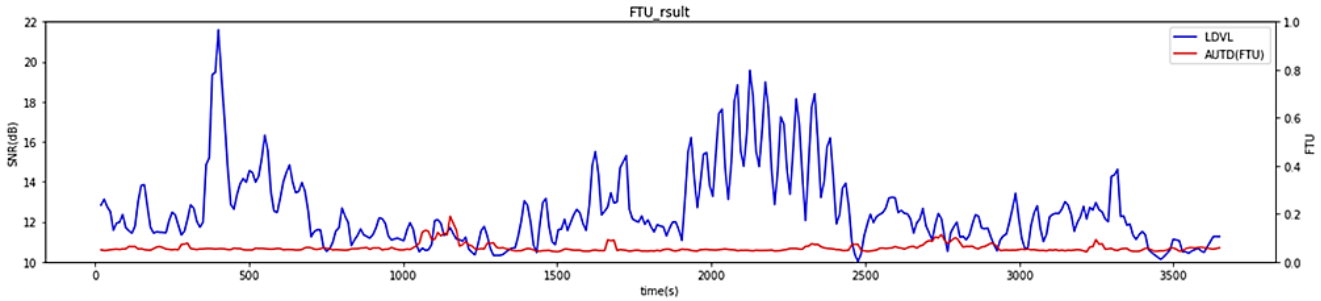


図 3-(4)-A-⑤-14　SNR(dB)-濁度(FTU)相関｜深海試験 1(12/13)｜大室海穴
（ドップラ実証機 SNR：青　濁度：赤）

(4)-B 複合航法試験（純慣性航法との比較評価）

[(4)-B｜目的]

各実施項目により検出された海中探査機の移動速度の推定結果を用いた複合航法演算アルゴリズムを構築するとともに、純慣性航法との位置検出精度の比較評価を実施する。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(4)-B｜達成目標（終了時）]

実環境において海中あるいは海上の移動体を適用し試験を実施し、構築した複合航法アルゴリズムを用いることにより位置検出精度が純慣性航法と比較して約10倍の精度を実現することを目指す。

[(4)-B｜達成目標（終了時）の達成状況]

■実環境において海中あるいは海上の移動体を適用し試験を実施　：　**達成**

■複合航法アルゴリズムにより位置検出精度が純慣性航法と比較して約 10 倍　：　**達成**

[(4)-B｜実施内容①｜複合航法アルゴルイズムの基本検討・実装化設計]

＜概要＞

ドップラ実証機を海中探査機に搭載し、深海試験において、海中探査機が搭載する慣性航法装置と当該実証機との計測値を適用した複合航法アルゴリズムについて検討し、併せてその実装に要する基本設計を実施した。

(a)システム設計（ハードウェア構成）

複合航法アルゴリズムにおけるハードウェア構成について検討した。当該アルゴリズムでは、既存の慣性航法装置に対し、ドップラ実証機が検出するドップラ速度を入力する複合航法を実現する。既存機として、海洋研究開発機構が所有する日本航空電子工業(株)製の慣性航法装置「JIMS180S-JM」（図3-(4)-B-①-1）の適用を想定する。「JIMS180S-JM」は、本研究課題にて実施する深海試験において使用する海中探査機「かいこう」に実装されている航法装置であり、慣性センサとして高性能な小型RLG（Ring Laser Gyro｜リングレーザージャイロ）ユニットが組み込まれるハイエンドクラスの装置である。実運用されている海中探査機に搭載された主たる航法装置であり実装における利便性が高く、航法性能の評価を運用レベルとして実施できる。

複合航法アルゴリズムの実現に要する機器構成としては、ドップラ実証機、慣性航法装置（JIMS180-JM想定）、深度計、及びこれらを管制する制御装置（コンピューター）と電源装置、各装置間を連絡する通信ハブ（Ether Hub）を基本とする。これら各機器・装置を、計測系のコンフィギュレーションに応じて適切に配置・展開することで、複合航法アルゴリズムに要するシステムを構築する。各装置の通信インタフェースは異なり、ドップラ実証機はEther通信を、慣性航法装置および深度計はシリアル通信(RS232C)を通信プロトコルとする。そこで、各制御装置間の情報伝達は汎用性を考慮しEther通信を仮定する。図3-(4)-B-①-2～

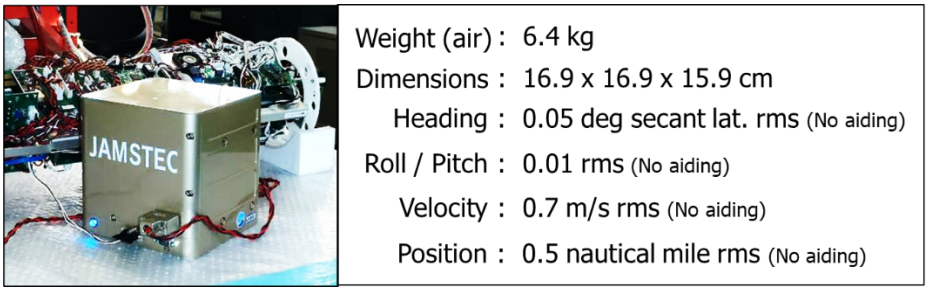


図 3-(4)-B-①-1 慣性航法装置「JIMS180-JM」｜日本航空電子工業(株)製

図3-(4)-B-①-4に、基本構成機器における結線パターンを例示する。図3-(4)-B-①-2においては、各制御装置はEther通信ポートを有する必要があり、加えて制御装置②③はシリアル通信ポートを備えることが求められる。一方、図3-(4)-B-①-3においては、単一の制御装置でドップラ実証機、慣性航法装置、深度計を管制するため、Ether通信ポートとシリアル通信ポートを2チャンネル備える必要がある。図3-(4)-B-①-4においては、各通信プロトコルの中継をTAが実施するため、Ether通信を介して単一の制御装置だけで全ての装置が管制される。実際には当該各パターンの他にも複数パターンが考えられるが、気中試験、水槽試験、浅海試験、深海試験と、各試験に応じた環境および配置可能な機器構成が適宜変化するため、臨機にハードウェア構成を適応させる。

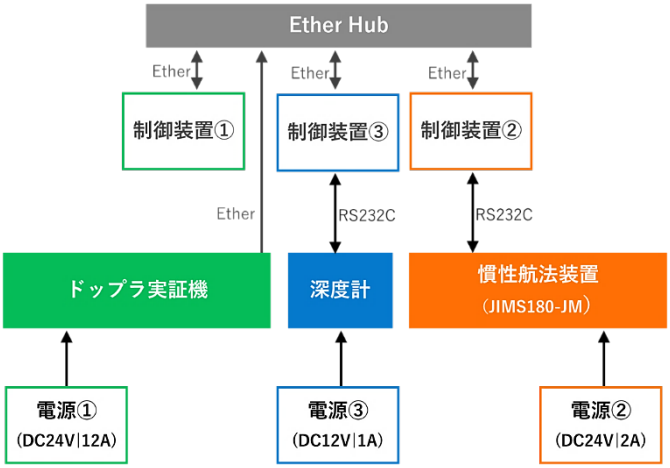


図 3-(4)-B-①-2　基本構成機器による結線パターン｜

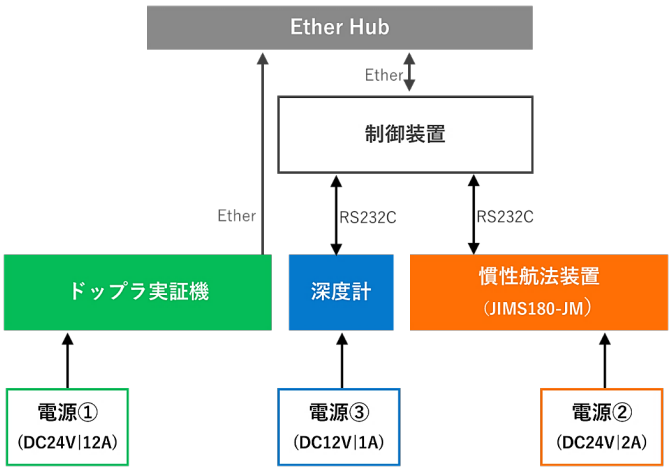


図 3-(4)-B-①-3 基本構成機器による結線パターン｜

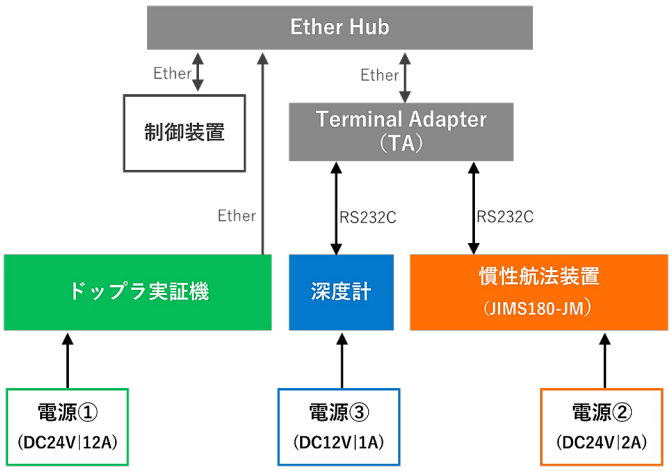


図 3-(4)-B-①-4 基本構成機器による結線パターン｜

(b) システム設計（ソフトウェア構成）

航複合航法アルゴリズムにおけるソフトウェア構成について規定した。当該アルゴリズムでは、既存の慣性航法装置（JIMS180S-JM）に対し、ドップラ実証機が検出するレーザードップラ速度を入力する複合航法を実現する。慣性航法装置が具備する状態推定器（カルマンフィルタ）への観測項として当該ドップラ速度を入力することで、13 次カルマンフィルタによる状態推定を実施し、推定結果に基づく航法演算補正を実施する複合航法を成立させる。図 3-(4)-B-①-5 に複合航法アルゴリズムの概略を図示する。慣性航法装置における純慣性航法演算に加え、状態推定器に当該ドップラ速度および深度計から得られる深度値を入力する。レーザードップラ速度はカルマンフィルタの観測項（観測ベクトル）として組み込まれ、状態推定における演算要素として使用され、深度値は鉛直方向成分における航法演算処理に利用される。

慣性航法装置は基本的に、地球上における移動体の水平状態（緯度・経度/速度/姿勢）を演算し、自己状態を把握することにより目的地へ移動することを目的とした装置となる。そのため、鉛直方向成分について、積極的な慣性航法演算することを前提としない。また鉛直方向に関しては、シューラーループを構成した演算処理ではないため、その影響が作用しないことから、単純な時系列的積分誤差が支配的となる。そこで、鉛直方向移動量（深度）に関しては、図 3-(4)-B-①-6 に示す深度ダンピングアルゴリズムを適用する。慣性航法装置が良好な鉛直方向位置（深度｜Z 値）

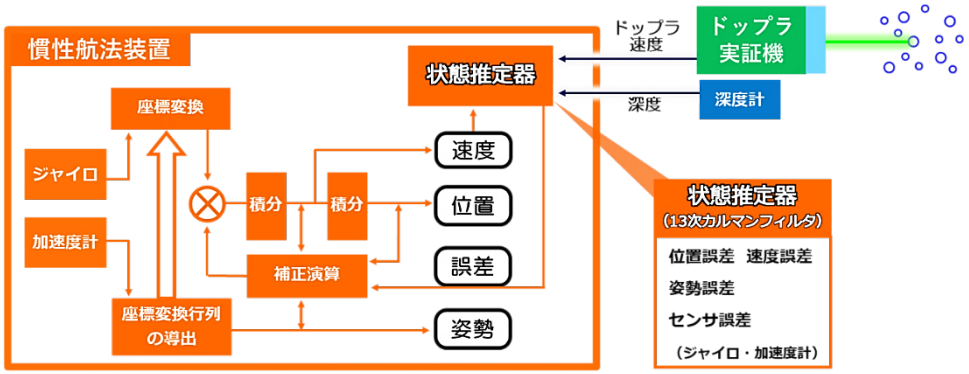


図 3-(4)-B-①-5　複合航法アルゴリズム｜概略図

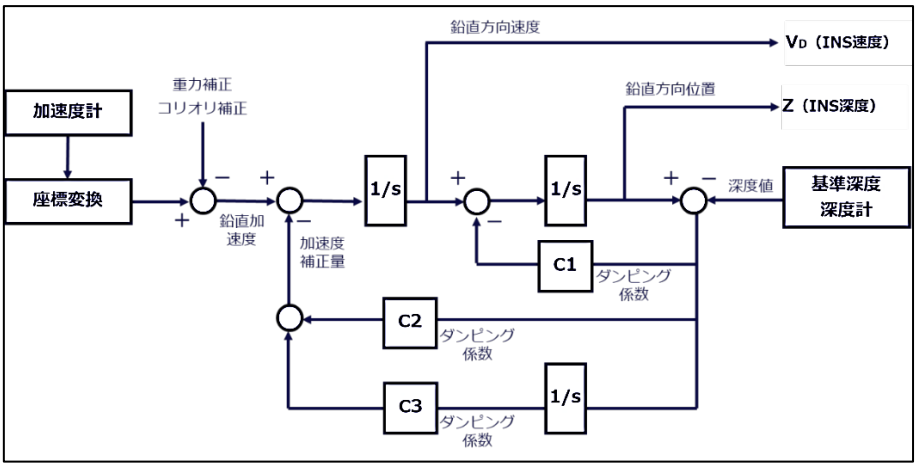


図 3-(4)-B-①-6　深度ダンピングアルゴリズム｜概略図

を出力するためには、深度計から出力される基準深度値が必須であり、基本構成機器として信頼性の高い深度計が求められる。

状態推定器であるカルマンフィルタは、13 次の状態量が定義されており、観測項となるドップラ速度の入力により、カルマンフィルタゲインを更新させることにより全状態推定を実施し、当該推定結果を補正量として航法演算に反映する。13 次カルマンフィルタの状態量は下記となる。

- 位置誤差（緯度誤差／経度誤差）　・・・2 次
- 速度誤差（δVn／δVe）　・・・2 次
- 姿勢誤差（εn／εe／εd）　・・・3 次
- センサ誤差（ジャイロ誤差｜δωx／δωy／δωz）　・・・3 次
  （加速度計誤差｜δAx／δAy ／δAz ）　・・・3 次

上記の通り、当該カルマンフィルタの各状態量は慣性航法演算精度に関係する誤差項目であり、フィルタ演算を繰返し行うことによりカルマンゲインが逐次更新され、状態量が推定される。図 3-(4)-B-①-7 に誤差推定器となるカルマンフィルタの概略を示す。ドップラ実証機が検出するレーザードップラ速度が、当該カルマンフィルタの観測項として入力されることで各誤差項目が推定され、併せて基準深度を入力することでダンピング処理が行われる。複合航法アルゴリズムでは、この両処理が良好な入力値に対して適切なタイミングで実施されることにより、純慣性航法演算と比較して大幅な位置検出精度の向上が期待される。

深度計（もしくは CTD 計）は、海中探査機の既装備品を想定しており、受動センサであることから安定した入力周期が担保される。一方、ドップラ実証機によるレーザードップラ速度計測においては、現況では実環境下における性能が未知であり、併せて能動センサであることから、周期的入力も未知となる。そのため、当該カルマンフィルタの観測ノイズを含む

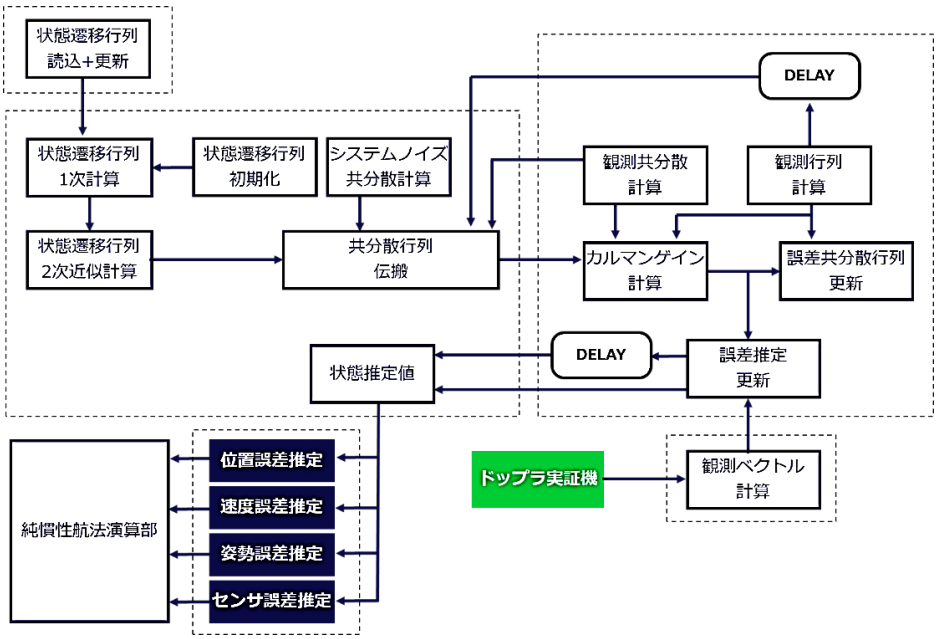


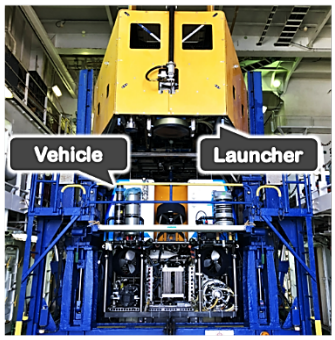
図 3-(4)-B-①-7　状態推定器（カルマンフィルタ）｜概略図

各システム設定に対して、実環境下（深海域）における計測精度・性能を確認したのちの設定する。また、ドップラ実証機が検出するドップラシフト（レーザードップラ速度）は進行方向の 1 成分であるため、当該速度を適用する複合航法アルゴリズムの性能を実環境（深海域）にて評価するためには、海中探査機の挙動影響が支配的となる。そのため、観測ベクトル、観測ノイズ、状態遷移行列、システムノイズ等の各構成・定義については、深海試験の結果を踏まえ調整する。

(c)海中探査機への実装化検討

深海試験における複合航法アルゴリズムの海中探査機実装を検討した。深海試験では、海洋研究開発機構が所有する船舶を支援母船とし海中探査機を適用することで、海中における移動体のドップラ速度を検出する。図 3-(4)-B-①-8 に深海試験での適用を想定する遠隔操作式海中探査機「かいこう」を示す。「かいこう」はランチャー／ビークル 2 種のプラットフォームから構成されており、ビークルが可動プローブとなり作業を実施する。支援母船からランチャーを介して電源系と通信系がビークルと確立され、支援母船の船上より「かいこう」の管制が実施される※13。深海試験においては、当該ビークル部の前方に配置されるペイロードバスケット内に、ドップラ実証機を固定設置する。これにより「かいこう」ビークル船首方向と同方向にレーザー光が照射され、ビークル船首方向成分（前後進方向）のレーザードップラ速度が検出される。「かいこう」ビークルが具備する Payload システムとドップラ実証機を連結することで、ドップラ実証機が要する電源系および通信系を「かいこう」内に確保する。慣性航法装置は「かいこう」制御システムに既に組込まれており、当該装置を

SPECIFICATIONS (Vehicle)	
Length	3.0m
Width	2.0m
Height	2.6m
Weight	5.5t
Depth	7000m
Speed	0-1kt
Payload	200kg



SPECIFICATIONS (Launcher)	
Length	5.2m
Width	2.6m
Height	3.2m
Weight	5.8t
Depth	11,000m
Speed	1.5kt
Payload	—

図 3-(4)-B-①-8　遠隔操作式海中探査機「かいこう」

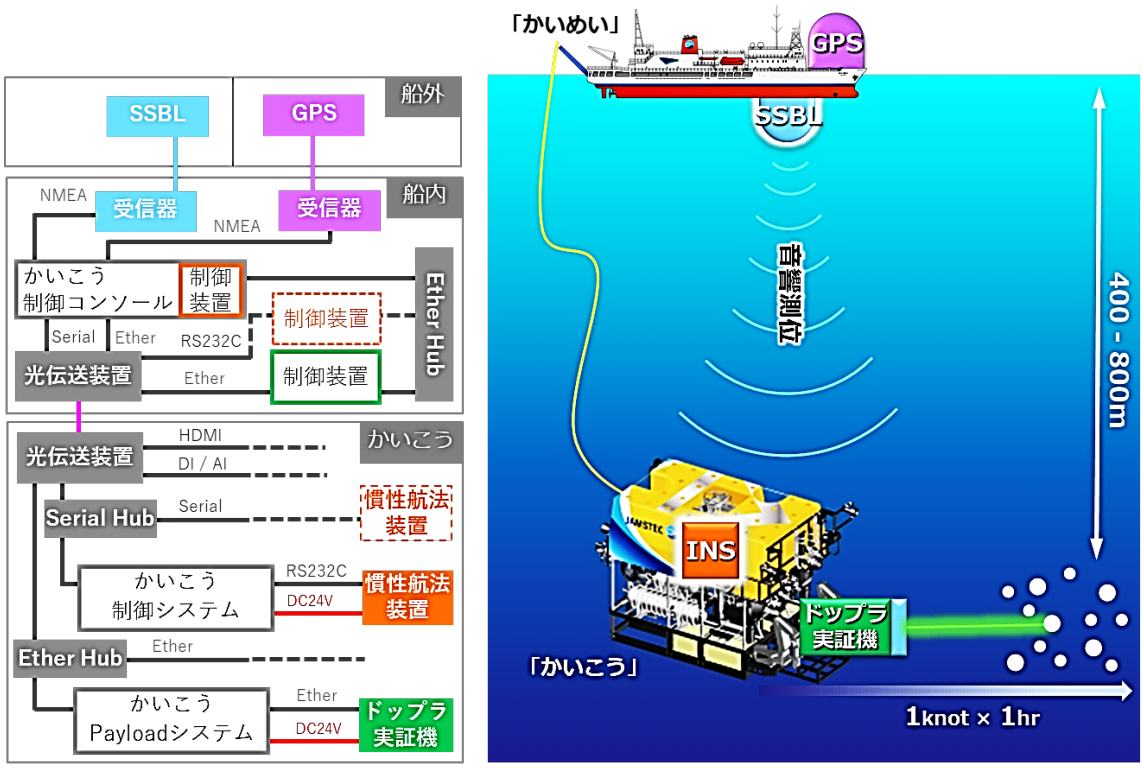


図 3-(4)-B-①-9　計測系コンフィギュレーション｜海中探査機実装

複合航法アルゴリズムの対象機とする。「かいこう」は支援母船とテザーケーブルにて連絡され、光ファイバ通信によりリアルタイムな通信リンクが「かいこう⇔支援母船」間において確立される。支援母船には GPS が搭載されており、支援母船の絶対位置が取得される。また船底には、SSBL 測位装置が搭載されており、支援母船における「かいこう」の相対位置が取得される。両位置情報から、潜航中における「かいこう」位置が、絶対位置として提示・記録される。図 3-(4)-B-①-9 に「かいこう」を適用した計測系コンフィギュレーションを示す。船上に配置される「かいこう」制御コンソールでは、光ファイバ通信を介して「かいこう」をリアルタイムに管制することが可能である。光ファイバ通信では、Serial、Ether、HDMI、DI/AI 等の多様な通信系を CWDM 方式（一部 DWDM 方式）により光多重処理しており、通信系として完全に同期制御される。

純慣性航法演算精度と複合航法演算精度とを比較評価することを目的とし、図 3-(4)-B-①-10 に示す試験セットアップについて検討を進めた。当該セットアップでは、「かいこう」が既搭載する慣性航法装置を利用し、深海試験時に取得される各計測データをオフラインにて適用することで複合航法演算結果を得る。先ず「かいこう」搭載の慣性航法装置は、深海試験において純慣性航法にて運用することで、純慣性航法演算結果（純慣性航法ログ）を得る。この際、「かいこう」運航中の事情により、慣性航法装置を純慣性航法にて運用できない場合、音響 DVL とのハイブリット航法演算結果を得る。当該ハイブリット航法は、音響対地速度もしくは音響対水速度の入力を得て、航法演算の位置検出精度を大きく向上させる。この場合、当該ハイブリット航法から逆演算することにより、純慣性航法演算結果（純慣性航法ログ）を算出する。また当該ハイブリット航法演算結果から基準運動・基準航跡を得る。

当該 INS と同期してドップラ実証機の計測値（ドップラ速度）を記録する。併せて、深度計が出力する深度値も同様に同期して記録する。一方、「かいこう」が搭載する慣性航法装置の数学モデル（シミュレーションモデル）を構築し、当該モデルが純慣性航法ログを出力するようにモデル同定（仮想 INS）を行う。仮想 INS に対して、純慣性航法ログと同期したドップラ速度および深度を入力することにより、オフラインにて複合航法演算を実施させ、航法結果（複合航法ログ）を得る。各ログ（純慣性航法演算ログ｜複合航法演算ログ）による各航跡をオフラインにて比較評価することにより、複合航法演算の実用性を検証する。本セットアップでの評価はリアルタイムではないが、実海域における試験結果（演算結果・計

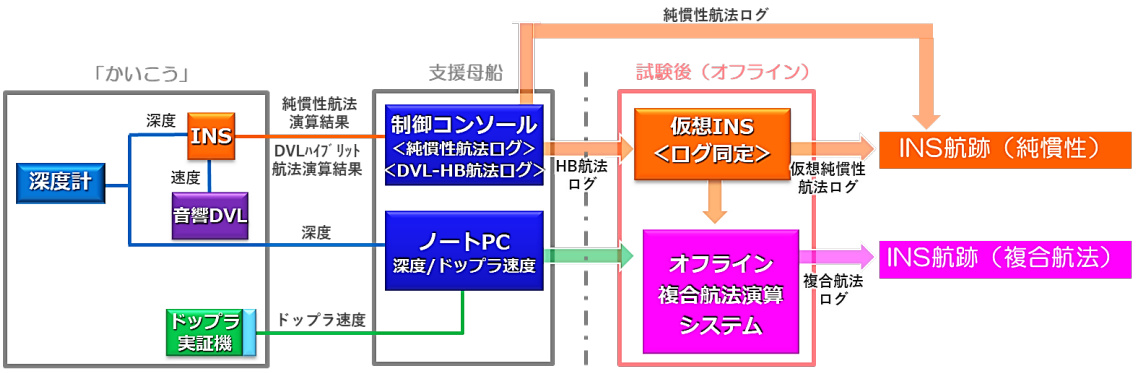


図 3-(4)-B-①-10　試験セットアップ｜航法演算比較評価用

測結果）をトレースしており、「かいこう」が実際に搭載している慣性航法装置のみを利用することで各航法演算結果が導出されるため、両者の位置検出精度を定量的に比較評価するには最適な方法と考える。

※13：
2023 年度時点において、「かいこう」はランチャーの使用を取止め、2024 年度の運航よりビークルと支援母船が直結する方式となる予定。また支援母船については、「かいめい」「新青丸」の 2 船体制で実施する予定。

[(4)-B｜実施内容②｜複合航法シミュレーション（初期検討）]

＜概要＞

実施項目「3.(4)-A」にて設計・製作したドップラ実証機を用いて、評価試験（気中試験｜水槽試験｜深海試験）を実施し、当該実証機の性能評価に要する基礎データを取得した。一方、各試験にておいて移動体に対する計測データ（移動体速度）が取得されなかった。そこで、小型船舶に慣性航法装置を搭載した慣性航法演算出力と、ドップラ実証機が計測する移動体速度を模擬する速度データ（模擬速度データ）を適用し、複合航法演算をシミュレーションした。本シミュレーション結果より、ドップラ実証機が具備すべき性能条件について分析した。

(a) ドップラ実証機を用いた評価試験

実施項目「3.(4)-A」にて設計・製作したドップラ実証機を用いて、気中試験・水槽試験・深海試験を実施し、当該実証機の基本性能を評価した。各試験コンフィギュレーション・試験結果については、「(4)-A｜実施内容④」に示す。

(b) 小型船舶を用いた慣性航法データの取得（慣性航法試験｜小型船舶利用）

前項に示す各試験において、移動体速度が取得されなかったことから、小型船舶を使用した慣性航法試験を実施した。小型船舶に「かいこう」が既搭載する慣性航法装置と同器種を設置し、小型船舶に海中探査機の航走を模擬させ、その際の慣性航法装置の計測結果（純慣性航法演算出力｜慣性航法データ）を取得した。当該データに対し、移動体速度の模擬データを適用することで複合航法演算シミュレーションを実施する。図 3-(4)-B-②-1 に慣性航法試験の概要を示す。試験海域は静岡県沼津市・伊豆三津浜周辺海域である。小型船舶に設置した慣性航法装置は、海中探査機「かいこう」が常備する慣性航法装置と同器種となる「JIMS180-JM」（日本航空電子工業(株)製）を使用した。「JIMS180-JM」を小型船舶の船内（計測室）に固定設置し、「かいこう」運用時と同様に小型船舶が航走している間にアライメント演算（船上アライメント演算）を実施した。併せて、「JIMS180-JM」のほぼ直上となる計測室屋外に DPGS アンテナを固定設置した。本試験において小型船舶は、可能な限り低速

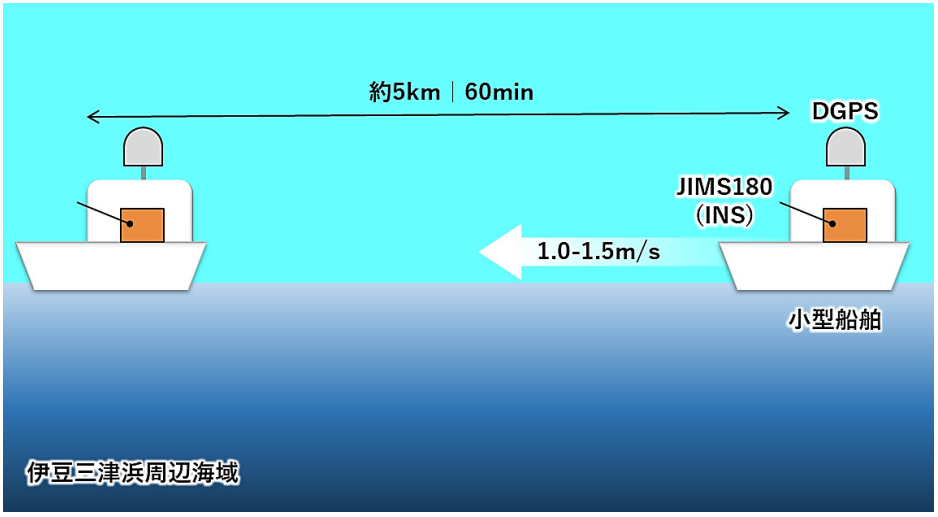


図 3-(4)-B-②-1　慣性航法試験｜計測系コンフィギュレーション
（沼津・伊豆三津浜周辺海域｜慣性航法データ取得｜小型船舶）

(1.0-1.5m/s)かつ定速において航行するようにし、船首方位をほぼ一定に保持させており、「(4)-A｜実施内容④」に示す深海試験での「かいこう」の航行プロフィルに似せている。当該プロファイルは純慣性航法演算と複合航法演算との航法性能を比較評価するのに適したプロファイルと考える。本試験を約 60 分間実施することで、直線距離にして約 5km を航走させた。その間、「JIMS180-JM」による慣性航法演算結果（慣性航法データ）を出力・記録し、並行して DGPS による小型船舶の航跡（GPS データ）を記録した。本試験では、GPS データを基準航跡として扱う。この際、慣性航法データと GPS データとは同一の PC を用いて、時刻同期を含め一元的に記録させている。本計測系にて取得された両航法データを適用することで、ドップラ実証機の模擬出力（模擬速度データ）を導出し、「JIMS180-JM」との複合演算航法シミュレーションに適用する。

(c)複合航法演算シミュレーション｜システム構成（慣性航法試験｜小型船舶利用）

前項にて取得された「JIMS180-JM」およびDGPSが出力する各データを適用した複合航法演算シミュレーションを実施する。本シミュレーションでは、ドップラ実証機が計測する移動体速度を模擬した仮想的な速度データ（模擬速度データ）を導出し、当該データを適用することにより複合航法演算を試行（シミュレーション）する。シミュレーションを実施することで演算精度（位置誤差）を評価するためには、基準航跡となる位置データ（仮の真値）が必要である。現況下では、位置データの真値は衛星測位（RTK-GPS等）のデータを使用することが最も精度が高いとされるが、海中において衛星測位は適用できない。そこで、慣性航法装置にて計測したセンサデータの生値（加速度、角速度）から基準航跡を導出する方法をとる。一方、「JIMS-180R-JM」が通常出力する計測データでは分解能が低く、かつ航法演算に要するフィルタ処理がされており、精度的に基準航跡としては使用できない。そのため、当該方法ではドップラ実証機が計測する移動体速度（速度データ）と「JIMS180-JM」が演算する航路とに乖離が発生してしまう。以上を踏まえ、複合航法演算シミュレーションの構成と実施方法について検討した。図3-(4)-B-②-2に複合航法演算シミュレーションのシステム構成をブロック図にて示す。本来は、ドップラ実証機が計測する速度データ（図中L-DVL速度）を適用した複合航法演算をシミュレーションするが、今回は模擬速度データを用いてシミュレーションを実施する。本シミュレーションでは先ず、基準航跡を生成させる。小型船舶を用いた慣性航法試験によりGPSデータが取得されており、併せて「JIMS180-JM」からの慣性航法データも取得されている。そこで両データが出力する①姿勢・方位データ（INS座標系）および②位置データ（地球座標系）を用いて、③速度データ（地球座標系→INS座標系）を算出する。これにより②および③から基準航跡を生成する。基準航跡は真値が未知である条件において、真値を模擬した本シミュレーションの基準となる。当該基準航跡よりこれを満足する角速度・加速度（基準角速度／加速度）を生成し、これを用いて航法演算を実施することで基準位置／基準姿勢／方位）が得られる。当該基準値が本シミュレーションに

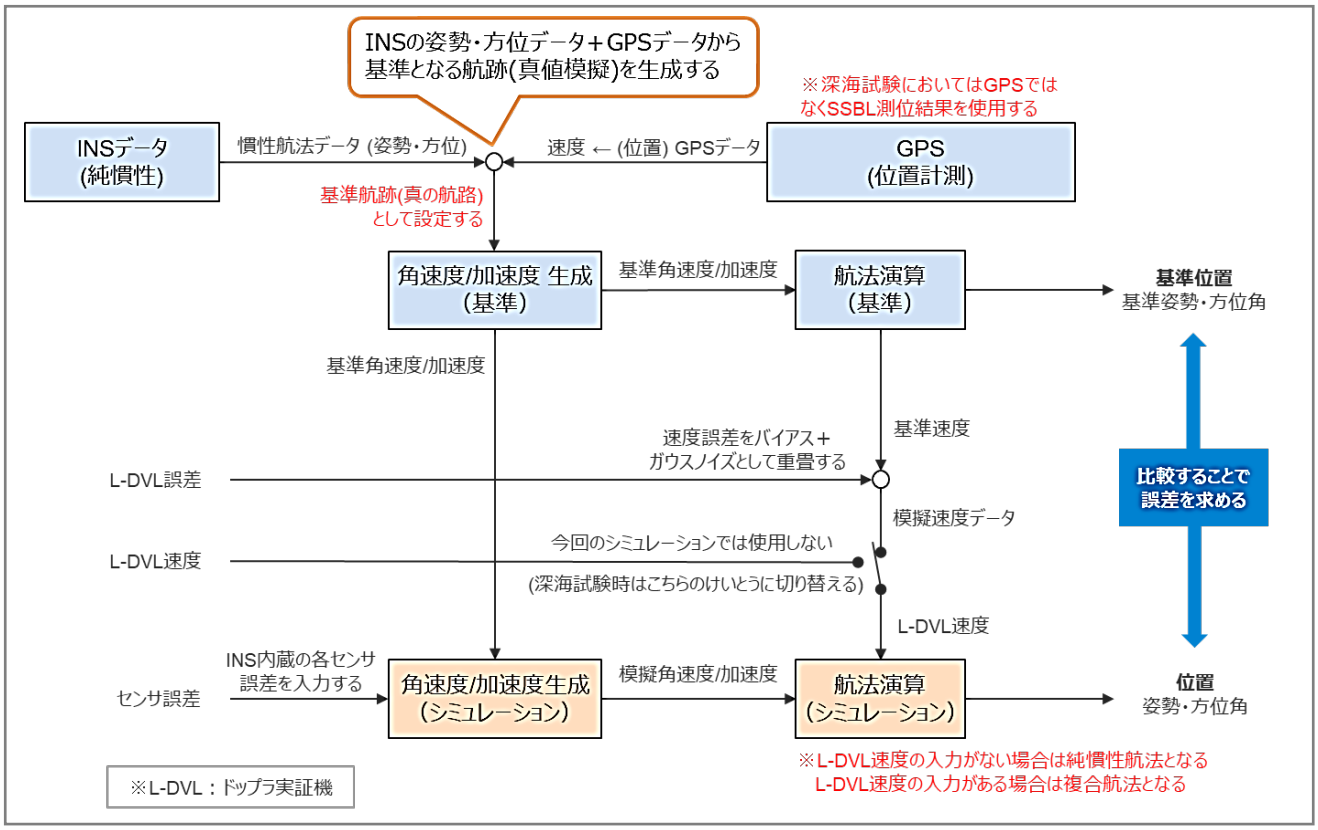


図 3-(4)-B-②-2　複合航法演算シミュレーション｜ブロック図｜慣性航法試験(小型船舶利用)

表 3-(4)-B-②-1　ジャイロ誤差パラメータ(1σ)

No.	項目	性能
1	バイアス誤差	メーカー機微情報のため非開示
2	ランダムドリフト誤差	
3	ミスアライメント安定性	
4	スケールファクタ安定性	

表 3-(4)-B-②-2　加速度計誤差パラメータ(1σ)

No.	項目	性能
1	バイアス誤差	メーカー機微情報のため非開示
2	ミスアライメント安定性	
3	スケールファクタ安定性	

おける純慣性航法演算結果、複合航法演算結果との比較対象（真値）となる。基準角速度／加速度にセンサ誤差を加味することにより模擬角速度／模擬加速度を生成し、これを模擬センサ出力として航法演算を実施する。当該航法演算が純慣性航法演算であり、この演算プロセスに模擬速度データを適用することにより複合航法演算となる。深海試験の場合、ドップラ実証機が計測する移動体速度が適用される。表3-(4)-B-②-1、表3-(4)-B-②-2に本シミュレーションにおけるセンサ誤差項目を規定する（各誤差の数値はメーカー機微情報のため非開示）。当該センサ誤差は、「JIMS180-JM」に組み込まれるリングレーザージャイロおよび加速度計の仕様値（理想的な誤差｜1σ）を採用している。

慣性航法試験にて取得された各データを基盤として、ドップラ実証機の模擬速度データによる複合航法シミュレーションを実施した。図 3-(4)-B-②-3 に慣性航法試験における小型船舶の基準航跡と GPS データを示す。基準航跡が GPS データ（GPS 航跡）とほぼ一致しており、当該基準航跡が真値模擬としての品質を有していることが確認された。深海試験の場合、GPS データーの代替えとして SSBL 測位結果を利用して、当該基準航跡を生成することになる。この際、SSBL 測位の精度、出力周期およびこれに起因するドップラ実証機・「かいこう」との同期が保障されない場合、「(4)-B｜実施内容①」に記載の通り、音響 DVL が出力する対地速度を入力するハイブリット航法演算結果から基準運動・基準航跡を得る。図 3-(4)-B-②-4 に慣性航法試験にて取得した「JIMA180-JM」の純慣性航法演算結果と GPS データを示す。併せて、GPS との純慣性航法誤差を図 3-(4)-B-②-5 に示す。慣性航法試験においては、純慣性航法誤差として 2589m@1H（≒1.4Nmile@1H）の位置誤差が生じている。「JIMS-180R-JM」の

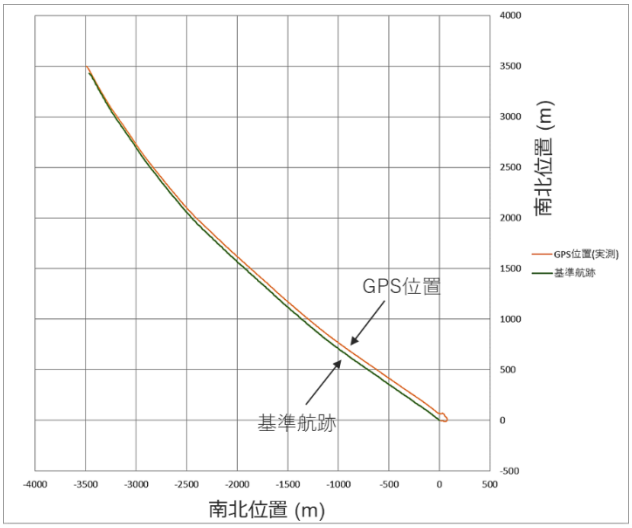
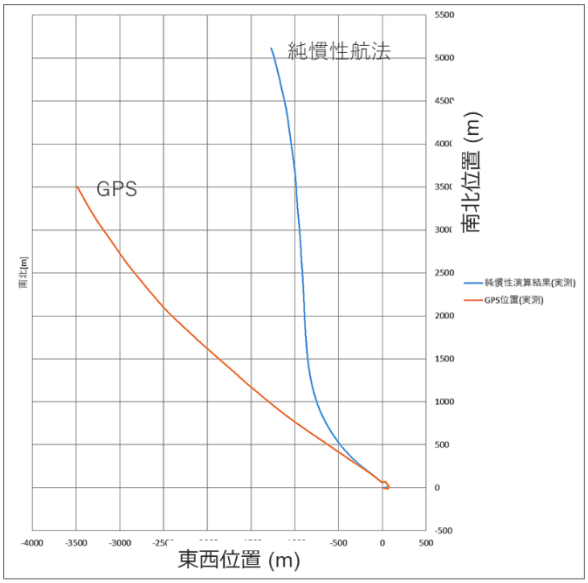
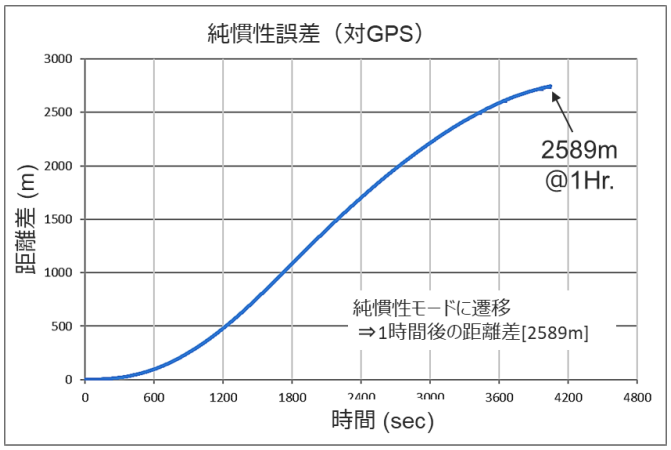


図 3-(4)-B-②-3
シミュレーション結果｜
データ比較｜
基準航跡データ／GPS データ



(←)図 3-(4)-B-②-4 シミュレーション結果
（データ比較｜純慣性航法／GPS）



(↑)図 3-(4)-B-②-5 シミュレーション結果
（純慣性航法誤差｜距離差｜対 GPS）

静置状態における位置誤差（設計仕様）は 0.5Nmile/hr・CEP（926m@1h・CEP）であるが、当該試験における船上アライメント及び航走中の小型船舶挙動により静置時性能とは条件が大きく異なる。本研究課題における最終目標では「慣性航法装置との複合航法を実施し純慣性航法と比較して約 10 倍の位置検出精度」を設定している。そこで、純慣性航法誤差である 2589m@1hr の 1/10 である 258.9m@1hr 以下の位置誤差に抑えることを目標として、設定パラメータを変化させ複合航法シミュレーションを実施した。各シミュレーション結果より、複合航法演算による位置誤差が 258.9m 以下であれば最終目標を達成したことを意味し、その際の設定パラメータはドップラ実証機が具備すべき性能仕様の目安となる。

複合航法シミュレーションにおける設定パラメータとして、深海試験におけるドップラ実証機の適用を想定し、実装に際し課題となる「速度誤差（計測精度）」「計測周期（計測頻度）」「取付ミスアライメント（設置精度）」の 3 種類を定義した。表 3-(4)-B-②-3 に各設定パラメータの詳細を示す。「速度誤差」はドップラ実証機が実際に計測する速度の精度を意味し、設計値は 0.02m/sec である。「計測周期」は最重要項目であり、深海における海水懸濁物からのレーザー反射（ドップラシフト）を検出する周期（頻度）を意味する。現況、まだ実環境下において実績はなく、「JIMS180-JM」におけるドップラ速度入力周期は 10Hz を規定している。「取付ミスアライメント」はドップラ実証機を「かいこう」に搭載する際の設置精度を意味する。複合航法においては、「JIMS180-JM」内部に仮想定義される三次元直

表 3-(4)-B-②-3　複合航法シミュレーション｜設定パラメータ

No.	項目	設定値	備考
1	速度誤差[m/s] （X軸方向）	0.02　0.05　0.10　0.15 0.20　0.30	・それぞれバイアス、ガウスノイズの成分に1/2ずつ配分する。 ・1軸速度検出であることからX軸（進行方向軸）にのみ設定する。
2	計測周期[Hz]	1.0　（1回計測／1s） 0.1　（1回計測／10s）	・設計値は10Hzであるが海水状態が悪条件であったことを想定し1Hz／0.1Hz程度の周期を設定。
3	取付ミスアライメント [deg] （Z軸回り）	0.5、1.0	ミスアライメントは定常的な誤差と考えられるため2値で固定。

行座標系における「かいこう」進行方向軸と、ドップラ実証機のレーザー照射方向ベクトルとが完全に一致しているのが理想状態である。しかし理想状態を提供することは不可能であり、取付ミスアライメントを少なからず発生する。ここで「速度誤差」は、設定した数値を上限としてガウスノイズ成分とバイアス成分とを 1/2 ずつ配分し、基準速度に付加している。「計測周期」の設定としては、1.0Hz｜0.1Hz といずれも設計値 10Hz と大きく乖離させており、悪条件下におけるドップラ実証機の最低検出頻度を想定としている。

以上の設定パラメータをそれぞれ変更して複合航法シミュレーションを実施した。各シミュレーション結果を表(4)-B-4 にまとめる。併せて、図 3-(4)-B-②-6～図 3-(4)-B-②-9 に、各シミュレーションにおける位置誤差変化を示す。基本的に、取付ミスアライメントが位置誤差に及ぼす影響は顕著であり、海中探査機への実装に関して回避できない課題である。一方、取付ミスアライメントはバイアス成分（不変誤差）として表出するため、計測結果より当該ミスアライメントを推定する手段もある。複合航法におけるドップラ実証機の実用性を検証するのに重要となるが、計測精度（速度誤差）と計測周期である。両パラメータともにドップラ実証機の性能そのものを示す指標である。表 3-(4)-B-②-4 中の青字記載は、最終目標を達成するための位置誤差目標（258.9m@1H）以下を満足した設定パラメータ項目およびシミュレーション結果である。計測周期として 1Hz｜0.1Hz と厳しい条件だったにも関わらず、速度誤差が 0.02－0.05m/s までに抑制されれば、位置誤差目標以下を達成している。ドップラ実証機の設計仕様における計測精度は 0.02m/s であり、シミュレーション上はその倍程度の速度誤差まで許容する。本シミュレーション結果から想定されるドップラ実証機が具備すべき条件について下記に纏める。

表(4)-B-4　複合航法シミュレーション｜結果（位置誤差）

No.	ミスアライメント [deg]	計測周期 [Hz]	速度誤差 [m/s]	位置誤差 [m]	No.	ミスアライメント [deg]	計測周期 [Hz]	速度誤差 [m/s]	位置誤差 [m]
1	0.5	1	0.02	73.0	13	1	1	0.02	109.1
2	0.5	1	0.05	155.8	14	1	1	0.05	190.6
3	0.5	1	0.1	264.3	15	1	1	0.1	296.8
4	0.5	1	0.15	341.6	16	1	1	0.15	367.8
5	0.5	1	0.2	367.8	17	1	1	0.2	375.9
6	0.5	1	0.3	694.1	18	1	1	0.3	739.3
7	0.5	0.1	0.02	64.4	19	1	0.1	0.02	129.6
8	0.5	0.1	0.05	109.8	20	1	0.1	0.05	164.4
9	0.5	0.1	0.1	198.3	21	1	0.1	0.1	232.8
10	0.5	0.1	0.15	290.2	22	1	0.1	0.15	317.0
11	0.5	0.1	0.2	382.9	23	1	0.1	0.2	405.5
12	0.5	0.1	0.3	569.4	24	1	0.1	0.3	587.4

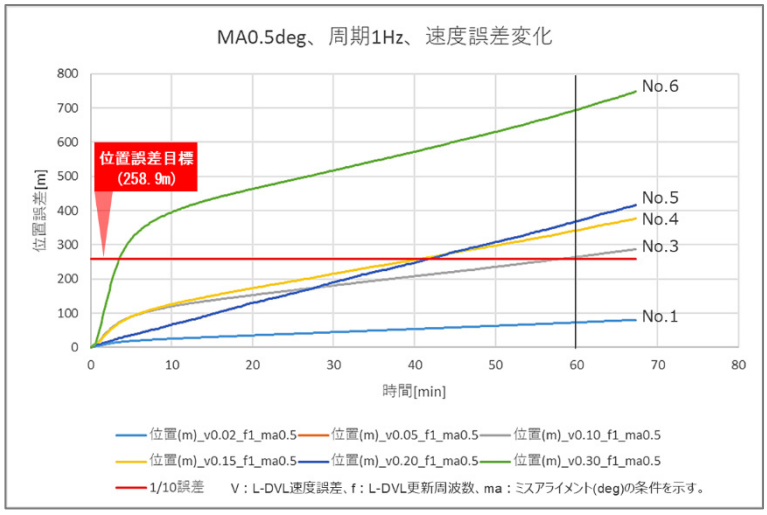


図 3-(4)-B-②-6
シミュレーション結果｜複合航法演算
(No.1～No.6)

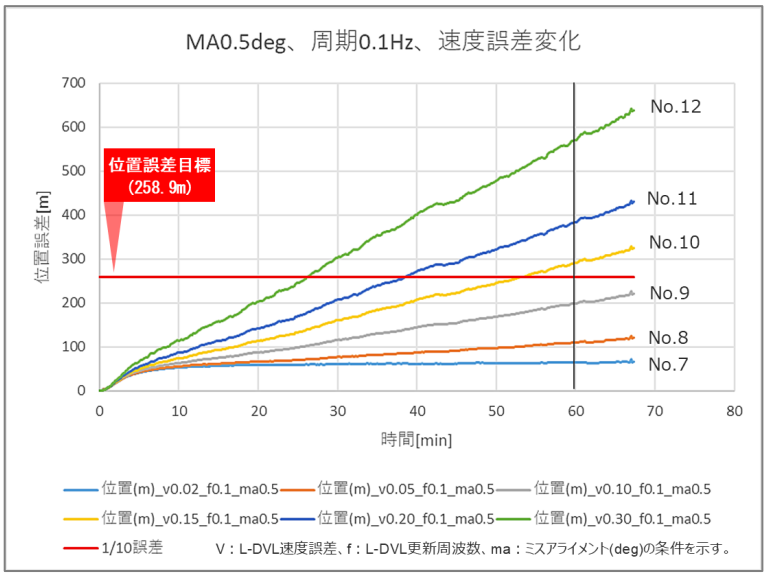


図 3-(4)-B-②-7
シミュレーション結果｜複合航法演算
(No.7～No.1)2

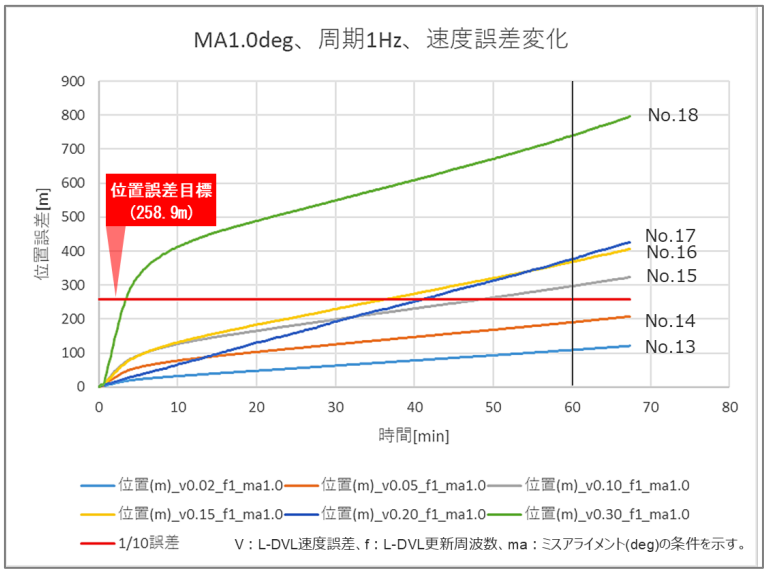


図 3-(4)-B-②-8
シミュレーション結果｜複合航法演算
(No.13～No.1)8

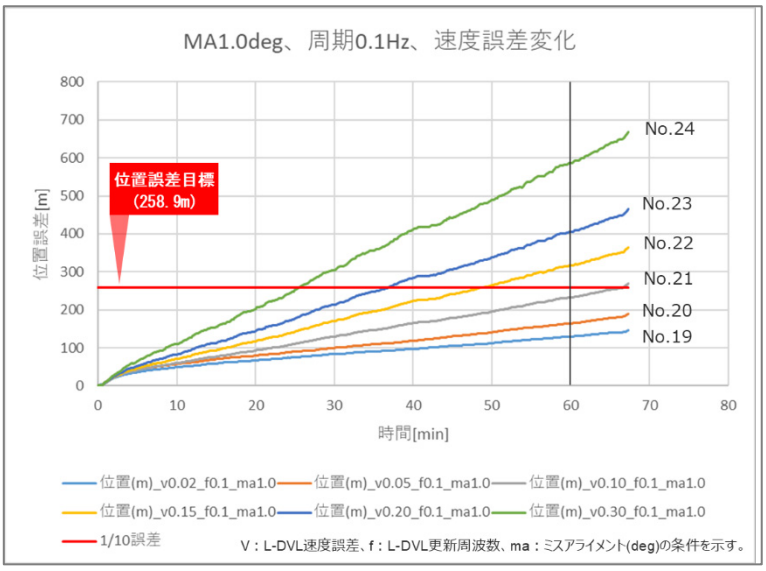


図 3-(4)-B-②-9
シミュレーション結果｜複合航法演算
(No.19～No.24)

- 取付ミスアライメントは可能な限り抑制する。0.5-1.0deg 程度に抑えられると良好な結果を得る可能性が高い。
- ドップラシフト検出（≒速度計測）する周期としては、1 回／10 秒以下ならば、速度精度が良好であることを条件に一定の効果を有する。
- 計測する速度誤差が 0.1m/s 程度でも条件によっては許容される。基本的には設計仕様 0.02m/s 以下の誤差軽減が実現すれば良好な効果を有する。
- ドップラ実証機の各設計仕様を満足した場合、複合航法精度は良好に担保される。

本シミュレーション結果は、基本的に設定パラメータの変化がなく、また計測環境（試験海域の気象・海象）が大きく変化しないことが前提となる。併せて、航走した小型船舶は 2 次元移動体のため、海中探査機のような三次元移動体においては、位置誤差を増長する要因が多くなる。そのため本シミュレーション結果のみにより、実環境下における技術検証結果を模擬できるものではない。一方、慣性航法装置の仕様や複合航法に要する諸条件は既知であることから、今後ドップラ実証機を海中探査機に適用して技術検証をする際に、本シミュレーション結果から得られる知見･条件を目標性能および性能改善の指標とする意義を持つ。

[(4)-B｜実施内容③｜複合航法演算シミュレーション（複合航法性能評価）]

＜概要＞

実施項目「3.(4)-A」にて設計・製作したドップラ実証機を用いて、「かいこう」に当該実証機を搭載し深海試験を実施した（「(4)-A｜実施内容⑤」）。その結果、音響DVLが出力する対水速度と同レベルの高品質なレーザードップラ速度（耐懸濁物速度）が計測された。そこで、本計測データを「かいこう」が装備する慣性航法装置の演算出力に適用し、レーザードップラ複合航法演算を試行（シミュレーション）した。併せて、同出力を適用した純慣性航法演算を試行し、レーザードップラ複合航法演算結果と比較評価した。その結果、純慣性航法の10倍以上の位置検出精度をレーザードップラ複合航法が有していることが示された。

(a)複複合航法演算シミュレーション｜システム構成（深海試験）｜「かいこう」利用）

「(4)-A｜実施内容⑤」にて実施した深海試験では、大室ダシ・大室海穴を「かいこう」が航走し、ドップラ実証機が海中懸濁物からのドップラシフトを検出し、レーザードップラ速度（対懸濁物速度）を計測した。全長約 800m の大室海穴内部の航走には制限があることから、最長距離を航走した際の計測データを適用したシミュレーションを実施する。図 3-(4)-B-②-10 に複合航法演算シミュレーションのシステム構成をブロック図にて示す。ドップラ

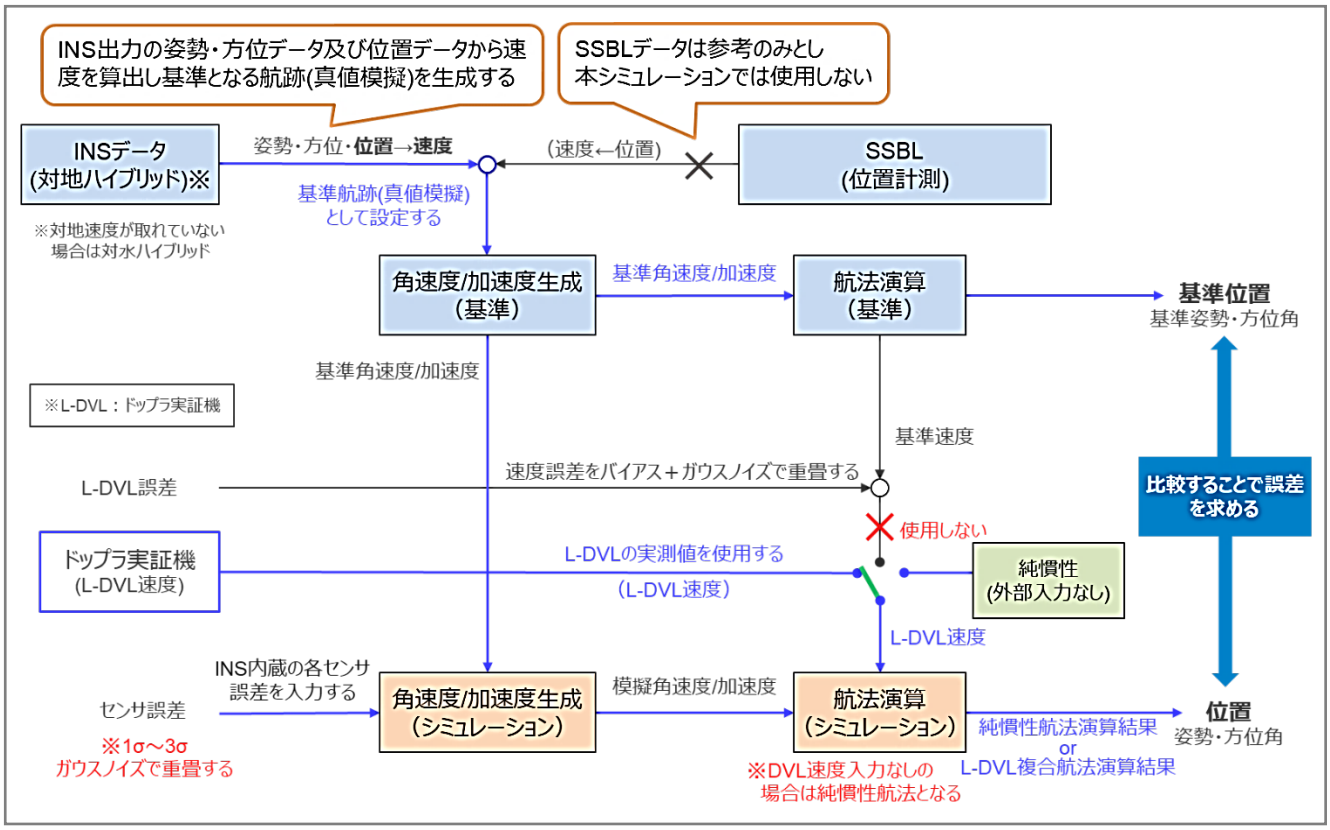


図 3-(4)-B-③-1　複合航法演算シミュレーション｜ブロック図｜深海試験結果(「かいこう」利用)

実証機が計測する速度データ（図中 L-DVL 速度）を適用した複合航法演算をシミュレーションする。本シミュレーションでは先ず、基準航跡を生成させる。「かいこう」にドップラ実証機を搭載した深海試験においては、「かいこう」装備の慣性航法装置（図 3-(4)-B-①-1）に対し、同じく「かいこう」装備の音響 DVL が出力する移動速度を慣性航法装置に入力する音響ドップラハイブリット航法を実施している。当該ハイブリット航法中は、音響 DVL が対地速度を検出している場合は音響対地速度ハイブリット航法(以降､対地ハイブリット航法)を、対水速度を検出している場合は音響対水速度ハイブリット航法（以降、対水ハイブリット航法）を実施している。そこで、対地ハイブリット航法による慣性航法装置が出力する①姿勢・方位データ（INS 座標系）および②位置データ（地球座標系）を用いて、③速度データ（地球座標系→INS 座標系）を算出する。これにより②および③から基準航跡を生成する。基準航跡は真値が未知である条件において、真値を模擬した本シミュレーションの基準となる。当該基準航跡よりこれを満足する角速度・加速度（基準角速度／加速度）を生成し、これを用いて航法演算を実施することで基準位置／基準姿勢／方位）が得られる。当該基準位置が､本シミュレーションにおける純慣性航法演算およびレーザードップラ複合航法演算(以降、複合航法演算）との比較対象（真値模擬）となる。基準角速度／加速度にセンサ誤差を加味することにより模擬角速度／模擬加速度を生成し、これを模擬センサ出力として航法演算を実施する。当該航法演算が純慣性航法演算であり、この演算プロセスにドップラ実証機が計測したレーザードップラ速度（図中、L-DVL 速度）を入力することにより複合航法演算となる。各演算プロセスによる出力値（位置）を基準位置とそれぞれ比較することで位置誤差が求められ、当該位置誤差が位置検出精度の評価値となる。

本シミュレーションでは、深「かいこう」支援母船による SSBL 測位結果を適用せず、上記対地ハイブリット航法により基準航跡を算出する。「かいこう」装備の慣性航法装置および音響 DVL はいずれもハイエンドクラスの航行機器であり、対地ハイブリット時の位置検出精度は「航走距離の 0.1%CEP」と非常に高い（例｜1,000m 航走時の位置誤差：1m）。一方、SSBL 測位による位置検出は、計測深度（音響伝搬距離）および支援母船の挙動や海象等に起因する不定の分散を有し、また支援母船の音響システム仕様により測位周期にも数秒を要するため、シミュレーションにおける基準航跡として品質を保証することが困難となる。

本シミュレーションにおける各センサ誤差は、表 3-(4)-B-②-1、表 3-(4)-B-②-2 に規定した値と同様となる。当該誤差が工場出荷時における理想状態であるセンサ誤差（経年劣化のない設計仕様誤差）を 1σ とし、2σ までの誤差をガウスノイズとしてシミュレーションの演算プロセスに重畳させ、各演算を試行する。

(b)複合航法演算シミュレーション｜データ選定（深海試験）｜「かいこう」利用）

慣性航法演算を評価するためには、地球固有周期となるシューラー周期（Period of Schuler ： 84.4min）を考慮し、当該周期以上の計測時間を適用することが望ましい。本シミュレーションの対象となる「(4)-A｜実施内容④」に記載する 2 度の深海試験は、何れも大室ダシ・大室海穴を「かいこう」が航走した際の計測データ（レーザードップラ速度）となる。一方、当該海穴の全長は短く、シューラー周期を超過する計測時間を要するデータは限られる。その中、「2024 年 12 月 14 日」の計測において、「かいこう」は大室海穴を連続して往復航走しており、往路から復路に切り替える際に音響対地速度が取得できない区間や、ドップラ実証機による計測が安定しない区間が存在するものの、比較的安定してシューラー周期以上の計測時間を有する。併せて、当該計測の結果、「かいこう」装備の音響 DVL が出力する音響対水速度との比較検証において、安定域の誤差が僅か 2.5%と他の深海試験時の計測結果と比較して最も精度の高いレーザードップラ速度が計測されている（図 3-(4)-A-⑤-12｜表 3-(4)-(A)-⑤-1)。また、当該計測においてドップラ実証機は、計測時間を通して 10kHz 程度の周期にてレーザードップラ速度を計測しており、複合航法演算性能を向上させることが期待される。以上を鑑み、「2024 年 12 月 14 日」における深海試験にて取得されたレーザードップラ速度、および「かいこう」装備の慣性航法装置出力をシミュレーションに適用する。

(c)複合航法演算シミュレーション｜位置検出精度の検証（深海試験）｜「かいこう」利用）

図 3-(4)-B-③-2 に複合航法演算シミュレーションにより試算された基準航跡および SSBL 測位のプロットを示す。真値模擬である基準航跡は、対地ハイブリット航法時の出力から試算されており、最も真値に近いと想定される。この際の支援母船が「かいこう」を SSBL 測位した結果ともよく合致しており、本計測において音響対地速度が安定して取得されていたこ

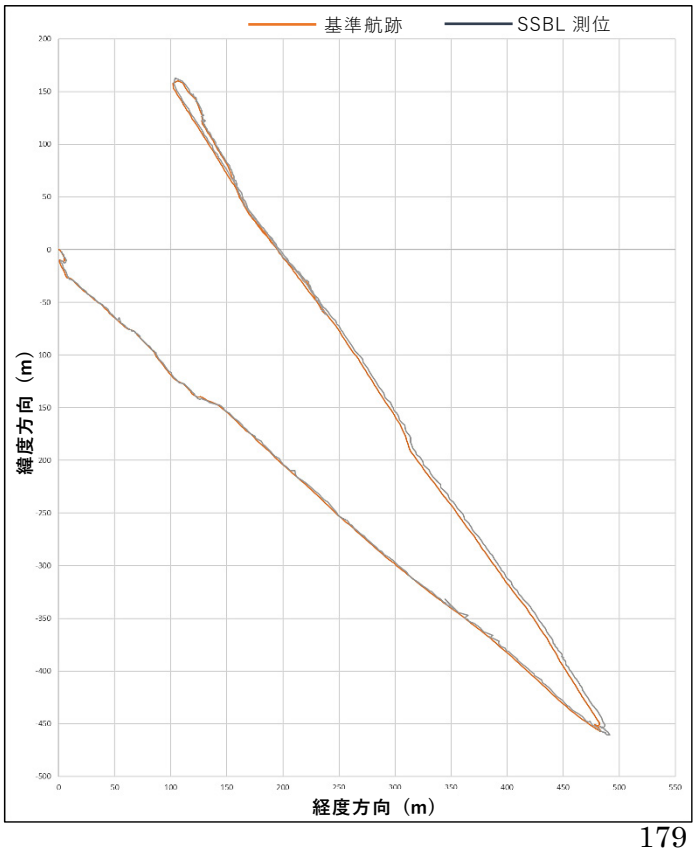


図 3-(4)-B-③-2
航跡図｜シミュレーション結果｜センサ誤差：1σ｜
基準航跡－SSBL 測位｜
深海試験データ｜2024 年 12 月 14 日｜大室海穴｜
基準航跡(橙線)／SSBL 測位(紺線)

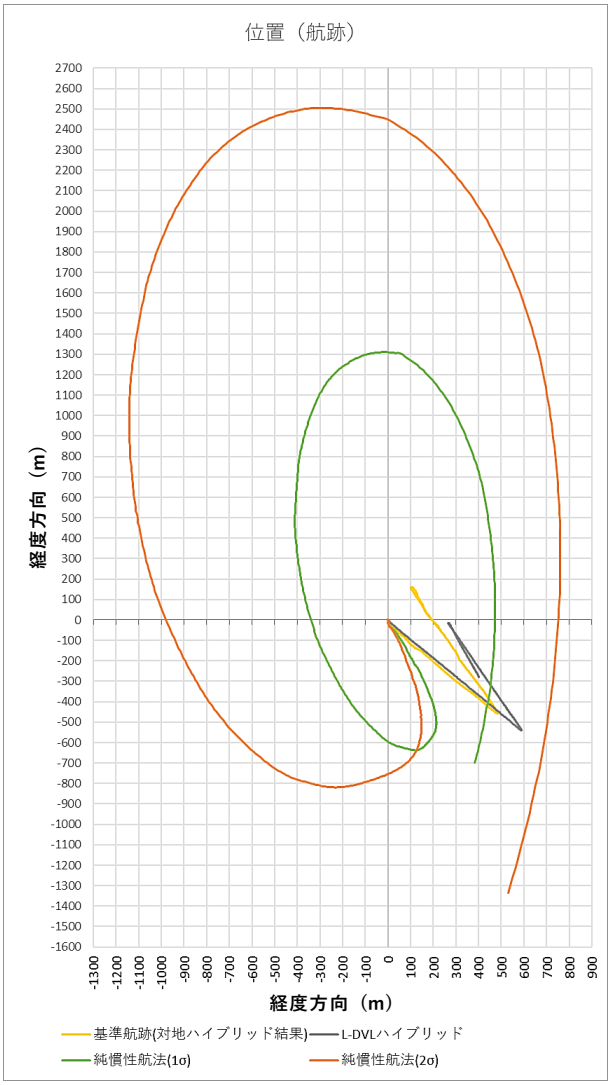


図 3-(4)-B-③-3
航跡図｜シミュレーション結果｜センサ誤差：1σ・2σ｜
基準航跡－純慣性航法－複合航法｜
深海試験データ｜2024 年 12 月 14 日｜大室海穴｜
基準航跡（黄線）／レーザードップラ複合航法（紺線）
純慣性航法 1σ（緑線）／純慣性航法 2σ（橙線）

とが推察される。本シミュレーションでは、当該基準航跡に対して、純慣性航法および複合航法との各位置誤差を求め、当該誤差から両者の位置検出精度を比較評価する。

図 3-(4)-B-③-3 にセンサ誤差 1σ・2σにおける純慣性航法演算および複合航法演算の航跡（シミュレーション結果）を示す。併せて、両航法演算結果における基準航跡からの位置誤差（センサ誤差 1σ・2σ）を図 3-(4)-B-③-4、図 3-(4)-B-③-5 にそれぞれ示す。

純慣性航法演算において、「かいこう」航走初期より基準航跡から逸脱していく航跡が確認される。本シミュレーションに適用する深海試験では、大室海穴を「かいこう」が V 字で往復運動した際の慣性航法装置出力（対地ハイブリット航法出力）を基に試算されている。「かいこう」が搭載する慣性航法装置「JIMS-180R-JM」対し、音響 DVL からの速度入力が何もない条件における演算（純慣性航法演算）性能は大きく劣化することは周知であり、同装置の設計仕様での位置検出精度は、静定状態においても 0.5Nmile/hr である。本計測において「かいこう」は、0.2-0.4m/sec 程度の低速にて大室海穴内部を航走しており、潮流等の外乱を含め航走時に多角的な慣性力が印加される。そのため、静定状態と比較して当該誤差は大幅に増加する。本シミュレーションにおいては、航走時間 82.7 分（≒シューラー周期）において純慣性航法誤差（位置誤差）が最大となり、センサ誤差 1σにおいて 1252.7m、センサ誤差 2σにおいて 2505.4m と試算された。

一方、同深海試験にてドップラ実証機が計測したレーザードップラ速度を、慣性航法演算に適用した複合航法演算における当該位置誤差は、センサ誤差 1σにおいて 182.7m、センサ誤差 2σにおいて 182.8m にまで抑制されている。レーザードップラ速度は、「かいこう」進行方向に対する耐懸濁物速度であり、対水速度に相当する。実海域には潮流が存在するため、対地速度と比較して対水速度の精度は劣る一方、一定の精度が保障された速度入力が高い確

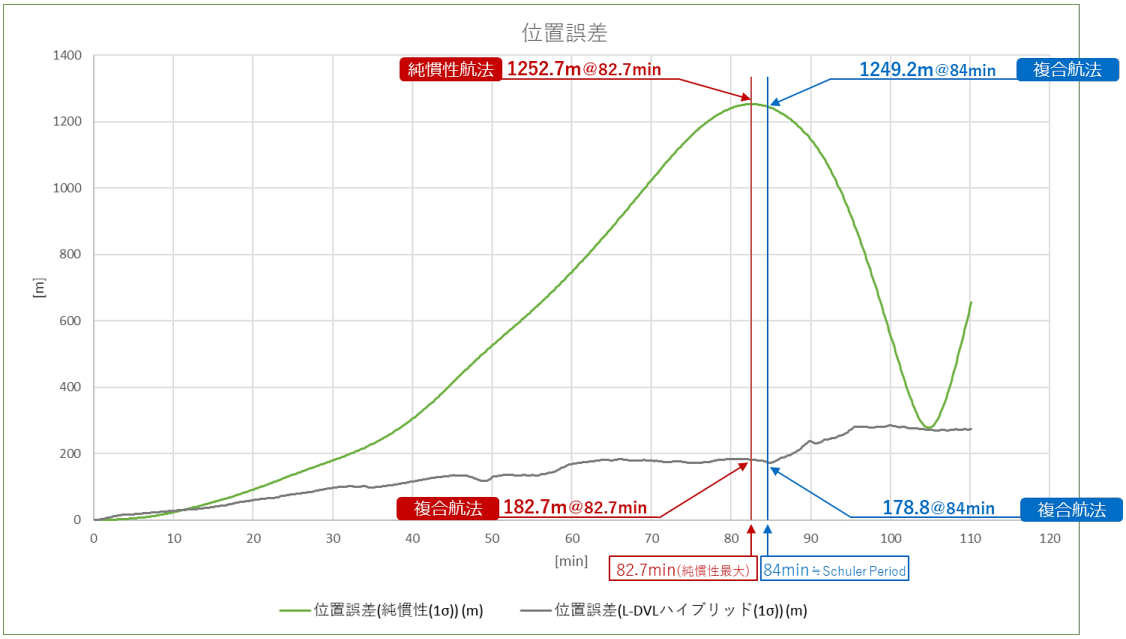


図 3-(4)-B-③-4　位置誤差｜シミュレーション結果｜センサ誤差：1σ｜
純慣性航法誤差(緑線)／複合航法誤差(紺線)｜深海試験データ｜2024 年 12 月 14 日

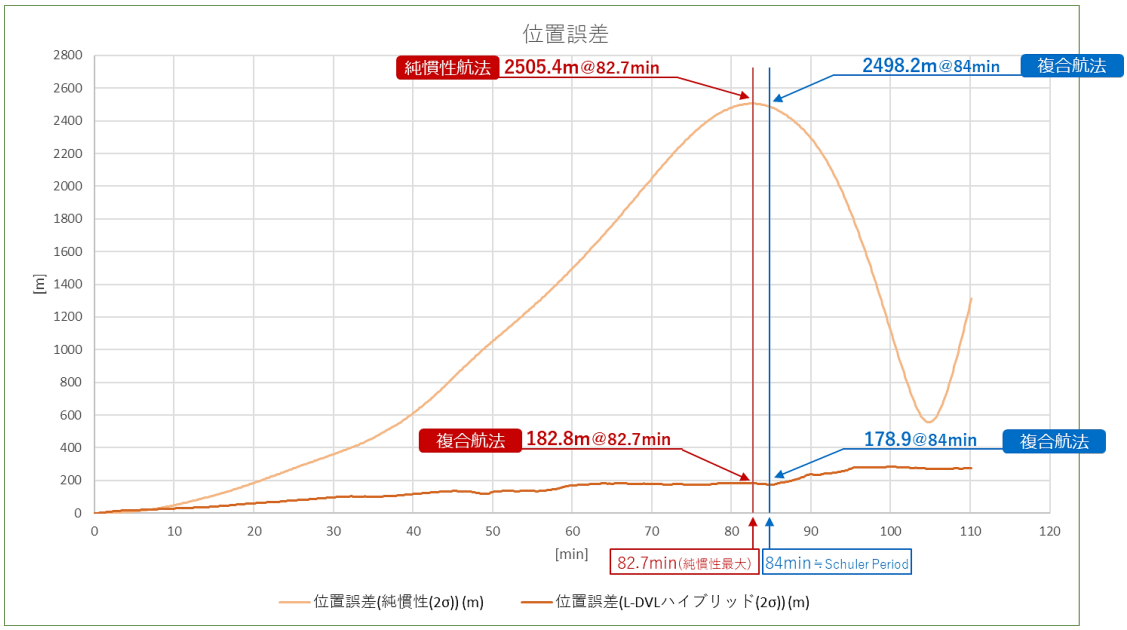


図 3-(4)-B-③-5　位置誤差｜シミュレーション結果｜センサ誤差：2σ｜
純慣性航法誤差(薄橙線)／複合航法誤差(橙線)｜深海試験データ｜2024 年 12 月 14 日

率（約 10kHz）で慣性航法演算に入力されることで、複合航法演算の精度が向上したと考えられる。複合航法演算における位置誤差は、時間経過に伴い僅かに増加傾向ではあるものの、レーザードップラ速度の入力によりよく抑えられており、シューラー周期も勘案しても、長時間航走に対しても比較的良好に状態推定が更新されたことを意味する。

表 3-(4)-B-③-1 に、各航法演算における位置誤差（位置検出精度）をまとめる。複合航法においてはレーザードップラ速度の入力により、センサ誤差に関わらず位置誤差が安定していることがわかる。当該入力により状態推定が進むとともに、速度に起因する演算誤差が軽減されるため、複合航法演算がセンサ誤差に依存せずに進むためである。「かいこう」搭載の慣性航法装置「JIMS-180R-JM」は 2013 年の「かいこう」建造当初より実装されており、経

表 3-(4)-B-③-1　シミュレーション結果（位置誤差機｜純慣性航法／複合航法）

航法演算	位置誤差[m]		位置検出精度比較 （純慣性航法／複合航法）
	航走時間：82.7min （純慣性誤差最大時）	航走時間：84min （シューラー周期）	
① 純慣性航法 （センサ誤差：1σ）	1252.7m	1249.2m	①/② （センサ誤差：1σ） 約 6.9 倍
② 複合航法 （センサ誤差：1σ）	182.7m	178.8m	
③ 純慣性航法 （センサ誤差：2σ）	2505.4m	2498.2m	②/④ （センサ誤差：2σ） 約 13.7 倍
④ 複合航法 （センサ誤差：2σ）	182.8m	178.9m	

年的な変化（劣化）を含めセンサ誤差は理想状態（工場出荷性能：1σ）を満足していない。そのため、本計測時における当該装置のセンサ誤差は理想状態（1σ）～2σの間にあると想定される。純慣性航法と複合航法における位置検出精度を、純慣性航法誤差最大時において比較評価すると、センサ誤差 1σにおいて約 6.9 倍（位置誤差 1252.7m/182.7m）、センサ誤差 2σにおいて約 13.7 倍となる。「最終目標｜(3)」および「(4)-A｜達成目標（終了時）」、「(4)-B｜達成目標（終了時）」のにおいては、慣性航法装置とレーザードップラ速度による複合航法において、純慣性航法と比較して約 10 倍の位置検出精度を目指しており、本結果により、当該目標を達成したことが実証された。

(5) 試験手法策定／試験実施／データ取得

[(5)｜目的]

各要素課題における実施項目の遂行に際し、良好なデータを取得するとともに、実機・実環境下（浅海・深海）における各研究成果の有効性を検証するために効果的な試験手法の策定、試験の実施、及びデータの取得を行うことで、各実施項目を効率的に進捗させる。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(5)｜達成目標（終了時）]

各実施項目の“終了時の目標”を達成するために要する各フィールド試験（浅海試験｜深海試験）手法を策定し実施する。

[(5)｜達成目標（終了時）の達成状況]

■各実施項目の“終了時の目標”達成に要するﾌｨｰﾙﾄﾞ試験手法を策定・実施　：　**達成**

[(5)｜実施内容①｜R2年度試験の策定／実施]

＜概要＞

基礎データ取得を目的とした水槽試験および浅海試験を策定・実施した。光学系の基本試験を実施するほか、物性推定アルゴリズムの基本設計に資する基礎データを取得した。実施項目「3.(2)-A」における反射率評価機の基本設計、「3.(3)-A」「3.(3)-B」の実施に要するレーザー反射率（強度情報）の基本特性を理解するための基礎データを取得する。併せて、レーザー測距現行機の光学系システムの特性を把握し、各評価機開発に反映させる。特にレーザー照射対象の色差・表面形状に起因する強度情報の差異を評価することにより、海底の物性推定（海底の類別）を実現する機械学習に利用する。

(a)試験治具（評価用パネル）の設計・製作

水槽試験・海域試験の実施内容に応じ試験治具（評価用パネル）を設計・製作した。各試験では、既存装置を用いたレーザー反射率の基本特性に関するサンプリングを目的として、色差・表面形状の異なる既知物体を水槽および海底に配置して実施した。レーザー照射対象となる既知物体は、異なる表面形状となる 2 種類のアルミ合金製金属板（300mm×300mm）であり、滑らかな表面処理が施されているものと、金属板表面に凹凸加工の壁紙を張り付けたものとなる。当該 2 種類の金属板に対して、異なる色彩の 40 色の塗装をそれぞれに施し、レーザー照射対象の評価ボードとして反射率計測（強度情報取得）を実施する。試験効率を考慮し、8 枚の評価ボードを同時に配置することが可能な計測フレームを製作し、各試験で

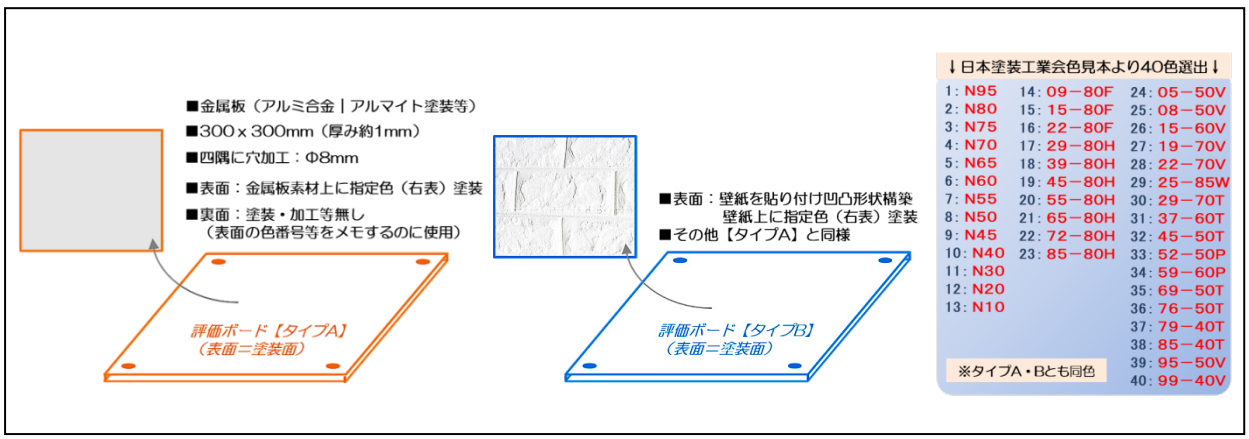


図 3-(5)-①-1　評価用パネル｜反射率計測用｜色差・表面形状評価

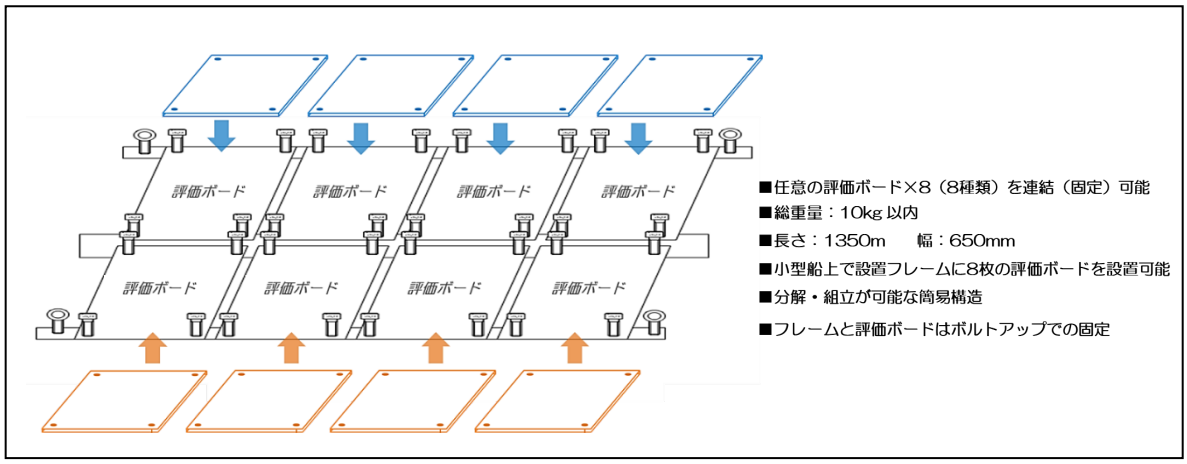


図 3-(5)-①-2　計測フレーム｜評価用プレート×8 式搭載

は当該計測フレーム（評価用プレート×8）を試験環境に設置した。図 3-(5)-①-1 および図 3-(5)-①-2 に、本試験にて使用する評価用プレートと計測フレームの概要を示す。

(b) 水槽試験〔R2年度〕（反射率基礎データ｜現行機｜評価用プレート｜多目的プール）

浅海試験に備え、レーザー測距現行機をはじめ各周辺機器を含む試験機器・計器の動作確認を実施すると共に、評価用パネル配置の組合せ、当該現行機に対する計測フレームの設置状態（位置・姿勢）について確認した。本水槽試験は、JAMSTEC が所有する「多目的プール」を利用して実施し、低濁度環境下（プール水環境）における固定距離におけるレーザー反射率を確認した。図 3-(5)-①-3 に水槽試験のコンフィギュレーションを示す。

(c) 浅海試験〔R2 年度〕（基礎データ取得｜反射率｜現行機｜評価用プレート｜石垣島海域）

水槽試験における各調整を経て浅海試験を策定・実施した。深海環境と同程度の光学伝搬環境を想定し、石垣島周辺海域を選定した。当該海域は小型船舶で移動が可能な距離・範囲（に最大水深が 20m 程度の浅海域が広がり、透明度の高い（濁度の低い）海水質条件が本試験の目的に合致する。併せて、試験時の気象・海象状況に応じて、試験ポイントを適宜、変

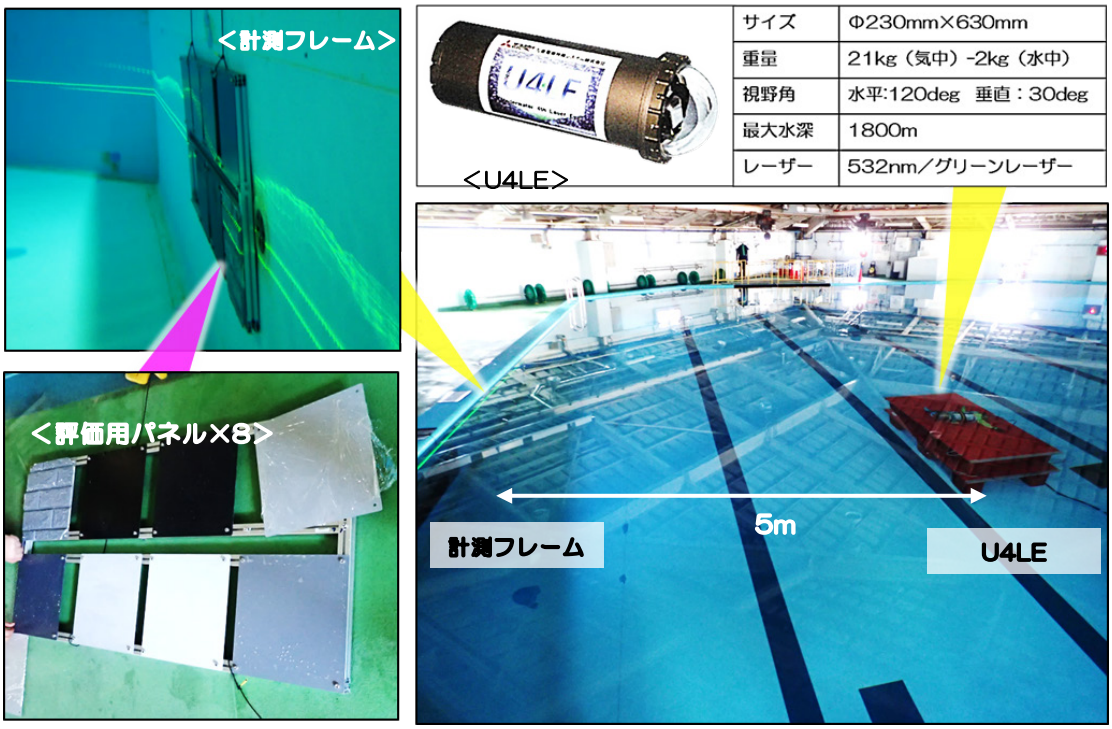


図 3-(5)-①-3　計測系コンフィギュレーション｜水槽試験｜多目的水槽｜評価用パネル

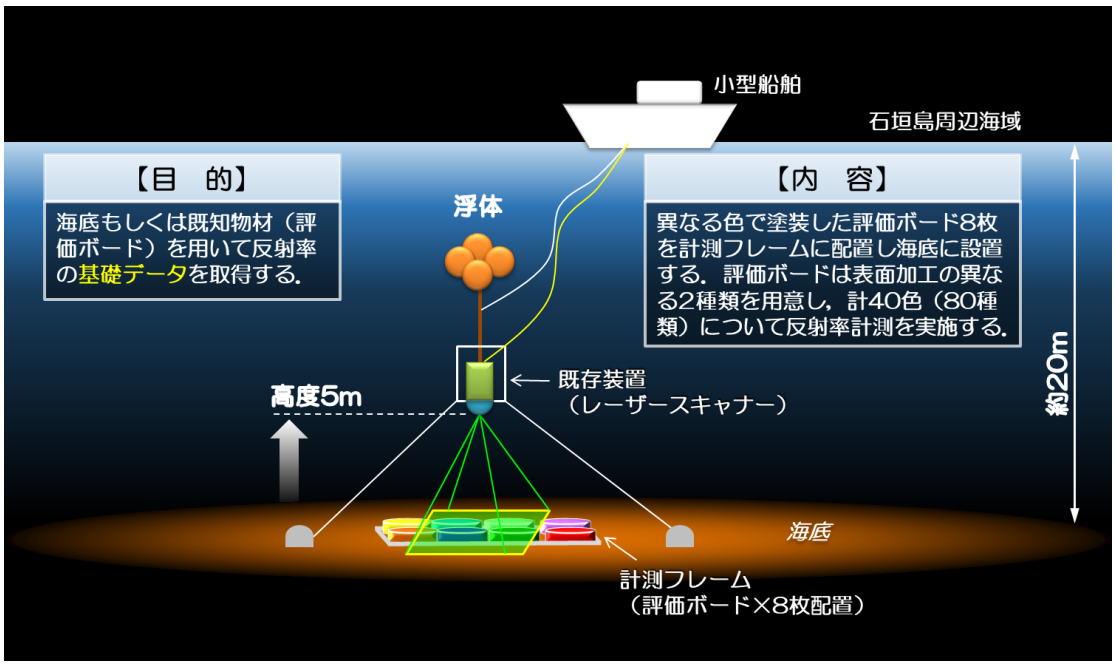
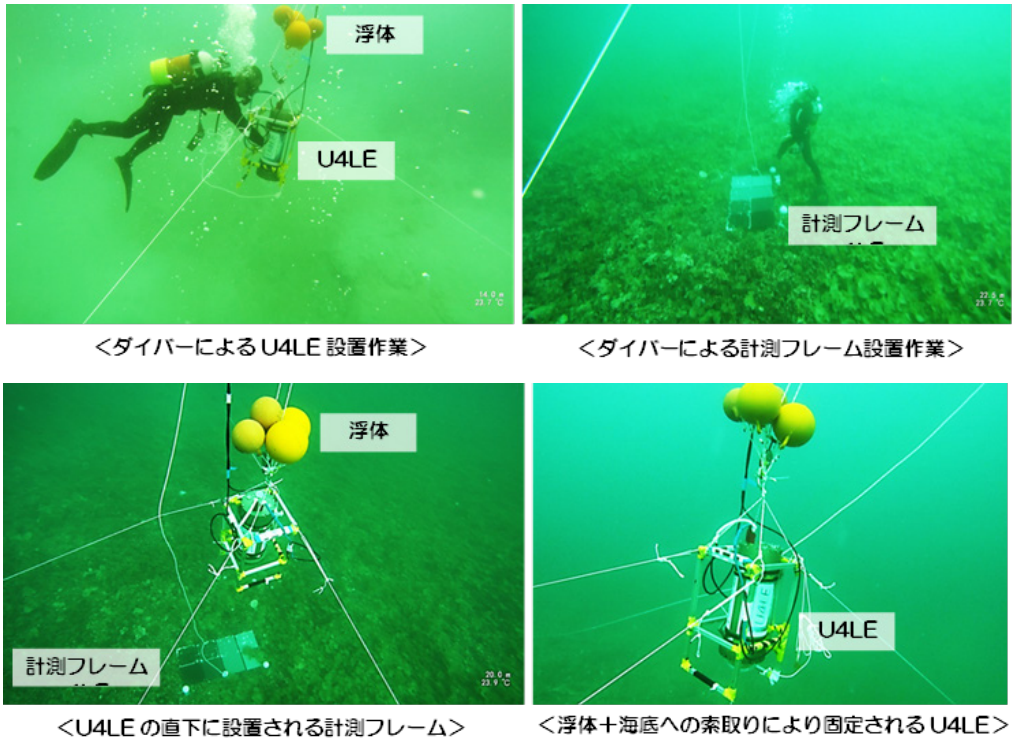


図 3-(5)-①-4　計測系コンフィギュレーション｜浅海試験｜石垣島周辺海域｜評価用パネル

更・移動することが可能であり、限られた期間で効率的に試験を実施するために良好なフィールドである。図 3-(5)-①-4 に当該海域試験におけるコンフィギュレーションを示す。本試験では、先に実施した水槽試験において各調整を済ませたレーザー測距現行機（三菱電機特機システム(株)社製レーザースキャナー｜U4LE）を使用し、海底に設置した計測フレーム（評価用プレート×8 枚）を計測対象として、その反射率（強度情報）を取得した。当該現行機は海底から約 5m の高度に固定し、電源／信号系統は小型船舶より供給しており、各調整および実計測結果をリアルタイムに確認することが可能である。図 3-(5)-①-5 に当該浅海試験のおける海中環境の様子を示す。



<ダイバーによるU4LE設置作業>　<ダイバーによる計測フレーム設置作業>

<U4LEの直下に設置される計測フレーム>　<浮体＋海底への索取りにより固定されるU4LE>

図 3-(5)-①-5　試験環境｜浅海試験｜石垣島周辺海域｜評価用パネル

寸法	：21mL×21mW×1.5～3.3mD
構造	：鉄筋コンクリート（水密）
観察窓	：0.4m×0.6m（3カ所）
	0.6m×0.8m（2カ所）
	0.8m×1.0m（1カ所）
加温	：温30°Cまで加温可能
冷却	：なし

図 3-(5)-②-1　水槽試験環境（多目的プール｜海洋研究開発機構）

寸法	：	40mL×4mW×2mD（一部2.3m）
構造	：	鉄筋コンクリート（水密）
観察窓	：	2カ所
クレーン	：	固定ジブクレーン
		天井クレーン（他設備と併用）
台車	：	計測台車（縦行式）
		・アナログ制御｜1軸2輪駆動方式
		・走行速度 → 0.2～2.0m/s
		・速度変動率 → ±3%F/S以内

図 3-(5)-②-2　水槽試験環境（多目的水槽｜海洋研究開発機構）

[(5)｜実施内容②｜R3年度試験の策定／実施]

＜概要＞

各実施項目において要する基礎データの取得を目的としてレーザー測距現行機、伝搬時間・反射率評価機およびドップラ評価機を用いた水槽試験・浅海試験・岸壁試験を実施した。当該試験では、各実施項目にて構築された評価機の基本性能について定量評価することを目的とし、既知物材をレーザー照射対象として使用した。併せて、レーザー測距現行機を用いて、特に色差に起因する反射率変化の基礎データを取得する試験を実施した。また、伝搬時間・反射率実証機（Green レーザー実証機／UV レーザー実証機）へ適用する深海試験用耐圧ガラス製ビューポートの耐圧試験を実施した（性能評価／解析）。これら試験にて取得されたデータを、各実施項目の取組みにフィードバックし、各実証機の詳細設計に反映する。

(a)水槽試験〔R3年度〕（基本性能評価｜現行機＋評価機｜評価プレート｜多目的プール）

構築した伝搬時間・反射率評価機に組込まれる各AGCの機能評価を含めた基本性能について評価・検証する水槽試験を策定・実施した。また、レーザー測距現行機を用いて反射物の色差による反射率変化（傾向）に対する基礎データ取得を目的とした水槽試験・浅海試験を実施した。「(5)｜実施内容①」に実施した水槽試験・浅海試験にて使用した計測フレーム＋評価用プレートを使用することで、基礎データの妥当性を検証する。レーザー測距現行機および伝搬時間・反射率評価機を用いて、計測フレーム上に配置される評価用パネルを既知の反射物標として測定した。評価用パネルは、異なる表面形状となる2種類の金属板（300mm×300mm）であり、滑らかな表面処理が施されているものと、金属板表面に凹凸加工の壁紙を張り付けたものとなる。当該2種類の金属板に対して、異なる40色の塗装をそれぞれに施工し、反射率を計測する。本計測において、特に光学吸収性の高い黒色を含むグレースケール（グレー系統色の色差）に対する反射率の差異について詳細に測定し、「(5)｜実施内容①」にて実施した各試験の計測結果と比較評価する。

水槽試験においては、伝搬時間・反射率評価機を槽内に固定設置し、当該評価用パネルの組合せ（塗装色の組合せ）と測定時のパラメータ設定を適宜変更し、基本機能／基本性能に関する各基礎データを取得・確認した。水槽試験は JAMSTEC が所有する多目的プール（図 3-

図 3-(5)-②-3　試験環境｜水槽試験｜多目的プール(左)｜多目的水槽(右)

(5)-②-1）および多目的水槽（図 3-(5)-②-2）にて実施された。深海環境を模倣することを考え、当該評価機に太陽光が極力入射しない環境を構築し、光学的な外乱の影響を軽減させて実施した。太陽光には当該評価機に組込まれるレーザー光源と同波長域成分が含まれるため、微弱な反射率変化を測定する場合、当該太陽光が PMT 出力に影響を及ぼすことが考えらえる。そこで、グレースケールに対する僅かな反射率変化を正確に計測するため、太陽光の影響を軽減することが可能な水槽試験が効果的と考えた。各水槽試験（多目的プール利用｜多目的水槽利用）の様子を図 3-(5)-②-3 示す。

(b) 浅海試験〔R3年度〕（基本性能評価｜伝搬時間・反射率評価機｜評価プレート｜石垣島）

実施項目「3.(3)-A」にて取り組む物性推定アルゴリズムの構築（基本設計）に要する基礎データの取得を目的として、石垣島周辺海域（水深約 5-20m）において浅海試験を策定・実施した。水槽試験にて使用した評価用プレートを計測フレームに設置し海底（浅海域）に配置した。これをレーザー測距現行機の計測対象とし、その反射率（レーザー反射強度）を測定する。測定結果は実施項目「3.(3)-A」に関する取組みにおいて、海底の色差判別に資する基礎データとして利用される。浅海試験にて得られた測定結果を分析することにより、各 AGC 調整を含む適切なパラメータ調整および測定条件に対する知見を得た。

浅海試験では、計測フレームを 2 式準備し、海底設置している計測フレームを測定している間に、船上にて新たな評価ボードの組合せを配置した計測フレームを準備し、測定終了後にダイバーが計測フレームを換装し海底設置した。これを繰返し実施すること

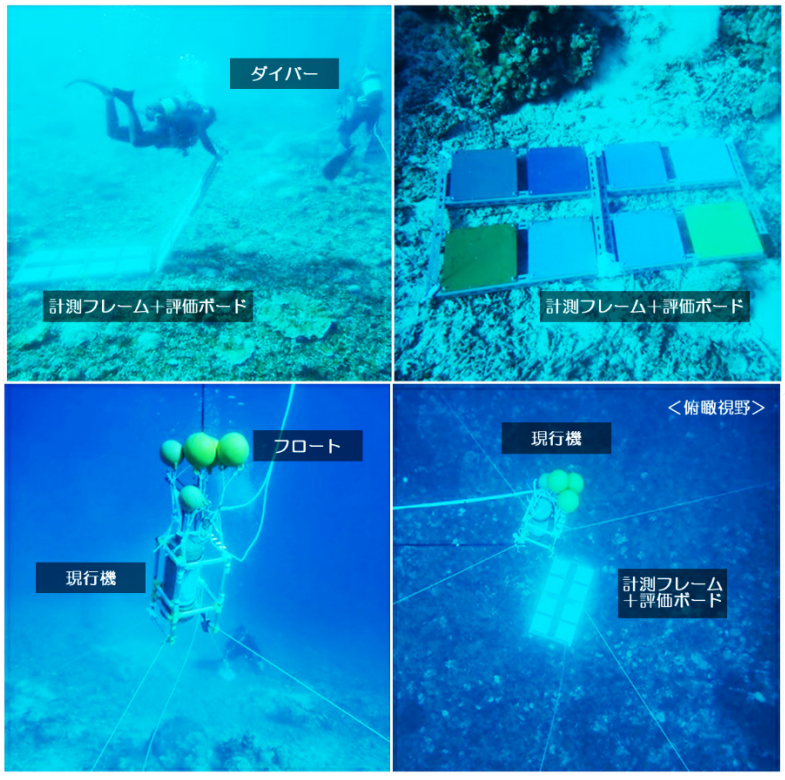


図 3-(5)-②-4　試験環境｜浅海試験｜評価用パネル｜石垣島周辺海域

により、複数パターンの計測フレーム（評価用パネルの組合せ）に対する反射率の基礎データを取得した。図 3-(5)-②-4 に試験環境を示す。

併せて浅海試験では、当該現行機が海底方向を向くように小型船舶に固定設置し、海底設置している計測フレーム上を通過するように低速で航行させ、移動状態における測定を実施した。これにより、周辺の海底域のレーザー反射と、評価用パネルからのレーザー反射とを包括して測定し、反射率の差異（強度データのコントラスト）や、移動計測時におけるデータ品質に関する基礎データを取得した。また深海試験時において、伝搬時間・反射率実証機を海中探査機に搭載した際の、既知物材に対する航行高度と航行速度に関する最適性（計測パラメータ初期値＋パラメータ調整方法）について知見を得た。図 3-(5)-②-5 に試験環境を示す。

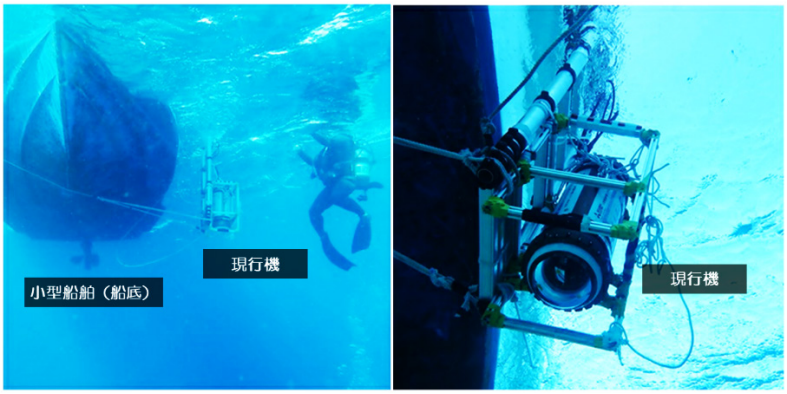


図 3-(5)-②-5　試験環境｜航行試験｜浅海試験｜石垣島周辺海域

(c) 水槽試験／岸壁試験〔R3 年度〕（基本性能評価｜ドップラ評価機島）

構築したドップラ評価機の基本性能について評価・検証する水槽試験を策定・実施した。本水槽試験においては、ベルトコンベア式の試験治具を適用した計測系（図 3-(5)-②-6）と、垂直吊下げ状態における測定系（図 3-(5)-②-7）との、2 パターンにおけるドップラシフト測定を目的とする。当該評価機を用いた水中環境下における測定は初めてであり、本研究にて提案・構築するシステムの妥当性を確認することを目的として、水中におけるレーザー反射光からのドップラシフト検出可否について検証した。ドップラ評価機では、システムの簡便性と試験時の容易性を鑑み、モノスタティック方式を採用しており、検出性能・精度については、バイスタティック方式となる実証機よりも劣る。併せて、レーザー光源を含む光学系性能は実証機の 1/10 であるため、システムの基本構成・コンセプトのフィージビリティの確認となる。本試験の結果、両測定系においてドップラシフトの検出を確認した。図 3-

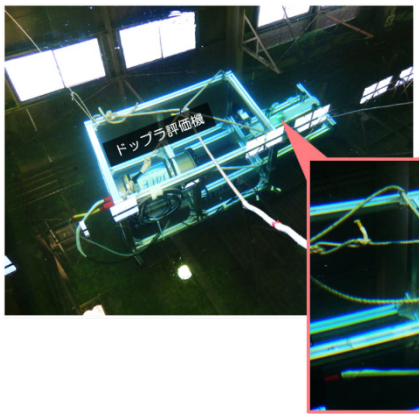


図 3-(5)-②-6
計測系｜ドップラ評価機｜
水槽試験｜ベルトコンベア式試験治具

図 3-(5)-②-7　計測系｜ドップラ評価機｜水槽試験｜鉛直吊上げ計測

(5)-②-7 における測定系は後記する岸壁試験と同じ測定系であり、水中と海中におけるドップラシフト検出の可否・精度について比較検証するために実施した。ドップラ評価機を鉛直姿勢に設置し電動クレーンにて吊下げ、レーザー照射方向 1.5m 先に白板（レーザー照射物標｜ターゲット）を索付けしている。この状態において電動クレーンを使い当該評価機を上げ下げすることで、水中における白板挙動に生じる当該評価機との相対速度を、ドップラシフトとして検出することを想定している。本測定系の気中における事前確認と比較して信号検出レベルは低下したものの、当該評価機における移動体に対するドップラシフトの水中検出が示された。

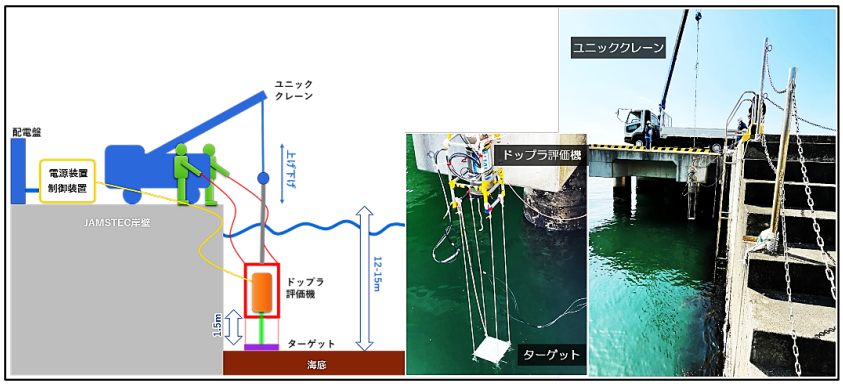


図 3-(5)-②-8　試験環境（ドップラ評価機｜岸壁試験）

水槽試験においてドップラ評価機によるドップラシフト検出のフィージビリティが確認されたことから、同測定系において岸壁試験を策定・実施した。図 3-(5)-②-8 に岸壁試験の計測系コンフィギュレーションを示す。水槽試験と同様の測定系において、ユニッククレーンを使用して JAMSTEC 岸壁よりドップラ評価機を海中に投入する。同クレーンを用いてドップラ評価機を上げ下げすることで、約 1.5m 先の白板（ターゲット）に生じる相対速度を測定した。当該計測系においてドップラシフトの測定を繰返し実施したが、ドップラシフト検出は確認されなかった。本岸壁は東京湾沿岸域に位置しており、本岸壁を含め周囲は大型船の桟橋となる。そのため当該岸壁域の海水濁度は非常に高く、海面より 1m 程度沈降させるとターゲットを視認することすら困難となる。前項記載の通り当該評価機は 1.5m 前方を測定エリアとして光学系を設計しており、岸壁試験環境（海水濁度）においては、測定エリアからの反射光を受光することが困難な環境下（測定エリア手前に懸濁物が多量に存在する環境）であったためと推測される。

(c) 深海用光学系耐圧試験〔R3 年度〕（深海試験用耐圧ガラスビューポート｜性能評価＋解析）

深海試験にて使用する光学系システム（伝搬時間・反射率実証機）に適用する耐圧ガラス製ビューポートを試作し、耐圧試験にて評価した。深海域における各システムの実用性検証を進捗させることを目的として、深海試験を実施する。本研究では、「1.(1) 実環境における長距離レーザー測距」において「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」を目指しており、これを達成するためには送受光系を各段に性能向上させることが必須となる。そのなか、伝搬時間・反射率実証機に組込むポリゴンミラーの受信開口面積の拡張は非常に大きな役割を果たす。そのため、ポリゴンミラーを含む大系化した光学系に対するビューポート（システム内部と海水とのインタフェースとなる光学的媒質境界）の開発は重要課題であり、大深度域の水圧に耐え得る強靭さと透明度（光学的透過性）について検討を要した。そこで、R2 年度には深海試験用にアクリル製ビューポートを試作しこれを評価したが、その結果、透過性および耐圧性には問題がないものの、アクリル材の物性により海中環境にてビューポート外面に多数の気泡が付着することが確認され、併せて製造時における品質保証について懸念が生じた。そこで R3 年度

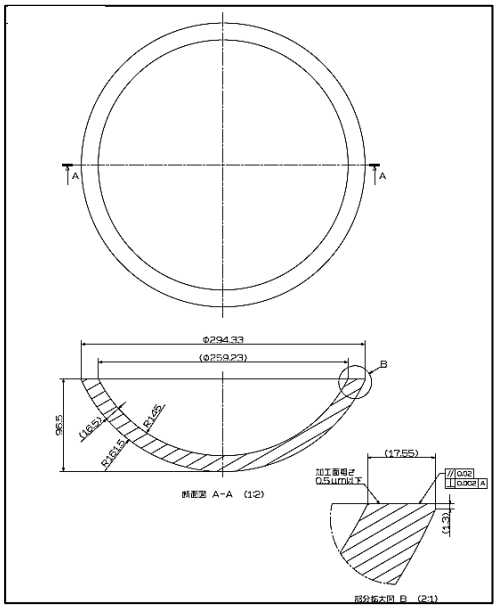


図 3-(5)-②-9
ガラスビューポート試作器

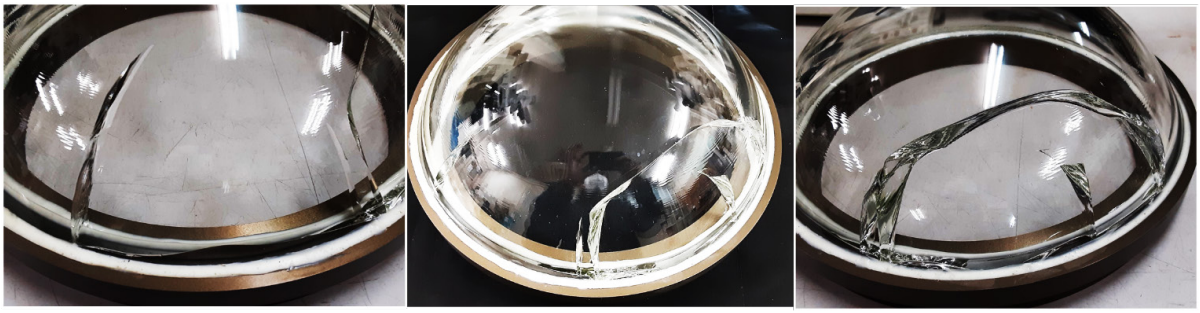


図 3-(5)-②-10　耐圧ガラス製ビューポート｜試作器｜破断状態（耐圧試験後）

においては、深海試験用の耐圧ガラス製ビューポート（以降、ガラスビューポート）を新たに試作し、耐圧試験を実施し評価した。

当該実証機では、大径化したポリゴンミラーを格納し、回転運動に伴うレーザー光送受を補償するとともに、各固定ミラー、集光レンズ、ピンホール、PMT等の光学系アレンジメントを許容するビューポートについての検討が求められる。そこで、以上の条件に加え、広角水平視野および垂直視野を確保させる新たなビューポートの最適化に取り組んだ。従来の半球体となるガラスビューポートではなく、図3-(5)-②-9に示すドーム型を適用することにより、容器内部の光学伝搬路の短縮化・効率化について取組み、レーザー光の外界への照射および反射光の入射を広角かつ効果的に実施するビューポート形状を採用した。一方、半球体におけるビューポートと異なり、当該形状における大型・大径かつ大深度水圧に耐えるガラス製ビューポートを開発した事例はなく、深海試験に先駆け、上記条件に加え耐圧性を補償するガラスビューポートの機構・形状検討が必須となる。そこでガラス成型メーカーとの仕様協議およびシミュレーションを繰返し、当該ガラスビューポートを試作して耐圧試験を実施した。その結果、要求仕様として20MPa（≒水深2000m相当圧）の耐圧性能に対し、約4MPa（≒水深400m相当圧）にて破断することが確認された。図3-(5)-②-10に耐圧試験後の破断されたガラスビューポートを示す。

従来より実績・知見のある半球体のガラス製ビューポートを基盤としたシミュレーション結果を用いて、十分な耐圧性を担保した形状（肉厚含む）に設計したにも関わらず、耐圧試験において仕様圧に達することなく早期に破断した。このことから、当該シミュレーション

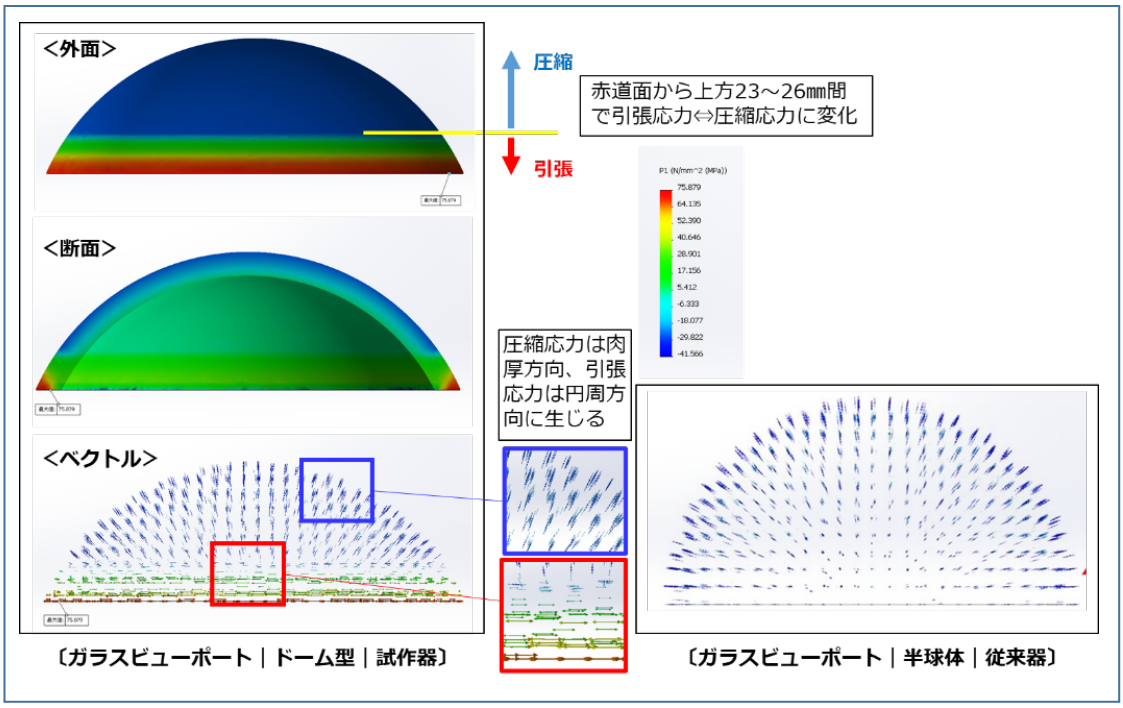


図 3-(5)-②-11　ガラスビューポート破断解析結果｜試作器｜ベクトル解析（耐圧試験後）

手法そのものを見直し、ガラスビューポート現物の破断状況の調査から推測される破断原因について考察し、併せて新たなシミュレーションを実施したことにより、下記解析結果（知見）を得た。

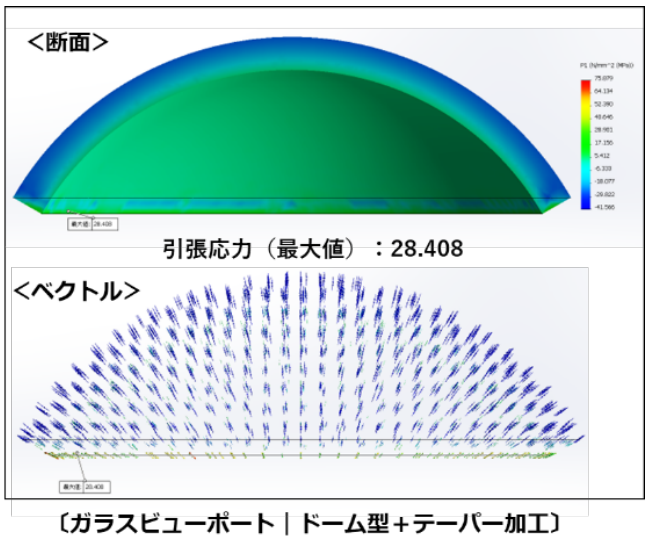


図 3-(5)-②-12　ガラスビューポート｜ベクトル解析（テーパー30 度施工）

イ）（前提として）ガラスは圧縮応力には強い耐性を有するが、引張応力には比較的に脆弱であり、破断原因の多くは引張応力に起因する。

ロ）これまでの実績およびシミュレーション結果より、半球体ビューポートでは、平加工した接着部分（ビューポート底面）の内側部分に引張応力が発生することが判明しており、当該引張応力の許容は100MPa最大と設計してきた。

ハ）上記引張応力の最大が100MPa以下となるように、ガラス材の肉厚を設計（定義）し、シミュレーションの結果より当該引張応力に対し十分な耐性を得たはずだが、耐圧試験において早期（仕様圧以下にて）に破断した。

ニ）耐圧試験結果より、本ビューポートは半球体の頂部60%から成るドーム形状であり、半球体とは根本的に異なる応力挙動が生じていることが想定された。

ホ）（上記想定より）各応力が働く部位および方向性についてシミュレーション（ベクトル解析）を実施した。（これまでは応力強度と応力分布についてのシミュレーションのみ）

ヘ）ベクトル解析の結果、本ビューポートの底面より上方約25mm地点を境界として、境界上部においては肉厚方向への圧縮応力が作用し、境界下部においては横方向（水平方向）への引張応力が発生していることが判明した（図3-(5)-②-11）。比較の為、同図に半球体ビューポートにおけるベクトル解析結果を併載する。半球体ビューポートには赤道回りの引張応力が発生していないことが確認される。

ト）ガラスビューポート現物の破断状況調査により、ガラス成型過程にて生じる底面周辺の微小なキズ（本件においては3箇所）が破断の基点となっていることが確認された。ビューポート製作過程において、当該キズの発生を完全に抑えることは不可能であり、一方、従来の半球体ビューポートでも当該キズは無数発生しているが、仕様圧以下で破断した実績はない。

チ）（以上より）本ビューポート製造時に生じる底面周辺（赤道回り）の微小なキズを基点とし、本ビューポートの特異な形状に起因して赤道回りに過大な引張応力が発生することで、仕様圧以下で破断したと推測される。

上記の解析結果から、本ビューポート形状において十分な耐圧性を備えるためには、赤道回りの引張応力を抑制することが必須であることが判明した。そこで、ビューポート底部にテーパー加工を施すことにより、当該引張応力を分散させることを考え、シミュレーションを実施した。その結果、ガラスビューポートに生じた当該引張応力は、ガラスビューポートおよび金属部材接合部に施したテーパー加工により効果的に分散されることが確認された。図 3-(5)-②-12 に 30 度のテーパー加工によるベクトル解析結果を例示する。これにより、伝搬時間・反射率実証機においては、最適なテーパー加工を施すことで仕様圧を満足するドーム型ガラスビューポートの適用を想定し、2023 年度以降に実施予定となる深海試験（深海試験用実証機）に備える。

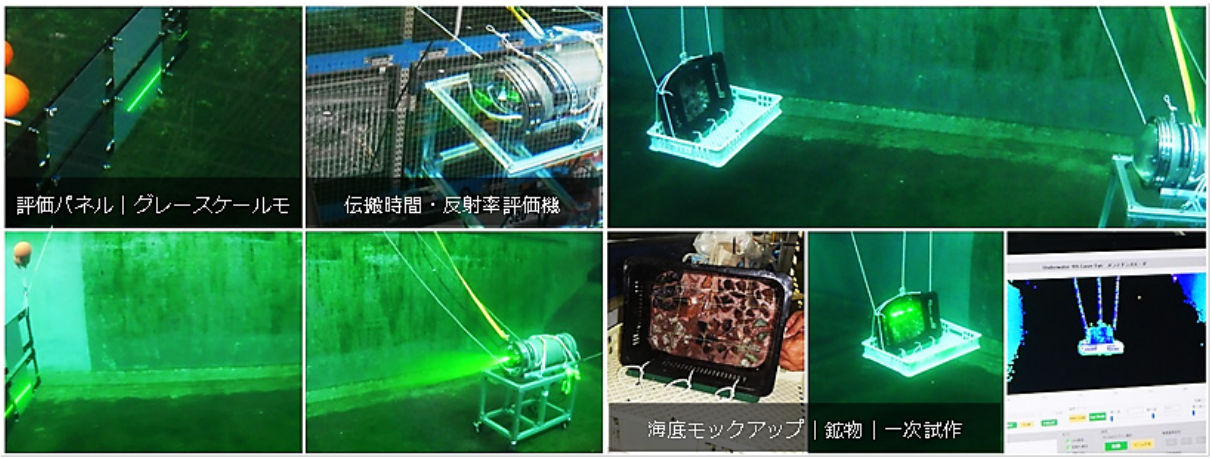


図 3-（5)-③-1　試験環境｜水槽試験｜伝搬時間・反射率評価機｜評価用パネル＋海底モックアップ試作

図 3-(5)-③-2　試験環境｜水槽試験｜ドップラ評価機｜移動台車

[(5)｜実施内容③｜R4年度試験の策定／実施]

＜概要＞

各実施項目に要する基礎データの取得を目的として伝搬時間・反射率評価機、伝搬時間・反射率実証機（Greenレーザー実証機／UVレーザー実証機）、ドップラ実証機を用いた水槽試験・浅海試験を策定し実施した。各試験において、伝搬時間・反射率評価機および同実証機については、基本性能を定量評価することを目的とし、既知物材をレーザー照射対象として基礎データを取得した。ドップラ実証機については、ハードターゲットおよび海中懸濁物をレーザー照射対象として基礎データを取得した。併せて、各伝搬時間・反射率実証機へ適用する深海試験用耐圧ガラス製ビューポートを試作し、耐圧試験を実施した結果、目的とする深海環境（水圧環境）への耐性を確認した。これら試験にて取得された基礎データを、各実証機の性能向上を目的とした改良および深海仕様へ反映させる。

(a)水槽試験〔R4年度〕(基本性能評価｜伝搬時間・反射率評価機／ﾄﾞｯﾌﾟﾗ評価機｜多目的水槽)

2021 年度に製作した伝搬時間・反射率評価機およびドップラ評価機を用いて水槽試験を実施した。レーザー光源制御、受光系制御、光学系調整、信号処理機能、AGC 機能等を含む各評価機のシステム性能と健全性を確認し、併せて一部コンポーネントの性能向上を検証した。これにより得られた基礎データを解析することで、同各実証機への設計、製作に反映させた。図 3-(5)-③-1、図 3-(5)-③-2 に本水槽試験の様子を示す。伝搬時間・反射率評価機においては、既知物材として色差の異なるグレースケールの評価用パネル、および試験サンプル（海底モックアップ｜一次試作）を計測対象として基礎データを取得し、ドップラ評価機においては、ベルトコンベア式の試験治具（ハードターゲット）に加え、移動台車を用いて水槽底との相対速度（対水槽底速度）を計測した。これら水槽試験の結果を踏まえ、基本的には同様のセットアップ（各評価機／試験治具）を適用して浅海試験を実施することで、水槽環境と浅海環境との差異（環境依存の性能比較）を検証する。そのため水槽試験は、浅海試験に備える動作確認、システム健全性確認の意義も持つ。

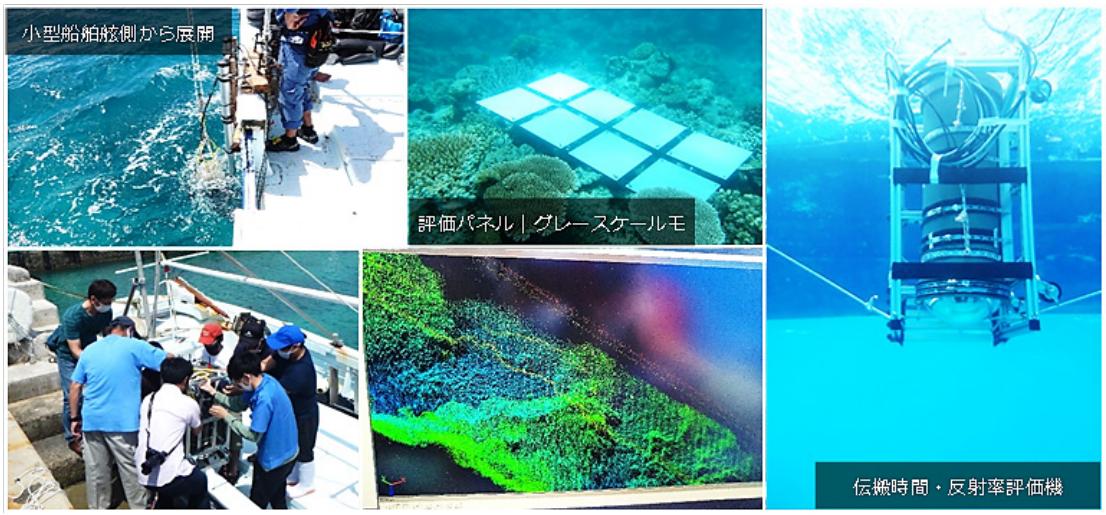


図 3-(5)-③-3　試験環境｜浅海試験｜伝搬時間・反射率評価機｜石垣島周辺海域

図 3-(5)-③-4　試験環境｜浅海試験｜ﾄﾞｯﾌﾟﾗ評価機｜石垣島周辺海域

(b) 浅海試験〔R4年度〕（伝搬時間・反射率評価機／ドップラ評価機）

基本的には上記水槽試験と同様のセットアップにて浅海試験を実施した。伝搬時間・反射率評価機においては、水槽試験と同じグレースケールの評価用パネルを使用して、海水中におけるレーザー光（レーザー反射光）の伝搬減衰を水槽試験結果と比較評価するとともに、太陽光の海中への入力がレーザー光の照射方向と同様の条件（受光系として信号の切り分けが困難な条件）における受信感度と信号雑音比を評価した。昨年度同様にウェイトとフロートを利用して伝搬時間・反射率評価機を定点保持して当該パネルを計測したほか、小型船舶の舷側に当該評価機を固定設置し、小型船舶が航走しながら海底に配置した評価用パネルを計測した。ドップラ評価機では、ベルトコンベア式試験治具と併せて海底に設置し、海水環境におけるハードターゲットからの反射光のドップラシフトを計測した。海域・海底底質が異なる地点で当該計測を実施し、ドップラシフト検出の可否および水槽試験との検出性能を比較した。図 3-(5)-③-3、図 3-(5)-③-4 に本浅海試験の様子を示す。

(c) 水槽試験〔R4年度〕（UVレーザー実証機／ドップラ実証機）

これまでに、伝搬時間・反射率評価機およびレーザー測距現行機、ドップラ評価機を用いて実施してきた各水槽試験、浅海試験にて得された基礎データ・知見をフィードバックし、Green レーザー実証機、UV レーザー実証機、ドップラ実証機をそれぞれ開発した。ここで、Green レーザー実証機は新規開発の MCP-PMT および駆動電源を実装することから、R4 年度は機能確認、動

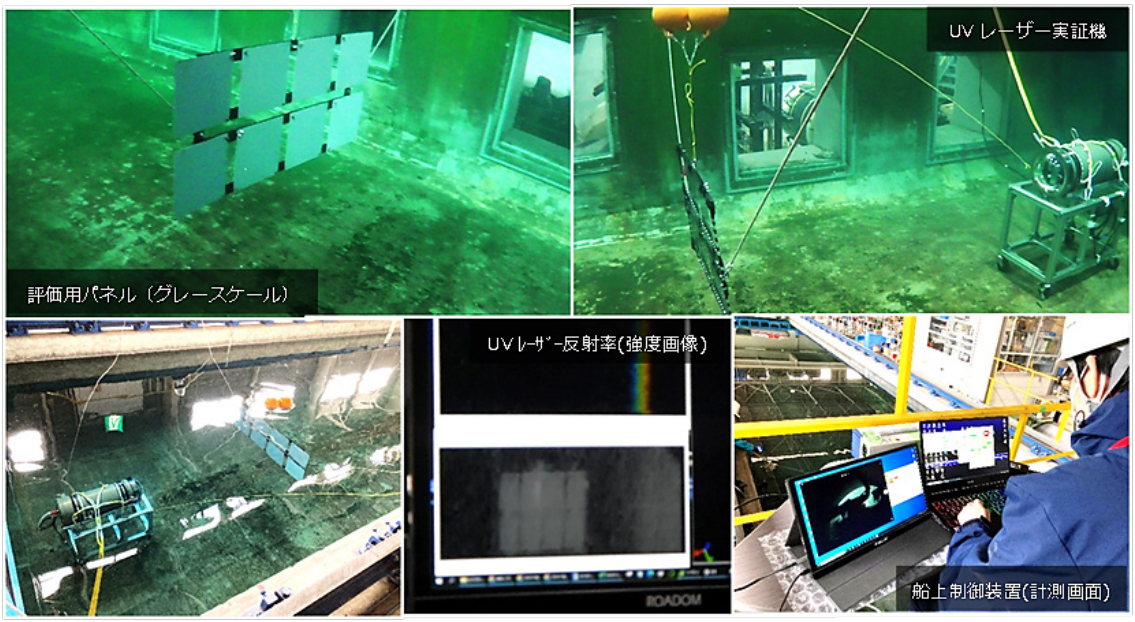


図 3-(5)-③-5　試験環境｜水槽試験｜UV レーザー実証機｜多目的水槽

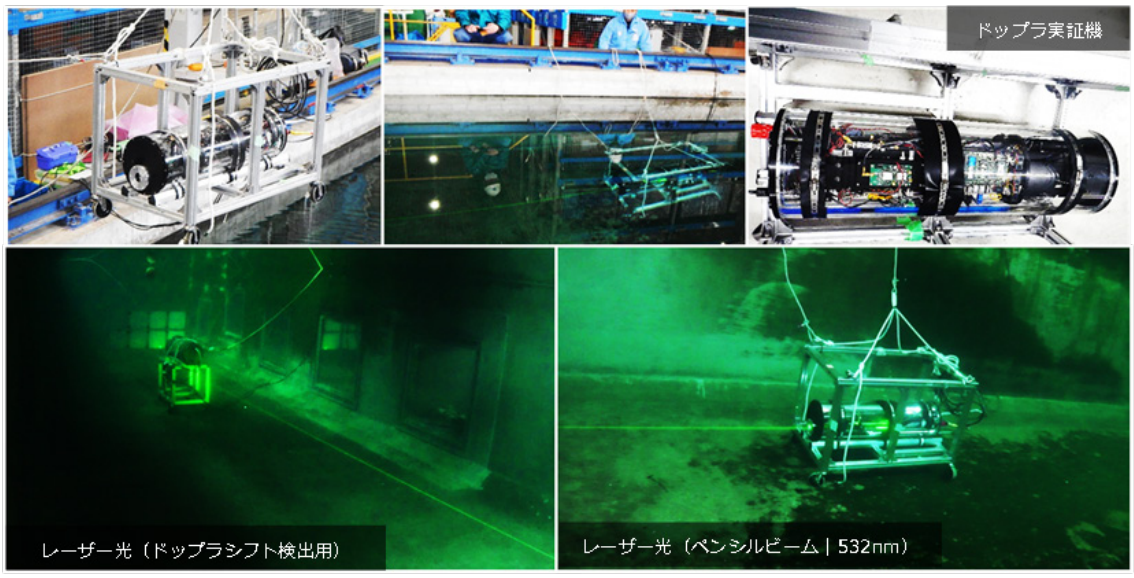


図 3-(5)-③-6　試験環境｜水槽試験｜ドップラ実証機｜多目的水槽

作確認とし、R5 年度より水槽試験、浅海試験を実施する。そこで、UV レーザー実証機およびドップラ実証機を用いた水槽試験を実施した。可視光外のレーザー光源を実装する UV レーザー実証機は、国内外を含め海中における実用化事例のない特異な海中光学技術となる。水中において著しく減衰する UV 波長レーザーを伝搬させ、その反射光を検出することの技術的フィージビリティについて確認する。当該技術の有効性については、事前の理論検討およびスモールケースでの簡易試験にて確認は済んでいるものの、高出力の UV レーザー光源と高感度な MCP-PMT（マルチアルカリ光電面）を適用する実機として、その効果を検証するのは初めてである。図 3-(5)-③-5 に本水槽試験の環境を示す。

ドップラ実証機ではバイスタティック方式を採用しており、同評価機のモノスタティック方式と比較してドップラシフトの検出精度は向上する一方で、送受信光に対し光軸調整を適切に実施することは非常に難しい。そこで、事前に気中において厳密な光軸調整を実施することで、水中環境下における当該調整作業を回避することを考えた。しかし光軸が経由するシステム全体の各光学系境界における屈折・拡散により、事前調整が効果を果たさないことが判明した。そこで、送信光は能動的に拡散光とすることで光軸合わせの厳密性を軽減させ、受光系への入力を担

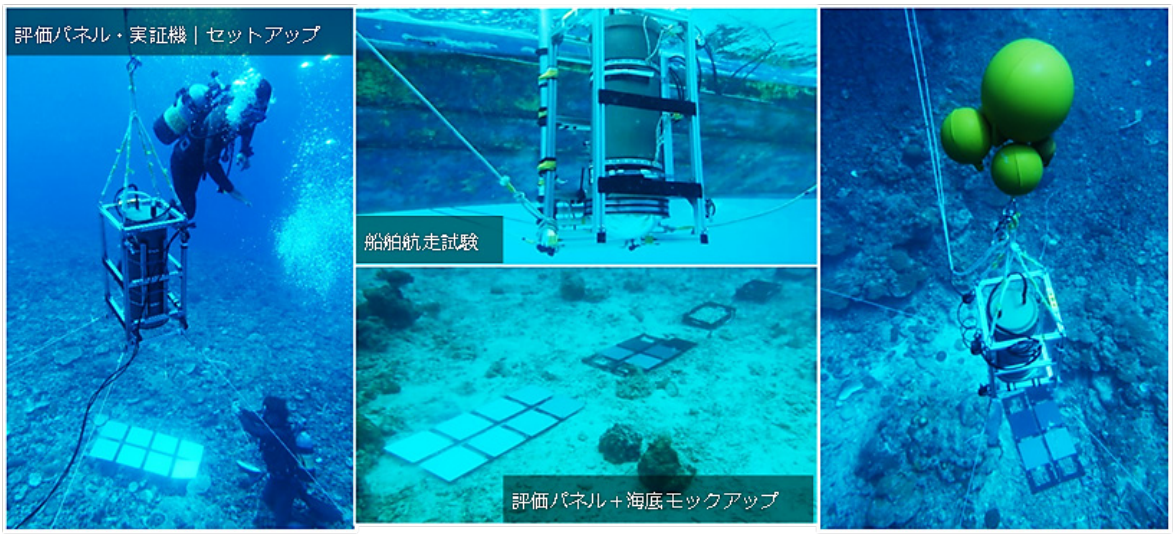


図 3-(5)-③-7　試験環境｜浅海試験｜UV レーザー実証機｜石垣島周辺海域

保する方式の有効性を水槽試験にて確認した。同方式による試験系は浅海試験においても有効である。図 3-(5)-③-6 に本水槽試験の環境を示す。

(d) 浅海試験〔R4年度〕（UVレーザー実証機／ドップラ実証機）

前項の水槽試験と同様のセットアップにおいて、UV レーザー実証機およびドップラ実証機を用いた浅海試験を実施した。UV レーザー実証機においては、これまでと同様にグレースケールの評価用パネルと今回新規に製作した既知物材となる海底モックアップを使用して、海水中における UV レーザー光の伝搬減衰とこれに応じた各既知物材に対する反射率を計測した。UV レーザー実証機の水槽試験結果と比較評価するとともに、UV レーザー光の海中伝搬特性を定量評価することを目的とする。本試験結果は、海中光学技術にとって意義のある成果であり、非可視光波長のレーザー光に対する海中伝搬を理解し、送受光技術を系統化し確立することは、光電磁波を媒体とする海中利用に大きく貢献する新たな知見となる。一方、浅海試験では太陽光の影響は大きく、特に UV レーザー実証機においては、太陽光に含まれる紫外成分の総量が大きく、UV レーザー光と分離することが困難であるため、受信光（受信信号）の信号雑音比を劣化させた。図 3-(5)-③-7 に本浅海試験（UV レーザー実証機）の環境を示す。

バイスタティック方式を採用したドップラ実証機では、現場での光軸調整が困難であることから、気中にて光軸調整を実施し、これに対して送信光を拡散光とすることで受光系への入力を担保し試験を実施した。海岸域においてドップラ実証機の光軸調整および基本動作を確認したのち、小型船舶（作業支援船）の舷側からドップラ実証機を展開し、延長方向（海底方向）から任意の確度（約 45 度）を持たせて固定し、作業支援船を低速で航走させながら海中・海底からのドップラシフト計測を実施した。海中環境においてレーザー光のドップラシフトを主観的に計測する本取組みは、レーザー光の海中利用においても特殊かつ意義が深い。深海域とことなり浅海域では、マリンスノーやプランクトンに代表される比較的に大型な懸濁物は少ないと考えられ、一方で浅海域の濁度は高くレーザー光の透過性（伝搬性）は低い。また本試験では試験の便宜性から通常仕様より拡散したレーザー光を使用したことからエネルギー密度も低く距離減衰量も大きい。本浅海試験ではこのような悪条件においても、海底からの反射（ドップラシフト）だけでなく、海中からのドップラシフトを検出することが確認された。これら試験結果で得られた基礎データおよび各知見を踏まえ、深海試験における運用性・便宜性、および計測精度・性能向上を鑑み、モノスタティック方式とバイスタティック方式の両方式を適用可能なハイブリット型レーザー実証機への改造を決定した。図 3-(5)-③-8 に本浅海試験（ドップラ実証機）の環境を示す。

(e) 深海用光学系耐圧試験〔R4年度〕(深海試験用耐圧ガラスビューポート｜性能評価＋解析)

Green レーザー実証機および UV レーザー実証機に搭載する耐圧ガラス製ビューポートを試作し、耐圧性能を評価した。R5 年度以降、実環境における各実証機の性能検証を進捗させること

図 3-(5)-③-8　試験環境｜浅海試験｜ドップラ実証機｜石垣島周辺海域

を目的として、深海試験を実施する。本研究の最終目標の 1 つとなる「最大約 60m（往復約 120m）レンジを有するレーザー測距」を達成するためには、レーザー測距現行機と比較して各段の性能向上を要し、これを実現するためには、Green レーザー実証機に組込むポリゴンミラーの受信開口面積の拡張は最重要な改善項目である。そのため、ポリゴンミラーを含む大系化した光学系に対する耐圧ビューポートの開発が重要であり、大深度水圧に耐え得る強靭さと光学的透過性に満足しなければならない。

各レーザー実証機では、大径化したポリゴンミラーを格納し、回転運動に伴うレーザー送受光を補償するとともに、最適な光学系アレンジメント（各固定ミラー、集光レンズ、ピンホール、PMT 等）を許容するビューポートについて検討した。その結果、半球体ではなくドーム型を適用することにより、容器内部の光学伝搬路の短縮化・効率化を実現し、レーザー光の照射および反射光の入射を広角かつ効果的に実施するビューポート形状としてガラス製ドーム型を採用した。2021 年度までに実施してきた各試行およびシミュレーションを含む検討結果より、ガラス製ドーム型において十分な耐圧性を備えるためには、赤道回りの引張応力を抑制することが必須であることが判明し、ビューポート底部にテーパー加工を施すことにより、当該引張応力を分散させる方式を適用する当該ビューポートを試作した。図 3-(5)-③-9 に試作したガラス製ドーム型ビューポートを示す。

当該ビューポートの耐圧性能を確認するため、圧力水槽（中型高圧実験水槽装置｜JAMSTEC）にて耐圧試験を実施した。当該ビューポートの耐圧仕様を 1,000m 水深圧相当（≒10MPa）とし、安

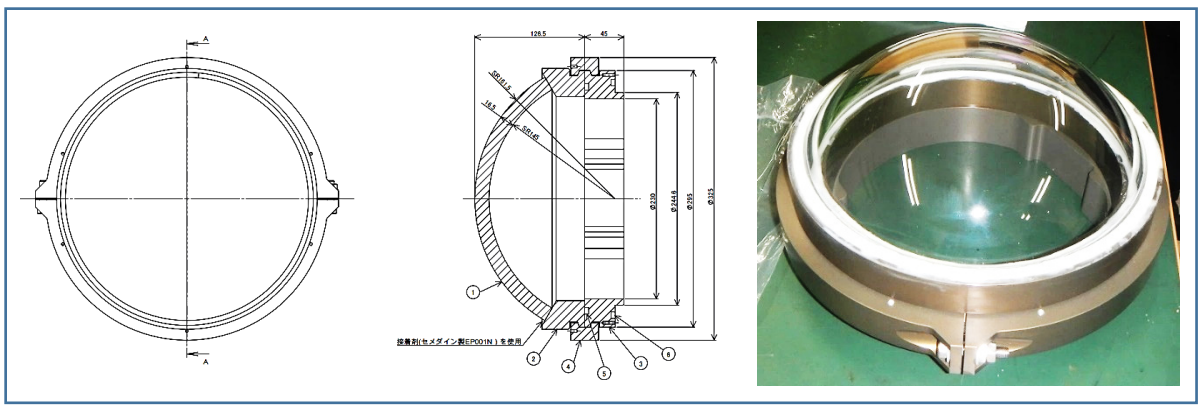


図 3-(5)-③-9　ガラス製ドーム型ビューポート（テーパー加工あり）

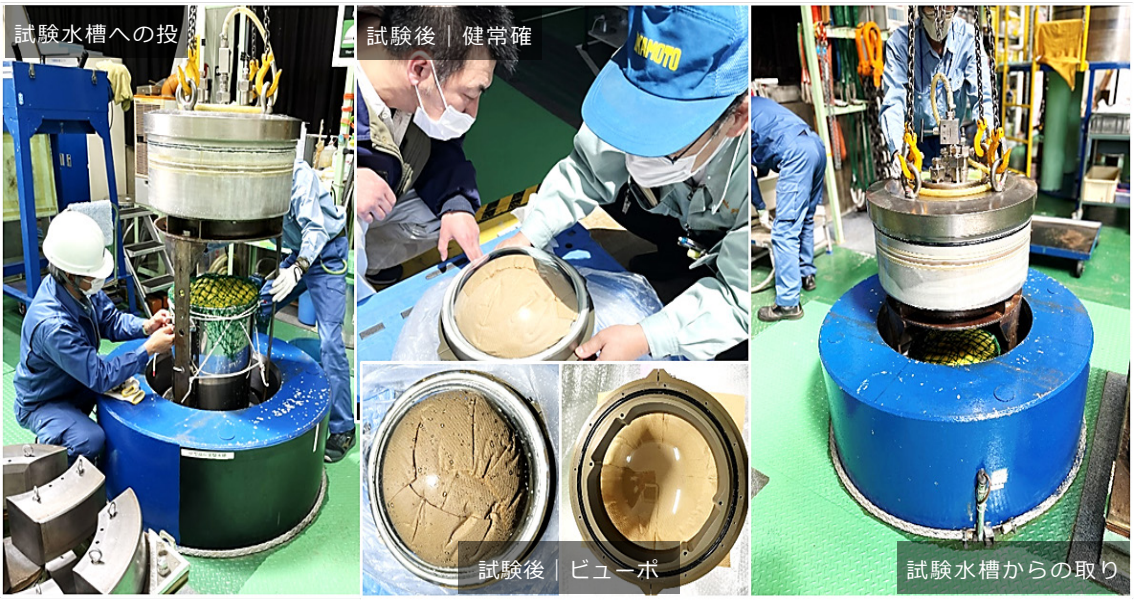


図 3-(5)-③-10　ガラス製ドーム型ビューポート

全率を考慮し 1,300m 水深圧相当（≒13MPa）まで昇圧し、昇圧後 1 時間その状態を保持し、大気圧（0MPa）まで降圧した。その結果、当該ビューポートに破損・破断はなく、健常であることが確認され、当該ビューポートの実用性が示された。Green レーザー実証機、UV レーザー実証機においては、深海仕様に関する改善工事において、当該ビューポートが実装される。図 3-(5)-③-10 に本耐圧試験の環境を示す。

[(5)｜実施内容④｜R5年度試験の策定／実施]

＜概要＞

各実施項目に要する各種試験について、実施目的および想定される結果・効果を正確に評価できるよう、試験内容/試験手法を策定した。2023年度より、Greenレーザー実証機、UVレーザー実証機、ドップラ実証機が製作され、各機を深海試験仕様＋「かいこう」搭載仕様に変更・調整することから試験種別は多岐にわたり、それら各試験の結果より、各実施項目の進捗に要する成果／データが取得された。

(a) 耐圧試験〔R5度〕（実施回数：3回｜実証機用ガラスビューポート｜実証機用耐圧容器）

R5 年度に実施する深海試験に備え、各実証機を耐圧仕様（深海試験）に変更するため、耐圧容器を製作した。併せて、Green レーザー実証機および UV レーザー実証機において、海水とのインタフェースとなるドーム型ガラスビューポートを製作した。それぞれに対して、耐圧試験を実施し、耐圧仕様を満足していることを確認した。試験設定（加圧条件）を下記に示す。ビューポートを含むいずれの試験体も、設計耐圧を 10MPa（1,000m 水深相当圧）としている（安全率｜1.5 以上）。そのため、13MPa を最大圧力（保持圧力）として、海中探査機の潜航速度、浮上速度を模擬した昇圧／降圧速度にて試験を実施した。図 3-(5)-④-1 に試験環境を示す。

●昇圧速度（潜航速度模擬）　：10kPa/sec（0.6m/s｜潜航速度）
●保持圧力（潜航深度）　：13MPa（1,300m 水深相当圧）※安全率含む
●保持時間　：1Hr
●降圧速度（浮上速度）　：10kPa/sec（0.6m/s｜浮上速度）

(b)「かいこう」連接試験（実施回数：3回｜Greenﾚｰｻﾞｰ実証機｜UVﾚｰｻﾞｰ実証機｜DPR実証機）

R5年度実施する深海試験では海中探査機「かいこう」に各実証機を搭載し、「かいこう」の制御システムを経由した光ファイバ通信にて、各実証機を「かいこう」コンソールより遠

図 3-(5)-④-1　耐圧試験｜高圧試験水槽
（ガラスビューポート｜Green 実証機用耐圧容器｜UV 実証機用耐圧容器｜DPR 実証機用耐圧容器）

隔にて管制する。併せて、各実証機への電源供給は、「かいこう」が具備する外部への電源供給ポートを利用する。そこで、各実証機の電源仕様・通信仕様を「かいこう」が提供するペイロード仕様に対応させるため、水中ケーブル・コネクタ類を当該仕様に合わせて入手した。併せて、コネクタピンアサインを含む詳細仕様を「かいこう」ペイロード仕様に合致するよう各実証機のインタフェースを調整した。これら電源・通信仕様の整合が取れ、「かいこう」制御システムを経由して問題なく各実証機の管制が可能か、「かいこう」連接試験にて確認した。図3-(5)-④-2に各実証機を「かいこう」に搭載する場合のシステム結線を図示す

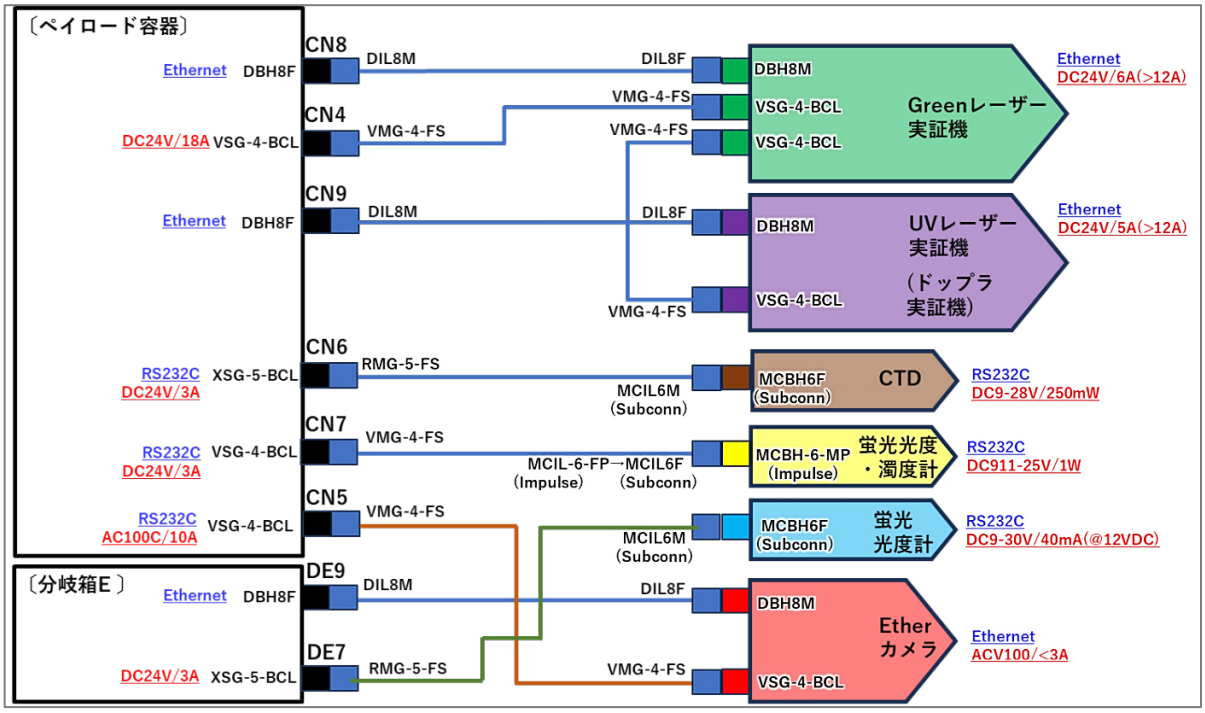


図 3-(5)-④-2　「かいこう」連接試験｜システム結線（「かいこう」搭載結線）
（Green 実証機用｜UV 実証機｜DPR 実証機｜環境評価機器類）

図 3-(5)-④-3　「かいこう」連接試験｜無人探査機整備場
（Green レーザー実証機｜UV レーザー実証機｜ドップラ実証機）

る。当該試験は「かいこう」搭載時における各実証機および計測機器の結線コンフィギュレーションであり、本連接試験では当該結線において不備・不具合が発生していないこと確認する。各結線のアサインや各コネクタのピンアサインが整合されていても、特に電源系の挙動は負荷状態（各実証機を接続した状態）で確認しなければ、良否が判断できない。「かいこう」連接試験は、基本的に深海試験前に実施するほか、深海試験において「かいこう」潜航中に不具合事象が発生した場合、および各実証機のエレクトロニクス仕様に変更が生じた場合に、健常性確認も兼ねて実施した。図3-(5)-④-3に「かいこう」連接試験の様子を示す。

(c)水槽試験｜浅海試験｜深海試験（実施回数：3回｜2回｜2回）

各実証機の基本性能を確認するとともに、最終目標の達成目指し、現況における改善点の抽出等を目的として、水槽／浅海／深海試験を実施した。各試験における実施内容については、実施項目「3.(1)-A」「3.(2)-A)」「3.(3)-A・B」「(4)-A・B」に示す。物性推定アルゴ

図 3-(5)-④-4　海中探査機「かいこう」｜支援母船「新青丸」
（Green レーザー実証機｜UV レーザー実証機｜ドップラ実証機｜海底モックアップ）

リズムの構築・類別性能の向上に要する学習データは、水槽・浅海・深海試験それぞれにて実施された。一方、各実証機の現況性能における最終目標への試行は、深海試験にてのみ実施される項目となる。また、深海域における各実証機の性能評価は、R5 年度より開始される新規の事項となる。当年度は 2 回の深海試験（航海名｜KS-23-08C・KS-24-02C）を実施し、いずれも JAMSTEC が所有する「かいこう」および支援母船として「新青丸」を使用した。「かいこう」「新青丸」の諸元、および深海試験時の「かいこう」外観を図 3-(5)-④-4 に示す。水槽試験や浅海試験と異なり深海試験は、陸域から離れた沖合海域において海中探査機を用いて実施され、試験環境も水深 800m 以深の大深度域となる。そのため、船舶／海中探査機の運航管理部署／運航従事者と、航海計画・試験項目・安全性・妥当性等、事前に詳細な検討と調整を要した。また、各実証機の「かいこう」への搭載、および通信系・電源系の確立、各試験項目に応じた「かいこう」操作／航走計画、それを実現する支援母船の操船／航行計画等、現場においても運航従事者との詳細な調整・協議を要した。その結果、下記に示す最終目標を達成する成果を得た。

◆「最終目標(1)｜最大水平分解能 8,000 画」
＜成果＞
最大水平分解能：8,294 画素（Green レーザー実証機）
最大水平分解能：8,457 画素（UV レーザー実証機）

[(5)｜実施内容⑤｜R6年度試験の策定／実施]

＜概要＞

各実施項目における「達成目標（終了時）」および本研究の最終目標の達成を目的として、Greenレーザー実証機、UVレーザー実証機、ドップラ実証機を用いた水槽試験／深海試験（最終評価）を策定・実施した。その結果、各実施項目の達成目標および本研究の最終目標の達成を示す成果／データが取得された。

(a)水槽試験｜深海試験〔R6度〕（実施回数：2回｜2回）

R5 年度までに得られた基礎データにより改善を図った各実証機による最終評価を目的として深海試験を実施した。当年度は 2 回の深海試験（航海名｜KM-24-10C・KM-24-14C）を実施し、いずれも JAMSTEC が所有する海中探査機「かいこう」および支援母船として「かいめい」を使用した。「かいめい」諸元、および深海試験時の「かいこう」外観等を図 3-(5)-⑤-1 に示す。この際、各深海試験の事前確認・調整のため、2 度の水槽試験を実施した。各水槽試験、深海試験における実施内容については、実施項目「3.(1)-A」「3.(2)-A)」「3.(3)-A・B」「(4)-A・B」に示す。

R6 年 9 月、12 月にそれぞれ実施された 2 度の深海試験では、本研究課題における下記に示す最終目標の達成を示す成果、もしくは最終目標の達成に要する計測データを得た。

◆「最終目標(1)｜最大計測距離：約 60m」
＜成果＞
最大計測距離：**64m**（Green レーザー実証機による長距離レーザー測距データの取得）

◆「最終目標(2)｜物性推定正解率：約 70%」
＜成果＞
物性推定正解率：**83.1%**（物性推定アルゴリズム・学習用＋評価用データの取得）

◆「最終目標(3)｜位置検出精度(純慣性航法比較)：約 10 倍」
＜成果＞
位置検出精度(純慣性航法比較)：**10 倍以上**（複合航法演算に要するﾚｰｻﾞｰﾄﾞｯﾌﾟﾗ速度の取得）

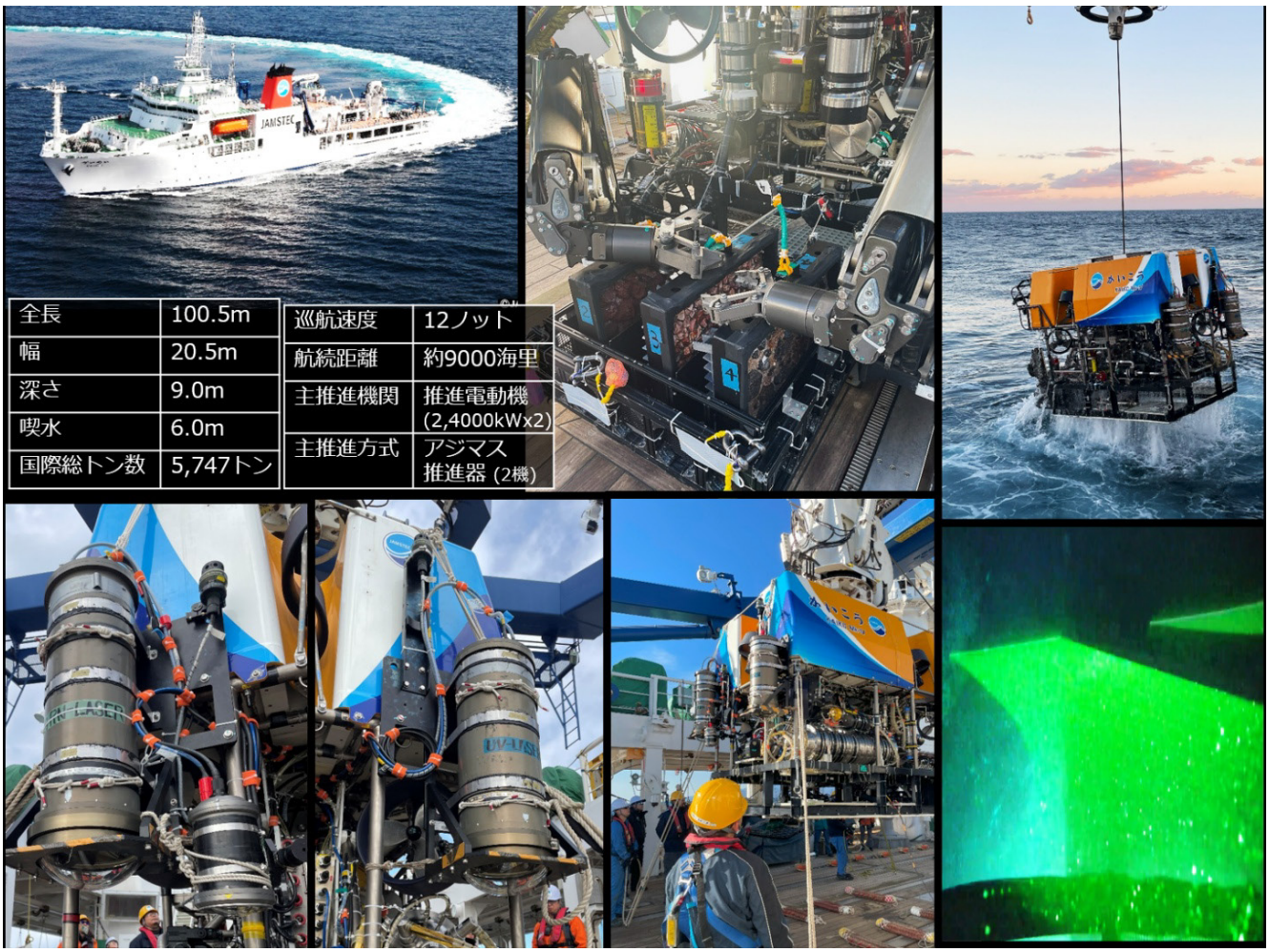


図 3-(5)-⑤-1　海中探査機「かいこう」｜支援母船「かいめい」
（Green レーザー実証機｜UV レーザー実証機｜海底モックアップ｜レーザー照射シーン）

R6 年度に実施した深海試験（2 度）および R5 年度に実施した深海試験(2 度)では、上記最終目標の達成を示す成果、および最終目標の達成に要する計測データを取得しただけでなく、レーザー反射を利用する海底可視化技術の高度化が実証された。Green レーザー実証機、UV レーザー実証機から生成される海底可視化画像は、高分解能かつ高精細であり、また距離方向分解能もミリオーダーを実現している。図 3-(5)-⑤-2、図 3-(5)-⑤-3 に、Green レーザー実証機、UV レーザー実証機により生成された海底可視化画像を例示する。

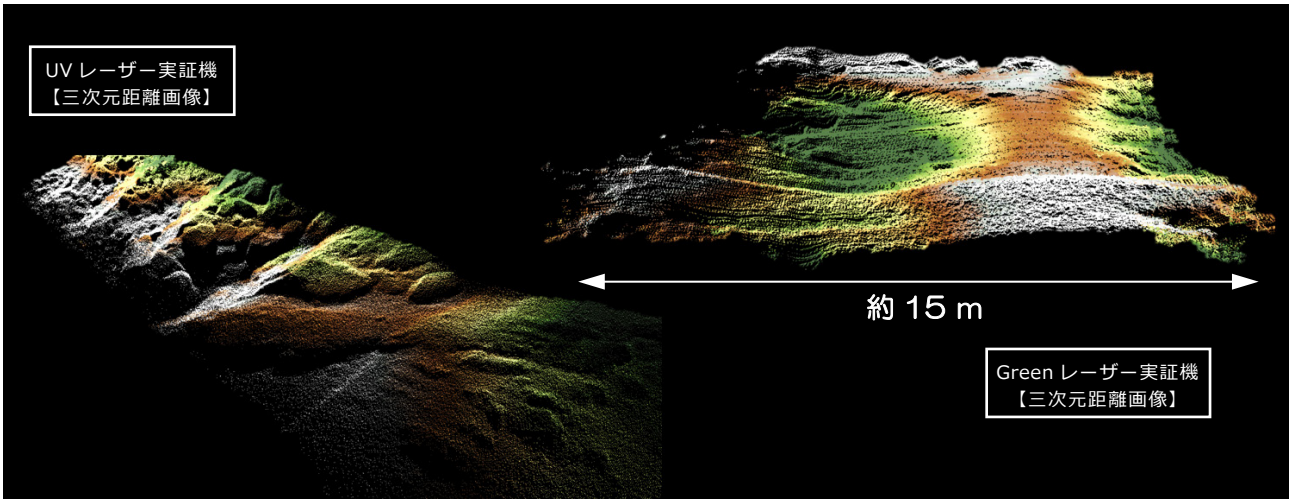


図 3-(5)-⑤-2　三次元海底可視化画像｜例示 1｜初島東方｜Green レーザー実証機・UV レーザー実証機

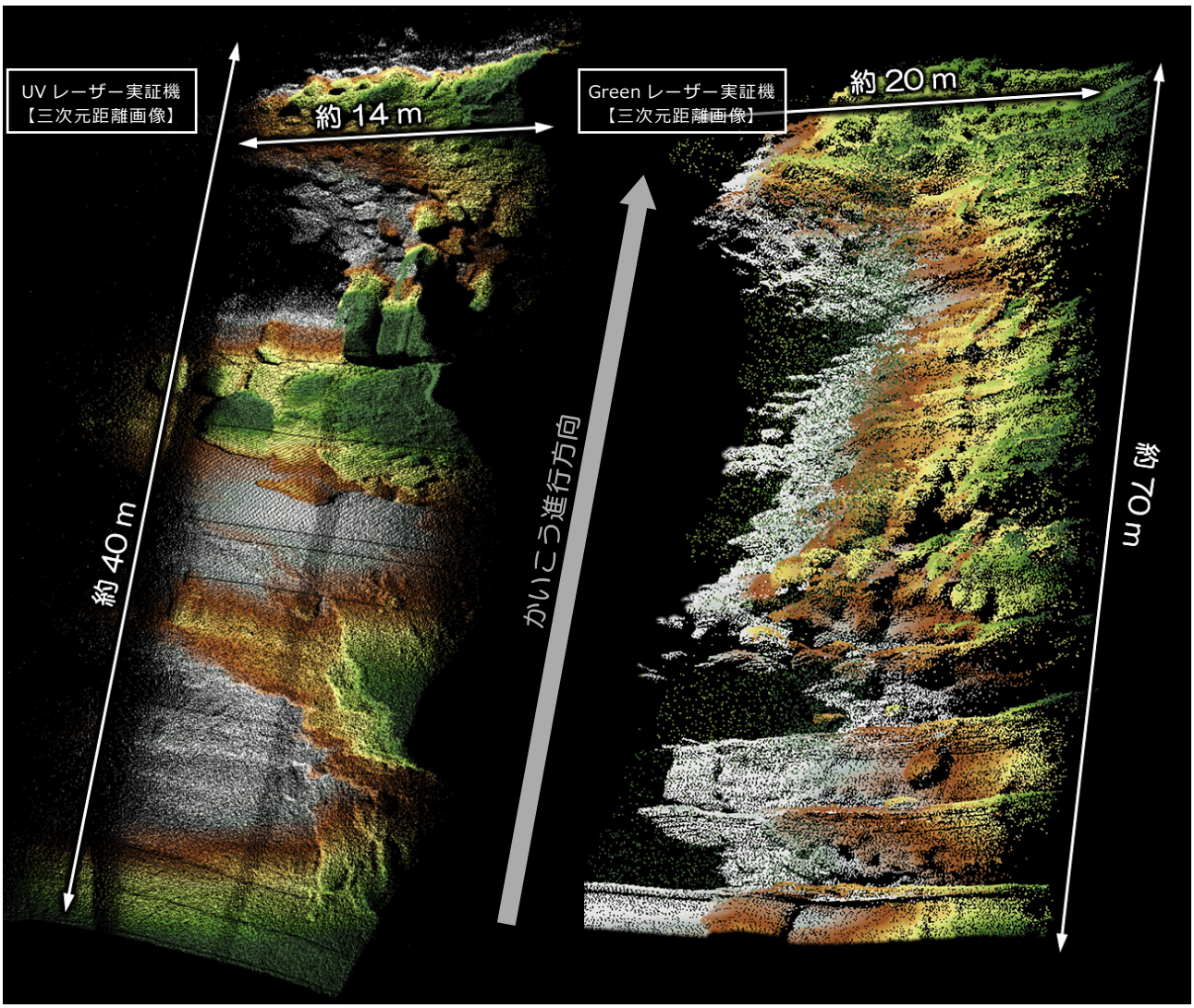


図 3-(5)-⑤-3　三次元海底可視化画像｜例示 2(広域)｜初島東方｜Green レーザー実証機・UV レーザー実証機

(6) プロジェクトの総合的推進

[(6)｜目的]

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、プロジェクト全体の進捗状況を確認し、各担当機関・担当者による進捗報告会を定期的に実施する。また必要に応じて内部あるいは外部有識者を招聘して意見を聞くなど、プロジェクトの効率的かつ効果的な推進を図る。

（業務計画書｜3.3より抜粋）

[(6)｜実施内容①｜R2年度]

＜概要＞

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、プロジェクト全体の進捗状況を確認し、各担当機関・担当者による進捗会議を定期的（1回/月｜計4回）に実施した。

(a)進捗会議および技術専門会議

◆プロジェクト進捗会議（第1回）：2020年12月16日　09:30～｜Web会議システム
◆プロジェクト進捗会議（第2回）：2021年1月15日　09:30～｜Web会議システム
◆プロジェクト進捗会議（第3回）：2021年2月19日　09:30～｜Web会議システム
◆プロジェクト進捗会議（第4回）：2021年3月24日　09:30～｜Web会議システム

各進捗会議において、各担当機関・担当者が異なる研究分担について共通の認識を持つことにより、問題点の効果的な抽出と改善方法、および全体スケジュールの管理・調整が計画的に進められた。また進捗会議で協議する内容に対し、より技術的・専門的に掘下げた議論を要する場合は、各研究機関の関係者・有識者を招聘して、別途、技術専門会議を開催することで、技術的整合をとると共に技術的ボトルネックの解決を図った。

◆技術専門会議（第1回）　：2020年12月16日　09:30～｜Web会議システム

当該会議により短期間で効率的・効果的に各担当項目が進捗し、プロジェクトの推進に繋がった。また、当年度はプロジェクト開始の初年度かつ実施期間が短期であったことから、基本設　計や基礎データ取得に注力した。この成果を次年度の実施項目へ反映させるとともに、一部成果を整理し、国内外の学会等に発表する準備を実施した。本プロジェクトでは、研究分担機関が遠方に位置することから、またコロナ禍の現況から、Web 会議システムを有効活用することで情報共有の機会を増やすとともに、各研究機関が有する技術的な知見・考えを資料にまとめ共有することで相互理解を図った。

[(6)｜実施内容②｜R3年度]

＜概要＞

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、各担当機関・担当者とプロジェクト全体の進捗状況を確認することを目的として、進捗報告会を定期的に実施した。また、海底物性推定への取組みにおいて有識者を招聘した技術意見会を開き、深海試験時の海域選定や鉱物サンプルに関する情報を収集し、プロジェクトの効率的かつ効果的な推進を図った。本委託業務の実施により得られた成果について、国内の学会において積極的に発表（3 件）し、当該学術分野より得られた意見・知見より本研究の更なる進展に努めた。この際、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知した。

(a)進捗会議および技術専門会議

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、各担当機関・担当者による分担実施項目に関する進捗報告会を定期的（毎月 1 回程度｜計 10 回/年度）に実施し、技術課題や懸念事項を含めた情報共有を図った。併せて、プロジェクト全体の進捗状況を関係者間にて共通認識することにより、プロジェクトの現況を把握し、計画の妥当性を再確認しつつ各実施項目の推進に努めた。

◆プロジェクト進捗会議（第 5 回）：2021 年 4 月 23 日　09:30～｜Web 会議(Bluejeans)
◆プロジェクト進捗会議（第 6 回）：2021 年 5 月 28 日　09:30～｜Web 会議(Bluejeans)
◆プロジェクト進捗会議（第 7 回）：2021 年 6 月 25 日　09:30～｜Web 会議(Bluejeans)
◆プロジェクト進捗会議（第 8 回）：2021 年 8 月 6 日　09:30～｜Web 会議(Bluejeans)
◆プロジェクト進捗会議（第 9 回）：2021 年 9 月 24 日　10:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 10 回）：2021 年 10 月 28 日 09:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 11 回）：2021 年 11 月 25 日 09:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 12 回）：2021 年 12 月 23 日 13:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 13 回）：2022 年 1 月 18 日　09:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 14 回）：2022 年 3 月 25 日　09:30～｜Web 会議(MS-Teams)

上記進捗会議において、各担当機関・担当者が異なる研究分担（実施項目）について共通認識を持つことにより、問題点の効果的な抽出と改善方法、および全体スケジュールの管理・調整が計画的に進められた。また進捗会議で協議する内容に対し、より技術的・専門的に掘下げた議論を要する場合は上記進捗会議とは別に、各研究機関の関係者・有識者を招聘した技術専門会議を開催することで、技術的整合を確認する共に、技術課題の解決を図った。

◆技術専門会議（第 2 回）　：2022 年 3 月 3 日　13:30～｜Web 会議(MS-Temas)
「PMT＋駆動電源制御（高速 AGC 機能）の仕様最終調整」

(b)有識者招聘による技術意見会

プロジェクトの効率的・効果的な推進を図ることを目的し、有識者を招聘した技術意見会を開催した。実施項目「(3)-B｜複数種の物材に対する物性推定試験」）について、海洋研究開発機構の海底鉱物、海底地質、海底観測の各有識者を招聘して技術意見会を開き、海底鉱物資源域に関する情報をヒアリングし、2023 年度以降に実施予定となる深海試験時の海域選定について知見を得た。併せて、当該項目において実施する水槽試験に適用する鉱物サンプルに関する情報を収集し、鉱物サンプルの特徴と取得法、および入手可能な類異品等の知見を得た。また、海洋研究開発機構の海底鉱物資源サンプルを管理するキュレーターを招聘した技術意見会を別途開催し、海底鉱物サンプル（現物）の提供可否、および当該サンプルのデータベース利用可否についてヒアリングした。その結果、取扱いが比較的に容易かつ人体影響のない海底鉱物サンプル（マンガン団塊）の一部提供、およびデーターベース利用の許可を得た。

◆技術意見会（第 1 回）：2022 年 3 月 8 日　09:30～｜Web 会議(Zoom)
「海底鉱物資源域の選定と鉱物サンプルに関して」
◆技術意見会（第 2 回）：2022 年 3 月 24 日　10:00～｜Web 会議(Google-Meet)
「海底鉱物サンプル提供とデータベース利用に関して」

(c)成果発表（国内学会）

本プロジェクトの実施内容（研究内容）により得られた成果について、国内学会において 3 件の研究発表を実施し、当該学術分野より本研究に対する意見・知見を得た。

〔国内学会｜口頭発表〕
◆海洋理工学会令和 3 年(2021 年)度春季大会｜2021 年 6 月 11 日
「レーザー反射光による海中センシング技術に関する取組み【第 1 報】」
◆日本機械学会 2021 年度年次大会｜2021 年 9 月 7 日

「海中レーザー光を用いた海底反射に関する基礎試験」
◆日本機械学会関東支部第 28 期総会・講演会｜2022 年 3 月 15 日
「長距離海中レーザー測距評価機の開発」

[(6)｜実施内容③｜R4年度]
＜概要＞
プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、各担当機関・担当者とプロジェクト全体の進捗状況を確認することを目的として、進捗報告会を定期的に実施した。また、物性推定に関する取組み、ドップラシフト解析（複合航法）に関する取組み等については個別会議を不定期に実施し、課題の抽出、生じた問題の解決、今後の方針等について情報共有した。その他、各評価機、実証機の製作に際し、詳細な技術協議を要する場合、担当者・関係者間による技術専門会議および技術試験を実施した。
本委託業務の実施により得られた成果について、国内の学会において発表（5 件）し、当該学術分野より得られた意見・知見より本研究の更なる進展に努めた。この際、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知した。

(a)進捗会議
プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、各担当機関・担当者による分担実施項目に関する進捗報告会を定期的（毎月 1 回程度｜計 11 回/年度）に実施し、技術課題や懸念事項を含めた情報共有を図った。併せて、プロジェクト全体の進捗状況を関係者間にて共通認識することにより、プロジェクトの現況を把握し、計画の妥当性を再確認しつつ各実施項目の推進に努めた。本会議にて共有した技術課題については、協議を進め、必要に応じて個別会議（後記）を実施した。

◆プロジェクト進捗会議（第 15 回）：2022 年 4 月 28 日　09:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 16 回）：2022 年 5 月 23 日　09:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 17 回）：2022 年 6 月 29 日　09:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 18 回）：2022 年 7 月 26 日　09:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 19 回）：2022 年 8 月 31 日　09:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 20 回）：2022 年 9 月 26 日　09:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 21 回）：2022 年 10 月 26 日　09:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 22 回）：2022 年 11 月 18 日　13:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 23 回）：2022 年 12 月 23 日　09:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 24 回）：2023 年 1 月 27 日　09:30～｜Web 会議(MS-Teams)
◆プロジェクト進捗会議（第 25 回）：2023 年 3 月 27 日　10:30～｜Web 会議(MS-Teams)

(b)個別会議（物性推定関連｜ドップラシフト解析関連｜深海試験計画｜耐圧容器設計）
各実施項目において特に協議・調整等を要する事案が発生した場合、関係機関と個別会議を不定期に実施し、課題抽出、問題解決、今後方針等について情報共有を図った。協議・調整の結果を進捗会議にフィードバックし、関係者間にて共通認識することにより、プロジェクトの効果的な推進と、当該年度計画の遂行に努めた

◆個別会議（物性推定｜第 1 回）：2022 年 6 月 14 日　16:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆個別会議（物性推定｜第 2 回）：2022 年 7 月 14 日　10:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆個別会議（深海試験｜第 1 回）：2022 年 6 月 15 日　15:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆個別会議（物性推定｜第 3 回）：2022 年 6 月 14 日　16:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆個別会議（物性推定｜第 4 回）：2022 年 8 月 2 日　10:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆個別会議（ドップラ｜第 1 回）：2022 年 8 月 3 日　10:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆個別会議（物性推定｜第 5 回）：2022 年 9 月 6 日　10:00～｜Web 会議(MS-Teams)
◆個別会議（物性推定｜第 6 回）：2022 年 9 月 16 日　10:00～｜Web 会議(MS-Teams)

◆個別会議（物性推定｜第7回）　：2022年9月22日　　13:00～｜Web会議(MS-Teams)
◆個別会議（ドップラ｜第2回）　：2022年9月22日　　15:00～｜Web会議(MS-Teams)
◆個別会議（物性推定｜第8回）　：2022年11月8日　　15:00～｜Web会議(MS-Teams)
◆個別会議（ドップラ｜第3回）　：2023年1月16日　　14:00～｜Web会議(MS-Teams)
◆個別会議（深海試験｜第2回）　：2023年1月16日　　16:00～｜Web会議(MS-Teams)
◆個別会議（耐圧容器｜第1回）　：2023年1月20日　　14:00～｜Web会議(MS-Teams)
◆個別会議（ドップラ｜第4回）　：2023年3月20日　　13:30～｜Web会議(MS-Teams)

(c)技術専門会議・技術試験（Greenレーザー実証機｜光検出器）

特にGreenレーザー実証機の製作に際し、新規開発のMCP-PMTおよびその駆動電源（光検出器AGC組込）の実装において、仕様詳細を調整するとともに、技術問題の共有とその解決、および確認・検査等について、当該技術に関係する担当者・関係者間による技術専門会議・技術試験を実施した。

◆技術専門会議　　：2022年4月11日　　「PMT駆動電源仕様」
◆技術専門会議　　：2022年4月25日　　「PMT駆動電源仕様」
◆技術専門会議・技術試験：2022年5月9日　　「PMT駆動電源制御確認」
◆技術専門会議　　：2022年5月25日　　「PMT駆動電源仕様」
◆技術専門会議　　：2022年6月13日　　「PMT駆動電源仕様」
◆技術専門会議　　：2022年10月25日　　「PMT駆動電源仕様」
◆技術専門会議・技術試験：2022年1月24日　　「PMT駆動電源制御確認・実装確認」

(d)成果発表（国内会議）

本プロジェクトの実施内容（研究内容）により得られた成果について、国内学会において5件の研究発表を実施し、当該学術分野より本研究に対する意見・知見を得た。

〔国内学会｜口頭発表〕
◆海洋理工学会令和4年度(2022年度)春季大会｜2022年6月10日
「レーザー反射光による海中センシング技術に関する取組み【第2報】」
◆海洋理工学会令和4年度(2022年度)秋季大会｜2022年11月11日
「海中レーザー反射光を用いたドップラシフト検出【第1報】
◆海洋理工学会令和4年度(2022年度)秋季大会｜2022年11月11日
「レーザー反射光による海底の物性推定に関する取組み【第1報】
◆第70回応用物理学会春季学術講演会｜2023年3月16日
「高効率GaAsP-MCP-PMTの開発」
◆日本機械学会関東支部第29期総会・講演会｜2023年3月17日
「深海試験用長距離海中レーザー測距実証機の開発」

[(6)｜実施内容④｜R5年度]

＜概要＞

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、各担当機関・担当者とプロジェクト全体の進捗状況を確認することを目的として、進捗報告会を定期的に実施した。また、特に物性推定に関する取組み、ドップラシフト解析（複合航法）に関する取組み等については個別会議を不定期に実施し、課題の抽出、生じた問題の解決、今後の方針等について情報共有した。その他、各実証機の製作に際し、詳細な技術協議を要する場合、担当者・関係者間による技術専門会議および技術試験を実施した。併せて、2023年度(R5年度)から開始された深海試験について、船舶運用関係者、海中探査機運用関係者と本プロジェクト関係者とで、試験方法・実装手段等について協議し、安全かつ効率的な深海試験の実施に努めた。これら会議・協議とは別に、各実証機の性能評価・検証に要する各種試験に関しては、可能な限り多くのプロジェクト関係者が参加できるよう計画・調整し、当該試験により得られた

成果・知見を実感することでより具体的に認識を共有し、効率的かつ効果的な進捗と課題解決に繋げた。

本委託業務の実施により得られた成果について、国内の学会において発表（4 件）するとともに、展示会への出展や依頼講演を実施(4 件)し、当該学術分野・産業分野より得られた意見・知見より本研究の更なる進展に努めた。また 2023 年度中において 4 件の国際会議を申請し、採択を受けた（発表は 2024 年度）。この際、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知した。

(a)進捗会議

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、各担当機関・担当者による分担実施項目に関する進捗報告会を定期的に実施（毎月 1 回程度｜計 12 回/年度）し、技術課題や懸念事項を含めた情報共有を図った。併せて、プロジェクト全体の進捗状況を関係者間にて共通認識することにより、プロジェクトの現況を把握し、計画の妥当性を再確認しつつ各実施項目の推進に努めた。

◆プロジェクト進捗会議（第26回）　：2023年4月26日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第27回）　：2023年5月25日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第28回）　：2023年6月26日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第29回）　：2023年7月31日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第30回）　：2023年8月28日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第31回）　：2023年9月28日　09:00～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第32回）　：2023年10月30日　13:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第33回）　：2023年11月30日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第34回）　：2023年12月27日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第35回）　：2024年1月22日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第36回）　：2024年2月27日　09:00～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第 37 回）　：2024 年 3 月 21 日　09:00～｜Web 会議

(b)個別会議（実証機｜物性推定｜ドップラ｜水槽・浅海・深海試験｜耐圧容器｜その他）

各実施項目において特に協議・調整等を要する事案が発生した場合、関係機関・関係者と個別会議を不定期に実施し、課題抽出、問題解決、今後方針等について情報共有し解決を図った。2023 年度より深海試験が開始されたことにより、船舶および海中探査機の運航従事者との協議が多く行われた。これら協議・調整の結果を進捗会議にフィードバックし、全関係者間にて共通認識することにより、プロジェクトの効果的な推進に努めた。

◆個別会議（物性推定｜第 9 回）　：2023 年 4 月 11 日　15:00～｜対面
◆個別会議（物性推定｜第 10 回）　：2023 年 4 月 14 日　15:00～｜対面
◆個別会議（深海試験｜第 3 回）　：2023 年 6 月 1 日　13:00～｜対面
◆個別会議（水槽試験｜第 1 回）　：2023 年 6 月 2 日　13:30～｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 4 回）　：2023 年 6 月 14 日　10:00～｜対面
◆個別会議（物性推定｜第 11 回）　：2023 年 6 月 16 日　15:30～｜対面
◆個別会議（深海試験｜第 5 回）　：2023 年 6 月 21 日　15:00～｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 6 回）　：2023 年 6 月 26 日　16:00～｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 7 回）　：2023 年 6 月 29 日　15:00～｜Web 会議
◆個別会議（ドップラ｜第 5 回）　：2023 年 6 月 30 日　15:30～｜Web 会議
◆個別会議（浅海試験｜第 1 回）　：2023 年 7 月 6 日　15:30～｜Web 会議
◆個別会議（実証機開発）　：2023 年 7 月 7 日　13:30～｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 8 回）　：2023 年 8 月 29 日　10:00～｜Web 会議
◆個別会議（ドップラ｜第 6 回）　：2023 年 9 月 1 日　16:30～｜Web 会議
◆個別会議（浅海試験｜第 2 回）　：2023 年 9 月 6 日　09:30～｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 9 回）　：2023 年 9 月 13 日　13:00～｜Web 会議

◆個別会議（深海試験｜第 10 回）　：2023 年 11 月 10 日　　11:00～ ｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 11 回）　：2023 年 12 月 1 日　　10:00～ ｜Web 会議
◆個別会議（その他）　　：2023 年 12 月 7 日　　13:00～ ｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 12 回）　：2023 年 12 月 15 日　　14:00～ ｜Web 会議
◆個別会議（ドップラ｜第 7 回）　：2023 年 12 月 20 日　　17:15～ ｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 13 回）　：2024 年 1 月 24 日　　10:30～ ｜Web 会議
◆個別会議（ドップラ｜第 8 回）　：2024 年 2 月 21 日　　10:00～ ｜Web 会議

(c)試験（実証機｜物性推定｜ドップラ｜水槽・浅海・深海試験｜耐圧容器｜その他）

Green レーザー実証機、UV レーザー実証機、ドップラ実証機を製作し、海中探査機「かいこう」に搭載した深海試験にて性能評価・検証を実施した。これに関する各種試験を実施しするとともに、可能な限り多くのプロジェクト関係者が参加できるよう計画・調整することで、当該試験により得られた成果・知見の認識を具体的に認識・共有し、効率的かつ効果的な進捗と課題解決に繋げた。

◆耐圧試験(ガラスビューポート)　：2023 年 4 月 13 日　｜高圧実験水槽
◆浅海試験(Greenレーザー実証機)　：2023年5月10-15日　｜石垣島周辺海域
◆水槽試験(Greenﾚｰｻﾞｰ実証機｜海底ﾓｯｸｱｯﾌﾟ計測)：2023年6月5-9日　｜多目的水槽
◆耐圧試験(ガラスビューポート)　：2023年9月12日　｜高圧実験水槽
◆連接試験(かいこう+Green+UV｜IF接続確認)：2023年9月15日　｜無人探査機整備場
◆耐圧試験(Greenﾚｰｻﾞｰ実証機｜耐圧容器)：2023年9月22日　｜高圧実験水槽
◆深海試験(新青丸・かいこう｜KS-23-08C)　：2023年10月18-25日　｜相模湾初島東方海域
◆水槽試験(Green +UV実証機｜海底ﾓｯｸｱｯﾌﾟ計測)：2023年10月31-11日2日｜多目的水槽
◆浅海試験(ひびき｜慣性航法試験)　：2023年11月25-28日　｜伊豆三津浜周辺海域
◆連接試験(かいこう+ Green +UV｜IF接続確認)　：2023年12月21日　｜無人探査機整備場
◆連接試験(かいこう+ Green +UV+DPR|IF接続確認)：2024年1月17日　｜無人探査機整備場
◆耐圧試験(ドップラ実証機｜耐圧容器)　：2024年2月19日　｜高圧実験水槽
◆水槽試験(ドップラ実証機｜基本性能確認)　：2024年2月26日　｜多目的水槽
◆深海試験(「かいこう」｜KS-24-02C航海　：2024年2月29日-3月7日　｜「新青丸」@相模湾

計14試験
〔・耐圧試験×4回　・連接試験×3回　・水槽試験×3回　・浅海試験×2回　・深海試験×2回〕

(d)成果発表（国内会議｜講演・展示会）

本プロジェクトの実施内容（研究内容）により得られた成果について、国内学会において 4 件の口頭発表を実施した。併せて、国内外展示 3 件、依頼講演 1 件の報告を実施した。また 2023 年度において 4 件の国際会議に申請し採択を受けた（発表は 2024 年度）。これら各成果発表において、当該学術分野・産業分野より、本研究に対する意見・知見・将来展望への期待を得た。

〔依頼講演〕
◆海洋理工学会令和 5 年度(2023 年度)秋季大会｜2023 年 10 月 26 日
「UV レーザーを適用する海底可視化技術」

〔展示会等｜ポスター・機器展示・音声説明〕
◆海洋研究開発機構報告会/JAMSTEC2023｜2023 年 9 月 19 日
「海中光電磁波に関する研究開発 －様々な”光”の特性を利用して海を知る－」
◆PHOTON FAIR 2023｜2023 年 11 月 16－18 日
「光電子増倍管／海中探査を正確かつ高速に実現」
◆Photonics West Exhibition2023｜2024 年 1 月 30－2 月 1 日
「高時間応答光検出器の応用」について

〔国内学会｜口頭発表〕

◆第 93 回(令和 5 年度)マリンエンジニアリング学術講演会｜2023 年 9 月 21 日
「UV レーザーを適用する海底可視化技術」

◆海洋理工学会令和 5 年度(2023 年度)秋季大会｜2023 年 10 月 27 日
「レーザー反射光による海底の物性推定に関する取組み【第二報】」

◆日本機械学会関東支部第 30 期総会・講演会｜2024 年 3 月 14 日
「深海試験用長距離海中レーザー測距実証機の開発【第 2 報】」

◆第 71 回応用物理学会春季学術講演会｜2024 年 3 月 23 日
「イオン抑制処理による長寿命 MCP-PMT の開発」

〔国際学会｜Abstract 査読｜申請＋採択済|2024 年度発表予定〕

◆OPTICS & PHOTONICS International Congress｜April 23, 2024
「A Basic Research on The Deep Seabed Classification Technology Using Laser Reflection Images with Different Wavelengths」

◆OPTICS & PHOTONICS International Congress｜April 24, 2024
「Installation of the photosensor for the underwater laser scanner」

◆OPTICS & PHOTONICS International Congress｜April 24, 2024
「Development of the doppler laser system for under water vehicle speed measurement」

〔国際学会｜Full Paper 査読｜申請＋採択済|2024 年度発表予定〕

◆The 43rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2024)｜2024 年 6 月 12 日
「Basic Research on Seabed Visualization Technology Applying Uv-Laser」

[(6)｜実施内容⑤｜R6年度]

＜概要＞

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、各担当機関・担当者とプロジェクト全体の進捗状況を確認することを目的として、進捗報告会を定期的に実施した。特に、本研究課題における各最終目標を達成することを目的として、最終評価の場となる深海試験に対する試験手法､計測系のコンフィギュレーション(航行高度･速度･姿勢安定性)、評価手法、試験海域および予備海域を含む試験エリアの選定について、関係機関と協議を重ねた。併せて、計測データの精度・信頼性の向上を図るため、船舶運用関係者、船舶運航従事者、海中探査機運航従事者と本プロジェクト関係者とで、各実証機の海中探査機への実装手段および支援母船の航走計画について協議し、安全かつ成果創出に効果的な深海試験の実施に努めた。また、前年度における深海試験の成果を踏まえ、ドップラシフト解析、レーザードップラ複合航法に関する取組み等については個別会議を不定期に実施し、課題の抽出、当年度の方針等について担当機関、関係機関と協議するとともに、問題の解決に努めた。その他､各最終目標の達成に必要な技術要素について詳細な技術協議を要する場合､担当機関･関係機関による技術専門会議および技術試験を実施した。これら会議・協議とは別に、各実証機の性能評価・検証に要する各種試験に関しては、可能な限り多くのプロジェクト関係者が参加できるよう計画・調整し、当該試験により得られた成果・知見を共有（実感）することでより、最終目標の達成を現実的に意識させ、本プロジェクトに従事する各担当機関、および関連機関・部署の総合力の向上を図った。

本委託業務の実施により得られた成果について、国内・国外の学会において発表（国内 6 件｜国外 4 件）するとともに、ワークショップ・シンポジウムにおける展示・講演を実施(3 件)し、当該学術分野・産業分野に本プロジェクトの成果を示した。加えて、最終目標達成を含む深海試験にて得られた成果についてプレス発表を実施することで、新聞記事・Web 記事を含め本プロジェクトの成果と意義を広く一般に示した。また 2024 年度中において 6 件の国際会議を申請し、採択を受けた（発表は 2025 年度）。この際、研究成果の発表にあたって

は、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知した。この際、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知した。

(a)進捗会議

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、各担当機関・担当者による分担実施項目に関する進捗報告会を定期的に実施（毎月 1 回程度｜計 12 回/年度）し、技術課題や懸念事項を含めた情報共有を図った。併せて、プロジェクト全体の進捗状況を関係者間にて共通認識することにより、プロジェクトの現況を把握し、計画の妥当性を再確認しつつ各実施項目の推進に努めた。特に、最終目標に対する実現可能性、技術課題・懸念事項の解決を含めた計画との整合について意識し、最終評価（深海試験）に必須となる事項の整理に努めた。

◆プロジェクト進捗会議（第38回）　：2024年4月22日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第39回）　：2024年5月21日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第40回）　：2024年6月20日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第41回）　：2024年7月31日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第42回）　：2024年8月30日　14:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第43回）　：2024年9月27日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第44回）　：2024年10月29日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第45回）　：2024年11月27日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第46回）　：2024年12月26日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第47回）　：2025年1月22日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第48回）　：2025年2月6日　10:00～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第49回）　：2025年2月26日　09:30～｜Web会議
◆プロジェクト進捗会議（第 50 回）　：2025 年 3 月 24 日　15:30～｜Web 会議

(b)個別会議（実証機・PMT関連｜ドップラ・複合航法｜深海試験｜その他）

各実施項目において高別に協議・調整等を要する事案が発生した場合、関係機関・関係者と個別会議を不定期に実施し、課題抽出、問題解決、今後方針等について情報共有し解決を図った。併せて、本プロジェクトにおける最終評価の場となる 2024 年度に実施する深海試験(×2 度)について、船舶および海中探査機の運航管理部署・運航従事者との協議を密に実施し、最終目標の達成を目的として安全かつ成果創出に効果的な深海試験の実施に努めた。また、これら協議・調整の結果を進捗会議にフィードバックし、全関係者間にて共通認識することにより、プロジェクトの推進を図った。前年度深海試験を含め前航海にて得られた知見を基に、試験海域、試験エリアの選定、支援母船の航行計画、海中探査機の航行計画等、各運航従事者を交え最終目標を達成するための詳細な計画を考察した。

◆個別会議（Green・UV データ解析）：2024 年 4 月 9 日　13:00～｜Web 会議
◆個別会議（PMT 駆動電源）：2024 年 4 月 12 日　09:00～｜Web 会議
◆個別会議（LDVL 複合航法｜第 1 回）：2024 年 4 月 24 日　16:00～｜Web 会議
◆個別会議（ドップラ｜第 9 回）：2024 年 4 月 25 日　10:00～｜対面
◆個別会議（深海試験｜第 14 回）：2024 年 6 月 5 日　13:30～｜対面
◆個別会議（深海試験｜第 15 回）：2024 年 7 月 3 日　11:15～｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 16 回）：2024 年 7 月 11 日　15:00～｜Web 会議
◆個別会議（ドップラ｜第 10 回）：2024 年 7 月 18 日　10:00～｜Web 会議
◆個別会議（LDVL 複合航法｜第 2 回）：2024 年 8 月 1 日　13:45～｜対面
◆個別会議（深海試験｜第 17 回）：2024 年 8 月 22 日　13:30～｜Web 会議＋対面
◆個別会議（ドップラ｜第 11 回）：2024 年 8 月 22 日　15:00～｜対面
◆個別会議（深海試験｜第 18 回）：2024 年 10 月 7 日　15:00～｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 19 回）：2024 年 10 月 16 日　13:00～｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 20 回）：2024 年 10 月 16 日　14:00～｜Web 会議
◆個別会議（LDVL 複合航法｜第 3 回）：2024 年 10 月 31 日　11:00～｜Web 会議

◆個別会議（深海試験｜第 20 回）　：2024 年 11 月 15 日　　15:30～ ｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 21 回）　：2024 年 11 月 15 日　　15:30～ ｜Web 会議
◆個別会議（深海試験｜第 22 回）　：2024 年 11 月 25 日　　11:00～ ｜対面
◆個別会議（深海試験｜第 23 回）　：2024 年 12 月 2 日　　11:00～ ｜対面
◆個別会議（LDVL 複合航法｜第 4 回）：2025 年 1 月 10 日　10:00～ ｜Web 会議
◆個別会議（LDVL 複合航法｜第 5 回）：2025 年 1 月 16 日　10:00～ ｜Web 会議
◆個別会議（ドップラ｜第 12 回）　：2025 年 2 月 6 日　　15:00～ ｜Web 会議
◆個別会議（LDVL 複合航法｜第 6 回）：2025 年 2 月 6 日　10:00～ ｜Web 会議
◆個別会議（ドップラ｜第 12 回）　：2025 年 2 月 6 日　　14:30～ ｜Web 会議
◆個別会議（全実証機データ解析）：2025 年 2 月 24 日　　11:00～ ｜対面
◆個別会議（ドップラ｜第 12 回）　：2025 年 2 月 26 日　　13:30～ ｜Web 会議
◆個別会議（LDVL 複合航法｜第 7 回）：2025 年 3 月 10 日　10:30～ ｜Web 会議
◆個別会議（有識者ﾋｱ|将来利用）　：2025 年 3 月 26 日　　11:00～ ｜対面
◆個別会議（LDVL 複合航法｜第 8 回）：2025 年 3 月 26 日　15:00～ ｜Web 会議

(c)試験（Green・UV・DPR実証機｜水槽・深海試験｜探査機連接試験｜その他）

Green レーザー実証機、UV レーザー実証機、ドップラ実証機を製作し、海中探査機「かいこう」に搭載した深海試験（×2 度）にて、最終評価を実施した。当該深海試験に際し、事前確認および事前調整等に要する各種試験を実施した。当該試験結果を深海試験計画にフィードバックするとともに、各関係機関・各関係部署と共有し、最終目標の達成に資する深海試験の実施に備えた。

◆性能評価試験(PMT＋駆動電源)　：2024 年 4 月 18-19 日　｜HPK 実験室
◆水槽試験(ドップラ性能評価)　：2024 年 5 月 14 日　｜JAMSTEC 多目的水槽
◆岸壁試験(ドップラ計測評価)　：2024 年 5 月 16-17 日　｜JAMSTEC 岸壁
◆計測データ評価試験(Green +UV 計測データ)：2024 年 5 月 24 日　｜MEDS 実験室
◆動作確認試験(環境センサ)　：2024 年 8 月 20 日　｜JAMSTEC 整備場
◆水槽試験(ドップラ性能評価)　：2024 年 8 月 22-23 日　｜JAMSTEC 多目的水槽
◆水槽試験(Green 実証機設定調整)　：2024 年 9 月 9 日　｜JAMSTEC 多目的水槽
◆連接試験(かいこう- Green+UV+DPR)　：2024 年 9 月 13 日　｜「かいめい」船上
◆深海試験(かいめい・かいこう｜KM-24-10C)：2024 年 9 月 16-23 日　｜初島東方+大室海穴
◆性能評価試験(PMT＋駆動電源)　：2024 年 11 月 14-15 日　｜HPK 実験室
◆水槽試験(Green・ドップラ設定調整)　：2024 年 12 月 5 日　｜JAMSTEC 多目的水槽
◆連接試験(かいこう- Green+UV+DPR)　：2024 年 12 月 11 日　｜「かいめい」船上
◆深海試験(かいめい・かいこう｜KM-24-14C)：2024 年 12 月 13-20 日　｜初島東方+大室海穴
◆底生生物蛍光確認試験(UV 反射特性)　：2024 年 12 月 27 日　｜JAMSTEC 生態研究棟

計14試験
〔・PMT+駆動電源×2回　・連接試験×3　・水槽試験×4回　・岸壁試験×1回　・深海試験×2回　・その他試験×2〕

(d)成果発表（国内会議｜国際会議｜シンポジウム・ワークショップ｜プレス発表）

本プロジェクトの実施内容（研究内容）により得られた成果について、国内・国外の学会において計 10 件（国内 6 件｜国外 4 件）の発表を実施するとともに、ワークショップ・シンポジウムにおける展示・講演を実施(3 件)することで、当該学術分野・産業分野に本プロジェクトの成果と発展性を示した。加えて、最終目標達成を含む深海試験に得られた成果についてプレス発表を実施することで、新聞記事・Web 記事を含め本プロジェクトの成果と意義を広く一般に示した。また 2024 年度中において 6 件の国際会議を申請し、採択を受けた（発表は 2025 年度）。この際、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知した。

本委託業務の実施により得られた成果について、国内学会／国際学会において発表（国内6件｜国際5件）するとともに、ワークショップ・シンポジウムにおける展示・講演を実施(3件)し、当該学術分野・産業分野に本プロジェクトの成果を示した。加えて、最終目標達成を含む深海試験にて得られた成果をプレス発表し、メディア媒体（新聞記事・Web記事）にて本プロジェクトの成果と意義を一般に示した。また2024年度中において6件の国際会議を申請し、採択を受けた（発表は2025年度）。

〔国内学会｜口頭発表〕

◆日本機械学会2024年度年次大会｜2024年9月10日
「可視／非可視レーザーによる海底反射を適用した深海底可視化技術」

◆第94回（令和6 年度）マリンエンジニアリング学術講演会｜2023年10月23日
「UVレーザーを適用する海底可視化技術【第2報】」

◆日本機械学会関東支部第31期総会・講演会｜2025年3月4日
「深海試験用長距離海中レーザー測距実証機の開発 【第3報】」

◆日本機械学会関東支部第31期総会・講演会｜2025年3月4日
「レーザー反射光による海底画像の識別に関する取組み」

◆2025年第72回応用物理学会春季学術講演会｜2025年3月15日
「MCP-PMT用ランプアップ電源の開発」

◆2025年電子情報通信学会総合大会｜2025年3月24日
「海中レーザーを適用するドップラ速度計測に関する基礎研究」

〔ワークショップ・シンポジウム〕

◆防衛装備庁技術シンポジウム2024｜2024年11月12日
「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」

◆海と地球のシンポジウム2024｜2025年3月12日
「深海環境下におけるレーザー反射を適用した先進的光学計測技術の検証」

◆安全保障技術研究推進制度成果活用ワークショップ｜2025年3月25日
「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」

〔国際学会｜Abstract査読〕

◆OPTICS & PHOTONICS International Congress 2024｜April 23, 2024
「A Basic Research on The Deep Seabed Classification Technology Using Laser Reflection Images with Different Wavelengths」

◆OPTICS & PHOTONICS International Congress 2024｜April 24, 2024
「Development of the Doppler laser system for under water vehicle speed measurement」

◆OPTICS & PHOTONICS International Congress 2024｜April 24, 2024
「Installation of the photosensor for the underwater laser scanner」

◆2025 IEEE International Symposium on Underwater Technology (UT2025) ｜ March 4, 2025
「Fundamental Researches on Advanced Sensing Technologies Using Laser Reflection in the Deep-Sea and on the Deep-Seabed」

〔国際学会｜Full Paper査読〕

◆ ASME 2024 43rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering(OMAE2024)｜Jun 12, 2024
「Basic Research on Seabed Visualization Technology Applying UV-Laser」

〔国際会議｜Abstract査読｜申請＋採択済｜2025年度発表予定〕

◆OPTICS & PHOTONICS International Congress｜2025年4月23日
「Performance verification test for the underwater laser Doppler velocimeter in deep-sea area」

◆OPTICS & PHOTONICS International Congress｜2025年4月24日
「Approaches to Seafloor Image Identification Using Laser Reflected Light」

◆OPTICS & PHOTONICS International Congress｜2025年4月24日
「Development of a lamp-up photodetector for underwater laser scanner」

〔国際会議｜Full Paper査読｜申請＋採択済｜2025年度発表予定〕
◆The Thirty-fifth (2025) International Ocean and Polar Engineering Conference (Offshore and Polar Engineering Conference / ISOPE2025) | June 2, 2025
「Development of Highly Sensitive and Highly Responsive Photodetector for Underwater Laser Scanners」
◆The Thirty-fifth (2025) International Ocean and Polar Engineering Conference (Offshore and Polar Engineering Conference / ISOPE2025) | June 4, 2025
「The Deep Seabed Visualization Technology Using an Underwater Laser Reflection Measurement with Round Trip Distance of Over 100 Meters」
◆ASME 44th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE2025) | June 24, 2025
「Deep Seabed Images Produced by the Underwater UV Laser Scanner Mounted on an Underwater Vehicle in Deep-Water Tests」

〔プレス発表〕
◆2025年3月18日
「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 ―」

４．委託業務全体の成果

４．１　計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

本研究課題の計画時および実施当初において、予見していなかった特筆すべき成果、および最終目標を上回る顕著な成果を以下に示す。

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）を開発した。当該MCP-PMTを開発担当機関（浜松ホトニクス株式会社）のプロダクト（製品）として登録し、本研究課題にて創出された**技術研究成果を市場へと展開**した。

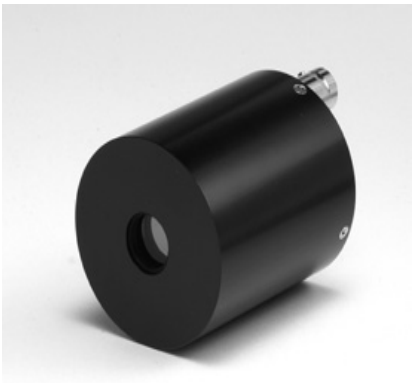


図 4-1-①
高性能 MCP-PMT「H15548-40」

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)機能を新規開発した。光電変換後の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」を考案し、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、**PMTへの印加電圧そのものを距離減衰補正に適用する手法は世界初**となる。

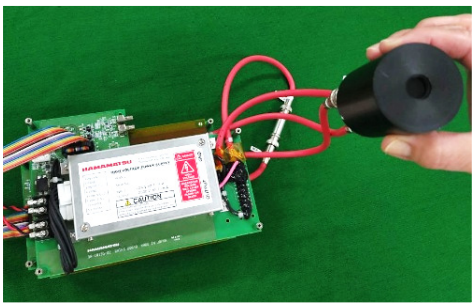


図 4-1-②
高性能 MCP-PMT＋高速制御駆動電源
による光検出器 AGC セットアップ

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（紫外）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、**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（最大計測距離）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。

図 4-1-③
UV レーザー実証機により計測された
海底可視化画像(合成画像)｜例示

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波長｜532nm）＋非可

視レーザー（UV波長｜355nm）による深海底の同時計測（海底可視化）を実施した。これにより、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。

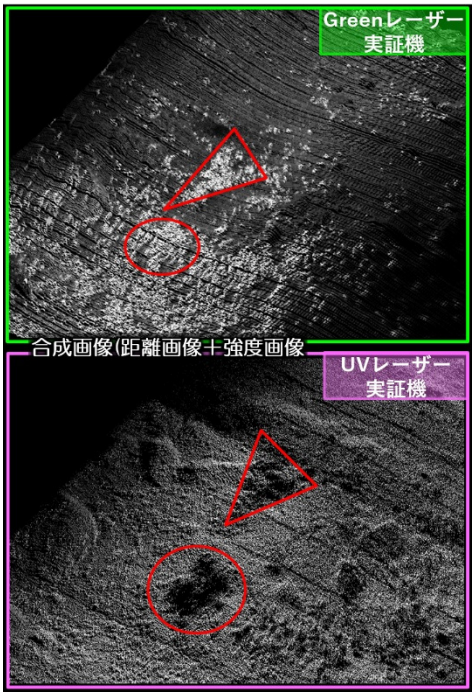


図 4-1-④
Green レーザー実証機／UV レーザー実証機の同時計測により生成された海底可視化画像の差異(合成画像｜シロウリガイコロニー)

４．２　研究課題の発展性（間接的成果を含む）

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のレーザー反射が可視化され、その位置が特定し、併せて海底の物性（底質）を類別する。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、**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（図4-2-①）。

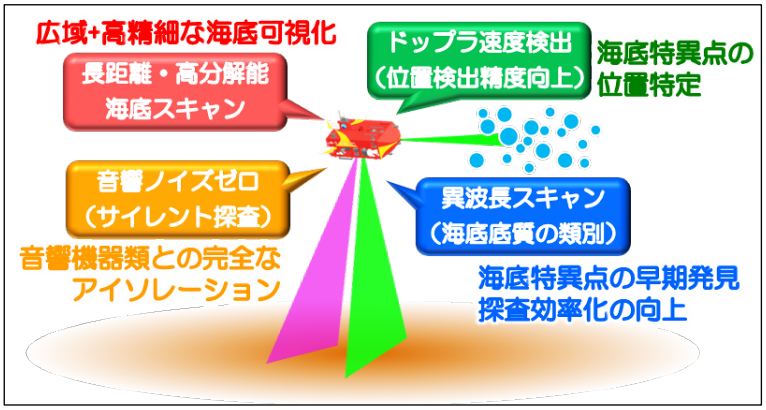


図 4-2-①　本研究成果の発展性｜音響ノイズゼロ・サイレント探査

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）技術への応用**が可能となる（図4-2-②）．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。未知の海底環境に対し、海中探査機が自己位置を把握しつつ、周囲の環境地図を構築することで、将来的に海中探査機の完全自動化／高度自動化を実現する根幹技術に繋がる。

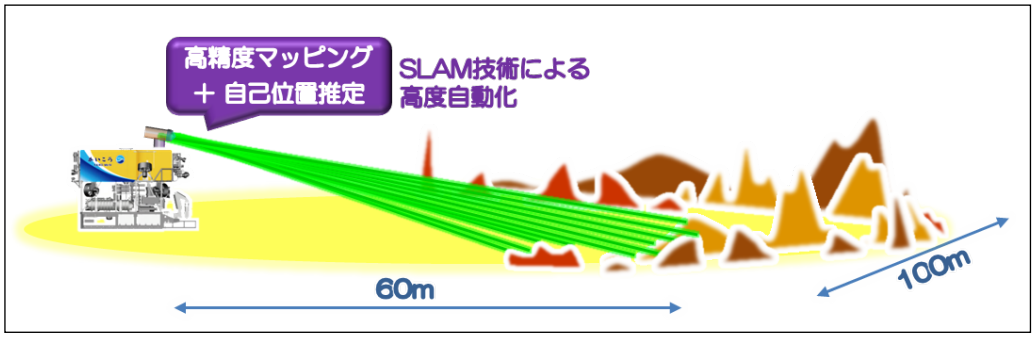


図 4-2-②　本研究成果の発展性｜海中 SLAM 技術への応用

③ 従来海底探査技術の補完

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が成立する。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。カメラによる海底探査はでは、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一方、高精細かつ色彩情報を含む多くの情報量が提供される。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、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（図4-2-③）。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、これら各海底探査技術を段階的に、あるいは同時に、または個別に適用することで、

図 4-2-③　本研究成果の展望性｜従来海底探査技術との組み合わせと効果（位置付け）

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、<u>海中探査機が安全に海底探査を実施するのに必須となる航行高度を提供</u>（例｜高度20-40m）するものであり、効率性だけでなく海中探査機利用の実用性を大きく向上させる。

④ 可視×非可視レーザーによる同時計測

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新たな海底理解手法の確立に大きく貢献する。<u>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</u>することで（図4-2-④）、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が明確化される。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、<u>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同定され、海底資源探査における新手法の確立</u>が期待される。

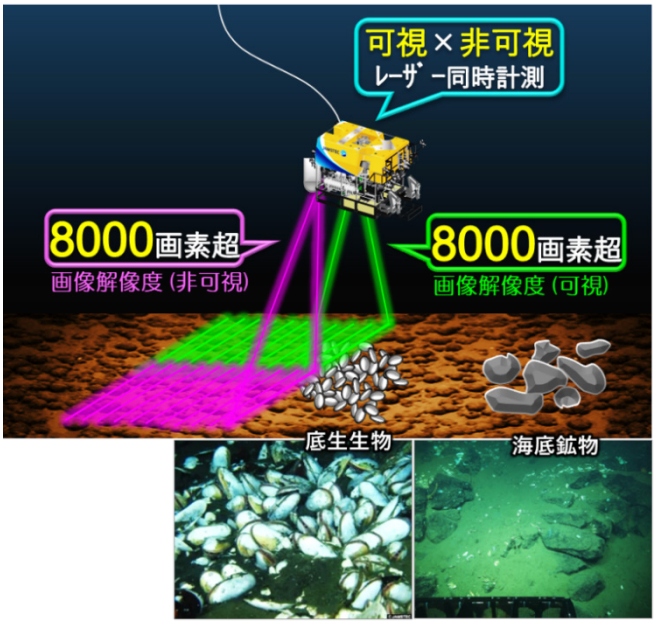


図 4-2-④　本研究成果の発展性｜可視・非可視レーザー同時計測による海底特異点の同定

４．３　研究成果の発表・発信に関する活動

① 国際会議における受賞（論文表彰）

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**「43th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE2024)」において『Best Paper Award』を受賞**した。

② 成果の社会発信｜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「4.1｜③｜UVレーザーによる海底可視化技術の実証」、「4.1｜④｜可視レーザー＋非可視レーザーによる海底特異点の可視化」に記載する成果についてプレス発表した。

＜発表タイトル｜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 ―』
(URL｜https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20250318_2/)

③ 成果の社会発信｜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として掲載された。

＜記事見出し｜2025年5月5日／06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』

⑤ その他

上記②および③の情報発信に伴い、**複数のWeb記事**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。

５．プロジェクトの総合的推進

５．１　研究実施体制とマネジメント

本研究課題では、代表研究機関（海洋研究開発機構）が本研究課題の全体を各要素課題の進捗とともに統括した。各分担研究機関（三菱電機ディフェンス＆スペースステクノロジーズ株式会社／浜松ホトニクス株式会社）が担当する研究項目（実施項目）の進捗を、試験結果および研究成果とともに判断し、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、現況状況や生じた課題・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との整合、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の共有化を図った。

本研究課題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、浅海試験および最重要となる深海試験の実

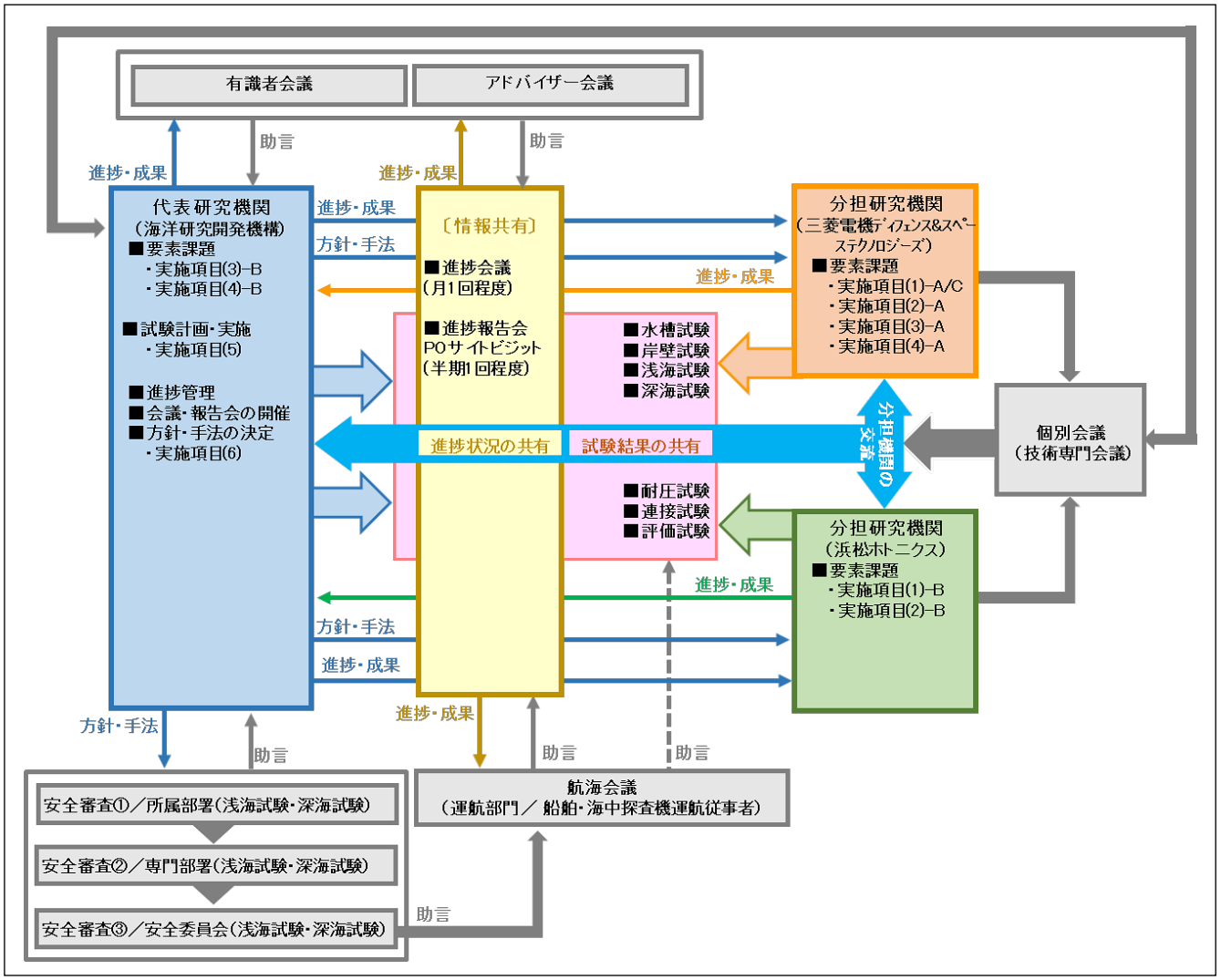


図 5-1-①　研究実施体制図

施に際し、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、万全の準備と注意を払った。**加えて、**船舶および海中探査機の管理部門、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。**これら体制により、本研究課題における深海試験×4回の航海期間（計32日間）が事故なく安全に実施され、最終目標の達成に大きく寄与した。

本研究課題において、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。図5-1-①に本研究課題における実施体制を図示する。

５．２　経費の効率的執行

本研究課題では、要素技術のフィージビリティ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製作し、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、光学系等を設計時より事前に選定**しておき、当該実証機の開発経費の軽減と効率化に努めた。

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）を利用**することにより、試験費用を大幅に抑制した。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ため、**継続的に利用可能な試験装置・試験治具・評価装置を製作**することで、試験費用の節減に努めた。

深海試験においては、最終目標を達成することを第一の目的とし、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・海象の悪化等により、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、安全な試験実施が可能な海域を設定するとともに、**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、避航地の選定と航路計画）に注力**し、船舶運用経費（燃料費）の抑制に努めた。

６．まとめ、今後の予定

本研究課題では、各レーザー実証機を用いた実環境下（深海環境下）における実証を通じて、当初設定したすべての最終目標を達成した。更に、本研究課題における各実施項目を遂行する過程あるいは結果において、最終目標とは異なる顕著な成果が多数得られた。これらはいずれも、海中レーザー計測技術の高度化およびその利用・応用に向けた世界初あるいは世界最高水準となる成果である。以下に本研究課題の成果を整理するとともに、付加価値となる成果、情報発信およびこれを踏まえた今後期待される展開等について示す。

【最終目標の達成】（3項参照）

① 長距離レーザー測距性能の実現 **世界最高**

・最大測距レンジ： **64m**（往復**128m**）　　目標：60m（往復120m）

・最大水平分解能： UVレーザー　**8,457画素**　　目標：8,000画素

Greenレーザー **8,294画素**

② 海底物性推定の高精度化 **世界初**

・推定正解率：　**83.1%**　　目標：70%

③ レーザードップラ複合航法精度の実証 **世界初**

・純慣性航法比：　**10倍以上**の位置検出精度　　目標：10倍

④ 深海環境下での海中探査機による上記目標の達成

・海中探査機に3種類のレーザー実証機（Greenレーザー実証機／UVレーザー実証機／ドップラ実証機）を搭載し、水深約900mの深海環境下にて最終目標を全て達成（実証に成功）

【その他の顕著な研究成果】（4.1項参照）

① 高性能光電子増倍管(MCP-PMT)の開発と製品化 **市場展開**

現行機搭載品比較3倍以上の光検出効率および製品相当以上の長寿命化を両立した新型MCP-PMTを開発し、製品登録・市場展開を実現。

② 光検出器AGCの開発（PMT増幅率高速制御） **世界初**

レーザーの海中伝搬における距離減衰補正を目的に、MCP-PMTへの印加電圧そのものを高速制御するAGC機能を実現。

③ UVレーザーによる深海可視化技術の実証 **世界初**＋**世界最高**

非可視（紫外｜UV）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）を新規開発した。海中探査機に当該実証機を搭載し、UVレーザーの海底反射から高精細な海底可視化画像の生成に成功した。最大15m（往復30m）の測距レンジおよび8000画素以上の最大水平分解能を実現。

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

Greenレーザーおよび UVレーザーの両波長を適用した深海底の同時計測を実施し、生成された海底可視化画像の比較から、UVレーザーに対する底生生物の蛍光特性あるいは吸収特性と考えられる特異な差異（海底特異点）を可視化に成功。

【成果発表・発信】（4.3項参照）

① 国際会議での論文表彰

国際会議「43th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE2024)」において『Best Paper Award』を受賞

② 成果の社会発信（プレス発表）

Greenレーザー測距技術・UVレーザー可視化技術を中心とした成果についてプレス発表。
『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』

③ 成果の社会発信（新聞記事）

上記「②｜プレス発表」における研究成果について新聞記事として掲載。
『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』

【今後の展開と応用可能性】

本研究課題で得られた成果および各要素技術の基礎を確立し、用途に応じ適切に発展させることにより、以下のような分野での展開・応用が期待される。

① 「4.2 研究課題の発展性｜①-④」に記載する技術への応用

② 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、ごく微小なレーザー反射を検出することが可能となる。これにより海底地形や底生生物を精細に可視化するだけでなく、メタンハイドレート湧出などの海底から湧き出てくるガス・気泡からの僅かなレーザー反射も検出が可能となる。そのため、従来の海底可視化技術では捉えることが困難な資源域（メタンハイドレート湧出域など）の探査への応用が見込まれる。

③ 海底インフラ・海底構造物の維持管理／保守点検

可視・非可視レーザーによる非接触かつ高感度・高精度な計測技術は、海底ケーブルや海底パイプライン、その他の海底構造物等に対する劣化監視や損傷検出に有効である。そのため、これら海底インフラを維持管理／保守点検するためのセンシング技術としての応用が見込まれ、それら管理・点検の自動化への寄与も期待される。

④ 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、環境影響評価や保全活動に資する。

⑤ 海底ダイナミクス（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、これを時系列的に比較することで、当該海底域におけるダイナミクス（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に繋がる。

⑥ 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、港湾保安や水中監視、危険物探知など保安分野への転用が期待される。併せて、非可視（UV）レーザーは視認を困難とするため、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。

⑦ 海中・海底流体場の計測（流速計測）

レーザードップラ速度を計測する技術を利用して、海中・海底の流速を計測することが可能である。音響ドップラ速度計（もしくは音響流速計）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。

⑧ 港湾監視／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、船舶や水中ドローンなど、海中移動体の速度を非接触で計測することが可能なため、港湾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。この際、非可視レーザーのドップラ速度を適用することにより、計測対象に認知されることなく計測することも可能となる。また、魚類を含む海洋生物の移動速度を非接触で計測することが可能なため、魚群の移動速度や挙動監視などの生態調査への転用が想定される。

【今後の予定】

本研究課題では、Greenレーザーおよび UVレーザーを適用した長距離レーザー計測技術、高精細海底可視化技術の有効性を実証した。併せて、これら技術により取得された海底可視化画像を用いて、海底の物性（底質）を自動類別するアルゴリズムを機械学習手法により構築し、高い正解率を示すことで当該画像の実用性と品質を実証した。加えて、Greenレーザーに対する海中懸濁物のドップラシフトを検出することで、移動体の対水速度（対懸濁物速度）を計測した。これを適用した慣性航法装置との複合航法による位置検出精度を示すことで、当該速度の実用性と品質を実証した。いずれのレーザー計測技術についても、深海環境下において最終目標を達成しており、当該技術の基礎を確立したと考える。

今後、これら技術を更に進捗、あるいは前記に示した展開・応用するために必須となるのが、小型・軽量化を前提とする実装性の向上となる。本研究課題では、海中探査機に搭載可能なサイズ・形状・通信仕様を満足させたが、各レーザー実証機は他の海中機器と比較しても大型・大重量であり、大型の海中探査機にのみ実装可能だったと言える。今後、本技術を進捗させる、あるいは展開・応用するためには、現況性能を保持しつつ小型・軽量化に取り組むことが効果的である。これを実現するため、耐圧容器内部の光学系と電気・電子機器の最適化設計を実施する。システム全体の対雑音性の向上（電気雑音を抑制）を図るとともに、電力収支と放熱管理を勘案した容器内部の機器配置、電路設計、光路設計を考える。この際、光検出器の寿命劣化の最大要因となる内部散乱および近傍散乱の影響を極力軽減させる技術努力も必須となる。これにより、海中探査機の種別（有人機／遠隔操作型無人機／自律型無人機）に関わらず本技術を実装可能な仕様を検討する。併せて、応用可能性のある分野への利用と実装仕様について調査・検討していく。世界的にも最高水準となる本研究課題の各成果（要素技術性能）を実用化するための仕様諸元を整理しつつ、**実装性向上を前提とした小型・軽量化を実現するシステムの最適化設計**を進める。

本研究課題で構築したGreenレーザー実証機、UVレーザー実証機は、現況、4度の深海試験および同じ試験海域（近海域｜初島東方・大室ダシ）でしか利用されていない。今後、**実際の資源域を含む様々な海域（海底域）、水深域において当該実証機の計測実績を積む**ことで、各レーザー波長に関する反射特性の理解が深まる。特に深海底に対する可視・非可視レーザー反射の比較に関しては、海底計測のデータサンプル（海底可視化画像データ）が蓄積されるほど、海底反射に対する特異な差異について知見が深まり、併せて、実用性の向上と改良項目の抽出にも繋がる。

ドップラ実証機に関しては、海中懸濁物からのレーザードップラシフトを検出するため、**様々な海域（海水成分）においてドップラ速度計測を実施**することで、当該ドップラ成分の検出頻度、確度、精度の理解が深まる。併せて、高速から低速まで様々な速度域におけるデータサンプルの

取得を実施する。併せて、本研究課題では一方向の速度成分（進行方向速度）に対する速度計測に留まったが、今後、三軸方向のレーザードップラ計測手法について検討を進める。加えて、海底に対するレーザードップラ速度（レーザードップラ対地速度）の計測精度について検証していく。

７．研究発表、知的財産権等の状況

（１）研究発表等の状況

種別	件数
雑誌論文	4件
学会発表（国内学会）	17件
学会発表（国際学会）	7件
展示・講演	4件
図書	該当なし
プレス	1件
その他（ワークショップ・シンポジウム）	3件

（２）知的財産権等の状況

「該当なし」

（３）その他特記事項

「該当なし」