



ALAN レポート

概要版

(2022 年 10 月 17 日発行)

本資料は暫定的な内容を含んでいます。最終版は準備中です。

©2022 ALAN コンソーシアム

(許可なく内容の一部または全部を転載、複製、翻訳することを禁ず)

はじめに

本レポートを発行する ALAN コンソーシアム（Aqua Local Area Network Consortium）は、海中を代表とする水中世界（Aqua）を一つの Local Area Network（LAN）環境として位置づけ、海中光技術で世界をリードし、新たな市場の創出や社会課題の解決を目指して 2018 年に設置された。

我々にとって水中・海中は身近であるが、生活や産業面においてその活用は地上や空中と比較して非常に遅れている。水中・海中を大きく活用するには情報通信技術の拡大が不可欠だが、地上や空中で利用されている電波は水中を透過しないという課題がある。しかし一方で、青色の光は水中を透過するため、光を使用した水中無線技術の展開が期待される。

本 ALAN レポートの目的は主に 3 つある。1 つ目は、水中・海中という次世代の経済圏の実現に関わる水中光技術（特に LiDAR・光無線通信・光無線給電）や、水中ロボティクスなどの技術動向を伝え知らせることである。2 つ目は社会実装に必要なニーズ等の情報共有であり、3 つ目はこれに関する研究開発等の成果の情報発信を通じて、社会の理解促進や市場の活性化を図ることである。

読者諸氏には、この新たな市場創出と関連技術による新ビジネスのポテンシャルをぜひともご理解いただきたい。そのうえで、多くの組織や人との共創の拡大を期待したい。多くの組織や人との共創は、社会課題の解決も加速させるであろう。

本レポートの具体的な内容は、ALAN コンソーシアムの取り組みの解説と、想定される産業や応用領域とその動向、そして関連する各種要素技術やシステム技術とその動向についてである。また、これらの応用分野や応用技術についての市場の大きさやその推移の予測を行い、結果を本レポートに含めている。この技術や市場予測等を適切に提供するために、本レポートは、水中光技術とその応用分野に関わっている専門家の集団として ALAN コンソーシアムメンバーがその知見をもとに執筆している。

本技術領域や応用分野は将来の大きな広がり確信しているが、まだ技術は初歩の段階でもあり、その将来への予見は未だ茫洋としている。本レポートをもとに、読者諸氏が本技術領域や応用分野への興味を深め、一人でも多くの人材が新経済圏の実現と加速をけん引する役割を担うことを願っている。

目次

※概要版では目次の太字部分のみを掲載しています。他の章の一部はサンプルとして掲載しています。

1. **ALAN レポート発行にあたって**
 1. 1 **なぜ今、水中・海中で光無線技術を活用するのか**
 1. 2 **水中・海中での光無線技術活用と想定される具体事例**
 1. 3 **水中光無線技術の意義**
 1. 4 **本レポートの構成**
2. **ALAN コンソーシアムの活動**
 2. 1 **ALAN コンソーシアムの活動**
3. **産業／応用領域の動向**
 3. 1 水中関連民生応用と光無線技術の関わり
 3. 2 水中関連 1 次産業応用と光無線技術の関わり
 3. 3 水中関連エネルギー分野と光無線技術の関わり
 3. 4 水中関連インフラと光無線技術の関わり
 3. 5 水中関連の防災と光無線技術の関わり
 3. 6 水中環境問題と光無線技術の関わり
 3. 7 2050 年までの応用領域ロードマップ
4. **要素技術とシステム技術の動向**
 4. 1 水中の光伝搬の基本
 4. 2 LiDAR 技術の水中展開
 4. 3 光無線通信技術の水中展開
 4. 4 光無線給電技術の水中展開
 4. 5 ロボット・ドローンの水中展開
 4. 6 2050 年までの技術・システムロードマップ
5. **応用分野・応用技術毎の市場推移**
 5. 1 水中無線技術の民生応用市場
 5. 2 水中無線技術の 1 次産業応用市場
 5. 3 水中無線技術のエネルギー分野応用市場
 5. 4 水中無線技術のインフラ分野応用市場
 5. 5 水中無線技術の防災応用市場

- 5. 6 水中無線技術の環境問題対応市場
- 5. 7 水中ロボット・ドローン関連の水中無線技術市場
- 5. 8 水中 LiDAR 技術市場
- 5. 9 水中光無線通信技術市場
- 5. 10 水中光無線給電技術市場

1. ALAN レポート発行にあたって

1. 1 なぜ今、水中・海中で光無線技術を活用するのか

我々は青い地球の上で生活している。この地球の表面の 70% は海である。つまり、我々の生活は水・海と切り離すことはできない。特に日本は海に囲まれた世界有数の海洋国家である。国土面積は世界の中で 60 位と小さいにも関わらず、領海と排他的経済水域は国土面積の 11.8 倍もあり、世界で 6 番目の広さである。このため、日本において水中・海中の利活用を考えることは、日本に大きな価値と優位性をもたらすと同時に、世界の水中・海中の利活用をけん引することにもつながる。

この広大な水中・海中の利活用はどのように進めればよいであろうか。地上や空中、さらに宇宙では、新しい仕組みや技術の発展をもとに、多様な応用の創出による利活用が進んでいる。これに対して水中世界は大きく後れを取っており、水中世界は『ラストフロンティア』、『最後のデジタルデバイド領域』などと呼ばれている。水中・海中の利活用が進まない理由は、水の様々な特性や特徴が影響しており、特に現代社会の発展を支える情報通信 (IT) 技術の水中での適用の制限が大きなハードルとなってきた。

さて、この身近な水・海のこととはどこまで知っているであろうか。海の色が青く見えるのは、可視光のいわゆる虹の七色や RGB (赤・緑・青) のなかで、赤色は吸収のため失われやすく、青色に向かうほど透過されやすい性質があるからである。このため青色の光は水中で多様な活用が可能といえる。

なお実際には水質により一番透過しやすい色は異なる。蒸留水や深海などのきれいな水では、青色が最も透過しやすい。これに比べて沿岸水などは、青色より緑色のほうが透過しやすくなる。さらに、湾内などの少し濁った水になると黄色が最も透過するが、きれいな水に比べて透過可能な距離は大きく縮小する。このように水の状態によっても光の利用可能な条件は大きく異なってくるが、総じていえば、光は水中で利用可能であり、特に青色や緑色の光を活用することで水中・海中に様々な可能性をもたらすことができる。

水中を透過しやすい青色や緑色の光は、太陽光にも含まれ電球や蛍光灯などからも発生する。これらの従来の光源は情報通信技術への適用が難しかったものの、青色発光ダイオード (LED) がそれを可能にした。青色 LED は青色レーザなどへの展開も含めて、青色光や緑色光を高度に利用可能とし、この 10 年ほどで、効率や明るさについても著しく進歩している。なお、この青色 LED の実現と実用化には、赤崎氏、天野氏、中村氏という日本人研究者の大きな貢献があった。彼らが 2014 年にノーベル物理学賞を受賞したことは、青色光の利用が期待される海洋国家との強いつながりを感じざるを得ない。

水中を一つの生活圏ととらえた場合、情報通信手段として地上や空中の発展をけん引した無線技術の適用は不可欠である。この無線技術として、水中を透過できる光の利用が極めて重要となる。なお、情報通信を全て光の無線技術だけで構築するのではなく、これまでも

利用されてきた有線技術や、光と異なる特徴を持つ音波と棲み分けたうえで、より柔軟性のある「水中ネットワーク」を構築することが肝要となる。

近年大きく進展した青色光を技術の中心に据え、日本は世界をリードして特に民需として材料・デバイス・機器・システム・ネットワークなどの光無線技術の研究開発を推進すべきである。水中世界を次世代の経済圏としてそこに新たな市場を創出し、また、既存の社会課題の解決につなげていくことは極めて意義深いといえるだろう。

1. 2 水中・海中での光無線技術活用と想定される具体例

水中世界を次世代の新経済圏と捉え、新たな市場創出や社会課題の解決を行う場合、実際に何に対して何が可能で、何が必要なのだろうか。

水中・海中は、これまでも1次産業のフィールドとして、また、エネルギーやインフラ、防災、環境など社会的な意義から利活用されてきた。また、レジャーなども含めた民生応用もさまざまにある。このように、人間社会の活動の多くが水中・海中と関わっている。このため水中光無線技術の実現と進展により、これまでの分野や市場とともに、これまでにない新たな市場の創出・発展が期待される。未知な分野の広がりもあるため、現時点で関連する応用範囲や産業を限定することは適当でないが、想定される具体事例を挙げてみる。

1次産業関連では、いけすなど養殖場の点検・監視・観察・計測などの管理業務に加え、その設置や保守の作業にも水中光無線技術が活用できる。また、ダムなどの水力発電設備や拡大している水上ソーラー発電設備などのエネルギー分野においても、同様に管理・保守業務や設置作業に水中光無線技術が活用できる。

水中光無線技術は海上に加え、海中を利用した輸送、海底や海中の資源・エネルギー開拓などにも適用できる。特に海底ケーブルや、水中・海中と陸上を結び付けている港湾設備や橋脚などの水中構造物やインフラの調査・点検・監視などは、技術適用の重要な対象といえる。これらすべてに欠かせない、精密な海底地形図の作成への活用も併せて重要な対象であることは言うまでもない。さらに海洋国家としては、地震や津波、台風に関わる波浪などの防災のための監視も応用対象となる。

また海洋は地球において大きな面積・体積を占めている。そのため世界的に重要かつ喫緊の対応が必要な環境問題に関しても、海洋視点での速やかな問題への対処が望まれている。そこでも水中光無線技術を活かすことができ、海洋マイクロプラスチックの監視・観測や、二酸化炭素(CO₂)の水中モニタリングなどへの活用が極めて意義深い。

これらのように、水中光無線技術は1次産業・エネルギー・インフラ・防災・環境など、国や世界の持続的発展に貢献する。また民生応用としても、海中観光・旅行、水中eスポーツ、VR水族館などの水中アクティビティやレジャーへの応用のほか、地上生活圏の各種の水槽やプールなどの保守管理も対象になるなど、その応用範囲は幅広い。

以上のような多様な水中・海中に関わる産業の新たなプラットフォームの構築と、その社会実装を進めるためには、水中・海中における高度なセンシングと、動画などの膨大な情報の通信を可能とする情報通信技術に加え、水中ドローンなどの水中ロボティクスの発展が欠かせない。さらにこれら機器や仕組みには電力・給電技術も必要となる。

特に、センシング・通信・給電は無線技術として、その実現と高度化を加速させなければならない。これらの技術が搭載されることとなる多様な水中ロボットが進歩することで、広大な水中・海中を、制限なく利活用することが可能となる。



図1. 1 水中・海中の次世代の新経済圏のイメージ

1. 3 水中光無線技術の意義

水中の無線技術は今までも存在している。すでに述べたように、音波は水中での無線通信において広く活用されており、現在も技術進展は続いている。音波の利点は極めて長距離まで信号の届く遠達性であり、応用にもよるがkm単位での利用が可能である。一方で音波の周波数はキロヘルツ (kHz) 程度と非常に低く、このため通信応用では通信速度が大きく制限されおおよそ 10Kbps 程度となる。これは地上無線通信の Wi-Fi や 5G と呼ばれる最新の通信で利用可能な Gbps などに比べて 10 万分の 1 から 100 万分の 1 程度であり、非常に遅い通信速度である。このため、リアルタイムの動画伝送どころか静止画の伝送さえも容易ではない。さらに音波の波長の長さから、センシングの分解能も制約を受ける。このように

音波は利点もある一方で、現代社会を支える情報通信の観点からは十分な特性を備えているとはいえない。

地上で一般的に利用される電波の利用はどうであろうか。残念ながら、特に通信で利用されている電波は水中で非常に大きな損失がある。このため Wi-Fi のようなギガヘルツ (GHz) といった高周波は数 mm の伝搬距離となってしまう。周波数が低ければわずかに伝搬するが、AM ラジオ程度のメガヘルツ (MHz) でも数十 cm の伝搬距離しかない。さらに低周波の 10kHz 程度になれば数十 m 単位での伝搬も可能だが、この低い周波数では通信速度が 1Kbps ほどとなり、音波と同様に利用が制限される。

ここで有線も考えておく。有線を利用すれば通信や給電の性能的に問題は少なく、通信では Gbps クラスの速度も利用できる。ただし、有線はその敷設作業が必要であるほか、海中の移動体利用では動作範囲つまり配線長が制約され、配線の絡まりや長尺の保管などが課題となる。地上・空中がそうであるように、水中・海中でも通信の無線技術への移行が重要といえる。

さて、光を利用した無線技術を考える。光は電波と同じ電磁波の一種であるが、数百テラヘルツ (THz) という超高周波である。すでに述べたように、この中で特に青色や緑色は、水の特性からほぼ唯一の透過可能な高周波電磁波となっている。

地上では光を利用した通信やセンサーは多用されるが、同等の性能が水中・海中でも利用できると期待できる。なお、水中の伝搬距離は水質により大きく変化し、良い条件でも、地上や空中などの数百 m や数 km といった距離の通信には光は利用できない。様々な状況や環境、必要な特性に応じて、音波や電波、有線などを組み合わせた通信システムを構築すべきであろう。

すでに述べたように、小型で高効率かつ明るい青色光源である青色 LED や青色レーザーの利用が容易になったのはこの 10 年ほどである。このために水中の光無線技術はごく最近に活発化し始めた分野といえ、逆にまだまだ技術の大きな進展が必要な分野といえる。様々な水中・海中応用分野が想定されるが、光無線技術の進展に伴ってその応用範囲はますます大きく広がることと期待できる。ALAN コンソーシアムが目指す社会は、今まさに広がり始めていると捉えている。

表 1. 1 水中の情報通信技術の比較

項目	有線	音波	低周波電磁波	光
長所	安定性、高性能	遠達性、豊富な実績	耐環境性、水面・海底の境界を超える	高速、低コスト
短所	有線、配線管理、敷設の負担	水面・海底の境界が影響し浅海に弱い	短距離、低速	濁りに弱い
周波数 (色)	—	20kHz	10kHz	青～緑 (～黄)
通信、センサの距離感	1,000 m	3,000 m	30 m	300 m
通信速度	1Gbps	10Kbps	1Kbps	1Gbps

給電の距離感	1,000 m	実質不可	大型装置で数 m	小型で数十 m
環境影響	ほぼなし	中	小	中？

1. 4 本レポートの構成

2 章では、本レポートの対象とする分野・技術のこれまでの経緯の理解を促すため、本 ALAN レポートを準備した ALAN コンソーシアムの現在までの活動をまとめた。3 章では、本レポートの対象とする産業／応用領域の動向を、具体的ないくつかの領域ごとに解説した。4 章では、関係する技術動向として、水中 LiDAR、水中光無線通信、水中光無線給電、水中ロボット・ドローンなどの要素技術とシステム技術について解説した。5 章では、応用分野・応用技術の市場とその予測推移を示した。なお、ALAN コンソーシアムの活動の中で有用であった発表資料等を付録とした。

2. ALAN コンソーシアムの活動

2. 1 ALAN コンソーシアムの活動

超スマート社会（Society 5.0）実現のためには、様々な産業・業種の先進的な取り組みを掛け合わせた「共創」により、社会課題解決を図ることが重要である。特に CPS/IoT には大きな期待が寄せられており、テクノロジーを活用した新たなサービスの展開が求められている。一般社団法人電子情報技術産業協会（JEITA）は、より広範な社会課題解決と新産業創出による経済発展を促すべく、業界の枠を超えた共創を実現し、新たなビジネス創出をめざす「共創プログラム」の取り組みを 2018 年に開始した。

JEITA 共創プログラムによる第 1 弾の取り組みとして、第 1 回 JEITA ベンチャー賞の受賞企業である株式会社トリマティスからの提案に基づき、ALAN コンソーシアムが 2018 年 6 月 21 日に設立された。

設立以降、ALAN コンソーシアムは多様なステークホルダーによるオープンな検討体制により、水中光技術やロボティクスに係る技術的課題及びニーズ等の情報共有を実施した。また、技術動向や業界のフロントランナーから示される新たな産業の可能性について、様々な普及啓発活動を推進してきた。

表 1. 2 ALAN コンソーシアムの活動実績

日付	実績
2018 年 6 月 21 日	設立総会
7 月 11 日	記者説明会（ 配布資料 ） ✓ コンソーシアム設立の目的／狙い／計画の報告 ✓ 日経 xTECH 等、多数記事掲載
8 月 3 日	設立記念フォーラム（参加者：133 名） ✓ 現状の取り組みや課題について会員より紹介 ◆技術セッション 01 海中光学の可能性 ～早くそして正確に～ 海洋研究開発機構 02 青色 LD ～CW 動作特性・短パルス動作特性～ 名城大学 03 LiDAR 向け高出量・短パルス LD ドライバ トリマティス 04 LD 外部変調 ～LN 変調技術～ 早稲田大学・情報通信研究機構 05 スキャナ ～シリコンフォトニクス&ランダムアクセススキャニング～ 産業技術総合研究所

- 06 高効率可視光ファイバレーザー ～青・緑・黄色光源の実現～ 千葉工業大学
- 07 水中 LiDAR ～空間系 LiDAR から水中へ～ トリマティス
- 08 水中光無線通信 ～光空間通信技術の応用～ 東海大学
- 09 水中光無線通信 ～無線ネットワーク技術の応用～ 東北大学
- 10 水中光無線通信 ～ギガビット級高速通信実験～ 山梨大学
- 11 水中光無線給電 ～光無線給電技術の応用～ 東京工業大学
- 12 AI・ロボティクス ～ROV そして AUV への展開～ 千葉工業大学

◆市場創出セッション

- 01 音波での海底地質調査 ～音波での実績及び光への期待～ 産業技術総合研究所
- 02 海底環境調査 ～音波での実績及び光への期待～ KDDI 総合研究所



10 月 16- CEATEC 2018 に出展（ブース来場者 86 名／聴講者 79 名）

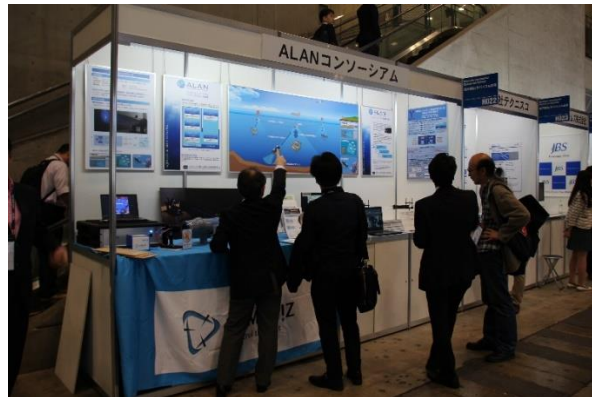
19 日

◆展示内容

- ✓ ALAN コンソーシアムの概要紹介
- ✓ 山梨大学：高精細リアルタイム動画転送に向けた高速水中光無線通信
- ✓ 株式会社トリマティス：Trimatiz LiDAR と実証状況

日付

実績



◆コンファレンス内容

- 1.『光技術が切り拓く未知なる海洋 ―光技術で新たな海洋産業を―』 JAMSTEC
- 2.『ALAN コンソーシアムの紹介』 トリマティス
- 3.『トリマティスの水中センシング・水中 LiDAR 技術の開発』 トリマティス
- 4.『高精細リアルタイム動画転送に向けた高速水中光無線通信』 山梨大学
- 5.『魚類養殖市場の実状と水中光センシング・通信が秘める可能性』 富士通
- 6.『海中海底ネットワーク構想』 KDDI 総研

2019 年 記者説明会 ([配布資料](#))

- 2 月 7 日
- ✓ 活動実績の報告, 新しいプロジェクト発表
 - ✓ OPTRONICS 等, 多数記事掲載

2 月 16 日 入会説明会 (参加者 24 名)

- ✓ コンソーシアムの状況報告／今後の展開を紹介

5 月 14 日 2019 年度総会

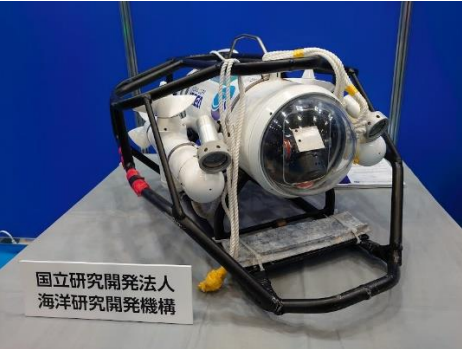
- ✓ 2018 年度事業報告／収支報告
- ✓ 2019 年度事業計画／収支予算案の確認

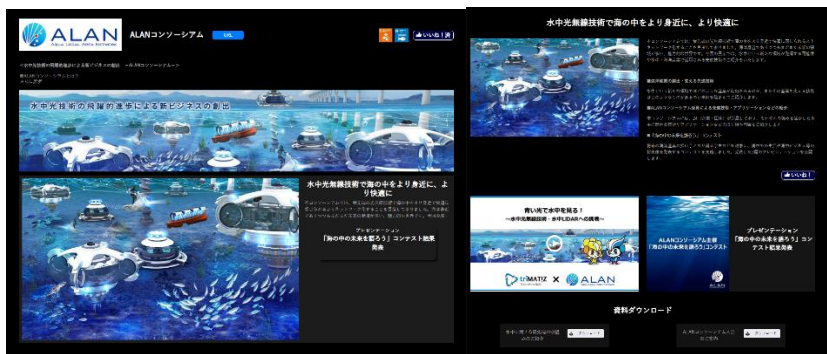
8 月 26 日 ALAN コンソーシアム 公式 Facebook ページを開設 ([リンク](#))

8 月 29 日 新江ノ島水族館による特別講演と光技術に関する意見交換

10 月 8 日 記者説明会 ([配布資料](#))

- ✓ 水中光無線技術に関する現状
- ✓ コンソーシアムの活動実績／実証結果の発表
- ✓ 今後の活動計画
- ✓ 日刊工業新聞／INTERNET Watch／コンバーテック 等, 多数記事掲載

日付	実績
10月16日	CEATEC 2019 に出展（ブース来場者 119 名／聴講者 136 名） ◆展示内容 ✓ 株式会社トリマティス：Trimatiz LiDAR と実証状況 ✓ 国立研究開発法人 海洋研究開発機構：海中探査機搭載用 3D レーザースキャナー ✓ 株式会社 KDDI 総合研究所：海中でも無線でスマホ ～青色 LED 光無線通信技術を用いた検証～ ✓ 山梨大学：高精細リアルタイム動画転送に向けた高速水中光無線通信 ✓ 千葉工業大学：水中／海中での光無線給電の検討 ✓ 東京工業大学：水中・海中の光無線給電技術 海の影響を考慮した、水上から水中への光無線給電受光特性
	 
	◆コンファレンス タイトル：ALAN コンソーシアム特別シンポジウム 『～水中光技術（センシングと無線通信）がもたらす未来～』 登壇者・講演タイトル
	
11月23-24日	第1回海のアバターの社会実装を進める会 ✓ ALAN コンソーシアム会員から講師派遣
2020 年	日経クロステック取材対応

日付	実績
4月7日	
5月14日	2020 年度総会 ✓ 2019 年度事業報告／収支報告 ✓ 2020 年度事業計画／収支予算案の確認
8月3日	水中 LiDAR, 水中光無線通信, 水中光無線給電ワーキンググループ活動開始
10月20-23日	CEATEC 2020 ONLINE に出展（ブース来場者 839 名） ✓ 会員各社の取り組み紹介 ✓ ALAN コンソーシアムが目指す未来のイメージ作成 ✓ 海洋産業の次世代を担う層を対象に『海の中の未来を語ろう』コンテスト開催 (詳細)
	
12月4-6日	第2回海のアバターの社会実装を進める会@福島ロボットテストフィールド (参加者 137 名／視聴合計 532 回) ✓ 運営事務局として JEITA が福島イノベーション・コースト構想推進機構から受託 ✓ シンポジウムへ ALAN コンソーシアムの活動紹介 ✓ 水中ドローンのデモンストレーション支援 ✓ INTERNET Watch 等, 多数記事掲載 ◆配信動画 12/4 特別シンポジウム_ロボット×海×人 –最先端ロボットがもたらす新たな産業・新たな暮らし– 12/5 ROV デモ・操縦体験 12/6 ROV デモ・航行試験・操縦体験

日付

実績



2021 年
5 月 14 日

2021 年度総会

- ✓ 2020 年度事業報告／収支報告
- ✓ 2021 年度事業計画／収支予算案の確認

6 月 10 日 ALAN フォーラム –新しい事業領域としての海洋産業–（聴講者 186 名）

- ✓ 島田代表、東京大学、ウミノミクス、e5 ラボ／Marindows による講演・パネルディスカッション
- ✓ フォーラムの[詳細](#)



10 月 19-
22 日

CEATEC 2021 ONLINE に出展（ブース来場者 1,145 名／聴講者 456 名）

- ✓ 水中 LiDAR 実験 おさかな計測 ([動画](#)) トリマティス
- ✓ 会員各社の取り組み紹介
- ✓ ALAN コンソーシアム特別シンポジウム開催 ([動画](#)／[配布資料](#))



11 月 1 日

通信ビジネスの専門誌『月刊テレコミュニケーション』取材対応

日付	実績
	✓ 月刊テレコミュニケーション 2021 年 12 月号に掲載
12 月 10-11 日	第 3 回海のアバターの社会実装を進める会@福島ロボットテストフィールド ✓ 運営事務局として JEITA が福島イノベーション・コースト構想推進機構から受託 ✓ シンポジウムへ ALAN 会員が参加（東洋建設） ✓ デモンストレーションを通じ水中光無線給電・LiDAR 技術を紹介（トリマティス・東京工業大学） ✓ 電波新聞等，多数記事掲載 ◆配信動画 12/10 特別シンポジウムー水中ロボットを中心とした海洋産業の今と未来 12/11 水中ロボット操縦体験・デモンストレーション 
2022 年 1 月 14 日	レーザー学会シンポジウム ✓ 会員各者の「開発が進む光水中無線技術への期待」に関わる講演を実施 レーザー学会シンポジウム ・ レーザー学会学術講演会第 42 回年次大会 シンポジウム SY07「開発が進む光水中無線技術への期待」 ・ 2022 年 1 月 14 日（金）9:00～16:15，4セッション，11 講演（1 講演 25 分） ・ セッション 1（チュートリアル） --- 座長：塙（山梨大学） ・ 吉本（千歳科大），安達（東北大），「ALAN コンソーシアムの概要」 ・ 吉田，石橋（JAMSTEC），斎藤（三菱特機），「海中光技術の 20 年 ～こと始めから，今，そして未来へ～」 ・ 西谷（KDDI 総研），「海中経済圏／海中生活圏構想 ～水中光無線通信技術の展望と技術開発への期待～」 ・ セッション 2（水中光無線通信） ---- 座長：高橋（トリマティス） ・ 塙，中村，稲葉（山梨大），「水中光無線通信における信号処理の可能性」 ・ 鈴木（トリマティス），「水中 NW を実現する水中光ワイヤレス通信技術の検討」 ・ 吉野，藤井（日本女子大付属高），吉野（東京電機大），「浮遊物のある水中伝送路による水中ワイヤレス光通信の伝送特性」 ・ セッション 3（水中光デバイス/共通技術，水中 LiDAR） ---- 座長：宮本（東工大） ・ 松尾，長岡（浜松ホトニクス），「PMT を使用した水中通信」 ・ 高山（東海大），高橋（トリマティス），「水中を伝搬した光の精捕捉追尾」 ・ 高橋，鈴木（トリマティス），「高出力青色 LD による小型水中 LiDAR の開発」 ・ セッション 4（水中光給電） --- 座長：鈴木（トリマティス） ・ 宮本（東工大），「「広がり始めた水中・海中光無線給電の動向と課題」 ・ 内田（千葉工大），「化合物太陽電池を用いた海中光無線給電の検討」 
3 月 10 日	KOKOKARA Fair 主催：日刊工業新聞社（講演動画／配布資料） ✓ ALAN コンソーシアムの活動紹介 タイトル：光無線技術が拓く新しい水中の世界

日付	実績
	講演者：ALAN コンソーシアム 代表 島田 雄史 氏 (株式会社トリマティス 代表取締役 CEO)
3 月 22 日	記者説明会 (配布資料) ✓ 活動紹介, 実証成果の報告, 社会実装に向けた取り組みを実施 ✓ 実証成果報告: 1Gbps×100m 超高速海中光ワイヤレス通信 ✓ 日経クロステックなど, 多数の記事に掲載 
5 月 26 日	マルチメディア推進フォーラム 主催：ハイテクノロジー推進研究所 ◆登壇者・講演タイトル ✓ トリマティス：可視光を利用した水中高速通信技術とアプリケーション ✓ JAMSTEC：「水中高速通信技術と展望」 ✓ KDDI 総合研究所：「水中通信の実用化に向けた取り組み」～海中経済圏・生活圏の実現に向けて～
5 月 17 日	2022 年度総会 ✓ 2021 年度事業報告／収支報告 ✓ 2022 年度事業計画／収支予算案の確認
7 月 25 日	ALAN フォーラム ーいざ社会実装！ラストフロンティアたる水中世界へー (聴講者 301 名) (詳細／動画) ✓ 社会実装に向けた会員企業の講演を実施

日付

実績

The graphic is a promotional poster for an online seminar. It features a collage of six speakers' portraits arranged in a hexagonal pattern. The background is a deep blue with an underwater scene, including a submarine and a bridge. Text is overlaid in white and yellow. The title 'ALAN Forum' is prominent at the top left. The theme 'いざ社会実装！ラストフロンティアたる水中世界へ' (Now social implementation! To the last frontier, the underwater world) is at the top right. The main topic '「光」で水中世界を快適に' (Comfortably in the underwater world with 'light') is in yellow. The date and time '2022.7.25[MON] 15:30-17:00' are in white. The text '無料オンラインセミナー' (Free online seminar) is at the bottom right. The speakers' names and affiliations are listed around the portraits.

島田 雄史
(株)トリマティス

吉田 弘
(国研)海洋研究開発機構

越智 鉄美
東日本電信電話(株)

杉本 英樹
五洋建設(株)

深澤 杏香
富士通(株)

ALAN Forum

いざ社会実装！
ラストフロンティアたる水中世界へ

「光」で水中世界を快適に

2022.7.25[MON]
15:30-17:00

無料オンラインセミナー

10 月 18- 21 日 CEATEC 2022 に出展（予定）

11 月 17- 18 日 ResorTech EXPO 2022 in Okinawa に出展（予定）

(本節は、ALAN レポート最終版のサンプルイメージとして準備したものです。
暫定版であり、正確性を検証中の内容も含まれます。)

4. 4 光無線給電技術の水中展開

4. 4. 1 はじめに

これまでの水中機器は、電線かバッテリーによる給電が基本である。電線は連続稼働には有効だが、行動範囲制限や長尺配線の絡まり、重量のある配線の保管、また配線の電力損失などが課題になる。バッテリー搭載は連続稼働時間の制限と充電・バッテリー交換作業の負荷のほか、バッテリー自身の体積・重量・コストが課題である。

そこで水中の無線技術が期待される。特に水中損失の低い光無線給電（OWPT, Optical Wireless Power Transmission）は魅力的であり、図4. 4. 1のように、小型軽量かつ光ビームにより遠隔で給電可能という特徴がある。この水中光無線給電の応用や必要な技術と要件、また取り組まれている研究の動向と課題について解説する。



図4. 4. 1 光無線給電の構成

4. 4. 2 水中・海中光無線給電のユースケース

水中光無線給電は水中機器のほとんどの適用できる。レジャーやプール掃除用ロボットなどの民生関連応用から、第1次産業、エネルギー・インフラ、防災、環境など、多様な産業向けのセンシング機器や作業ロボットへの応用が想定される。水中光無線給電にも給電距離の制約はあるため、その給電形態は機器の種類や設置場所によって常時給電のほか定期的充電となることもある。構成としては、固定光源から固定機器へ、固定から移動へ、移動から固定へ、さらに移動から移動へ、など多様に想定される。これらの多様な形態や状態に対応する水中光無線給電の基盤技術を構築することで、これまでにない水中の機器やサービスの創出も進むと考えられる。

なお、光源と機器を水中に設置するだけでなく、図4. 4. 2のように水中と水上の間で光ビームを伝搬するような構成にすることにより、水上の機器も含めた活用が可能となる。水中のみの光無線給電は長距離といっても100 m以下に制限されるが、水上も活用することで給電範囲はより広がり、海などの広大な空間への活用も広げられるであろう。

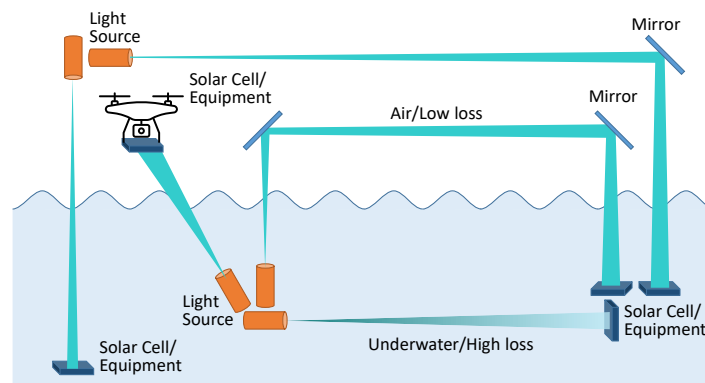


図4. 4. 2 水上-水中間など多様な応用の水中光無線給電

4. 4. 3 光無線給電技術とその水中応用

光無線給電は比較的新しい技術分野である。1970 年前後には光無線給電がすでに提案されていたものの、研究開発は 2010 年代後半から活発化し始めた。研究や取り組みの多くは光無線給電システムを構成する個々の要素技術に関するものであり、光無線給電をシステムとして構築した事例は多くない。特に、水中の光無線給電の研究事例は世界的にも非常に少ない。近年は（文献情報は略，括弧は報告年），無線充電コンセプト（2015），100 mW・4 m 程度の給電実験（2018），最適波長の理論解析と 50 mW・10 cm 程度の給電実験（2019），通信と給電の同時の検討（2019），波長依存給電の理論解析（2020），90 cm 程度の給電実験（2020），4 mW・2.3 m の給電実験（2021），4 mW・10 m の給電実験と理論解析（2021）など，初期的な低電力条件の評価については徐々に報告されるようになった。

ここで給電に重要な効率を考える。給電効率は光源効率と太陽電池効率の積が上限となる。地上向けでは近赤外帯レーザ効率が 75%，近赤外用太陽電池効率は単色光で最大 69%とされており，最大 50%程度の給電効率が期待できる。ただし，現在の市販品を用いると給電効率は 20%以下となる。

これに対し，水中では青色帯の光が必要である。青色光源は性能改善が進み，効率 50%を達成した事例も報告されている。受光側の太陽電池はその基本原理から単色光，また短波長向けほど効率が高くなる。しかし，現状では短波長の青色用太陽電池の研究事例は極めて限定されており，現状の想定給電効率は 20%程度となっている。このため水中用には今後の各種のデバイス開発と性能改善が重要といえる。

水中への光の伝搬では水中損失も重要な要素となる。これは水質に強く依存するが，十分透明な水質においても数十 m 程度の給電距離が限界と考えられる。ただし，給電がわずかでも問題がない場合は，100 m 程度までが給電可能な距離となるだろう。

4. 4. 4 水中・海中光無線給電用基礎実験

先に述べたように水中・海中の光無線給電はまだ取り組みが少ない。東工大の宮本らは，

1-10 m, 1-10 W クラスの実現を目指した構成の検討を進めており、8-10 cm 角の太陽電池と数 W 以上の高出力レーザを用いた給電システムの構成を検討している。特に太陽電池モジュールの高効率動作のために、モジュールから光を漏らすことなく均一照射を可能とする必要があり、フライアイレンズ系モジュールの構成が提案されている。この構成により、ビーム入射位置や入射角度への耐性が得られ、水流などによる位置変動への対応に有利と考えられる。

図4. 4. 3は、東工大の宮本らによる、波長 450 nm の青色光レーザ 3 台の光を 90 cm 長の水槽（水道水）内に通過させた水中光無線給電の実験例である。各レーザの最大出力は 6 W であった。ビームサイズ調整用の凹レンズを通してフライアイレンズ系モジュールにレーザ光を入射することで、光出力 18 W において太陽電池電力出力 2.25 W を達成している。フライアイレンズ系の採用により、レーザ光の精密な位置決定は不要であり、3 つのレーザの入射場所についても制約はない。より長距離の特性評価に向けて、水槽内での往復反射を利用した 10 m 程度までの評価系も構築しており、複数の高出力レーザを用いた 10 m-10 W の給電は実現可能といえる。

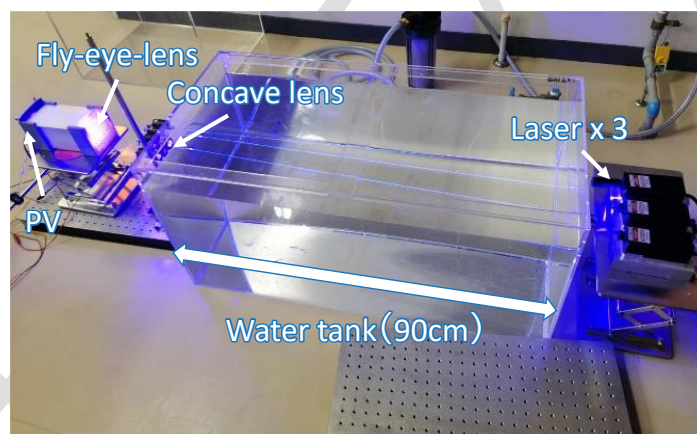


図 4.4.3 フライアイレンズ系と 3 ビームの水中光無線給電

光無線給電全体の各部の損失評価に基づく給電電力に関するパワーバジェットを図4. 4. 4に示す。10 W の電力出力には給電距離 1 m で数十 W、距離 10 m では 100 W 以上が必要と見込まれる。給電電力は基本的に青色光源出力に依存するが、幸い光源技術の進展により単チップ半導体レーザで数 W 程度の光出力が、さらに加工用レーザなどでは kW クラスが実用化されている。水中光無線給電はこれらの技術適用により、必要に応じて数 W から数 100 W の給電が十分可能といえる。

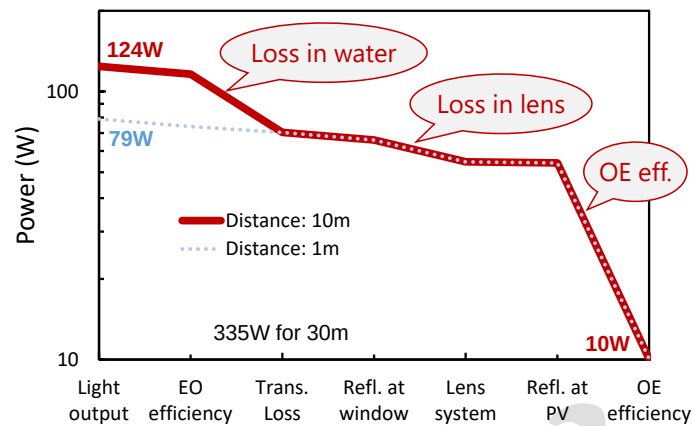


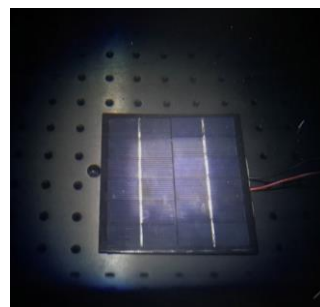
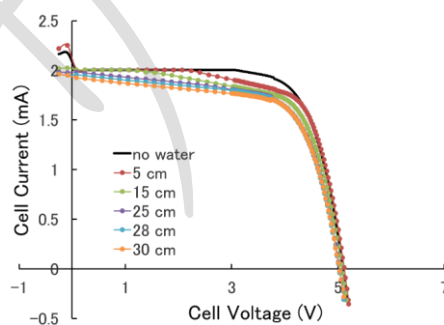
図 4. 4. 4 水中光無線給電のパワーバジェット

4. 4. 5 水中・水上間の光無線給電

先に述べたように、水中間の給電のほかに水中・水上間の光無線給電も有用といえる。水面での反射率（垂直入射）は2%程度と小さいが、水の波があった場合、波の傾斜した波面における屈折で光ビームの方向が大きく変化する。小さな波でも同様な現象が様々な方向に発生するため、実質的に光ビームが散乱してしまう。

図 4. 4. 5 は水上から水中へのビーム伝搬の基礎実験の様子である。上段は水の波がほぼない状態で、下段は扇風機により波を生じさせた場合となっている。左は水槽の下に設置した太陽電池の電気出力特性であり、右は水上から撮影したその太陽電池へのビーム照射状態である。波がなければ光のビームは太陽電池に適切に到達する。一方で波があると、ビームは時間的に様々に散乱するため、光の分布も均一でなく時間的に変化する。さらに太陽電池の電気出力も時間的に大きく振れるため、無線給電は不安定になる。

水中・水上間の光無線給電は水中機器だけでなく地上機器の応用を様々な広げるうえで有効なため、より詳細な特性解明と対策手法の検討が必要である。



(a)

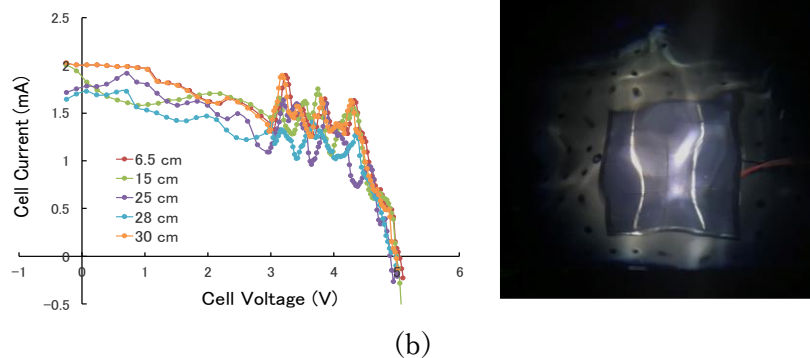


図4. 4. 5 水上から水中への光無線給電の基礎実験の例
(a)は波がない場合，(b)は波がある場合．左は水槽下部に設置した太陽電池の電気出力，
右は水上から撮影した太陽電池面に到達した光ビームの様子．

4. 4. 6 水中光無線給電のまとめ

水中光無線給電について，その意義や構成の基本を紹介し，現時点の給電特性や将来的な給電量の見込みなどを説明した．水中・海中の実際の応用には引き続き多様な研究開発が必要である．技術が確立することで，新機器・新サービスや新応用など，多様な産業形成が見込まれる．

参考文献

- 1) 宮本智之，信学会論文誌, vol. J103-C, no. 5, pp. 270-278, 2020.
- 2) 宮本智之，李嘉莹，光学, vol. 50, no. 11, pp. 452-461, 2021.

(本節は、ALAN レポート最終版のサンプルイメージとして準備したものです。
暫定的版であり、正確性を検証中の内容も含まれます。)

5. 1 0 水中光無線給電技術市場

現在、水中光無線給電の市場は立ち上がっていない。一方で、地上向けの光無線給電は海外ベンチャー企業によるサンプル出荷も始まっている。つまり技術的には光無線給電は近い将来に立ち上がり始める期待があり、水中光無線給電の市場形成も期待される。現時点では市場推移の予測は明瞭とは言えないが、水中における各種応用の想定に対して、個数と価格、それらの年推移を予測した。

応用領域としては、水中関連の民生応用として 2025 年において世界人口の 0.01% (1 万人に 1 人) が水中光無線給電を適用した機器を利用し、機器 1 台は平均 5 万円、機器価格のうち 5% が水中光無線給電機構とする。また、2025 年以降の推移として、毎年機器利用者の割合が 5% ずつ増加 (2026 年は $0.01\% \times (1+5\%)$)、また機器 1 台の価格は変動しないが、その中の水中光無線給電機構に関わる市場規模が 5 年毎に 1% 増加 (線形増加) すると考えた。この場合の、水中関連の民生機器に関わる光無線給電機構の市場は図 5.10.1 と見込まれる。

水中機器全体における民生の市場自身は非常に小さな割合といえる。さらにその民生用機器に利用される光無線給電の機構の市場も決して多いとは言えないが、水中無線技術の広がりにより水中機器自身の市場が拡大が期待され、将来的には光無線給電の機構の市場としても数 100 億円以上が期待される。

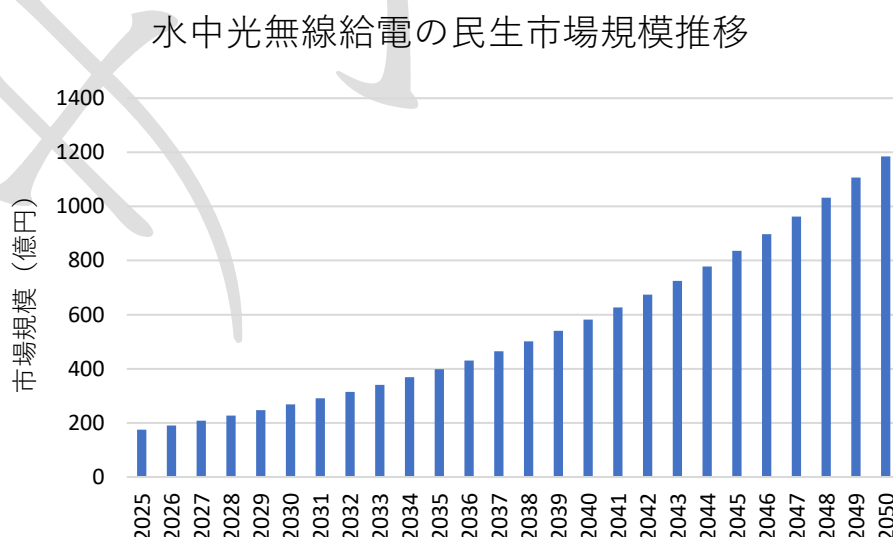


図 5.10.1 水中関連の民生応用機器に利用される光無線給電の機構の市場の予測