平成 29 年度防衛装備庁 安全保障技術推進制度

成果報告書

「光電子増倍管を用いた適応型水中光無線通信の研究」

平成 30 年 5 月

機関名: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実施した平成29 年度「光電子増倍管を用いた適応型水中光無 線通信の研究」の成果を取りまとめたもので す。

1. 委託業務の目的

1. 0委託業務の目的

本研究では水中での安定した通信の実現のため、青色を含む複数の波長の光をLDやLED等の半導体素子より送信し、光電子増倍管(PMT)等の高感度受光素子で受信する光無線通信を水中で実施する。その上で、光の海中伝搬に関する基礎データのチャート化に取り組み、海中における試験結果を参考にしながら、通信アルゴリズムの提案等をすることで、濁度に適応的に対応する水中光無線通信に関する研究開発を実施する。

海中伝搬に関する基礎データのチャート化では、利用予定の可視光波長域での伝搬光強度と散乱光強度の関係を、過去の試験データを含めて調査し、必要となる海洋における光伝搬に関するデータを取得する海域試験を実施し、その関係を明らかとする事を目指す。その際、必要であれば海洋プロファイリングも実施し、過去のデータとの整合に努める。また豪雨や津波などの災害時の海中環境も視野に入れ、可能な限り広範な環境条件に対応するチャート化とする。

海中通信試験の実施では、複数波長の光を送信可能なLDやLED送信機と、PDやPMT等の複数の受光素子の利用が可能な受信機を用い、波長と通信符号を切り替えつつ水中通信する場合の通信品質の変化を確認するための試験を実施し、通信距離と通信速度に関するデータを取得する。

通信アルゴリズムの構築では、海水固有の光学的性質に適応する通信システムを提案する。波長によって異なる海中での減衰量を考慮し、かつ通信速度(通信符号)を変化させることで、濁度の時間変化によっても一定の通信品質を安定かつ連続的に維持することを目指す。

海域基礎データ取得装置の製作と水中光無線通信装置の試作では、海中伝搬に関する基礎データのチャート化に用いるための海域基礎データ取得装置、および海中通信試験に用いるための水中光無線通信装置を試作する。

これらを実現するために、海洋研究開発機構では海中伝搬に関する基礎データのチャート化、通信アルゴリズムの構築および海中通信試験を実施し、株式会社エス・エー・エスでは海域基礎データ取得装置の製作、株式会社島津製作所では水中用光無線通信装置の製作を行う。

1. 1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

濁度に適応的に対応する水中光無線通信に関する研究開発開始時に、①海中伝搬に関する基礎データのチャート化、②海中通信試験の実施、③通信アルゴリズムの構築、の大きく三つの課題を設定し、それらを実施するために必要となる試作装置として④海域基礎データ取得装置の製作、⑤水中光無線通信装置の試作を行った。

①海中伝搬に関する基礎データのチャート化

平成 27 年度に 3 計測域で 8 観測、平成 28 年度に 8 計測域で 14 観測、平成 29 年度に 6 計測域で 11 観測、合計 17 計測域で 33 回の海域基礎データ取得装置を用いた海洋プロファイリングを実施し、データを取得した。マイルストンの達成状況を評価する定量指標および数値目標として、平成 27 年度は 1 回以上、平成 28 年度は 2 回以上、平成 29 年度は 3 回以上の海域基礎データ取得を計画し、いずれも達成した。

②海中通信試験の実施

平成 28 年度に 1 回、平成 29 年度に 4 回の水中光無線通信を実施し、データを取得した。マイルストンの達成状況を評価する定量指標および数値目標として、距離 50m での光無線通信を目標とし、最大で 190m の距離での通信を実現した。また距離 20m で波長の自動切り替えによる通信を計画し、同距離で通信中に波長の自動切換えを実現した。ただし現時点では受光素子の切り替えは手動である。試験を通じて通信可能距離と通信最大速度の算出を計画し、試験結果から算出した。

③通信アルゴリズムの構築

海の状態に応じて最適な波長と変復調方式を推定する計画をし、海域基礎データから濁度とクロロフィル濃度に応じて最も透過する最適波長を算出した。具体的には

- ・ 濁度 1.81FTU 以上かつクロロフィル濃度 9ppb 以上で赤色、それ以外は緑色
- ・緑色が使えない場合、濁度 0.79FTU 以下かつクロロフィル濃度が 3ppb 以下で青色、 それ以外で赤色

とする事が妥当であることが分かった。これをアルゴリズム実行における動作切り替え制御パラメータとして反映するプログラムを実装した。

最適な変復調方式については、クロック同期がもっとも重要である事がわかったことから、同期に有利な 4B/5B 方式はその一つ考えられる。ただし海の状態に応じて符号を動的・適応的に変更する事は、頻繁な再同期処理による通信性能の低下にもつながるため、現時点では必要性は薄いと考える。

④海域基礎データ取得装置の製作と水中光無線通信装置の試作

海域基礎データ取得装置を計画通り試作し、反射光強度取得部の追加や水中光無線通信装置との接続のためのソフトウエア改良なども予定通りに完了し、海中伝搬に関する基礎データのチャート化や通信アルゴリズムの検証に用いた。

水中光無線通信装置の試作では、試作した水中光無線通信装置はすぐれた性能を発揮し、水槽内および海洋にて実際に通信を実施することで、通信距離と速度の関係把握や通信アルゴリズムの検証に用いる事ができた。

1. 2 研究課題終了後の将来性

平成30年5月25日現在において、海外を含む複数の企業から商品化の時期など、購入を念頭にした具体的な問い合わせを受けている。また新聞社からの取材や、学会からの講演依頼もしばしばあり、注目度の高い研究を実施できたと考えている。現時点での水中光無線通信装置は研究段階であり、試作の域を出ないが、実用において解決が難しい技術的課題は無いことから、比較的早く民生利用側のデュアルユースを実施できると考える。まずは利用者の要求に応じたカスタマイズ品としての水中光無線通信装置の製作に結び付けることをめざす。

将来的にはビークル間の短距離高速通信を実施する主要な通信手段になると予想しており、特に水中および水上ビークルの自動化において重要な役割を果たすだろう。また空中の小型ビークル(ドローン)と水中ビークルとの直接通信も可能であることから、水中と空中を直接結ぶ唯一の高速通信手段として、計画段階の想定に含まれない独自の発達も期待できる。

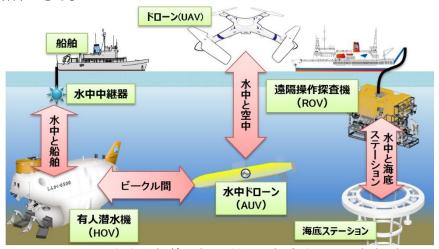


図1-1 水中光無線通信の利用が想定される通信経路

1. 3 副次的成果や目標を超える成果

①距離 120m で 20Mbps、190m で 32kbps の通信を確認

当初は 50m を目標としていたが、およそ 3.8 倍の距離での通信を実現した。これは通信装置の性能が高かったことはもちろん、可視光の海中での透過が理論上限値に近い場合がしばしばあり、通信路として良好であった事も大きい。特に深海と呼ばれる太陽光が届かない 150m 以深では、海域によらず透過率が高いことがわかった。

②通信速度の変更による SN の改善

通信速度を低下させることで、通信光の1シンボル当たりの強度レベルが上昇し、結果としてSNが改善し、通信距離を向上させる事ができる。ただし速度を低下させただけではシンボル当たりの外乱光も増えるため、そこで受信部に通信速度に応じて帯域を可変するアナログ信号フィルタを、試作した水中光無線通信装置に導入した。この構成により、通信エラーが発生した場合に通信速度を落とし、SNを改善させて通信を復旧させる事を実際の通信試験で確認した。

③イーサネット通信が可能

試作した水中光無線通信装置はイーサネットに準拠しており、距離 100m で windowsOS 間でのリモートデスクトップ接続を、距離 40m で HD 監視カメラの映像 確認とコントロールを実現した。イーサネット通信にはリアルタイムの双方向通信、すなわち高速な全二重通信機能が必要であるが、実現することができた。これは音響通信では未だに実現されていない。

④色による水中の透過度(伝搬光強度)の違い

従来、きれいな水では青>緑>赤の順で水中を良く透過し、汚い水では赤>緑>青の順で透過すると考えられていた。しかし今回の研究で、綺麗な海では緑>青>赤の順で透過し、一定以上汚くなると緑>赤>青の順に、最後に赤>緑>青となる事がわかった。ここで青は460nm、緑は525nm、赤は640nmである。これらはダイオードによる発光で利用可能な一般的な波長で、電子のエネルギーギャップと密接にかかわる値である。この波長と透過度の順序は、水中光無線通信装置の設計段階で重要な条件になるであろう。

⑤海面をまたいで、空中と水中を直接結ぶ通信が可能

従来は海面波の影響で光軸がずれ、もしくは白波の影響で光が遮蔽され通信ができない、というのが通説であった。今回の研究で海面による屈折、反射、遮蔽などの影響がある場合でも、ある程度のビーム幅を持つ光による送受信であれば、20Mbps の通信速度でエラーなしに通信できた。光無線通信は水中と空中を直接結ぶ唯一の無線高速通信手段となりうる事を確認した。

1. 4 論文、特許、学会発表等の研究の成果

査読論文1件、国際学会4件、国内口頭発表3件、ポスター発表3件、雑誌掲載1件、プレスリリース1件、展示3件、講演3件、特許1件(詳細は3.1に記載)。このうち、特に重要なものを下記に示す。

①論文発表

【1】澤 隆雄、西村 直喜、東條 公資、伊藤 伸、"波のある水面をまたぐ光無線通信の水槽試験" 2017 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、B-10-50、p. 166、2017

概要と特筆すべき点:

この論文は乱れた水面を超えて水中と空中を結ぶ水槽試験の結果を公表したもので、このような論文は海外にも見当たらず、世界で初めてそれが実現できることを示した。

[2] Takao Sawa, Naoki Nishimura, Shin Ito, "Wireless Optical Ethernet Modem for Underwater Vehicles" 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 2018

概要と特筆すべき点:

【1】の内容を含めた研究成果を海外発表した。電気通信関係で最も著名な IEEE 傘下の学会であり、IEEE の論文データベースに本研究成果が登録されたことで、検索可能

となった事の意義は大きい。

[3] Takao sawa, Naoki Nishimura, Shin Itoh, "Underwater visible light communication" 2nd International Conference and Exhibition on Visible Light Communications (ICEVLC2018), 2018

概要と特筆すべき点:

可視光通信を取り扱うこの学会では、これまでは主に空中の光無線通信について取り扱ってきたが、今回の研究成果発表をきっかけとして、無線通信に新たに水中分野を築きつつある。また IEEE の標準化においても本学会での活動は重要となると考えている。招待講演として発表した。

[4] Takao Sawa, Koji Tojo, Naoki Nishimura, Shin Ito, "Laser Diode Based Underwater OpticalWireless Communication", The 7th Laser Display and Lighting Conference 2018 (LDC'18), 2018

概要と特筆すべき点:

レーザーダイオードに関しての学会であるが、この学会は OPIC という光関係で国内 最大の 12 の専門学会の共同で実施されている学会のうちの一つである。【3】の学会は 今後この OPIC 傘下で活動する予定で、本学会での活動は同様に重要となると考えてい る。招待講演として発表している。

②特許

【1】発明の名称:水中用レーザ光源、発明者:西 亮祐、東條 公資、西村 直喜(株式会社島津製作所)、出願登録区分:出願、出願番号および出願日:2018-063804(2018年3月29日)、出願区分:国内

概要と特筆すべき点:

この特許は水中で高出力なレーザーダイオードを用いる際、狭い耐圧容器内で効率的にLDモジュールを冷却しつつ、複数の発光色による通信光を外部に導く方法についての特許である。冷却は装置の小型化において主要な課題であり、この特許が今後の装置小型化におけるかなめになると考えている。

③装置展示

【1】展示場所:テロ対策特殊装備展(SEECAT)、展示内容:水中光無線通信装置、日時: H29.10.11-13

概要と特筆すべき点:

水中光無線通信装置を展示した。この展示をきっかけに産経新聞社から取材依頼があり、インターネット検索大手のポータルサイト「ヤフー」トップページを飾った。

④プレスリリース

【1】発表名:水中光無線通信による 100m 超の 20Mbps 双方向通信に成功、~水中光 Wi-Fi の構築及び水中観測機器の IoT 化へ大きく前進~、日時: H29.10.2 概要と特筆すべき点:

H29.8.26 に実施した実海域試験の結果を中心に、これまでの研究成果を発表した。 水中ロボット間での120m 距離での20mbps の通信と、100m 距離でのリモートデスクト ップ接続を実現した事を最初に公表し、大きな反響を得た。

1.5 研究実施体制とマネジメント

本研究を円滑に実施するため、研究経費や購入物品の管理、提出書類の準備作業の多くの部分を、外部資金担当の事務担当者がサポートした。これにより研究実施者は研究活動に専念できたことから、良い研究成果を出す環境になったと考えている。業務計画や参加者・協力者に事務担当者の記載こそ無いが、実質的には研究チームの一員であった。

また P0 と研究分担期間との定期的な情報交換は、研究の方向性の確認と、研究のモチベーションを上げるために、重要であった。

1.6 経費の効率的執行 特になし。

- 2. 平成29年度(報告年度)の実施内容
- 2. 1 平成29年度の実施計画
 - ① 海中伝搬に関する基礎データのチャート化

平成28年度に海中の濁度を測定する反射光強度取得部を海域基礎データ取得装置に追加したため、平成27、28年度に反射光強度を計測していない海域・季節については、平成29年度で改めて反射光強度を含めた伝搬光強度、波長毎の散乱光強度等の海域基礎データを計測する。

計測深度は太陽光が良く届く 25m、太陽光到達限界に近い 200m、太陽光がまったく届かない 200m 以深とし、太陽光の影響は照度計で計測する。太陽光の影響が無い夜間についても海域基礎データを取得する。

平成29年度における計測海域は、特に、マリンスノーが多く濁度の高い海域とする。さらに、豪雨や津波などの災害時に発生する極めて濁度の高い特異環境を想定し、水循環が悪く濁度が高い沼・池等で計測を行い、広範な環境条件について海域基礎データを取得する。

外乱光が無い状態で光伝搬試験が実施可能であり、かつ通信素子間距離を長く取る 事が可能な施設で基準データを取得する。例えば、艦艇装備研究所の高速水槽のよう な施設を想定している。

② 海中通信試験の実施

②-1 海中通信試験(1回目)

平成29年度は、海中で水中光無線通信試験装置により通信試験を実施する。通信 試験では、通信に適した波長、受光素子を選択し、通信距離及び速度を切り替えつつ 海中で通信し、通信距離と速度の関係についてデータを取得する。

②-2 海中通信試験(2回目)

③で水中光無線通信装置の通信アルゴリズムを調整し、⑤で水中光無線通信装置の 受光素子の改良を実施後、海中通信試験を行う事で、通信性能の向上を確認する。

③ 通信アルゴリズムの構築

海中通信試験の結果を比較し、物理モデルを修正することで、海中通信に最適な波長と変復調方法を導出し、濁度に適応的に対応する通信アルゴリズムを構築する。

平成 28 年度の数値シミュレーション結果と②-1の海中通信試験の結果より、通信アルゴリズムを調整する。

上記の調整したアルゴリズムに②-2の海中通信試験の結果を反映し、通信アルゴリズムを構築する。

また、分担機関と連携し、再委託によって、以下の④⑤の研究開発に取り組む。

④ プログラムの作成(再委託先:エス・エー・エス株式会社)

②の海中通信結果を海域基礎データ取得装置に反映し、③で調整した通信アルゴリズムを水中光無線通信装置のプログラムに反映する。

海中通信試験のために、海域基礎データ取得装置及び水中光無線通信装置を船上か

ら操作するためのコントロール装置及びプログラムを作製する。

⑤ 水中光無線通信装置の改良(再委託先:株式会社島津製作所)

②の海中通信試験の実施結果に基づき、水中光無線通信装置が太陽光を遮蔽、または特定の波長が選択可能となる最適な受光素子用フィルタを追加し、装置の改良を 実施する。

⑥ プロジェクトの総合的推進

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、両機関の調整会の開催等、参画各機関の連携・調整にあたる。月毎に打合せを実施する。また、国内外の学会等において、本研究の成果を公表する。国外での学会発表として、OCEANS2017Anchorage(アメリカ、アラスカ)での研究成果の発表を予定している。また、国外の工業技術研究院(台湾)の施設で本研究の海中基礎データ取得装置を用いてデータを測定する予定である。測定結果から通信に適した波長、速度及び距離について推定する。この結果と、工業技術研究院が所有する水中光無線通信装置の通信距離及び速度と比較する。

2. 2 平成29年度の研究実施日程

業務項目/月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
①海中伝搬に関する基礎デ ータのチャート化	-											→
②海中通信試験の実施				*								+
③通信アルゴリズムの構築			•									
④プログラムの作成		•	•		-	-				4	—	•
⑤水中光無線通信装置の改良					-							
⑥プロジェクトの総合的推進	•											

- 2. 3 平成29年度の研究成果の説明
- ① 海中伝搬に関する基礎データのチャート化
- ①-1 目的

海域基礎データ取得装置を用いて透過度(伝搬光強度)、波長毎の散乱光強度、温度、 電気伝導度等を計測する。

- ①-2 実験日・場所・使用船舶・実施者
- ①-2-1 第1回

日時: 平成29年7月5、6日

場所:鹿児島県トカラ列島薩摩硫黄島周辺(図2-1)

使用船舶: 鹿児島県立鹿児島水産高等学校所有小型実習船「拓青」(図2-2)

実施者:澤隆雄、(海洋研究開発機構)、他1名



図2-1 実験場所

観測点① 北緯 30 度 45.11 分、東経 130 度 11.51 分、水深 270m、10 時、曇り(270001x) 観測点② 北緯 30 度 44.21 分、東経 130 度 07.73 分、水深 180m、14 時、晴れ(855001x)



図2-2 鹿児島県立鹿児島水産高等学校所有小型実習船「拓青」

総トン数:19トン

全長:19.95 m

最大搭載人員:24 名(船員含む)

①-2-2 第2回

日時: 平成29年7月26日

場所:相模湾(図2-3)

使用船舶:海洋研究開発機構所深海調査研究船「かいれい」(図2-4) および搭載 無人探査機「かいこう」(図2-5)

実施者:澤隆雄(海洋研究開発機構)、株式会社島津製作所より5名、島津エンジニアリング株式会社より1名、エス・エー・エス株式会社より2名、愛一工業株式会社より2名



図2-3 実験場所

観測点①:北緯34度36.00分、東経138度34.50秒、水深2450m、7月26日10時頃、晴れ(照度未取得)



図2-4 深海調査研究船「かいれい」

総トン数:4517トン

全長:106 m

最大搭載人員:60名 (乗組員38名/研究者等22名)

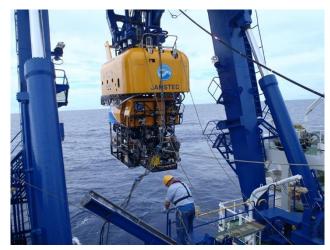


図2-5 無人探査機「かいこう」 最大潜航深度:7,000m

寸法:長さ約3m×幅約2m×高さ約2.6m

重量:約5,500kg (空中重量) ペイロード:300kg (空中重量)

①-2-3 第3回

日時: 平成 29 年 11 月 6 日

場所:富山県滑川市沖(図2-6)

使用船舶:富山県立滑川高等学校所有小型実習船「かづみの」(図2-7)

実施者:澤隆雄、他1名(海洋研究開発機構)



図2-6 実験場所

観測点①:北緯36度47.20分、東経137度19分14秒、水深320m、11月6日10時頃、晴れ(照度未取得)



図2-7 富山県立滑川高等学校所有小型実習船「かづみの」

総トン数:19トン

全長:20.4 m

最大搭載人員:27 名(船員含む)

①-2-4 第4回

日時: 平成 30 年 1 月 24 日

場所:兵庫県淡路市津名港内(図2-8)

使用船舶:株式会社関海事工業所多目的 DPS 作業台船「あさひ」(図 2 - 9)

実施者:澤隆雄(海洋研究開発機構)、島津製作所より4名、島津エンジニアリン

グより1名、愛一工業より4名



図2-8 実験場所

観測点① 水深 10m、15 時頃、曇り(570001x)



図 2 - 9 「あさひ」株式会社関海事工業所多目的 DPS 作業台船 総トン数: 3,000 トン 全長: 80.0 m

①-2-5 第5回

日時: 平成30年2月14~16日

場所:沖縄県慶良間列島周辺(図2-10)

使用船舶:海洋エンジニアリング社所有海洋調査船「第一開洋丸」(図2-11) 実施者:澤 隆雄(海洋研究開発機構)、エス・エー・エス株式会社より1名



図2-10 実験場所

観測点① 北緯 26 度 20.10 分、東経 127 度 15.80 分、水深 400m

1回目:14日15時頃、曇り(980001x)

2回目:14日19時頃、曇り(1201x)

3回目:15日9時頃、晴れ(350001x)

観測点② 北緯 26 度 19.10 分、東経 127 度 32.40 分、水深 440m

1回目:15日15時頃、晴れ(照度未取得)

2回目:15日19時頃、晴れ(251x)

観測点③ 北緯 26 度 21.50 分、東経 127 度 33.00 分、水深 660m、16 日 9 時頃、晴れ (200001x)



図2-11 海洋エンジニアリング社所有海洋調査船「第一開洋丸」

総トン数:1,390トン

全長: 72.85 m

最大搭載人員:45 名(船員含む)

①-2-6 第6回

日時: 平成30年2月20日6時ごろ

場所:福島県南相馬市横川ダム (図2-12)

使用船舶:なし(ただしクレーンを使用、図2-13)

実施者:澤隆雄(海洋研究開発機構)、エス・エー・エス株式会社より1名、他1

社



図2-12 実験場所 横川ダム 型式:直線重力式コンクリートダム

堤高:75m 堤長:200m

総貯水量:13,650,000m³ 天候:晴れ(13001x)



※株式会社加藤製作所商品紹介パンフレットより抜粋

図 2-13 加藤製作所製ラフテレーンクレーン「MR-130R」

総トン数:13.7トン

全長: 7.4 m

最大吊り上げ重量:13t

最大地上揚程:24.8m(ジブ)

① -3 実験結果概要と考察

ここでは計測した透過度(伝搬光強度)、波長毎の散乱光強度、温度、電気伝導度等を示すとともに、得られたデータについて考察をする。計測海域の選定において、本年度はマリンスノーが多く濁度の高い海域を選定予定であったが、海中通信試験第1回の結果よりマリンスノーの過多は濁度に大きな影響を与えず、水中光無線通信への影響も極めて低いことが判明した。そこで濁度が高いと思われる兵庫県淡路市、福島県南相馬市横川ダムを計測場所として選定し、直接、高い濁度環境下における計測を実施した。また災害時等に発生する濁度の高い環境については、荒天日を予測するのが極めて困難であったため実施せず、同様に兵庫県淡路市と福島県南相馬市の横川ダムをその代替計測場所に選定した。

結果として、光の透過度は濁度とクロロフィル濃度と明確な関連がみられ、また波長による透過度の違いも濁度とクロロフィル濃度から類推可能であった。しかし波長毎に計測した反射光強度は、透過度との関連を見つけるに至っていない。例えば濁度の低い沖縄での透過度(図2-32E)と濁度の高いダムでの透過度(図2-36)では,赤色と青色で優劣が入れ替わっているが,反射光強度(図2-33Eおよび図2-37)では明確な入れ替わりは確認できない。波長との関連については透過度か、濁度もしくはクロロフィル濃度からの類推が現時点では有効と考える。

(1)-3-1 第1回

鹿児島県立鹿児島水産高等学校所有小型実習船「拓青」を利用させていただき実験を行った。計測海域の水の透明度は高く、250m までの水深で高いところでも 0.05FTU である(図 2-14AB)。クロロフィル濃度は 75m 前後の深度で 1.0ppb 程度の極大値を取っている(図 2-15AB)。これは他の地点での海域基礎データでも確認できるが、透明度が高い場合は表層よりも 100m 前後の中層のほうが、植物プランクトンの影響が大きい事が確認できる。この領域での光の透過度は今回の日中計測では上手く計測できなかったが(図 2-16AB)、後方散乱+蛍光強度では特に 550nm の反射が顕著に強いことがわかる(図 2-17AB)。また赤色である 590、635nm についても上昇傾向が確認できることから、クロロフィル濃度の増加は緑~赤色の光の透過をさまたげる事を示唆している。

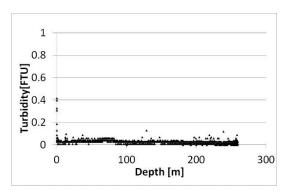


図2-14A 観測点①濁度

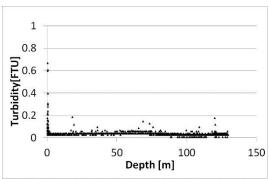


図2-14B 観測点①濁度

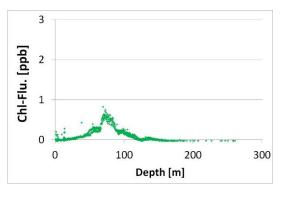


図2-15A 観測点①クロロフィル濃度

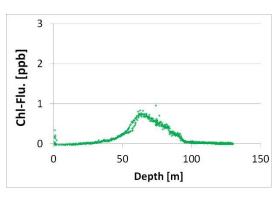


図2-15B 観測点②クロロフィル濃度

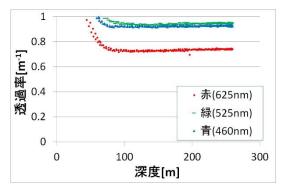


図2-16A 観測点①クロロフィル濃度

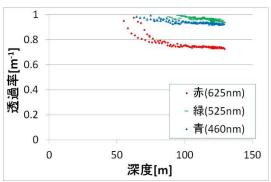


図2-16B 観測点②クロロフィル濃度

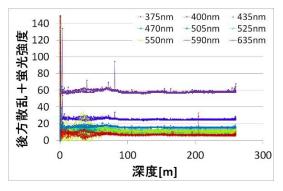


図2-17A 観測点①後方散乱+蛍光強度

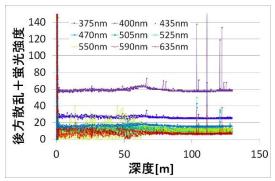


図2-17B 観測点②後方散乱+蛍光強度

① -3-2 第2回

海洋研究開発機構所深海調査研究船「かいれい」および搭載無人探査機「かいこう」を用いた実験を行った。この実験海域は平成27年度第1回の海中伝搬に関する基礎データのチャート化において計測を実施した海域とほぼ同じである。「かいこう」に水中光無線通信装置と海域基礎データ取得装置を搭載し、通信試験の最中での海域基礎データ取得を試みた。試験では最大830mまで「かいこう」で潜航したが、すべての深度域で濁度は0.05FTU前後(図2-18)であった。ただし潜航中は基本的にカメラのライトを点灯させているため、計測ノイズが大きかった。クロロフィル濃度(図2-19)においてもその傾向がでており、計測全般でノイズが大きい。ただし深度30m前後で2.0ppbという強いピークが明瞭に確認され、ピーク値が浅い深度域であることからも、第一回の計測海域よりも海が濁っていることを裏付けている。光透過率(図2-20)および後方散乱+蛍光強度(図2-21)は、残念ながら「かいこう」の照明の影響で非常にノイズが大きくデータが不明瞭となってしまった。光の透過率計測素子と後方散乱+蛍光強度計測部には外乱光を抑制するバンドパスフィルターが搭載されていない。これは複数波長の光を一つのセンサで検知するため、受光帯域を広げる必要があったためであるが、外乱光に対して弱い事が明らかとなった。海

域基礎データ取得装置は光無線通信装置と接続して適応的に環境に対応する事で通信の安定化を試みるために用いるが、現在の構成では逆に外乱光の影響で安定性が失われる可能性がある。太陽光や照明光などの外乱光が無い事を仮定するのは本研究の本質に反するため、多数の波長を計測するセンサを通信制御に用いる場合は注意が必要であると言える。

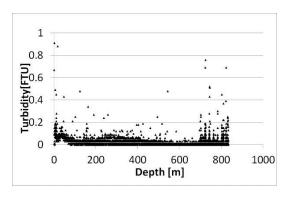


図2-18 濁度

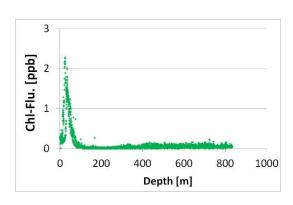


図2-19 クロロフィル濃度

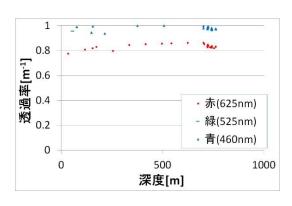


図2-20 光透過率

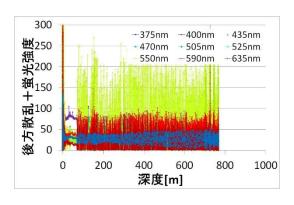


図2-21 後方散乱+蛍光強度

① -3-3 第3回

富山県立滑川高等学校所有小型実習船「かづみの」を利用させて頂いて実験を行った。この実験海域は平成28年度第2回および第七回の海中伝搬に関する基礎データのチャート化において計測を実施した海域とほぼ同じである。濁度は0.1~0.2FTUと比較的高く(図2-22)、そのためクロロフィル濃度には表層で2.0前後のppbの高い値を示してから徐々に低下し、深度100m以深は0.01ppb前後の低い値である(図2-23)。光透過率を見ると緑のほうが優勢であることが分かる(図2-24)。濁度が比較的高いこと、クロロフィル濃度が低く緑色の反射が弱いことから、緑色が透過しやすい環境であった。残念ながら機材の不調で後方散乱+蛍光強度は取得できなかった。

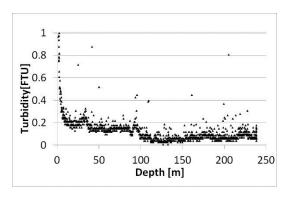


図2-22 濁度

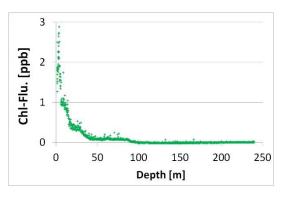


図2-23 クロロフィル濃度

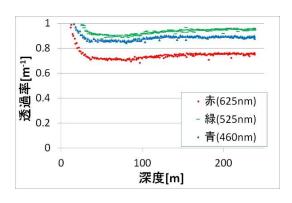


図2-24 光透過率

①-3-4 第4回

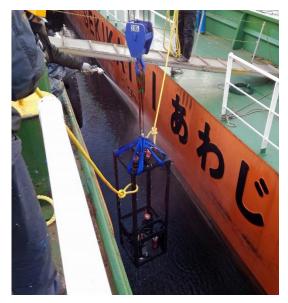


図2-25 計測風景

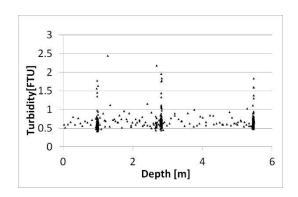


図2-26 濁度

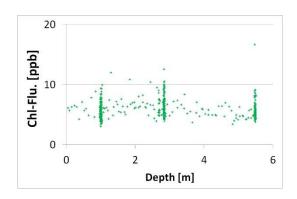


図2-27 クロロフィル濃度

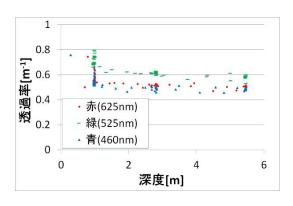


図2-28 光透過率

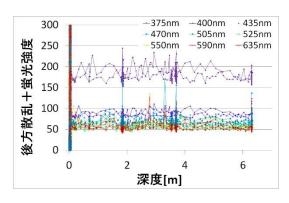


図2-29 後方散乱+蛍光強度

①-3-5 第5回

海洋エンジニアリング社所有海洋調査船「第一開洋丸」を用いて実験を行った。3つの計測点において、計測を実施し、特に観測点①および②では時刻をずらして計測し、太陽光の影響を含めた変化を計測した。どちらの観測点でも2回目は夜間観測となった。濁度は全観測点で時刻に関わらず表層付近でも0.05以下で、深度を増すにつれて低下している(図2-30ABCDEF)。クロロフィル濃度も全観測点で時刻にかかわらず似た傾向で、深度100m付近までは0.5程度の比較的高い値を示すが、200mでほぼ0となり、これ以深はほぼ0を維持している(図2-31ABCDEF)。光透過率も観測点と時刻、深度に関わらず理論上限に近い高い値である(図2-32ABCDEF)。クロロフィル濃度は浅深度で比較的高く、そのため濃度の違いによる光透過率の変化が浅い深度で確認できる。図2-32Gは図2-32Eの縦軸を拡大したものであるが、このグラフと図2-31Eを比較すると、クロロフィル濃度の増減に光透過率が影響を受けていることがわかる。200m以深ではクロロフィル濃度および濁度ともにほぼ0であるため、200m以深での青色の光透過率は横ばいとなっている。それに対して緑と赤の光の透過率については、その深度域でわずかに上昇傾向が確認できる。図2-32Bにおいて比較的わかりやすく確認できるが、青と緑の光透過率が

深度増加つれて徐々に差がついている。この原因については調査中である。深度変化による水の密度変化が引き起こす屈折率変化や、高いクロロフィル濃度において緑と赤の散乱が相対的に強い事など、いくつかの要因が予想されるが、現時点では特定に至っていない。この現象は水中光無線通信の性能を左右することから、調査を継続していく。

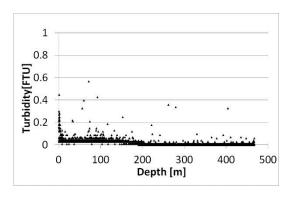


図2-30A 観測点①1回目濁度

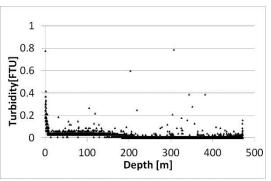


図2-30B 観測点①2回目濁度

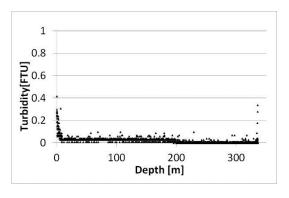


図2-30C 観測点①3回目濁度

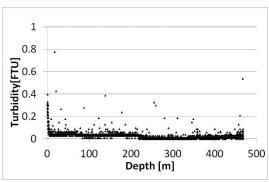


図2-30D 観測点②1回目濁度

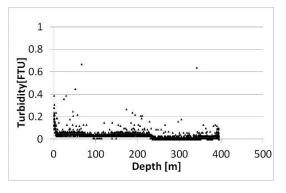


図2-30E 観測点②2回目濁度

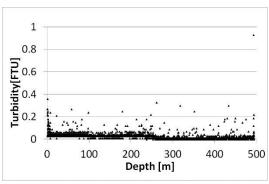


図2-30F 観測点③濁度

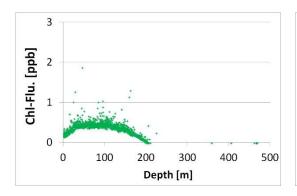


図2-31A 観測点①1回目クロロフィル濃度

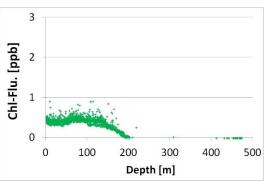


図2-31B 観測点①2回目クロロフィル濃度

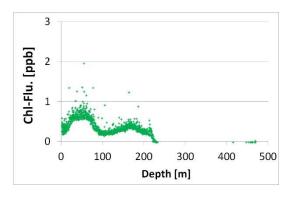


図2-31C 観測点①3回目クロロフィル濃度

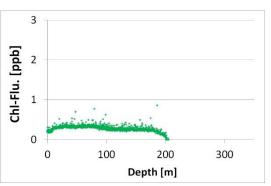


図2-31D 観測点②1回目クロロフィル濃度

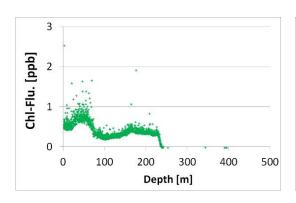


図2-31E 観測点②2回目クロロフィル濃度

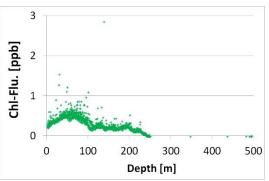


図2-31F 観測点③クロロフィル濃度

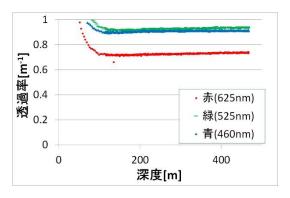


図2-32A 観測点①1回目光透過率

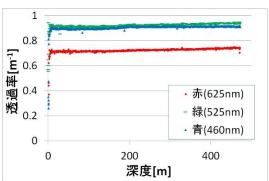


図2-32B 観測点①2回目光透過率

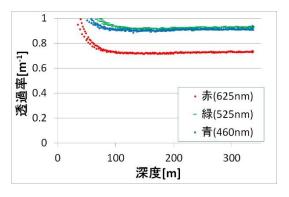


図2-32C 観測点①3回目光透過率

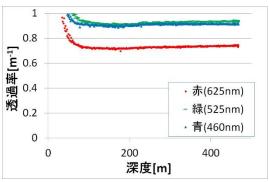


図2-32D 観測点②1回目光透過率

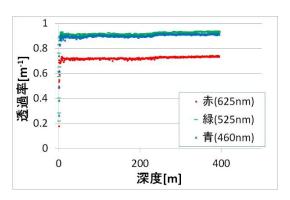


図2-32E 観測点②2回目光透過率

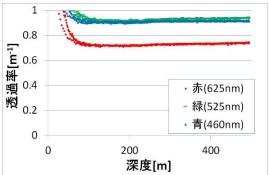


図2-32F 観測点③光透過率

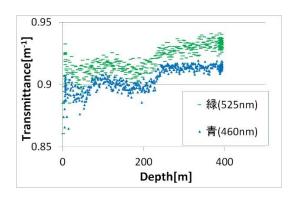
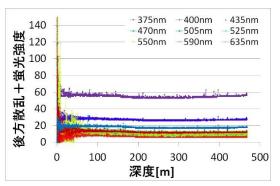


図2-32G 観測点②2回目光透過率(拡大)



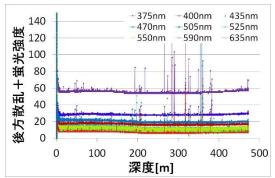
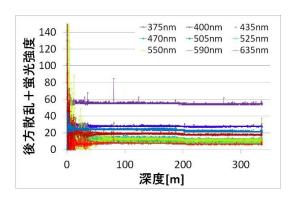


図2-33A 観測点①1回目後方散乱+蛍光強度 図2-33B 観測点①2回目後方散乱+蛍光強度



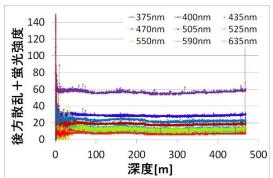
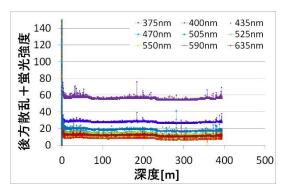


図2-33C 観測点①3回目後方散乱+蛍光強度 図2-33D 観測点②1回目後方散乱+蛍光強度



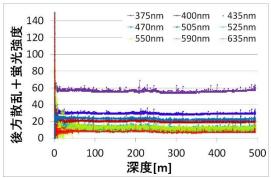


図2-33E 観測点②2回目後方散乱+蛍光強度 図2-33F 観測点③後方散乱+蛍光強度

① 3-6 第6回

福島県南相馬市役所および他1社のご協力のもと、福島県南相馬市横川ダムにて実 験を行った。試験ではラフテレーンクレーンを用いて、水面から水面下 20m 程度まで の計測を行った。試験は日の出前後で実施し、山間部であり直接太陽光は水面に届い ておらず、夜間計測に相当する計測である。計測太陽光の影響が濁度は表層で 0.5FTU、20m付近の中層で 0.7FTUで、中層のほうが高い (図2-34)。観測点の水 深は 40m 程度で、水底までの距離が比較的近いことによる影響と予想される。クロロ フィルも同様の傾向を示し、表層で約 2. Oppb、20m の中層で約 3. Oppb であった(図 2 -35)。光の透過率は深度 20m において、緑が 0.64、赤が 0.6、青が 0.47 程度であ った(図2-36)。第4回の台船「あさひ」での計測と比較すると、赤色の透過率は 0.5 から 0.6 と改善が大きいが、緑色は 0.6 弱から 0.64 程度の改善であった、逆に青 色については低下をしている。「あさひ」での計測では外乱光が入りやすく、値が高く 出やすい環境であったことを考慮すれば、クロロフィル濃度は青色への影響が少な く、赤色への影響が大きいと予想される。濁度の影響が青色に大きく赤色に小さいこ とと逆の関係である。ただし後方散乱+蛍光強度のグラフ(図2-37)を見ると、 もっとも短い波長の 375nm の値が最も高く、波長が長くなるにつれて順に値が低くな っていることがわかる。これまでの計測では 635nm の赤色が 525nm の緑よりも高い値 であることがしばしばあったが、今回はその傾向はみられない。これは懸濁物質の粒 子の大きさが影響していると考えられ、具体的には水中で浮遊する粒子のサイズが大 きかったと予想されるが、本件については継続して調査が必要である。また透過光強 度と反射光強度の関係について一見して明確な関連は見つけにくく、同様に継続した 測定と調査が必要と考える。

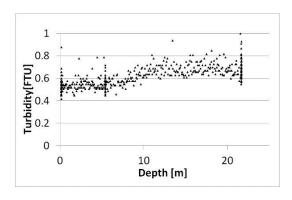


図2-34 濁度

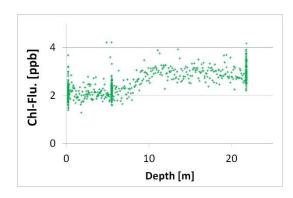


図2-35 クロロフィル濃度

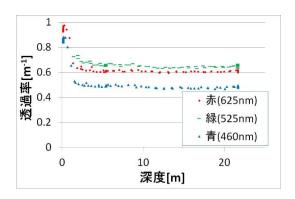


図2-36 光透過率

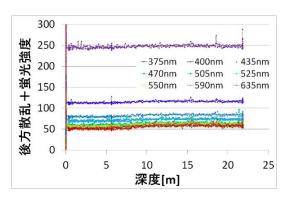


図2-37 後方散乱+蛍光強度

① -4 濁度、クロロロフィル濃度、光の透過度(伝搬光強度)の関係

これまで計測データをまとめ、濁度とクロロフィル濃度を横軸に、光の透過度を縦軸にして 3 次元散布図化したものが図 2-3 8 Aである。点群の色は発光色を表している。データには H29 年度だけでなく、H27、28 年度データを再校正した結果も含めている。これらから以下の事が明らかとなった。

i) 綺麗な水中でも、460nm (青) より 525nm (緑) のほうが透過する。

濁度およびクロロフィル濃度が低い場合でも、わずかに 525nm (緑) のほうが、460nm (青) よりも透過度が高く、有利であることがわかった。純水による吸収はおよそ 450nm 付近がもっとも小さく光が透過する[1]とされているが、海には塩分をはじめ多数の物質が溶け込んでおり、この結果となったと推測する。水中光無線通信において遠距離通信を試みる場合、使用する光は緑を第一選択とすべきである。

ii)クロロフィル濃度の下限値は濁度に依存する

図2-38Bは濁度とクロロフィル濃度の散布図である。濁度の上昇につれて、クロロフィル濃度は高くなる傾向であるが、グラフの右下にデータの空白部分が確認できる。これはクロロフィル濃度と濁度に関連がある事を意味し、濁度の上昇にともなってクロロフィル濃度の下限値が高くなる事を意味する。ただし濁度に関係なくクロロフィル濃度は高い値をとりうる。すなわち、クロロフィル濃度は濁度によってある程度予測でき、濁度情報のみから光の波長毎透過度を算出する方法も有効な方法であると考える。

iii) 綺麗な水では赤が最も透過しないが、汚い水では赤が最も透過する

図2-38Cは濁度と透過度の比較したグラフ、図2-38Dはクロロフィル濃度と透過度を比較したグラフである。 図2-38Cと図2-38Dを比較すると、図2-38Cにおける値は密集している。指数関数による回帰式を求めると、図2-38

Cの決定係数 (R^2) は、図 2-38 Dの決定係数よりすべて低い。すなわち、濁度と透過度の関係性が強い事を意味する。図 2-38 Cの指数関数の回帰式によるグラフでは、緑と青の近似曲線は交差せず、赤は青と緑の近似曲線と交差している。これは綺麗な水では赤が最も透過しない色である反面、汚い水の場合は赤が最も透過する事を意味している。赤と青の交差点は 0.79FTU で、赤と緑の交差点は 1.81FTU で発生していた。すなわち、単純に濁度を参考にして波長切り替えを試みるならば、0.79FTU で青色を赤色に変更し、1.81FTU で緑色を赤色に変更すれば良いことになる。

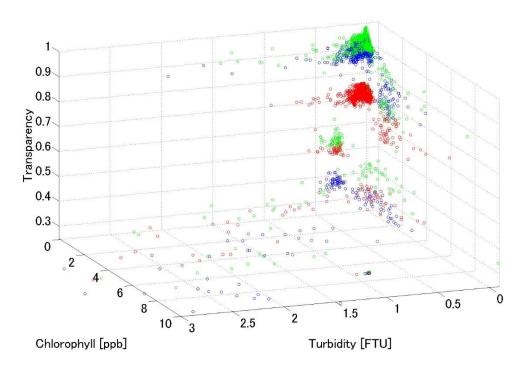


図2-38A 濁度、クロロフィル濃度、光の透過度(伝搬光強度)

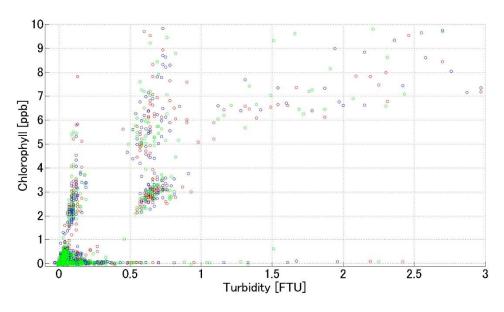


図2-38B 濁度とクロロフィル濃度

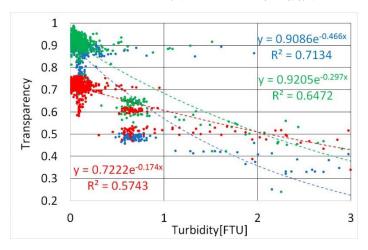


図2-38C 濁度と透過度(伝搬光強度)

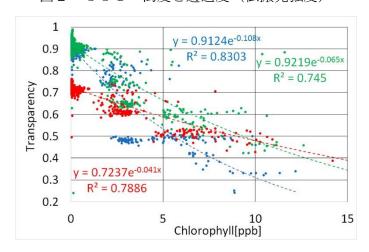


図2-38D クロロフィル濃度と透過度(伝搬光強度)

① -5 水中光無線通信に関する海域図 (チャート)

水中光無線通信において、通信距離と速度の目安を海域毎に把握することを目的として、海域図(チャート、図2-39)を作成した。海域図には海域基礎データでのデータ取得をした場所毎に、およその濁度、クロロフィル濃度、光の伝搬減衰を記載している。この伝搬減衰がどの色であるかは、それら数値が記載されている吹き出しの背景色が表す。データには平成29年度だけでなく、これまで計測した平成27、平成28年度分のデータを再補正したものも含めている。

この伝搬減衰と通信可能な距離の目安をあらわしたものが図 2 - 4 0 である。試作した水中光無線通信装置の暫定性能を基準として、通信速度を 10Mbps と仮定し、ビーム幅を 3 度、20 度、90 度として通信を行った場合、最大通信可能距離[m]と吸収係数 [dB/m]の関係をあらわしている。例えばもっとも伝搬減衰が低い鹿児島トカラ列島付近深海での 0.22dB/m の減衰の場合、3 度ビームでおよそ 120m の通信距離が期待できるが、淡路島津名港内表層付近で 2.48dB/m では 11m 程度の距離と予想される。



図2-39 計測海域毎の濁度、クロロフィル濃度および光の吸収係数

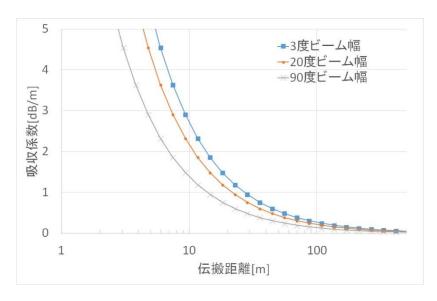


図2-40 吸収係数と通信可能距離

② 海中通信試験の実施

2-1 目的

海中通信試験の実施により、通信に適した波長、受光素子を選択し、通信距離及び速度を切り替えつつ海中で通信し、通信距離と速度の関係についてデータを取得する。

そのデータを解析し、無線通信装置の通信アルゴリズムを調整し、2.3.⑤で行う 水中光無線通信装置の受光素子の改良を実施後に再度、海中通信試験を実施し、通信性 能の向上を確認する。

②-2 日時・場所・試験者・試験方法

海中通信試験は当初予定では2回であったが、計3回実施した。また淡水の大型水槽でも通信試験を実施したので、それを含め4回の通信試験の結果を記載する。

2-2-1 海中通信試験 (第1回)

日時: 平成29年7月26日

場所:相模湾

使用船舶:海洋研究開発機構所深海調査研究船「かいれい」および搭載無人探査機「かいこう」

実施者:澤 隆雄(海洋研究開発機構)、株式会社島津製作所より5名、島津エンジニアリング株式会社より1名、エス・エー・エス株式会社より2名、愛一工業株式会社より2名

※海域基礎データのチャート化における第2回(①-2-2)と同時に実施

試験方法:

「かいこう」ランチャーおよびビークルに、水中光無線通信用の送信機と受信機をそれぞれ搭載し、深度約700m付近にてビークルを離脱、ランチャーとビークル間で光による無線通信を行う。通信中はビークルをランチャー直下に保持し、2次ケーブル繰り出し長を変化させて両者間の距離を開きながら計測する。その間、ランチャーおよびビークル部に搭載する監視カメラにて、通信光の強弱を監視しながらビークル部の水平位置を調整し、光軸合わせを行う。(図2-41A)

水中光無線通信装置は、「かいこう」ランチャーおよびビークルの後部に搭載し、両者結合時でもおよそ対向する位置関係に設置した(図2-41B)その際、ビームの広がりによる通信性能へ与える影響を確認する目的で、ビークル側にはビーム広がり角度がそれぞれ3度(狭角)および20度(広角)となる青色LDを搭載し、受光部はPMTとした。ランチャー側には20度(広角)緑色LDを搭載し、PMTとPDを設置した。今回よりマスター側PMTの受光面前には緑用バンドパスフィルターを、スレーブ側PMTには青用バンドパスフィルターを、同側PDに赤用バンドパスフィルターを取り付け、性能向上を図った。今年度の通信試験にはすべてフィルターを利用している。

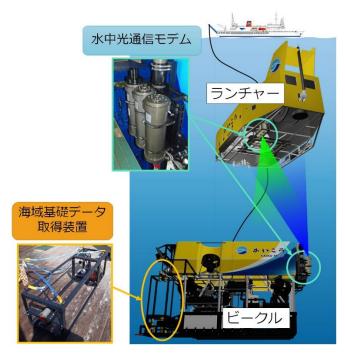


図2-41A 実験模式図



図2-41B 結合時の搭載位置関係 上赤丸内がランチャー搭載の水中光無線通信装置、下赤丸内がビークル搭載の水中光 無線通信装置

②-2-2 大型水槽通信試験

i) 日時·場所·試験者

日時: 平成 29 年 9 月 11~15 日

場所:防衛装備庁艦艇装備研究所高速水槽(図2-42A)

使用船舶:なし

実施者:澤 隆雄(海洋研究開発機構)、株式会社島津製作所より6名、島津エンジニアリング株式会社より1名、エス・エー・エス株式会社より2名、愛一工業株式会社より4名



図 2 - 4 2 A 高速水槽 長さ約 350m、幅約 6m、水深約 2.2~2.6m

試験方法:

水中光無線通信装置の一方を水槽端部に、もう一方を水槽上の移動台車から水中へ 吊り下げて設置し、台車を移動させて距離を変化させながら計測を行った(図2-4 2B)。水槽はすべてトンネル内にあり、照明の点灯/消灯により環境光を増減させ、 その影響も確認する。

今回の試験では水中光無線通信装置の発光部と受光部のみを水中に設置した。特にLD部は発光する光ファイバーを延長して、先端の発光部のみを水中に導入した。これにより水中導入部分を小型・軽量化し、水中部の首振り機構を追加し、水中導入後に光軸を変更しやすくしている。

当初計画では同時に海域基礎データ取得装置を水中に設置し、照明を消灯して外乱 光が無い状態でデータを取得する予定であったが、艦艇装備研究所の高速水槽の設備 の関係で設置が困難で計測ができなかった。そこで装置の一部である海洋プロファイ ラ (CTD) を取り外して計測し、海域基礎データの一部を取得して通信性能の評価に活 用した。

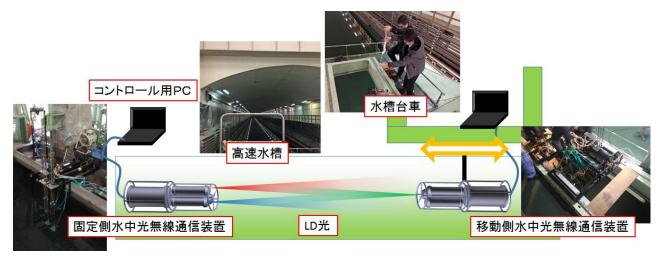


図2-42B 実験模式図

②-2-3 海中通信試験(第2回)

日時:平成30年1月24~26日

場所:兵庫県淡路市津名港沖

使用船舶:「あさひ」株式会社関海事工業所多目的 DPS 作業台船

実施者:澤隆雄(海洋研究開発機構)、島津製作所より4名、島津エンジニアリング

より1名、愛一工業より4名

※海域基礎データのチャート化における第4回と同じ船舶にて同時平行に実施

試験方法:

水中光無線通信装置を長手方向約 10mのフレームに取り付け、このフレームを使って台船両舷側から通信装置を海中に吊り下げ、水深約 5m 程度で対向するように設置し、計測を行った(図2-43A)。試験では波浪の影響で水中の光学的性質が変動する状態で、かつ太陽光による強い外乱光下で、それら影響を確認する。また第1回の海中通信試験結果より、波長切り替えでの調整パラメータに相当する濁度値を平均化しつつ、切り替え判定に一定時間を必要とするようにアルゴリズムを改良し、またエラー発生量に合わせて通信速度を上下するアルゴリズムを追加し、その効果を確認した。

加えて、水中光無線通信装置を長手方向約 15m のフレーム内に設置し、台船片弦から このフレーム半分を海中に沈め、通信装置の一方を海中に、もう一方を空中に配置する ようにし、海面をまたいでの通信を行った(図 2 - 4 3 B)。

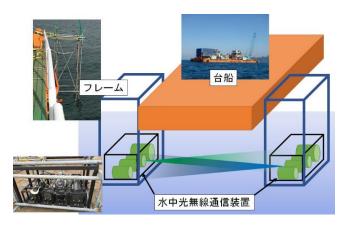


図2-43A 水中通信実験模式図

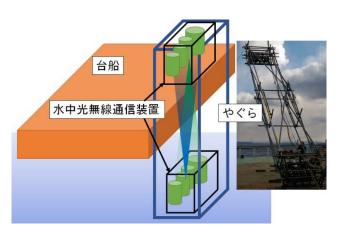


図2-43B 空中-水中間通信実験模式図

②-2-4 海中通信試験(第3回)

日時: 平成30年3月26日

場所:相模湾

※海中通信試験第1回と日時場所、試験水深、試験時刻はほぼ同一

使用船舶:海洋研究開発機構所深海調査研究船「かいれい」および搭載無人探査機「かいこう」

実施者:澤 隆雄(海洋研究開発機構)、株式会社島津製作所より5名、島津エンジニアリング株式会社より1名、エス・エー・エス株式会社より2名、愛一工業株式会社より2名

試験方法:

「かいこう」ランチャーおよびビークルに、水中光無線通信用の送信機と受信機をそれぞれ搭載し、深度約700m付近にてビークルを離脱、ランチャーとビークル間で光による無線通信を行う。通信中はビークルをランチャー直下に保持し、2次ケーブル繰り出し長を変化させて両者間の距離を開きながら計測する。その間、ランチャーおよびビ

一クル部に搭載する監視カメラにて、通信光の強弱を監視しながらビークル部の水平位置を調整し、光軸合わせを行う。水中光無線通信装置は、「かいこう」ランチャーおよびビークルの後部に搭載し、両者結合時でもおよそ対向する位置関係に設置した(第一回と同様)。

ビークル側には広角の青色 LD と赤色 LD を搭載し、受光部は PMT とした。ランチャー側は広角の緑色 LD と PMT および PD を設置した。ビークル側水中光無線通信装置と海域基礎データ取得装置を連結し、基礎データ取得装置からの情報をもとにプログラムにて波長の自動切り替えを試みた。また第 2 回の海中通信試験結果より、波長切り替えを行う濁度を変更するとともに、通信速度を自動的に上昇・下降させる判断時間を短縮し、より安定的な通信を試みた。

②-3 実験結果概要と考察

2 - 3 - 1 海中通信試験 (第1回)

試験深度である 700m~830m の濁度は 0.05FTU 以下、クロロフィル濃度も 0.05ppb 以下と低く、数値的には良好な通信路であったといえる。ただし水中ロボットの監視カメラ画像にはマリンスノーが非常に多く確認され、大きな懸濁物質が非均一に存在し、時間的にも不安定な通信路であった。

残念ながら水中ロボット側の照明のため、光の透過率および後方散乱+傾向強度の計測値にはノイズが大きく乗ってしまい、正常な値が取得できなかった。FTU およびクロロフィル濃度についてもやはりノイズが大きい傾向が確認された。通信装置や水中ロボットは強い光を常に発し、また浅深度では太陽光も存在することから,実用時には外乱光が常にある事を想定する必要がある。不確かな計測値を用いての適応アルゴリズムによる制御は、通信を逆に不安定にしてしまう可能性がある。通信路の光減衰をリアルタイムに計測する手法は、外乱光の除去が重要な課題となると考えられ、通信装置本体への影響以上に慎重に検討すべきと言える。

通信距離を徐々に伸ばしながら、送信素子、送信出力、受信素子を変え、通信速度と信号のローパスフィルタの関係を計測した結果が図2-42A~Qである。

計測結果の傾向として、以下の点が明らかとなった。

i) 通信速度を下げ、同時にローパスフィルタのカットオフ周波数を下げることにより、 通信距離が伸びる。

例えば図2-42Oの結果では、通信速度が 4、10、20Mbps ではフィルタ設定によらず通信ができなかった。通信速度 160、800kbps でもフィルタ設定 2MHz 以上では通信できなかったが、フィルタ設定を 500Hz または 1MHz とすることで通信が可能となった。これはフィルタにより受信帯域を狭めノイズを低減し、SN が向上したためと考えられる。定性的な説明となるが、カメラのシャッタースピードを遅くすることで受光量が増加し、画像ノイズを減る現象に近い。通信速度の変更は光無線通信で有効な手法で、通信の安定化に活用できることがわかった。

ii) 光出力を上げることにより、通信距離が伸び、同距離であれば速度を向上させることが出来る。

例えば図2-42 J と図2-42 L は 100m 距離での通信結果であるが、図2-42 J は光出力レベル 1、図2-42 L は光出力レベル 7 である。このレベルは送信器内部の LD 素子の発光数と関連しており、Lv7 は単純に Lv1 のおよそ 7 倍の輝度である。SN としては 8.45 dB 程度の改善となるため、今回の試験海域の水質から考慮すると、Lv1 から Lv7 とすることで通信距離は $15\sim20m$ 程度の延長できると予想した。試験結果は Lv7での 110m 距離おける通信は、Lv1 での 100m より良い結果が確認された。

また Lv7 での 120m では、Lv1 での 100m よりも悪い結果であった。これらは理論と矛盾しない結果である。

iii) ビーム幅を狭めることは、動揺の影響が強くなり性能低下を引き起こす場合もある

ビーム幅を狭めることで、光の単位面積当たりの光量が増加し、SN は向上する。ただし狭めることで光の照射面積は減少し、受光側での受信が難しくなる。搭載する水中ロボット等の動きによっては、光軸が受信素子からはずれて結果として通信が不安定となる。このトレードオフを見極めるために、ビーム幅3度と20度の二つのLD発光ユニットを搭載して試験を行った。(そのためもあり、この時は水質に応じた波長の自動切換えは実施していない)。理論ではビームを20度から3度とすることで単位面積当たり光量は約44.3倍となり、SN は約16.5dB改善するはずであった。だが試験では通信の不安定さが増加し、例えば図2-44Kの100mでの通信では、通信がまったくできなくなってしまった。ビーム幅を狭めることは搭載する水中ロボットなどのプラットフォームの安定性が十分に確保されているか、光軸補正用の特別の装置を用いる場合に限られると言える。裏返せば、プラットフォームの安定性が確保できない場合は十分に広いビーム幅で通信を実施する事で、通信の安定性が確保できると考えられる。

図2-44はリモートデスクトップ接続の試行結果をまとめたものである。距離100mまで安定して接続できた。現時点でも試作水中光無線通信装置は実用に値する装置といえる。

	1	回目			実施	日時		201	7/7/2	6 9:3	0 ~ 9	: 54	
	条件			マス	ター					スレ	ーブ		
	送信素子		広	角側L	.D(CH	1)			広	角側L	.D(CH	1)	
	受信素子			PMT(CH1)					PMT(CH1)		
	送信出力			1	1					-	1		
	通信距離						20)m					
	結果						通信	速度					
	和未	20N	1bps	10M	/lbps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	321	kbps
	Full(制限なし)	0	0			0	0	0	0	0	0		
	16MHz	0	0			0	0	0	0	0	0		
	8MHz	0	0			0	0	0	0	0	0		
	4MHz												
フ	2MHz	×	×			0	0	0	0	0	0		
イルタ	1 MHz												
周波	500kHz					0	Δ	0	0	0	0		
数	250kHz												
	125kHz					×	×	0	0	0	0		
	62kHz												
	31kHz							×	×	0	0		
	15kHz												

O:安定的にデータを受信した △:データを受信したが不安定 ×:データを受信できない

図2-44A 通信エラー確認試験

ビーム幅:20度 出力:Lv1 距離:20m

	2	回目			実施	日時		201	7/7/26	9:54	4 ~ 10	0:04	
	条件			マス	ター					スレ	ーブ		
	送信素子		狭	角側L	D(CH	2)				_	_		
	受信素子			_	=					PMT(CH1)		
	送信出力			1	1					_	_		
	通信距離						20	m					
	4± EB						通信	速度					
	結果	20N	/lbps	10M	1bps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	32k	bps
	Full(制限なし)	0				0		0		0			
	16MHz	0				0		0		0			
	8MHz	0				0		0		0			
	4MHz												
フ	2MHz	×				0		0		0			
イルカ	1MHz												
タ周波	500kHz					Δ		0		0			
数	250kHz												
	125kHz					×		0		0			
	62kHz												
	31kHz							×		0			
	15kHz												

O:安定的にデータを受信した △:データを受信したが不安定 ×:データを受信できない

図2-44B 通信エラー確認試験

ビーム幅:3度 出力:Lv1 距離:20m

	3	回目			実施	日時		2017	/7/26	10:0	7 ~ 1	0:12	
	条件			マス	ター					スレ	ーブ		
	送信素子		広	角側L	D(CH	1)				-	_		
	受信素子			_	_					APD(CH2)		
	送信出力			-	1					-	_		
	通信距離						20)m					
	結果						通信	速度		•		_	
	Ψ1 /	20M	lbps	10N	/lbps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	32k	bps
	Full(制限なし)												
	16MHz												
	8MHz					×							
	4MHz												
フ	2MHz					×							
イルカ	1MHz												
タ周波	500kHz												
数	250kHz												
	125kHz												
	62kHz												
	31kHz												
	15kHz												

O:安定的にデータを受信した △:データを受信したが不安定 ×:データを受信できない

図2-44C 通信エラー確認試験

PDによる受信を試みたが、ゲイン調整不良のため通信できず。

	4	回目			実施	日時		2017	/7/26	10:2	5 ~ 1	0:38	
	条件			マス	ター					スレ	ーブ		
	送信素子		広	角側L	.D(CH	1)			広	角側L	D(CH	1)	
	受信素子			PMT(CH1)					PMT(CH1)		
	送信出力			-	1					1			
	通信距離						40	m					
	4± EE						通信	速度					
	結果	20N	1bps	10N	/lbps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	32k	bps
	Full(制限なし)	0	0			0	0	0	0	0	0		
	16MHz	0	0			0	0	0	0	0	0		
	8MHz	0	0			0	0	0	0	0	0		
	4MHz												
フ	2MHz	×	×			0	0	0	0	0	0		
ィルタ	1MHz												
周波	500kHz					Δ	0	0	0	0	0		
数	250kHz												
	125kHz					×	×	0	0	0	0		
	62kHz												
	31kHz							×	×	0	0		
	15kHz												

○: 安定的にデータを受信した △: データを受信したが不安定 ×: データを受信できない

図2-44D 通信エラー確認試験

ビーム幅:20度 出力:Lv1 距離:40m

	5	回目			実施	日時		2017	/7/26	10:3	9 ~ 1	0:46	
	条件			マス	ター					スレ	ーブ		
	送信素子		狭	角側L	.D(CH	2)				_	_		
	受信素子			-	_					PMT(CH1)		
	送信出力			-	1								
	通信距離						40)m					
	結果						通信	速度					
	和朱	201	/lbps	10N	/lbps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	32k	bps
	Full(制限なし)	0				0		0		0			
	16MHz	0				0		0		0			
	8MHz	0				0		0		0			
	4MHz												
フ	2MHz	×				0		0		0			
ィルタ	1MHz												
周波	500kHz					0		0		0			
数	250kHz												
	125kHz					×		0		0			
	62kHz												
	31kHz							×		0			
	15kHz												

O:安定的にデータを受信した △:データを受信したが不安定 ×:データを受信できない

図2-44E 通信エラー確認試験 ビーム幅:3度 出力:Lv1 距離:40m

	6	回目			実施	日時		2017	/7/26	10:5	6 ~ 1	0:59	
	条件			マス	ター					スレ	ーブ		
	送信素子		広	角側L	.D(CH	1)			広	角側L	.D(CH	1)	
	受信素子			PMT(CH1)					PMT(CH1)		
	送信出力				1						1		
	通信距離						60)m					
	結果						通信	速度					
	和未	201	/lbps	101	/lbps	4M	lbps	800	kbps	160	kbps	32k	kbps
	Full(制限なし)												
	16MHz												
	8MHz	0	0			0	0	0	0	0	0		
	4MHz												
フ	2MHz												
イルカ	1MHz												
タ周波	500kHz												
数	250kHz												
	125kHz												
	62kHz												
	31kHz												
	15kHz												

O:安定的にデータを受信した △:データを受信したが不安定 ×:データを受信できない

図2-44F 通信エラー確認試験

ビーム幅:20度 出力:Lv1 距離:60m

	7	回目			実施	日時		2017	/7/26	11:0	0 ~ 1	1:09	
	条件			マス	ター					スレ	ーブ		
	送信素子		狭	角側L	D(CH	2)				_	_		
	受信素子			-	_					PMT(CH1)		
	送信出力			1	1					_	_		
	通信距離						60	m					
	4 ± 田						通信	速度					
	結果	201	/lbps	10N	/lbps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	32k	kbps
	Full(制限なし)												
	16MHz												
	8MHz	0				0		0		0			
	4MHz												
フ	2MHz												
イルカ	1MHz												
タ周波	500kHz												
数	250kHz												
	125kHz												
	62kHz												
	31kHz												
	15kHz												

O:安定的にデータを受信した △:データを受信したが不安定 ×:データを受信できない

図2-44G 通信エラー確認試験

ビーム幅:3度 出力:Lv1 距離:60m

	8	回目			実施	日時		2017	/7/26	11:1	0 ~ 1	1:15	
	条件			マス	ター					スレ	ーブ		
	送信素子		広	角側L	.D(CH	1)			広	角側L	.D(CH	1)	
	受信素子			PMT(CH1)					PMT(CH1)		
	送信出力				1						1		
	通信距離						80)m					
	結果						通信	速度					
	和朱	20N	/lbps	101	/lbps	4M	lbps	800	kbps	160	kbps	32k	kbps
	Full(制限なし)												
	16MHz												
	8MHz	0	0			0	0	0	0	0	0		
	4MHz												
フ	2MHz												
イルカ	1MHz												
タ周波	500kHz												
数	250kHz												
	125kHz												
	62kHz												
	31kHz												
	15kHz												

O:安定的にデータを受信した △:データを受信したが不安定 ×:データを受信できない

図2-44H 通信エラー確認試験

ビーム幅:20度 出力:Lv1 距離:80m

	9	回目			実施	日時		2017	/7/26	11:1	5 ~ 1	1:17	
	条件			マス	ター					スレ	一ブ		
	送信素子		狭	角側L	.D(CH	2)				-	_		
	受信素子			_	_					PMT(CH1)		
	送信出力			1	1					_	_		
	通信距離						80)m					
	結果						通信	速度					
	和朱	201	/lbps	10M	/lbps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	32k	bps
	Full(制限なし)												
	16MHz												
	8MHz	0				0		0		0			
	4MHz												
フ	2MHz												
イルカ	1MHz												
タ周波	500kHz												
数	250kHz												
	125kHz												
	62kHz												
	31kHz												
	15kHz												

O:安定的にデータを受信した △:データを受信したが不安定 ×:データを受信できない

> 図2-44 I 通信エラー確認試験 ビーム幅:3度 出力:Lv1 距離:60m

条件 マスター スレーブ 送信素子 広角側LD(CH1) 広角側LD(CH1) 受信素子 PMT(CH1) PMT(CH1) 送信出力 1 1 結果 Full (制限なし) 「IOMbps 10Mbps 4Mbps 800kbps 160kbps 32kbps 32kbps Full (制限なし) 16MHz ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※		10	回目			実施	日時		2017	/7/26	11:3	0 ~ 1	1:40	
送信素子 広角側LD(CH1) 広角側LD(CH1) 受信素子 PMT(CH1) PMT(CH1) 送信出力 1 1 通信距離 100m 結果 20Mbps 10Mbps 4Mbps 800kbps 160kbps 32kbps Full(制限なし) 16MHz														
受信素子 PMT(CH1) 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1		条件			マス	ター					スレ	ーブ		
送信田力 1		送信素子		広	角側L	D(CH	1)			広	角側L	D(CH	1)	
通信距離 100m Aligna		受信素子			PMT(CH1)					PMT(CH1)		
August		送信出力			1						1	1		
Full (制限なし)		通信距離						10	0m					
Full (制限なし)														
Full (制限なし)		約 田						通信	速度					
16MHz		和米	20M	1bps	10M	1bps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	32k	bps
8MHz × × × O × × 1:× 2:× x × x 4MHz		Full(制限なし)												
AMHz		16MHz												
フィルタ周波数 1MHz ○ △ ○ × 500kHz ○ ○ ○ × 250kHz ○ ○ × 125kHz ○ ○ × 62kHz ○ ○ ×		8MHz	×	×	×	0	×	×			×	×		
イルタ周波数 500kHz 〇〇〇〇× 125kHz 〇〇〇× 62kHz 〇〇〇×		4MHz							×	×	×	×		
ルタ目		2MHz							×	×	×	×		
周波数 250kHz 〇〇〇× 125kHz 〇〇× 62kHz 〇〇×	ル	1MHz							0	Δ	0	×		
数 250kHz	周	500kHz							0	0	0	×		
62kHz		250kHz									0	×		
		125kHz									0	×		
31kHz		62kHz												
		31kHz												
15kHz		15kHz												

〇:安定的にデータを受信した △: データを受信したが不安定 ×: データを受信できない

図2-44 J 通信エラー確認試験 ビーム幅:20度 出力:Lv1 距離:100m

	11	回目			実施	日時		2017	/7/26	11:4	1 ~ 1	1:45	
	条件			マス	ター					スレ	ーブ		
	送信素子		狭	角側L	D(CH	2)				-	_		
	受信素子			_	_					PMT(CH1)		
	送信出力			-	1					-	_		
	通信距離						100	0m					
	結果						通信	速度					
	心木	20N	1bps	10N	/lbps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	32k	bps
	Full(制限なし)												
	16MHz												
	8MHz	×		×		×		×		×			
	4MHz												
フ	2MHz												
ィルタ	1MHz												
周波	500kHz												
数	250kHz												
	125kHz												
	62kHz												
	31kHz												
	15kHz												

O:安定的にデータを受信した △:データを受信したが不安定 ×:データを受信できない

> 図2-44K 通信エラー確認試験 ビーム幅:3度 出力:Lv1 距離:100m

	12	回目			実施	日時		2017	/7/26	11:4	8 ~ 1	1:52	
	条件			マス	ター					スレ	ーブ		
	送信素子		広	角側L	D(CH	1)			広	角側L	D(CH	1)	
	受信素子			PMT(CH1)					PMT(CH1)		
	送信出力			-	7					-	7		
	通信距離						10	0m					
	結果						通信	速度					
	和米	20M	1bps	10N	1bps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	32k	bps
	Full(制限なし)												
	16MHz												
	8MHz	×	0	Δ	0	0	0	0	0	0	0		
	4MHz												
フィ	2MHz												
ィルタ	1MHz												
カ周波	500kHz												
数	250kHz												
	125kHz												
	62kHz												
	31kHz												
	15kHz												

○:安定的にデータを受信した△:データを受信したが不安定×:データを受信できない

図2-44L 通信エラー確認試験

ビーム幅:20度 出力:Lv7 距離:100m

	13	回目			実施	日時		2017	/7/26	11:5	5 ~ 1	2:05			
	条件	マスター							スレーブ						
	送信素子	広角側LD(CH1)							広角側LD(CH1)						
	受信素子			PMT(CH1)					PMT(CH1)				
	送信出力			-	7					-	7				
	通信距離	100m													
	結果	通信速度													
	心 木	20Mbps		10Mbps		4M	bps	800	kbps	160	kbps	32kbps			
	Full(制限なし)														
	16MHz														
	8MHz	Δ	0	0	0	0	0	1:O 2:O	1:× 2:O	0	×				
	4MHz							0	0	0	0				
フ	2MHz									0	0				
イルタ	1MHz														
周波	500kHz														
数	250kHz														
	125kHz														
	62kHz														
	31kHz														
	15kHz														

○:安定的にデータを受信した△:データを受信したが不安定×:データを受信できない

図2-44M 通信エラー確認試験

ビーム幅:20度 出力:Lv7 距離:100m

	14				実施	日時		2017	/7/26	12:1	1 ~ 1	3:07	
	AT 11												
	条件				ター			スレーブ					
	送信素子		広	角側L		1)			広	角側L		1)	
	受信素子			PMT(CH1)					PMT(CH1)		
	送信出力			-	7					-	7		
	通信距離		110m										
							\ -	\ <u></u>					
	結果							速度				T	
		20N	1bps	101	/lbps	4M	bps	800	kbps	160	kbps }	32	(bps
	Full(制限なし)												
	16MHz												
	8MHz	0	×	1:△ 2:×	1: × 2:O	×	×	×	×	×	×		
	4MHz			×	0	Δ	0	×	×	Δ	×		
フィ	2MHz			×	Δ	0	Δ	×	×	0	×		
ュルタ	1MHz			×	×	Δ	×	0	Δ	0	Δ		
周波	500kHz							0	0	0	×		
数	250kHz									0	×		
	125kHz												
	62kHz												
	31kHz												
	15kHz												

○:安定的にデータを受信した△:データを受信したが不安定×:データを受信できない

図2-44N 通信エラー確認試験

ビーム幅:20度 出力:Lv7 距離:110m

15		回目			実施	日時		2017/7/26 13:09 ~ 13:23						
	条件	マスター							スレーブ					
	送信素子	広角側LD(CH1)								_	_			
	受信素子			_	_					PMT(CH1)			
	送信出力			-	7					_	_			
	通信距離						120	0m						
	結果	通信												
	THANK	20M	lbps	10N	/lbps	4M	bps	800	kbps	160	kbps	321	kbps	
	Full(制限なし)													
	16MHz													
	8MHz	×		×		×		×		×				
	4MHz			×		×		×		×				
フィ	2MHz			×		×		×		×				
ィルタ	1MHz			×		×		0		0				
カ周波	500kHz			×		×		0		0				
数	250kHz			×		×								
	125kHz					×								
	62kHz													
	31kHz													

○:安定的にデータを受信した△:データを受信したが不安定×:データを受信できない

15kHz

図2-440 通信エラー確認試験

ビーム幅:20度 出力:Lv7 距離:120m

送信光同士の混信を避けるためにスレーブ側の発光を停止した。

16		回目			実施	日時		2017	/7/26	13:2	4 ~ 1	3:35	
	条件	マスター						スレーブ					
	送信素子		狭	角側L	D(CH	2)				_	_		
	受信素子			_	_					PMT(CH1)		
	送信出力			-	7					-	_		
	通信距離	120m											
	結果	通信速度											
	- 小木	20Mbps 10		10N	Mbps 4Mbps		800kbps		160kbps		32kbps		
	Full(制限なし)												
	16MHz												
	8MHz	Δ											
	4MHz												
フ	2MHz												
ィルタ	1MHz												
周波	500kHz												
数	250kHz												
	125kHz												
	62kHz												
	31kHz												
	15kHz												

○:安定的にデータを受信した △:データを受信したが不安定 ×:データを受信できない

図2-44P 通信エラー確認試験

ビーム幅:3度 出力:Lv7 距離:120m

	17				実施	日時		2017	/7/26	13:3	5 ~ 1	4:00		
	AT III													
	条件				ター			スレーブ						
	送信素子		· 狭	角側L	D(CH	2)		_						
	受信素子	_								PMT(CH1)			
	送信出力	7								_	_			
	通信距離	130m												
							`z <i> </i> =	\± r÷						
	結果		通信速度 20Mbps 10Mbps 4Mbps 800kbps 160kbps 32kbps											
		201	/lbps	101	/lbps	4M	bps	800	kbps	160	kbps }	32kbps		
	Full(制限なし)													
	16MHz													
	8MHz	×												
	4MHz													
フィ	2MHz													
ールタ	1MHz													
周波	500kHz													
数	250kHz													
	125kHz													
	62kHz													
	31kHz													
	15kHz													

○:安定的にデータを受信した△:データを受信したが不安定×:データを受信できない

図2-44Q 通信エラー確認試験 ビーム幅:3度 出力:Lv7 距離:130m

	水中光無線通信装置リモートデスクトップ接続試験結果											
					実施日	2017/7/26						
	距離											
		20m	40m	60m	80m	100m						
	送信素子 広角側LD(CH1)											
	受信素子	PMT(CH1)										
条 件	通信速度	4Mbps										
	フィルタ周波数		8MHz									
	送信出力		-	1		7						
	結果	0	0	0 0		0						
マス	ターPCからスレー	-ブPCへのリモー	トデスクトップ接	続を試行。								

図2-45 リモートデスクトップ接続試験

②-3-2 大型水槽通信試験

水中光無線通信装置を水槽壁面および移動台車に設置し、設置状態で光軸を微調整して試験を行った。これにより光軸ずれは最小限であり、かつ試験中に光軸が変動する事も無く、理想・理論に近い状態での試験である。光のビーム幅は第 1 回での狭い 3 度と、より狭い 0.3 度とし、それらビーム幅の比較をしつつ実施した。水槽の濁度は 0.01FTUを下回り、非常に低い値であった。クロロフィル濃度は 0.11ppb 程度で深海よりは高いが、比較的低い値であった。水槽への重量物の吊り下げが難しいため今回は海域基礎データ取得装置本体を水中に投入することができず、波長毎の光減衰は直接計測できなかった。ただし濁度の値から推測すると 0.25dB/m 程度の十分に低い値と考えられる。

試験結果をまとめたものが図2-46である。基準状態として通信速度は 20Mbps、水槽の照明は点灯、双方向通信として送信光は常時発光、ビーム幅は3度(広角)、波長は青、送信出力はLv7とし、この状態からそれぞれの値を変更させ、その変化による通信状態を確認した。その結果、以下のことが明らかとなった。

i) 外乱光は水中光無線通信に悪影響をおよぼす。 初期基準状態では 110m まで通信可能であった。第 1 回の海中通信試験ではビーム幅 3 度で 120m まで通信が確認できていることから、今回の通信では若干距離が短くなっている。濁度は十分に低いことから、光の減衰自体は第1回と大きく異ならないと予想されるため、距離の短縮はトンネル内の照明が外乱となり、通信に悪影響を与えたと予想する。照明を消灯した場合、緑色 LD を用いて距離 140m で 4Mbps の通信を確認した。また緑色 LD では距離 120m で通信速度 20Mbps が確認できた。20Mbps から 4Mbps へ速度を低下させる(帯域制限する)ことによる SN 改善の理論値は、

また、120mから140mの距離増加によるSN低下は

SN 低下値 =
$$0.25$$
dB/m x $20 + 101$ og₁₀ $(140^2/120^2)$
= 5 dB + 約 1.3 dB = 約 6.3 dB

であり、差し引きで 2.8dB 程度が照明の影響と予想される。これは今回の通信路においては距離にして 10m 強の通信距離が短くなる程度の影響である。

ii) 通信速度を落とすことにより SN が改善できる。

海中試験第 1 回と同じように、速度の変化が通信へ与える影響を確認することができた。試験では実際に通信速度を低下させることで、通信距離は明らかに延長された。例えば速度を $160 \mathrm{kbps}$ に落とすことで通信距離は $110 \mathrm{m}$ から $140 \mathrm{m}$ となり、 $32 \mathrm{kbps}$ に落とすことでさらに $160 \mathrm{m}$ まで通信が可能となった。 $20 \mathrm{Mbps}$ から $160 \mathrm{kBps}$ とすることによる SN 改善の理論値は、

SN 改善値 =
$$10*\log_{10}(\sqrt{(20\text{Mbps}/0.16\text{Mbps})})$$
 = 約 10.5dB

32kbps の場合は

となる。110mから140mへの距離増加によるSN低下は

SN 低下値 =
$$0.25$$
dB/m x $30 + 101$ og₁₀ $(140^2/110^2)$
= 7.5 dB + 約 2.1 dB = 約 8.6 dB

110m から 160m への距離増加による SN 低下は

SN 低下値 =
$$0.25$$
dB/m x $50 + 101$ og₁₀ $(160^2/110^2)$
= 12.5 dB + 約 3.3 dB = 約 15.8 dB

となる。両計算でそれぞれ約 2dB のずれがあるものの、おおむね理論値に近い値である。 速度を低下させることによる距離の延伸は、理論どおり有効な方法であることが確認で きた。なおずれの原因は、試験において距離の変化は離散的であることと、距離減衰を 0.25dB/m と仮定していること、フィルタは完全に信号を遮断しないことなどが上げら れる。 iii) ビーム幅を絞ることにより光軸ずれが発生しやすくなり、SN が改善するとは限 らない。

ビーム幅を 3 度から 0.3 度とすることで、通信距離は 110m から 130m となった。ビーム角度 θ のビームが距離 r で作る照射(球)面積は $2\pi r^2(1-\cos\theta)$ であるので、ビーム幅を 3 度から 0.3 度に狭めることにより、SN 改善の理論値は

SN 改善値 = $10*log_{10}((1-cos1.5 度)/(1-cos0.15 度))$

= 20 dB

であるが、110mから130mへの距離増加によるSN低下は

SN 低下値 = 0。 $25dB/m \times 20 + 10\log_{10}(130^2/110^2)$ = 5. 0dB + 約 1.5dB = 約 7.5dB

であり、12.5dBのかなり大きな差がある。これは光軸がずれている影響と推測される。通信装置を固定した状態でも、光軸ずれの影響が避けられなかったと考えられる。海中試験1回目でもビーム幅を20度から3度とした場合、通信距離は思ったよりも延長できなかった。今回のように装置を固定した状態でも、過度にビームを狭める事は通信を困難にする事が明らかになった。レーザー光はコリメートする事でほぼ平行光にできるが、通信装置に利用する上では現実的な選択では無いと言える。また移動体通信では、光軸ずれを補償する装置によって通信性能を向上させる事ができるとも言える。

iv) 光出力の向上により SN を改善できる。

海中試験第 1 回と同じ効果を確認できた。送信出力を Lv7 から Lv1 に落とすことにより、今回の発光 LD 部の光出力は 6.47W から 1.13W になる。これにより SN は約 7.6dB 下がる。実際の計測では 110m から 100m でエラーがあるものの通信可能で、90m では問題なく通信をしていた。その中間の 95m を通信距離とみなして、110m から 95m への距離が減少することによる SN 増加は

SN 増加値 = $0.25 dB/m \times 15 - 101og_{10}(95^2/110^2)$ = 約 3.8 dB + 約 1.3 dB = 約 5.1 dB

となる。みなした通信距離自体に誤差もあるため 2.5dB の違いがでているが、おおむ ね理論どおりと言える。出力の増加は通信性能を向上させるために有効である。

なお通信距離の上限を確認するため、通信速度を 32kbps まで低下させたところ、距離 190m での通信に成功した。このとき緑 LD を使用したが、この LD の実効出力は 4.93W である。受光素子は PMT であり、受信部 PMT はおよそ 0.025pW/mm² が最小受信感度であった。これら送信光出力と最小受信感度による理論計算をすると、計算上はおよそ 220m で通信が可能である。今回は試作装置にはまだ多くの改良の余地があることから、200m を超える通信は短期間に実現可能な、実用的な距離であると言える。

これら結果をもとに、ビーム幅を変えた場合の通信可能距離と通信距離について、試作水中光無線通信装置の性能を基準にした予測値を表 2 - 1 に示す。受信信号強度 (SN) に基づき計算し、電子回路や光学素子の応答速度による性能低下は無視ししている。1.25Gbps の速度を実現した研究[2]がすでにあり、少なくとも 1Gbps 程度までは短期間に実現可能な速度と考える。表よりビーム幅を広げることで通信可能距離は短くなり、速度も低下する傾向がわかる。それでもビーム幅 20 度ならば距離 50m で1Gbps に近い速度が実現でき、ビーム幅 90 度でも 20m 距離であれば 1Gbps の速度が出せると予測される。

	+ 准 夕 ル	通信速度	フィルタ	符号	照明	ビーム幅	受信素子	波	 長	送信出力					
	基準条件	20Mbps	8MHz	4B/5B	あり	3度	PMT	青	青	7					
		-						マスタ側	側:60lx スレー	ーブ側 : 370lx					
		変更条件													
	結果	変更なし	通信速度 (160kbps) フィルタ (62kHz)	符号 (MAN)	照明 (なし)	変更余件 ビーム幅 (0.3度)	受信素子 (APD)	波長 (緑)	波長 (赤)	送信出力 (1)					
	50m	0					0	0		0					
	60m	0					0	0		0					
	70m	0					0	0		0					
	80m	0					0	0		0					
	90m	0					0	0		0					
	100m	0					×	0		Δ					
	110m	0						0		×					
诵	120m	Х	0			0		0							
通信距離	130m		0			0		×							
	140m		0		X (狭角4Mbps○) (緑4Mbps○)	×									
	150m		X (32kbps O)		×										
	160m		(32kbpsO)			(32kbpsO)		(32kbpsO)							
	170m					(32kbpsO)		(32kbpsO)							
	180m							(32kbpsO)							
	190m							(32kbps∆)							
	200m														

図2-46 通信エラー確認試験結果

表2-1 ビーム幅を変えた場合の通信可能距離と通信距離

Range[m]	Speed[Mbps]	Speed[Mbps]	Speed[Mbps]		
	@3deg. beam width	@20deg.	@90deg.		
20	95, 800	9, 830	510		
50	5, 680	583	30. 2		
100	51. 3	5. 26	0. 273		
150	0. 463	0. 047	0. 002		

[※]濁度=0.01[FTU]、クロロフィル=0.01[ppb]、波長=460[nm] (青)、受光素子=PMT

②-3-3 海中通信試験(第2回)

①-3-4で実施した第 4 回海中伝搬に関する基礎データのチャート化の試験と同海域である。ただし通信試験では港湾内から出て試験を実施した。濁度は 0.5FTU で、チャート化の試験時の 0.75FTU よりも若干下がっており、光の透過率もチャート化の試験より改善した環境と予想される(浅深度のため計測できなかった)。試験では 20m 距離で 20Mbps の通信を確認した。ビーム幅は 20度である。このとき図 2-40から求められる減衰係数はおよそ 1.0dB/m となり、透過率でおよそ 0.8 と予想された。これはこれまでの試験結果と矛盾しない。水深 5m で太陽光も強いため、通信路としては悪いケースだが、それでもこの距離の通信は安定して実施可能と言える。この試験を通じて以下の事項を確認した。

i)海面を跨ぐ水中~空中間の通信が可能

海面を跨いだ通信試験を実施し、特に問題なく通信ができることが確認できた(図 2 -47)。瀬戸内海であるため波浪は $1\sim2m$ と比較的低いが、当日は風が強く白波があり、波面はかなり乱されていた。海中の伝搬距離は約 5m、気中の伝搬距離は約 5m、合計 10m 程度の短い通信距離であったものの、通信は一度も途切れず安定していた。

ii) 通信速度とLDを切り替えるアルゴリズムの動作を確認

この試験では適応的に通信をするアルゴリズムの一部を実装し、試験を行った。具体的には通信エラーに対応して通信速度を 32k、160k、800k、4M、10M、20M に自動的に変更し、また一定濁度を超える場合に通信チャンネルを切り替え、送信波長を赤と青の間で自動的に切り替える試験を実施した。そして実際に通信速度が 20Mbps まで自動的に上昇することを確認し、通信エラーが多い場合に 32k まで速度を落として通信を安定化させる動作を確認した。双方向通信の兼ね合いで青と赤の切り替えとしている。ただしチャート化試験で明らかとなった切り替えを考慮すべき濁度 0.75FTU を越える値はほぼ計測されなかった。そのため実際には切り替え不要の場面であったが、まれに FTU が1 を超える場合などで波長が切り替わり、アルゴリズムの機能を確認した。

iii)SNが低い場合、データのエラー以外に通信上の課題がある

通信符号による SN 改善効果を確認するため、RS 符号、ターボ符号、LDPC 符号の三種のデータを送受信し、エラー解析を行った。RS 符号は 8bit、符号長は 204、メッセージ長は 188 とし、符号化率は約 92.1%である。ターボ符号では符号長を 5112、保持データ数は 4、生成多項式は「01101」と「10001」、符号化率は 50%である。LDPC 符号は DVB-S.2 規格に準じて符号長を 64800、符号化率を 90%とした。これら符号化ずみデータをあらかじめ準備し、水中光無線通信装置の一方からバイナリデータとして送信し、反対側の水中光無線通信装置で記録を行った。この送受信を経由したデータを復号し、オリ

ジナルデータと比較することで、符号の違いによるエラー低減率の違いの計測を試みた。送受信において RS 符号の送信では 92 個が、ターボ符号の送信では 96 個が、LDPC 符号では 9 個のデータパケットが相手側に到達し、記録された。この到達したデータパケットを解析すると、すべて送信データパケットと同一であった。裏返せば SN 不足の際に、データビットの反転が記録される以前に、別の通信上の問題があったことになる。今回の試作装置では UDP/IP 通信に準じてデータの送受信を行っており、IP ヘッダ部で発生したエラーはチェックサムにより検出され、パケット全体が破棄される。しかしそれ以降のデータ部分のエラーはそのまま転送されるはずである。データ部分のエラー発生時にヘッダ部も同様にエラーが発生する可能性は高いが、しかし今回の試験すべてでたまたまヘッダ部にエラーが集中し、データ部だけにエラーが発生する事がなかったとは考え難い。

一つの可能性として、同期不良の発生が考えられる。今回の試作水中光無線通信ではベースバンド伝送を行っている。これは可視光の周波数が 400-800THz と非常に高く、いわゆる FM 変調回路の構成が難しいためである。これは同様に波長の干渉を利用する事が難しい事でもあり、例えば電波無線通信で一般的な PLL 回路の構成も、光無線通信では難しい。そこで今回の試作水中光無線通信装置の同期回路は、光ファイバー通信で広く用いられる 4B/5B 伝送路符号化を利用して同期を取っている。光ファイバー通信と比較すると水中光無線通信は、伝搬減衰が高く光軸が基本的にずれた状態での通信となるため、受信側には 50dB 以上の受光量の変動を考慮して、受信せねばならない。 さらに移動体通信では受信同期のタイミングも常に変動する。どちらも光ファイバー通信では通常発生せず、対応しきれずに同期に失敗したと予想する。同期に失敗するとデータ量が増減するため、IP ヘッダ部の記録されたデータ量との相違が発生し、チェックサムエラーによりデータが破棄される。今回はこの現象が頻発したと予想する。水中光無線通信の同期方法については電波無線技術よりも有線光ファイバー通信の技術のほうが親和性が高く、今後の重要な研究要素と考える。



図2-47 海面をまたぐ通信試験

青い光は水中からの通信光、緑の光は空中からの通信光。カメラは空中側の通信装置 付近に設置され、水中側に向けている。

②-3-4 海中通信試験(第3回)

第 2 回の結果をもとに再調整した波長と速度の自動切換えアルゴリズムの検証を実施し、エラーレート 0%での通信速度の上昇(装置間距離 20m で最高設定速度 4Mbps までの上昇)と、下降(エラーレート 10%以上での最低速度)を確認し、問題なく機能することを確認した。ただし発光色を青と赤に切り替える際、実際の海域の濁度値は非常に低いため、アルゴリズム検証のために一時的に切り替え濁度値を低い値(0.01FTU)に変更し、反応させるようにした。その結果、濁度値を下回る場合は青、上回る場合は赤色に変更する事を確認した。

またランチャー側に IP カメラを搭載し、スレーブ側光無線通信装置に接続し、マスター側からの遠隔コントロールおよび画像の確認を試みた(図2-48、図2-49)。動画像として 720p の映像はリアルタイムに伝送され、またカメラの向きを変更するなどの動作がリアルタイムで出来ることも確認した。



図2-48 水中光無線通信装置と IP カメラ

かいこうランチャー後部上面に搭載されている。容器は右から左に順に、水中光無線 通信用主耐圧容器、IPカメラ用電源およびHUB、IPカメラ。



図2-49 IPカメラの画像

かいこうランチャーの内部を覗き込んでいる。

オレンジのケーブルはランチャーとビークルを結ぶ、かいこう2次ケーブル。

③ 通信アルゴリズムの構築

③-1 システムの物理モデルの修正

海域基礎データ取得装置で得られた海洋プロファイリングの結果から、 $460 \, \mathrm{nm}$ の青色 光の透過率は、 $525 \, \mathrm{nm}$ の緑色光よりも低いことが分かった。それを裏図けるように、② -3-1 第1回の通信試験と②-3-2 大型水槽試験の結果で、緑光による通信は青光よりも遠距離で通信が可能であった。少なくとも今回用いた青色 LD の発光波長 $460 \, \mathrm{nm}$ と、緑色 LD の $525 \, \mathrm{nm}$ を比較した場合、濁度やクロロフィル濃度にかかわらず $525 \, \mathrm{nm}$ の光のほうがより減衰が少ないと言える。物理モデルの通信路において、よく知られている理論的な波長毎減衰率の値では青色が過大評価されているとも言える。この理論と実際の差異は図 2-40 の通信可能距離の計算ですでに反映しているが、今後に通信システムの設計をする場合にも十分に考慮すべきである。

③-2 通信アルゴリズムの調整

適応アルゴリズムにおける色の変更は、現在の送信光を赤色にするか否かの選択に簡略化される。例えば緑光を使っている場合は濁度やクロロフィル濃度に応じて赤色への変更が検討され、青光を使っている場合もやはり赤色への変更のみが検討対象となる。 具体的な変更点は①-4ii)より

- ・ 濁度 1.81FTU 以上かつクロロフィル濃度 9ppb 以上で赤色、それ以外は緑色
- ・緑色が使えない場合、濁度 0.79FTU 以下かつクロロフィル濃度が 3ppb 以下で青色、 それ以外で赤色

となる。

ただし試作した水中光無線通信装置は、マスター側のみ海域基礎データ取得装置が接続される構成であるため、マスター側のみ通信アルゴリズムが適用される。スレーブ側でのアルゴリズムの調整は、マスター側の海域基礎データ取得装置の情報を光通信データに乗せてスレーブ側に送信し調整するか、もう一台の海域基礎データ取得装置製作し、スレーブ側にも接続する方法が考えられる。いずれも技術的には難しい事ではないので、将来的な利用段階での検討事項とし、研究対象からは除外する。

なお平成 28 年度の研究成果より、ノイズの時間変動や多重反射、分散の影響が現状の光無線通信においてほぼ無視できるため、SN および BER 計算以上の情報は時間領域での数値シミュレーションでは得られないことが明らかとなった。そのため通信アルゴリズムの調整においては、追加の数値シミュレーションについては実施していない。

③-3 通信アルゴリズムの構築

通信アルゴリズムの修正によって構築したフローチャートを図2-50ABに示す。 透過光強度の計測装置については、通信試験中の通信光そのものや水中移動体が利用 する照明光が計測値へ与える影響が大きく、利用において相応の対策が必要と分かった ことから、今回は実装しなかった。透過光強度の計測では計測光路を長くとる事で精度を上げることから、装置が大きくなりがちで、また外乱光を遮断するカバー等も大きくならざるを得ない。計測値そのものは最重要であるが、実装においては利用を慎重に考えるべきである。将来的に取得装置の小型化・高精度化が進む事を見据えつつ、利用の可否を継続的に検討すべきである。

反射光強度に関しては透過光強度ほど波長の違いに対応しての明確な関係性が不明瞭であったことから、現時点ではアルゴリズムからは除外する。ただしデータ解析をさらに進めることで関連を数式化できる事も予想され、利用の可否については継続的に検討すべきと考える。

符号については現時点で動的に変更する事は不要と考えられる。海中通信試験結果から同期(位相ロックループ)の性能が総合的な通信性能に与える影響が大きいことがわかったが、符号の変更はかならず再同期が必要となる作業であるため、頻繁な変更は通信におけるオーバーヘッドを増加させ、性能低下を引き起こす可能性がある。そのため現時点では動的な、積極的な変更による利点は少ないと予想する。同期の問題は SN に直接影響を与えないため物理モデルに含まれない要素ではあるが、実機構成における課題として非常に重要であり、低 SN での確実な同期法は今後に研究すべき重要課題である。

素子については、原則 PMT で良い。心配した環境光による通信不良や、近距離での素子損傷は現在のところ発生しておらず、動的に素子を切り替える動作は不用と考える。コストや耐久性などの観点から、あらかじめ搭載する素子を固定採用すべきである。

これら調整後に②-3-4第3回の通信試験を実施し、青LDと赤LDが濁度情報に基づいて切り替わることを確認した。ただし同海域の濁度は青光を利用する範囲で、原則切り替えが不要な範囲であったため、意図的に変更のしきい値(0.79FTU)を0.1FTUまで下げ、自然と切り替わるようにして確認した。クロロフィル濃度についても同様に切り替え不要な範囲で、また現在の海域基礎データ取得装置はクロロフィル濃度をリアルタイムに試作水中光無線通信装置に送ることができないため、変更の確認は行っていない。

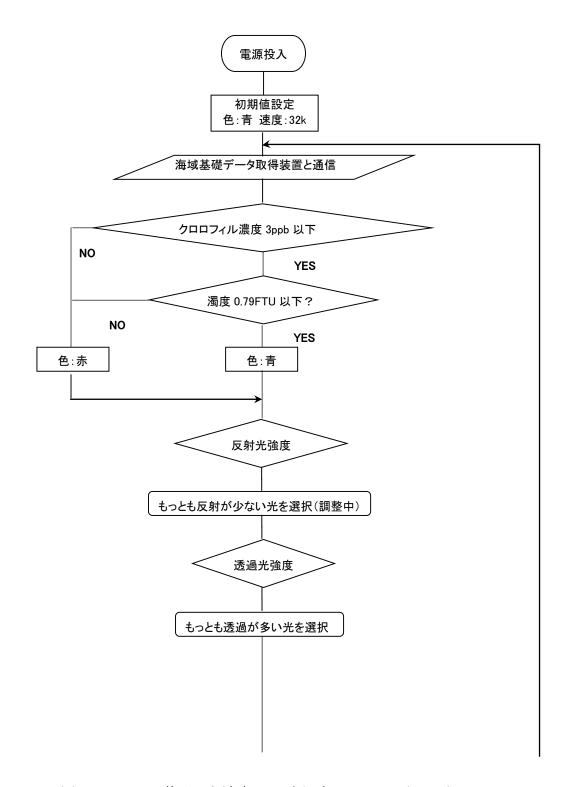


図2-50A 修正した適応アルゴリズムのフローチャート

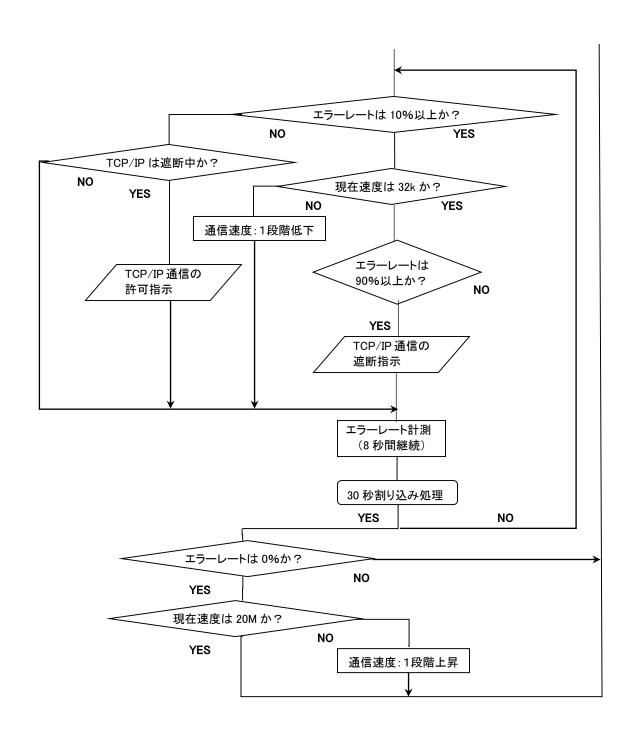


図2-50B 修正した適応アルゴリズムのフローチャート (続き)

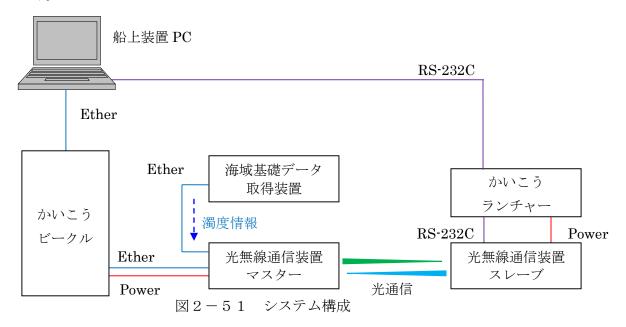
④ プログラムの作成(再委託先:エス・エー・エス株式会社担当)

④-1 目的

水中において光無線通信装置(マスタ/スレーブ)間で通信し、海域基礎データ取得装置で測定した濁度情報を基にLDを切り替えて通信するとともに、通信エラー状態を確認しながら通信速度を自動的に切り替えるソフトウエアを製作する。

④─2-1 構成概要

本システムは「海域基礎データ取得装置」ならびに「光無線通信装置」で構成され、「光 無線通信装置」は信号を発信するマスターと信号を受信するスレーブに分割される(図 2-51)。



◎海域基礎データ取得装置

各センサ系のデータ (濁度情報) を取得し、Ethernet 上にリアルタイムにデータ値を送出する。海域基礎データ取得装置を図 2-5 2 に示す。



図2-52 海域基礎データ取得装置

◎光無線通信装置マスター

LD による無線通信を、船上からの手動操作、あるいはタイマ機能による自動送出により行う。光無線通信装置マスターを図2-53、光無線通信装置を図2-54に示す。



図 2 - 5 3 光無線通信装置マスター (ROV「かいこう」搭載状態) 写真奥から順に PMT, 青 LD (3 度ビーム幅), 青 LD (20 度ビーム幅)



図2-54 光無線通信装置(容器開放状態) 左から順に緑LD,赤LD,青LD,PD

◎光無線通信装置スレーブ

LD による無線通信を、船上からの手動操作、あるいはタイマ機能による自動送出により行う。

また、RS-232C経由で船上装置に対してステータス通知を行い、船上装置からの操作を行うことができる。



図2-55 光無線通信装置スレーブ (ROV「かいこう」搭載状態) 中央から左から右に向かって順に、PD、PMT、緑 LD(20 度ビーム幅)

4-2-2 IPアドレス一覧

データ伝達ネットワーク内でのIPアドレスを表2-2に定義する。

表2-2 IPアドレス一覧

ノード	IP アドレス	備考
船上装置 PC	192. 168. 0. 100	
海域基礎データ取得装置	192. 168. 0. 10	
光通信装置マスターPC	192. 168. 1. 100	
光通信装置マスター変復調回路	192. 168. 0. 110	
光通信装置スレーブ PC	192. 168. 1. 200	
光通信装置スレーブ変復調回路	192. 168. 0. 210	

④-3 海域基礎データ取得装置

海の濁りと光伝播を計測する。

計測したデータはリアルタイムに Ethernet 上に送出し、光無線通信装置に伝達する。

CPU ボード: GIGABYTE GB-BACE-3000

IO ボード: CONTEC USB I/O Terminal AIO-160802AY-USB

LAN HUB: Logitec LAN-SW03PSBE

バッテリ:トラストテクノロジー Mobile Power Bank 31200 濁度計: JFE アドバンテック 多波長濁度計 MFLW10W-CAD-S21

④-4 光無線通信装置

変復調回路を経由して、マスター側からスレーブ側にデータの転送を行う。 その際、発光色や受信素子を変更して水中通信を行う。

内部機器構成はマスター/スレーブ共に同等とする。(LED 等の構成は変わる。)

CPU ボード: Lex SYSTEM 2I385A

IO ボード: CONTEC USB I/O Terminal AIO-160802AY-USB

LAN HUB: Logitec LAN-SW03PSBE

バッテリ:トラストテクノロジー Mobile Power Bank 31200

変復調回路:東洋電機 装置

アプリケーション: Windows アプリケーションとして作成する。

④─5 マスター側アプリケーション概要

マスター側アプリケーションは主に以下の機能を持ち、手動ならびに自動での通信試験を行えるものを作成する。

- ○手動発光機能
- ○タイマ制御発光機能
- ○シナリオ制御発光機能

- ○LD 容器状態(温度等) 監視機能
- ○送受信データロギング機能
- ○自動通信機能(通信速度の自動変更)
- ④-5-1 自動通信機能の概要

マスター・スレーブ間で双方向通信を行える状況下で、マスター側で自動通信開始操作を行うと、マスター側はスレーブ側へ自動通信用のパケットデータの断続的な送信を開始する。

スレーブ側は一定時間内に受信した自動通信パケットを検査しデータが欠けていないかを調べ、エラーレートを算出し、マスターへエラーレート情報を送信する。マスター側は一定時間ごとにスレーブから送られてきたエラーレートを確認し、エラーレート 0%ならば通信速度を1段階上昇させ、10%以上ならば通信速度を1段階下降させる。通信速度の変更に伴い受信素子のローパスフィルタ値を適した値に変更する。また、海域基礎データ取得装置から取得した濁度値が、事前に設定した閾値を超えていた場合は、送信光の波長を濁りの影響を受けにくい赤色に変更する。

上記の処理をソフトで自動的に行うことにより、水中の環境が変動している条件下に おいて安定した双方向通信状態の維持を図るものである。

これら機能は海中通信試験第2回前と第3回前の計2回、通信アルゴリズムの改良に伴って適宜プログラムの修正を実施する事で実現している。

④-6 スレーブ側アプリケーション概要

スレーブ側アプリケーションは主に以下の機能を持ち、手動ならびに自動での通信試験 を行えるものを作成する。

- ○レスポンス発光機能
- ○手動発光機能
- ○LD 容器状態(温度等) 監視機能
- ○送受信データロギング機能
- ○RS-232C 経由でのステータス通知、操作コマンド受付機能
- ○送受信データロギング機能
- ④ 7 システム内通信フォーマット (海域基礎データ取得装置データ伝達プロトコル) 海域基礎データ取得装置から光通信装置や船上装置に対してデータを伝達する際の プロトコルを規定する。

④─7-1 ネットワーク構成概要

海域基礎データ取得装置からのデータは Ethernet を利用して発信する。

発信先アドレス: ブロードキャスト IP アドレス (特定ポートに対し Ethernet 上の全ノードに対して発信)

通信プロトコル: UDP プロトコル

発信周期: 1 Hz

④-7-2 ポート番号

MCCP メモリ情報は表2-3に示すポートに対して発信される。

表2-3 MCCPメモリ情報発信ポート先

ポート番号	データ種類	備考
9010	海域基礎データ	

4 - 7 - 3 通信フォーマット

濁度情報について、データフォーマットを記述する。

データは全て ASCII 形式とし、パラメータ間はカンマ(、)で区切られる。

:、日時、濁度、深度、反射光 375nm、反射光 400nm、反射光 635nm、反射光 435nm、反射光 470nm、反射光 505nm、反射光 525nm、反射光 550nm、反射光 590nm、透過光赤、透過光青、透過光緑[CR][LF]

◎ヘッダ部

":"固定。

◎フッダ部

CR·LF(0x0D、0x0A)固定。

◎データ部

○日時

以下の表示形式で通信パケット送出時刻を表す。

YYYY/MM/DD hh:mm:ss

YYYY: 西暦 4 桁

MM:月2桁

DD: 日2桁

hh:時2桁(24時間制)

mm:分2桁

s s: 秒 2 桁

例) 2017年1月2日 11時22分33秒

2017/01/02 11:22:33

○深度

深度值。小数点表示有。

例)深度値:200.5

○濁度

濁度值。小数点表示有。

例) 濁度値: 2.0326 2.0326

○反射光 375nm~590nm 反射光強度値。小数点表示有。

例)反射光強度値:1.01 1.01

○透過光 赤・青・緑 透過光強度値。小数点表示有。

例)透過光強度値:1.01

④-8 光通信装置スレーブステータスデータ伝達プロトコル 光通信装置のスレーブから船上装置に対してデータを伝達し、船上装置からの際のプロトコルを規定する。

④-8-1 ネットワーク構成概要

光通信装置からのデータは RS-232C を利用して発信する。

ボーレート:38400bps ビット長:8ビット

ストップビット:1ビット

パリティ:なし

- ⑤ 水中光無線通信装置の改良(再委託先:株式会社島津製作所担当)
- ⑤—1 目的

平成28年度に製作した光無線通信装置の改良、追加構成品の設計、製作。

- ⑤-2 光無線通信装置の改良詳細
- (5)-2-1 PMT ユニット AGC 機能追加改造

平成 28 年度に製作した PMT ユニットでは、PMT の感度を高く設定し固定していたため、通信可能な信号強度範囲が非常に狭いものであった。これを改善するため、AGC(自動感度制御)機能を追加する改造を行った。これにより、信号強度が大きな場合でも、通信が可能となり、PMT ユニットの使い勝手が大幅に改善された。

⑤-2-2 APD ユニット設計、製作

平成28年度ではSi-PIN PDを使用するPDユニットを製作した。 この改良として、新たに、APDを使用するPDユニットの設計、製作を行った。 このユニットについては、通信距離延伸のため、以下の機能追加を行った。

- ・フィルタ帯域可変機能
- ・アンプゲイン可変機能
- ・ユニット制御用通信機能

また、環境光ノイズ低減の為、視野を制限するフードと、素子受光面前にバンドパス 光学フィルタを追加した。

⑤ ─ 2 − 3 PMT ユニット新機能追加改造

APD 使用 PD ユニットと共通の新機能を追加した。視野制限フードも同様に追加した。

⑤-2-4 コントロールユニット新機能追加改造

コントロールユニットに対して、以下の新機能追加の為の改造を行った。

- ・受信波形モニタ用オシロスコープ内蔵
- ・PD ユニット、PMT ユニットとの制御通信機能追加
- 変調速度設定可能範囲拡大

⑤ - 2 - 5 PMT ユニット低ノイズ化、高感度化改造

深海試験①後、PMT ユニットが他のユニット由来のノイズを信号として取り込んでしまうことが判明したため、これを低減するための改造を行った。また、PMT のゲインを限界近くまで使用するための改造も同時に行った。

⑤-3 関連要素開発

⑤-3-1 動揺補償および指向角変更技術実験装置製作

送受信双方に、光線方向の変更機構を組み込んだ通信実験装置を製作した(図2-56)。この実験装置は、ビームの指向角(広角ビーム、挟角ビームを可変)を変更する機能も有する。

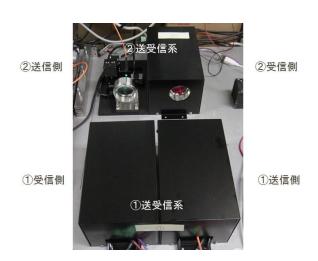


図2-56 動揺補償および指向角変更技術実験装置

通信光の半分をハーフミラーで PSD に導入し光の到来方向を検知、それを元にステージモーターを使って送受信素子の位置を変更し受光素子中央に送信光が来るようにする。

⑤-3-2 PMT ユニット通信可能距離延伸検討、実験

主に光信号論理値変換における認識閾値の最適化検討、実験を行った。環境光ノイズが小さい深海では、信号光由来のショットノイズが主ノイズ源であるため、光信号伝送において完全点灯、完全消灯の二レベルの矩形波変調を行う場合、完全消灯時は極端にノイズが小さい状態となる。光強度をハイ、ローの論理値へ変換する際その閾値を最適化すれば、閾値を光信号強度の平均値に設定した場合に比べ、通信に必要な光強度を最小で1/4程度にすることが期待された。このための実験を行った結果、閾値を下げた場合、イーサネット最小パケットサイズにおいては、半分程度の信号強度で閾値を平均値とした場合と同等のパケット通過率となった。この実験では閾値設定を手動で行ったが、閾値を下げ過ぎた場合、逆に通信誤りが増えてしまう。自動化する場合は、過渡的にこのような閾値設定状態を通過する可能性が高いため、簡易な誤り訂正機能を導入することが望ましい。

⑤-3-3高速送受信実験

既存の赤 LD ユニット、APD ユニットに対して、光信号強度レベルを増やす改造を行い 100Mbps の通信を試みた。光信号レベルの変更は、点灯する LD の数を増減することで行ったが、この方式では、光の照射方向によって異なる信号レベルの比率が変化するため、ピーク信号レベルをレベル数で単純に分割した閾値によって論理判定することはできないことが判明した。これを解決するため、送信側で、信号をスクランブル化(擬似乱数を加算)し、各レベルの出現頻度を均一化したうえで、受信側で、10ms 間の 1000 サンプル AD 変換結果から、高頻度値を各レベル段階と判定するソフトウエアを組み込むこととした。結果、3 レベルの強度レベルを使用して、陸上で、100Mbps にて、1kbytesの疑似乱数パケットを安定送受信可能な状態を構築できた。

⑥ プロジェクトの総合的推進

円滑にかつ効率的に本研究を推し進めるため、本年度は関連機関・協力者と合計 3 回 の打ち合わせを実施した。海域試験時は関係各位が自ずと集まり打ち合わせも綿密に行われたが、①および②で日時等の記載があることから、ここでは再掲しない。また当初 予定では国外の工業技術研究院(台湾)の施設等を訪問しデータ交換等実施する予定であったが、スケジュールの都合で実施しなかった。

⑥-1 第1回

日時: 平成29年8月31日

場所:防衛省市ヶ谷本部(市ヶ谷)

参加者:土志田 実、石田 祐希子(防衛装備庁)、澤 隆雄、他1名(海洋研究開発

機構)、島津製作所より2名、エス・エー・エスより2名

打ち合わせ内容:

7月26日に実施した実海域における光無線通信試験結果の報告を主に、現時点まで の成果のまとめと課題を共有し、今後の研究の方向性についての議論を行った。

⑥-2 第2回

日時: 平成29年12月5日

場所:海洋研究開発機構横須賀本部(横須賀)

参加者:澤 隆雄(海洋研究開発機構)、島津製作所より3名

打ち合わせ内容:

これまでに得られた研究成果から得られた知財について、特許申請に記載する内容と 報告時期について議論した。

6-3 第3回 (キックオフミーティング)

日時:平成30年2月6日

場所:海洋研究開発機構東京事務所(内幸町)

参加者:土志田 実、石田 祐希子 (防衛装備庁)、澤 隆雄 (海洋研究開発機構)、島 津製作所より5名、エス・エー・エスより2名、愛一工業より2名

打ち合わせ内容:

本年度の最終成果報告を見据え、本研究を通じて明らかとなったことを報告するととも に、翌月3月の海域試験の実施に向けての意見交換を行った。

- 3. 成果の外部への発表及び活動
- 3. 1 論文、口頭発表展示

①論文発表

- Takao Sawa, Naoki Nishimura, Takeyoshi Kumagai, Akio Ichikawa, Shinpei Goto, "A profiler for underwater optics" Techno-Ocean2016, 1D.3, October, 2016
- 【2】 澤 隆雄、杉本 文孝、西村 直喜、東條 公資、"水面をまたぐ光無線通信 の基礎試験" 2016 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、B-5-27、pp. 297、2016
- 【3】 澤 隆雄、"光電子増倍管を用いた適応型水中光無線通信の研究"防衛装備庁技術シンポジウム 2016、2016
- 【4】 澤 隆雄、"水中可視光通信"可視光通信ワークショップ (VLCWS2016)、2016
- 【5】 澤 隆雄、東條公資、西村直喜、熊谷剛愛、伊藤伸、"赤潮時における光の波長毎透過強度"ブルーアース 2017、BE17-P82、2017
- 【6】 澤 隆雄、西村 直喜、東條 公資、伊藤 伸、"波のある水面をまたぐ光無 線通信の水槽試験" 2017 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、B-10-50、p. 166、 2017
- 【7】 澤 隆雄、西村 直喜、東條 公資、伊藤 伸、"水槽および海域における水中光 無線通信試験" 2018 年 電子情報通信学会総合大会、AS-1-6、pp. s-11~s-12、2018
- [8] Takao Sawa, Naoki Nishimura, Shin Ito, "Wireless Optical Ethernet Modem for Underwater Vehicles" 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 2018
- [9] Takao sawa, Naoki Nishimura, Shin Itoh, "Underwater visible light communication" 2nd International Conference and Exhibition on Visible Light Communications (ICEVLC2018), 2018
- 【10】 澤 隆雄、"光の Wi-Fi で水中でも SNS ができる?~水中可視光無線通信について~" 海洋研究開発機構研究報告会 JAMSTEC2018、 2018
- [11] Takao Sawa, Koji Tojo, Naoki Nishimura, Shin Ito, "Laser Diode Based Underwater OpticalWireless Communication", The 7th Laser Display and Lighting Conference 2018 (LDC'18), 2018
- 【12】 澤 隆雄、"光通信が深海にやってきた! 何のために、どうやって?—" ワイヤレス・テクノロジー・パーク(WTP)2018、2018
- 【13】 防衛装備庁技術シンポジウム 2017、2017
- 【14】 澤 隆雄、"水中移動体との無線 LAN 通信" オプトロニクス 8 月号、pp. 72-77、2017
- 【15】 澤 隆雄、西村 直喜、東條 公資、"水中可視光通信" 電子情報通信学会 誌 Vol. 101、 No. 1、pp. 52-58、2018

②特許

【1】発明の名称:水中用レーザ光源、発明者:西 亮祐、東條 公資、西村 直喜(株式会社島津製作所)、出願登録区分:出願、出願番号および出願日:2018-063804(2018年3月29日)、出願区分:国内

③装置展示

- 【1】展示場所:海洋研究開発機構横須賀本部一般公開、展示内容:海域基礎データ取得装置、日時:H28.5.21
- 【2】展示場所:テロ対策特殊装備展(SEECAT)、展示内容:水中光無線通信装置、日時: H29.10.11-13
- 【3】展示場所: 2nd International Conference and Exhibition on Visible Light Communications (ICEVLC2018)、展示内容: 水中光無線通信装置、日時: H30.3.16

④プレスリリース

【1】発表名:水中光無線通信による100m超の20Mbps 双方向通信に成功、~水中光Wi-Fiの構築及び水中観測機器のIoT化へ大きく前進~、日時: H29.10.2、内容: H29.8.26に実施した実海域試験の結果を中心に、これまでの研究成果を発表した。

4. まとめ、今後の予定

平成27年度から平成29年度までの海域基礎データ取得装置による計測で、濁度やクロロフィル濃度、光の透過度などの多数の海域基礎データを取得した。濁度が低い場合、太陽光は深度150m程度までPDでも計測され、深度400mまでクロロフィル濃度の上昇という形で水質へ影響を与える事がわかった。特に100m付近でのクロロフィル濃度の上昇が大きい場合が多かった。

濁度とクロロフィル濃度に対する光透過率の関係を指数関数による近似曲線として表し、通信可能なおよその距離をビーム幅に対応してグラフ化した。なお濁度は青色にもっとも影響し、赤色にもっとも影響が少ないが、クロロフィル濃度が上昇する付近では緑から赤色の光の透過率が若干下がる。これらを考慮すると通信における最適な発光色は

- ・濁度 0.79FTU 以下かつクロロフィル濃度が 3ppb 以下で青色、それ以外で赤色
- ・濁度 1.81FTU 以上かつクロロフィル濃度 9ppb 以上で赤色、それ以外は緑色となる。

LD は発光帯域が狭いが、これにより受信素子前に狭帯域の光学フィルタを導入する事が可能となり、太陽光を含む環境光の影響を低減できる。ただしこの光学フィルタは海域基礎データには導入が難しく、したがって海面付近や水中ロボットに搭載時には計測精度が落ちるため、光無線通信装置への波長選択信号をリアルタイムに送る際には課題がある。

通信においては巡回冗長検査 (CRC) 符号と自動再送要求 (ARQ) の利用が有効で、これにターボ符号や LDPC 符号などの誤り訂正 (FEC) を組み合わせたハイブリッド利用が有効であるが、試作した光無線通信装置を用いた実際の通信では、クロック同期のほうが重要であった。微弱光で SN が低い場合、LDPC などの符号の性能が発揮される以前に同期に問題が出たと考えられる。4B/5B 方式などの同期に有利な符号を高度化する事が、通信装置の性能向上において重要である。

試作した光無線通信における試験で、通信速度と通信距離に反比例関係を確認した。具体的には120mで20Mbpsが可能で、190mで32kbpsの通信が可能であった。通信速度を落とし、信号フィルタにて高周波成分をカットすることでSNを上昇させ、通信距離を延ばす事ができる。ただしビーム幅を狭めることによってSNを向上させる方法は、実際には動揺の影響をより受けやすくなり、性能低下を引き起こす場合が多い。青色と緑色の光による波長多重通信によって、100m距離でもイーサネット通信が可能であった。この双方向通信はゆらぐ海面を跨いで水中と空中の間で通信でも可能であることも試験で確認した。

今回の研究成果の反響は大きく、海外を含む複数の企業から商品化の時期など、購入を念頭にした具体的な問い合わせを受けている。現時点で解決が難しい技術的課題は無く、比較的早く民生利用側のデュアルユースを実施できると考える。

本研究は水中航走体での安定通信を想定しているが、ビークル間の短距離高速通信において十分な性能を発揮できるだろう。また水中航走体と船舶、もしくは水中航走体と(空中)ドローンとの通信にも活用できると考えており、計画段階の想定に含まれない新たな利用方法が発達する事も考えられる。

本研究を実施するにあたって、防衛装備庁の PO や事務担当者、施設をお貸し頂いた鑑定装備研究所の方々から多くの助力を頂いた。また水産系の高校の実習船を活用させていただき、大学の先生の方々から貴重なアドバイスと助力も頂いた。ご協力頂いた皆様に、この場を借りて感謝を述べさせていただきます。

参考文献

- [1] Robin M. Pope and Edward S. Fry, "Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements," Appl. Opt. 36, 8710-8723 (1997)
- [2] Kazuhiko Nakamura, Izumi Mizukoshi, and Masanori Hanawa, "Optical wireless transmission of 405 nm, 1.45 Gbit/s optical IM/DD-OFDM signals through a 4.8 m underwater channel," Opt. Express 23, 1558-1566 (2015)

以上