

令和 3 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

1Gbps × 100mのBL積を達成する水中光ワイヤレス通信技術の研究

令和 4 年 5 月

株式会社トリマティス

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、株式会社トリマティスが実施した令和3年度「1Gbps×100mのBL積を達成する水中光ワイヤレス通信技術の研究」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

1. 1 研究課題の最終目標

2010年以降、水中光ワイヤレス通信技術は急激に発達し、グリーン～ブルーの波長帯を用いた通信装置によって、深海では20Mbpsで100mを超える長距離通信実験の成功例[1]があり、海外では製品化も成されている[2]。しかし海中光ワイヤレス通信が発展し市場が形成されるためには、地上ネットワーク並みの通信速度の長距離通信が望まれる。しかしながら、現時点において地上のネットワーク並みの100Mbpsを超える通信速度で100m以上の長距離通信を達成した例は、まだない。

本研究では、これまでの水中光ワイヤレス通信の伝送容量、伝送距離を大幅に凌駕する大容量・長距離通信の達成を目的とした通信方式に関する基礎研究を実施する。3年間の業務において、まず水中光ワイヤレス通信品質に影響を与える水のゆらぎ、水のにごり、水中浮遊物等の海中環境特性に関する研究を実施し、通信の伝送特性に与える影響の原理や条件を明らかにする。それらの知見を基に、海中環境が通信の伝送特性に与える影響を抑制する通信方式の提案及び双方向通信システムの試作を行う。試作機を用いて、

- ・ 深海と同様の減衰量を有する疑似理想環境における長距離通信実験
- ・ 様々な実海水域の背景パラメータを模擬した疑似海中環境における通信実験
- ・ 実海水域における通信実験

を実施する。海中環境を変えて試作装置を評価することで、海中環境条件が通信の伝送特性に与える影響を最小化できるように提案通信方式の、

- ・ 変調方式（信号波形、多値度等）
- ・ 多重化方式（時間、空間、波長、周波数、符号多重等）
- ・ 伝送方式（ビーム数、伝送符号等）
- ・ 光受信方式（アレイ数、受光面積、フロントエンド回路等）
- ・ 誤り訂正方式（誤り訂正能力、バースト誤り訂正能力等）
- ・ 信号処理方式（伝送波形劣化補償等）

の最適化を行い、通信速度1Gbpsまたは伝送距離500mまでにおいて、伝送速度（B）と伝送距離の積（BL積）が100Gbps・m（1Gbps×100m）以上を実現する双方向大容量・長距離水中光ワイヤレス通信技術を確立するとともに、水中光ワイヤレス通信システムの設計手法に関する知見を得ることを目指す。

その際、本研究で積み上げた、海中環境が通信の伝送特性に与える影響を抑制する通信方式の検討結果、疑似理想環境、疑似海中環境、及び実海水域での海中計測試験や水中光通信実験の比較データの解析により海中環境条件が水中光ワイヤレス通信に与える影響パラメータを明確化することで、実海水域に適用できる提案水中光ワイヤレス通信方式の伝送限界式を導出する。導出した伝送限界式を用いて、実海水域で達成できるBL積（1Gbpsまでの伝送容量の伝送可能距離）を評価する。

[1] Takao SAWA, et al., “Practical Performance and Prospect of Underwater Optical Wireless Communication,” IEICE Trans. Fundamentals, E102.A(1), pp. 156-167 (2019).

[2] Sonardyne, BlueComm Underwater Optical Communication:
<https://www.sonardyne.com/product/bluecomm-underwater-optical-communication-system/>

1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

(1) 海水の物理化学・生物環境が光ワイヤレス通信に与える影響の把握

これまでの水中光ワイヤレス通信の研究例では、海水の特性そのものに注目している研究は少なく、特に減衰と散乱角以外の特性を考慮している研究は殆どない。よって、

- ・ 想定される背景パラメータ（温度・密度、外来光、濁度等）の把握
- ・ 海中を光が伝搬している際に光が受ける影響（ゆらぎ、散乱、減衰等）の把握
- ・ 光波長、光出力、ビーム径や送受光指向性が上記に与える影響の把握
- ・ これらの同時計測手法の確立

を疑似海中環境水槽及び実海水域で実施し、伝搬減衰量のほかに、光のパスペナルティ（反射や散乱、吸収等の複合要因で発生する等価的な過剰損失）を推定する。

(2) 環境適応型双方向通信のための通信・信号処理方式

これまでの研究例から、深海であればグリーン～ブルー光の伝搬減衰量は0.2dB/m以下となる事がわかっている[3]。目標に挙げている500mの通信を達成するためには、(システムダイナミックレンジ) \geq (伝搬減衰量100dB@500m) + (パスペナルティ) の式を満たさなければならない。しかし、海中環境由来のパスペナルティは、これまで十分な検討が行われてこなかった。そこで、

- ・ 項目(1)で取得したデータを基にした最適な通信・信号処理方式の検討
 - ・ 項目(1)で取得したデータを基にした光学系の検討
 - ・ 考案した方式の評価方法の検討と評価
- を実施し、パスペナルティを見積もる。

[3] Hiroshi Yoshida, et al., “Basic Study of Underwater Laser Propagation,” Proc. 9th SEGJ Int. Symposium (Sapporo), 2009.

1. 3 要素課題に対する実施項目及び体制

これらの要素課題に取り組むために、株式会社トリマティスでは(1) a、(1) b、(2) a、(2) c、(3)を実施する。国立研究開発法人海洋研究開発機構では(1) c、(2) b、(2) dを実施する。

(1) 海水の物理化学・生物環境が光ワイヤレス通信に与える影響の把握のための調査

a. 光計測装置の開発(トリマティス)

想定される背景パラメータ(温度・密度、外来光、濁度等)の同時計測、および伝搬中に光が受ける影響(ゆらぎ、散乱、減衰等)を計測できる海中光伝搬特性計測装置を開発し、光強度、特に時間変動や分散による波形拡がりのデータが取得できるようにする。また2種類以上の波長で計測が可能で、光指向性が調整可能なように本装置を組み上げる。

b. 海中計測試験(トリマティス)

水中光ワイヤレス通信の方式検討および実証装置のシステムデザインを行うために、(1) aで開発した計測装置を用い、疑似海水環境水槽および実海水域で計測試験を実施し、光強度、特に時間変動や分散による波形拡がりのデータを取得する。

c. 各種仕様の検討(海洋研究開発機構)

計測装置を用意するために必要な背景パラメータの抽出と計測仕様について検討を行うとともに、(1) aで実施する計測装置の開発、ならびに(1) bで実施する海中計測に必要な知見を提供する。(1) b.で取得した海中試験のデータを解析し、解析結果から得られた知見を、水中光ワイヤレス通信の方式検討及び実証装置のシステム仕様に反映する。また必要に応じてシミュレーションを行う。

(2) 環境適応型双方向通信のための通信・信号処理方式設計と実証装置の試作・評価

a. 通信・信号処理方式の検討(トリマティス)

(1)で計測したデータにより伝搬減衰量、ならびにデータ解析結果をもとにパスペナルティを推定し、所要システムダイナミックレンジ(以下Dレンジ)を求める。パスペナルティと伝搬路変動の物理特性から、最適な通信方式の選定と信号処理方式の検討を行う。

b. 光学系の検討(海洋研究開発機構)

海水と送受光素子とのインターフェースとなる海中光学系を、(1)で得たデータをもとに検討する。ゆらぎの影響、外来光の影響、受信に対する送信光回り込み(散乱光等)を分析し、設計に反映する。

c. 実証装置のシステムデザインと試作（トリマティス）

（１）で計測したデータを基本とし、（２）a、bの検討結果を反映して、実証装置のシステムデザインを実施する。デザイン結果をもとに、各部の電気・機械設計を進め、擬似海中環境および実海水域で計測が実施できる双方向大容量・長距離海中光ワイヤレス実証装置を試作する。

d. 評価試験とデータ分析（海洋研究開発機構／トリマティス）

（１）の計測データをもとに擬似海中環境を構築する。この環境構築に当たっては、海洋研究開発機構がこれまでの海洋実験で得たノウハウも合わせて利用する。構築した擬似環境および実海水域において、（２）cで試作した装置の通信評価を行う。この試験では最終的な目標値を達成しているかどうかを評価する以外に、得られたデータを解析して実機の設計仕様と実機性能の比較を行い、性能が十分得られていない場合は、（２）cの試作に戻って装置の改良を実施するという、改良→実験の繰り返しを、研究期間で可能な限り実施する。

（３）プロジェクトの総合的推進（担当：トリマティス）

3ヵ月ごとに1回を基準として定期的な進捗報告会を実施し、実施機関でのプロジェクト全体の進捗状況を確認する。また、必要に応じて有識者を交えたデザインレビューを行い、プロジェクトの推進に努める。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

（１）海水の物理化学・生物環境が光ワイヤレス通信に与える影響の把握のための調査

a. 光計測装置の開発（トリマティス）

海中の背景パラメータや送受信パラメータの違いにより、伝搬中に光が受ける影響の計測ができる光計測装置の開発をした。

また海中計測試験の背景パラメータの抽出、背景パラメータ取得に必要な測定器、及びデータ取得のための測定治具を開発した。

b. 海中計測試験（トリマティス）

開発した計測装置を用いた疑似海中環境での計測試験を実施し、計測データを取得。取得データを解析し、測定条件下でBL積1Gbps×100m達成に必要な、通信方式及びロスバジェットの試算に活用。

c. 各種仕様の検討（海洋研究開発機構）

水中で伝搬実験での背景パラメータ、背景パラメータを取得する方法を検討し、（１）a.に反映。また相模湾沖の深海試験や、プール実験の実施法について検討。検討結果を（２）d.に反映。

（２）環境適応型双方向通信のための通信・信号処理方式設計と実証装置の試作・評価

a. 通信・信号処理方式の検討（トリマティス）

候補となる通信方式及び信号処理方式の検討を行うと共に、水中光ワイヤレス通信試験で用いる実証装置の光送受信器構成と仕様案の検討を行った。

b. 光学系の検討（海洋研究開発機構）

相模湾沖の深海試験が実施可能な水中光学系を耐圧容器に実装。またプール施設での光学ミラーによる折り返し通信実験が実施可能な光学系を実現。それにより深海試験、プール実験での通信実験に成功。

c. 実証装置のシステムデザインと試作（トリマティス）

1Gbpsでロスバジェット60dB以上を実現する光送受信器を試作（受信感度-30dBm以下、平均光

出力30dBm以上)。100mの深海水光ワイヤレス通信実験に必要なロスバジェット20dBに対して40dBのマーヅンを実現見込み。マーヅンは、水中環境の悪化やビーム径の拡大による損失の増加への対応に使用。

d. 評価試験とデータ分析（海洋研究開発機構／トリマティス）

相模湾沖深海900mにおける深海試験により1Gbps、100mの通信実験を行うことにより目標の1Gbps×100mのBL積を達成。またプール施設での実験でも1Gbps、108mの通信実験に成功。

伝送評価式と受信感度の理論式を用いて、1Gbpsまでの伝送速度で伝送限界を評価。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

(1) 海水の物理化学・生物環境が光ワイヤレス通信に与える影響の把握のための調査

a. 光計測装置の開発（トリマティス）

海中の背景パラメータや送受信パラメータの違いにより、伝搬中に光が受ける影響の計測ができる光計測装置の開発を行った。光計測では、実海域での計測を行う前に、実海域では制御できない背景パラメータの影響を定量化するため疑似海中環境での計測を行う。疑似海中環境における水中光伝搬特性計測の概念図を図1-a-1に示す。光計測では、光パルス送信装置及び光パルス受信装置で構成される光伝搬装置を用いて、光パルス列のパワー変動や波形広がりなどの時系列変化などの伝搬特性の計測を行う。

光パルス送信装置は、光源（LD及びLDドライバ）と可変のビームエキスパンダで構成されており、送信光パルスのパワー、パルス幅、ビーム径の制御が可能である。光パルス受信装置は、光受信器（受光素子及び受光基板）、可変の広角ズームレンズで構成されており、広角ズームレンズの制御や受光素子の変更を行うことにより、受光径（及び受光面積）、受光角の制御が可能である。

疑似海中環境では、水道水に海洋深層水から抽出した疑似海水成分を添加することにより基本的な海中環境を構築すると共に、カオリナイト（粒子径1μm程度）等の粘土成分を添加することで疑似海中環境の濁度の制御を行う。またヒーターによる加温や水中ポンプによる水流により、海中のゆらぎを模擬し、伝搬した光パルスのモードフィールドを観測することにより水中のゆらぎによる光軸ずれを評価できる。また光伝搬特性の計測においては、濁度、温度等の背景パラメータを同時に記録しておくことにより、水中環境の背景パラメータの影響を定量的に評価することが可能となる。

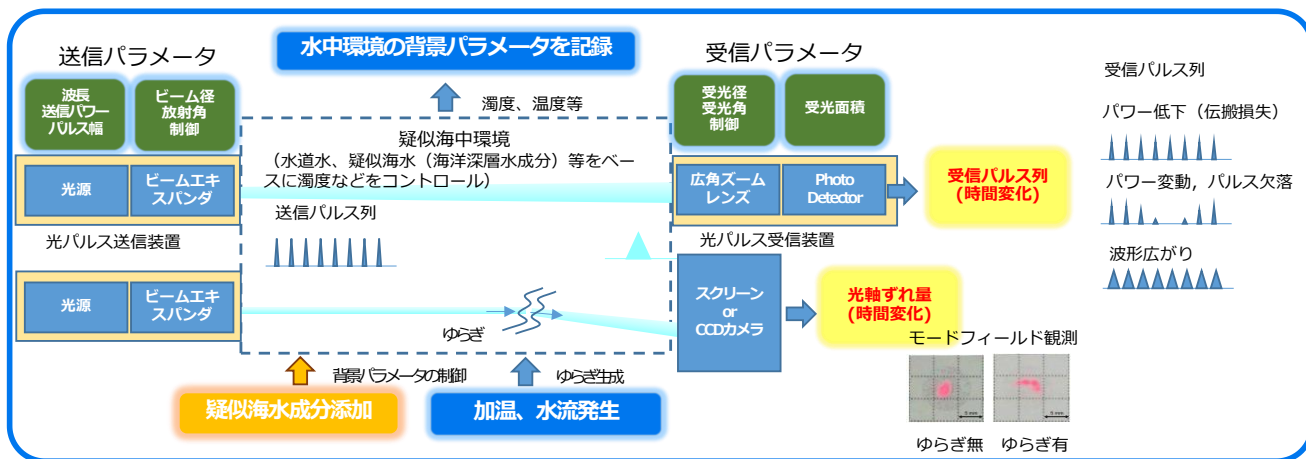


図1-a-1 図1 似海中環境における水中光伝搬特性計測の概念図

ア. 光パルス送信装置

光パルス送信装置の構成を図1-a-2に、仕様を表1-a-1に示す。図1-a-2に示す様に、光パルス送信装置は、LDを駆動する送信基板（LDドライバ）、発光素子としてLD、ビームを拡大するビームエキスパンダで構成されている。また送信波長は、445nm（青）と488nm（青緑）の2波長が選択可能である。スペクトル幅は、図1-a-3に示す様に波長445nmで2nm程度、波長488nmで3nm程

度であった。送信パワーは、波長445nmで最大71.6 μ W(26.7mW)、波長488nmで最大11.5mW(46.3mW)（括弧内はマルチ横モードLD）である。送信パルス幅は、図1-a-4に示す通り1ns～8nsの範囲で制御可能である。またパルス列の繰り返し周波数は5kHz～100MHzの範囲（但しパルスのデューティ比が1/2以上）で設定可能である。ビーム径（パワーが1/2となる直径）は、図1-a-5に示す様に445nm LDで約3mm×3mm～9mm×9mm程度、488nm LDで約4×4mm～33mm×24mm程度であったが、波長ごとの光学系の最適化を行うことによりビーム径の範囲を調整できると思われる。

表 1-a-1 光パルス送信装置の仕様

項番	項目	内容	備考
1	送信器構成	LD、LDドライバ、ビームエキスパンダで送信器を構成	図2参照
2	波長	445nm LD（青）：443nm 488nm LD（青緑）：487.5nm	図3参照
3	スペクトル幅	445nm LD：445nm、 488nm LD：488nm	
4	送信パワー（最大）	445nm LD：71.6 μ W（26.7mW） 488nm LD：11.5mW（46.3mW）	括弧内はマルチ横モードLDの値
5	送信パルス幅	1ns～8ns（445nm、488nm共通）	図4参照
6	列繰り返し周波数	5kHz～100MHz	但しパルスデューティ比1/2以上
7	ビーム径（直径）	445nm LD：約2～10mm程度 488nm LD：約3～30mm程度	図5参照

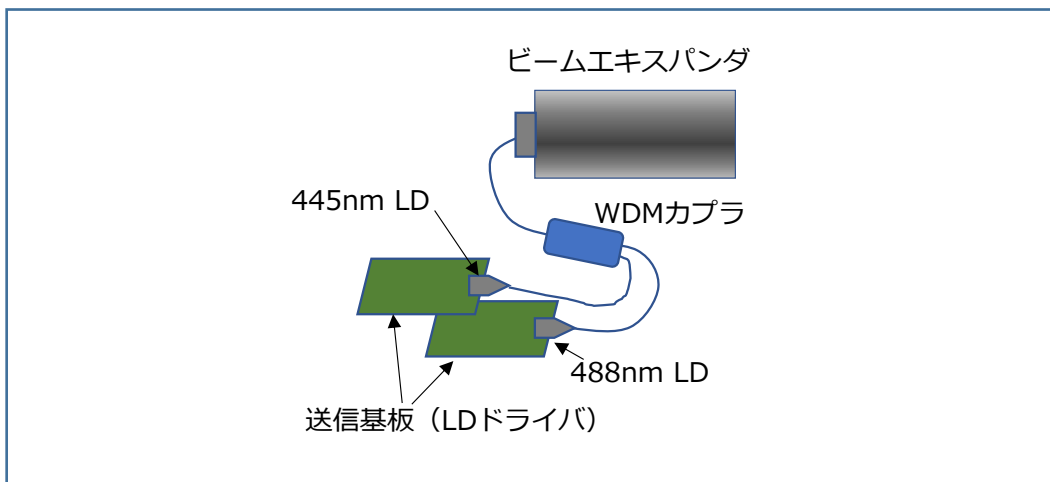


図 1-a-2 光パルス送信装置

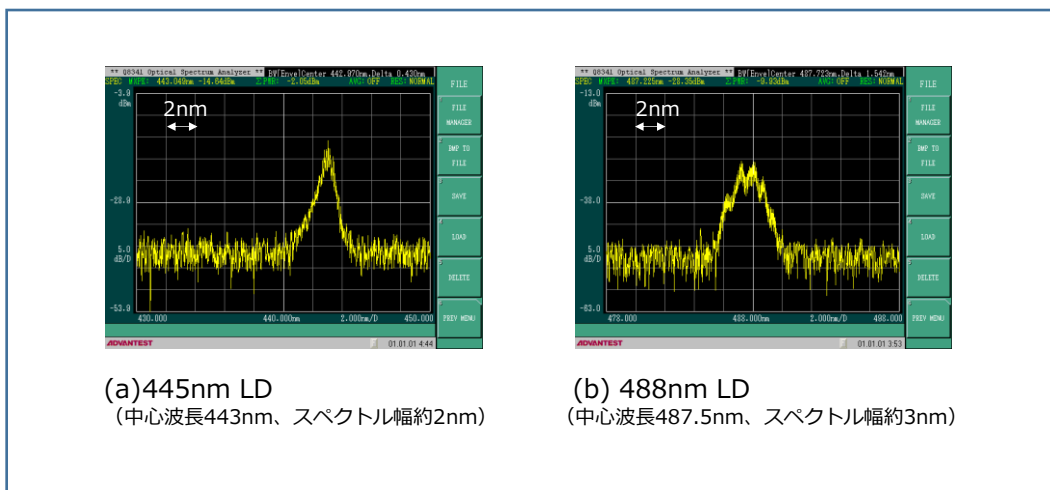


図 1-a-3 光スペクトル波形

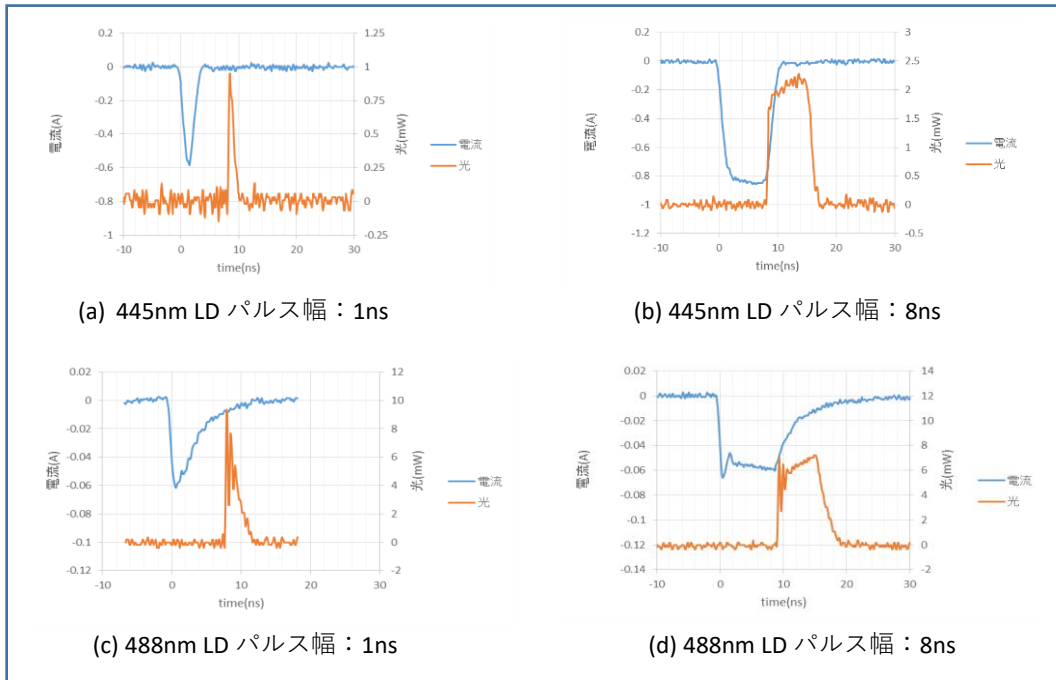


図 1-a-4 送信パルス波形

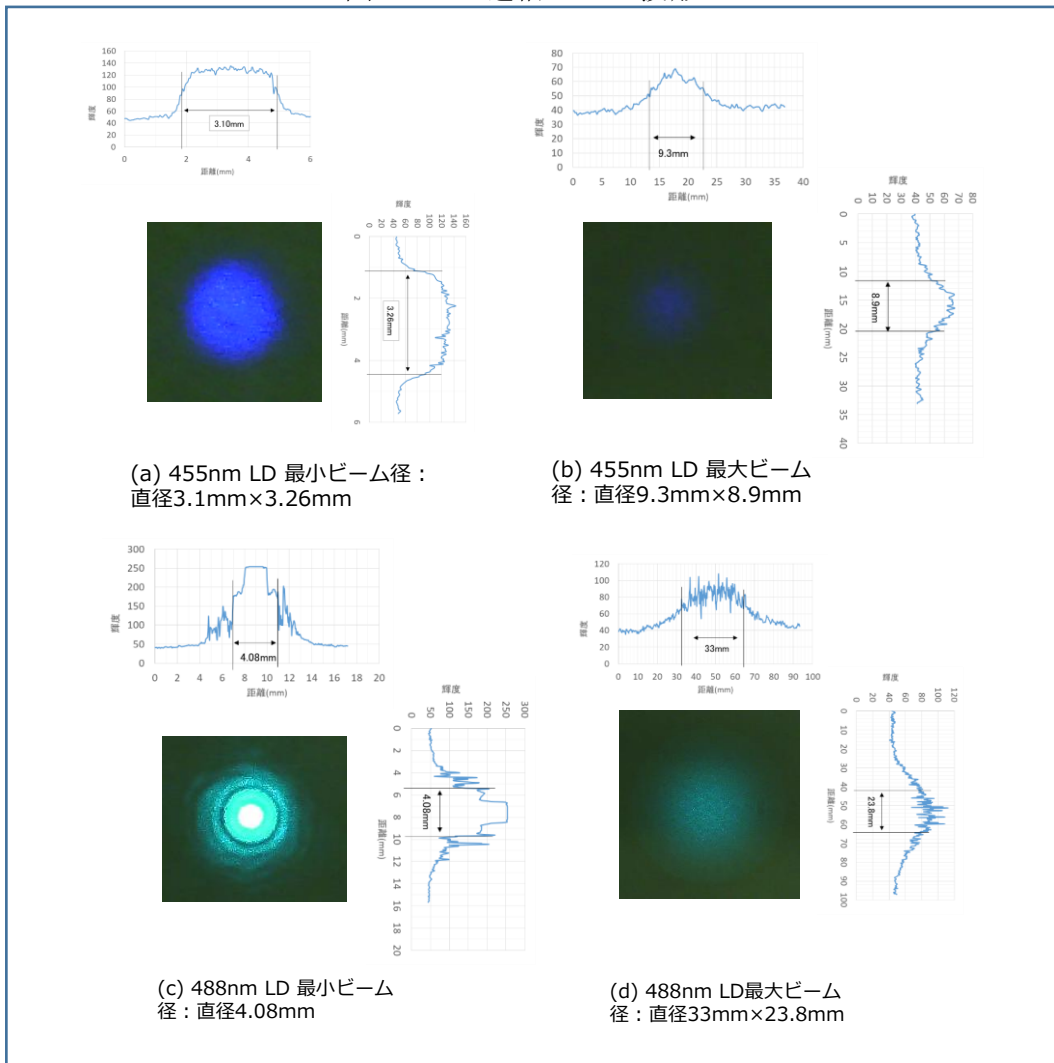


図 1-a-5 ビーム径@距離 4m

イ. 光パルス受信装置

光パルス受信装置の構成を図1-a-6に、仕様を表1-a-2に示す。光パルス受信装置は、受光素子、受光範囲及び受光角を制御する可変広角ズームレンズ、光を電流に変換する受光素子、光電流を電圧に変換し増幅する受光基板（TIA）で構成されている。光計測試験においては、受光径、受光感度の異なる素子を用いて試験を行う予定であるが、今回は、受光素子径 $\Phi 0.2\text{mm}$ 、増倍率50、周波数帯域700MHzのSi-APDを用いた。光パルス受信装置の有効受光径は、広角ズームレンズの最大広角設定時に、 $\Phi 3.9\text{mm}$ となり、受光素子径に比べ10倍以上の受光径を実現している。広角レンズとPDアレイ等の受光素子径の大きな受光素子を組み合わせることにより、受信装置の受光径のさらなる拡大が可能と考えられる。また最大受光角は、図1-a-7に示す様に最大広角設定時に $\pm 0.6^\circ$ であり、最大ズーム設定時に比べ4倍の最大受光角を実現している。一般に最大受光角は、受光素子径が大きいほど大きくなる。広角レンズと受光素子径の大きな受光素子を組み合わせることにより、受光径及び最大受光径を拡大することで、水中での光軸合わせの難易度の緩和が可能であると考えられる。

表 1-a-2 光パルス受信装置の仕様

項番	項目	内容	備考
1	受信器構成	受光素子, 受光基板 (TIA), 可変広角ズームレンズで受信器を構成	図6参照
2	有効受光径 (直径)	3.9mm (最大広角設定、受光素子径 $\Phi 0.2\text{mm}$ に対して)	
3	有効受光角	$\pm 0.6^\circ$ (最大広角設定) $\pm 0.15^\circ$ (最大ズーム設定)	図7参照
4	受光感度	445nm : 15.2(A/W) 488nm : 16.7(A/W)	

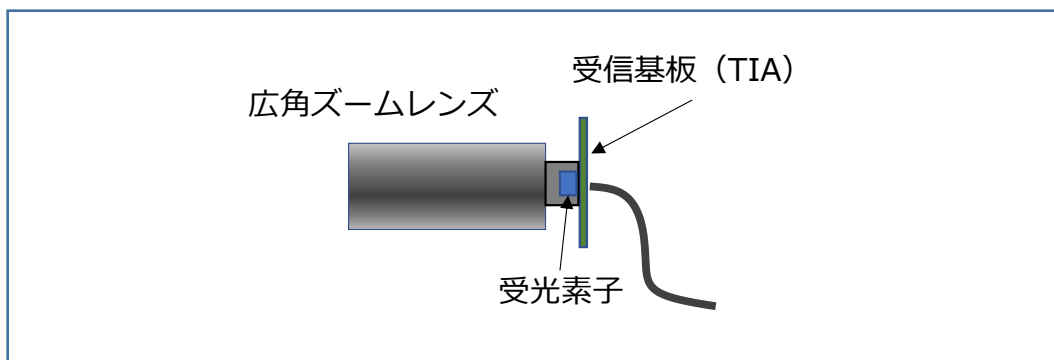


図 1-a-6 光パルス受信装置の基本構成

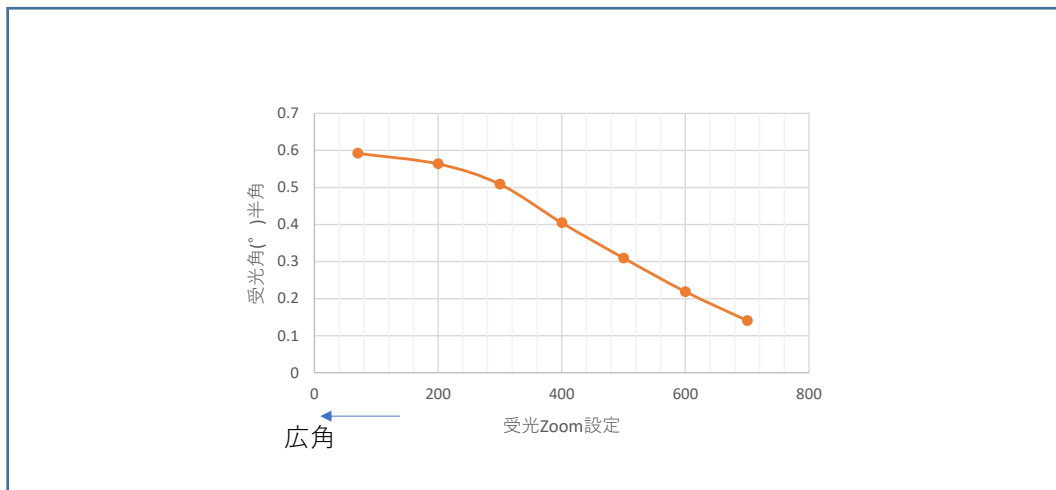


図 1-a-7 広角ズームレンズの設定と有効受光角

ウ. パイプ水槽光伝搬路（疑似海中環境）

パイプ水槽を図1-a-8に、その仕様を表1-a-3に示す。塩化ビニール製の全長1,750mm、内径150mmのパイプと、アクリル製の窓（パイプとの接合部から窓までの長さが75mm）を組み合わせたパイプ水槽に、水道水や海水などを充填することによりパイプ水槽光伝搬路を構成することができる。例えば、パイプ2本を接続し、両端にアクリル窓を取り付けることにより、水中伝搬距離3.65mのパイプ水槽伝搬路となる。また、3.65mのパイプ水槽伝搬路を3セット構成できる部材を揃えているので、最大10.95mの水中伝搬実験が可能である。

表 1-a-3 パイプ水槽の仕様

項番	項目	内容	備考
1	パイプ水槽	パイプ水槽、アクリル窓で構成	図8参照
2	パイプ長	全長1750mm/本（アクリル窓含まない）	
3	パイプ径	Φ150mm	
4	センサ投入口寸法	Φ50mm	
5	パイプ水槽接合部からアクリル窓までの長さ	75mm	

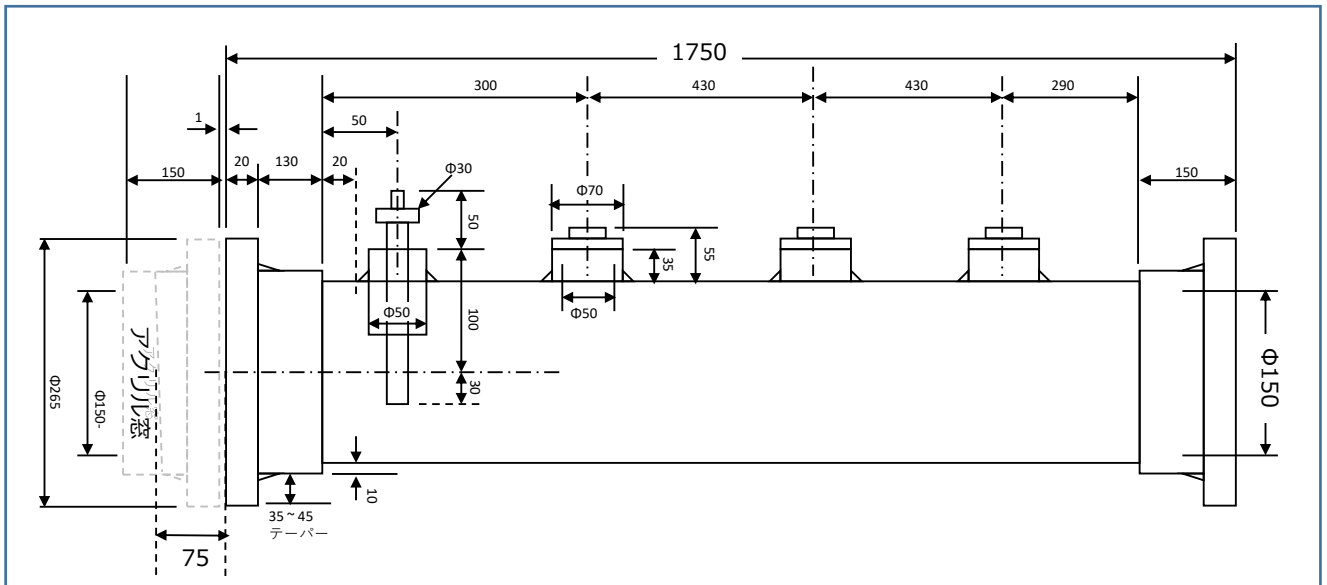


図 1-a-8 パイプ水槽のサイズ

エ. 防水ケース（耐圧容器）

光伝搬装置を収容し、プールや実海域で光計測試験を行うための防水ケースの仕様を表1-a-4に示す。防水ケースは、全長575mm（送信）、739mm（受信）、内径310mm、厚さ10mmの亚克力製の円筒パイプで、片端に放熱及び水中コネクタを取り付けるアルミ製のフランジ、もう一方に光パルスの入射出を行う亚克力製のフランジ（亚克力窓）を取り付ける構成をとっている。サイズは、水深100m程度で使われる耐圧容器のサイズを参考にしている。光パルス送信装置及び光パルス受信装置を収容した防水ケースの外観を図1-a-9及び図1-a-10に示す。図を見て分かるように、装置収容後の空き空間が多くまだまだサイズダウンが可能である。

表 1-a-4 防水ケースの仕様

項番	項目	内容	備考
1	構成	亚克力製円筒パイプ、亚克力製フランジ、アルミ製フランジで構成	図9、10参照
2	全長	送信装置用：575mm 受信装置用：739mm	
3	内径	310mm	
4	厚さ	10mm	



図 1-a-9 防水ケースの外観（光パルス送信装置を収容）

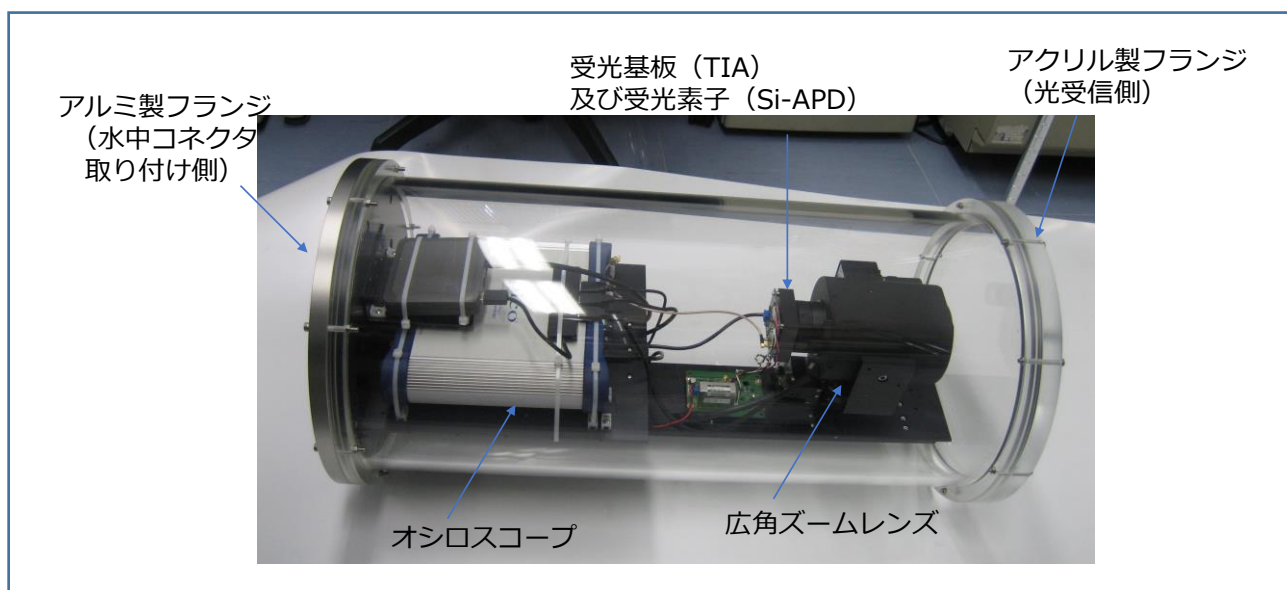


図 1-a-10 防水ケースの外観（光パルス受信装置を収容）

b. 海中計測試験（トリマティス）

光パルス伝搬特性の測定

開発した光計測装置を用いた疑似海中環境での計測試験実施に向けて、試験項目案を策定すると共に、光計測試験を開始し一部データの取得を行った。

光計測装置の動作確認を兼ねて、パイプ水槽光伝搬路を用いた光計測試験を、水中伝搬距離を変えて行った。まず水中伝搬距離0mでの光計測試験の実験系を図1-b-1/11に示す。光パルス送信装置は、445nm LDと488nm LD、それぞれのLDを駆動する送信基板（LDドライバ）、445nmと488nmの光パルスを合波するWDMカプラ、及びビームを拡大するビームエキスパンダで構成されている。光パルス送信装置からの光出力は、パルス幅3nsとなるように送信基板でLD駆動電流を制御すると共に、ビームエキスパンダ後段の可変光アッテネータで、光パルス受信装置が飽和しないように制御した。なおビーム径は最小となるように、ビームエキスパンダを設定した。光パルス受信装置は、可変広角ズームレンズ、Si-APD、受光基板（TIA）で構成されており、受光基板からの出力電圧波形をオシロスコープで測定した。なお光パルス受信装置では、受光径、受光角が最大になるように、広角ズームレンズを設定している。空間伝搬波形（水中伝搬距離0mの波形）を図1-b-2/12に示す。光パルス受信装置の出力波形のピーク電圧は、445nm、488nmそれぞれで689mV、476mV、パルス幅は、それぞれ2.5ns、2.65nsであった。なおピーク電圧は、光パルス受信装置が飽和しないように、入力制御を行っていることと、光軸調整条件による受光感度の変化があることから、水中伝搬距離ごとの単純な比較はできない。

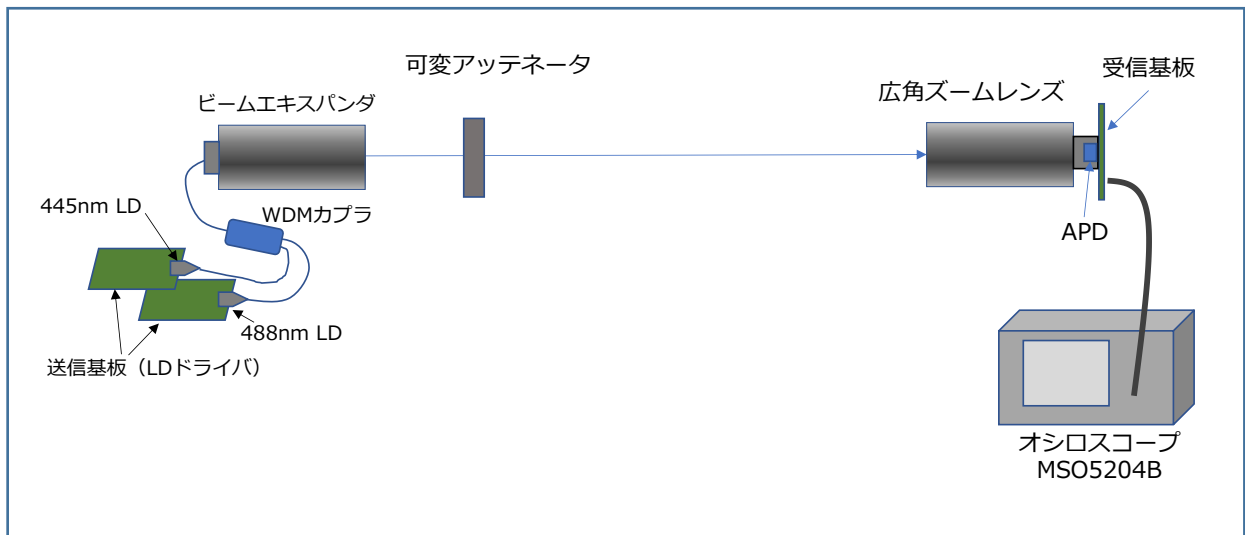
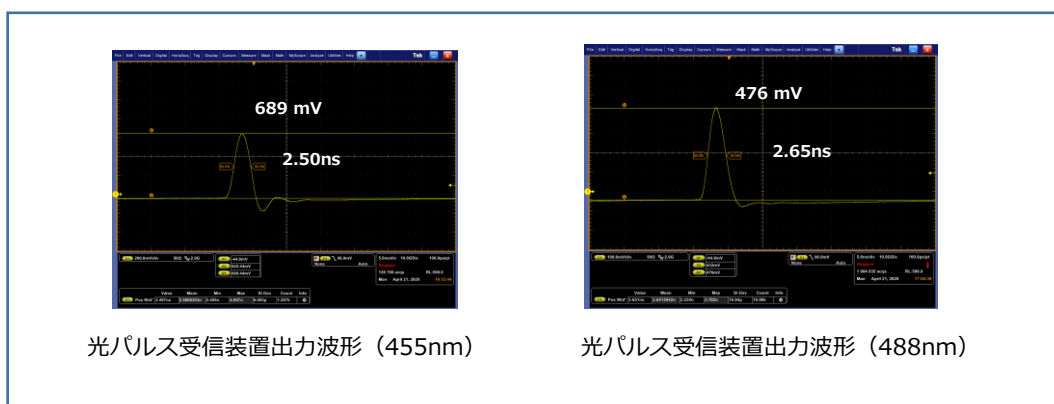


図 1-b-1/11 光伝搬実験系（空間伝搬）



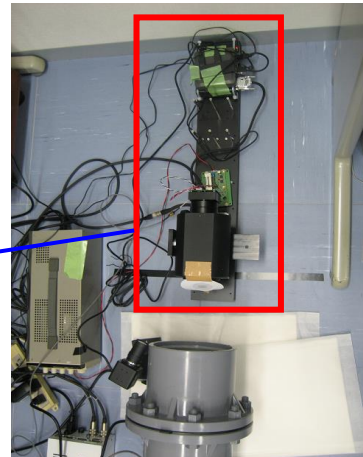
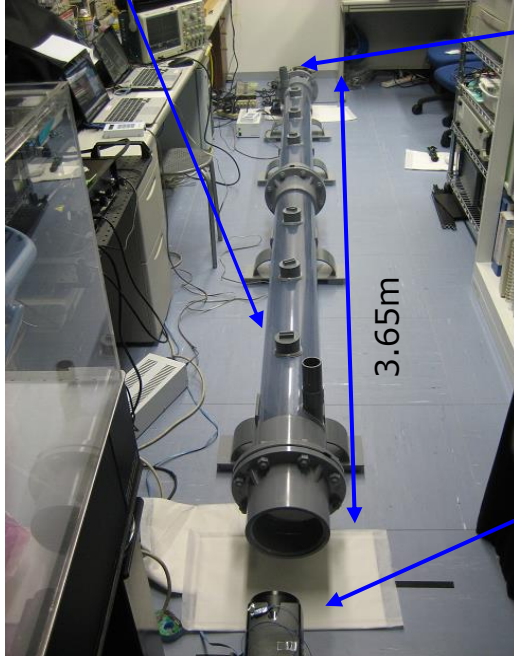
光パルス受信装置出力波形（445nm）

光パルス受信装置出力波形（488nm）

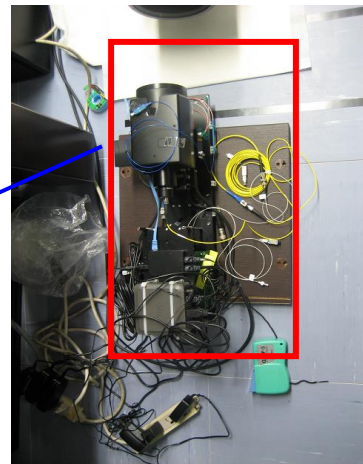
図 1-b-2/12 空間伝搬波形

次に光パルス送信装置と光パルス受信装置の間に、パイプ水槽光伝搬路を挿入して水中光計測試験を行った。パイプ2本と両端にアクリル窓を装着した水中伝搬路長3.65mのパイプ水槽を用いた実験系を図1-b-3/13、水中伝搬波形を図1-b-4/14に示す。光パルス受信装置の出力波形のピーク電圧は、445nm、488nmそれぞれで492.6mV、754.6mV、パルス幅は、それぞれ2.28ns、2.43nsであった。また3.65mのパイプ水槽2本と、パイプ水槽から出力された光パルスをもう一方のパイプ水槽に折り返すミラー（ビーム折り返しミラー）を用いた水中伝搬路長7.3mの水中計測試験の実験系を図1-b-5/15、水中伝搬波形を図1-b-6/16に示す。本実験では、パイプ水槽に水道水を充填した。光パルス受信装置の出力波形のピーク電圧は、445nm、488nmそれぞれで264.6mV、546.5mV、パルス幅は、それぞれ2.34ns、2.88nsであった。伝搬後のパルス幅を比較すると波長445nmで-0.15ns~-0.22ns程度、波長488nmで-0.3ns~+23ns程度の変動が見られたが、光パルス受信装置、オシロスコープの周波数帯域を考えると有意な差とは言えない。また、7.3mのパイプ水槽の水中伝搬損失を光パワーメータで測定したところ3.2dBであった。試みに光パルス送信装置の出力条件を合わせた場合のピーク電圧で水中伝搬損失を評価したところ4.2dBであり、実際の損失より1.0dBの劣化が見られた。大きな差ではないが、光軸調整条件の調整不足による感度劣化が要因と思われる。今後、光軸調整の難易度の緩和のためにも、受信装置の有効受光径や受光角の拡大を行うことが重要である。

パイプ水槽
光伝搬路
(水道水充填)

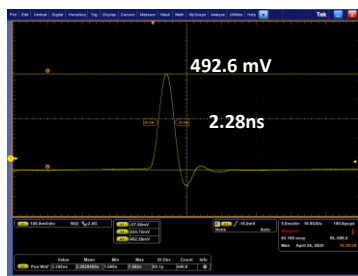


光パルス受信装置



光パルス送信装置

図 1-b-3/13 水中計測試験（パイプ水槽光伝搬試験）実験系
※パイプ 2 本連結したパイプ水槽を用いて試験（3.65m）



光パルス受信装置出力波形（455nm）



光パルス受信装置出力波形（488nm）

図 1-b-4/14 水中伝搬波形（3.65m）

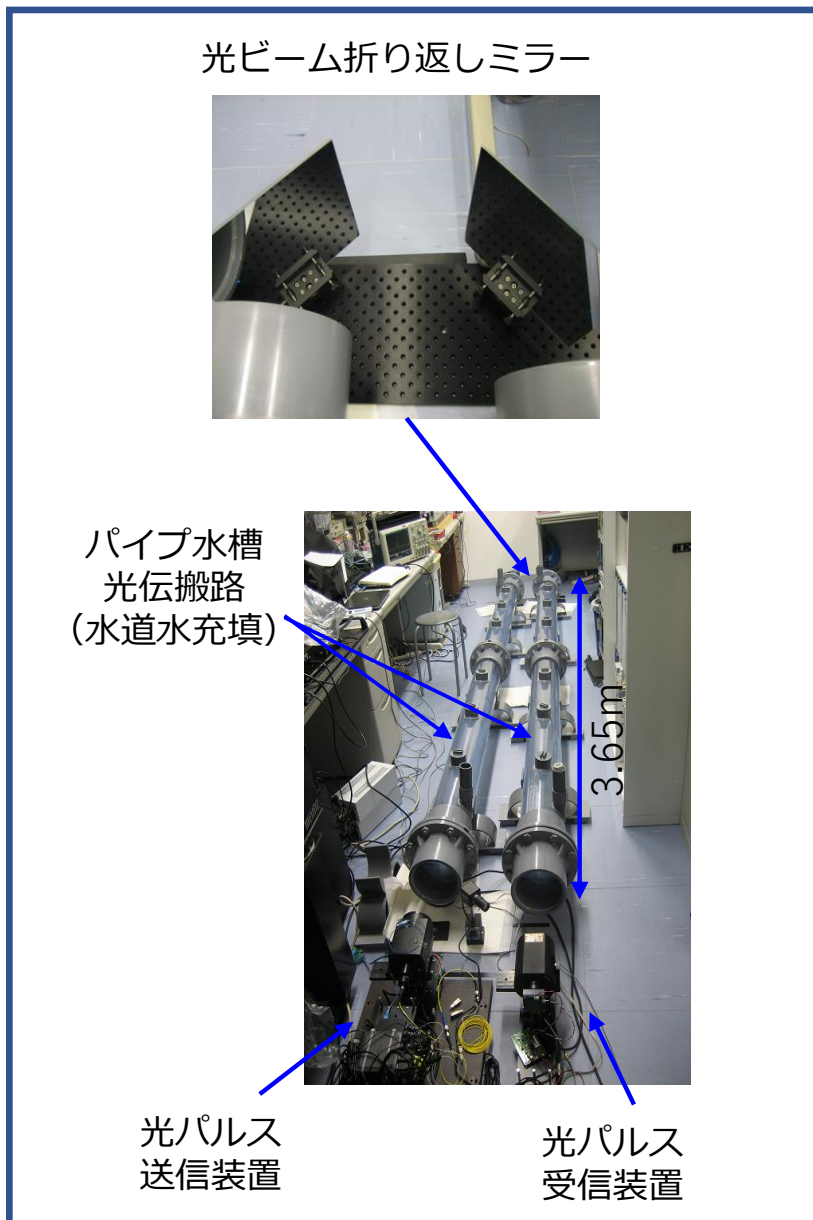


図 1-b-5/15 水中計測試験（パイプ水槽光伝搬試験）実験系
※パイプ 2 本を連結したパイプ水槽 2 つで折り返し試験（7.3m）

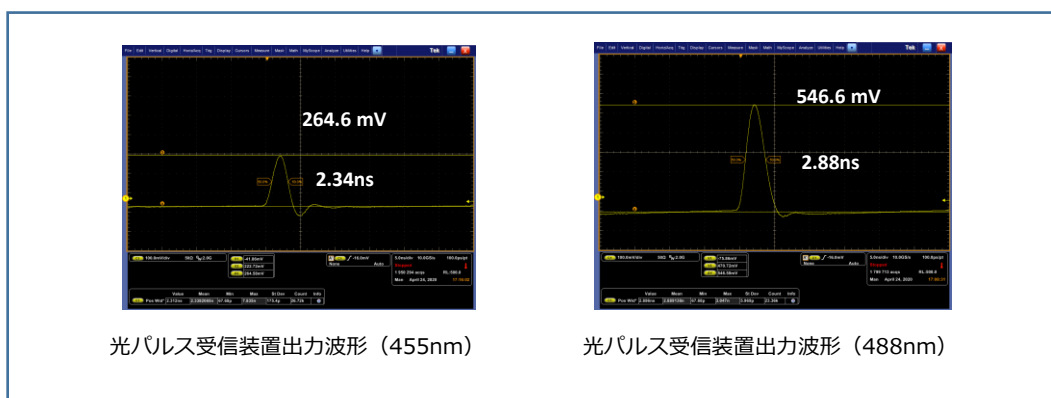


図1-b-6/16 水中伝搬波形（7.3m）

光パルス送信装置と光パルス受信装置の間に、合計10.95mのパイプ水槽光伝搬路を挿入した水中光計測試験系を図1-b-7に示す。

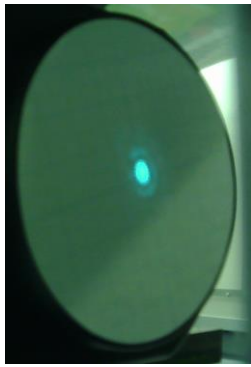
光パルス送信装置は、波長445nmのLD (Laser Diode) と488nmLD、それぞれのLDを駆動する送信基板 (LDドライバ)、445nmと488nmの光パルスを合波するWDM (Wavelength Division Multiplexer) カプラ、及びビームを拡大するビームエキスパンダで構成されている。光パルス送信装置からの光出力は、パルス幅3nsとなるように送信基板でLD駆動電流を制御すると共に、ビームエキスパンダ後段の可変光アッテネータで、光パルス受信装置が飽和しないように制御した。なおビーム径は最小となるように、ビームエキスパンダを設定した。光パルス受信装置は、可変広角ズームレンズ、Si-APD (Silicon Avalanche Photo Diode)、受光基板 (TIA; Transimpedance Amplifier) で構成されており、受光基板からの出力電圧波形をオシロスコープで測定した。

パイプ水槽伝搬路は、パイプ2本を連結し両端にアクリル窓を装着した水中伝搬路長3.65mのパイプ水槽3本と、1本目のパイプ水槽から出力された光パルスを2本目のパイプ水槽に折り返す平面鏡 (ビーム折り返しミラー)、2本目のパイプ水槽から出力された光パルスを3本目のパイプ水槽に折り返す平面鏡で構成されている。連結したパイプ水槽3本を使った水中伝搬路長は10.95mである。

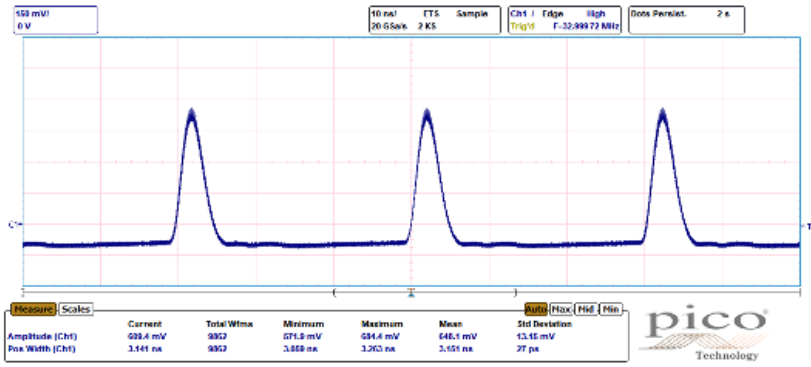
測定例として、波長488nmのLDの10.95m伝搬後の水中伝搬波形を図1-b-8に示す。光パルス受信装置の出力波形のピーク電圧は、ビーム径 (小)、ビーム径 (大)、それぞれ648mV、56.2mV、パルス幅は3.15ns、3.16nsであった。ビーム径が大きくなることにより受光素子に入る光パワーが小さくなっているが、パルス幅の変化はなかった。パイプ水槽伝搬路の損失は、7~7.5dB程度であり、パイプ水槽の平均損失1.2dB、折り返しミラー2枚の平均損失0.8dBを考慮すると、伝搬損失は0.16~0.21dB/mと推定される。これにはパイプ水槽のアクリル窓、折り返しミラーへの入射、出射角の条件により損失が変化するためと思われる。伝搬損失を正確に測定するためには、入射、出射角の条件を一定にして測定する必要があると思われる。



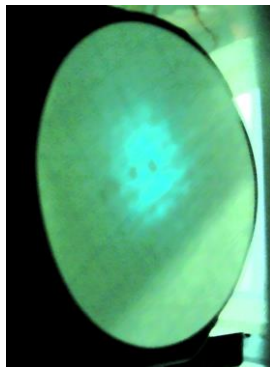
図 1-b-7 水中計測試験系



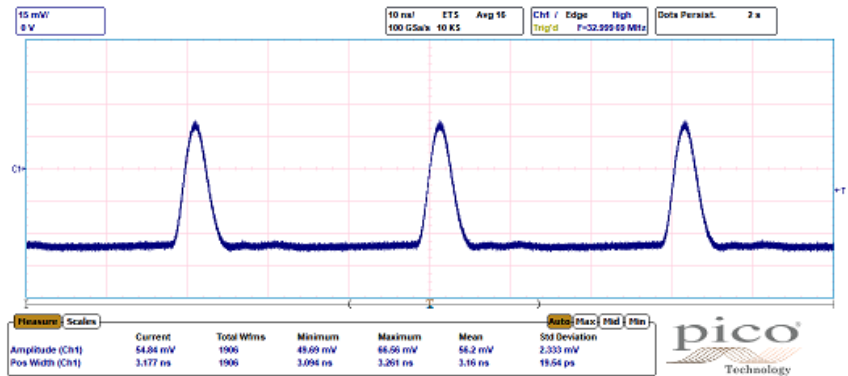
ビーム形状 (小)



伝搬波形



ビーム形状 (大)



伝搬波形

図 1-b-8 10.95m 伝搬後の水中光伝搬波形

伝搬ビーム径と水の揺らぎの影響

次にゆらぎによる光パルス伝搬特性の評価[3]を行った。評価に用いた実験系の構成を図 1-b-9 に、実験系の諸元を表 1-b-1 示す。光パルスの水中伝搬にはパイプ水槽を用い、その両端に送信光源と受光部を配置した。パイプ水槽は、両端に透明アクリル板ビューポートを取り付けた内径約 15 cm の塩ビ製管で、内部を水道水で満たした。長さ約 3.75 m の連結パイプを 3 本と、平面鏡での光路折り返しにより、最長 10.95 m の水中伝搬まで可能としている。送信光源には、SMF (Single Mode Fiber) 出力の青緑色の GaN LD (窒化ガリウム ; Gallium Nitride LD) を用い、ズームレンズを用いてコリメート光のビーム径を可変し、パイプ水槽内に投光した。伝搬した LD 光の観察は、受信器の集光レンズの位置に透過スクリーンを設置し、背面からビデオカメラで観察した。カメラ画像の 1 ピクセルは、スクリーン上の約 0.1 mm に相当する。揺らぎの生成には、パイプ水槽内に設置したヒーターで水を加熱し、ポンプで水流を発生させ、温度分布を持った乱流を発生させた。今回は、パイプ水槽 3 本のうち受信器側の 1 本にのみ揺らぎを発生させた。

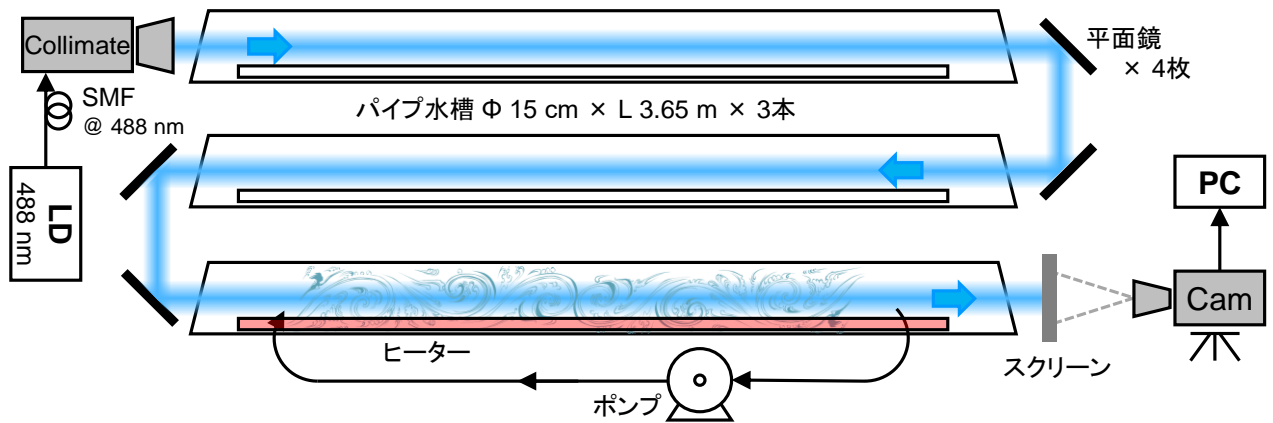


図 1-b-9 実験系の構成

表 1-b-1 実験系の諸元

パイプ内径	150 mm
水中伝搬長	3.65 m × 3 本
波長	488 nm
ビーム径 細/太 (FWHM)	送信端: 1.8 / 28 mm 伝搬後: 4 / 30 mm
ヒーター出力	100 W
ポンプ流量	11 L/min (カタログ値)
ビデオ フレームレート	15 fps

LD 光のビーム径と揺らぎの有無に関し、4 通りの測定を行った。ゆらぎ無し及び揺らいだ状態で撮影したビデオ映像の 1 フレームを図 1-b-10(a)に示す。揺らぎの結果を比較すると、細ビームでは、ビームの変形とワndaによる劣化が目立つのに対して、太ビームでは、網目状の強弱パターンが目立っている。

次に測定データの解析について述べる。撮影したビデオから約 90 秒間に相当する 1,400 フレームを抽出し、ピクセル毎の光強度の時間変化を統計的に処理した。図 1-b-10(b)に、揺らいだビームでの強度の頻度分布と、対数正規分布を仮定したフィッティング曲線を示す。細ビームでは、ビーム軸に対応した高強度のピークと、揺らぎにより、強度ゼロに向かって増加する広い分布が重なっていることが分かる。一方、太ビームでは、顕著なピークはなく、広い揺らぎの分布だけが見える。

次に、ピクセルごとに時間方向の強度揺らぎから、光強度がほぼゼロとなるフェード発生確率を算出した。図 1-b-11(a)に示すように、細ビームでは、ビームの中央部ではフェード発生は無かった。これは、揺らぎの無いビームの強度分布と、揺らいだビームの平均強度分布が概ね一致したと整合する。一方、太ビームの場合は、元の分布がブロードなこともあり、フェード発生の無い領域は、細ビームより拡大した。

図 1-b-11(b)にピクセル毎の平均強度とフェード確率の相関を示す。水色が揺らぎなし、青が揺らぎありを示す。フェード確率は、平均強度の増加に対して急激に改善するように分布している。これは、誤差補関数(erfc)の性質と整合的に見える。細/太ビームとも、揺らぎにより分布の広がりや光強度が大きい方向へのシフトが見られる。フェード確率の低い領域(~1%)のシフト量に注目すると、太ビームの方が相対的に小さく、信号受信に対するパワー変動が緩和されることが期待できる。

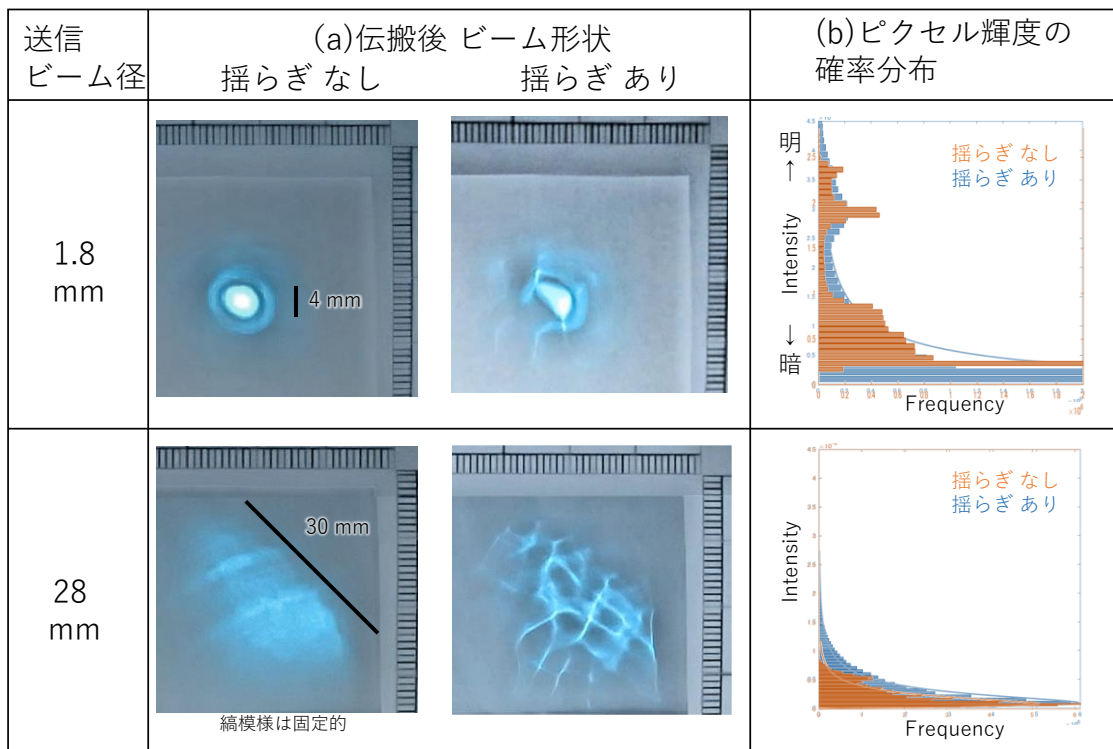


図 1-b-10 (a) ビーム形状と (b) ピクセル輝度の確率分布

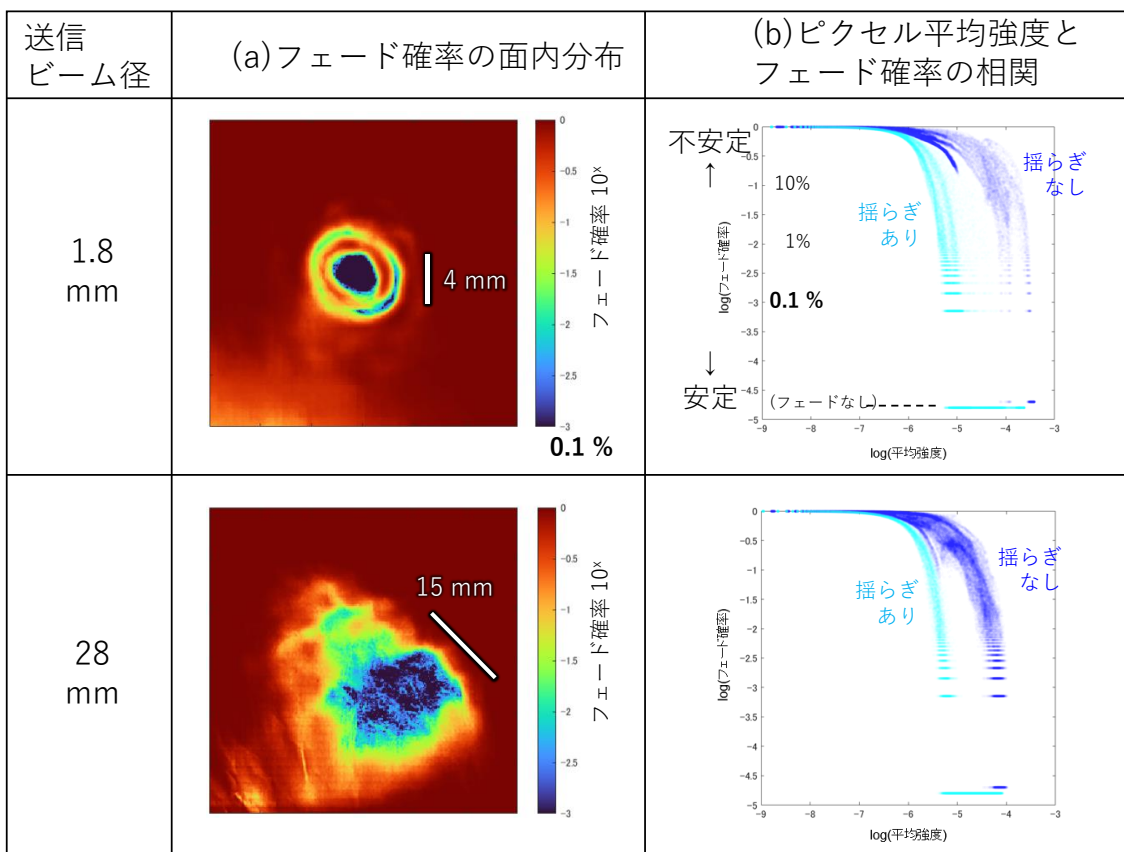
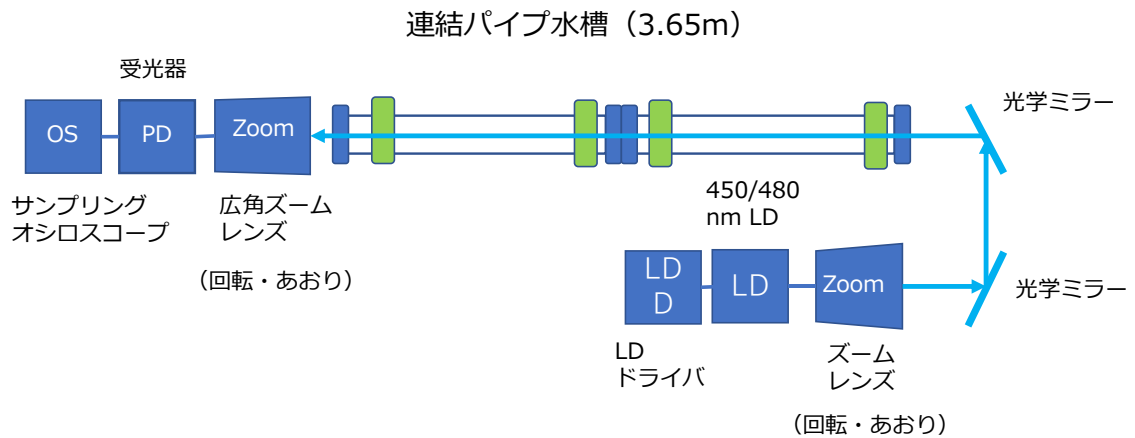


図 1-b-11 (a)フェード確率の面内分布、
(b) ピクセル毎の平均強度とフェード確率の相関

成分の違いによる水中伝搬特性

パイプ水槽に、水道水に海水抽出成分を溶かした疑似海水、汲み上げ海水をそれぞれ充填し光パルスの伝搬特性の測定を行った。実験系を図 1-b-12 に示す。



まず、疑似海水での伝搬後の波形を図 1-b-13 に示す。伝搬による波形広がり、波形劣化は観測されなかった（伝搬前、伝搬後共 3 ns 弱程度）。伝搬損失は、疑似海水を入れた直後は、損失 2.0dB 程度（入射，出射窓の損失含む）で、水道水とあまり変わらなかった。

また水道水に海水成分を溶かした直後、大きく光軸がずれる現象が起こった。この現象は、疑似海水を、ポンプを使って循環させ、疑似海水成分を均一化させることにより収まったことから、海水成分が良く混ざらず疑似海水内に成分分布が起きたためと推測される。また数日時間をおいて損失を測定したところパイプ水槽の疑似海水内に気泡が生じると、損失が 10 dB 近くと大きくなることがあった。時間をおいて気泡が収まると損失が元に戻ったことから、気泡も損失を増大させる一因となると考えられる。

次に、汲み上げ海水での伝搬後の波形を図 1-b-14 に示す。伝搬による波形広がり、波形劣化は観測されなかった（伝搬前、伝搬後共 3 ns 弱程度）。損失は、7.2 dB となり、パイプ水槽の平均損失 1.2dB を考慮すると、1.6 dB/m の伝搬損失と推定される。

参考に、海水の汲み上げを行った現場風景を図 1-b-15 を示す。その際計測した海水の水温，流速，光量は、18.5～18.6℃，13.2～16.0 cm/s，179.215～189.024 μ E/m²sec，濁度については、計測が安定しなかったが、ボトム値を拾っていくと 0.2～0.3 FPU 程度であった。

パイプ水槽においても、計測が安定しなかったが、ボトム値を拾って、平均を取ると濁度は 0.21 FPU となった。また、疑似海水を少し放置した状態で、パイプ水槽の両端の光損失を測定すると、少し損失が増し 4.6 dB 程度となった（パイプ水槽の損失 1.2 dB を考慮すると、伝搬損失 0.93 dB/m）。同様にボトム値を拾って、平均濁度を計測すると 0.1 FPU であった。これらの値は、伝搬損失=6.25×濁度の式にあてはめると、汲み上げ海水で 1.31 dB/m，少し放置した疑似海水で 0.63 dB/m となり、損失測定からの値より 0.3 dB ほど小さいが、それなりに近い値となった。

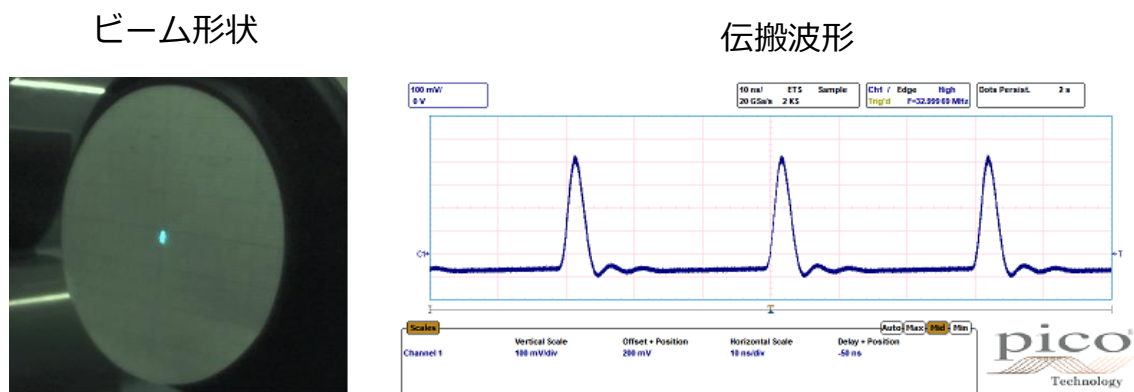
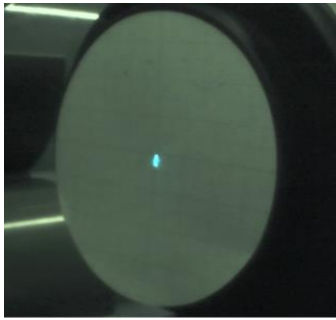


図 1-b-13 疑似海水 3.65m 伝搬後の水中光伝搬波形

ビーム形状



伝搬波形

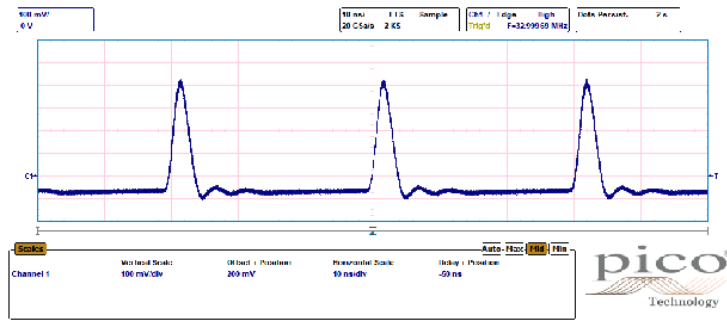


図 1-b-14 汲み上げ海水 3.65m 伝搬後の水中光伝搬波形

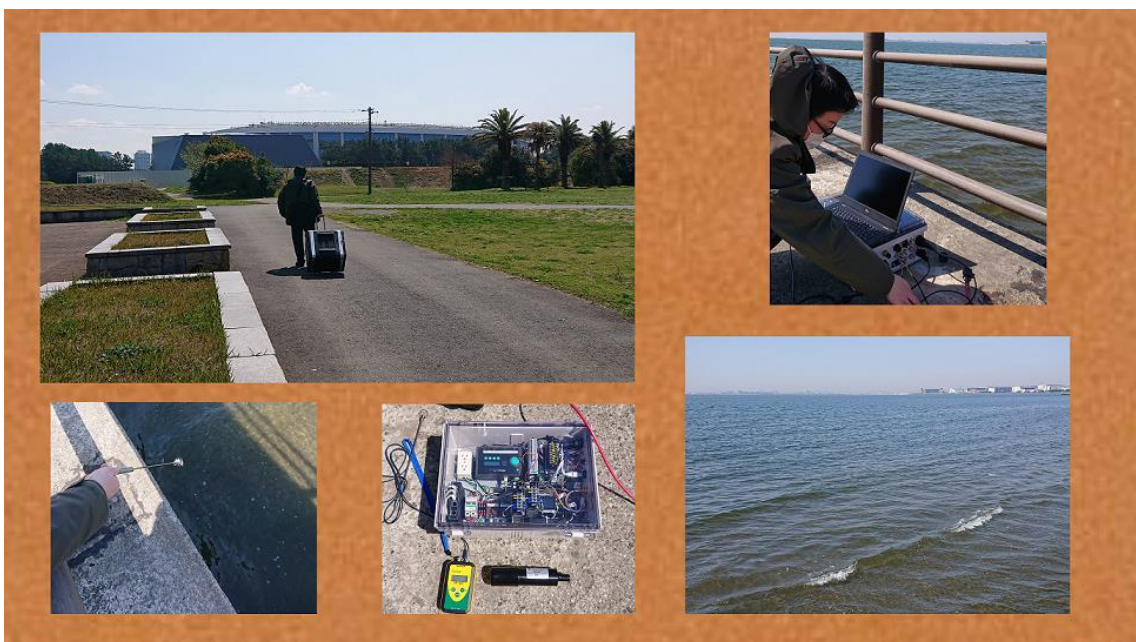


図 1-b-15 海水の汲み上げを行った現場風景

また成分による顕著な伝搬特性の違いは見られなかったことから、散乱なども損失として影響していると考えられる。よって本計測範囲では、所要Dレンジは伝搬損失 $\times 100\text{m}$ （理想環境である深海で $0.2\text{dB/m} \times 100\text{m} = 20\text{dB}$ ）で換算できると考えられる。

またゆらぎによるパワー変動、受光外れについては、通信断等の通信品質に係る影響であるため、Dレンジを拡大とは別とし、誤り訂正やマルチビーム化、受光径の拡大（もしくはビーム径の拡大）により確率統計的に抑制することが有効であると考えられる。

[3]高橋他、「可視光無線通信の伝搬ビーム径と水の揺らぎの影響」、信総大 2021 BS-6-3 (2020.3)

c. 各種仕様の検討（海洋研究開発機構）

背景パラメータ計測システム

①背景パラメータの選出

本研究課題において、水中・海中を伝搬路とするレーザー光に対し、その伝搬に大き

く影響を与え、かつ環境評価試験にて繰り返し再現が可能となるパラメータを選出した。当該パラメータの選出は ①レーザー光の伝搬に対し損失効果(減衰 | 拡散・吸収)をもたらすパラメータ ②レーザー光の直進性を妨げるパラメータ を念頭に、海洋研究開発機構がこれまで実施してきた海中におけるレーザー光の伝搬特性試験を基盤として下記項目を選出した。

- 環境温度 (温度差 | 温度境界面)
- 電気伝導度 (海水密度)
- 伝搬場の流速 (懸濁物の挙動)
- 圧力
- 蛍光光度 (特に伝搬場中における有機懸濁物の総量)
- 濁度 (特に伝搬場中における向き懸濁物の総量)
- 照度 (外乱光)

②背景パラメータの計測

上記で選出した背景パラメータの影響を評価することを目的とし、水槽試験およびフィールド試験において当該パラメータを計測・記録(ロギング)する背景パラメータ評価システムを設計・製作した。以下に当該システムの詳細を示す。

a. 計測センサ

下記に示す各センサーを背景パラメータ評価システムにおいて一元的に管制する。

(1) 蛍光光度濁度計 | 2125-050-PL | OTG (K-エンジニアリング)

- ①測定 : クロロフィル- α 、濁度
- ②通信プロトコル : RS-232C
- ③初期化処理の有無 : 有り
- ④サンプリング周期 : 3Hz ~ 10 秒
- ⑤インタフェース : MCBH6M
- ⑥電源 : DC11-25V/1W

(2) CTD センサー | MniCTD-DR (Valeport (K エンジニアリング))

- ①測定 : 電気伝導度 / 水深 / 温度
- ②通信プロトコル : RS-232C
- ③初期処理の有無 : 有り
- ④サンプリング周期 : 1Hz ~ 8Hz
- ⑤インタフェース : MCBH6M
- ⑥電源 : DC9-25V/250mW

(3) 水中光量子センサー | QSP-2150 (Biosherical (K エンジニアリング))

- ①測定 : スカラー照度
- (※任意の空間点に対する全周方向から入射する光束密度)
- ②通信プロトコル : RS-232C (ASCII)
- ③初期処理の有無 : 有り
- ④サンプリング周期 : 100Hz ~ 250Hz
- ⑤インタフェース : MCBH4M
- ⑥電源 : DC6-15V/5mA

(4) 分光色彩照度計 | C-700 (SEKONIK)

- ①測定 : ピーク波長 / 簡易スペクトル / 照度
- ②通信プロトコル : USB
- ③初期処理の有無 : 有り
- ④サンプリング周期 : 任意
- ⑤インタフェース : USB

- ⑥電源 : USB バスパワー
 ⑦その他 : 使用条件により本システムの管制から除外する
- (5) プロペラ式流速計 | VR401V (株式会社ケネック)
 ①測定 : 流速
 ②通信プロトコル : 電圧 (0 ~ 2V)
 ③初期処理の有無 : 無し
 ④サンプリング周期 : リアルタイム
 ⑤インタフェース : アナログ端子
 ⑥電源 : 内臓バッテリー
- (6) 高精度デジタル圧力計 | KDM30 (アズワン)
 (※水流の設定・調整用に使用/ロギングなし)
 ①測定 : 水圧
 ②通信プロトコル : RS232C (電流 (4mA ~ 20mA)
 (電圧出力オプション)
 ③初期化処理の有無 : 有り
 ④サンプリング周期 : リアルタイム
 ⑤インタフェース : 汎用 I/F 無し
 ⑥電源 : DC24V
 ⑦その他 : 条件により本システム管理から除外する。
- (7) 温度センサー | 計測部 : NR-TH08 NR-HA08 / 制御部 : NR-500 (キーエンス)
 温度調整付き : E5CC-002SM-001 (OMRON)
 温度センサー : 熱電対×16 (最大)
 ①測定 : 水温
 ②通信プロトコル : USB2.0
 ③初期化処理の有無 : あり/なし
 ④サンプリング周期 : 10Hz 以下
 ⑤インターフェース : T. B. D
 ⑥電源 : USB バスパワー | DC7.6V (3.3W)
- <センサー以外の機器>
 (8) 流量コントローラ | FC2W-X110 (SMC)
 (9) マグネットポンプ | MD30-RN (イワキ)
 (10) Ethernet-D/A 変換 | E1241 (MOXA)

b. データロギング

背景パラメータ評価システムにおいて、各センサーの出力値（データ）を一元的に記録（ロギング）する。下記にデータロギング項目を示す。当該データは背景パラメータ評価システムに組み込まれる記録部（HDD）に保存される。

順番	項目	データサイズ	測定器	備考
1	ロギング年月日	Unsigned Int		ヘッダー1
2	出力時分秒	Unsigned Int		ヘッダー2
3	クロロフィル- α	Float	蛍光光度センサー	
4	濁度	Float	蛍光光度センサー	
5	電気伝導度	Float	CTD	
6	水深	Float	CTD	
7	温度	Float	CTD	

8	スカラー照度	Float	水中光量子センサー	
9	ピーク波長	Float	分光色彩照度計	環境光
10	簡易スペクトル	Float	分光色彩照度計	環境光
11	照度	Float	分光色彩照度計	環境光
12	流速	Float	プロペラ式流速計	
13	水温	Float	温度センサー	
14	設定温度	Float	温度調節器	
15	設定流量	Float	水用流量コントローラ	
16	ポンプ ON/OFF	Char (1Byte)	マグネットポンプ	

■ データフォーマット : CSV ファイル

■ サンプルング周波数 : 0.1Hz-2Hz (可変)

c. 管 制

背景パラメータ評価システムを介して a 項に示すセンサー類および関連機器を管制する。当該管制は背景パラメータ評価システムの GUI(Graphical User Interface) を経由し、以下に示す項目がそれぞれ管制される。

- ① ログイン開始/停止
- ② ポンプ ON/OFF
- ③ 水温 UP/DOWN ※直接入力あり
- ④ 流量 UP/DOWN ※直接入力あり
- ⑤ 蛍光光度センサー
 - ・初期化
 - ・測定開始/停止
- ⑥ CTD センサー
 - ・初期化
 - ・測定開始/停止
- ⑦ 水中光量子センサー
 - ・初期化ボタン
 - ・測定開始/停止

d. 表 示

背景パラメータ評価システムにおいて下記に示す項目を GUI に表示する (前記「データロギング」とは別機能)

順番	項目	測定器	備考
1	クロロフィル- α	蛍光光度センサー	
2	濁度	蛍光光度センサー	
3	電気伝導度	CTD	
4	水深	CTD	
5	温度	CTD	
6	スカラー照度	水中光量子センサー	
7	ピーク波長	分光色彩照度計	環境光
8	簡易スペクトル	分光色彩照度計	環境光
9	照度	分光色彩照度計	環境光
10	流速	プロペラ式流速計	
11	水温	温度センサー	
12	設定温度	温度調節器	

13	設定流量	水用流量コントローラ	
14	ポンプ ON/OFF	マグネットポンプ	
15	クロロフィル- α	蛍光光度センサー	
16	濁度	蛍光光度センサー	

③背景パラメータ評価システムの製作

全項に示した主仕様を具現する背景パラメータ評価システムを設計・製作した。当該システムは、各試験手法および試験内容・目的に応じて、任意にセンサーおよび計測・データロギング項目を選択（脱着）することが可能である。GUIを組み込む制御用計算機を軸に、3系統の通信手段（USB通信／Serial通信／Ethernet通信）を提供している。AC100V系の電源を当該システムへの供給源として、管制するセンサー仕様に応じてAC100V系、DC24V系、DC12V系に電源制御／電源分配する。図1-1-16に本システム構成図を、図1-1-17にシステム接続図をそれぞれ示す。通信系統のうちEthernet系は、Ethernetハブを介して制御用計算機とEthernet⇔RS232C変換器（NPORT5410）およびEthernet⇔D/A変換器（E1241）を接続する。これにより3種のシリアルI/Fセンサー（蛍光光度センサー／CTDセンサー／水中光量子センサー）を制御するとともに、流量コントローラおよびSSR（Slid State Relay：マグネットポンプ制御用）のアナログ値を検出する。またUSB計ではUSBハブを介して分光色彩照度計を制御するとともに、マルチ入力データロガーを管理する。当該データロガーはプロペラ式流速計および高精度デジタル圧力計のアナログ出力を取得するために配置される。併せてUSB系のうち1系統は、USB⇔シリアル変換器（RS485）を介して温度調節器を制御する。温度調節器は温度センサ（熱電対）のアナログ入力を取得するとともに、ヒーター用のSSRを制御する。この他、熱電対の検出値のうち8線は温度・電圧測定モジュール（MR-TH08）にて管理する。本装置では最大16系統の熱電対の検出値を取得可能である。全てのセンサー出力は、上記の3系統の通信I/Fを介して、制御用計算機において一元的に管制および記録・保存する。

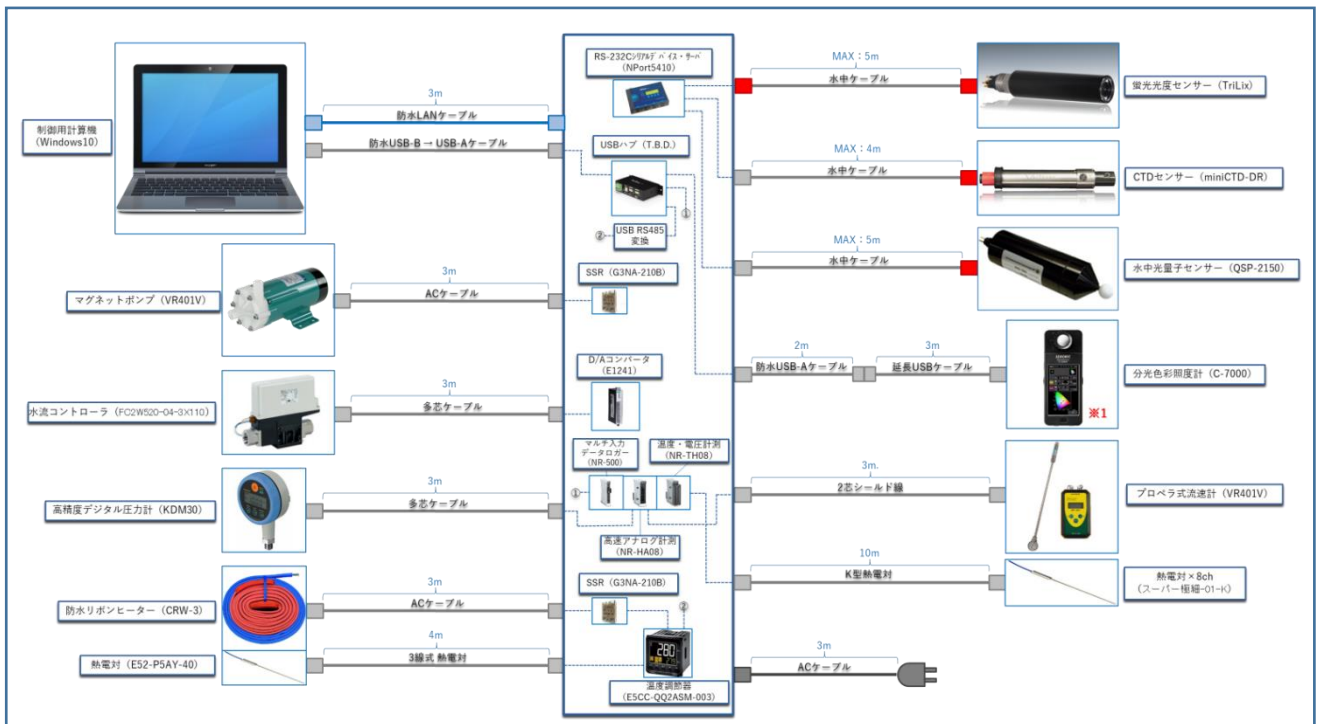


図 1-1-16 システム構成図

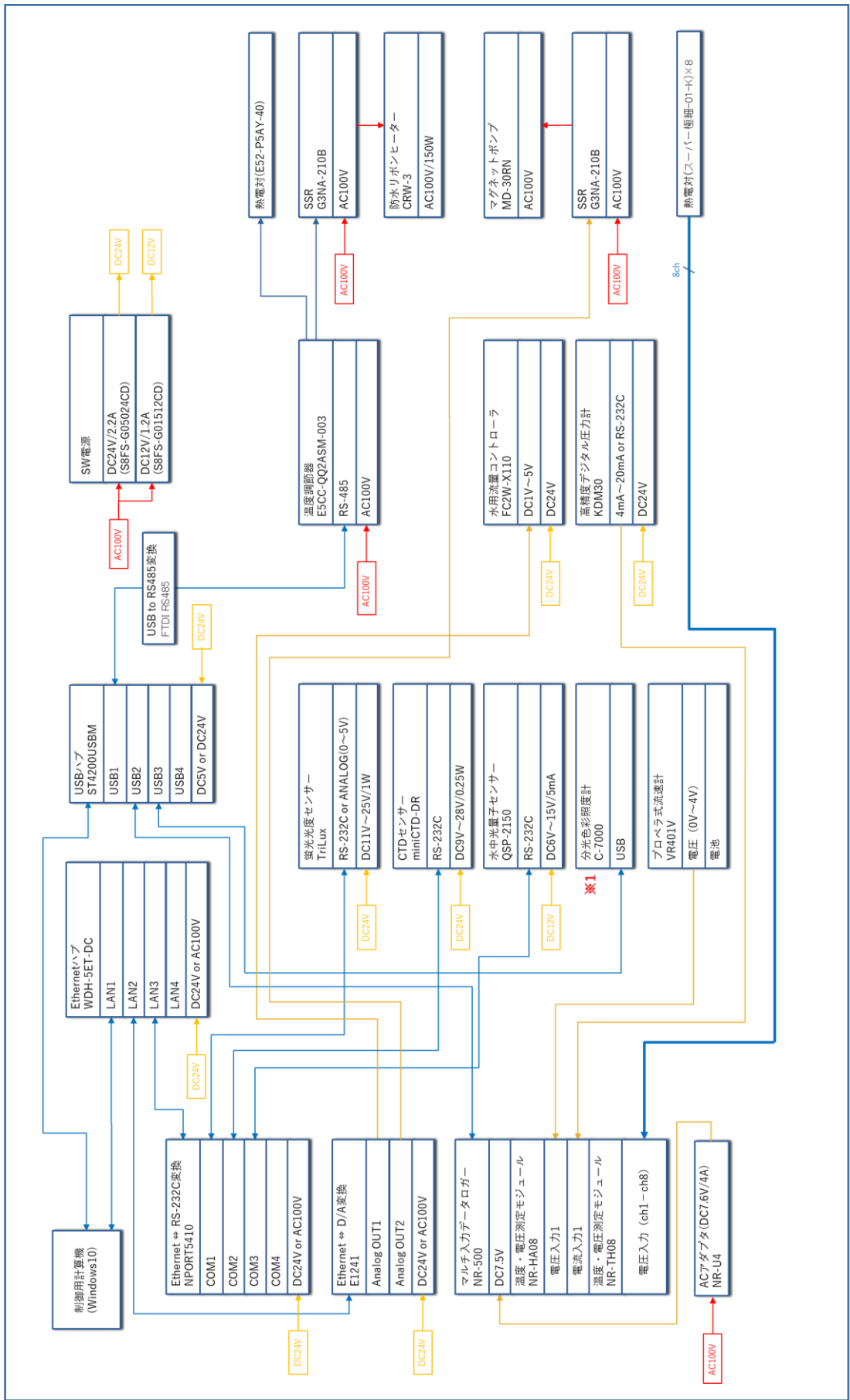


図 1-1-17 システム接続図

④システムの機能・性能評価および試験

全項③にて製作したシステムの機能・性能を評価することを目的とし試験を実施した。図3に評価試験構成図を、当該評価試験時の様子を図1-1-18にそれぞれ示す。試験の結果、背景パラメータ評価システムの全ての機能が、所望の仕様性能を満たしていることが確認された。

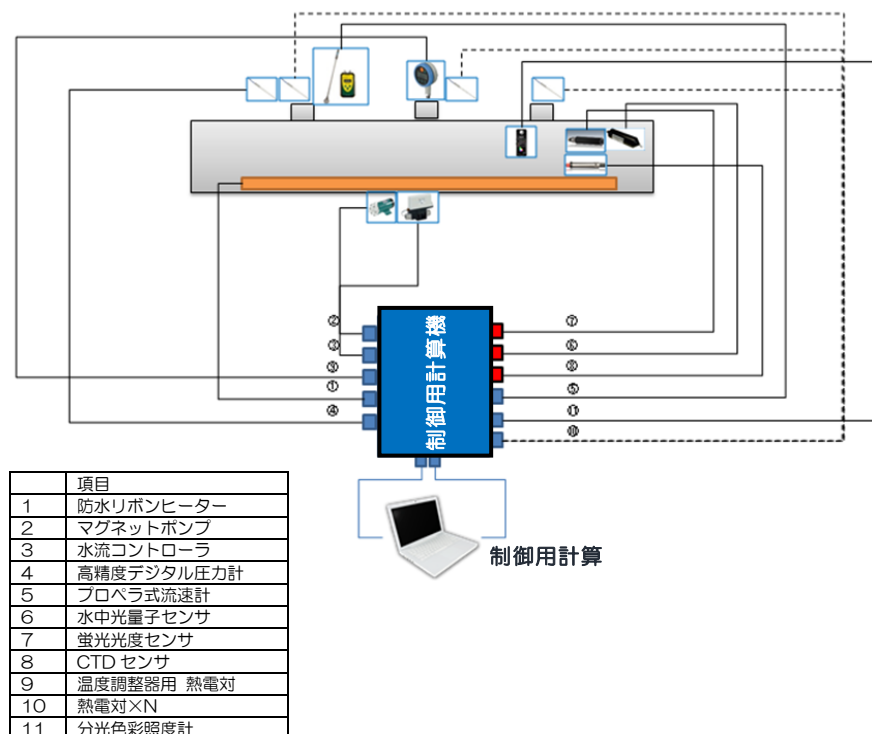


図 1-1-18 評価試験構成図



図1-1-19 評価試験の様子

実海水域試験の検討

① 【概要】

本年度（R4年度）において深海試験を実施することが決定したことから、当該深海試験に

光ワイヤレス通信装置（実証機）を実装するための手法及びシステム仕様を検討・設計した。海洋研究開発機構が所有する研究船（支援母船）「かいよう」および遠隔操作式海中探査機（Remotely Operated Vehicle）「かいこう」に当該実証機を適用し、深海域において通信試験を実施する。「かいこう」ランチャーおよびビークルにそれぞれ当該実証機を搭載させ、ランチャー⇄ビークル間において光ワイヤレス通信リンクを確立することで、通信精度・通信距離・通信速度を評価する。この際、ランチャーおよびビークルに搭載する当該実証機への電源系統および信号系統を「かいこう」システムと連結させることにより、「かいこう」制御コンソール（「かいいい」船上配置）を経由して当該実証機を船上から管制する。以下に「かいいい」「かいこう」の仕様諸元を示す。

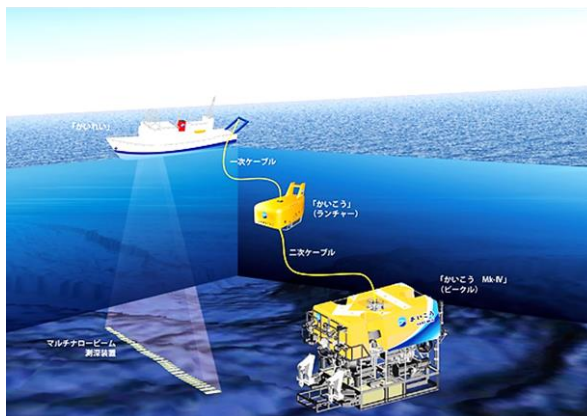


深海調査研究船「かいいい」

全長	106.0m
幅	16.0m
深さ	7.3m
喫水	4.7m
国際総トン数	4,517トン
航海速力	約16ノット
航続距離	約9,600マイル
定員	60名（乗組員38名/研究者等22名）
主推進機関	ディーゼル機関 2,206kW×2基
主推進方式	可変ピッチプロペラ×2軸



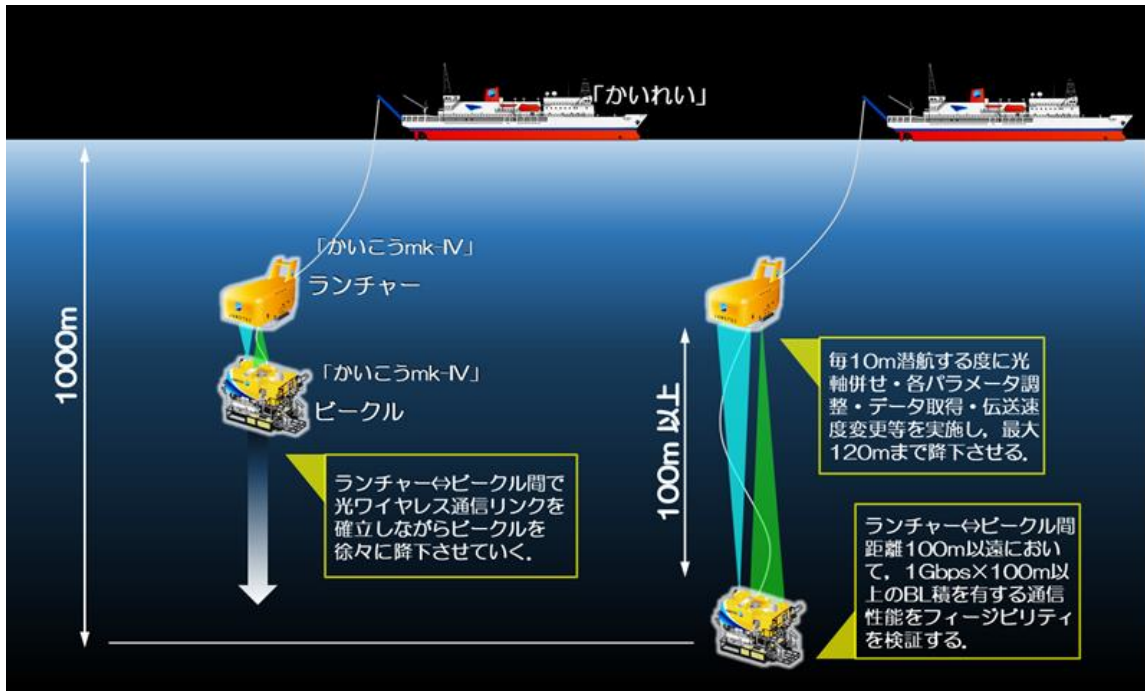
遠隔操作型無人探査機「かいこう」



	ランチャー	ビークル (Mk-IV)
全長	5.2m	3.0m
幅	2.6m	2.0m
高さ	3.2m	2.6m
空中重量	5.8トン	5.5トン
最大潜航深度	11,000m	7,000m
ペイロード	—	空中300kg、水中200kg
曳航速度	最大1.5ノット	0~1.0ノット
航海装置等	前方障害物探査ソナー 結合監視用白黒TVカメラ 二次ケーブル監視用TVカメラ（1台） 高度計 方位計、深度計	推進装置（スラスタ） 前方障害物探査ソナー 高度計 慣性航法装置 ドップラー速度計 深度計 後方監視白黒TVカメラ 嵌合監視TVカメラ ROVホーマー
作業機器	—	マニピュレータ（7自由度×2）
ケーブル	光・電力複合ケーブル 1次ケーブル φ45mm×12,000m 2次ケーブル φ29.5mm×250m	

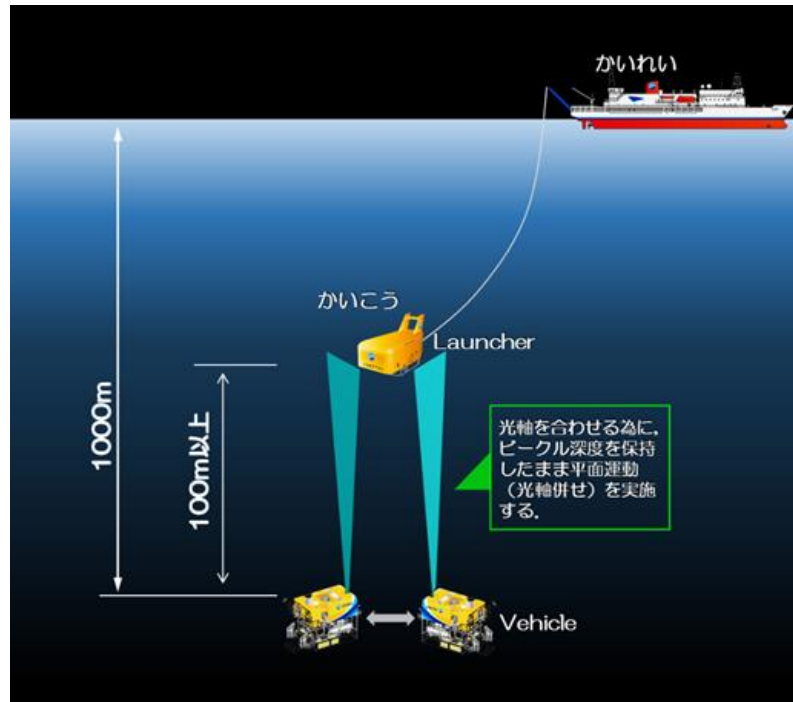
上述の通り深海試験では、「かいこう」ランチャーおよびビークルにそれぞれ水中光ワイヤレス通信実証機を搭載する。当該実証機はレーザー送信部（レーザー送信容器）とレーザー受信兼信号処理部（レーザー受信兼信号処理容器）より構成されており、送受信部（信号処理部含む）がそれぞれのプラットフォームに搭載されることで双方向通信を確立する。潜航開始時、「かいこう」ランチャー及びビークルは連結しており、2つのプラットフォームは連結状態で潜航していく。この際、ランチャーは支援母船（「かいいい」）の1次ケーブルにて連結されている。「かいこう」が目標深度（1000m）付近まで到達する

と、「ランチャー」からビークルを離脱させ、ビークルが潜航を開始する。この際、ビークルとランチャーは2次ケーブルにて連結されており、ランチャーはビークル離脱時の深度をほぼ保持する。深海試験においては、ランチャー⇄ビークル間で光ワイヤレス通信リンクを確立させ、その状態を出来る限り保持しながらビークルを徐々に潜航（下降）させていく。ビークル潜航時、毎10m程度下降する度に、各パラメータ調整・データ取得・伝送速度変更等を実施する。要すれば、ビークル挙動を適宜制御することでランチャー⇄ビークル間の光軸合わせを実施する。ビークルがランチャー深度より100m以深となるまで下降させ、その間、上記操作を繰り返し実施する。下図に深海試験の概略を図示する。

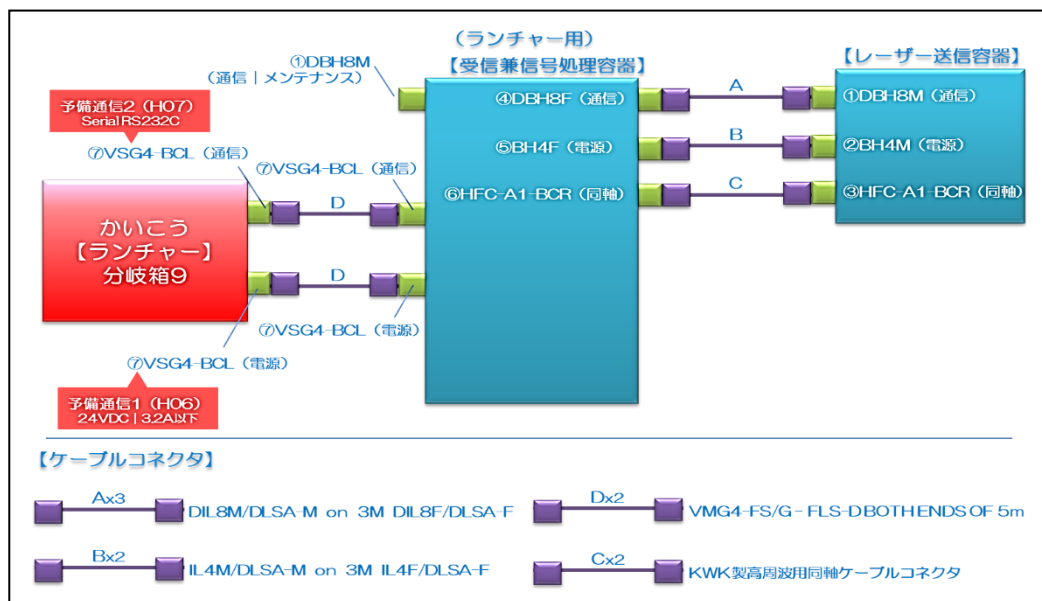


< 深海試験概略（「かいこう」ランチャー⇄ビークル間光ワイヤレス通信） >

ランチャー⇄ビークル間距離が100m以遠において、本研究手法を深海適用したことによる「1Gbps×100m以上のBL積」の達成如何（フィージビリティ）を確認する。この際、下降時と同様に、要すればビークル深度を保持したまま平面運動させ光軸合わせを実施する（下図）。光軸合わせにおいては、ランチャー搭載の下方カメラ（監視カメラ）の映像および（ランチャーあるいはビークルの）受信強度の変化を目安にビークル動作を制御する。深海試験における背景パラメータ（環境パラメータ）は、「かいこう」ランチャーおよびビークルの既存搭載センサを用いる他、前年度製作した「背景パラメータ評価システム」に組み込まれる機器・測器の一部（候補 | CTD計 / 蛍光光度・濁度計）を流用する。



< 深海試験概略（「かいこう」ランチャー⇄ビークル間光ワイヤレス通信） >



< 実証機搭載用システムコンフィギュレーション（ランチャー搭載） >

② 【システムコンフィギュレーション】

深海試験において、「かいこう」ランチャーおよびビークルへの光ワイヤレス通信実証機を搭載するために、当該実証機の電源系統、信号系統のインターフェースを「かいこう」システム仕様と整合させ、コネクタピンアサインを含む水中コネクタ仕様を選定した。以下に深海試験におけるシステムコンフィギュレーションを示す。

前述の通り、当該実証機はレーザー送信部（レーザー送信容器）とレーザー受信兼信号処理部（レーザー受信兼信号処理容器）より構成されており、送受信部（信号処理部含む）がそれぞれのプラットフォームに搭載されることで双方向通信を確立する。そのため、ランチャーおよびビークルへの搭載は基本的には同じシステム構成となるが、各ペイロー

ドに対するインターフェース仕様が異なるため、これを整合させるようにコンフィギュレーションを整える。一方、レーザー受信兼信号処理容器とレーザー送信容器間の仕様は、搭載するプラットフォームとの連結箇所が無い場合全て同様となる。レーザー送信容器への信号処理用通信はEther通信プロトコルであり、これを許容する水中コネクタバルクヘッド「Subconn社製 | DBH8F」および同水中ケーブルコネクタ「Subconn社製 | DIL8M/DLSA-M--DIL8F/DLSA-F」を採用する。一方、信号系統には、信号インピーダンス：50Ω（要求仕様）を満足する水中同軸コネクタ「KWK | HFC-A1-BCR」および水中同軸ケーブルコネクタ「KWK社製 | HFC-A-CCP」を製作し対応する。電源（給電）系統には「Subconn社製 | BH4F」および「Subconn社製 | IL4M/DLSA-M-IL 4M/DLSA-F」を採用する。

「かいこう」ランチャーとレーザー受信兼信号処理容器と連結する系統には、ランチャー搭載の「分岐箱9」が提供する「予備通信1」用ポートを電源系統に、「予備通信2」ポートを信号系統に割り当て、両ポートとも「Seacon社製 | VSG4-BCL」を採用した。通常、「かいこう」ランチャーはペイロード用ポートを確保してなく、本試験専用に既存の機器ポートの電力仕様から当該各ポートを選定し、レーザー受信兼信号処理容器との連結用ポートとして流用した。

「かいこう」ビークルとレーザー受信兼信号処理容器と連結する系統には、ビークル搭載の「研究者用ペイロード容器」が提供する「CN4 | 研究者用電源」用ポートを電源系統に、「CN8 | 1000BASE-T」ポートを信号系に割り当て、それぞれ「Seacon社製 | VSG-BCL」「Subconn社製 | DBH8F」を採用する。

(2) 環境適応型双方向通信のための通信・信号処理方式設計と実証装置の試作・評価

a. 通信・信号処理方式の検討 (トリマティス)

候補となる通信方式及び信号処理方式の検討と、実証装置の光送受信器構成及び仕様案の検討を行った。

まず水中環境の影響による水中光伝搬の課題を図 2-a-1 示す。図 2-a-1 にある水中伝搬損失による光の減衰や、散乱によるビームの拡散は、受光素子への光入力を減少させる。また多重散乱による波形広がりやピークパワーの減少を引き起こす。これらの現象は、水中の温度や塩分量などによる光学的な特性によるものであり、比較的広範囲に均一な光学特性が分布し時間的な変化があまりないと考えられる。このことから損失の影響、散乱の影響は、光の伝搬特性に対してほぼ一定であり、誤り特性も S/N の劣化による確率論的なビット誤りが支配的になると考えられる。

一方、懸濁物による通信遮断は、懸濁物が通信経路上に存在する場合に起こる局所的な現象であり、懸濁物が通信経路から移動すれば通信状態は回復する。また水中のゆらぎも、時間的にゆっくり変動する局所的な現象である。このように懸濁物の影響、ゆらぎの影響は、光の伝搬特性に対して時間変動を伴って起こることから、比較的長時間のバースト誤りを引き起こす要因になると考えられる。

通信遮断、光軸ずれへの対応技術を図 2-a-2 に示す。懸濁物や光軸ずれによる通信遮断の影響を抑制する技術として、時間変動の大きい局所的な現象であることを考慮して、マルチビーム化 (空間ダイバーシティ技術) の適用を検討している。ゆらぎによる光軸ずれに対しては、受光素子のアレイ (PDA) 化などによる受光径の拡大を検討してきた。その検討の一環として、(1) a. イで示した光パルス受信装置の受光径を広角レンズにより拡大している。また受光径の拡大や (1) a. イで言及した有効受光角の拡大は、水中での光軸合わせの難易度の緩和にも有効であることから本研究の要素技術の一つと考えている。

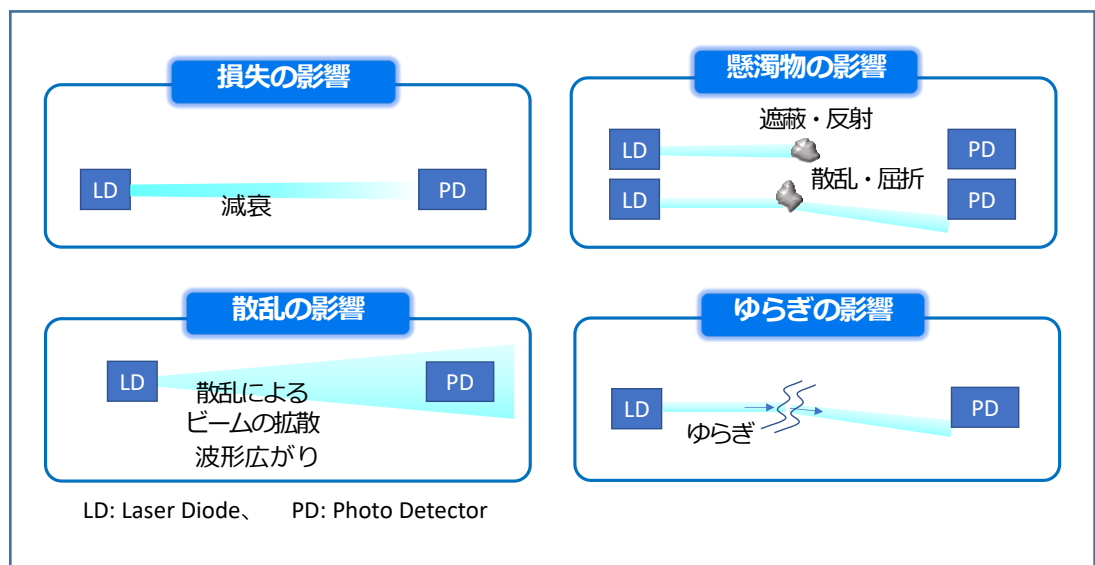


図 2-a-1 水中環境の影響による水中光伝搬の課題

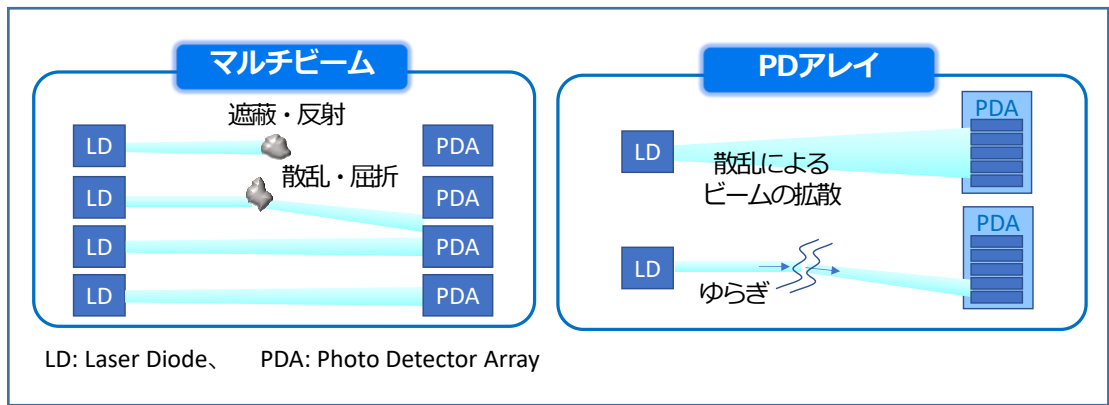


図 2-a-2 通信遮断、光軸ずれへの対応技術

また変調帯域の狭い可視光 LD により伝送ビットレート 1Gbps を達成するためには、図 2-a-3 に示す多値変調技術や多重化技術による大容量化が必要になる可能性がある。光の ON/OFF による OOK (On Off Keying) は、一番単純で S/N を高くとれる変調方式であるがビットレート程度の変調帯域が必要となる。一方大容量化技術としては、本研究でマルチビーム化の適用を検討していることから、マルチビームによる空間多重と、光のレベル差や位相差を用いる多値変調技術の内、最も単純な PAM4 (4 値のパルス強度変調) を候補に検討を進めている。なお多値変調は、OOK に比べ必要帯域が狭い一方 S/N が悪くなるので、送受信器の帯域が十分ある場合には OOK を選択する。例えば PAM4 は、OOK に比べ単純計算で S/N が 1/3 になる。

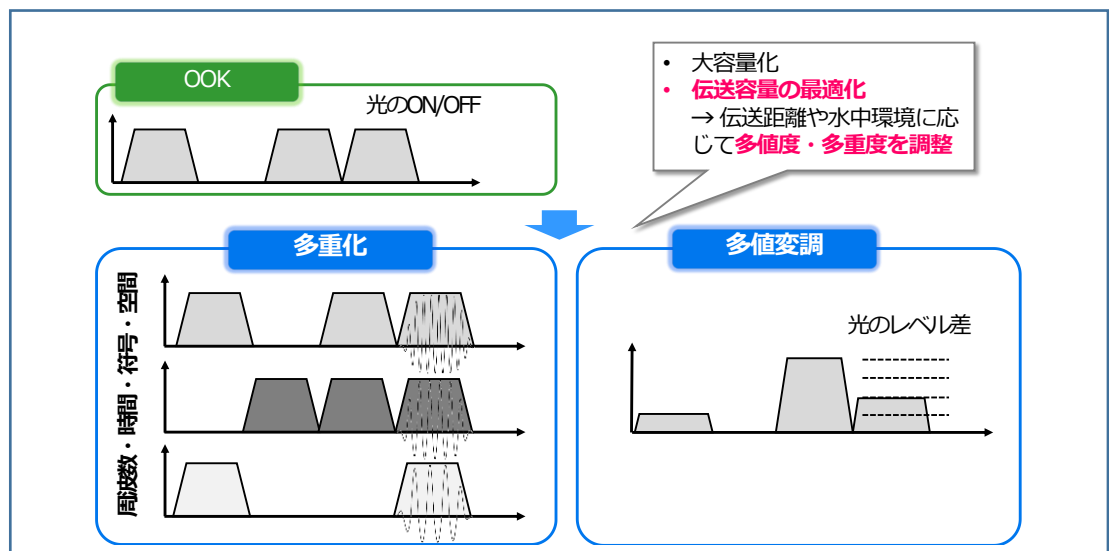


図 2-a-3 多値変調、多重化による大容量化

これまでに挙げた課題を解決するための光伝搬技術をまとめると共に、光伝搬技術に加えて行っている信号処理技術を、研究課題と候補となる適用技術として表 2-a-1 にまとめた。まず表 2-a-1 に示した誤り訂正技術は、不安定な通信状態の改善に役立つことが知られている。例えば前方誤り訂正 (FEC) 符号であるリードソロモン符号 RS(255,239)であれば、239 バイト中 8 バイトの誤り訂正が可能であり、伝搬損失や、ビームの拡散による S/N 劣化に対して十分な改善効果がある。しかしながら、懸濁物による通信遮断やゆらぎによる光軸ずれ、受光外れは、比較的長い誤りであるバースト誤りを引き起こす。FEC 符号を用いて比較的長いバースト誤りに対応するためには、複数の FEC フレームを、ビットやバイト単位で順番にインターリーブすることで、バースト誤りをビット誤りやバイト誤りに変換することが効果的である。本研究では、RS(255, 239)にインターリーブを施した誤り訂正を適用することを考えている。また、その他のバースト誤り耐性向上技術として、再送制御 (ARQ) 技術があ

るが、送受信装置間で制御フレームをやりとりする必要があるため、ある程度通信状態が安定していることが前提となる。また本研究では、マルチビーム化することを前提としているので、ビーム毎にデータを送信するタイミングを変えることにより空間に加えて時間で送信データを分散すれば、通信遮断や光軸ゆらぎ、光軸はずれによるバースト誤り耐性をより一層向上できると考えている。また、比較的長いバースト誤りが起きても安定な通信を維持するため、バースト誤りが生じても同期が外れない様に、マイクロ秒以下で同期が可能なバースト同期機能、特にバーストフレームの適用、バースト同期機能の適用を検討している。

これらを踏まえた信号処理部の仕様案を表 2-a-2 に、バーストフレーム構成を図 2-a-4 に、送信側のブロック図を図 2-a-5 に、受信側のブロック図を図 2-a-6 に示す。今後、これらの仕様案から必要な技術項目を選択し、水中光ワイヤレス通信実験に用いる実証装置の試作を行う予定である。

表 2-a-1 研究課題と候補となる適用技術

研究課題	影響を与えるパラメータ	候補となる適用技術
光軸ゆらぎ 通信遮断	潮流、密度・温度変化、懸濁物	マルチビーム (空間ダイバーシティ) + バースト誤り耐性の高い誤り訂正
受光技術 (受光径拡大)	ゆらぎ、散乱、減衰等の伝送パラメータ	PDアレイ等 (受光面拡大)
変調技術 (変調帯域不足)		多値変調、 多重化技術
波形劣化 (波形広がり)		適応フィルタによる波形劣化補償 + デジタル信号処理

表 2-a-2 信号処理部の仕様案

項番		内容	備考
1	バーストフレーム	デリミタ、ヘッダ、ペイロード、CRCで構成されるバースト伝送に対応した固定長フレーム	必須 図23参照
2	バースト同期	Over-sampling Clock Extraction : オーバーサンプリングされたデータ列において、デリミタやSFDのパターンマッチングによりクロック位相を選択	必須
3	クロック抽出	バースト同期により選択した位相を初期位相としたPLLによるクロック抽出	優先度低
4	誤り訂正	Interleaved FEC (RS(255,239) or RS(255,223)) : n個のFECフレームをインターリーブすることによりバースト誤り耐性をn倍向上	必須
5	ARQ (再送制御)	シーケンス番号により不達を管理し再送を制御。あらかじめ設定した不達率以上で送信ウィンドウ内のバーストフレームを全て再送。	優先度低
6	時間拡散/再送	マルチビームのチャンネル間でタイミングをずらして送信。マルチビームチャンネル間の正常なデータを集めて送信データを再構成。	優先度高
7	変調方式	NRZ (OOK) : 2値変調	必須
		PAM4 : 4値の強度変調	優先度高
		QAM (電気段) : 強度と位相を組み合わせた多値変調 (多値度未定)	優先度低
8	波形等化	帯域制限フィルタ : 変調方式, ビットレートに合わせた帯域制限	必須
		周波数等化 : 送受信器の周波数特性を補償	優先度高
		適応フィルタ : 波形広がり等の補償	優先度低

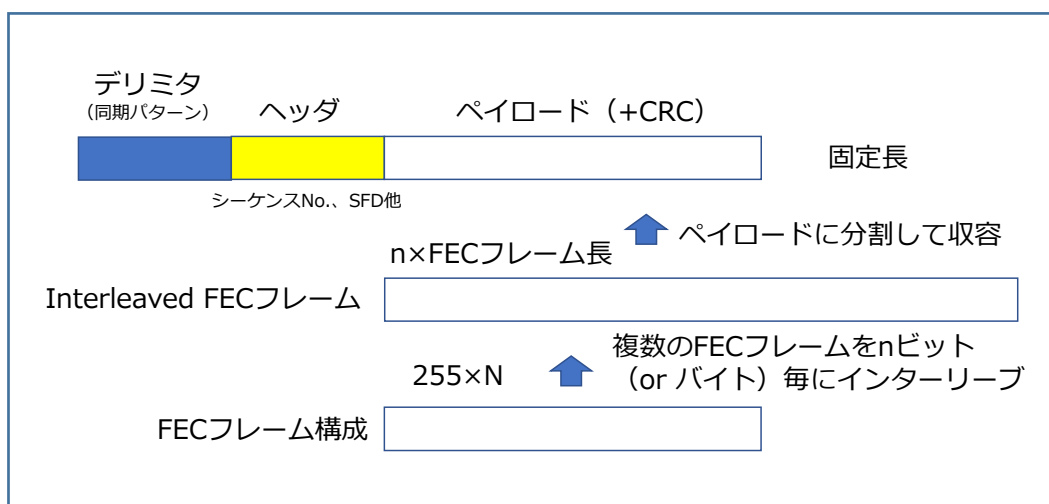


図 2-a-4 バーストフレーム構成

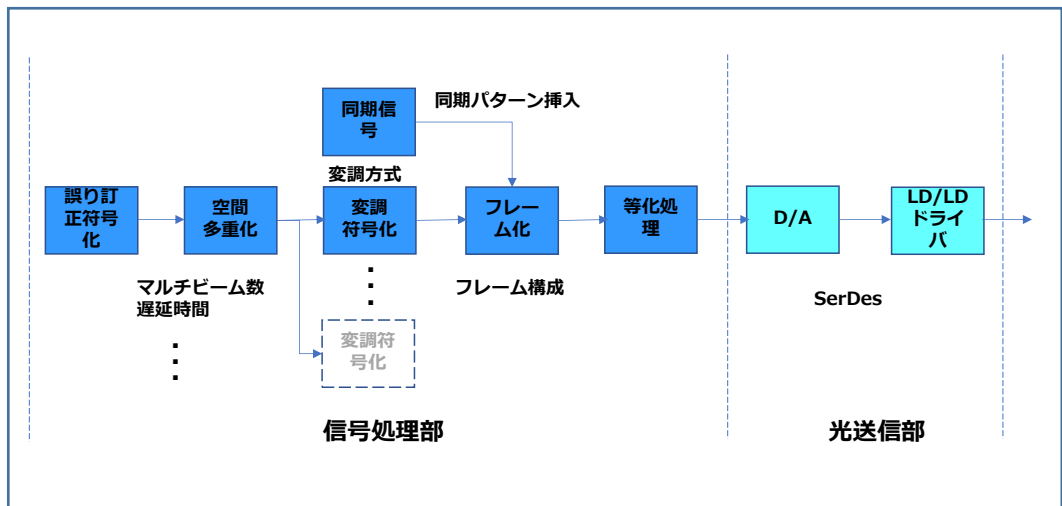


図 2-a-5 送信側の機能ブロック図

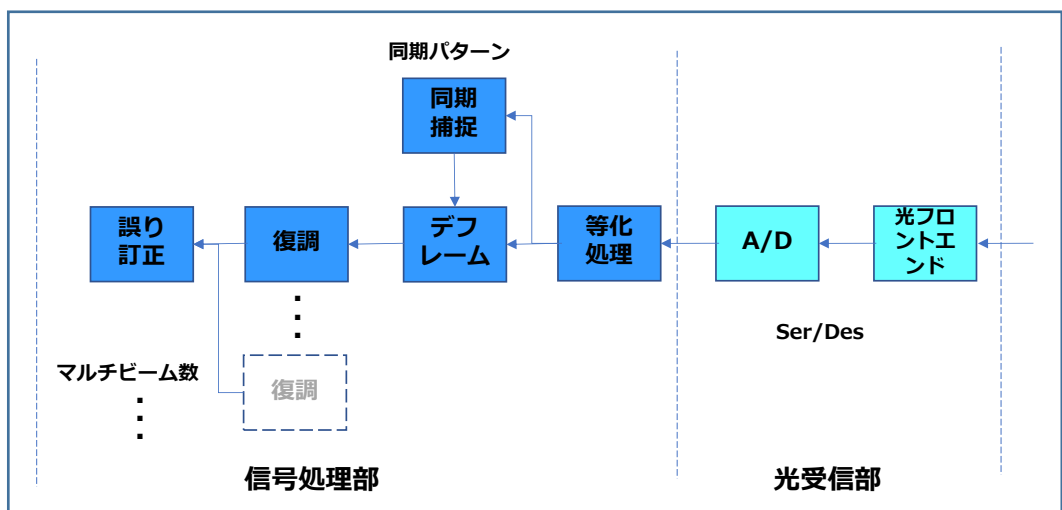


図 2-a-6 受信側の機能ブロック図

水中に適用する可視光デバイス

水中に適用できる可視光デバイスとその性能を図 2-a-7 に示す[4]。深海で損失の低い青色光源としては、変調帯域が GHz 程度以下と狭いが、高出力化，低コスト化の進展が著しい GaN-LD が普及している。また GaN 系 LD は，研究開発が進み緑色光源としても期待されている。また LD 以外に、ファイバーレーザー、固体レーザーや波長変換による緑色光源が入手可能である。黄色光源としては，固体レーザーや波長変換による研究開発が行われている。しかしながら、これらは LD に比べ、複雑な構成となることから、本研究開発では、LD の利用を前提に検討を行う。

受光素子としては、可視光に感度があり高速な Si-APD や、速度は遅くなるが、さらに高感度な MPPC (Multi-pixel Photon Counter) や PMT (Photo Multiplier Tube) の利用が期待されている。高感度な PMT を用いた成果として、20Mbps の伝送速度で 120m の水中光無線通信実験を行った例が報告されている。また図中示していないが、1 Gbps の信号を受信可能な PMT も報告されている。

投送受光 パワー・感度 と波長の関係

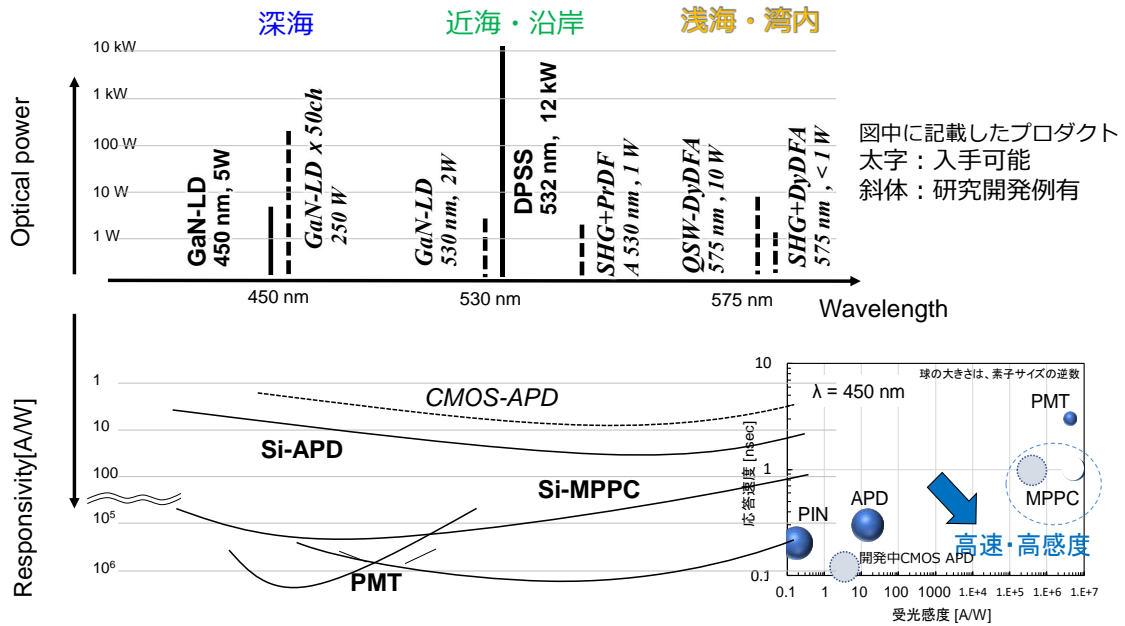


図 2-a-7 水中に適用できる可視光デバイスとその性能

光送信器

検討した光送信方式の LD 配置例と送信器構成を図 2-a-8 に示す。送信器は、複数の LD、LD ドライバで構成されており、各 LD は OOK で同一信号を送信、マルチビーム（マルチ LD）による必要送信パワーの確保を行う。また各 LD の個別 ON/OFF により送信パワー制御を行うと共に、深海での海中通信実験を見据えて、マルチ LD により必要送信パワーを確保した上で、10cm~1m 程度までビーム径の広げ、通信実験における送受信器間の光軸合わせを簡易化する。

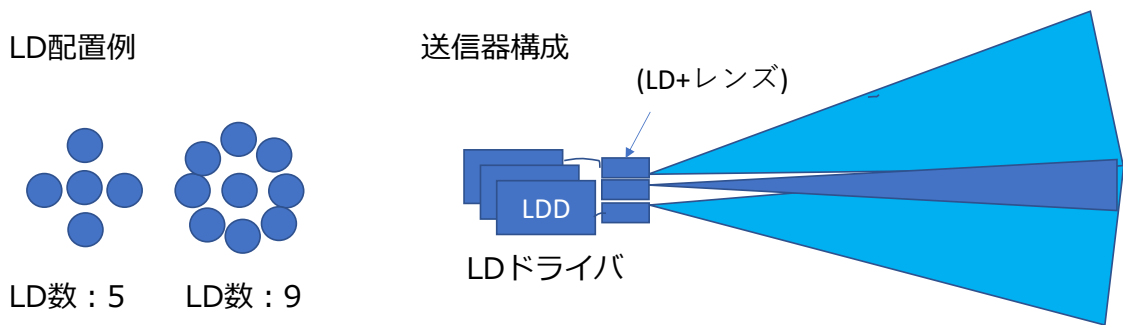


図 2-a-8 LD 配置例と送信器構成

まず変調方式の検討の詳細について述べる。変調方式には、強度、位相、または強度と位相の両者を用いたものがあるが、本研究では、光強度を用いた変調方式を使って、可視光 LD により 1 Gbps の信号生成を目指すこととした。光強度のオンオフによる 2 値の変調 OOK (On-off-keying)、4 値の多値変調である PAM4 (Pulse Amplitude Modulation 4)、8 値の多値変調である PAM8 の変調方式の性能の比較を表 2-a-3 に示す通り多値数が大きくなると、1 Gbps の変調を行うための LD の必要帯域は少なくて良い。一方、多値数が大きくなると 1 ビットあたりの光強度が小さくなるため、受信感度は劣化する。また、多値数が大きくなると変調も複雑になる。そのため、LD の帯域が十分あるのであれば、受信感度、変調の容易さの観点で OOK が望ましい。なお 1GHz の帯域を持つ可視光 LD については確認済みであるため、OOK を変調方式として選択す

る。

表 2-a-3 変調方式の性能の比較

変調方式	多値数	必要帯域 (GHz)	受信感度ペナルティ (dB)	変調の容易さ
OOK	2	0.7	0	◎
PAM4	4	0.5	-4.8	○
PAM8	8	.25	-8.4	△

送信器構成 (LD 数) と送信パワーを表 2-a-4 に示す。送信パワーについては、マルチ LD 化することにより確保することを考えている。市販の最高性能の LD ドライバ (変調電流振幅 100 mA)、可視光 LD (電流-光出力効率 2W/A と仮定) を用いると、1 LD 当たり 20 dBm (100 mW) 程度の送信出力が期待できる。図 2-a-8 の LD 配置例で考えると、トータルの送信パワーは、LD 5 個で約 27 dBm、LD 9 個で約 29.5 dBm となる。

表 2-a-4 送信器構成 (LD 数) と送信パワー

送信器構成	LD数 (ビーム数)	送信パワー
複数LDによるマルチビーム送信 (同一信号)	5	27dBm
	9	29.5dBm

伝搬後のビーム径と伝搬損失を表 2-a-5 に示す。理想的な海中環境のコリメート光の伝搬損失を 0.2 dB/m、伝搬距離 0 m での単位面積当たりの光パワーを基準とすると、100 m 伝搬後のビーム径が 10 cm の場合、ビームの広がりによる受光損失が無いので、トータルの伝搬損失は 20 dB、ビーム径が 1 m (距離 0 m の面積比 100 倍) では、ビーム広がりによる受光損失により伝搬損失は 40 dB に増大する。このようにビーム径を拡大すると送受信器間の光軸合わせを簡易化できるが、伝搬損失が増大する。

表 2-a-5 伝搬後のビーム径と伝搬損失

伝搬距離	ビーム径	伝搬損失
0m	10cm弱程度	
100m	10cm~1m	20~40dB

受信器構成

受信器構成と PMT 配置例を図 2-a-9 に示す。受信器は、複数の PMT と受信回路で構成され、各受信回路の出力信号をコンバイナで合波する構成である。PMT をアレイ化することにより、受信器の受光面積を拡大し、送受信器間の光軸合わせを容易化した。

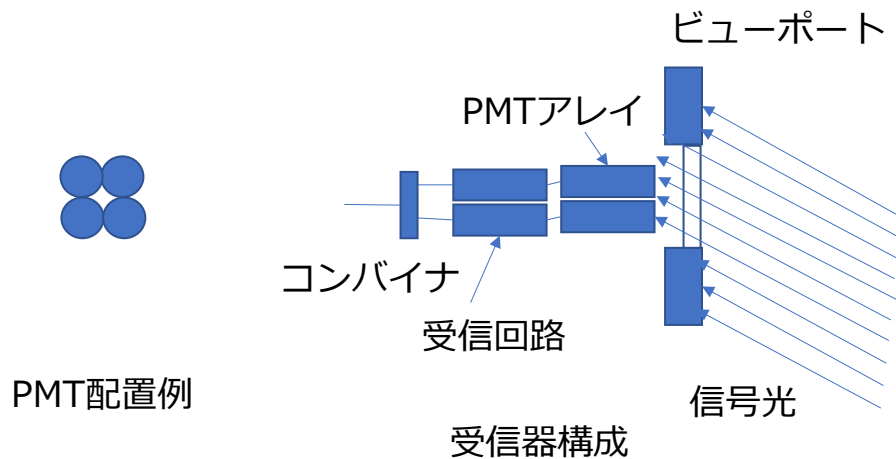


図 2-a-9 受信器構成と PMT 配置例

受信器に用いる受光素子の性能の比較を表 2-a-6 に示す。伝送速度 1 Gbps (帯域 0.7 GHz 以上) の光信号を受信できる受光素子は、表 2-a-6 に示す様に 0.7 GHz 以上の帯域を持つ Si-APD と PMT である。MPPC は立ち上がりこそ 1ns 以下と早いですが、立下がりですそ引きが生じ、連続信号を受信するのは不得手である。Si-APD と PMT を比較すると、低速では圧倒的に PMT が高感度であるが、伝送速度 1 Gbps であれば、表 2-a-6 のフロントエンド構成を用いた Si-APD と PMT の受信感度は、理論計算ではほぼ同等と考えられる。一方、受光径では PMT が、飽和パワーでは Si-APD の方が有利である。受光径の拡大については、APD アレイと同構造を持つ数 cm 径の MPPC が数万円で入手可能であることから、将来的に APD のアレイ化が経済的かつ飽和パワーの大きい有望な受光素子と考えられる。しかしながら、開発費が必要なことを考えると、現状は PMT のアレイ化が有効である。

表 2-a-6 受光素子の性能の比較

変調方式	受信帯域	受信感度-30dBm以下を実現するフロントエンド構成	受光径	飽和パワー
Si-APD	◎ (1GHz以上)	TIA	0.2mm程度	○ (高)
MPPC	× (200MHz程度)	N.A.	1cm~数10cm	○ (高 (ピクセル数に依存))
PMT	○ (1GHz弱)	ハイインピーダンスまたはTIA (TIAが望ましい)	25mm	× (低 (-20dBm程度)?)

光送信器の帯域、高出力化の検討

入手した 450nm 帯の可視光 LD が 1 Gbps で変調が可能か基礎検討を行った。可視光 LD の 1 GHz 変調実験系を図 2-a-10 に示す。図に示す通り、信号発生器 (Hittite HMC-T2220) から 1 GHz の正弦波を発生させ、高出力 RF アンプで増幅し、やや強引であるがインピーダンスマッチングさせず可視光 LD に正弦波変調をかけた。可視光 LD の出力波形を図 2-a-11 に示す。図 2-a-11 に示す様に、0.6 W ほど持ち上がっているが、正弦波変調された光出力の振幅が 1.0 W 以上となっている。以上から、入手した可視光 LD は、1 GHz 程度の帯域を有している。また、1 W 以上の光振幅での変調が可能であることから、LD ドライバ (送信回路) を適切に設計すれば、LD 単体で平均光パワー 27 dBm (500 mW) を達成できる可能性が得られた。表 2-a-4 では、30 dBm の平均光パワーを得るのに LD が

9 個以上必要であったが、2 個の LD で 30 dBm の平均光パワーを得ることが可能となる。

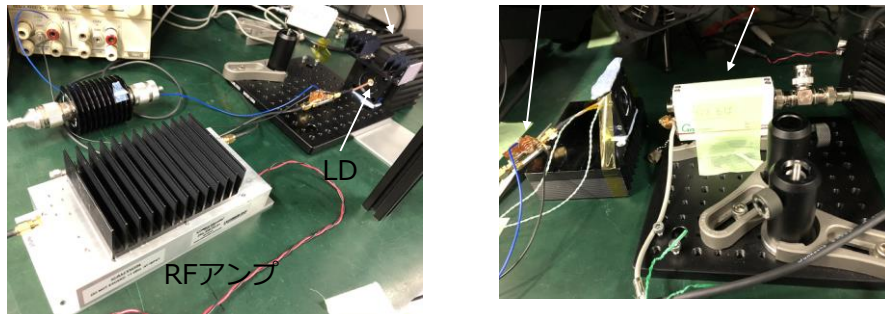
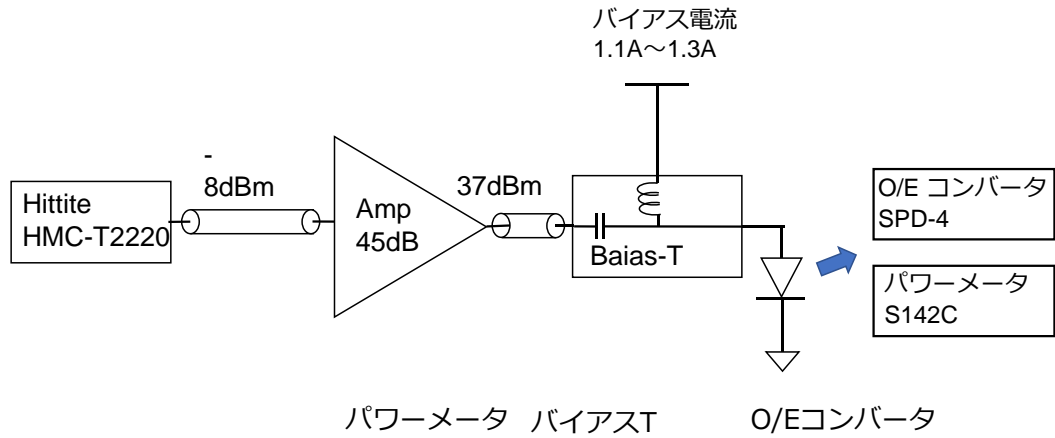


図 2-a-10 可視光 LD の 1 GHz 変調実験系

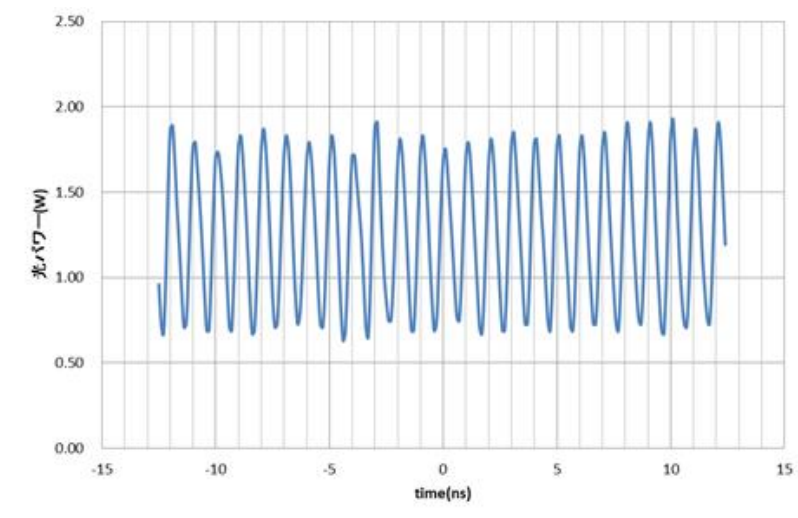


図 2-a-11 可視光 LD の出力波形

[4]鈴木他、「水中ネットワークを実現する ALAN コンソーシアム」信ソ大 ABS-1-16 (2019-9)

b. 光学系の検討（海洋研究開発機構）

① 【概要】

水中光ワイヤレス通信実証機を用いて深海試験を実施することを目的として、海洋研究開発機構（以降、JAMSTEC）が所有する遠隔操作式無人探査（ROV: Remotely Operated Vehicle）「かいこう」（図2-b-1）を構成するランチャーおよびビークルに搭載する各耐圧容器（レーザー送信容器／レーザー受信兼信号処理容器）を製作した。本研究における予算・工期、及び「かいこう」ペイロード領域の効率化を鑑み、「レーザー受信部」と「信号処理部」を同一容器に統合して格納する仕様を採用し、当該実証機の深海試験仕様として、各プラットフォームに耐圧容器2式を搭載する構成とした。

図2-b-1に示すように「かいこう」ランチャーは、支援母船（「かいいい」）とテザーケーブル（一次ケーブル）により連結されており、併せてランチャー／ビークル間もテザーケーブル（二次ケーブル）を介して連結している。一次ケーブルおよび二次ケーブルを連結することにより、「かいいい」船上に配置する制御コンソールより、ランチャー／ビークルそれぞれを遠隔制御することが可能である。当年度実施した深海試験（水中光ワイヤレス通信試験（3.（2）d項参照）において、ランチャー／ビークル間を光ワイヤレス通信リンクで確立させることを目的として試験系を設計している（3.（2）d項参照）。一方、ランチャーにはペイロード領域が付与されていないため、深海試験（水中光ワイヤレス通信試験）に備え、ランチャーへの当該実証機（レーザー送信容器／レーザー受信兼信号処理容器）を搭載することが可能なペイロードを構築し、併せて当該実証機への通信系統・電源系統を確立させるために新たなI/Fを設けた。

各プラットフォームに到達する受信光（相手先から発出される送信光）の100m先での有効径を700mmと定義し、当該受信光を妨げにならないペイロード領域を各プラットフォームに確保させた。ランチャーとビークル間における光ワイヤレス通信を確立させることを考え、ランチャーおよびビークルに搭載される各「レーザー送信容器」と「レーザー受信兼信号処理容器」が相対する位置にペイロード領域を特設させている。図2-b-2及び図2-b-3に、「かいこう」ランチャー・ビークルにおける各耐圧容器の搭載コンフィギュレーションと同容器が提供する光ワイヤレス通信コンフィギュレーションを示す。

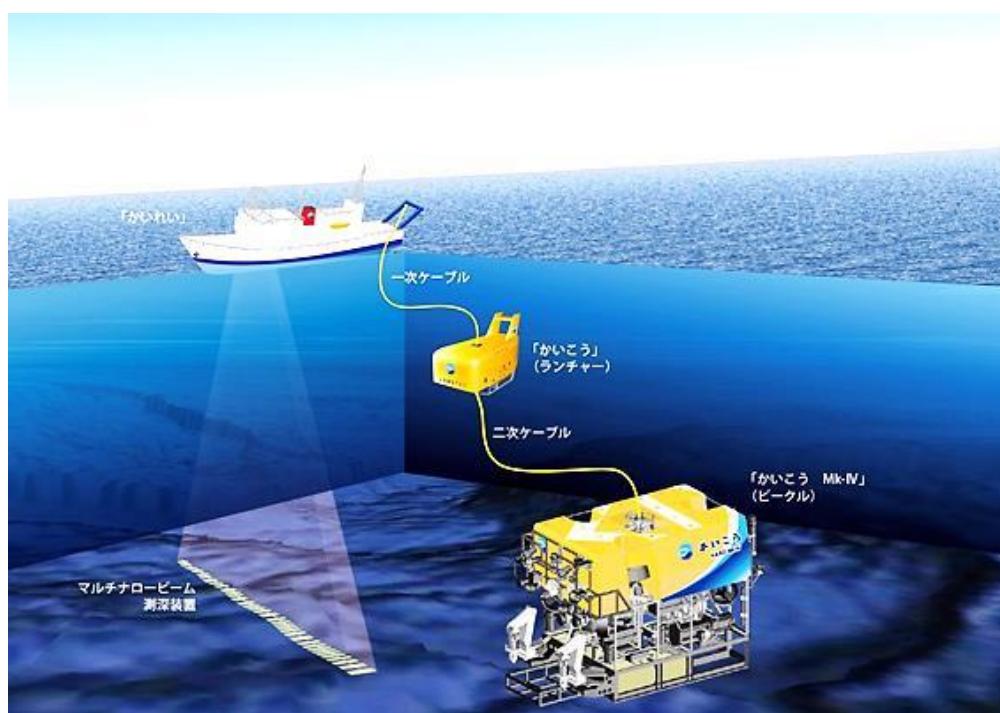


図 2-b-1 「かいこう」オペレーション概要図

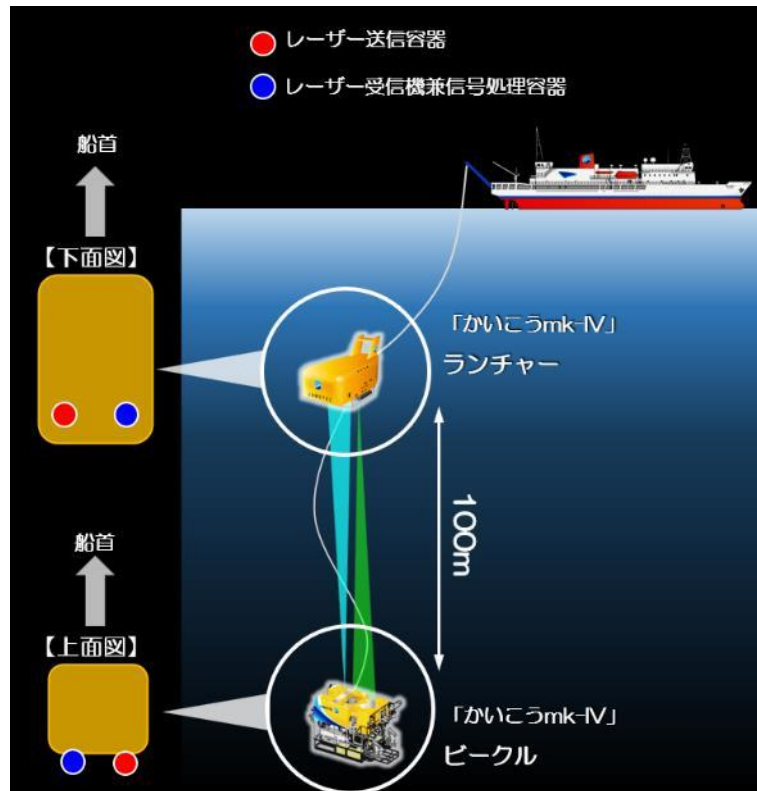


図 2-b-2 「かいこう」搭載コンフィギュレーション

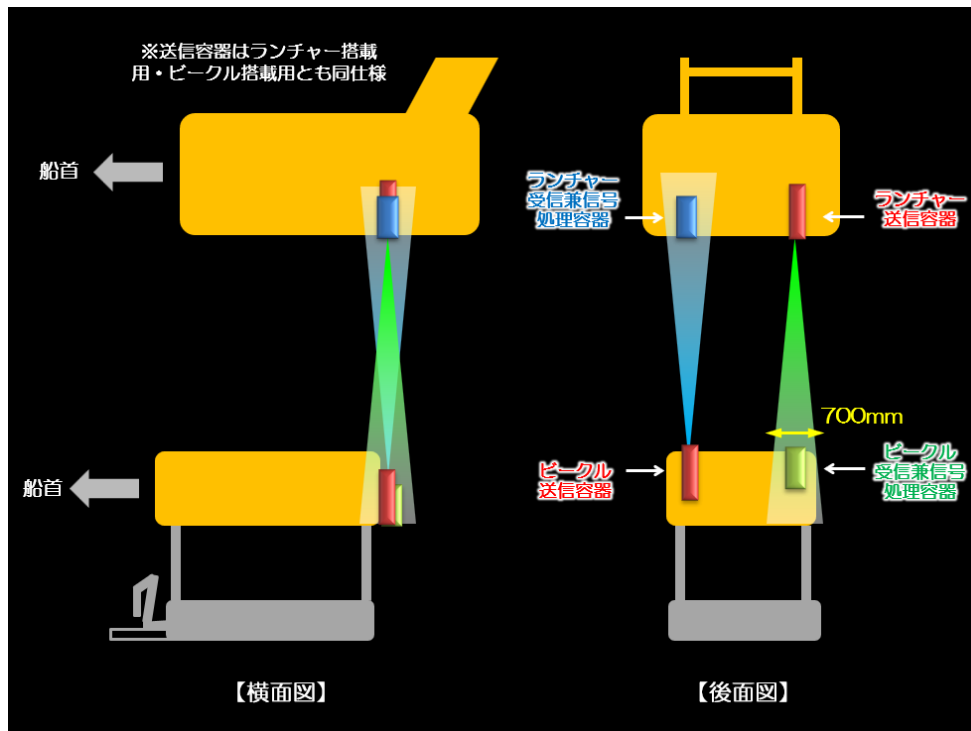


図 2-b-3 「かいこう」による光ワイヤレス通信コンフィギュレーション

② 【耐圧容器（光学系）の実装】

水中光ワイヤレス通信実証機を構成する各容器（レーザー送信容器／レーザー受信兼信号処理容器）において、所望の耐水圧性能を有し、水中インターフェースを外装する耐圧容器を設計・製作し、併せて「かいこう」への実装治具を設計・製作した。以下に各容器

の仕様を示す。図2-b-4、図2-b-5に各容器の図面を、図2-b-6に外観を示す。レーザー光が入出光する際の海水と容器内部（空気）との境界を成すビューポートには、送信容器から照射されるレーザー光の広角を考慮するとともに、受信兼信号処理容器に内蔵される受光素子（PMT | Photo Multiplier Tube）の指向性（レーザー有効径）、および各媒質境界における屈折を鑑み、減衰特性（透過率）と耐熱性、耐水圧性を総合的に考慮（一部試算）した38mm厚の強化ガラス（強化テンパックス）を採用した。

<仕様（レーザー送信容器）>

- 対水圧（使用最大水深） : 1,000m 水深相当圧
- 外寸 : $\phi 225 \times 718.9\text{mm}$
- 内寸 : $\phi 180 \times 601\text{mm}$ （内径は最大基板サイズより決定）
- 材質 : （胴部）アルミ合金 （ビューポート）ガラス
- 水中コネクタ : BH4M（電源用 | 24VDC/18A 許容 | SUBCON）
DBH8M（通信用 | GigE | SUBCON）
- 高周波同軸コネクタ : 制御信号用 | 50Ω / 1GHz 以上許容
- コネクタ配置 : 片側フランジ（ビューポート側で無い）に全配置
- ビューポート : 肉厚 | 38mm 以下 耐圧 | 1,000m 水深相当圧
外径 | $\phi 110\text{mm}$ 材質 | 強化テンパックス
- 内容物 : 送信基板（LD/ドライバー+コントローラ）
Ether スイッチ（HUB）+USB 変換器
広角ズーム+ドライバ
微動台+ドライバ

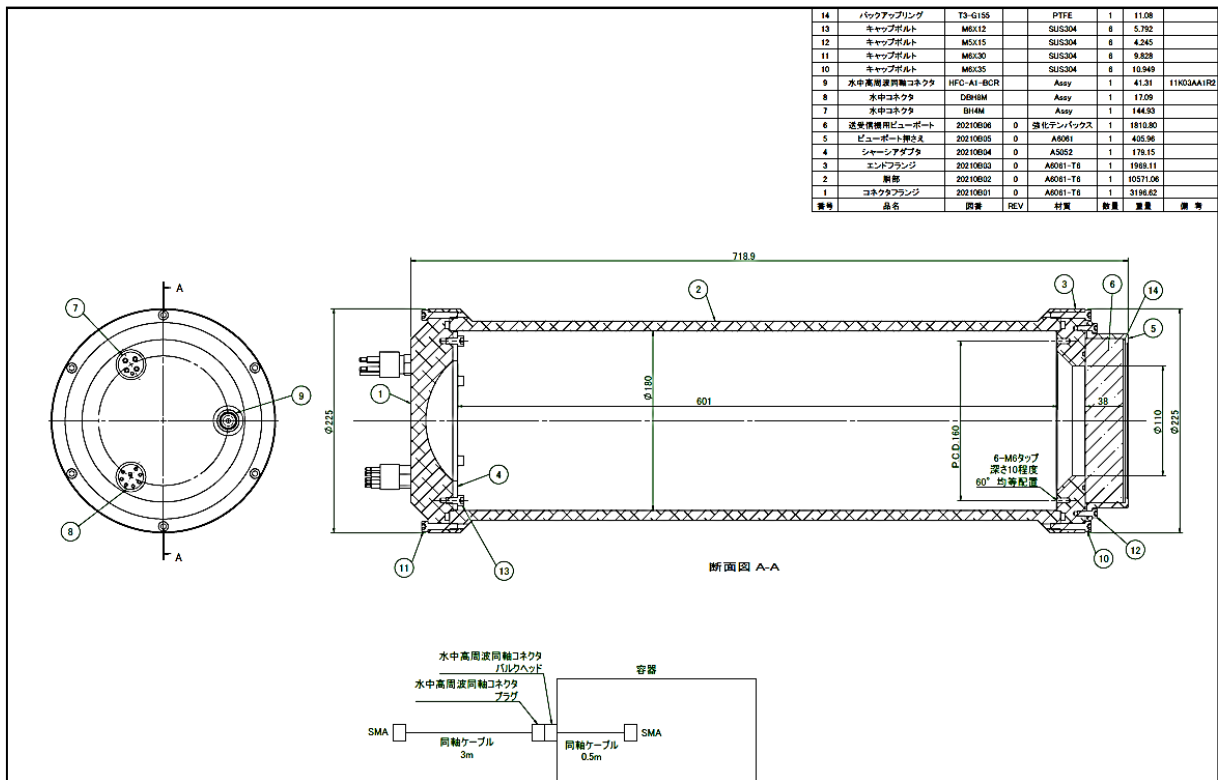


図 2-b-4 レーザー送信容器（耐圧容器）簡易図面

<仕様（レーザー受信兼信号処理容器）>

- 対水圧（使用最大水深） : 1,000m 水深相当圧
- 外寸 : $\phi 280 \times 549.9\text{mm}$
- 内寸 : $\phi 230 \times 401\text{mm}$ （内径は最大基板サイズより決定）
- 材質 : （胴部）アルミ合金 （ビューポート）強化ガラス
- 水中コネクタ : BH4M（電源用 | 24VDC/18A 許容 | SUBCON）
DBH8M（通信用 | GigE | SUBCON）
DBH8F（通信用 | GigE | SUBCON）
VSG4-BCL（電源用 | 24VDC/18A 許容 | SEACON）
- 高周波同軸コネクタ : 制御信号用 | 50Ω / 1GHz 以上許容
- コネクタ配置 : 片側フランジ（ビューポート側で無い）に全配置
- ビューポート : 肉厚 | 38mm 以下 耐圧 | 1,000m 水深相当圧
外径 | $\phi 110\text{mm}$ 材質 | 強化テンパックス
- 内容物 : 受信基板（PMT+コントローラ）
電源基板
Ether スイッチ（HUB）+USB 変換器
広角ズーム+ドライバ
微動台+ドライバ

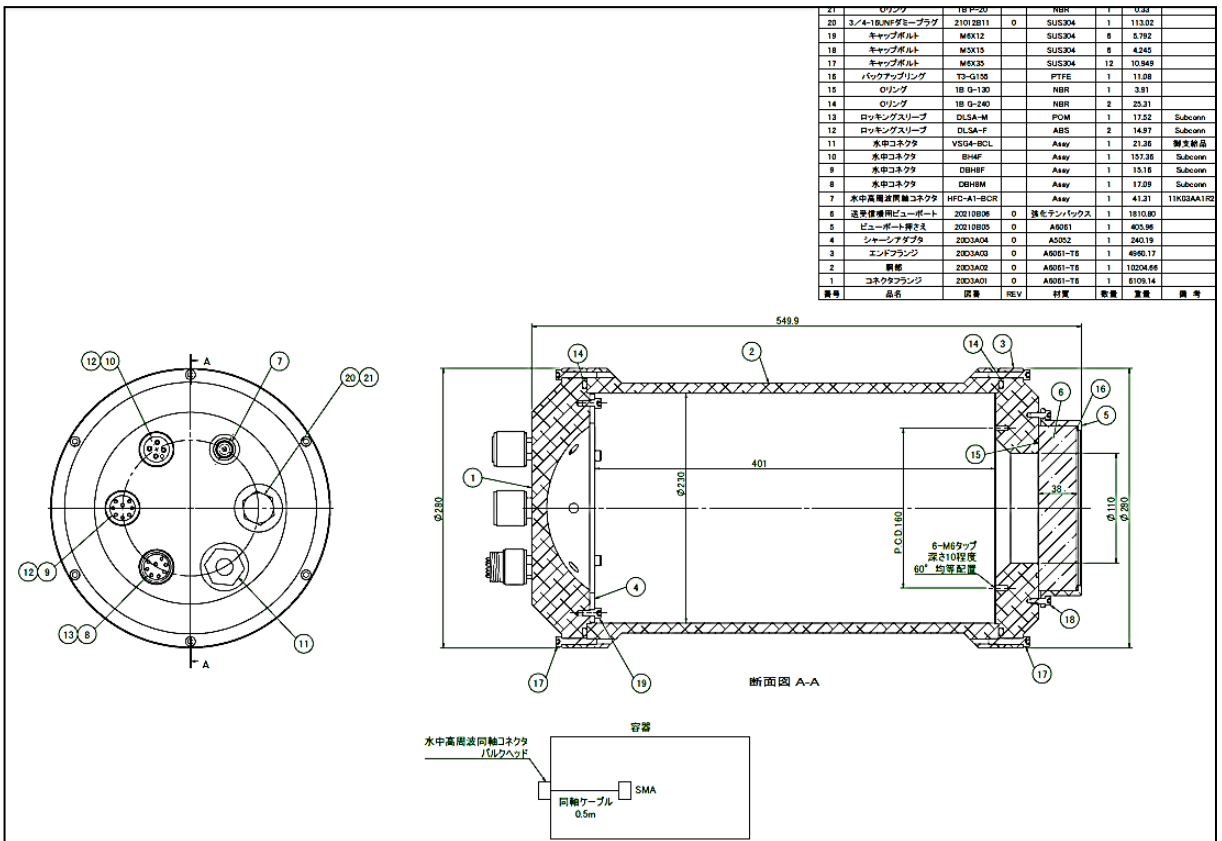


図 2-b-5 レーザー受信兼信号処理容器（耐圧容器）簡易図面

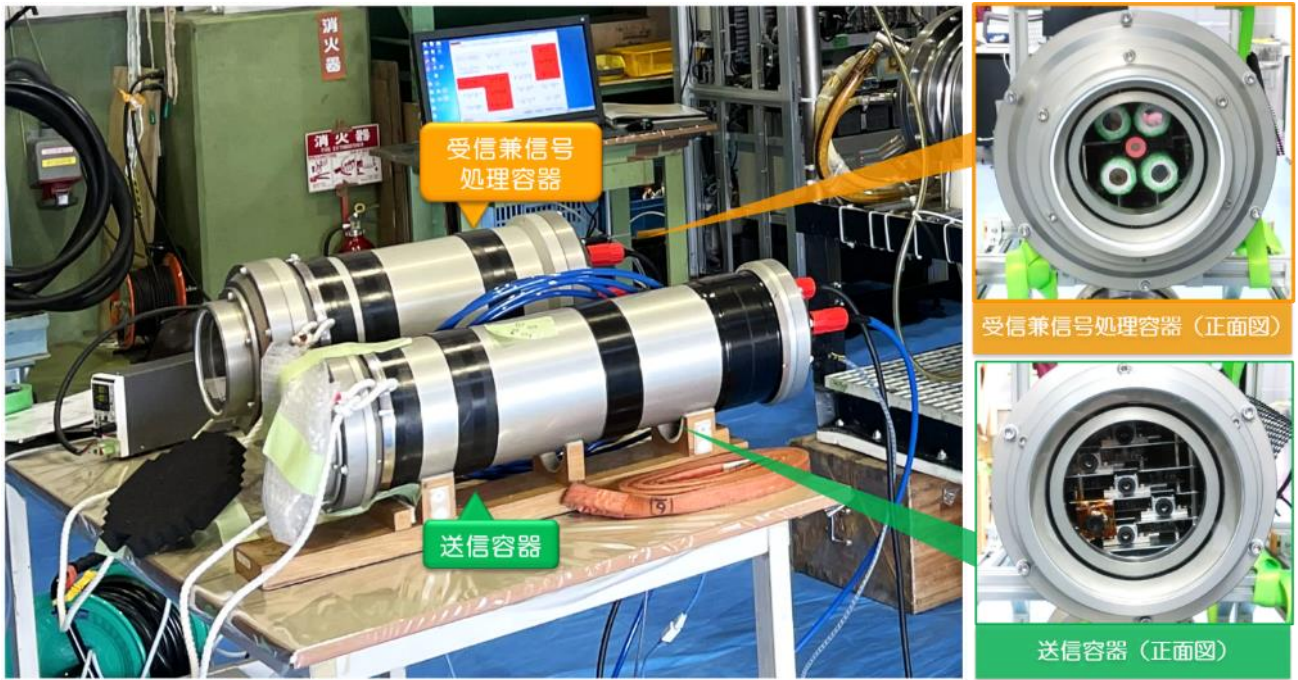


図 2-b-6 外観（レーザー送信容器／レーザー受信兼信号処理容器）

③ 【搭載／配置検討】

製作した各容器サイズは、「かいこう」に搭載する仕様としては比較的に大型のものであり、ランチャーおよびビークルの各プラットフォームに対して、図2-b-3に示す光ワイヤレス通信コンフィギュレーションを満足する相対配置を実現することは通常仕様では困難となる。そこで前年度においてモックアップを用いた各容器の搭載+配置検討（図2-b-7 | 図2-b-8）を実施することで、「かいこう」への実装治具（取付台座・補器台・取付具）を設計・製作した。

<ビークル搭載検討（モックアップ）>

- レーザー送信容器
⇒ ビークル船尾上部（左舷）
- レーザー受信兼信号処理容器
⇒ ビークル船尾上部（右舷）

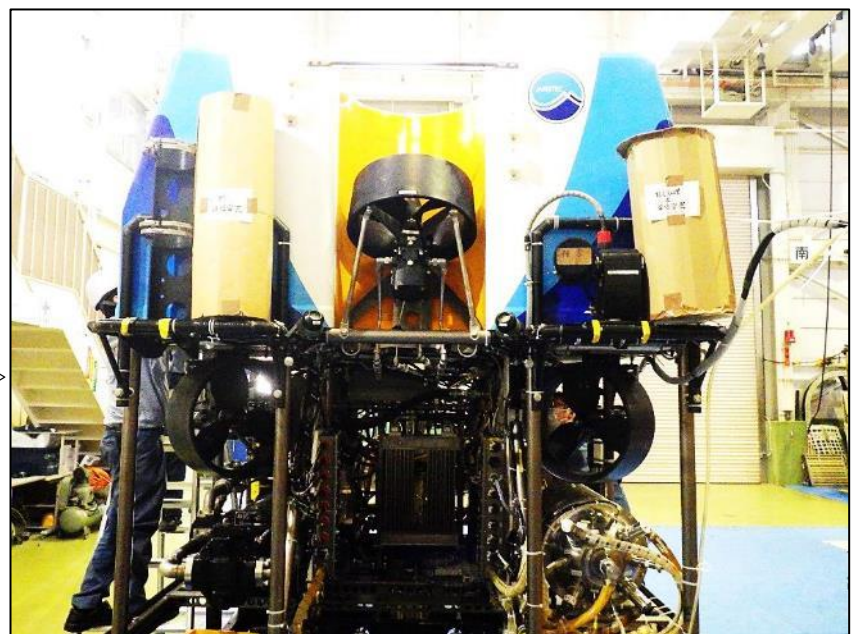
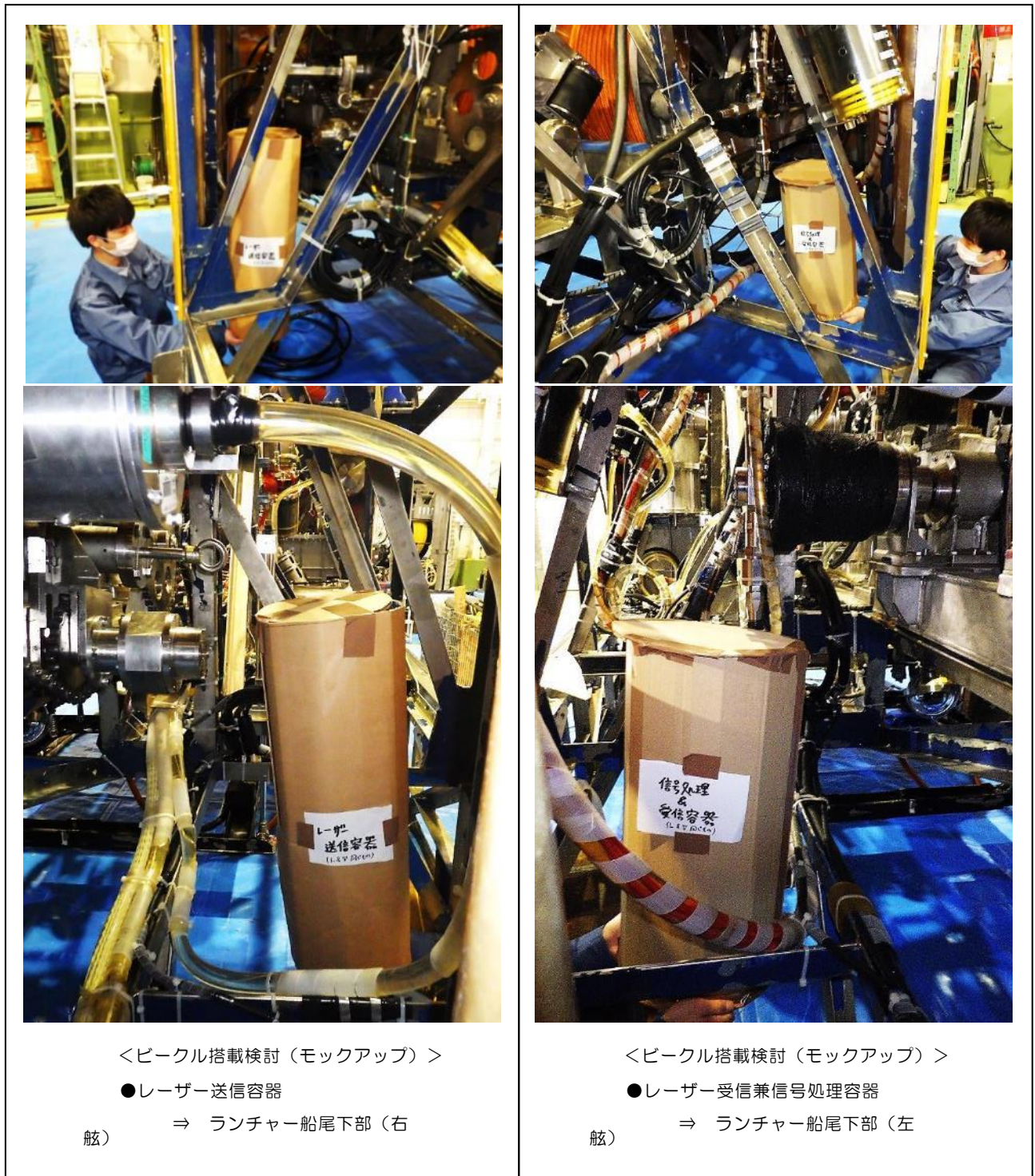


図 2-b-7 搭載+配置検討（ビークル | レーザー送信容器／レーザー受信兼信号処理容器）



＜ビークル搭載検討（モックアップ）＞

●レーザー送信容器

⇒ ランチャー船尾下部（右舷）

＜ビークル搭載検討（モックアップ）＞

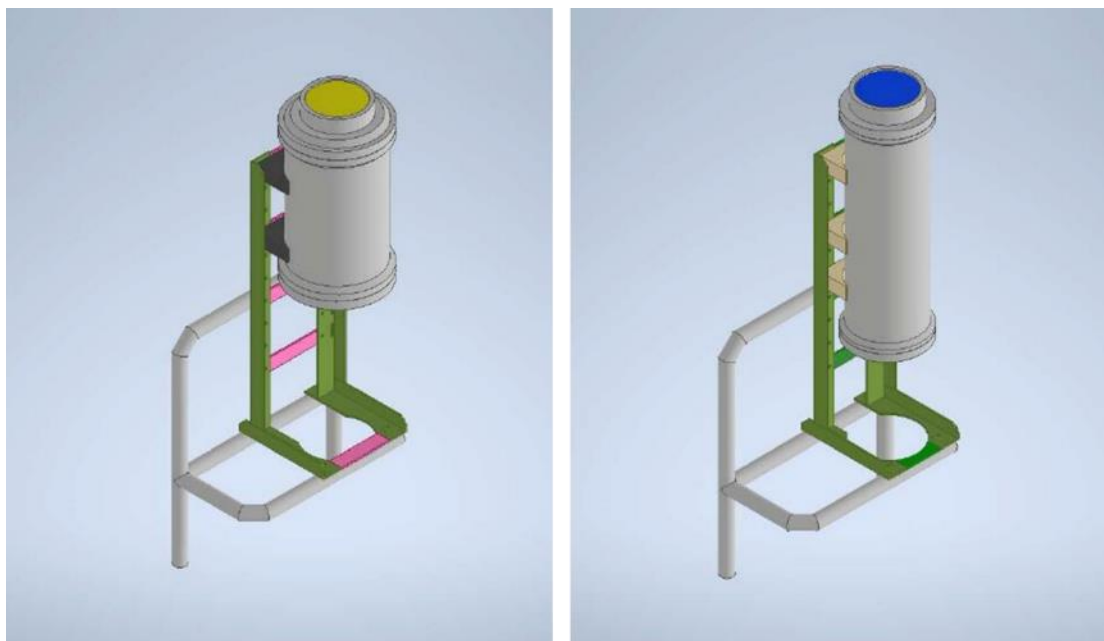
●レーザー受信兼信号処理容器

⇒ ランチャー船尾下部（左舷）

図 2-b-8 搭載+配置検討（ランチャー | レーザー送信容器/レーザー受信兼信号処理容器）

当該検討結果より、所望の光ワイヤレス通信コンフィギュレーションを満足し、かつ各プラットフォームが提供する通信系統・電源系統の確立が可能な搭載場所を決定した。ビークル搭載用レーザー送信容器は船尾（機体後部）左舷上部に、同じくレーザー受信兼信号処理容器は船尾（機体後部）右舷上部に搭載させる。ランチャー搭載用レーザー送信容器は船尾（機体後部）右舷下部（フェアリングカバー内部）に、同じくレーザー受信兼信号処理容器は船尾（機体後部）左舷下部に搭載させる。そこで、当該検討結果に基づき各容器をランチャー/ビークルの搭載位置へ設置するための実装治具を設計・製作した（図 2-b-9 | 図 2-b-10）。これにより深海試験において、レーザー光（送

信光) の伝搬を極力妨害することなく送信容器から照射させ、拡張した送信光を可能な限り遮蔽させずに受信兼信号処理容器に到達させる光ワイヤレス通信を確立させるための各容器が配置される。



↓実装治具（ビークル搭載用 | 受信兼信号処理容器用）

↓実装治具（ビークル搭載用 | 送信容器用）



図 2-b-9 実装治具（ビークル搭載用 | レーザー送信容器 / レーザー受信兼信号処理容器）

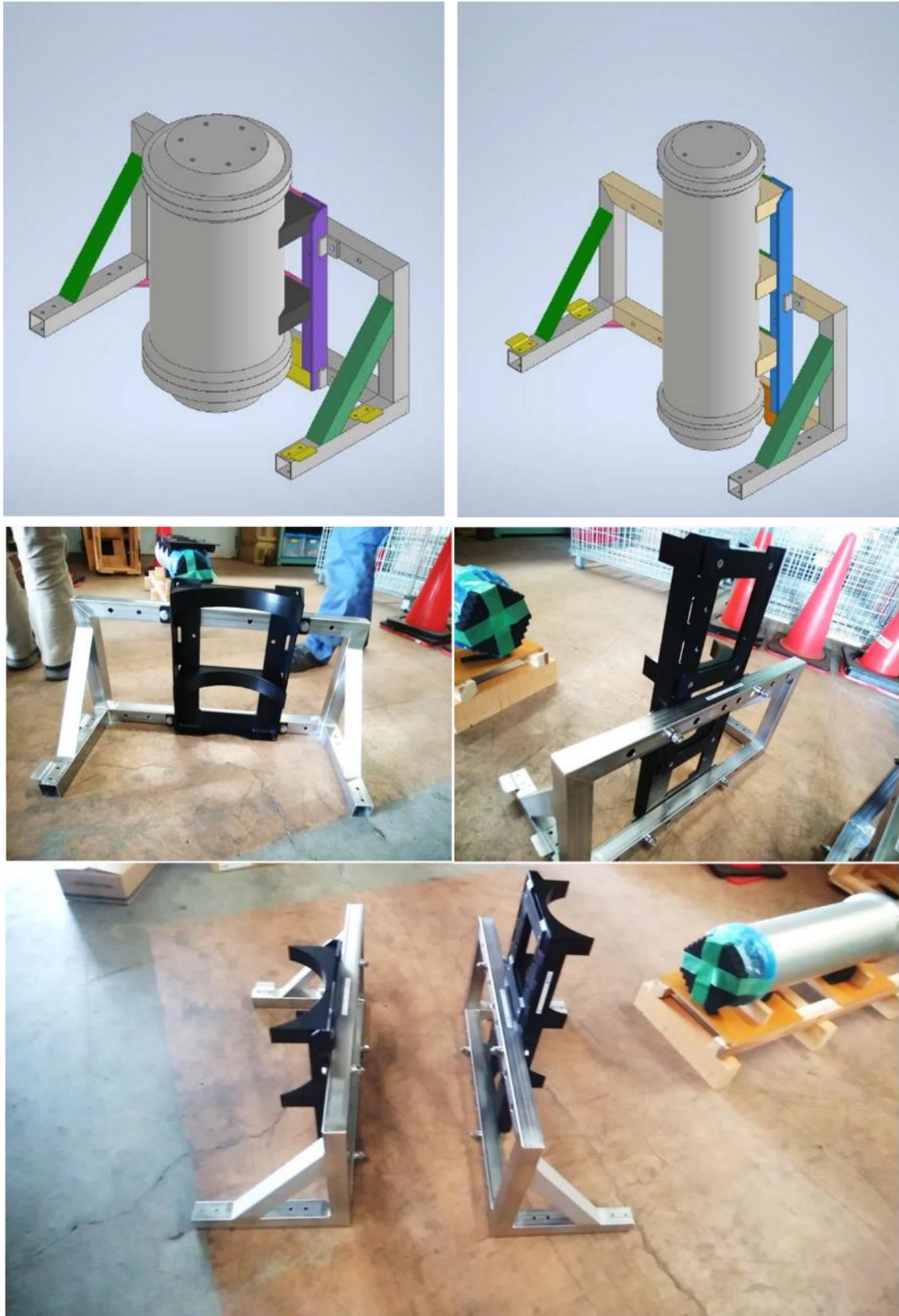


図 2-b-10 実装治具（ランチャー搭載用 | レーザー送信容器 / レーザー受信兼信号処理容器）

c. 実証装置のシステムデザインと試作

(2) a. の方式検討を基に実証装置のシステムデザインを行った。実証装置の機能ブロック図を図2-c-1に示す。実証装置は、送信モジュール (Optical tranceiver)、受信モジュール (Optircal receiver)、送受信信号処理モジュール (Data signal processor) で構成されている。送信モジュールは、複数の可視光LDとLDドライバから構成されており、各可視光LDは同じ信号で変調さるので、LD数を増やすことにより高出力化が図れる。受信モジュールは、4個のPMTを受信基板で合波する構成になっており、4個のPMTを使うことにより、受光面積を4倍 (受光径2倍相当) に拡大することで、ゆらぎによるパワー変動や受光外れ、受光ビーム径の拡大による受光損失を抑制する。受信モジュールには、信号をインターリーブすることによりバースト誤り耐性を向上させたInterleaved FEC (Forward Error Correction) 機能、高速同期を可能とする専用フレーム機能を備えている。

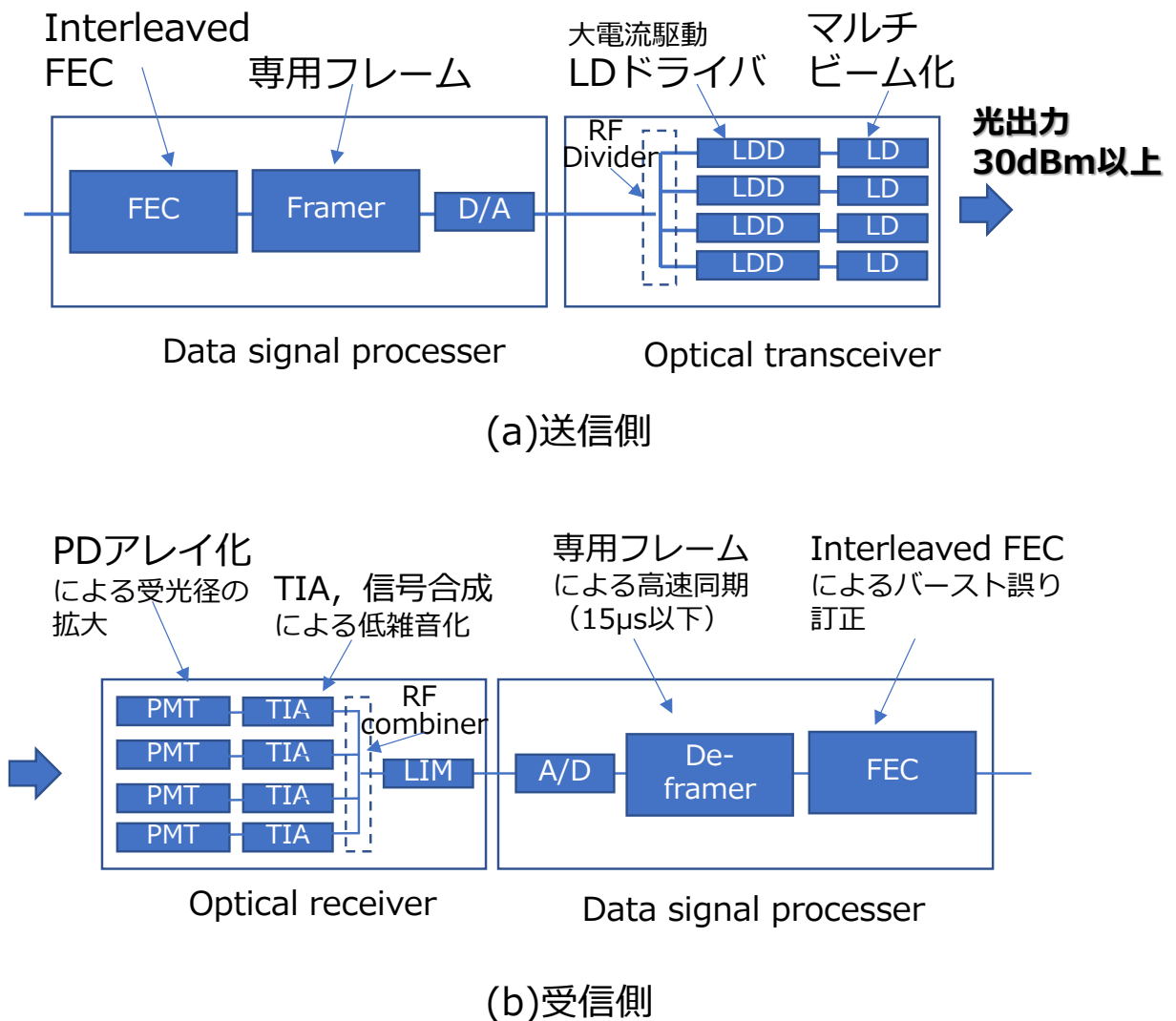


図2-c-1 実証装置の機能ブロック図

また1Gbps送信モジュール単体の出力波形を図2-c-2に示す。LD単体で光振幅 1.0 Wを実現しており、LDが2個あれば平均光パワー 1.0 W (30 dBm) を実現できる。方式検討時の、LD単体100mW (20dBm) の想定からは大幅な改善である。実証装置においては、LD数4または5個での運用を想定しているため、最大出力は、33~34dBmが見込まれる。次に送信モジュールの出力を受信モジュールで受信した時の、受信モジュールの出力波形を図2-c-3に示す。受信モジュールの受信感度は、PMT単体で-27dBm以下 (増倍率低め、誤り率 10^{-3}) 程度

であり、実証装置の送信パワーを勘案するとロスバジェット60 dB以上が見込める。なお現時点のLD単体、PMT単体評価でも54 dBのロスバジェットとなる。今後、送信モジュール、受信モジュール、信号処理モジュールの結合試験を通じて、モジュール間の設定の最適化、必要に応じて改良を行い、ロスバジェットの拡大を図り、マージンを積み上げる。

送信、受信、信号処理モジュールの結合試験の試験系を図2-c-4に示す。また参考として送信、受信、信号処理モジュールを図2-c-5に示す。結合試験では、信号処理モジュールのデバックモードで、データが受信できるところまで確認した。

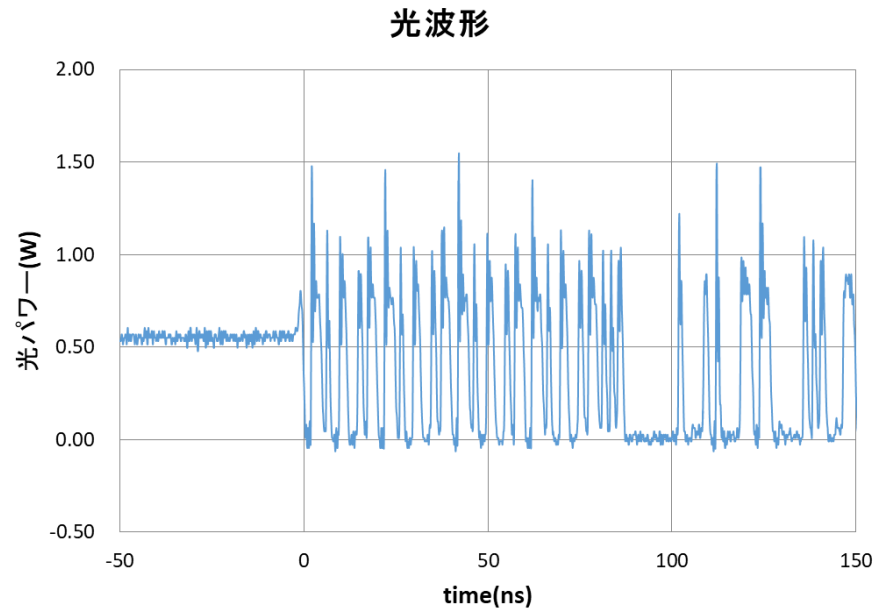


図2-c-2 送信モジュール出力光波形

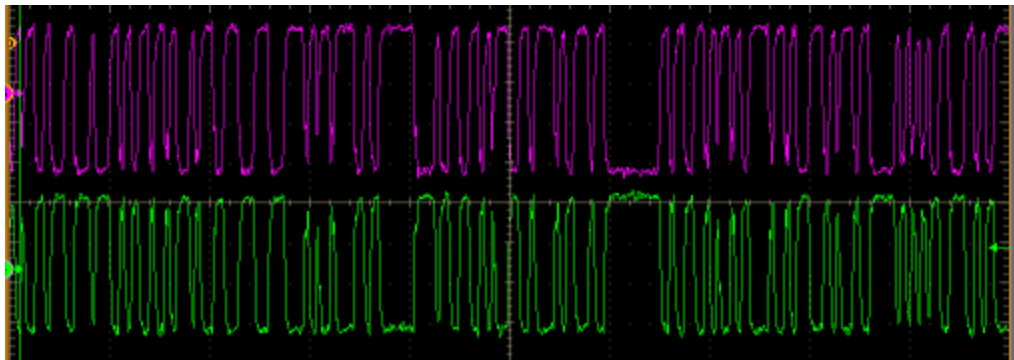
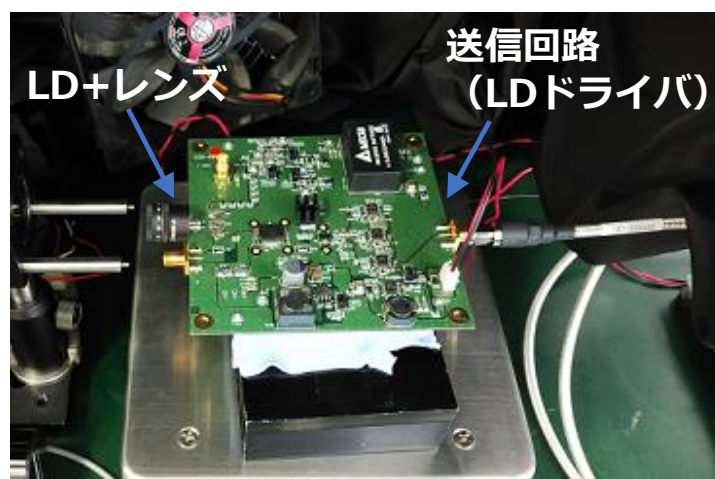


図2-c-3 受信モジュール出力電気波形（差動出力）



図2-c-4 送信，受信，信号処理モジュール結合試験系



(a) 送信モジュール



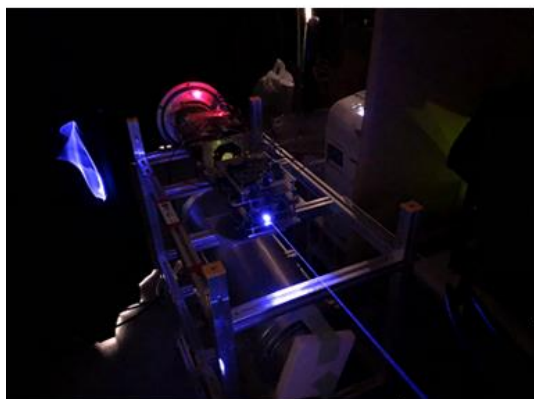
(b) 受信モジュール



(c) 送受信信号処理モジュール

図2-c-5 (a) 送信モジュール、(b) 受信モジュール、(c) 送受信信号処理モジュール

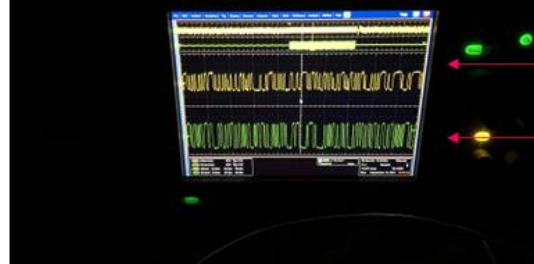
最後に室内実験の様子を図2-c-6に示す。出力が大きいため、実験はビームを拡散させると共に、受信器直前にアッテネータを置いて評価を行った。



送信装置



受信装置



受信波形

変調波形 (送信側)

図2-c-6 室内実験の様子

d. 評価試験とデータ分析

(ア) 評価試験系 (海洋研究開発機構/トリマティス)

(イ) 評価試験 (海洋研究開発機構/トリマティス)

① 【概要】

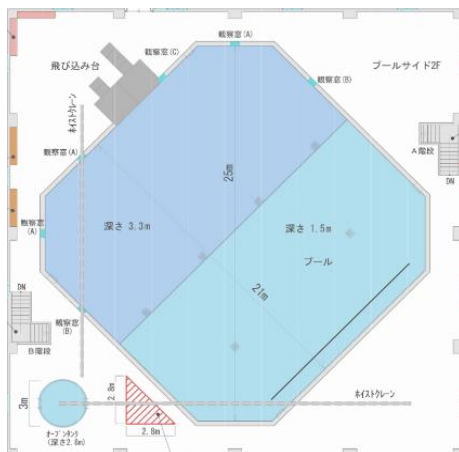
実施項目(1)等で得られた計測データ・知見(ノウハウ)・方針をもとに、疑似海中環境(プール|水槽)および実海域における評価試験系を検討・構築する。併せて、当該各試験系を用いて実施項目(2)で試作した水中光ワイヤレス通信実証機を用いた評価試験(プール試験・水槽試験/深海試験)を策定し実施する。これにより、BL積100Gbps/m(1Gbps×100m)に対する当該実証機を適用した伝送性能を確認し基礎データを取得する。(※データ分析:トリマティス担当)

② 【試験系の構築 | プール試験/水槽試験の策定・実施】

水中光ワイヤレス通信実証機を用いて、開発初期におけるシステム健全性確認、機性能確認、および伝送性能確認等を実施するためにプール試験・水槽試験を計3回実施した。プール試験の試験系を図2-d-1、水槽試験の試験系を図2-d-2に示す。(※当時のコロナ禍状況およびJAMSTEC規定を鑑み、試験回数、試験日数、試験時間、参加配員に関しては、可能な限りの安全性を担保している。)

- ・第1回プール試験 | 2021年9月16-17日 | JAMSTEC多目的プール
- ・第1回水槽試験 | 2021年10月26-28日 | JAMSTEC多目的水槽
- ・第2回プール試験 | 2022年1月19-20日 | JAMSTEC多目的プール

a. <試験環境 | JAMSTEC多目的プール>



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	: 水温30°Cまで加温可能
冷却	: なし

図2-d-1 試験環境(多目的プール | JAMSTEC)

b. <試験環境 | JAMSTEC 多目的水槽>



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 ・索行速度 → 0.2~2.0m/s

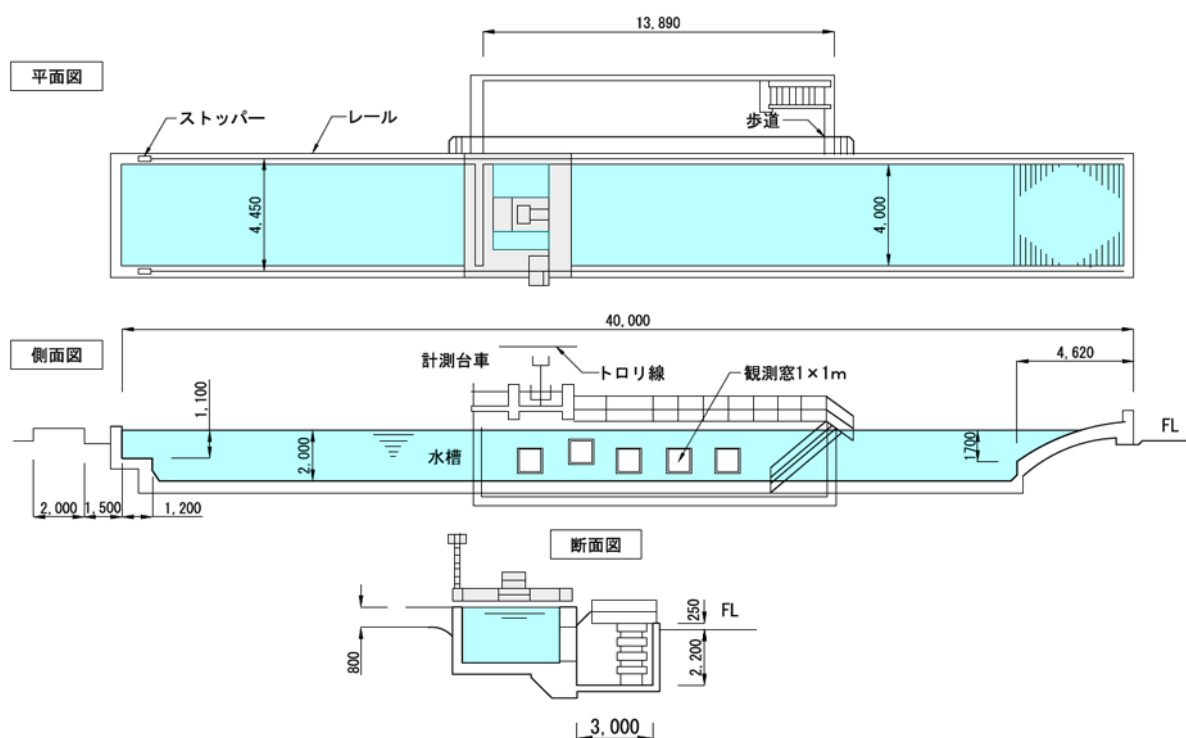


図 2-d-2 試験環境 (多目的水槽 | JAMSTEC)

c. <第1回プール試験>

レーザー送信容器およびレーザー受信兼信号処理容器にそれぞれ格納した深海試験仕様となる水中光ワイヤレス通信実証機に対し、水中環境におけるシステム健全性確認、機能性能確認および光軸調整等を兼ねたプール試験を実施した。当該実証機の開発担当である研究代表機関と調整し、JAMSTEC 多目的プールを用いて複数パターンの伝搬試験を実施し、この際、図 2-d-3 に示すように、プールサイドの突起構造とプール壁面を利用することにより当該実証機を水中内に固定設置し、水中光ワイヤレス通信に関する基礎データを取得した。図 2-d-4 に本試験におけるシステムコンフィギュレーションを、図 2-d-5 に本試験の様子を示す。

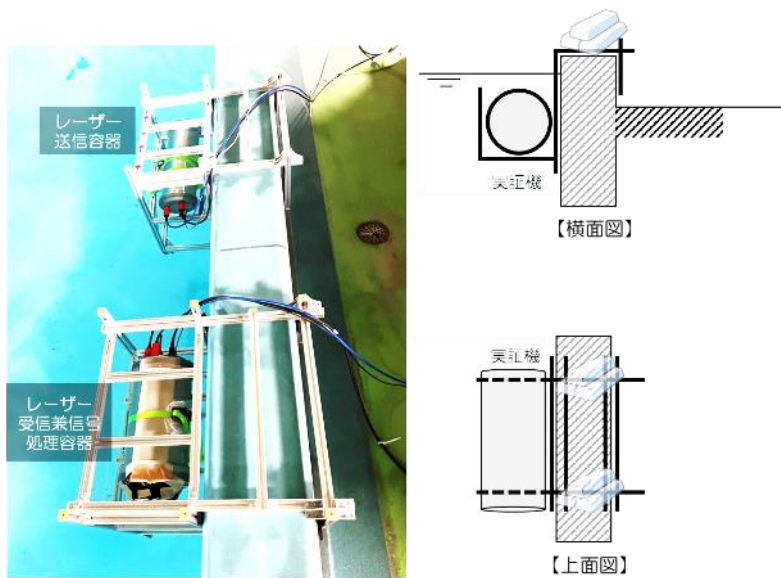


図 2-d-3 実証機固定状態 (第 1 回プール試験 | 多目的プール)

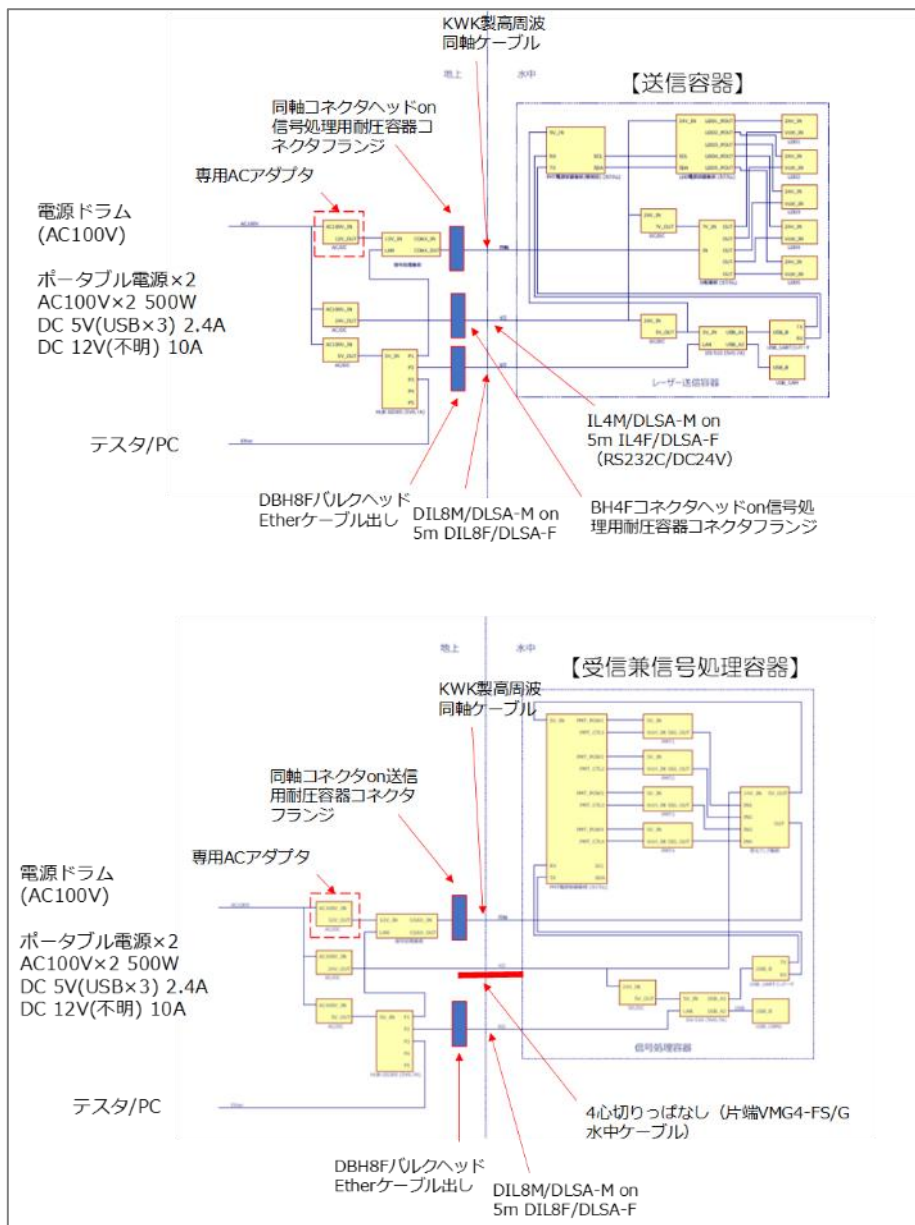


図 2-d-4 システムコンフィギュレーション (第 1 回プール試験 | 多目的プール)

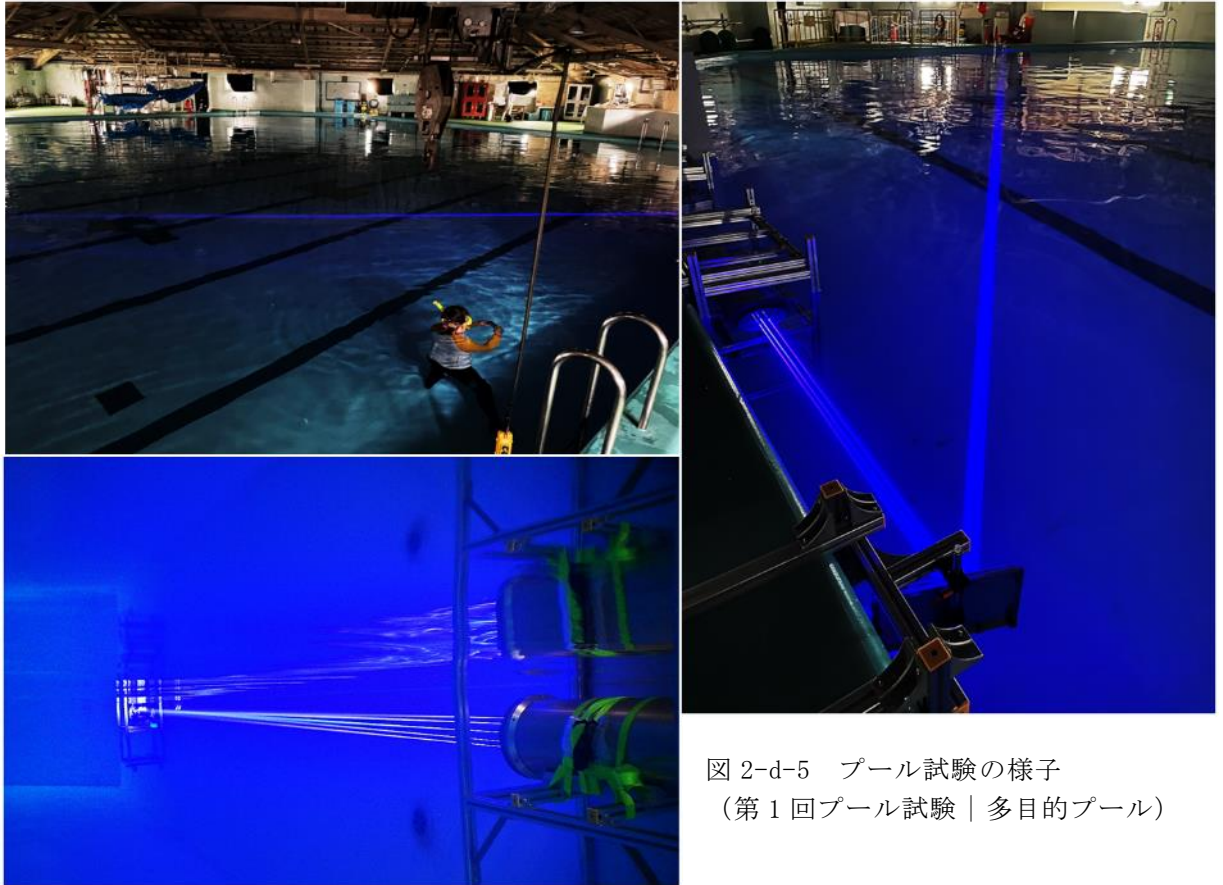


図 2-d-5 プール試験の様子
(第 1 回プール試験 | 多目的プール)

d. < 第 1 回水槽試験 >

第 1 回プール試験と同様に、深海試験仕様となる水中光ワイヤレス通信実証機の基本性能を確認すべく水槽試験を実施した。当該試験においては、各レーザー波長における双方向通信性能を確認するとともに、長距離通信時における基礎データの取得を主とする。JAMTEC 多目的水槽の長手方向に対し出来る限り間隔を開けてレーザー送信容器およびレーザー受信兼信号処理容器を水槽壁面に固定設置し (図 2-d-6)、レーザー伝搬長を確保した。併せて、アクリル製反射ミラーを配置することにより、レーザー伝搬距離を伸長させ、長距離伝送時における通信波形

(送信光波形) および送信光強度を定量的に計測した。本試験におけるシステムコンフィギュレーションは第 1 回プール試験と同様となる。図 2-d-7 に本試験の様子を示す。

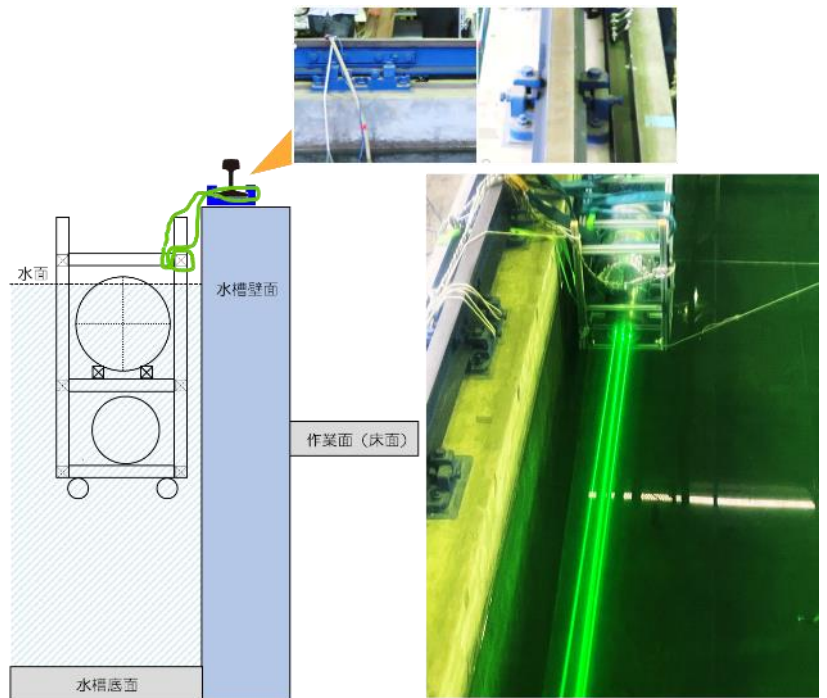


図 2-d-6 実証機固定状態
(第 1 回水槽試験 | 多目的水槽)

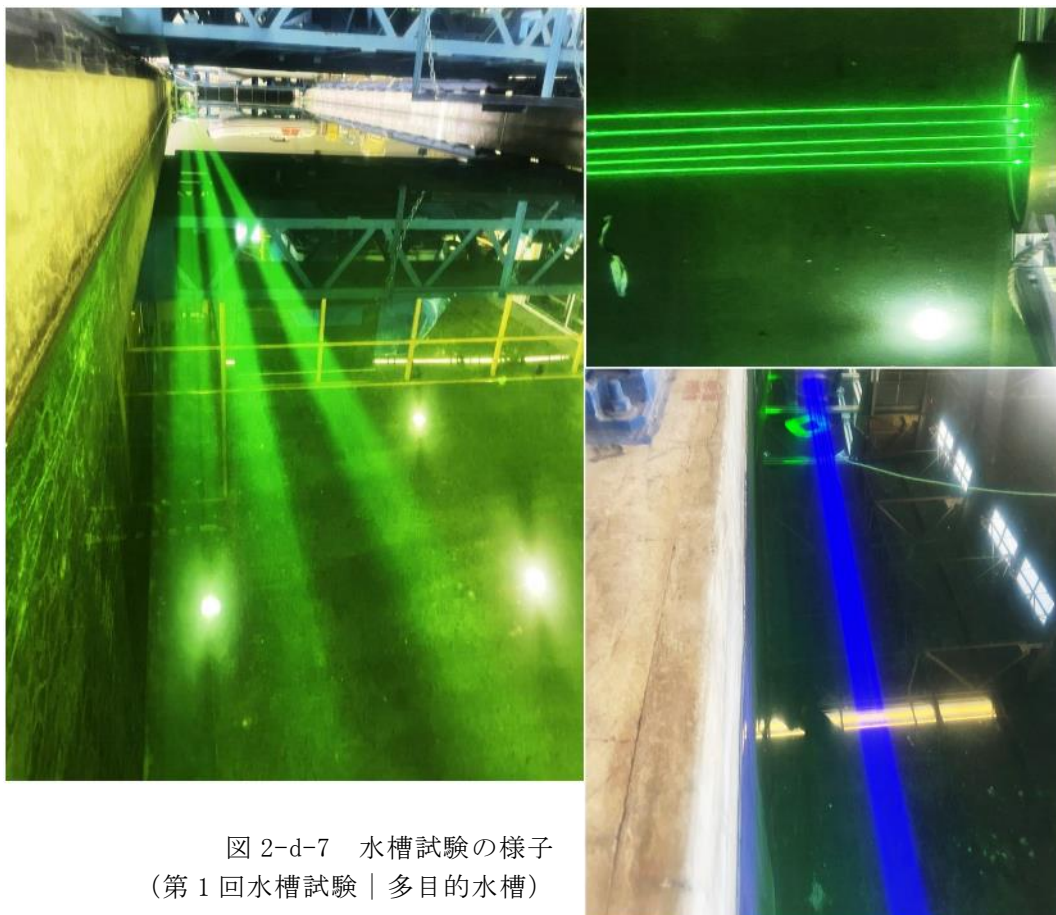


図 2-d-7 水槽試験の様子
(第 1 回水槽試験 | 多目的水槽)

e. <第 2 回プール試験>

後述する水中光ワイヤレス通信実証機を「かいこう」に適用した深海試験（水中光ワイヤレス通信試験）を実施した後、100m 超の長距離伝搬状態における通信波形（送信光波形）および送信光強度の特性を計測・評価することを目的として、プール試験を実施した。本プール試験では、先に適用したアクリル製反射ミラーに起因するレーザー光の拡散（指向性と光強度の劣化）を鑑み、金属製反射ミラーを採用することで、100 超の光ワイヤレス伝搬路（片方向通信リンク）を確立させる。図 2-d-8 に本試験における試験系パターン（通信コンフィギュレーション）を示す。

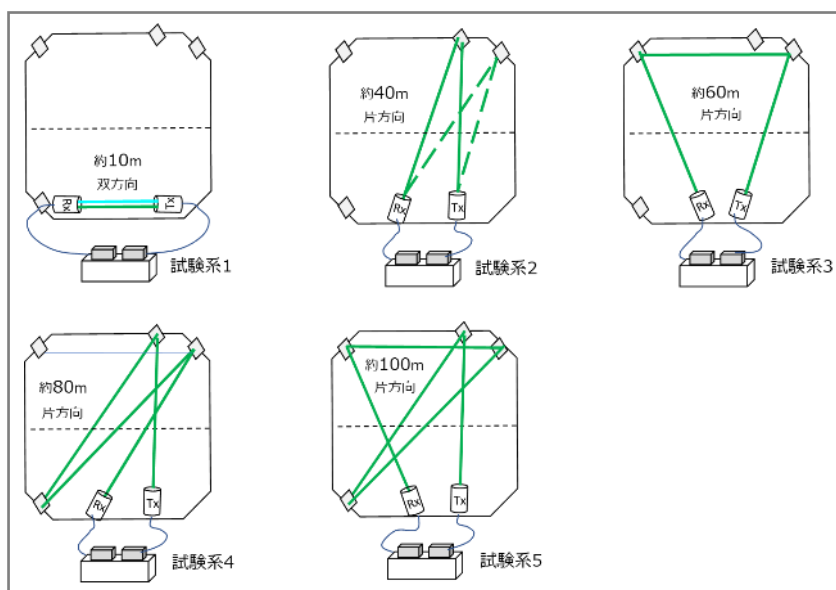


図 2-d-8 試験系パターン
(第 2 回プール試験 | 多目的プール)

図 2-d-8 に示す試験系 5 において約 100m 超の光ワイヤレス伝搬長が提供される。本研究の目標・目的でもある 1Gbps×100m の BL 積を達成する水中光ワイヤレス通信を確立させ、その際の基礎データを取得することで、水中光ワイヤレス通信における回線設計等に資する理論式の検討・構築に反映させる。本試験におけるシステムコンフィギュレーションは、第 1 回プール試験および第 1 回水槽試験と同様となる。本試験の結果、試験系 5 において金属製反射ミラーにより送信光を計 4 回反射させることで、片道約 20m の伝搬路が 5 本確立され、最大約 108m の通信長を有する水中光ワイヤレス通信に成功し、その際の基礎データを取得した。図 2-d-9 に本試験の様子を示す。

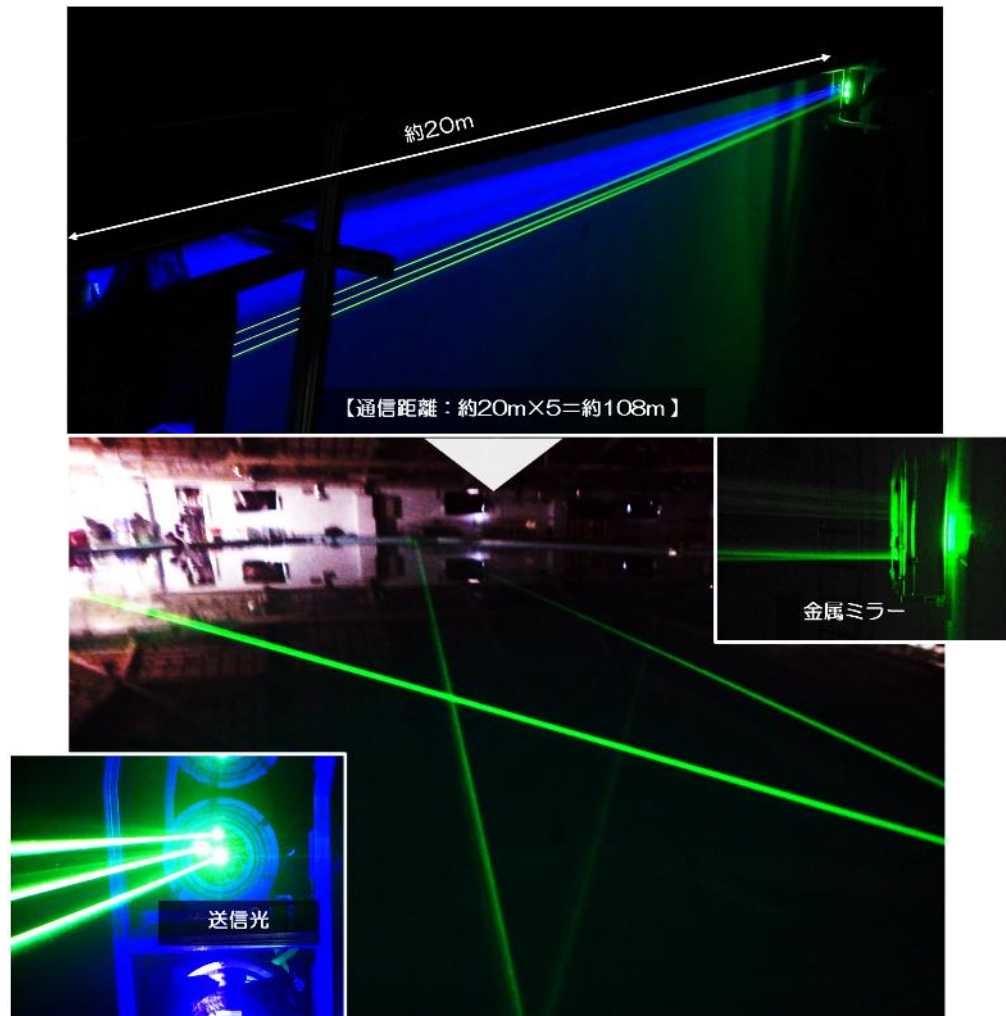


図 2-d-9 プール試験の様子（第 2 回プール試験 | 多目的プール | 108m 通信長）

③ 【試験系の構築 | 深海試験（水中光ワイヤレス通信試験）の策定・実施】

水中光ワイヤレス通信実証機を用いて、JAMSTEC が所有する ROV「かいこう」を適用した水中光ワイヤレス通信試験を実海域にて実施すべく、当該試験系を構築するとともに試験要領・試験手法を策定し、当該試験を実施した。

a. <海域試験 | 諸元>

- ・課題番号 : C21-14
- ・課題名 : 「1Gbps×100m の BL 積を達成する海中ワイヤレス通信技術の海域検証試験」

- ・課題提案者： 石橋 正二郎 (MarE3・技術開発部 | 主任研究員)
- ・首席研究員： 永橋 賢司 (MarE3・技術開発部 | 部長)
- ・期間： 令和3年11月26日(金)～同11月30日(火)
- ・出入港地： 出港地 | 横須賀 (JAMSTEC 棧橋) 入港地 | 横須賀 (JAMSTEC 棧橋)
- ・使用船舶等： 「かいいい」 | 4,517G/T
「かいこう」 | 7,000m級遠隔操作式無人探査機 (ROV)

b. <実施海域 | 潜航予定ポイント> (図 2-d-10)

[1] 相模湾 (水深：80-1,500m) 機構海域番号61-31

[35° 13.0' N, 139° 12.0' E] [35° 13.0' N, 139° 24.0' E]

[35° 00.0' N, 139° 24.0' E] [34° 54.0' N, 139° 12.0' E]

[35° 02.0' N, 139° 08.0' E]

の5点で囲まれる範囲

[2] 予備海域：駿河湾 (水深 300～2,000m) 機構海域番号 61-32

[35° 04.0' N, 138° 38.0' E] [35° 04.0' N, 138° 44.0' E]

[34° 35.0' N, 138° 41.0' E] [34° 35.0' N, 138° 31.0' E]

の4点で囲まれる範囲

[3] 予備海域：南海トラフ北縁部 (水深 500～2,000m) 機構海域番号 61-32

[34° 15.0' N, 138° 45.0' E] [34° 15.0' N, 139° 00.0' E]

[34° 00.0' N, 139° 00.0' E] [34° 00.0' N, 138° 45.0' E]

の4点で囲まれる範囲

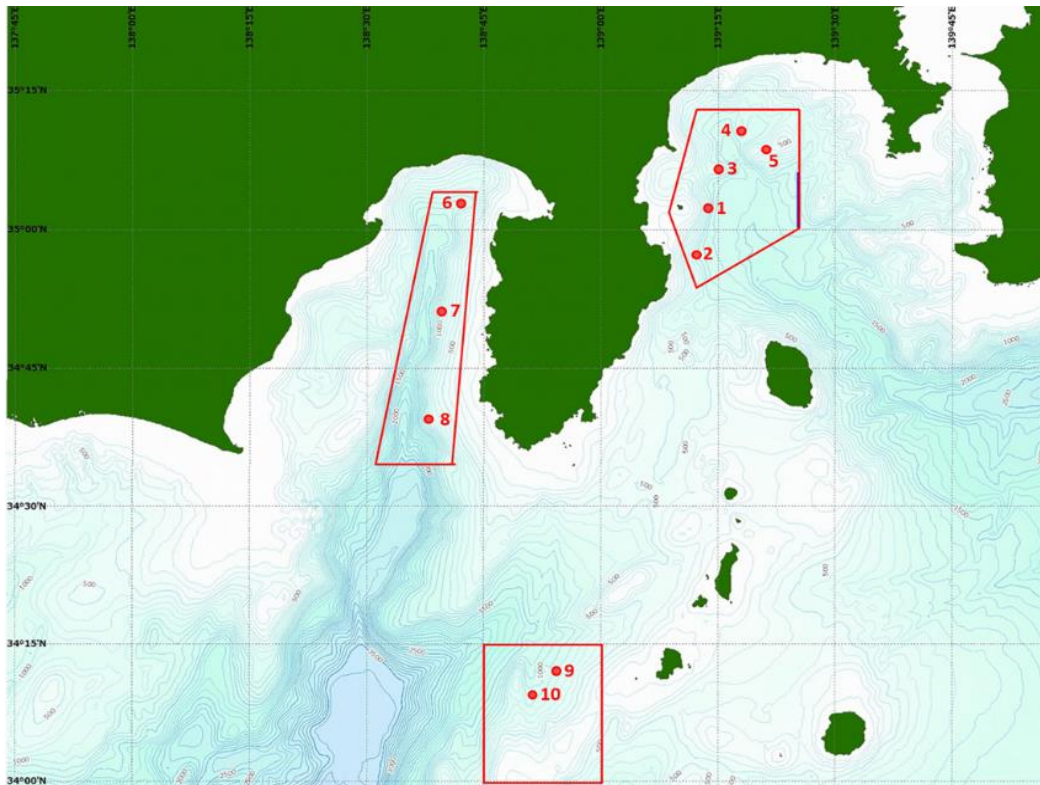


図 2-d-10 実施海域 (水中光ワイヤレス通信試験 | 相模湾/駿河湾)

[1]相模湾^{※1}

- 潜航予定ポイント 1： 35° 01.00 'N 139° 14.00 'E (水深約 900-1000m)
 潜航予定ポイント 2： 34° 57.50 'N 139° 12.00 'E (水深約 900-1000m)
 を中心とする半径 1 マイル以内
 潜航予定ポイント 3： 35° 06.50 'N 139° 15.00 'E (水深約 800-900m)
 を中心とする半径 1 マイル以内
 (※海底 20m 以上を保持し着底はしない)
 潜航予定ポイント 4： 35° 10.50 'N 139° 18.00 'E (水深約 900-1000m)
 を中心とする半径 1 マイル以内
 潜航予定ポイント 5： 35° 08.50 'N 139° 21.00 'E (水深約 600-700m)
 を中心とする半径 1 マイル以内
 (※海底 20m 以上を保持し着底はしない)

[2]駿河湾 (予備海域) ^{※2}

- 潜航予定ポイント 6： 35° 03.00 'N 138° 41.00 'E (水深約 900-1000m)
 を中心とする半径 1 マイル以内
 潜航予定ポイント 7： 34° 51.50 'N 138° 39.50 'E (水深約 900-1000m)
 を中心とする半径 1 マイル以内
 潜航予定ポイント 8： 34° 39.50 'N 138° 38.00 'E (水深約 800-900m)
 を中心とする半径 1 マイル以内

[3]南海トラフ北縁部 (予備海域) ^{※2}

- 潜航予定ポイント 9： 34° 12.00 'N 138° 54.00 'E (水深約 900-1000m)
 を中心とする半径 1 マイル以内
 潜航予定ポイント 10： 34° 09.00 'N 138° 51.00 'E (水深約 900-1000m)
 を中心とする半径 1 マイル以内

※1

潜航予定ポイントが「潜水船及び無人機等の海底ケーブルに対する作業安全基準」に抵触する場合、海底 20m 以上を保持し着底はしない。

実施海域①内において、気象・海象条件および試験目的・海水環境等により、首席・本船の判断にて潜航予定ポイント 1-5 以外のポイントへ潜航する場合がある。

※2

気象・海象条件等により「試験海域① | 相模湾」における潜航が困難と判断された場合は、「実施海域② | 駿河湾」あるいは「試験海域③ | 南海トラフ北縁」の潜航ポイント 6-10 が選定される。

試験海域②内あるいは試験海域③内において、気象・海象条件および試験目的・海水環境等により、首席・本船の判断にて潜航予定ポイント 6-10 以外のポイントへ潜航する場合がある。

c. < 試験日程 >

日付	動静	行動予定	海域
11 月 25 日 (木)	出港⇒回航	研究者乗船 試験・潜航準備	JAMSTEC/横須賀 HQ 岸壁

11月 26日 (金)	潜航1回目	水中光ワイヤレス通信試験①（実施海域①での試験）	相模湾 潜航予定ポイント①（実施海域①） 水深約1000m
11月 27日 (土)	潜航2回目	水中光ワイヤレス通信試験②（実施海域②での試験）	相模湾 潜航予定ポイント②（実施海域②） 水深約1000m
11月 28日 (日)	潜航3回目	水中光ワイヤレス通信試験③（実施海域③での試験）	相模湾 潜航予定ポイント③（実施海域③） 水深約1000m
11月 29日 (月)	回航⇒入港	（機構岸壁着岸後） 研究者下船＋艀装解除	JAMSTEC/横須賀HQ 岸壁

<注記>

海象・気象、作業進捗状況等により日程および実施内容（行動予定）、予備海域を含めた潜航予定ポイントを変更する可能性がある。

d. <接続試験 | 機器搭載>

海域試験の事前作業として、水中光ワイヤレス通信実証機と「かいこう」との接続試験および機器搭載確認を「かいこう」整備場および「かいいい」船上においてそれぞれ実施した。各レーザー送信容器およびレーザー受信兼信号処理容器と「かいこう」システム（水中部 | 船上部）との電氣的結線状態を構築し、所望の信号および電源の供給に問題がないことを確認する。この際、「かいこう」主電源となる船上からの3000VAC供給状態を構築し、通信I/F仕様、電源I/F仕様の正常性を確認するとともに、EMI環境を考慮する電氣的健全性（安定性）を確認した。併せて、各容器をランチャー／ビークル

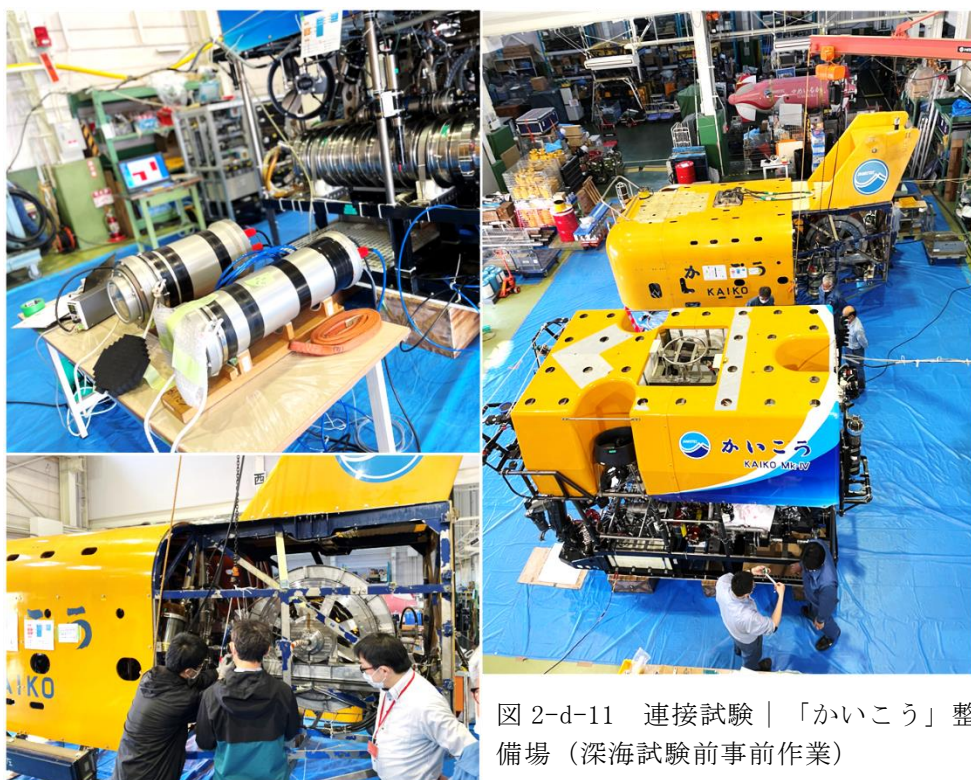


図 2-d-11 接続試験 | 「かいこう」整備場（深海試験前事前作業）

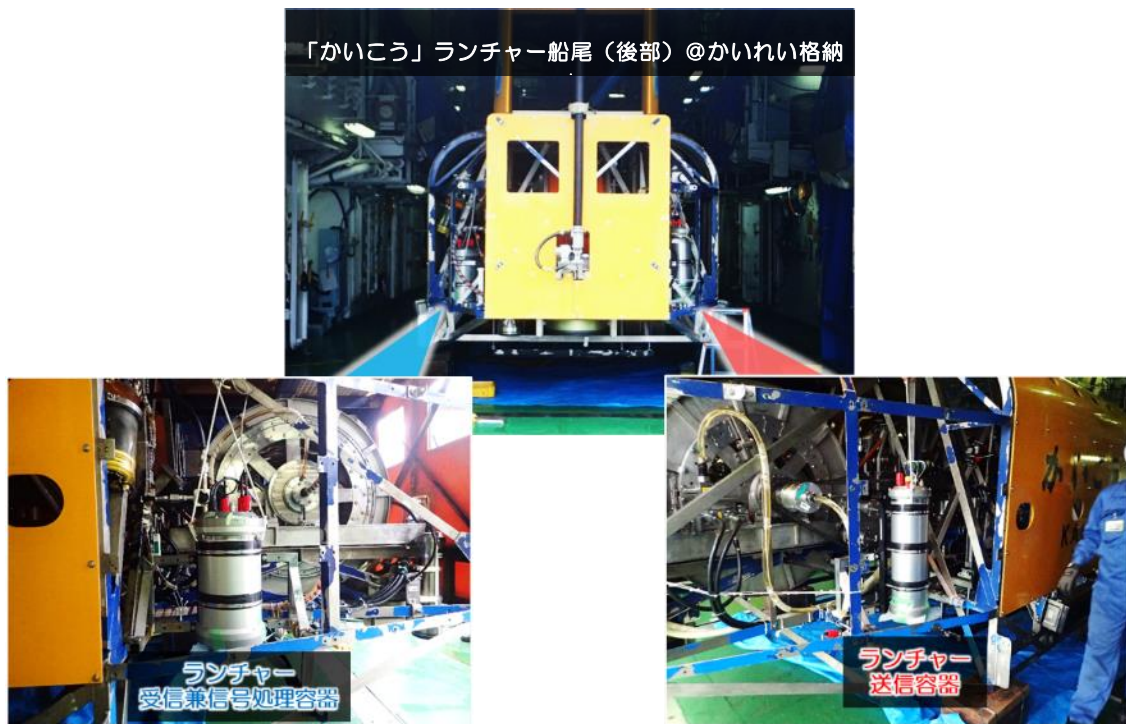


図 2-d-12 接続試験+機器搭載 | ランチャー搭載用機器 | (深海試験前事前作業)



図 2-d-13 接続試験+機器搭載 | ビーグル搭載用機器 | (深海試験前事前作業)

それぞれのプラットフォームに搭載し、他の周辺構造物（機体構成物）とのフィジカルコンタクトおよび設置安定性を確認した。併せて、「かいこう」潜航におけるランチャー／ビーグル離脱・嵌合時、および着水・揚収時の運用安全性を「かいこう」運航チーム、「かいいい」運航責任者にて確認した（図2-d-11-図2-d-13）。

e. <システム搭載コンフィギュレーション | 電源系統・信号系統>

深海試験において、「かいこう」ランチャーおよびビークルへの水中光ワイヤレス通信実証機を搭載するために、当該実証機の電源系統、信号系統のインターフェースを「かいこう」システム仕様と整合させ、コネクタピンアサインを含む水中コネクタ仕様を設計、構築した。図2-d-14、図2-d-15に深海試験における各プラットフォームへのシステム搭載コンフィギュレーション（結線図）を示す。

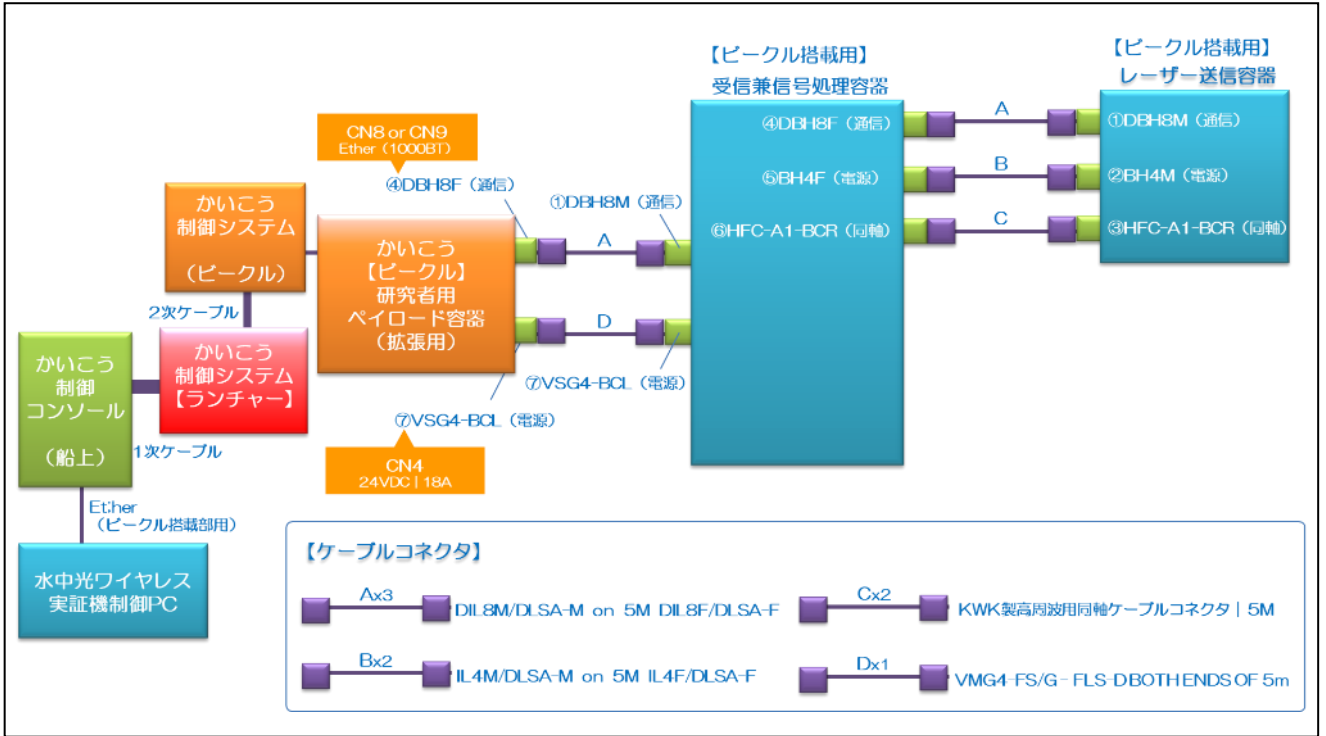


図 2-d-14 システム実装コンフィギュレーション（結線図 | ビークル実装仕様）

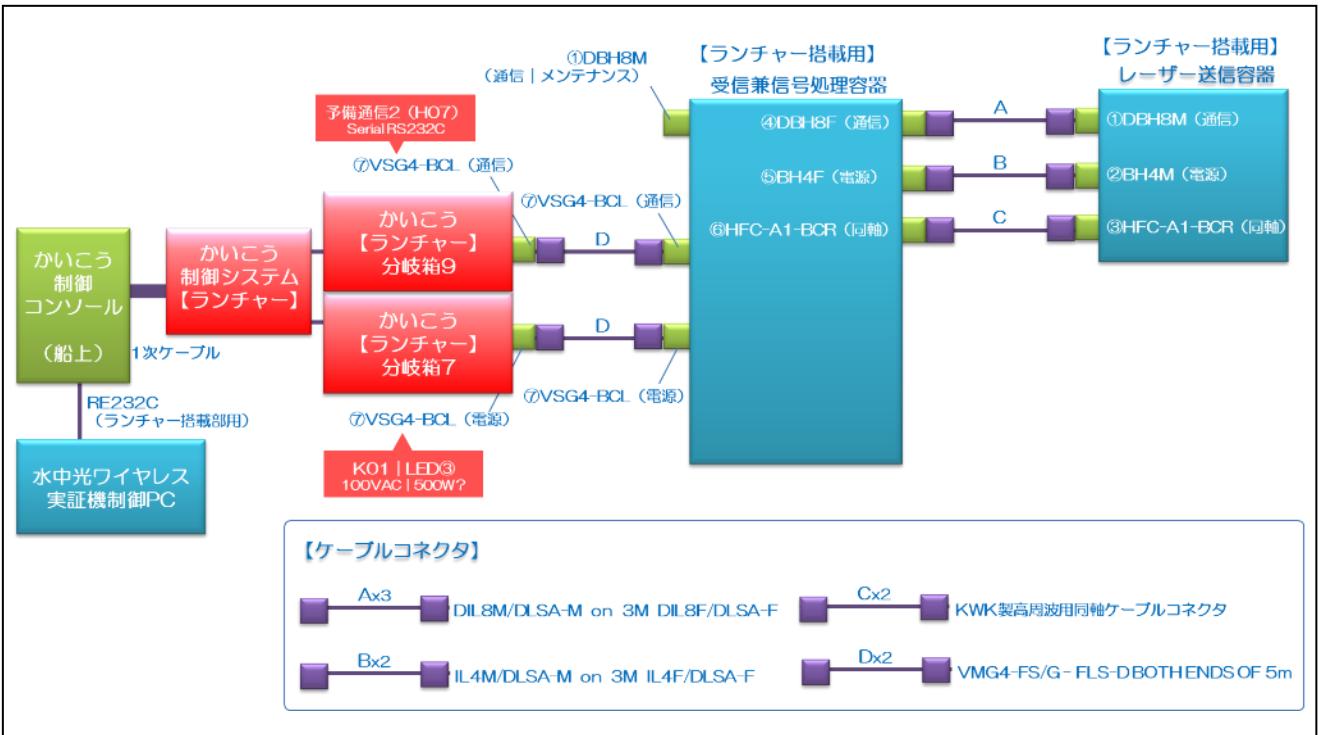


図 2-d-15 システム実装コンフィギュレーション（結線図 | ランチャー実装仕様）

当該実証機はレーザー送信容器とレーザー受信兼信号処理容器より構成されており、送受信機能（信号処機能含む）をランチャー／ビークルそれぞれのプラットフォームに搭載させることで双方向通信リンクを確立する。そのため、ランチャーおよびビークルへの搭載は基本的には同じシステム構成となるが、ペイロードに対するインターフェース仕様が各プラットフォームにより異なるため、これを整合させるようにコンフィギュレーションを整えた。一方、レーザー受信兼信号処理容器とレーザー送信容器間の仕様は、プラットフォームと連結箇所が無い同様となる。レーザー送信容器への信号処理用通信はEther通信プロトコルであり、これを許容する水中コネクタバルクヘッド「Subconn社製 | DBH8F」および同水中ケーブルコネクタ「Subconn社製 | DIL8M/DLSA-M--DIL8F/DLSA-F」を採用する。一方、信号系統には、信号インピーダンス：50Ω（要求仕様）を満足する水中同軸コネクタ「KWK | HFC-A1-BCR」および水中同軸ケーブルコネクタ「KWK社製 | HFC-A-CCP」を新規に製作し対応した。電源（給電）系統には「Subconn社製 | BH4F」および「Subconn社製 | IL4M/DLSA-M-IL 4M/DLSA-F」を採用している。

「かいこう」ランチャーとレーザー受信兼信号処理容器とを連結する系統には、ランチャー搭載の「分岐箱9」が提供する「予備通信1」用ポートを電源系統に、「予備通信2」ポートを信号系統に割り当て、両ポートとも「Seacon社製 | VSG4-BCL」を採用した。通常、「かいこう」ランチャーはペイロード用ポートを確保してなく、本試験専用既存の機器ポートの電力仕様から当該各ポートを割り当て、レーザー受信兼信号処理容器との連結用ポートとして利用している。「かいこう」ビークルとレーザー受信兼信号処理容器と連結する系統には、ビークル搭載の「研究者用ペイロード容器」が提供する「CN4 | 研究者用電源」用ポートを電源系統に、「CN8 | 1000BASE-T」ポートを信号系に割り当て、それぞれ「Seacon社製 | VSG-BCL」「Subconn社製 | DBH8F」を採用した。

f. <試験概要（実施計画） | 水中光ワイヤレス通信試験>

深海環境下において、水中光ワイヤレス通信実証機の性能および実用性を確認するとともに、1Gbps×100mのBL積を達成する通信リンクを確立させることを目的として、「かいこう」を適用した水中光ワイヤレス通信試験を実施した。本試験では、「かいこう」ランチャーおよびビークルそれぞれに光ワイヤレス通信装置を搭載し、ランチャー⇄ビークル間において光ワイヤレス通信リンク（以降、通信リンク）を確立することで、当該実証機が提供する通信精度・通信距離・通信速度が評価される。

本試験においては、「かいこう」ランチャーおよびビークルに搭載する水中光ワイヤレス通信実証機への電源系統および信号系統を「かいこう」システムと連結させ、「かいこう」制御コンソール（「かいいい」船上配置）を経由して当該実証機を船上より管制する。当該実証機はレーザー送信容器とレーザー受信兼信号処理容器より構成されており、両送受信セットがランチャー／ビークルにそれぞれ搭載されている。各プラットフォームにおいて送受信系を1対ずつ確立することでランチャー⇄ビークル間の双方向通信を実現する（図2-b-3参照）。この際、1Gbps×100mのBL積を達成する通信試験においては、ランチャー（送信）→ビークル（受信）間の520nm波長帯のグリーンレーザーを適用した片方向通信により評価する。

(ア)水中光ワイヤレス通信試験（ビークル下降中 | 図2-d-16)

「かいこう」潜航開始時、ランチャー及びビークルは連結しており、この状態で潜航していく。「かいこう」が目標深度付近（例えば目標深度から約100m以浅）まで到達すると、ランチャーからビークルを離脱させ、2次ケーブルを繰り出すことによりビークルが潜航（下降）を開始する。この際、ランチャーは可能な限りビークル離脱時の深度を保持する。本通信試験においては、ビークル離脱後、約20-30m下降した時点において、ランチャー⇄ビークル間の通信リンクの確立をさせ、可能な限り通信状態を保持しながらビークルを徐々に下降させていく。通信状態を保持するために、ビークルが10-20m程度下降する度に、当該実証機の調整（パラメータ調整・デ

ータ取得・伝送速度変更等)を実施する。要すれば、ビークルの挙動(方位、位置、姿勢)を適宜変化(制御)することでランチャー⇄ビークル間の光軸を合わせる。最終的に、ビークルがランチャー深度より100m以深(最大約120m)となるまで下降させ、要すれば上述の作業を繰り返し実施する。

【「かいこう」運動条件】

- ・ 下降速度(ビークル) : 5-10m/min
- ・ 目標深度(ランチャー) : 700-900m
- ・ 目標深度(ビークル) : 800-1000m
- ・ 調整作業 : 10-20m 下降する度に(試験状況による)
- ・ ビークル制御(下降中) : 方位保持(ランチャー挙動に応じて適宜調整)
- ・ ビークル制御(停止中) : 方位保持+定点保持(ランチャー挙動に応じて適宜調整)

整)

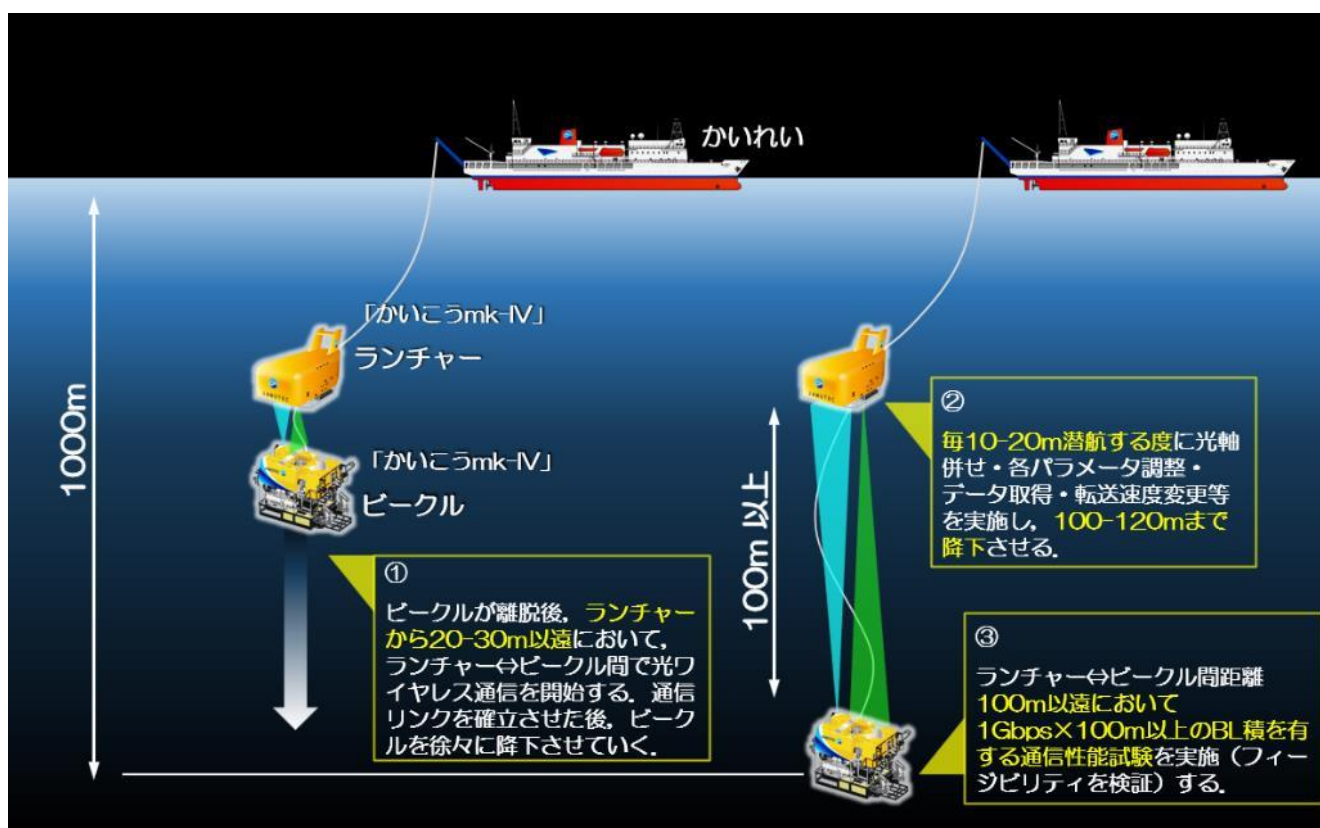


図 2-d-16 システム概要(水中光ワイヤレス通信試験 | ビークル下降中)

(イ) 水中光ワイヤレス通信試験(ビークル水平運動 | 図 2-d-17)

ビークル⇄ランチャー間の深度差が100m以遠となる地点までビークルを潜航させ、その地点でビークルの潜航を停止することで「1Gbps×100mのBL積」の達成を目指す通信試験を開始する。この際、下降時と同様に要すればビークル深度を保持したまま水平運動させ光軸合わせを実施する。光軸合わせにおいては、ランチャー搭載の下方カメラ(監視カメラ)の映像、ビークル搭載の上方監視カメラ、およびランチャーあるいはビークルに各搭載されている受信兼信号処理容器の内蔵カメラ、および各受信兼信号処理容器において検出される光受信強度の変化を目安にビークル動作を管制する。

【「かいこう」運動条件】

- ・ ビークル制御(停止中) : 方位保持+定点保持 (ランチャー挙動に応じて適宜調整)

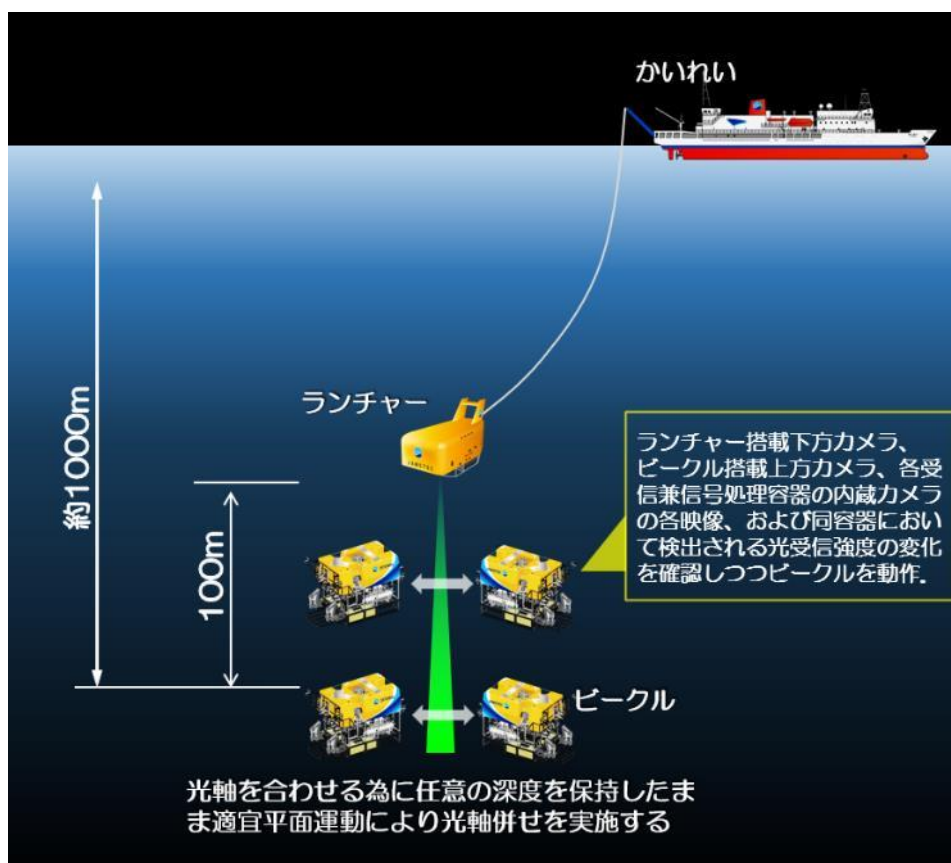


図 2-d-17 システム概要 (光ワイヤレス通信 | 下降中)

整)

- ・ 目標深度 (ランチャー) : 700-900m
- ・ 目標深度 (ビークル) : 800-1000m

(ウ) 水中光ワイヤレス通信試験 (ビークル上昇中)

基本的に、前述「(ア) 水中光ワイヤレス通信試験 (ビークル下降中)」と同様の作業を実施することで、ランチャー/ビークル間の通信リンクを確立させ、可能な限り通信状態を保持しながらビークルを徐々に上昇させていく。通信状態を保持するために、ビークルが 10-20m 程度上昇する度に、当該実証機の各調整 (パラメータ調整・データ取得・伝送速度変更等) を実施する。

【「かいこう」運動条件】

- ・ 上昇速度 (ビークル) : 5-10m/min
- ・ 調整作業 : 10-20m 上昇する度に (※試験状況による)
- ・ ビークル制御 (上昇中) : 方位保持 (ランチャー挙動に応じて適宜調整)
- ・ ビークル制御 (停止中) : 方位保持+定点保持 (ランチャー挙動に応じて適宜調整)

整)

(エ) 光ワイヤレス試験時 | 共通条件等

上記 (ア) - (ウ) においては、下記を共通の前提条件として試験を実施する。

- ビークル最大潜航深度 : 1000m (※光ワイヤレス通信装置の設計耐圧による)
- ランチャー最大潜航深度 : 800-900m (※ビークル最大潜航深度による)

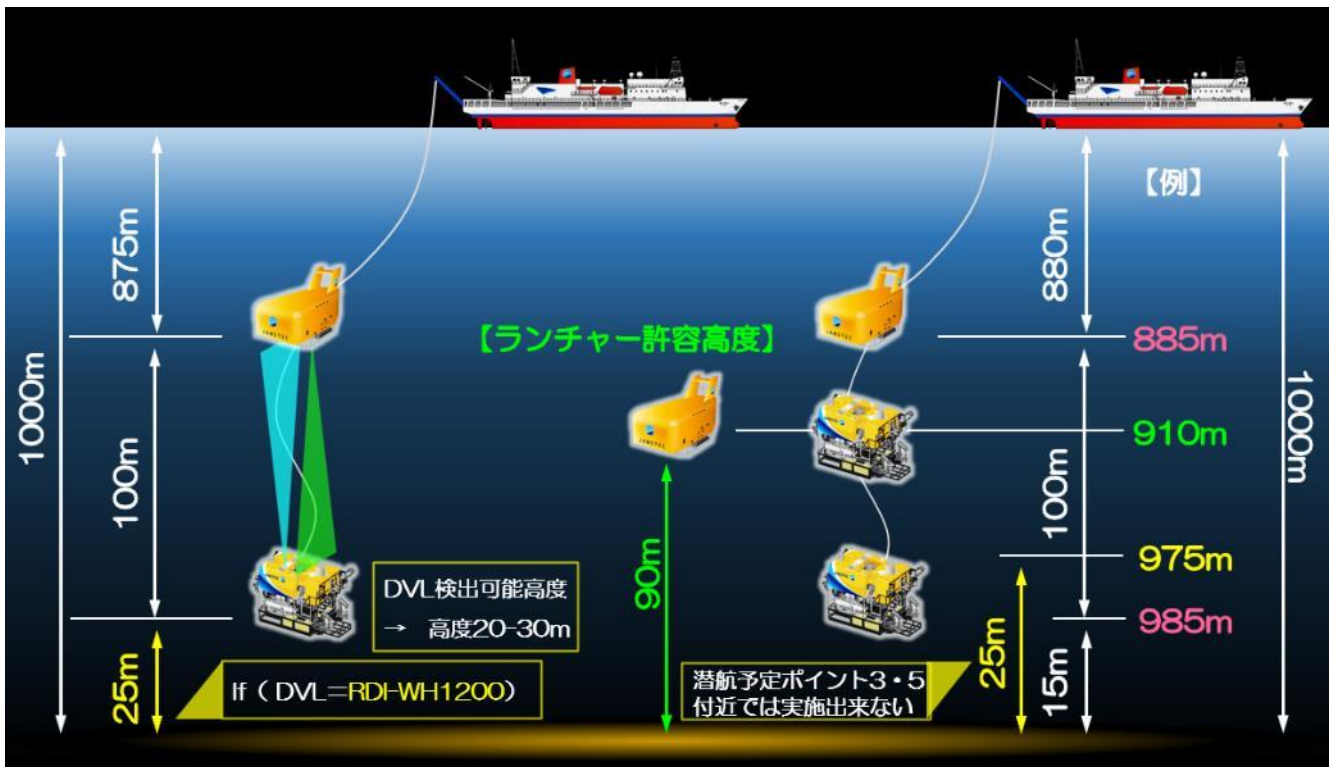


図 2-d-18 潜航計画（試験要領 | 水中光ワイヤレス通信試験）

- ビークル⇄ランチャー間距離 : 100m 以上（※光ワイヤレス通信装置性能による）
- ビークル高度 : 20-30m（※DVL の対地速度検出性能による）
- 試験海域最大水深 : 約 1100m（※上記条件による）

これら共通条件を満足する潜航計画例を図 2-d-18 に示す。水深 1,000m 海域において本試験を実施する場合、ホバリングを含めた良好なビークル運動性能を確保するために、DVL 対地速度が検出可能な高度まで海底に接近することが求められる。そこでビークル高度を 15m（深度 985m）とし、その状態において 100m 以上のランチャー／ビークル間距離（通信距離）を確保することを考え、ランチャー深度 885m（高度 115m）において本試験を開始する（ランチャーからビークルを離脱する）。ここでランチャー運用規定における最低高度は 90m である。この条件においてランチャーからビークルを離脱させ、深度 985m まで降下させることでランチャー／ビークル間距離 100m が確保され、その際に実施し得る通信試験において 1Gbps 通信速度を達成（1Gbps 相当の通信用データフレームの受信を確認）することで、1Gbps×100m の BL 積を有する水中光ワイヤレス通信の成功を目指す。

g. <試験実施手順（オペレーション方法） | 水中光ワイヤレス通信試験>

前項記載の通り、「かいこう」ランチャーからビークルを離脱させ、ランチャー／ビークル間が 20-30m 程度離れた状態から出来るだけ早急に光軸を合わせ、以降、10-20m 程度潜航（下降）する毎に、水中光ワイヤレス通信実証機の各調整（パラメータ調整・データ取得・伝送速度変更等）およびデータ取得を実施する。当該実証機には自動での光軸合わせ機能は備えていないため、本試験系のプラットフォームとして唯一機動力を有する「かいこう」ビークルの挙動により光軸合わせを実施する必要がある。そこで、ランチャーからの音響測位位置、およびランチャー下方カメラ、ビークル搭載の受信兼信号処理容器に内蔵される監視カメラ、さらにビークル搭載の上方カメラ（後方監視カメラを上方監視用に配置）の各映像を確認しながら、都度、光軸のズレを補正するようにビークル挙動を管制する。1Gbps×100m 通信に関しては、ランチャーから送信光をビークルに受信する片方向通信にて評価するため、特にビークルに搭載されている各カ

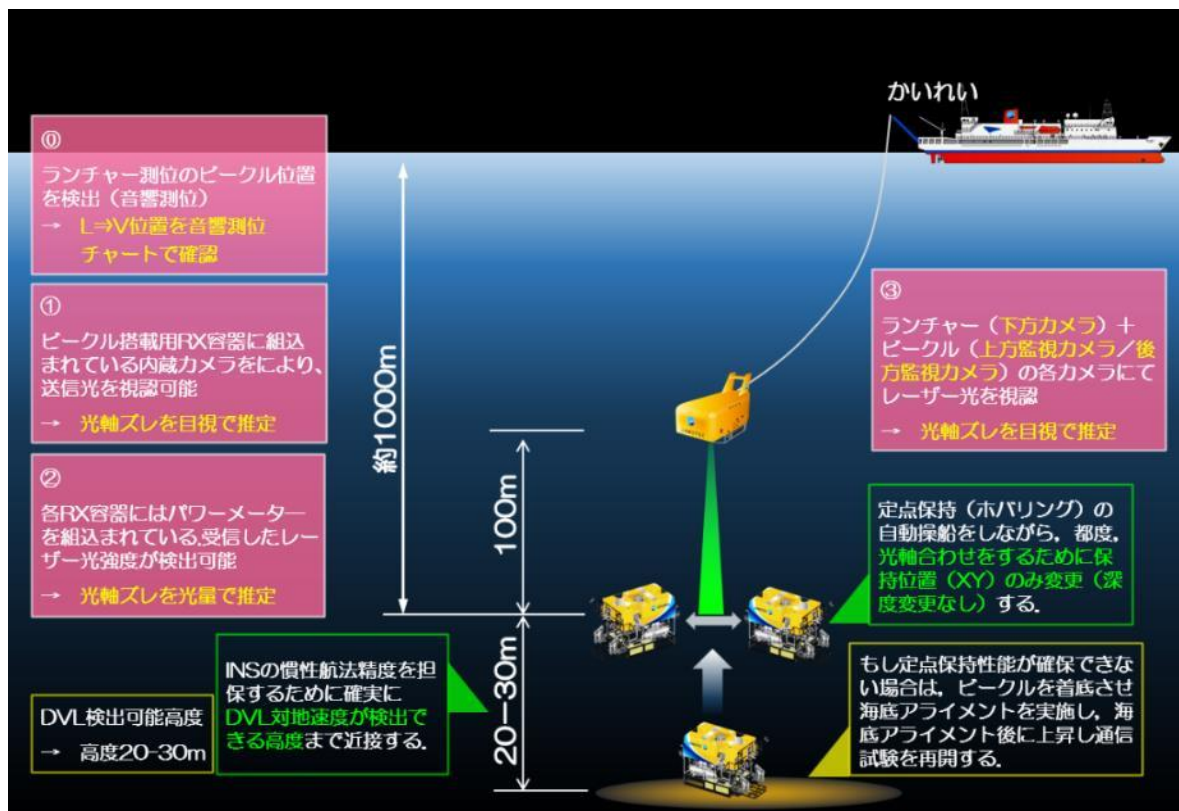
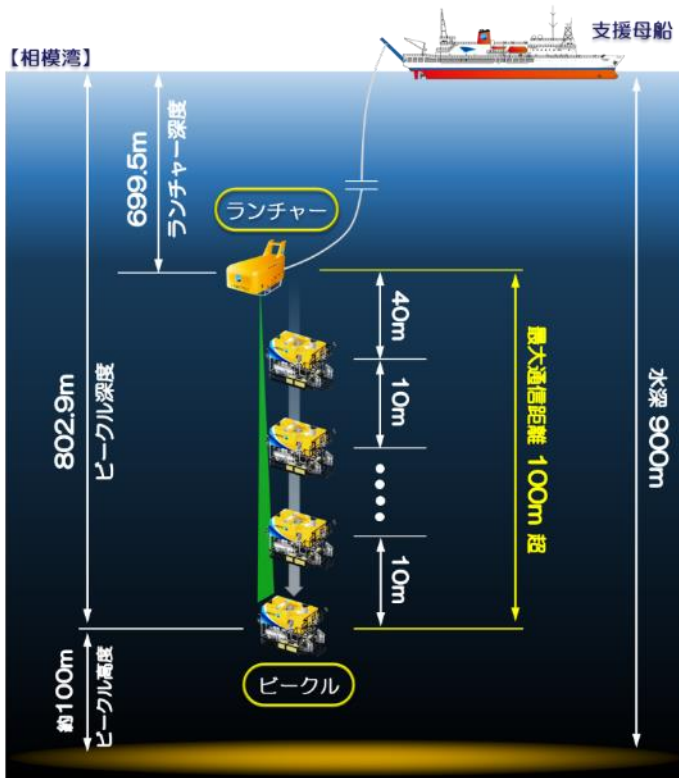


図 2-d-19 オペレーション方法（光軸合わせ | 水中光ワイヤレス通信試験）

メラ映像の監視が重要となる。図 2-d-19 に光軸合わせに関するオペレーション方法について図示する。この際、もし定点保持や水平動作等のビークル運動性能が確保できない場合は、ビークルを一度着底させ海底アライメントを実施することで、慣性航法装置の性能（DVL 複合航法性能）を担保し、海底アライメント後に再度上昇して通信試験を再開する。

ブイクル搭載カメラの画角にレーザー光が捕捉できない状況下においては、特にランチャーからのブイクル音響測位を頼りに、ブイクル位置をランチャー直下となるように管制させる。併せて、ブイクル搭載の受信兼信号処理容器に内蔵されるパワーメータ（光強度検出）の出力を確認しながら、光強度が増加する方向にブイクルを誘導させる。その結果、ブイクル搭載の各カメラにてレーザー光軸が視認される状況になった場合、当該各映像において、レーザー光が直線的な光線として視認されるのではな

く、点光源として視認されるようにブイクルの水平位置を調整させる（図 2-3-20）。ブイクル搭載のカメラ映像として、ランチャーから照射されるレーザー光が光線ではなく点光源に近づくにつれ、送受の光軸状態が良好になったことを意味する。



h. <試験結果 | 水中光ワイヤレス通信試験>

2021年11月27日-29日（3日間）において、「かいこう」に水中光ワイヤレス通信実証機を搭載し（図 2-3-21）、相模湾西方の海域にて通信試験を実施した。「かいこう」ランチャーから 1Gbps に変調したパルスレーザー光（1Gbps 試験フレーム）を送信し、ブイクルにて受信することで通信性能を評価した。

図 2-d-22 試験環境（水中光ワイヤレス通信試験）

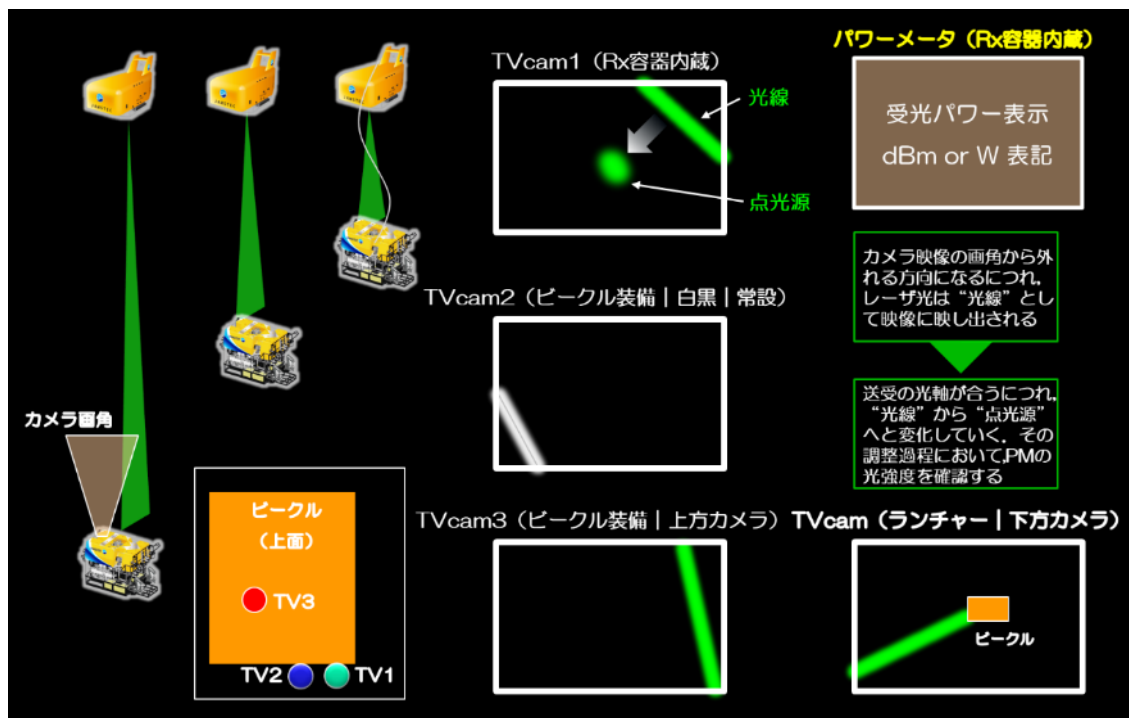


図 2-d-20 カメラ映像による光軸合わせ概要（水中光ワイヤレス通信試験）

本試験では相模湾の水深約 900m の海域において、ランチャー深度約 700m からビークルを離脱→降下させ、ランチャー/ビークル間距離（通信距離）を 10m 毎段階的に離していった。この際、1Gbps 試験フレームの受信成否（誤りのない試験フレームの受信数）を確認するとともに、受光強度および伝搬場の環境パラメータを計測した（図 2-d-22）。ビークルがランチャーから離脱した当初は、各容器の配置位置、および 2 次ケーブルで連結されたビークルの運動性能から、光軸を合わせることが非常に困難であるため、ビークルがランチャー離脱より約 40m 降下した地点より光軸合わせを試み、以降、10m 毎に通信試験を繰り返し実施した。この際、ビークルの運動制御は良好に実施された。



図 2-d-21 「かいこう」搭載状態 | 水中光ワイヤレス通信実証機

通信距離が伸長されるに連れ当該レーザー光は、海水を構成する諸成分により拡散・吸収（減衰）されていくため、1Gbps 試験フレームの品質を損なうことなく長距離を伝搬させることは困難となる（図 2-d-23）。ビークルに搭載されている受信兼信号処理容器にはカメラが内蔵されており、光軸合わせが良好な状態においては、ランチャーから照射された送信光（520nm | Green 波長帯レーザー光）が視認可能である。

本試験では、各プラットフォームおよび当該実証機に内蔵のカメラ映像、パワーメータ出力（光強度）等を船上の制御コンソールにて視認しながら、「かいこう」ビークルの挙動を適切に制御することで光軸合わせを試み（図 2-d-24）、100m 超の通信距離においても 1Gbps 試験フレームが良好に受信されることが確認された（水深 900m、ランチャー深度約 699.5m、ビークル深度 802.9m）。ランチャー／ビークル間の距離（通信距離）が伸長するにつれ送信光は減衰しカメラ映像からでは視認することも困難となる

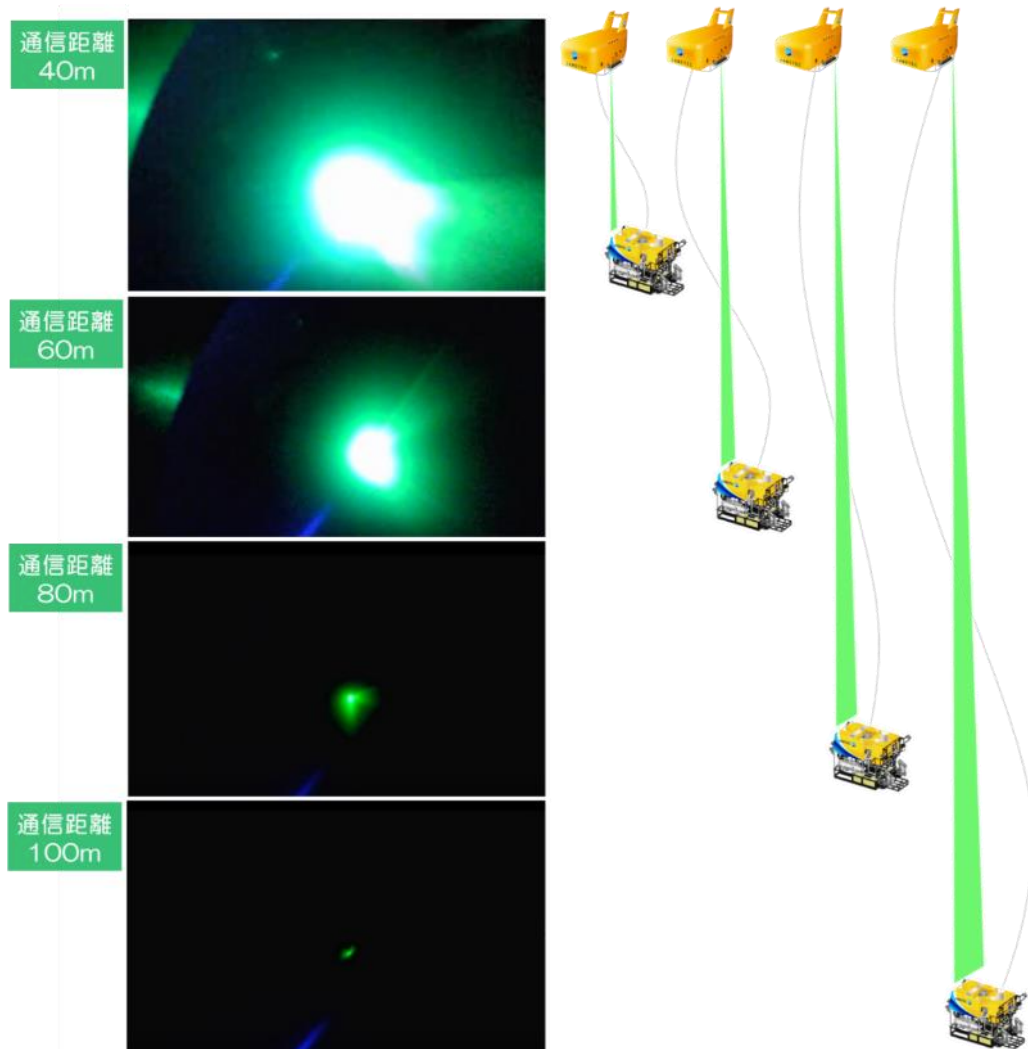


図 2-d-23 ランチャーから照射されるレーザー光をビークル搭載カメラより撮影した映像
（ビークル搭載・受信兼信号処理容器内蔵のカメラより撮影）

が、アレイ化した高感度の PMT を組込むことにより、微小な送信光を確実に捕捉し、これを正確に復調させることに成功した。本成果は実海域において 1Gbps×100m の海中光ワイヤレス通信が技術的に確立したことを意味しており、世界的にも類のない成果となった。高出力 1Gbps の送信系をマルチビーム化することで海中伝搬場における通信レベルとビーム有効径を保証し、高感度な PMT をアレイ配置した受信系により受光効率の大幅向上が図られた。本試験結果により、伝搬場の環境に応じてレーザー光の送受を適切に制御することで、海中においても地上と同レベルの高速通信ネットワークが非接触（ワイヤレス）で実現できることが証明された。

画面左下から延びる緑色のラインがランチャーから照射される送信光（Green レーザー光）



【下方カメラ映像 | ランチャー装備】
ビーグルがランチャーから離れ徐々に潜航していく様子

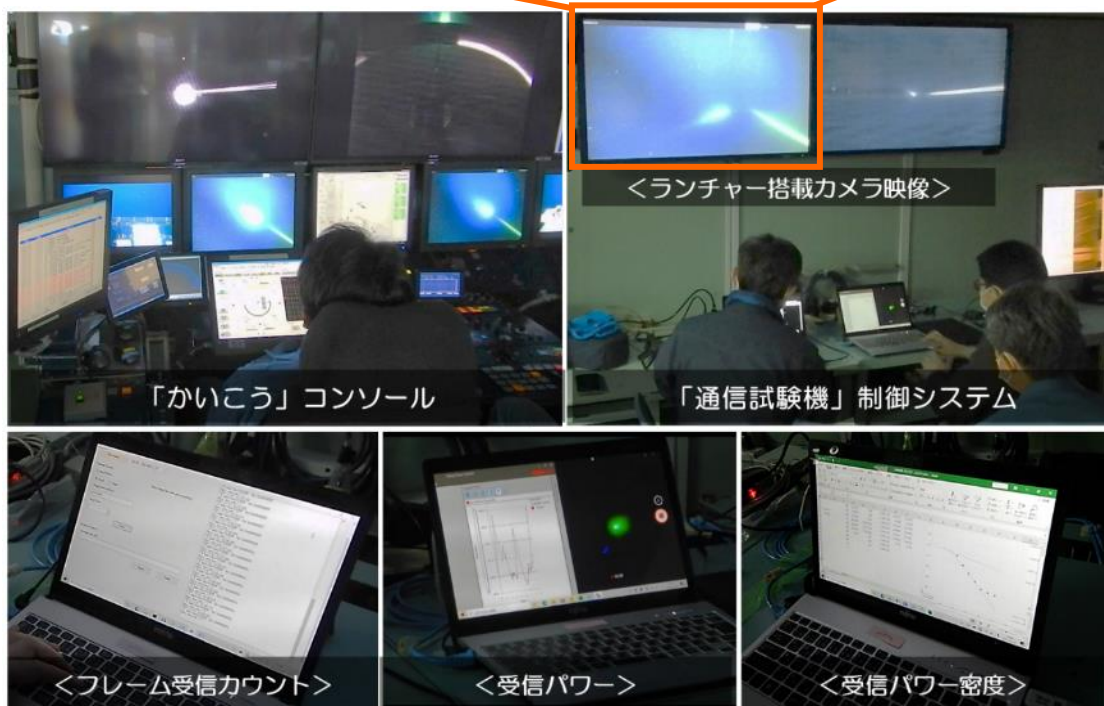


図 2-d-24 水中光ワイヤレス通信試験の様子 / 「かいいい」船上
（「かいこう」制御コンソール | 水中光ワイヤレス通信実証機制御 PC）

（ウ） データ分析（トリマティス）（（2）d.（ウ））

通信実験の実施により 1Gbps×100m の BL 積の達成が確認された。ここでは、伝送限界式を用いて伝送速度をパラメータに伝送可能距離を評価する。水中光ワイヤレス通信における光伝搬の総損失は、これまでの実験から、主に水中の光の伝搬損失、ビーム径の拡大による損失が主な要因となると考えられ、下記の伝送評価式で表される。

$$\text{総損失 [dB]} = \text{光の伝搬損失 [dB]} \times \text{距離 [m]} + \text{ビーム拡大による損失 [dB]} \quad (\text{但し } \Phi_1 > \Phi_2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \text{光の伝搬損失 [dB]} &= \text{単位距離当たりの伝搬損失 [dB/m]} \times \text{距離 [m]} \\ \text{ビーム拡大による損失 [dB]} &= \text{有効受光径}^2 / \text{ビーム面積} \\ &= 10 \times \text{LOG}_{10} \left(\frac{\pi (\Phi_2/2)^2}{\pi (\Phi_1/2)^2} \right) \\ &= 20 \times \text{LOG}_{10} (\Phi_2 / \Phi_1) \end{aligned}$$

$$\text{ビーム面積} \propto \pi (\Phi_1/2)^2$$

$$\text{有効受光面積} \propto \pi (\Phi_2/2)^2$$

Φ_1 : ビーム径 (直径), Φ_2 : 有効受光径 (直径)

とした。伝搬損失 0.2dB/m、ビーム放射角 0.005rad (深海試験で用いた光送信器の 100m でのビーム径約 50cm から求めた)、有効受光径 5cm の伝送距離と損失の関係を図 2-d-25 に示す。

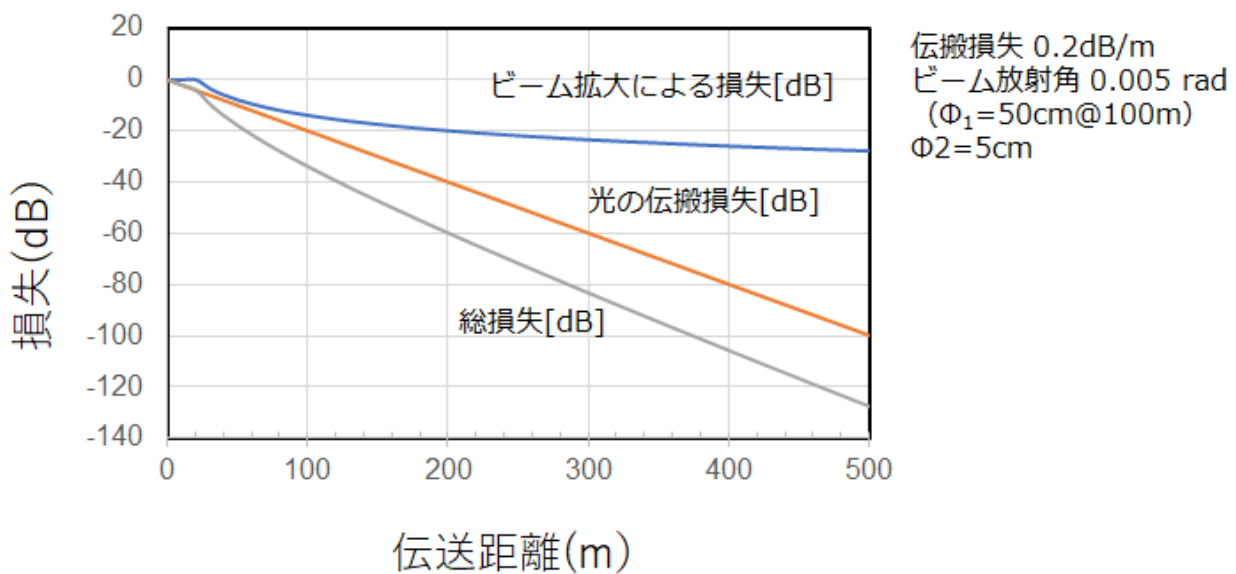


図 2-d-25 伝送距離と損失の関係

図から分かるように、伝送距離が短いとビーム拡大による損失の影響が大きいが、距離が長くなると、光の伝搬損失の影響が支配的になることがわかる。

次に、深海試験でパケット受信が可能であった距離での損失を、伝搬損失をパラメータとした伝送評価式による損失曲線上にプロットした。これを図 2-d-26 に示す。図からわかるように、ほぼ伝搬損失 0.3dB/m~0.4dB/m の損失曲線の間を取得した損失データが分布していることから、試験時の伝搬損失が 0.3dB/m~0.4dB/m 程度であったと推測することができる。

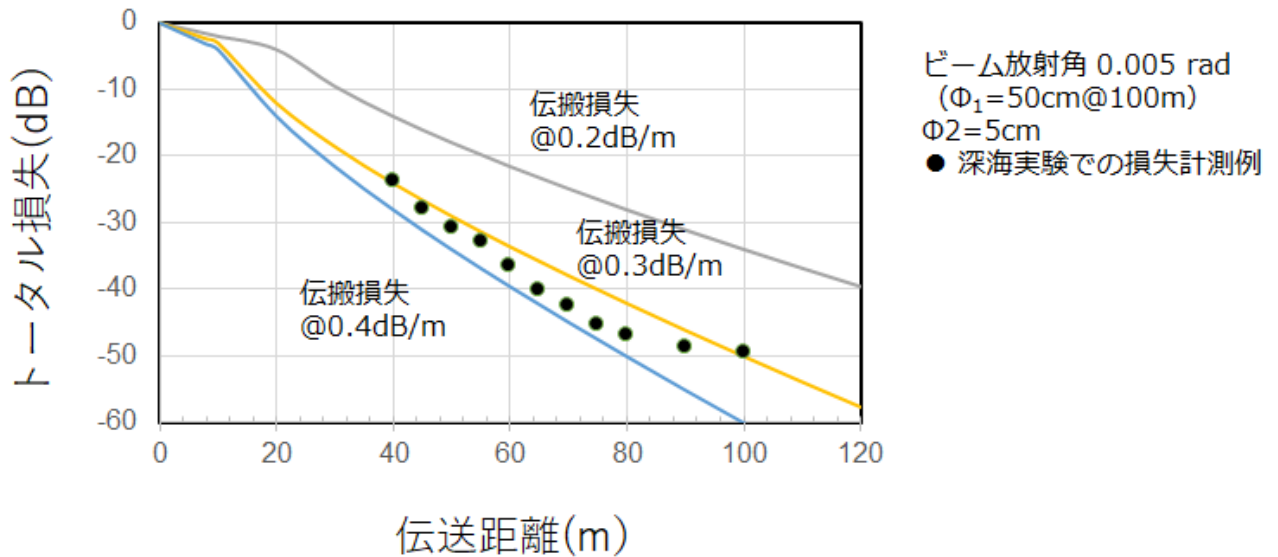


図 2-d-26 伝送限界式による損失曲線と深海試験で取得した損失データの比較

受信回路の帰還抵抗値をパラメータとした PMT、及び APD の受信感度の理論曲線を図 2-d-27 に示す。図 2-d-27 の PMT のビットレート毎の受信感度と、伝送評価式による損失曲線を用いて各ビットレートの伝送距離限界を評価した。その結果を図 2-d-28 に示す。

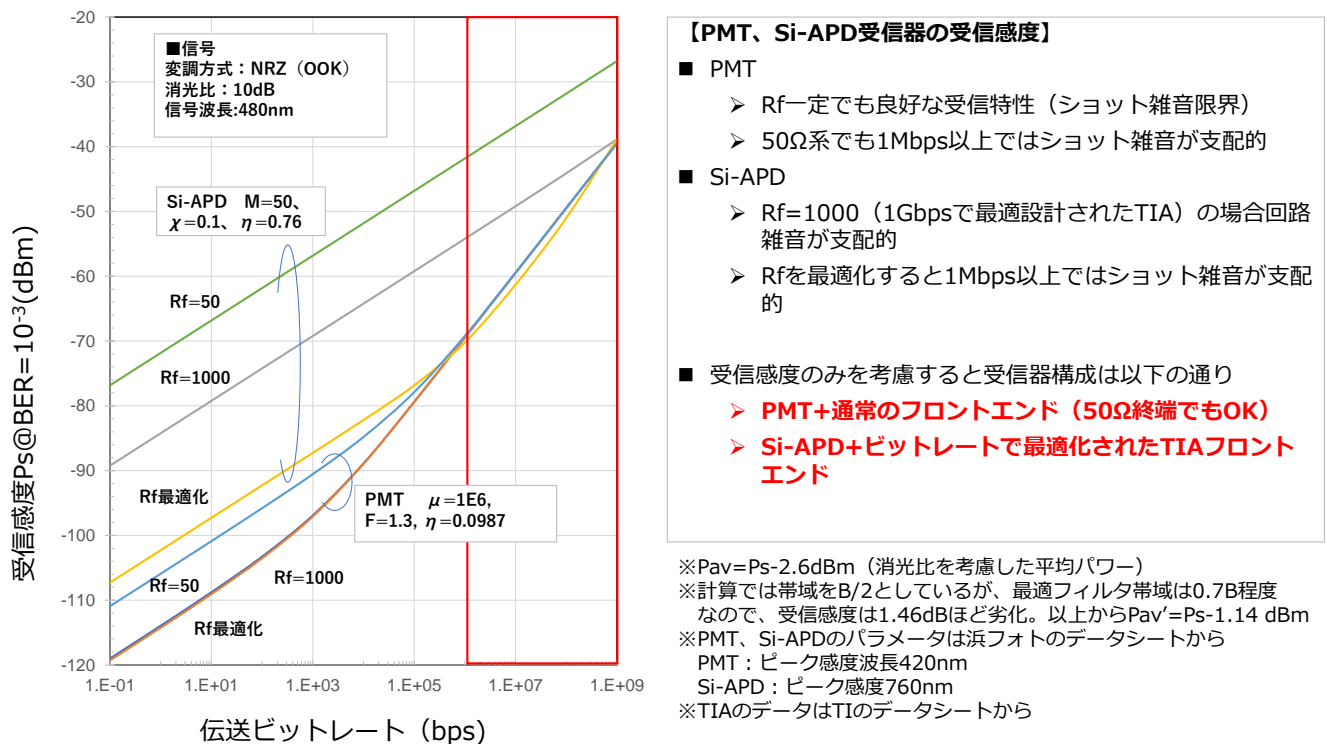


図 2-d-27 PMT、及び APD の受信感度

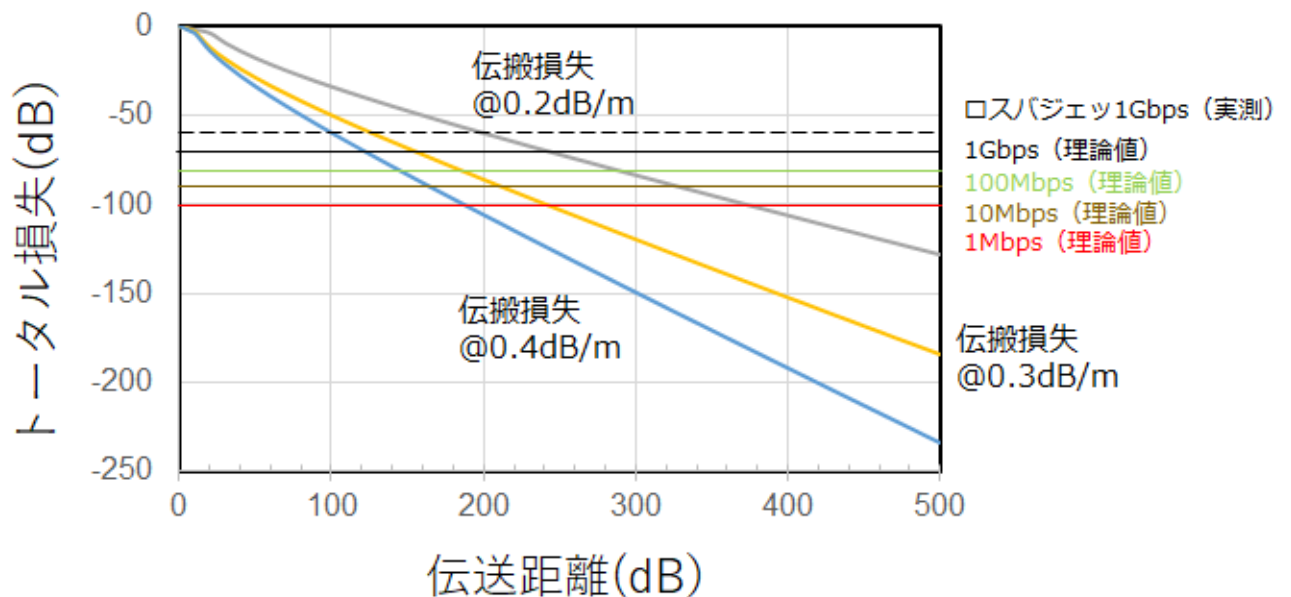


図 2-d-28 PMT のビットレート毎の受信感度と、伝送評価式による損失曲線

ビーム放射角 0.005 rad ($\Phi 1=50\text{cm}@100\text{m}$)、 $\Phi 2=5\text{cm}$ の条件で、実測値のロスバジェットから、伝送速度 1Gbps の伝送距離は、伝搬損失 0.4dB/m でも 100m 以上伝送可能と見積もられる。一方、理論計算により求めた PMT の受信感度に基づくロスバジェットでは、伝搬損失 0.2dB/m の条件であれば 1Gbps で 140m 程度、100Mbps で 280m 程度、10Mbps で 330m 程度、1Mbps で 380m 程度の伝送が可能であると見積もられた。

さらなる伝送距離の拡大にはロスバジェットの増大が不可欠であるが、本研究で提案したマルチビーム化により送信パワーの増大、受光径の拡大によるビーム拡大が有効であると考えている。

(3) プロジェクトの総合的推進 (トリマティス)

2019 年 1 月までは、対面での進捗会議、アドバイザリーボードの開催を行っていたが、2 月後半からは、情勢の変化により対面によるアドバイザリーボード、進捗会議の開催を見合わせた。一方、分担研究者間では、電話、メール等での連絡を随時行うことにより計画通り研究を進めた。コロナ禍において、その終息が見えない中、担当者が集まって進捗会議を行うことのリスクが顕在化したため、オンライン会議による進捗会議に移行した。オンライン会議は、集合会議に比べ、意思疎通が円滑に行えないが、それを補うため会議の頻度を増やし、確認漏れがないように留意した。以上により、再委託先を含めた担当者間で、迅速に課題を共有し、課題解決を行うことのできたので、プロジェクトを円滑にすすめることができた。

また JAMSTEC のプール施設での実験や、備船を用いた深海試験においてはコロナ対策をしっかりと行った上で、実施することで目標を達成することができた。

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

当初予定していなかった相模湾沖水深 900m での水中光ワイヤレス通信実験を実施、実験において $1\text{Gbps} \times 100\text{m}$ の BL 積を達成し、本研究の目標を達成した。また JAMSTEC のプール施設での通信実験において 1Gbps 、 108m の通信を達成した。

また本研究で用いる光送信器の開発において、市販のものに比べ10倍の変調電流でLDの変調が可能なLDドライバを開発した。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

光送信器のマルチビーム化、PMTのマルチ化による水中光ワイヤレス通信装置を開発することで、水中に高速ネットワークを構築できる可能性を示すことが出来た。今後、本研究開発を基に、水中のデータをリアルタイムで地上のネットワークに転送し、水中データの利用が可能な水中ネットワークの実現を目指し、研究開発を進めて行く予定である。

また、本研究開発の光送信器の開発において、市販のものに比べ10倍の変調電流でLDの変調が可能なLDドライバを開発した。今後の高速変調可能なLDドライバの開発、これを用いた通信装置の発展に寄与することができた。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

ALANコンソーシアムの活動を通じた研究成果の発信、学会の水中光関連技術のシンポジウムでの発表を積極的に実施。

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

2019年1月までは、対面での進捗会議、アドバイザリーボードの開催を行っていたが、2月後半からは、情勢の変化により対面によるアドバイザリーボード、進捗会議の開催を見合わせた。一方、分担研究者間では、電話、メール等での連絡を随時行うことにより計画通り研究を進めた。コロナ禍において、その終息が見えない中、担当者が集まって進捗会議を行うことのリスクが顕在化したため、オンライン会議による進捗会議に移行した。オンライン会議は、集合会議に比べ、意思疎通が円滑に行えないが、それを補うため会議の頻度を増やし、確認漏れがないように留意した。以上により、再委託先を含めた担当者間で、迅速に課題を共有し、課題解決を行うことのできたので、プロジェクトを円滑にすすめることができた。

またJAMSTECのプール施設での実験や、備船を用いた深海試験においてはコロナ対策をしっかりと行った上で、実施することで目標を達成することができた。

5. 2 経費の効率的執行

特になし

6. まとめ、今後の予定

疑似理想環境において、BL積 $100 \text{ Gbps} \cdot \text{m}$ ($1 \text{ Gbps} \times 100 \text{ m}$) を達成できる水中光ワイヤレス通信システムの実現を目指し研究開発を行った。

まず海中の背景パラメータや送受信パラメータの違いにより、伝搬中に光が受ける影響の計測ができる光計測装置の開発を行い、水中伝搬距離3.65m、7.3mの光計測試験を実施し波形データを取得した。また海中計測試験の背景パラメータの抽出、背景パラメータ取得に必要な測定器、及びデータ取得のための測定治具を開発した。

水中での光の伝搬特性を把握するため、水道水、水道水に海水抽出成分を混ぜた疑似海水、汲み上げ海水を充填したパイプ水槽を用いて光伝搬実験を行った。これらの実験では、成分の違いから顕著な伝搬特性の違いがみられなかったことから、散乱なども損失へ影響すると仮定し、所

要ダイナミックレンジは伝搬損失×100m（理想環境である深海で0.2dB/m×100m= 20dB）とし、それを基本に、未確認の伝搬ペナルティやビームの広がりによる受光損失に備え、30 dB以上のマージンを積み通信装置のロスバジェット設計を行った。ゆらぎによるパワー変動、受光外れについては、通信断等の通信品質に係る影響であるため、ダイナミックレンジの拡大とは別とし、誤り訂正やマルチビーム化、受光径の拡大（もしくはビーム径の拡大）により確率統計的に抑制できると考え、これらを反映した水中光ワイヤレス通信方式の検討を行った。

また、深海試験に向けて、通信装置を収容する光入射出用ビューポートを備えた耐水深度1000mの耐圧容器の試作を行った。これにより500m以深から水深1000mまでの実海水域での通信実験を可能とした。また、通信方式の検討結果を基に、伝送速度1 Gbpsで50dB以上のロスバジェット（設計値60dB、受信感度-30dBm以下、平均光出力30 dBm以上）を有する水中光ワイヤレス通信実証装置の試作を行った。これにより深海での水中光ワイヤレス通信実験に必要なロスバジェット20dBに対して最大30dB以上のマージンを達成した。

本実証装置を用いて、相模湾沖水深900mの深海で通信実験を行うことにより、目標である1Gbps×100mのBL積を達成した。また、JAMSTECのプール施設においても1Gbps、108mの通信実験に成功しており、本装置による水中光ワイヤレス通信の有用性を確認することができた。また、光伝搬実験や通信実験のデータを基に、伝送評価式を導出し、PMTの理論受信感度を用いてビットレート毎に伝送限界を評価した。

今後、本研究を基に、水中光ワイヤレス通信装置の開発を進めると共に、水中のデータをリアルタイムで地上のネットワークに転送し、水中データの利用が可能な水中ネットワークの実現を目指し、研究開発を進めて行く予定である。

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
学術論文	該当なし
学会発表	5件
展示・講演	該当なし
雑誌・図書	該当なし
プレス	2件
その他	該当なし

(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