

海洋石油・天然ガスに係る日本財団 – Deep Star 連携技術開発助成プログラム

「海底での光通信無線技術の開発」 完了報告書

事業 ID 2019526618

事業名 海底での光通信無線技術の開発

事業者名 島津製作所

報告日 2021年12月1日

1. 事業内容

高輝度半導体レーザーを用いた水中 Li-Fi 技術の研究開発として、無線ロボットが海底設備の点検を行う為に必要な通信範囲・通信速度が実現できる「水中通信基地局」システムの産業用プロトタイプ製作を行う。

2. 事業の目的

無線 ROV による海底設備点検を実現することで、水中ロボットの母船の小型化・省力化、およびリアルタイムカメラビューによるオペレーション時間の削減が見込めることから、海底設備点検コストを現状より大幅に削減することができる。

3. 事業目標

第 1 期（2019 年度）では、高輝度半導体レーザーを用いた全周囲型光無線通信モジュールを開発、水槽試験を実施、全周囲のみならず、任意の通信エリアのレイアウトが可能であることが検証できた。

第 2 期（2020 年度～2021 年度）では、第 1 期で検証した技術の社会実装に向けた、「水中通信基地局」システムの産業用プロトタイプを開発することを目標とし、1.すべてのコンポーネントの水中化開発、2.可視光帯域専用の水中コネクタの開発、2.ROV の照明光などの外乱光に対する耐ノイズ機能の開発、4.光学部品の長期海中暴露試験による耐環境性評価、最終成果として、5.実海域における実証試験を行うことを目標とする。5.においては、より実運用に近い評価を行うため無線 ROV の開発も行う。

4. 事業期間と事業費（1 年目）

事業期間	: 2020年6月1日～2021年11月30日 (事業期間は、当初2020年6月1日～2021年5月31日から変更済み)
総事業費	: 54,640,000 円 (うち助成金額 43,710,000 円)
開発線表	: 図 4-1

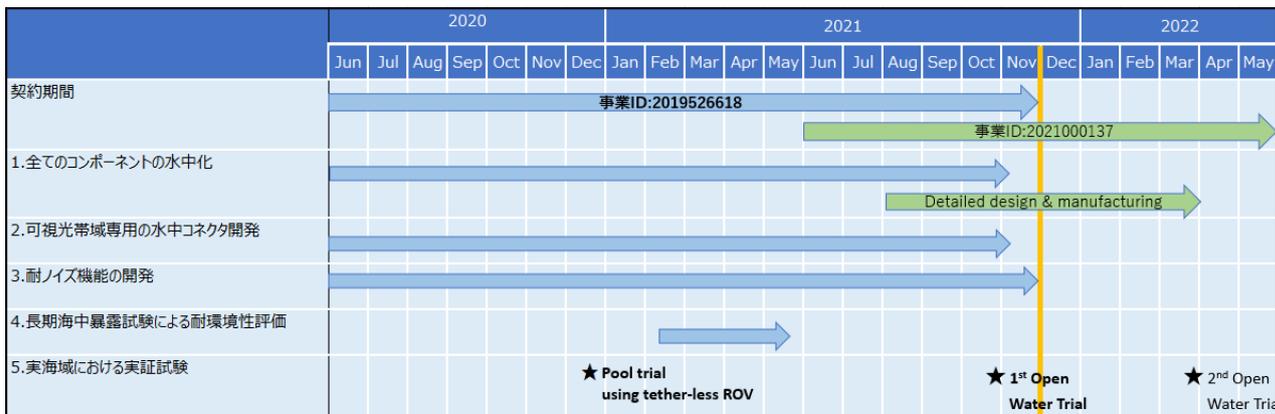


図 4-1 開発線表

5. 事業成果（概要）

事業期間が6か月延長となったが、第2期1年目で完了すべき項目を全て開発完了し目標達成した。概要を下表に、詳細を4頁以降に述べる。

項番	開発目標	開発結果
1	すべてのコンポーネントの水中化	発熱とノイズの大きい Emitter Module と、微細な信号を処理するその他の部分は別々の耐水圧筐体に入れる構造とする。また Deepstar との調整により、受発光の光ファイバをドーム状に配置し、一体化して海中に installation する構造とする。
2	可視光帯域専用の水中コネクタ開発	出力部においては「光ファイバを筐体に貫通させる構造」、入力部においては「複数の光ファイバを複数バンドルして耐水圧窓を経由して受光する構造」の試作品を製造し、耐水圧性、性能の評価を行い、良好な結果を得た。
3	耐ノイズ機能の開発	ROV の照明光などの外乱光に対する耐ノイズ機能として、2案の構想検討を行った。
4	長期海中暴露試験による耐環境性評価	2021年2月～2021年5月に光学部品の海中暴露試験を実施し、POF、石英とも光の透過率低下等の光学特性の劣化は発生しないことを確認した。
5	実海域における実証試験	2020/12 JAMSTEC ダイバープール 無線 ROV との通信試験を実施 2021/09 福島ロボットテストフィールド 実海域前の予備試験 2021/10 長崎沖 実海域での性能測定及び無線 ROV との通信試験を実施

6. 今後の事業計画

本事業 ID : 2019526618 で得られた成果は、事業 ID : 2021000137 に引き継がれる（図 4-1 の線表参照）。ここで、「水中通信基地局」システムの産業用プロトタイプの詳細設計、製造を行い、2022 年 2 月には水槽にて、2022 年 3 月には実海域においてその性能評価を行う計画である。試験結果を元に、実フィールドでの運用課題の抽出を行う。

事業期間と事業費（2 年目） 事業 ID : 2021000137

事業期間 : 2021 年 6 月 1 日～2022 年 5 月 31 日

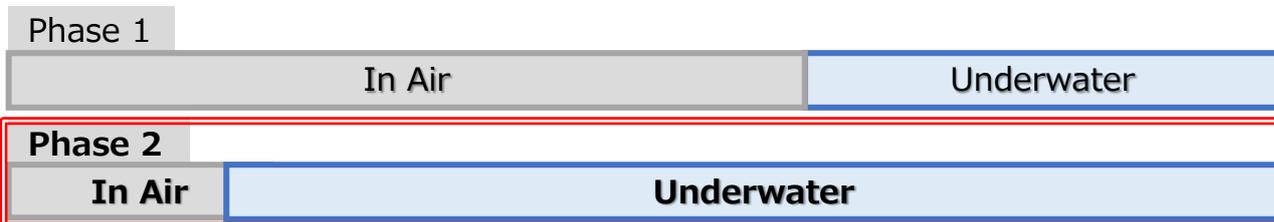
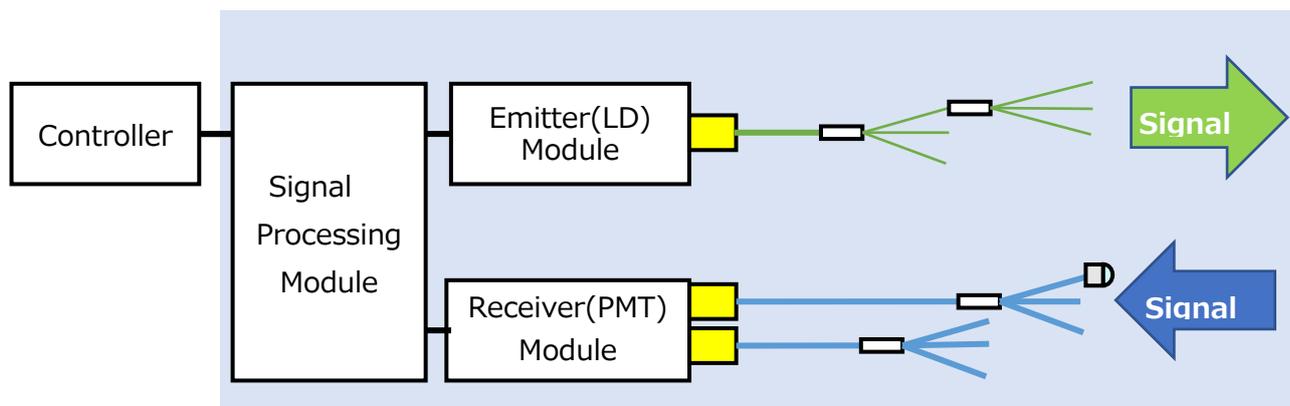
総事業費 : 69,090,000 円（うち助成金額 55,270,000 円）

海洋石油・天然ガスに係る日本財団 – Deep Star 連携技術開発助成プログラム

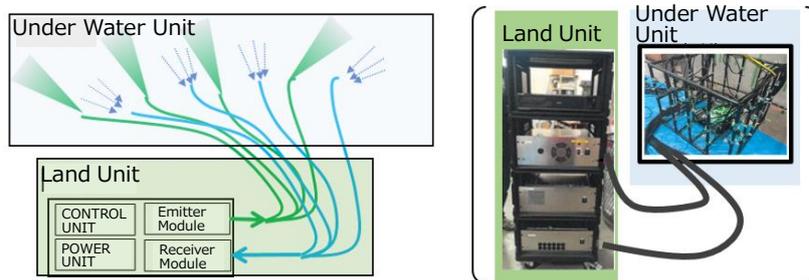
「海底での光通信無線技術の開発」 研究成果報告書 詳細

開発品の概要

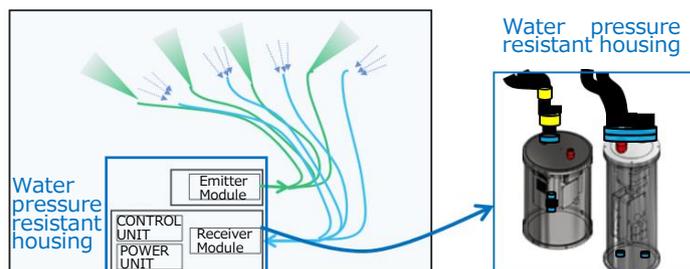
Development of industrial blue print version of Omni-Directional Optical Wi-Fi System



Phase1 試作基地局の構成：陸上部はラック内に内蔵

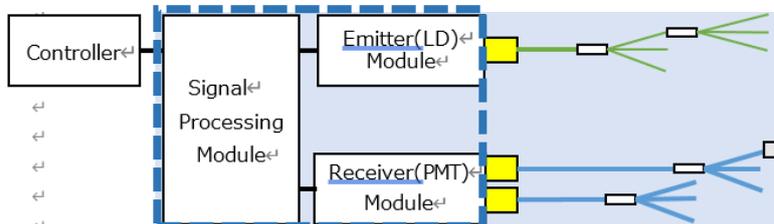


Phase2 試作基地局の構成：全てのモジュールを耐水圧筐体に内蔵



開発項目に対する成果

1. Field resistant design of all component considering installation procedure



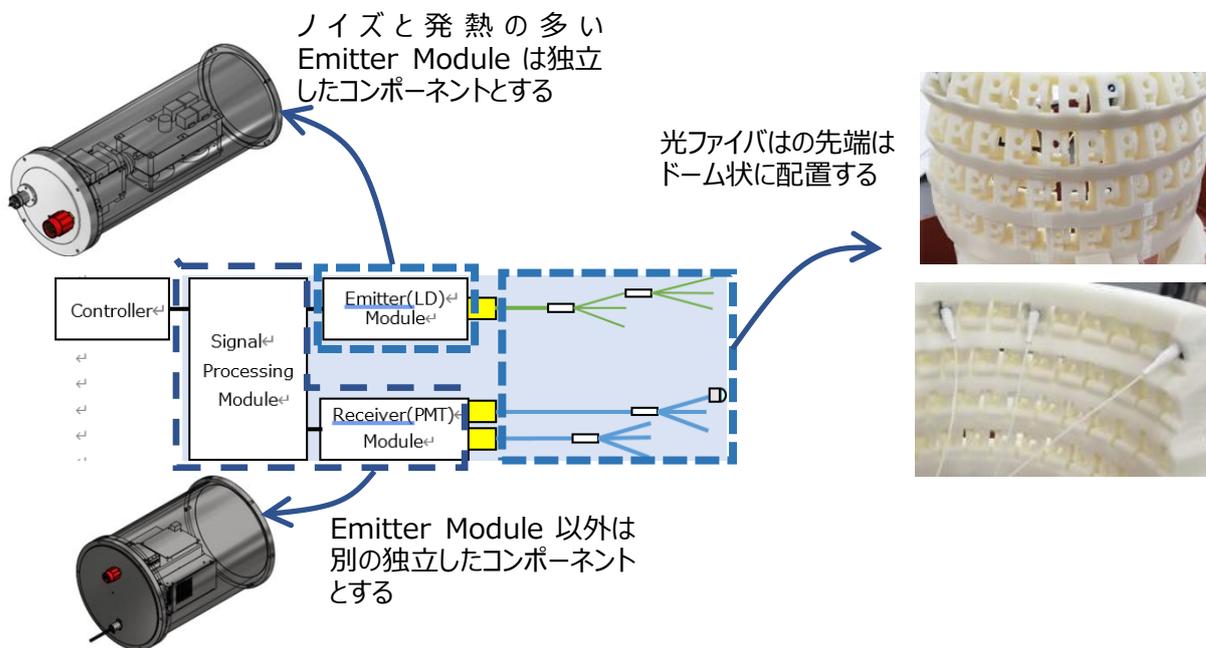
1.1 目的

全てのコンポーネントを内蔵して深海で運用可能な形態にモジュール化する。その為の構想設計を行う。

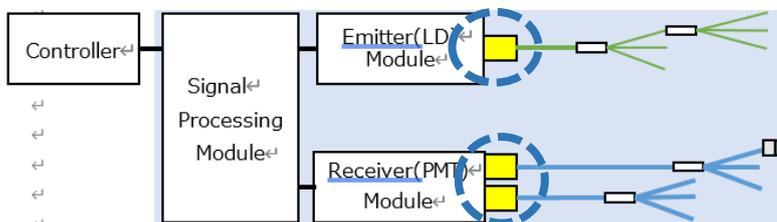
1.2 結果

発熱とノイズの大きい Emitter Module と、微細な信号を処理するその他の部分は別々の耐水圧筐体に入れる構造とする。

また Deepstar との調整により、受発光の光ファイバをドーム状に配置し、一体化して海中に installation する構造とする。



2. Development of underwater optical connectors for visible light band



2.1 目的

基地局の出力側と入力側のそれぞれの信号光を、耐水圧筐体に通す手法を確立する。既存の水中コネクタを使用した場合、出力側では高出力のレーザー光に対応した製品が存在しない。また、入力側では2百個以上のコネクタが必要となるため現実的ではない。このため、新規に深海で運用する基地局に適した光ファイバの入出力部品を開発・評価するものである。

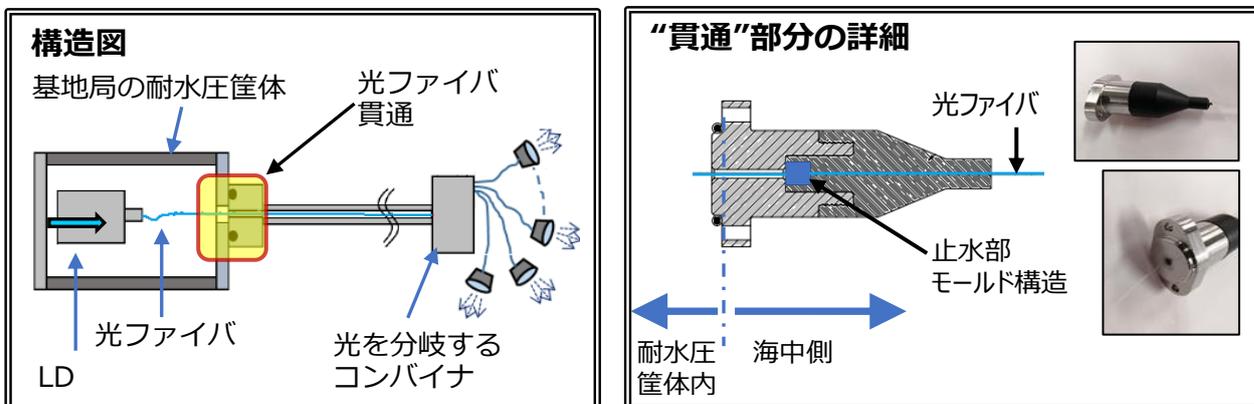
2.2 結果

出力部においては「光ファイバを筐体に貫通させる構造」、入力部においては「複数の光ファイバを複数バンドルして耐水圧窓を経由して受光する構造」の試作品を製造し、耐水圧性、性能の評価を行い、良好な結果を得た。

2.3 結果 出力部

2.3.1 出力部の構造

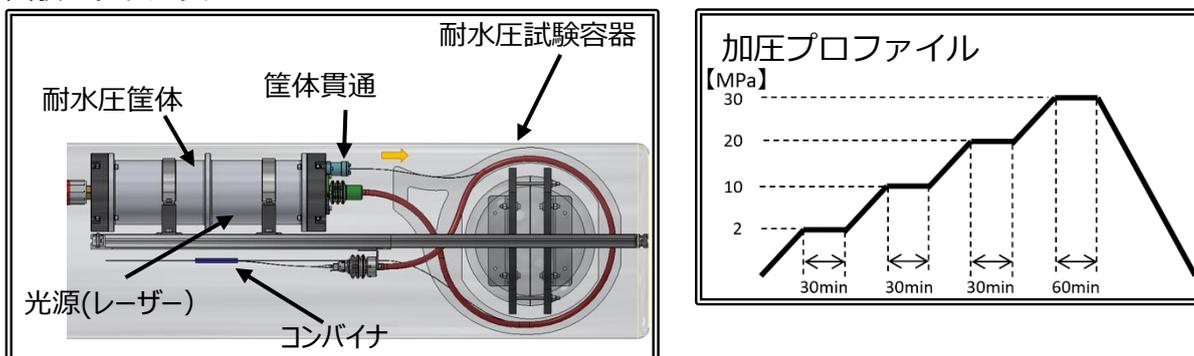
下図の通り、光ファイバを筐体に貫通させる構造とする。



2.3.2 出力部の評価

貫通部分に 30MPa (3000m相当) に対する耐水圧設計を行った。試作品に対して加圧試験を行い、水漏れのない事、物理的な変形や損傷が生じない事、通信性能に影響する光学特性の変動のない事を確認した。

①試験セットアップ



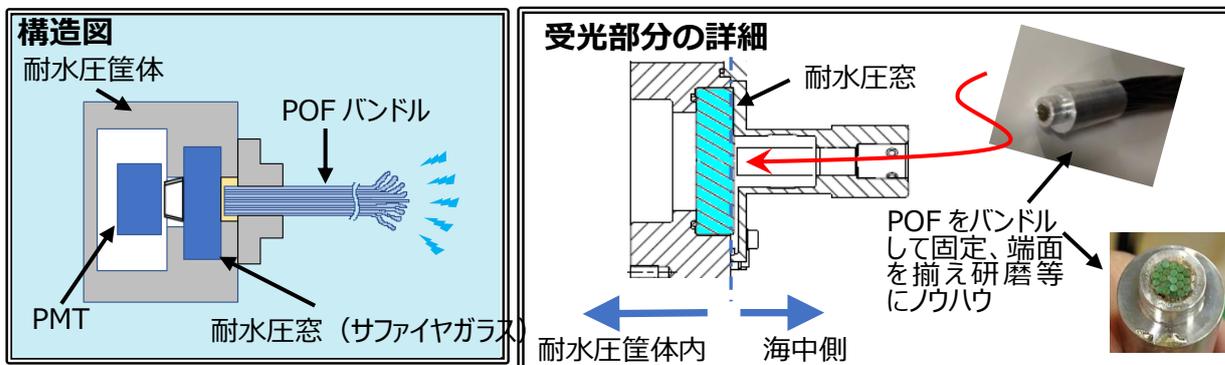
②試験結果

項目	設定及び規定値	結果
耐水圧性能	最大 30Mpa で加圧し漏れの無い事 試験後に部品の変形、損傷の無い事	○漏れは発生せず ○部品の変形、損傷は発生せず
光伝送特性の変動	最大 30Mpa まで段階的に加圧し、加圧中に光ファイバやコンバイナの減衰率に変動の無い事	○変動は発生せず

2.4 結果 入力部

2.4.3 入力部の構造

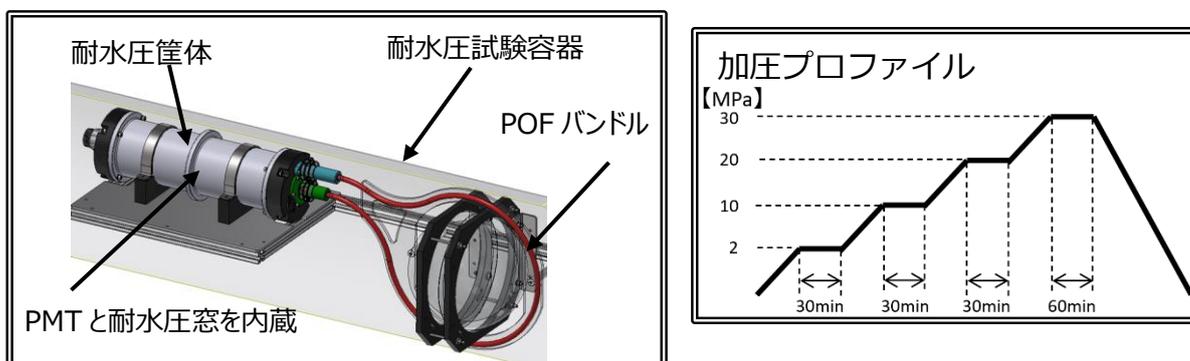
広い角度で信号光を受信するために POF 本数を 21 本とし、これらをバンドルして筐体内に信号光を取込む「耐水圧窓を経由して受光する構造」とした。



2.4.4 入力部の評価

試作品に対して 30MPa (3000m相当) の加圧試験を行い、水漏れのない事、物理的な変形や損傷が生じない事、通信性能に影響する光学特性の変動のない事を確認した。

① 試験セットアップ



② 試験結果

項目	設定及び規定値	結果
耐水圧性能	最大 30Mpa で加圧し漏れの無い事 試験後に部品の変形、損傷の無い事	○漏れは発生せず ○部品の変形、損傷は発生せず
光伝送特性の変動	最大 30Mpa まで段階的に加圧し、加圧中に POF バンドルや耐水圧窓を介した光の減衰率に変動の無い事	○変動は発生せず

3. Development of anti-noise function

3.1 目的

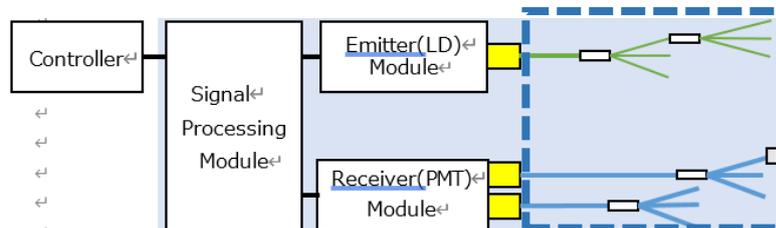
ROV の照明光などの外乱光が、通信光のノイズとなって通信性能の劣化の要因となる事が懸念されるため、その対策案を検討する。

3.2 結果

外乱光対策として 2 案の構想検討を行った。

No	対策	内容
対策①	光学フィルタによる外乱光の低減	信号光の光源であるレーザーの波長に最適化するようにバンドパスフィルタの通過域を狭くし、信号光以外をより除去できるようにし、S/N 比を向上させる。
対策②	PMT アレイを用いた外乱光の低減	複数の PMT から成る PMT アレイにおいて、外乱光を強く受けた PMT 素子を無効化する。信号光の強い PMT からの信号のみを受信することで、S/N 比を向上させる。

4. Long term observation of optical components under subsea environment



4.1 目的

基地局で使用する光ファイバを深海の海水に長期間暴露させ、そこで光学特性の劣化等の問題が発生しない事を確認する。

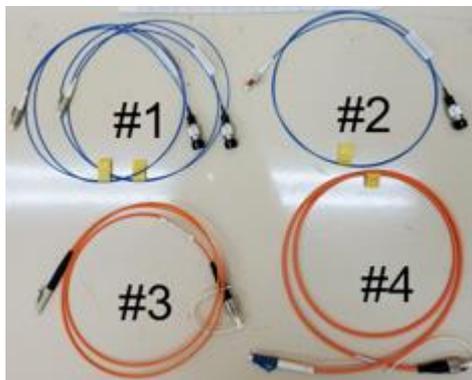
4.2 結果

POF、石英ファイバとも、光の透過率低下等の劣化は発生しなかった。

4.2.1 試験条件

- ①場所：和歌山沖、水深約 180m
- ②期間：2021年2月16日～2021年5月13日
- ③試験サンプル

パッチコード4種類、合計10本



バンドルファイバ1種類、合計10本



- ④方法：被試験体をネットに入れて、海中に放置
着底×2か所、浮遊×2か所、及び港の岸壁 1.8m×1か所に設置

海底への設置状況



4.2.2 試験結果

①外観検査

パッチコード、バンドルファイバとも外観上の劣化、損傷は無い

パッチコード



バンドルファイバ



② 性能試験

暴露前後の透過損失を測定した。試験前後の変化量は、+4.5~-1.6% (+0.19~-0.07dB) と非常に小さく、また透過損失が下がるファイバも見られることから、暴露試験の結果として、経時劣化による光ファイバの光学特性に変化は無かったと判断する。

No	透過損失(μW)		変化分
	暴露前	暴露後	
1	36.1	36.3	+0.6%
2	35.9	36.5	+1.7%
3	29.4	29.0	-1.4%
4	28.2	29.2	+3.5%
5	38.5	37.9	-1.6%
6	29.2	30.5	+4.5%

(データは一部のみ記載)

③ その他

参考として、FC/PC コネクタについても暴露試験を行った結果を記す。

- ・ 金属ケースが腐食し、損傷した。海中で暴露した状態での使用は不可と判断する。
- ・ 光学特性 (透過率) に劣化は無かった



5. System Demonstration

5.1 目的

基地局の性能評価を水中で実施する。実際に近い条件で評価を行う事で、実性能の評価と問題点の抽出を行う。また、水中ロボットを無線操縦することが基地局の目的の一つであり、その評価の為に無線 ROV を開発し、基地局との通信試験を行う。

5.2 結果

5.2.1 概要

以下の通り3度の試験を実施し、良好な結果を得た。

No	試験期間	試験場所	目的/結果
1	2020/12/9～ 12/11	JAMSTEC pool	無線 ROV との通信試験を実施。基地局との光通信で水中の無線 ROV の操縦に成功した
2	2021/9/28～ 9/30	Fukushima robot test field	実海域前の予備試験として実施。基地局の基本性能測定、無線 ROV の操縦、設置/回収方法の確認を行った。
3	2021/10/12～ 10/14	長崎沖	実海域での性能測定及び無線 ROV との通信試験を実施し、計算値通りの性能が海中でも得られる事を確認した。

5.2.2 No.1 JAMSTEC pool

①.目的

基地局の水中試験で、より実運用に近い評価を行うため無線 ROV を開発し、光無線による操縦を行い、実現可否を評価する

②.開発した無線 ROV の概要

市販品の有線式 ROV (BlueROV2) に以下に示す変更を施し、無線 ROV を開発した。

- a. 電源ケーブルを取り外し、バッテリーを搭載した。
- b. 通信ケーブルを外し、無線 LAN モジュールと水中光無線通信端末を搭載した。また、これらのインターフェースで ROV を制御するためのハードウェア/ソフトウェアを作製した。
- c. 水中で光無線通信が途絶えたことを検出し、自動浮上するバックアップ機能を開発した。
- d. 動作概要
 - ・ base station に接続された PC から無線 ROV を操縦できる。
 - ・ 水上では Wireless LAN を介して、PC から無線 ROV を操縦できる。
 - ・ 水中では base station と水中光無線を介して、PC から無線 ROV を操縦できる。
- e. 無線 ROV の構成を Fig.1 に、外観を Fig.2 に示す。

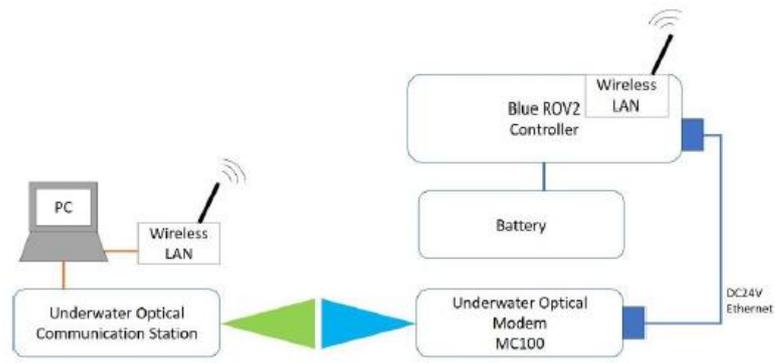


Fig.1 ROV configuration



Fig.2 ROV appearance

③. optical wireless communication area

Fig.3 shows optical wireless communication area installed in the pool.

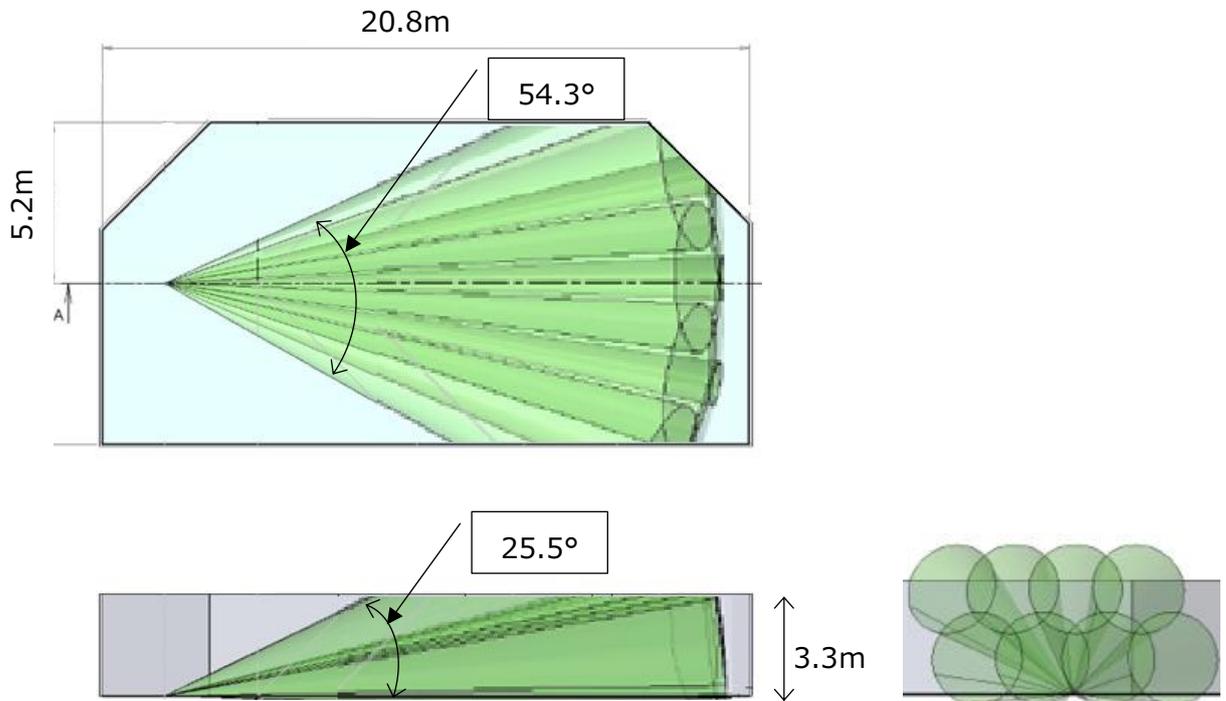
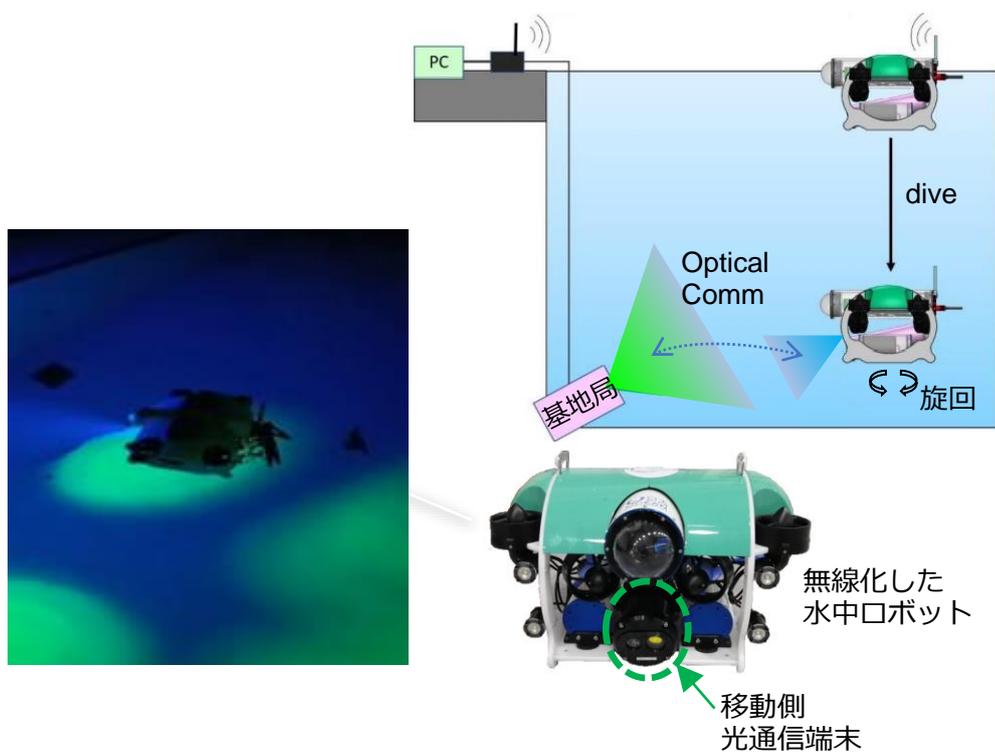
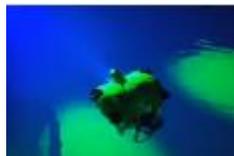


Fig.3 Communication area

④. Test 結果

水中で光無線を利用して“tether-less ROV”を操縦することに成功した。“tether-less ROV”の動きは、従来の“tether ROV”よりも機敏であり、将来の可能性を感じさせるものであった。



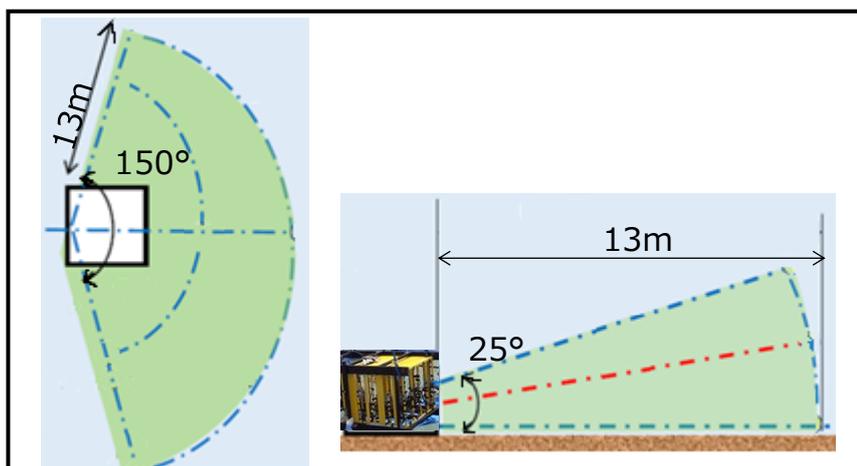
	<p>水上のロボットに潜水信号を送信。ここは Wi-Fi 通信</p>
	<p>水中で光通信でのリンクを確立</p>
	<p>光通信で、左旋回、右旋回の操縦を行った</p>

5.2.3 No.2 Fukushima robot test field /No.3 Nagasaki

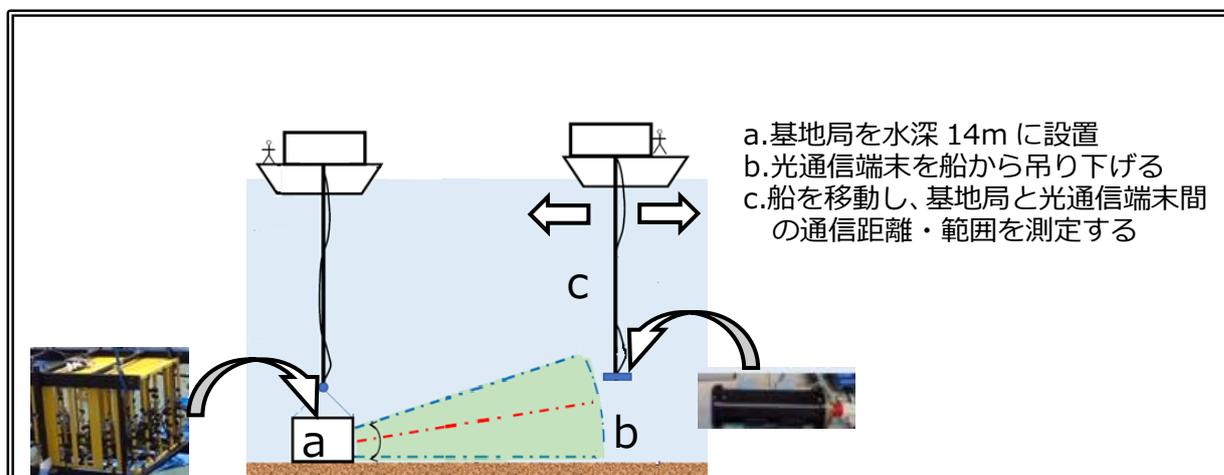
①.目的

実海域において、基地局の性能試験と無線 ROV の操縦試験を行う。福島で事前評価を行い、長崎で本試験を行った。

②.optical wireless communication area



③.Test method



④ . Test 結果

双方向通信距離は、現地の海水減衰率を加味した計算値「速度 1Mbps で距離 13m」に対して実測値「速度 1Mbps で距離 13.5m」であり、設計通り通信できていることを確認した。これは、深海の海水減衰率で計算した場合、速度 1Mbps で 50m 以上の通信距離に相当する。また、海中での水中光無線により、水中ロボットの無線操縦に成功した。

通信方向	通信距離		濁度 (参考)
	計算値	実測値	
双方向 基地局 緑 ⇔ 光通信端末青	13m	13.5m	

⑤.設置～試験



	<p>黄色のフレームに受発光合わせて 70 本弱の光ファイバを取り付けている。</p>
	<p>濁度が高く、さらに浮遊物が多量で、光通信には不利な環境であった</p>
	<p>水中ロボットの照明を切った状態 通信速度 1Mbps、通信距離 13.5m の双方向/全二重通信が出来る事を確認した。</p>

⑥. 海中の水中ロボットの無線操縦に成功した

