

光ファイバセンサによる 音響/環境センシング技術

鎌田 弘志

沖電気は日本最初の電子通信機器メーカーとして1881年に創業した。その年に電話機の試作実験に成功し、音響技術の沖電気としてスタートして今年で120年を越えた。水中音響センサの技術は、音響技術からスタートした沖電気が海洋関連の事業分野に展開蓄積し、業界をリードしてきた技術である。今、その水中音響センサ技術が光ファイバセンサ技術へと大きく変化を始めている。何故に音から光なのか？ 本稿においては、水中音響センサ応用の視点から着手した沖電気の光ファイバセンサ技術の開発の昨日から今日までを振り返り、明日への展望について述べる。

研究シーズの芽生え

光ファイバセンサの登場の背景として重要なものは、いうまでもなく光ファイバである。1970年に米国のコーニング社のMaurer, Kapron, Keckが20dB/kmという低損失ファイバの開発に成功した。それ以来、光ファイバ通信の優位性について世界の研究開発技術者に共通の認識が生まれ、光ファイバ技術は急速な進展を見た。

光ファイバ通信の伝送媒体である光ファイバが登場した当初は、曲げや振動などの外乱によって伝送特性が変化するという現象が問題になり、光通信の実用性が危ぶまれた。だが、悪いと思われる現象も別な見方をすれば良いことの始まりにつながる。その不安定な現象を積極的に利用すれば新しいセンサができるのではないかと、との発想を持つ人々がいた。そのような人々たちによって研究が進められたのが光ファイバセンサである。

1970年代、米ソの拮抗する冷戦体制のなかで、米国海軍技術研究所（NRL）は従来の概念とは異なる水中音響技術を模索していた。そのなかで、NRLのJ.A.Bucaroらは光ファイバを用いて高感度の新しい水中音響センサが実現できるのではとの着想を持つようになり、その研究開発を1970年代半ばに開始した。そして早くも1977年には光ファイバ水中音響センサの高感度可能性の実験報告を発表している¹⁾。

この論文はわずか2ページのものであるが、これが水中音と光ファイバを結び付けた世界で最初の論文であると思

われる。わが国では、防衛大学校が研究の先駆者であり、1970年代後半には研究開発を始めている²⁾。このような流れのなかで、海洋音響研究会（現海洋音響学会）は1985年に官・学・産の主な研究者を委員とする光ファイバ水中音響センサの勉強部会を設け、海外の技術動向を調査した³⁾。それに参加したのが水中音響を専門とする我々の光ファイバ技術との最初の出会であった。

スタートラインでうろうろする海亀

海洋音響研究会の勉強部会のあと、参加企業は一斉に試作開発に着手した。我々もその流れのなかで何かをしなければという思いはあったものの、圧電振動子を用いた水中音響センサを得意としてきた我々にとって、光についてはベースとなる知識が余りにも不足していた。音波と光では波長があまりにも違う。周囲を見渡しても光関係の本も測定器も見当たらない。当時、我々は事業部の設計部門であったため製品設計に忙しく、光に関する知識を自主的に集積する時間もほとんどとれない。思いあぐねた末、関連する大学の先生に教を請うて通うとともに、電線メーカーとの研究アライアンスを模索することにした。知識が少しずつ増えていくに連れ、その技術の難しさを強く認識し、実用化に至る可能性はほとんどないと思うようになってきた。当面の技術可能性とビジネス性が見えないからであろうが、電線メーカーとの研究アライアンスはまとまらなかった。海洋音響研究会の勉強部会に参加した企業のなかには、いち早く試作を行って水槽実験でその技術成果をPRするところもあったが、初期的な段階でのPRであったためであろうか、逆に実用化に対して悲観的な印象を関係者に与えることとなった。その段階においても我々の動きは、スタートラインでうろうろする海亀の歩みであった。

兎が躓いた石を避ける海亀

我々は水槽実験ではなく海上実験できるものを造る技術を求めている。水槽実験で完璧でも海に持って行くと思わぬ事象が出ることをレガシーな圧電水中音響センサで痛いほど経験してきた。また、かつて帝国海軍の音響技術研究

所が実験をしていた駿河湾でいつでも実験ができる環境設備を持っていた。海に持って行って測定評価ができない構成原理の水中音響センサ技術は企業の研究としてやるべきではないとも思っていた。その観点からのいくつかの試作品を作り海上実験を行ったが、性能はあまり芳しくなかった。その過程で、レガシーな圧電水中音響センサと同じ機能のものを光ファイバで実現して何のメリットがあるのだろうか、圧電水中音響センサよりも大幅に高感度なセンサが本当に必要なんだろうかと疑問を持つようになっていた。ただ、米海軍が多チャンネル受波器アレイへの応用を想定して研究を続けていることが気がかりであった。

そこで、米国の技術動向をもう一度調査しようということになり、専任の研究部門を設置して1988年から独自調査を開始した。米国のコンサルティング会社に3年かけて多チャンネル受波器アレイに必要な多重化伝送可能な光ファイバセンサ技術について調査を依頼した。調査結果は「米海軍の研究は継続されているが課題が複雑に絡み合っているようで、現時点で実用化の展望は見えない。実用化の可能性のある技術は調査した範囲では存在しない。」とのことであった。やはり、そうか。この研究は即刻中止すべきではないのかとの意見が社内的にも強くなってきた。ところが、報告書をよく見ると、調査された方式の一つに「コヒーレント性の高い波長可変レーザがないから、多重化の実現可能性がない。」と報告されている部分があった。

我々はここに注目した。逆に言えば、コヒーレント性の高い波長可変レーザがあれば実現の可能性がある方式ではないのか？ このようなレーザ技術は世の中になのか？ それを探してみよう。

何とそれは社内にあった。コヒーレント性の高い波長可変レーザであるDistributed Bragg Reflection (DBR) レーザ技術は研究開発本部内にあった。それは将来の波長多重通信として研究開発されていた。DBRレーザによる位相変調光を用いてオールオプティカルな時分割多重が可能となる光ファイバ水中音響センサを開発しようという基本構想はここで固まった。海亀の歩みであった我々は、兎が躓いた石を避けるようにして、まだ誰も通っていない新しい道を歩いてみることにした。

走り出した海亀

基本構想はできたので、まずは音を光に変えるセンサヘッドを試作することになった。それまでこの分野では「光ファイバを用いると圧電水中音響センサよりも高感度になる」というのが研究者のセールスポイントであった。NRLのJ.A.Bucaroもそう言っていた。だが、それは違うのではないのか？ 海中にはさまざまな雑音がある。その

雑音よりも極端に小さい音を検出する必要があるのか？ センサヘッドの感度は圧電水中音響センサ並みで十分なはずだ。我々はそう考えていた。圧電水中音響センサの設計技術は我々の得意な技術である。その技術ベースの上に立って、音には反応するが振動には反応しないプッシュプル構造の光干渉方式のセンサヘッドを設計試作しよう。音に対する感度は圧電水中音響センサ並みで良い。振動に反応しなければ音響センサとしては安定であり、海上実験に耐えるものとなるだろう。米国音響学会が発足した1929年に沖電気の水音響技術研究は始まっている。その経験を踏まえた我々のこの考え方は正しかった。高感度を目標とした内外の研究開発はすべて実用化に至らず、今では高感度をセールスポイントとする研究者はいない。我々は無駄な投資をかけなくて済んだ。

実際に、センサヘッドを組み立てるのは圧電水中音響センサの製造組立てのようにはいかない。研究者自らが試行錯誤しながら組み立てをすることになった。細い光ファイバをコイル状に振動板に張り付けてセンサヘッドを組み立てる作業を手作業で行っていくのは、若い研究者にとっても細心の注意と根気のいる作業であった。何度かの失敗の後、所定の長さの光ファイバを振動板に張り付ける作業に若い研究者は熟練していった。張り付けた光ファイバの長さが設計どおりかどうかを光学的に検証する技術も確立した。こうしてDBRレーザを光源とする光ファイバ水中音響センサがひとつ出来上がったのは1992年のことである。図1はそのセンサヘッド試作1号機である。

海上実験は駿河湾に浮かぶ計測バージ「オキシーテックⅡ」で行われた。満を持して行った実験は開発のファーストステップでの試験としては成功であり、可能性の展望を開いたものではあったが、まだまだ研究者の満足のいくものではなく、いくつかの難しい課題が浮き彫りになった。

振動には反応しないはずなのに出力が時々変動する。途

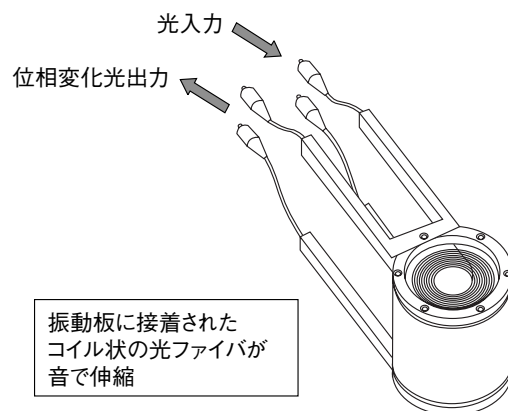


図1 光ファイバ水中音響センサのセンサヘッド試作1号機

中の伝送用の光ファイバケーブルが動くとも出力が変動するのである。我々はセンサヘッドを海中から引き上げて溜息をついた。何と、その溜息がセンサヘッドにかかると出力が変動してしまう。温度センサにもなっていたのである。溜息もつくことができない。

信号処理をして光を電気信号に変換した後の出力を調べてみても対策はみえない。そこで信号処理前の干渉光の様子を調べることにした。干渉光の振幅出力がゆらいでいる。我々はその振幅変動をある程度は設計に折り込んでい

たが、開発を進めているセンサは光位相検出方式であることから干渉光の振幅変動そのものは余り影響がないと思っていた。だが、その変動は予想を越えたものであり、余りにも大きいために位相検出の信号処理が正しくできていないのであった。我々はフェージング補償処理機能を追加し、課題をクリアした⁴⁾。

先にゴールに入った海亀

その後、センサヘッドにFiber Rotated Mirror(FRM)を設けて伝送用光ファイバケーブルでの光の偏波面の回転変動をキャンセルするなどの多くの改良を進め、安定で再現性よく海中の音を測定することができるようになった。1995年にはその試作品を駿河湾の計測バージ「オキシーテックⅡ」の側に敷設し、長期的な安定性を確認した。その光ファイバ音響センサを図2に、系統図を図3に示す。

また予想しない良いことも判った。圧電水中音響センサでは商用電力50Hzの地面への微弱な漏れによるケーブルへの電氣的誘導雑音が除去できず、音響測定邪魔になることが多いのに、この光ファイバセンサでは全くそれが見えない。壊れているのではと疑う人もいたほどであった。光ファイバ水中音響センサは圧電水中音響センサを超えるものとなった。

時分割多重伝送の技術はセンサと並行して研究開発を進めて、多チャネルオールオプティカル多重伝送の技術も検証された⁵⁾。その多重化構成の例を図4に示す。単チャネルであれば通常の光通信と同様に100kmを無中継伝送することも判った。こうして、海中においても安定で実用的なオールオプティカル時分割多重水中音響センサシステムの技術が確立していった。この確立した技術は沖電気が世界をリードする先端技術となった。

このセンサシステムは音響用として開発されたが、原理的にみて音響用に限定されるものではない。たとえば、音響に反応せず振動に反応するセンサヘッドを開発し、その周波数特性にマッチした信号処理方式をとることで、オールオプティカル時分割多重振動センサシステムを構築できる。現在、計測バージ「オキシーテックⅡ」の側には微小海底地震を測定する地震振動センサシステムが設置され長期観測に供されている(図5)⁶⁾。



図2 光ファイバ水中音響センサシステム1号機

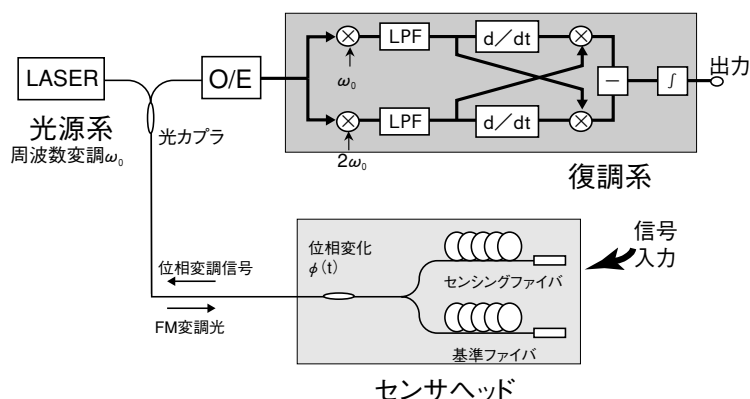


図3 光ファイバ水中音響センサの原理系統

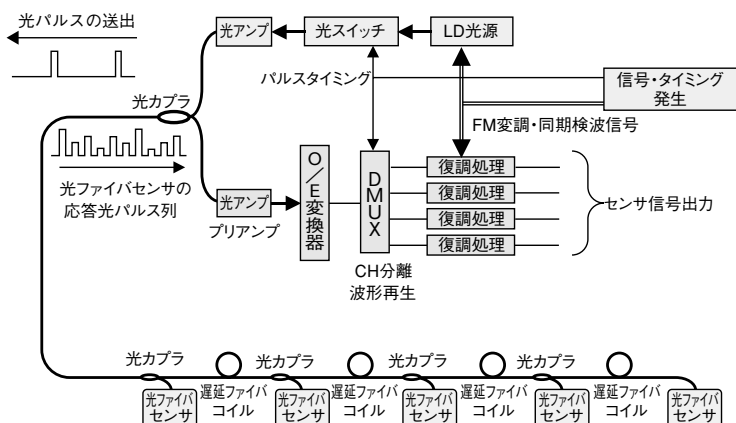


図4 光ファイバセンサ多重化構成例

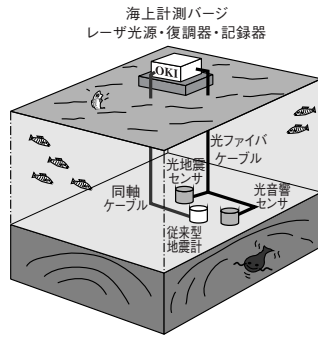
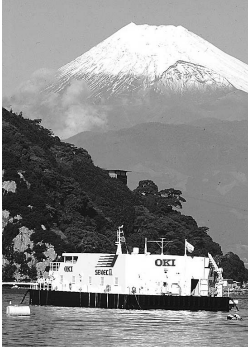


図5 海上計測バージ「シーテックII」に設置した光ファイバ地震センサ

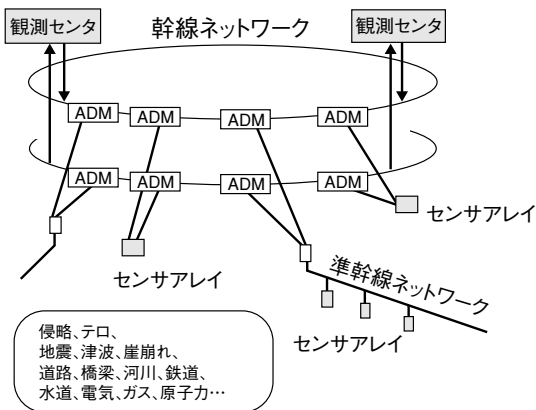


図6 フォトニック環境センサネットワーク構想

フォトニックセンサネットワークとしての明日

本稿で述べた光ファイバセンサシステムはオールオプティカルであり、未来技術トレンドであるフォトニックセンサネットワークの方式として可能性のある候補の一つに位置づけられよう。この方式ではケーブルはもちろんセンサヘッドにも何ら電気回路も電線も必要としない。光ファイバの伝送機能とセンシング機能が融合したシステム方式である。計測物理量に応じたセンサ構成を選択することで多様多岐な物理量（たとえば、地震、水位、歪み、等）をセンシングでき、それら複数の物理量を複合して長距離伝送する機能を実現できる。このネットワークは従来のネットワーク概念とは異なり、物理層からアプリケーション層までのレイヤが相互に複雑に関係するネットワークである。センサヘッドは計測物理量に応じたユニークパーパスなものであるが、フォトニックなコアネットワークにそれらが包括的に取り込まれていく。将来は、センサノードのコネクション、デスクネクションが容易な大規模なオールオプティカルなフォトニックセンサネットワークへと進化していくことが期待される⁷⁾。

まとめ

技術的可能性が発見されて、商品の形として新しい市場を形成するのに、どんなに急いでも10年以上かかると言われる。実際、急激に立ち上がって爆発的な普及を見せているインターネットですら、1969年に米国国防省が開発した「ARPAnet」がルーツであり、それからもう30年近くも経過している。

光ファイバ音響センサは1977年の米国海軍技術研究所のレポートが原点である。あれから25年経って、今、光ファイバセンサシステムとして実用的なものに発展を始めた。我々の最初の試作からみても10年経っている。技術は多くの人が関わるなかで、独創性と継続力と発想転換の調和によって発展していくものであるということを改めて感じる。

21世紀のこれから、国民の関心とニーズは生活の安全確保、危機管理と環境監視へと向かっていくと思われる。フォトニックな環境センサネットワーク技術はそれに応える技術として大きく飛翔していく可能性を持っている⁸⁾。



参考文献

- 1) J.A.Bucaro, H.D.Dardy and E.F.Carome: Optical fiber acoustic sensor., Appl.Opt.16, pp.1761-1762, 1977
- 2) S.Takahashi and T.Kikuchi: Comparison of optical fiber hydrophones., Jpn.J.Appl.Phys., 21 (Supplement 21-3), pp.164-166, 1981
- 3) 海洋音響研究会：光ファイバハイドロホン部会報告書，海音研報第13号，1988年
- 4) R.Sato, H.Ishi, K.Dobashi, H.Kamata, S.Saito: Pressure balancing structure for fiber-optic flexural disk acoustic sensor., Jpn.J.Appl.Phys., 32, pp.2473-2476, 1993年
- 5) 佐藤陵沢，新井宏，加藤洋一，土橋孝治，鎌田弘志，小浜俊一，江川護：光ファイバハイドロホンの多重化の試み，日本音響学会平成6年度春季講演論文集，pp.1169-1170，1994年3月
- 6) 新藤雄吾，佐藤陵沢，新井宏，土田典裕：光ファイバ加速度センサ，沖電気研究開発，第177号，Vol.65 No.1，pp.91-94，1998年
- 7) 土橋孝治：光ファイバセンサシステム，沖電気研究開発，第181号，Vol.66 No.2，pp.67-70，1999年
- 8) 鎌田弘志：光ファイバセンサによる環境センシングの将来展望：技術予測シリーズ・21世紀に期待される技術 その将来展望（第二巻 地球危機への対応技術）：日本ビジネスレポート社，2000年

筆者紹介

鎌田弘志：Hiroshi Kamata. システムソリューションカンパニー技師長