

最新的水中無線技術の研究動向と将来展望

Recent Trend and Future Perspective of Underwater Wireless Technology

吉田 弘 Hiroshi Yoshida†

Summary

水中無線技術の歴史は古く、音波による測深技術や潜水艦の長波通信は、1900年代前半に既に利用されていた。世界においては現在も積極的に石油・ガス産業や防衛・軍事産業で水中無線技術が多用されているが、我が国では、海洋産業の衰退もあり、市場の縮小とともに技術者も減ってきている。しかしながら、我が国は世界で6番目の広さの海洋面積（領海+排他的経済水域）を有する国であり、そこには多くの資源があり、また、国家としても海洋立国をうたっている。国内の海洋市場が縮小しているならば、市場を創るという行動をするべきだ。また、普段、空気を媒質として研究を進めている多くの研究者にとって、液体導電性媒質の海水は非常に面白い研究ターゲットである。市場形成を迎える前に、基礎研究を進め、いつでも応用が利くようにしておくべきだ。本稿では水中無線技術の総論として、研究内容だけでなく、心構えや市場性、将来性について紹介する。

Key Words

水中音響, 水中光無線, 水中電磁気, 海中技術, 海中ビジネス

1 水中無線技術が生かせる市場はあるか

近年の科学技術は大きな加速度をもって発展しており、2045年にはシンギュラリティ⁽¹⁾ (用語)を迎えると言われている。特に複雑系のサイエンス、データサイエンス、情報工学、生物工学、光・量子工学⁽²⁾の進歩はすさまじい。しかし、一方で、政治や経営判断で科学技術の情報を用いずに決定が行われる場合も散見される（ポストトゥルースの時代⁽³⁾ (用語)）。米国前大統領の決定や、我が国での感染症下でのイベント開催判断など、皆様の記憶にも新しいだろう。このようなちぐはぐな感じのある社会で、私たちは研究・開発、製品化に携わっており、何を目指して科学技術を進めればよいのか判断に迷ってしまう。加えて日本では、「失われた30年」と言われるように、バブル崩壊後の経済低迷は御存じのとおりであり、技術者や技能者の活躍の場に不安を感じる。更に、少子高齢化が世界に先駆けて進行しており、このままでは、2030年にはゼロ成長時代⁽⁴⁾に入っていく、若手の技術者が減少することは間違いない。

なぜ、水中無線の話でこのような書き出しとなったかという、水中の技術に挑戦すること、すなわち水中に関わる産業に貢献しようと決めたのであれば、失われた30年の間と同じ行動をしては何も起らない、と筆者が感じているからである。既出の

「失われた30年」関連の書物では、構造転換がなされなかったことや、金融政策の失敗などが挙げられている⁽⁵⁾が、どうすればよいのかが描けていない。山岡の著作⁽⁶⁾では、日本人的なところを見直したらよいという提案がなされている。日本人論は賛否両論あるものの⁽⁷⁾、日本で育ち、教育を受けた私たちには一定の思考・行動傾向があるようには思える。泉⁽⁸⁾によれば、失われた30年は、既に1960年にウィリアム・ベルによって予言されていた情報社会の到来を、日本では誰も気に止めなかったためだ。一方、米国は製造業から情報サービス業に転換し、今の「GAFAM」が出来上がったが、日本は（ハードウェアを中心とした）製造業に注力し、新たな産業分野に余力を入れなかったために、日本全体の成長が低迷したわけである。図1のグラフを見る限り、データをきちんと分析していれば、いつの時点でも、日本は構造転換ができたわけだが、データ分析能力にたけていても、社会学と技術を結び付けたデータを、作らない・見ない・見ても行動しない、わけである。泉先生の言を借りれば、「失われた30年」ではなく、「何もしなかった30年」なのだ。

さて、斜陽する海洋産業において、いまだ新たな海洋産業は生まれてきていない。もちろん、洋上風力発電・海底資源をはじめ、自動運航船などには、国と民間企業が一体となって取り組んでいる最中である。しかし、これらを主体的に実施しているのは大企業とその出資元である。つまり、欧米に比較すると動きはどうしても重くなっている。と

† 国立研究開発法人海洋研究開発機構, 横須賀市 JAMSTEC, Yokosuka-shi, 237-0061 Japan

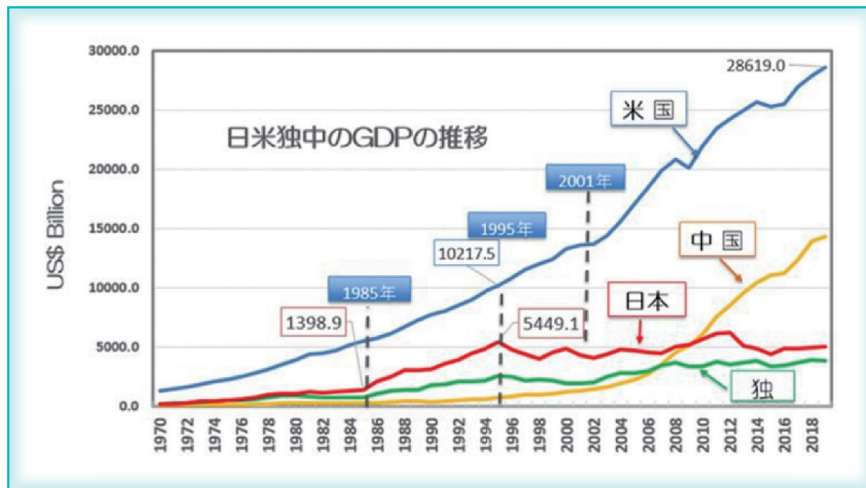


図1 日、米、独、中のGDPの推移⁽⁸⁾

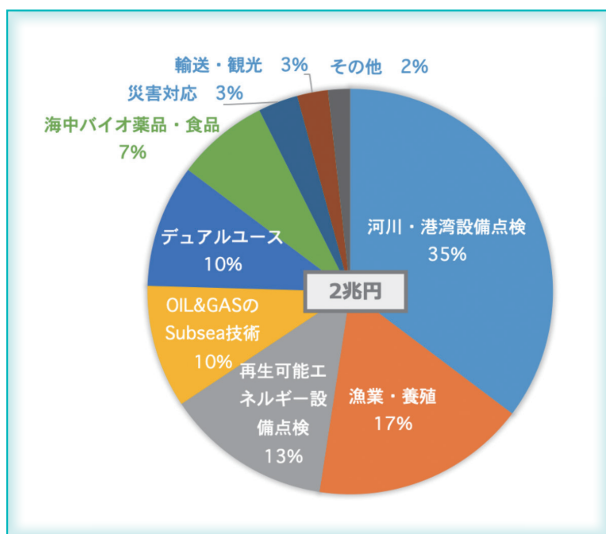


図2 水域ロボットサービスの2025年のビジネスポテンシャルの推定 (COCN フィールドロボット協議会作成⁽⁹⁾)

りわけ海中ビジネスに目を向けると、近々に産業化するアイテムは僅かと思われる。(2021年現在、ICTを活用した水域の自動化ビジネスについて取り組んでいるベンチャー企業が相当数ある。しかし、GDPから考えるとまだまだ小規模であり、試験運用のレベルであったりする。)しかし、産業ポテンシャルがないわけではない。図2に示すように、水中のICTーロボットサービスに関する新たなビジネスのポテンシャルは、2025年には2兆円市場と推定される⁽⁹⁾。なお、図中の「Subsea技術」は、深海石油・ガス業界に関わる技術サービス業を、また「デュアルユース」は、防衛を主とするが民生転用できるサービス業を示している。

日本は世界で6番目に大きい海洋面積を有する国である。この海洋を使わずして新たな産業は生み出せないだろう。しかし、これまで述べたように、「海洋産業に新たに取り組みたい」という希望はあ

るものの、この30年間で、技術の研究開発投資を縮小してきた民間企業にとっては、新技術開発とその実証が必要である海洋産業の創出に、リスクを背負っては乗り出せないのだ。つまり、海洋に新ビジネスを期待している企業は少なからず見受けられるが、それらの企業は他企業が先行して事業に成功するかどうかをうかがっているという状況なのである。

さて、私たち研究者・技術者は、ほとんどの場合、自分のやってきた技術を中心に据えて産業応用を検討する。しかし、この考え方では新たな分野の開拓に挑むことができない。せいぜい、その分野の知見者に伺いを立てて、いかに自分の有する技術を利用できるかと考える範囲にとどまる。今こそ技術者は大きな世界観を持って、新たな産業や新たな世の中を創造するためのデザインを行うべきだ。視点を変えれば、技術者が取り組んでいる技術は、「それ」だけではなく、ほかのことを広く検討できるような基礎理論と手法を内包しているはずである。そのような高い視点に立ち、「専門家ばか」にならずに、社会学などにも目を向けるとよいと思う。既に顕在化している未来の社会課題を解決するために、従来のフォアキャスト^(用語)手法に加え、バックキャスト手法を用いて、必要な技術を見いだして新たな取組みをすべきであろう。例えば、海洋であれば、次代のエネルギー・資源獲得、気候変動・地球温暖化対策、プレート境界型地震の予報といった非常にグローバルな課題から、漁業・養殖業の構造転換、水中インフラ保守整備の自動化といった身近な仕事まで、非常に多岐にわたって、新産業のビジネスポテンシャルがある。

自分のやってきた技術が使えないなら専門家などいらないではないか、とお叱りを受けそうである。それはそのとおりであり、私が指摘したいの

は、自分の専門に閉じ籠もり過ぎの日本人の思考傾向だ。技術者であっても、社会に役立つ技術を知るためには、社会学者が使うデータを集めて分析すべきなのだ。それを全部他人に委ねると、自分の視点での分析ができなくなってしまい、結果、自分の専門性を新規産業に生かすことができなくなってしまう。

この場をお借りして言っておきたい。海洋に興味を持って頂いた研究者・技術者の皆様は、単なる技術の一分野の情報として本小特集を読んで頂くのではなく、自分たちの研究やビジネスの新分野の開拓の機会がそこにあり、新たな取組みを試す最大のチャンスが示されていると捉えて頂いたら非常にうれしい。ほとんどの読者は、「面白そうだけど、実際には水中無線技術は使い道がないよね」と考えてしまいがちである。ところが、職業ダイバーや漁業従事者の激減という社会課題に対応するソリューションの一技術として考えて頂ければ、あなたの会社や自宅からネットワークを通じて海洋や水中にアクセスし、センサやロボットの遠隔操作の実現が必要であることが分かり、通信としては水中だけでないことが容易に理解できるわけである。

2 水中無線技術

水中・海中の無線技術の代表格は音響無線技術である。最初に測深技術（ソナー）の研究が始まり、その後に音響通信が続いた。電波とは異なり、水中を振動する疎密波として伝わる音波は、環境条件、つまり水の密度（水温、塩分濃度、圧力の関数）の影響を大きく受けるものの、光や電波と比較して、圧倒的に水中では長距離を伝搬できる特性を有していることから、着目され、研究開発が進んだわけである。音波は電波のアナロジーとして考えたいが、音波は水分子の振動であるわけだから、振動数が高くなるとエネルギーが吸収される。この吸収減衰は、周波数が高くなると、拡散減衰よりも効いてくるため、利用される周波数の上限はおおむね数 MHz である。例えば、ざっくりと言うと、数 km の距離では 10 kHz のオーダーが使用され、距離が短くなると 100 kHz 台が利用される。搬送波周波数が kHz 台ということは、通信速度も気中の電波に比べて非常に低速となる。搬送波周波数に対する占有帯域幅の比が非常に大きくなり、実際の設計に影響を与える。当然のように、単一チャネルの半二重通信がほとんどであった。しかし、近年は信号処理技術と空間ダイバーシチ技術により、多チャネル

化や高速化がなされ、100 kbit/s を超える通信も可能となってきている。ソナー応用としては、目的別に数百 Hz から MHz まで広く利用される。

光通信は、100 Mbit/s 以上の高速通信を提供できるポテンシャルがあるが、通信距離をとるためにはレーザーを利用して光軸を合わせる必要があり、LED のようにブロードな指向性では通信可能距離は非常に短くなる。実際の通信の利用場所である沿岸浅海域や河川では、濁度が高く、水の乱れも強いことから、通信可能な距離は数 m まで短縮され、実用性が低下してしまう。しかし、キューブサットにおける、3U サイズで数百 Mbit/s の速度を実現しているような、衛星光通信のすさまじい発展状況を見ると、海中光通信もまだまだ技術開発の余地があり、近未来には実用に供するシステムを実現できる可能性は高い。

電波については、水中、とりわけ海中では使えないという通説どおり、マイクロ波領域の電波は吸収減衰が大きく使い物にならない。しかし、周波数を下げていくと、真水中では 100 MHz 以下で、海水中では 100 kHz 以下で実用性が出てくる。例えば海中で 10 kHz を利用すると、通信距離は 30 m 程度で通信速度も 1 kbit/s 程度と遅くはあるが、環境や媒質に影響されにくく安定した通信を行える可能性が高い。

2.1 水中音響技術の動向

初めに水中音響の基礎を少しだけ紹介する。音源（送波器）によって海水粒子の運動が励起される。正弦波的に変化する運動が加えられれば、粒子は伝搬方向に平行に運動しながら、隣接粒子によって伝えられ広がっていく。海水は圧縮性流体であるから、この運動が正弦波状の圧力変化を生む。圧力の変化はマイクロホンのような圧力検出器（受波器）によって検出する。平面波近似で考えると、音圧 p (Pa) は、

$$p = \rho v u \quad (1)$$

と記述できる。ここで、 ρ (kg/m³) は海水の密度、 v (m/s) は平面波の伝搬速度、 u (m/s) は海水粒子の速度である。 $\rho v = 1.5 \times 10^5$ (g/cm²/s) は代表的な海水における固有音響インピーダンスである。インピーダンスを用いると、オームの法則の電圧＝インピーダンス×電流のアナロジーが利用でき、パワー P (W/cm²) は式(2)で書ける。

$$P = p^2 / \rho v \times 10^{-7} \quad (2)$$

海中での伝搬減衰は、拡散減衰と吸収減衰の二つが主となる。吸収減衰は 1 MHz 以上の周波数で生ずる粘性抵抗による減衰と、それ以下の周波数で現れる分子共鳴による緩和に伴う減衰がある。吸収減衰の経験式として有名な Thorp⁽¹⁰⁾ の式がある。

水中音響では、ドップラー効果の影響が非常に大きく、例えば自律型無人探査機の代表的速度である 3 ノット（時速 5 km 程度）でも影響が大きい。水中では反射波が大きいことも実装では問題になる。音響装置を海中に展開するフレームに搭載すると、そのフレームによる反射波が影響する。海面に近い場所を航行する移動体との通信は、海面反射が大きく影響する。これらの複数の反射波（マルチパス）の影響は、特に河川や港湾など、多数の人工物がある場所で問題になるので、信号処理などで積極的に取り除く必要がある。こういった理由から、浅海での音波の利用は環境に依存する。

伝搬環境としての基礎知識をもう一つ紹介しておきたい。先に述べたように、音波は水そのものの密度の時間変動を利用して情報を伝達することから、水の物理特性を大きく受ける。特に海水において、海水密度は水温、圧力、塩分濃度の関数であることから、深海では垂直方向に特有の音速プロファイルを示す。図 3 に一例を示すように、温度と水圧の関係から、海洋においては深度 1,000 m 付近に SOFAR 層という導波レイヤが存在する。また、この密度特性によって、見通し点においても不感帯となるような場所が生ずることがある。

さて、水中音響の技術の動向について紹介しよう。志村ら⁽¹¹⁾は、この SOFAR 層を利用した音響通信で実到達距離 1,000 km を超える通信を実証している。彼らは、低周波の大形送受波システムを開発し、伊豆・小笠原海域を利用して、音源と受波アレーを SOFAR 層に展開して、送受間の距離を変えながら計測を行った。このときに用いた手法は位相共役波をコア技術とし、イコライジングによって変動を吸収した。また、樹田ら⁽¹²⁾はイコライジングを最適化することで、伝送速度×距離の値（BL 積）を、従来方式の 40 kbit/s×km 程度から、桁違いで凌駕する 520 kbit/s×km の垂直方向の通信システムを作り、海洋研究開発機構の有人潜水調査船「しんかい 6500」の母船間映像通信に適用した。このような広大な海洋空間を利用した音響技術ばかりでなく、マルチパスの影響が強い浅海での研究もいろいろと進んでいる。ここ 10 年では OFDM、MIMO、ビームフォーミングなど電波通信で主流の手法を海中に適用した研究が見受けられる。しか

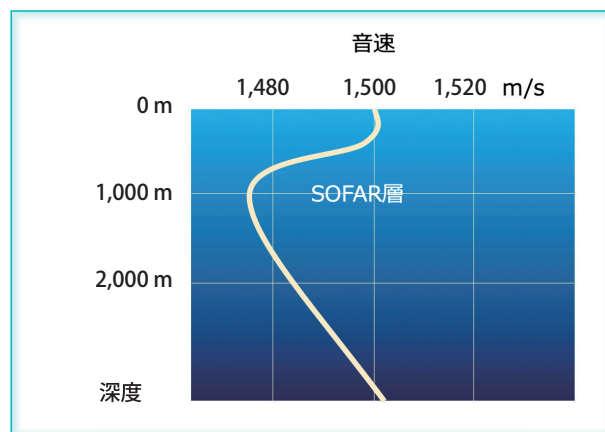


図 3 海中の音速分布の深度依存性

し、電波通信で主流の手法が全て海中で主流になるかということ、海中の伝搬遅延が大きくマルチパスの影響が長時間生じるといった特性を考えると、そうでもないことが分かっている。例えば OFDM は、その優位性である周波数の有効利用というメリットが得られにくいため、圧倒的優位な手法ということにはならず、幾つかある水中通信の一手法として利用されるにとどまっている。吉澤ら⁽¹³⁾は、浅海での音響測位がマルチパスなどで使いにくい点に着目し、浅海での測位手法の研究を進めている。NTT 未来ねっと研究所は MIMO 技術を利用した、1 Mbit/s を超える水中通信の達成を目標とした研究に着手している⁽¹⁴⁾。

国内は水中に関するビジネスが少ないため、水中音響の専門メーカーは少ない。昔は、日立製作所や沖電気工業、NEC などの大企業が水中音響機器を開発・販売していたが、近年は防衛に関わる産業に限定されているようだ。コンシューマ向けの製品として残っているのは魚群探知機（魚探）ぐらいであろう。良いニュースとしては、近年のハードウェア集積化とソフトウェア化により、かなり廉価な魚探が販売され、専門家でなくとも購入できる価格になってきている。つまり、魚探の分野では、ソナーは特殊機器というよりも、ネットで買える汎用機器化しているわけだ。一方、小規模の企業であるが、OKI シーテック、SGK システム技研、アクアサウンドなど、現在も精力的に水中音響機器を開発している企業がある。

国際的な水中音響の研究開発の傾向としては、要素技術系としては MIMO 通信、空間多重通信、測位技術として母船と水中機器の関係を逆にしたインバース SSBL (Super short base line)⁽¹⁵⁾、ソナーや通信を目的としたファーズドアレー技術、ユニークなところでは深層ニューラルネットワークを利用

した通信の研究⁽¹⁶⁾などが進められている。市場・実用を目指したシステム技術系としては、水中センサネットワーク、多数の水中ロボットの協調制御、養殖における魚固体数計量と体重推定などの取組みがあるようだ。

2.2 水中光技術の動向

水中の光は指数関数的に減衰する。この特性は有名な Beer-Lambert 則となる。ここで $E(r)$ は、光源から距離 r における光強度を表している。

$$E(r) = E_0 e^{-cr} \quad (3)$$

減衰定数 c の減衰要因は複数ある。純水は緑～紫の光をよく透過させる。しかし海水になると、塩分や微粒子などの混ざり物があり、その混ざり具合により減衰量は大きく変化する。式(4)は、混ざり物として、イエローサブスタンス（生物の代謝や死滅によると思われる化合物）と懸濁粒子を考慮した場合の減衰定数である。

$$c = a_w + a_y + a_p + b_m + b_p \quad (4)$$

ここで、 a_w , a_y , a_p はそれぞれ、純水、イエローサブスタンス、懸濁粒子による吸収項、 b_m , b_p はそれぞれレイリー散乱と、懸濁粒子等によるミー散乱による散乱項である。以上のように、吸収・散乱要因が複数あるということは、波長による吸収率の違いが大きくなるということである。図4はイエローサブスタンスと懸濁粒子が多く含まれる海域の光吸収-波長特性である⁽¹⁷⁾。この図から読み取れるように、一般には海水は青色が透過すると言われていたとしても、混ざり物にイエローサブスタンスが多ければ、最適な波長は黄色側にシフトするということだ。

2000年以前の水中光応用は、主として、太陽光を光源としたパッシブな計測系として発展した。そのような時代に浅沼ら⁽¹⁸⁾は、固体レーザーを使った植物プランクトンの計測手法の研究に挑戦した。大形の固体レーザーを研究船の甲板に設置し、ミラーで曲げて海中に入射させ、プランクトンの誘起蛍光を計測するシステムであったが、海面の反射が強く、実用には至らなかった。また、海外の石油・ガス分野で、赤色半導体レーザーにより、至近距離からの海中オイルパイプ点検装置なども開発されたようだ。変化は突然に起きた。1990年代後半の青色LEDと半導体レーザーの出現により、青色光源を手軽に海中に持ち込むことができるようになった。最初に手掛けられた海中光機器は石油・ガス向けの青色レー

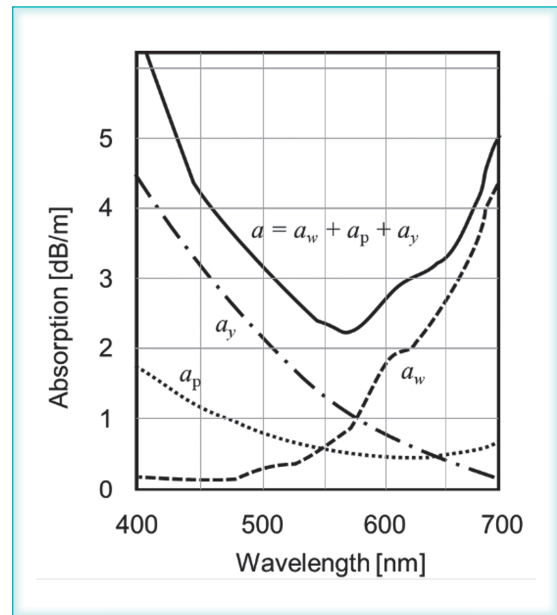


図4 懸濁粒子とイエローサブスタンスを含む海水の波長スペクトル
(筆者が原本⁽¹⁷⁾中の Fig 4.2.6 を再描画した)

ザスキャナである。現在は、処理が高度化し、欧米のベンチャー企業によって、非常に多種のラインナップがそろえられ販売されている。現在の水中ライダー (LiDAR) の研究開発は、深海利用と浅海利用の二つのターゲットに分かれ、前者としてはソナー並みの距離レンジ (30 m 以上) を有しながら、cm の解像度を有する特徴を生かすことであり、ボーイング社、3D at Depth 社が開発を進めている。国内では、海洋研究開発機構と三菱電機特機システムの共同開発⁽¹⁹⁾において、既に 30 m のレンジが達成され、現在は、50 m を超えるレンジの達成に向けた開発が進められているようだ。浅海をターゲットとした研究開発は、高濁度環境でのレンジ・分解能を向上させることと、ローコスト化が課題であり、現在、ALAN コンソーシアムの構成メンバーにおいては、浅海向けライダーの検討がなされている。

水中通信に関しては、机上の水槽実験による、通信の高速化を主とした研究が世界的に進んでいる。最近の論文には軌道角運動量多重方式を用いた通信の研究報告がある⁽²⁰⁾。2010年頃には、国内でも水中での光通信の実用実験が複数の技術チームでなされ、太陽誘電と東洋電機の合同チームでは、NHK の水中撮影ダイバー向けの高速度無線通信装置のプロトタイプが発表された。しかし、市販機となると、世界でも数社しか販売していない。この中には、海洋研究開発機構の澤⁽²¹⁾が協力し、島津製作所が製品化した水中光通信装置が含まれている。ま

た、2019年には、KDDI 総合研究所がスマホの海中無線化実験を、水中光通信を利用してデモンストラレーションした⁽²²⁾。このような海中の光無線技術を発展させる目的で、2018年にALANコンソーシアム^(明説)が立ち上がり、定期的な情報交換会が開催されている。実環境を考慮した実験研究には台風後の海水混濁時の光伝搬特性の報告⁽²³⁾がある。光通信は秘匿性が高いことから、米海軍などは本格的な利用を検討していると思われる。光による海中無線給電の研究については、宮本⁽²⁴⁾がレーザーを利用した海中給電について基礎的な取組みを進めており、課題や解決方法を提案している。

以上のように、海中の光無線技術としては、主としてライダによる可視化と通信の研究が行われている。ライダについては、欧米で製品化が進んでおり、国内もそれに追従する動きがあるが、国内市場が形成されていないのが問題である。水中光無線通信については、基礎研究は多く、製品化も国内外でなされている。しかし、広く水中の現場で使われているという話はほとんど聞かない。私見ではあるが、光通信装置の実用化には、Kaバンドや光の衛星通信と同じく、廉価な自動光軸合わせのシステムが必須なのである。光通信装置の本体だけでは、固定点間であったとしても、水中で光軸を合わせることが非常に難しい。移動体では光軸の追尾がなければ、全く使えなくなる。欧米からは自動追尾の論文が出始めているが、国内では追尾装置には研究費が出ないため、開発が進んでいない。このほかに、コストを下げることが水中光通信の課題である。現在開発されている水中光通信装置は、耐圧容器内に回路と素子を配置し、光学ウィンドにより防水と耐圧を実現している。この耐圧容器を従来の水中系企業が製作すると、1個当たり100万円を超える価格となる。これでは、幾ら水中通信ユニットを廉価に作っても安くならない。中国製の水中ロボットを見ると、数百m耐圧のものでも、数十万円の価格で販売されている。当然カメラを搭載した耐圧容器込みの値段だ。つまり、技術者たちは、自分の専門だけをこなして、後は専門家にお任せとしてしまっただけは、いつまでたっても市場に食い込めないのである。日本でも耐圧容器製作は、普通のケース製作と変わらないというぐらいにし、廉価に製作していくべきだ。

2.3 水中電磁波

ここでは、「電波」でなく「電磁波」という単語を使わせて頂く。どうしても「電波」という単語か

らは、ファーフィールドにおける、ポインティングベクトルによるエネルギー伝送のイメージになってしまうからだ。先にも述べたとおり、水中では電波は減衰してしまうので使えない。より厳密に電磁波エネルギーの水中減衰について考えると、対象の場を、導電率が1(S/m)よりはるかに低い真水の場合と、導電率が1(S/m)より大きい塩水(海水)の場合に分けて考える必要がある。(物理的には、純水とイオンが含まれた水に分けた方が正確であるが、実用上の感覚では、上記の分け方が適当と思われる。)

真水には少しのイオンしか混じっていないため、導電性が低くなる。一般に、電磁波エネルギーはイオン伝導によって失われると考えられているから、真水での電磁波の減衰は僅かと言える。この場合の電磁波エネルギーの水中での散逸メカニズムを簡単に解説しよう。純水であれば、 H_2O 分子しか含まれていない。 H_2O 分子は分極構造をしており、変動する電磁界が加えられると電界によって回転振動する。(磁界では振動しない。)水分子が単体である場合、回転によって放射が起こることから、エネルギーの散逸はないはずである。しかし、実際の水の H_2O 分子は、水素結合によって緩く結ばれており、熱運動によって、水素結合は結合・分離を繰り返している。ここに電磁界を加えると、当然、水分子は振動しようとして、水素結合の分離・再結合をしようとする。外部から印加される電磁界の振動数が高くなるほど、この結合の分離・結合の速度が速くなり、熱的に安定した状態から逸脱する。これによって、分子のランダムな直線運動が生じてエネルギーを散逸する。一般にはGHz帯に入ると、この散逸が大きくなることが知られている⁽²⁵⁾。

海水のエネルギー散逸メカニズムは非常に複雑である。一般には、イオンの移動のためにエネルギーが使われるように考えられているが、そんなにシンプルではない。ここからは筆者の仮説⁽²⁶⁾であるが、おおむね、次に述べる振舞いによって電磁波エネルギーが失われていると思われる。海水に入射された電磁波のうち、電界成分が水分子の回転振動を誘起する。ナトリウムイオンなどは、周囲に水分子が結合した水和状態になっており、電磁界によるイオンの運動はほとんど起こらない。水分子が振動すると、水分子の近くにいる水和イオンの結合力のおかげで、すぐに水分子はランダムな直線移動を開始する。これによって、水分子の振動は低下し、電磁波エネルギーは水分子と水和イオンの直線移動のために使用される。これがエネルギー散逸メカニズムの定性的な表現である。しかし、この描像には、

海中に導電電流を作る媒体が抜けている。直流印加時は、ナトリウムや塩素イオンがゆっくり移動する描像は成り立つが、交流電磁界の場合は、上述のように、ほとんどイオンは動けないはずである。では、何が交流導電電流を媒介しているかという確証がいまだとれていない。今のところ、プロトンが媒体になっている可能性があると考えて⁽²⁶⁾実験を進めると同時に、プロトンが導電電流を媒介するモデルが成立するか検討をしている。さて、ミクロの物理はこの辺で切り上げ、海中の電磁波エネルギーの伝達は、導電物質中の電流の広がりと同等であると考えると、次の話題に進めていこう。

海中通信の実用化は潜水艦の超長波通信が最初である。日本で潜水艦通信が開始されたのは1941年頃だ。海中通信の本格的な研究は1960年前後から盛り上がりを見せた。空気と海水間の問題は、Banos⁽²⁷⁾をはじめ、他の研究をベースにKing⁽²⁸⁾によって体系化された。Kingが定式化したラテラル波は、浅海実験において現れ、初学者の計測データ解釈を間違わせる。ラテラル波は海中を波源とする電磁波が、最短距離である海中よりも、損失が少ない気中を通り海中に再入射して、受信される波であり、アンテナ深度が数mの浅海実験では非常に優勢な波となる。Al-Shamma'aら⁽²⁹⁾は、短波帯で1,000 m程度の海中通信が可能という実験結果を報告した。彼等の実験ではアンテナ深度が数mとなっていること、使用する周波数がMHz帯であることから、ラテラル波は観測されないはずなので、彼等の実験が正しければ、海底などの想定しない伝搬経路があったのだろうか。

現在、国際的な海中電磁波の研究・開発は、それほど盛り上がっていない。海中では音波に比較し、指向性が弱く環境条件の変化に鈍感であることから、磁気誘導を利用したセンサネットワークの研究が比較的多い。また、低周波の電磁波は異種の媒質があっても透過性があることから、海底・海中・気中、海中・海水・気中といったような、3種類以上の異なる媒質間通信の検討がなされている。一方、2021年現在、海中電磁波の研究が国内で盛り上がりを見せている。佐藤ら⁽³⁰⁾の海中アンテナの動作解析、石井ら⁽³¹⁾の擬似スケールを利用した海水中の伝搬実験、滝沢ら⁽³²⁾の海底埋設物探知装置の試作、高橋ら⁽³³⁾の海中位置推定計算、江口ら⁽³⁴⁾の海中電力伝送などがある。既に市販されている海中電磁波応用機器には、坂田電機の地盤沈下モニタリングシステム⁽³⁵⁾があり、全国で250を超える採用実績がある。

海中で利用できる電磁波は長波帯前後であるにもかかわらず、石井⁽³¹⁾が示すように指数的減衰が距離とともに支配的になることから、サービスエリアが数十m程度に限定される。しかし、河川・港湾の設備点検など、浅海の作業フィールドにおいては、マルチパスの影響によって音波は非常に使いやすく、また装置のコストが高くなり、インフラ点検の道具にはなりにくかった。こういった場面では、サービスエリアが30~40 mであっても実用上は十分で、どちらかと言えば、安定した電磁波の方が都合が良い場合がある。

3 将来展望

日本では少子高齢化と極点社会^(用語)が同時に進んでいる。陸・海・空を考えたとき、既に衰退が進んでいる海洋産業は、開発に携わる人材が少ないこともあり、真っ先に投資対象から外されそうである。しかし、日本の強みは何か。広大な海があることなのではないだろうか。将来の産業に海を生きかさなくては、土地当りの人口密度が圧倒的に高い日本は生き残れないのではないか。

私たちは、新しい空間を開拓する際には、必ず、その地図、そこへの移動方法、そしてコネクション方法を用意するはずである。水中無線技術は、このように、新規開拓に必須の技術である。使う必要が出る前に、私たちの「知的好奇心」を原動力として、基礎技術を蓄えておくべきである。こうして近未来の世界に冠たる水中技術国家を目指すべきだ。

さて、掛け声だけなら誰でも掛けられる。実際に水中にはビジネスポテンシャルがあるのか。答えは「YES」である。まず、浅海域に限定して考えると、漁業養殖の生産性向上がある。日本はノルウェーに比較し、十分の一の生産性であり、技術によって生産性向上のポテンシャルは非常に大きい。日本も「獲る漁業」から「育てる漁業」に移行すべきである。漁業を含む一次産業を復興させないと、既に低い我が国の食糧の自給率36%が、更に低下してしまい、国際競争力がなくなってしまう。私たちは海からたん白質源を供給すべきで、これまで全くロボット化、ICT化を進めてこなかった漁業・養殖に急激な技術革新を与える機会が目前にある。また、河川・港湾の設備点検であるが、国交省の報告では、2030年までに点検・補修が必要なインフラ市場は5~8兆円と見積もられている。これらのかなりの部分が水中にある。点検・補修が進まなければ、昭和の建設物は利用できなくなってしまう。こ

これらの手助けをするのも、ロボットと ICT 技術であり、水中無線技術が、これらの利用に際して重要な技術ポジションを占めることになる。更に、2050 年のカーボンニュートラル達成を目指した、洋上や海中の発電設備や、温室効果ガスの計測・回収・貯留を行う設備も、洋上展開される可能性が非常に高い。また、かねて言われている、深海の海底資源の利用ビジネスも将来的には現れてくる。このように、水中・海中の新規ビジネスポテンシャルは非常に高く、我が国の優位性を出すためにも、進めて行かなくてはならないだろう。

本稿に続いて、各論として、それぞれの水中無線技術について、最新の技術の紹介がなされるはずだ。それらを読んで頂いた後、再び総論である本稿を読んで頂き、基礎技術からビジネスまでの道筋を模索して頂ければ幸いである。是非、あなたも水中無線技術に手を染めてみませんか。

■ 用語解説

・シンギュラリティ

レイ・カーツワイルの仮説であり、人間の頭脳が及ばないほどに優秀な知性が誕生するという説。

・ポストトゥルース

客観的な事実よりも、感情的な概念に訴える方が影響力がある社会・状態。

・フォアキャスト・バックキャスト

フォアキャストは現在・過去のデータにより、来るべき未来を予測する。バックキャストは反対に、ある時点の未来を予測・定義し、そうなるために、何をすべきか考える手法。

・ALAN コンソーシアム

水中を一つのネットワーク環境と捉え、光技術によってデジタルディバイド地域である水中の環境を改善することで、新たな市場を創ろうと考え、産学官連携で設立されたコンソーシアム。

・極点社会

少子高齢化が進む地方から大都市に人口が一極集中すること。増田レポートが有名。

■ 文献

- (1) 広口正之, “シンギュラリティとは～2045年問題～,” JNSA Press, no. 37, pp. 2-5, March 2014.
- (2) 量子生命科学研究会有識者会議, “量子でヒトを理解する、しあわせにする。～生命科学を場とした第二次量子革命～,” 量子生命科学研究所, March 2019.
- (3) リー・マッキンタイア, ポストトゥルース, 人文書院, 京都市, 2020.
- (4) 日本経済研究センター, 第46回中期経済予測, Nov. 2019.
- (5) 野口悠紀雄, 平成はなぜ失敗したのか(「失われた30年」の分析), 幻冬舎, 東京, 2019.
- (6) 山岡鉄秀, 新・失敗の本質「失われた30年」の教訓, 扶桑社, 東京, 2019.
- (7) 鈴木良夫, ロス・マオア, 日本人論の方程式, 筑摩書房, 東京, 1995.
- (8) 泉 耕二, システムデザイン論, 第2版, 電子書籍, April 2021.
- (9) 吉田 弘, “海洋ロボットによる「海の産業革命」とフィールドロボット知能化の検討,” RSJ オープンフォーラム, OF4: フィールドロボットの社会実装に向けた環境基盤整備とロボット政策の動向, Sept. 2019.
- (10) W. H. Thorp, “Analytic description of the low-frequency attenuation coefficient,” J. Acoust. Soc. Am., vol. 42, no. 270, March 1967.
- (11) T. Shimura, Y. Kida, M. Deguchi, Y. Watanabe, and H. Ochi, “Experimental study on multiple-input/multiple-output communication with time reversal in deep ocean,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 56, no. 7s1, July 2017.
- (12) Y. Kida, M. Deguchi, and T. Shimura, “Evaluation of effects of multipath and co-channel interference on time reversal MIMO in underwater acoustic channel,” Proc. Sympo. UltraSonic Electron., vol. 38, Oct. 2017.
- (13) 永野碧衣, 吉澤真吾, “インパルス応答測定に基づく雑音と音波反射に強い水中音響測位方式,” 海洋音響学会第37回研究発表会, May 2021.
- (14) 福本浩之, 藤野洋輔, 中野真理菜, 大岩美春, 椿俊光, 伊藤勇弥, “時空間等化を用いた1 Mbit/sec 級水中音響MIMO伝送の検討,” 信学技報, RCS2020-132, pp. 122-127, Nov. 2020.
- (15) Y. Watanabe, Y. Ota, S. Ishibashi, T. Shimura, M. Sugawara, and K. Tanaka, “An ocean experiment of inverse SSBL acoustic positioning using underwater vehicle OTOHIME,” Proc. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, Sept. 2016.
- (16) A. Das and A. Pramanik, “A survey report on deep learning techniques in underwater acoustic channels,” Computational Intelligence in Pattern Recognition, pp.407-416, Springer, Aug. 2019.
- (17) J. Dera, Marine Physics, Elsevier Oceanography Series, no. 53, Elsevier New York, 1992.
- (18) 浅沼市男, 宗山 敬, “海洋レーザ観測装置の基礎実験について,” JAMSTEC R 23, pp. 125-140, March 1990.
- (19) S. Ishibashi, Y. Ohta, M. Sugawara, K. Tanaka, H. Yoshida, and S. K. Choi, “Seabed 3D images created by an underwater laser scanner applied to an AUV,” Proc. OCEANS 2017, Anchorage, Sept. 2017.
- (20) A. E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M. P. J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A. F. Molisch, N. Ashrafi, and S. Ashrafi, “Optical communication using orbital angular momentum beams,” Adv. Opt. Photon., vol. 7, no. 1, pp. 66-106, March 2015.
- (21) T. Sawa, N. Nishimura, K. Tojo, and S. Ito, “Practical performance and prospect of underwater optical wireless communication,” IEICE Trans. Fundamentals vol. E102-A, no.1, pp. 156-167, Jan. 2019.
- (22) 西谷昭彦, “世界初, 青色LED光無線通信技術を用いた海中のスマートフォンとの通信実験に成功,” ニュース解説, 信学誌, vol. 103, no. 3, pp. 341-342, March 2020.
- (23) P. C. Chu and C. Fan, “Underwater optical path

- loss after passage of tropical storm,” Appl. Sci., 10, 4777, June 2020.
- (24) 宮本智之, “光ビームを用いる海中光無線給電方式へ特徴, 技術, 課題,” 信学 UWT 研究会, Nov. 2020.
- (25) M. Tanaka and M. Sato, “Microwave heating of water, ice, and saline solution: Molecular dynamics study,” J. Chem. Phys., vol. 126, 034509, Jan. 2007.
- (26) 吉田 弘, 出口充康, “海中でのアンテナのふるまいについての一考察,” 信学 UWT 研究会, June 2021.
- (27) A. Banos, Dipole radiation in the presence of a conducting halfspace, Pergamon Press, New York, 1966.
- (28) R. W. P. King, M. Owens, and T. T. Wu, Lateral electromagnetic waves, Springer, New York, 1992.
- (29) A. I. Al-Shamma’a, A. Shaw, and S. Saman, “Propagation of electromagnetic waves at MHz frequencies through seawater,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 52, no. 11, pp. 2843-2849, Nov. 2004.
- (30) H. Sato, N. Fujii, Q. Chen, N. Ishii, M. Takahashi, R. Suga, K. Uesaka, and H. Yoshida, “Dipole antenna with sheath-cover for seawater use,” International Sympo. A. P. (ISAP2017), 1376, pp. 1-2, Phuket, Thailand, Oct. 2017.
- (31) N. Ishii, Y. Ishizuka, S. Meguro, M. Takahashi, H. Yoshida, and Q. Chen, “3D Measurement of transmission between small dipole antennas using pseudo scale model for underwater positioning system in kHz band,” Proc. 2018 Asian Wireless Power Transfer Workshop (AWPT), Nov. 2018.
- (32) 松田隆志, 菅 良太郎, 滝沢賢一, 吉田 弘, 児島史秀, “電波を利用した海底下埋設物センシングシステムの検出能力についての一考察,” 2020 信学ソ大, March 2020.
- (33) 高橋応明, 野田耕司, 陳 強, 石井 望, “海中位置推定へのアプローチ,” 信学技報, AP2016-188, pp.55-62, March 2017.
- (34) 江口和弘, 川田壮一, 岡本克也, 柳場亮祐, 小柳芳雄, “磁界結合によるポジションフリー海中ワイヤレス電力伝送システムの実験検討,” 信学論 (B), vol. J101-B, no.11, pp.958-967, Nov. 2018.
- (35) 藏谷朋哉, “磁気通信技術と実用事例,” 一般社団法人センサイト協議会, <http://sensait.jp/9124/> (2019年12月3日閲覧).

(2021年9月1日受付, 11月14日再受付)

吉田 弘 (正員)

伊豆大島出身. 2002 海洋科学技術センター (現・国立研究開発法人海洋研究開発機構) 入所. 海洋ロボットの研究開発に携わり, 浅海小形ロボットからフルデプスの深海ロボットまで手掛けた. 入所以来, 海中光無線技術, 海中電磁波技術などの分野を切り開いてきた. 現在は, 極域向けの技術研究に取り組む一方, 地球温暖化解決のために, 海水から CO₂ を取り除くシステムの実現を目指している. 最近の標語は「科学技術のツケは, 科学技術で払え」. 博士 (理学).

