

海中光・電磁波技術の興味と社会貢献の可能性

国立研究開発法人海洋研究開発機構 技術開発部 次長 **よしだ ひろし**
吉田 弘



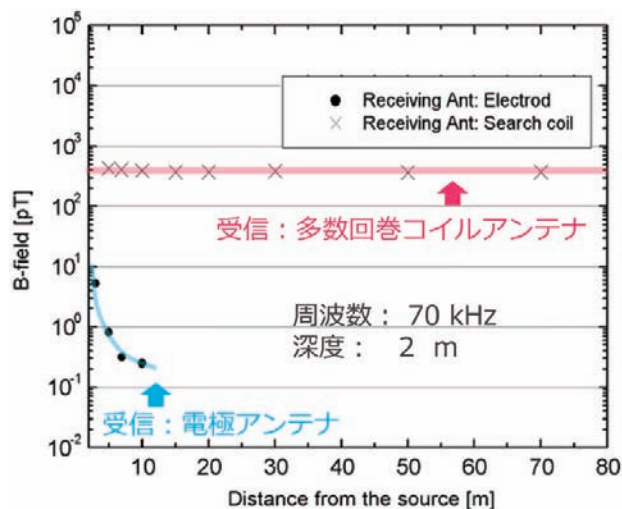
1. 海中光・電磁波技術への取組みのきっかけ

私が電波の魅力に取り憑かれたのは小学校4年生のときだ。伊豆大島に住み、普段は木登りや焚き火で遊んでいた。ある日、父に連れられて上京。秋葉原と神田をウロウロとして、科学教材社で二石ストレートラジオの組立てキットを購入した。自宅に着くまで待ちきれず、夜行船の中でキットを取り出して、抵抗の足を曲げて基板に差し込んでみたのが始まりだ。理屈も分からずに、形だけまねて八木アンテナを作ってみたが、当然使いものにはならなかった。中学1年生でハムの免許を取ると、電波熱はさらに高くなり、アンテナハンドブックが大事な1冊になり、FM放送受信アンテナが処女作となった。島抜けして高専に進み、大好きであるはずの電磁気学を学んだが、早速、ベクトル解析でつまづき、マクスウェル方程式を理解するどころか、「ナブラファイってなんだー?」と、いわゆる捨てる科目になってしまった。卒業研究で選んだのは光空間通信であった。まさか、大人になってから水中光通信をやるとは思いもしなかった。この時は伝搬ではなく、FM復調機の製作に熱中した。

波の理解に転機が訪れたのは、無線メーカーのJRCに入社した初年度だ。なぜか、高専卒だというのに研究所に出入りさせてもらえ、そこで8510というネットワークアナライザに出会った。見た目がものすごく格好良い。先輩に聞くところによると、アンテナのマッチングができると言う。この時から、電磁気学の必死の学び直しと高周波回路設計のOJTが始まった。研究所には学会で有名なアンテナ研究者がいらっしゃり、いろいろ教えてもらうことになる。2年ほどでこの天国のような環境から離れて、実設計部隊に配属され、時の花形無線システムである、コードレス電話、小電力無線機、アナログ携帯電話と関わらせてもらった。やればやるほど基礎能力が足りないと感じて、29歳で世話になったJRCを辞め、大学院の物理専攻に学んだ。当然実験系だったので、色々と実験装置を手作りするのにJRC時代の技術が役に立った。ミリ波のスペクトロメーターも製作した。34歳で博士号を頂いたが、就職先は無く、バイトをしていたソフトウェアハウスに世話になったが、3年ほどしたところで、未経験の深海ロボットの技術研究者としてJAMSTECに採用していただいた。世界で最も長時間連続

航行できる深海ロボット「うらしま」を始め、多くのロボット開発に携わった。

ロボットを開発しつつも電磁波への興味は失せず、海水中の電波通信や海底の電磁探査について論文を読んでいった。入所して3年目の2004年に海中で電磁波を試すチャンスが訪れた。小型の海中ロボットの遠隔操縦を音波以外のメディアでやるという試みだ。さっそく、これまで読み漁った海中通信の文献を参考に、数種類の海中アンテナを製作し、送信機を防水容器に収納した計測装置を用いて岸壁で伝搬試験を行った。この時に計測した奇妙なデータ(図1)が、海中電磁気を続ける動機となった。海中伝搬なのに、100m先でも3dBしか減衰しなかったのだ。周波数は70kHzである。現象はその後再現していないので計測間違いであろうと思うものの、海中電磁波の伝搬には未発見の何かがあるのではないかという僅かな思いを抱きながら研究にのめり込んでいる。



■図1. 長波海中伝搬の距離特性 (JAMSTEC岸壁、2004年2月) 多数回巻コイルアンテナで受信すると、80m先でも減衰量は数dBと異常と思われる計測値を得た。

海中の光を始めたきっかけは、海中電磁波より3年ほど遅い2007年の展示会である企業との出会いである。ほくらが前述の小型ロボットを展示しているところに来られた、三菱電機特機システムの方々と、電波でなくレーザーでやったら良いのではないかという話で盛り上がった。後日共同



研究契約を結んで、海水の光減衰を計測する共同作業が始まった。当初は表層の海水を汲み、机上で散乱と減衰を計測したが、得られる減衰量は数dB/mと大きく使い物になりそうもない。深海ならどうだろうと考え、これまでの経験から深海に近い透明度のある石西礁湖の海水を計測してみようということになった。これでダメなら諦めようと考えていたが、1dB/mを下回る減衰量を得た。研究を継続する決意をした私たちは、深海のin-situ減衰量計測機を開発して、青～緑光の減衰特性を計測した結果、深海なら理論的に300m程度のサービスレンジを得られそうだと結論した。さあ、これなら実用化可能と、システム開発に乗り出したがここからが苦難の始まりであった。

2. 水中光技術

水中の光技術の歴史や簡単な理論については、すでに拙文で述べさせていただいたので、そちらを参考にさせていただきたい^[1]。ここでは、自分達の活動を中心とした物語を展開させていただく。私たちが最初に取り組んだ水中光システムはレーザー測距装置である。今考えれば、実現が一番難しいシステムなのだが、この頃は深い考察をせずに、固定ビームで往復の距離を測れば良いだけなので簡単だとタカを括っていた。このシステムの詳細は、参考文献[2]を参照いただくとして、苦労した点を述べておきたい。システム仕様を決定するに当たっては、プレート境界型地震や海中の地滑りの研究をされている方々の意見を反映し、かつ音響システムで得られていない分解能を得ようと考え、分解能をmmに設定した。また、ダイナミックレンジの計算から、計測レンジは100mを目標とした。距離を計測する方法には位相比較方式を用いた。この方式の欠点はリファレンスラインが必要となる点である。実験を通じて気づいた、このシステムの最大の問題点は光軸を正確に合わせる必要があるということである。最初の試験は浅海で透明度の高い石西礁湖で実施した。漁船上にデータ処理・表示のためのパソコンを置き、海中に一对の測距システムを設置した。しかし、船上で計測機の値を読みながら、手動により海中で光軸を丁寧に合わせるためには、かなり浅い場所を選ばなくてはならない。すると波による海水のかき混ぜ効果が影響して、気体の混入や温度変化が起り、海水の密度揺らぎが大きくなってしまった。セカンドプロトタイプまで製作し、精度をmm台まで追い込んだものの、結局のところ光軸合わせが完全にはできずに測距レンジは10mにとどまり、光の到達距離も最大で30m程度であった。海中でレー

ザーを使うためには、高度な光軸合わせメカニズムが必須なのである。しかし、軸合わせ技術は通信では非常に一般的であり、競争的資金に応募しても革新的な技術ではないため、落とされることが明白であった。つまり民間企業が製品化のために開発するアイテムなのだ。しかし、2021年現在であっても、海中レーザー測距でビジネス的に成功するかと問われればノーであり、水中光軸合わせシステムはいつまでたっても開発が行われない。これは後述する水中光通信においても同じことが言える。

海中測距システムでの挫折はあったものの、2010年に水中LiDARを開発するチャンスが得られた。LiDARであれば反射光を受信するため光軸合わせは必要ない。結果的に、LiDARが最も成功した水中光システムとなった。特に海外では、海中石油・ガス業界や海軍関係を対象とした製品ラインナップがあり、ソナーを補間する30m以下の近距離における高解像度システムとして利用されている。日本でも三菱電機特機システムが共同研究成果を用いて製品化を行い、JOGMECや産総研の海底地形調査に利用され始めている。もちろん、水中LiDARも日本では簡単には受け入れられなかった。現在も水中LiDARに懐疑的な意見をもつ専門家もいる。しかし、2015年に石橋らがプレス発表した^[3]、大室ダシの詳細海底地形と小規模の熱水の可視化画像は素晴らしく、同時搭載したカメラとサイドスキャンソナーでは全く認識ができていないことから、水中カメラとソナーの間を補間できる非常に強力なツールであることを明確に示している。石橋らは現在も、更なる計測レンジの拡大と、新たにドブラー速度計測も加味した新型機の開発に意欲的に取り組んでいる。

水中光通信に関しては、私たちが取り組む前から、浅海や水槽での利用を目指した開発が行われてきていた。2015年にJAMSTECの澤らが安全保障技術推進制度のテーマに採択され、水中光通信システムの開発資金を得た。彼らは長波長側も含めた海水の伝搬損失を計測するところから着手したが、もっとも大きな功績は、2017年に深海700mにおいて、縦方向に距離120mにおいて、20Mbpsの深海中高速双方向光通信を実証したこと^[4]である。この時の光軸合わせは、縦方向に2連結している海中ロボットを利用したことで達成した。この距離におけるこの速度の通信はこれまでの常識を覆すもので、理論的には推測されていたとはいえ、非常に輝かしい成果であった。共同で研究を行っていた島津製作所は水中光通信装置を製品化して発売している。2021年、新たなブレイクスルーが起こった。本稿の執

筆現在未発表なので詳細は説明できないが、本記事が掲載されるころにはプレス発表がされているだろう。澤らの成果を大きくしのぐ、海中光通信の実証がなされたのだ。

以上のように、私達がきっかけを作った水中光技術研究が、どんどん花開いてゆき、革新的な研究成果や実用化が日本でも現れてきている。水中光技術の実用化を目指した団体としては、JEITAがサポートしているALANコンソーシアムがあり、非常に魅力的な近未来の水中光社会の絵を描いている。最後に一言。水中光技術応用のビジネス化を実現するためには枯れた技術と思われ、研究費を得ることが難しい、「水中光軸合わせ技術」をどうにかして進めるべきだということである。この技術を向上させ廉価な装置を実現しなければ、LiDAR以外の技術は実用にならない。いまは、水中光を利用したビジネスは黎明期にあるため、リスクが高く誰も投資をしない。しかし、投資しなければ永遠にビジネス化できないのである。バックキャストデザインを行い、光軸合わせ技術が将来の水中ビジネスに必須な一技術であることを認識いただき、投資して欲しい。

3. 水中電磁波技術

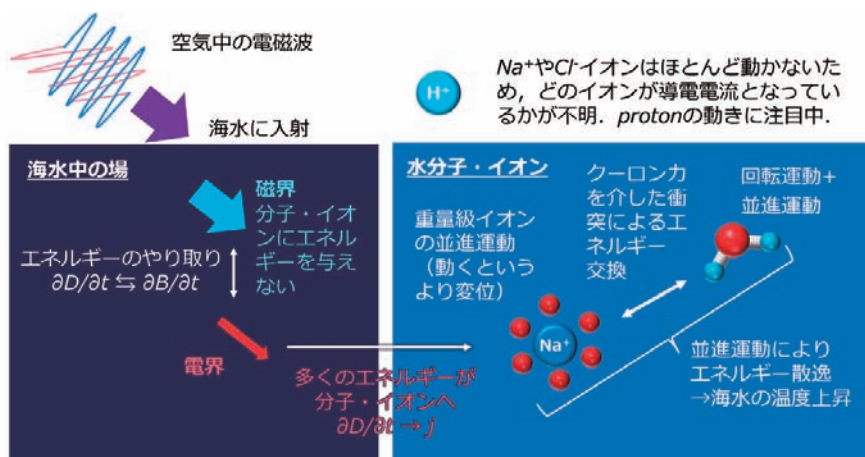
はじめに分類をしておきたい。電磁波に関しては、真水と海水では伝搬特性と使用できるアンテナが全く違う。よって、塩分がほとんど含まれていない水道水を場とする電磁波技術を「真水中の電磁波技術」、海水のように導電率が2~5S/m程度の塩水の場における電磁波を扱う場合を「海水中の電磁波技術」と呼ばせていただく。物理的にはイオンの有無によって分類すべきなのだが、実用的には上述の分類が適当と思われる。

水分子しか存在しない純水の場合は、外場として低周波

の電磁波が入射しても激しい減衰は起こらない。液体の水は熱運動によって水分子同士の水素結合が分離・結合を繰り返している。ここに低周波の電磁波が加わると、主として水分子の回転を励起する。しかし、もともと並進運動もしている水分子は、外場によって水素結合の引っ張り合いの度合いが変化し、電磁波エネルギーは並進運動に変換されていくことによって損失を生み減衰する。この度合いは周波数が高くなればなるほど大きくなり、常温ではマイクロ波領域で外場振動に分子の動きが追従できなくなり大きな損失を生む。より周波数が高くなると、配向電位によるダイポールモーメントが追従できる速度を超えて物理応答が変わる。

イオンが存在すると描像が急激に変わる。最近の私たちの研究では、図2に示すような描像と推測している。イオンは外場によって並進運動を起こす。水和によりその動きの変位量は小さく抑えられるが、水分子のある程度の秩序を乱して並進運動を増大させるには十分である。わずかなイオン数であっても、イオンの存在によって水分子の衝突が増大し、系の熱は急激に上昇する。つまり、外場としての電磁波のエネルギーは消費される。このメカニズムは少しの変位を起こすことが重要であるため、電磁波の周波数の変化には鈍感である。実際の海水においては、水分子とイオンの両者の電磁波レスポンスによって減衰量が決定される。

さて、ここでは主として海水中の電磁波技術に焦点を当てて話を進めさせていただく。冒頭に述べた奇妙な伝搬以降、特に研究仲間もいなかったこともあり、本業のロボット開発と光技術に注力していた。転機が訪れたのは2016年で、千葉大の高橋先生、新潟大の石井先生、東北大学の陳先生たちの研究グループからの、海中電磁波についての共同研究の誘いであった。国内のトップレベルのアンテナ・



■図2. 海中への電磁波エネルギー輸送と損失のメカニズム



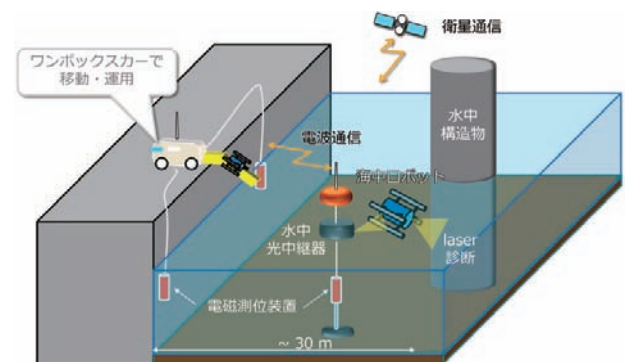
電波伝搬研究者との出会いである。ちょうど私のロボット開発が新たな局面を迎え、北極海水下に展開するロボットの研究開発が始まったところであった。海水に閉ざされた海では、電波どころか音波も利用できない。ロボットは通信と測位という手段を失ってしまうのだ。そこで、考えていたのが、気中-海水-海中という三層界面を通過できる長波の電磁波である。近似的な伝搬理論では、10kHzであれば海中でも30m程度のサービスエリアが得られる。海水はほとんど塩分が抜けており、かつ水よりも密度が低いため無損失に近いので、海水の底から30m以内にロボットがいれば、通信と測位ができると考えたわけだ。一方、先生がたは海水中での実験ノウハウを求めていらっしやった。この共同研究から、急激に海中電磁気技術の研究開発が加速した。電子情報通信学会でも、個別に海中電磁波を研究していた方々となることができ、海中電磁気コミュニティができ始めた。私は海中のアンテナ設計・製作と海中実験システムの構築、高橋先生は海中測位の研究、石井先生はラボでの正しい海中計測を実現するための擬似スケール則の研究、陳先生らは海中でのアンテナ動作の研究を進め、ラテラル波^[5]の検証を始め、かなり体系化が進み始めている。2020年には電子情報通信学会・通信ソサエティの研究専門委員会として海中ワイヤレス技術研究会(UWT研)が発足した。

まだ、海中電磁気技術を応用した製品はできておらず、海水下測位・通信も実用化されていないが、これまでの経験的に、系統的な研究を開始してから実証までがおおむね7~8年、社会で認められるようになるまでは、さらに5年程度必要なのであることから、海中電磁気の実証がなされるのは2023年ごろで、社会で一般的に利用されるようになるのは、2028年~2030年ではないかと推測している。

4. 水中光・電磁波技術による社会貢献の展望

国土が狭い我が国においては、海洋の利用は国の悲願であると言えるのではないかと。海洋立国をうたった書物はずいぶん昔からある。しかし、主たる海洋産業といえば、商船・造船・漁業養殖の3つだけで、年間市場は約10兆円、しかも思い切り右肩下がりの発展状況である。人が新地を開拓するときに必要な道具は、そこへの移動手段、そこでの作業ツール、そこと都市を結ぶ情報網である。音・光・電磁波は、通信・測位・テレメトリの手段として新規開拓には必須の技術である。例えば、少子高齢化対策としての自動化養殖システムを考えた場合、海中でのセンシングの

ためのメディアとして、音を補間する技術として光・電磁波技術が提案できるようになれば、音の弱点をカバーでき、できなかったことができるようになる。ダイバーの代わりに作業する水中ロボットは、現在はテザード(有線)遠隔が主流だが、ワイヤレス化が可能になればケーブル拘束がなくなり機体の小型化と自由度が増す。水中測位は難しい技術だが音と電磁波によるハイブリッドで高精度低価格のシステムが構築できるかもしれない。図3に将来の実施イメージを示した。海中ワイヤレス通信速度は10kbps台が常識であるが、光によってGbpsが可能になるかもしれない。このように例を挙げればきりが無いほど、水中光・電磁波技術は新たなビジネスを生み出せる可能性を秘めており、社会貢献のためのキーテクノロジーの一つである。新たなビジネスを生み出す技術でありながら、まだまだ、物理的に未知な研究フィールドでもある、水中光・電磁波技術は、少なくともこれから10年間は目を離せない技術だ。



■図3. 海中光・電磁波の産業応用例。水中構造物点検用のロボット運用で、測位に電磁波を、通信とセンシングに光を用いている。

参考文献

- [1] 吉田弘, “レーザーセンサの海洋分野への応用の期待と可能性,” 月刊オプトロニクス2019年11月号.
- [2] 吉田弘, “高精度海底移動量計測を目指した海中レーザースティック,” O plus E, 393, pp. 770-775, 2012年07月25日
- [3] 国立研究開発法人海洋研究開発機構プレス発表, 「AUV搭載式3Dレーザースキャナーによる海底熱水域の可視化に成功」, 2015年12月2日, http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20151202/
- [4] Takao SAWA, et al., “Practical Performance and Prospect of Underwater Optical Wireless Communication,” IEICE Trans. Fundamentals, E102. A (1), pp. 156-167 (2019).
- [5] R. W. P. King, M. Owens, and T. T. Wu, “Lateral Electromagnetic Waves,” Springer New York, 1992.