

大気・海洋環境の光ファイバーセンシング

佐藤宗純

大気汚染のセンシングの対象は、環境ガスや塵等である。これらは大気中に広範囲に拡散しているのが普通であり、局所的な計測では全容を把握することは難しい。幸い、光を用いることによって大気汚染にかかわる化学物質を検出することができること、また光は空気中を透過しやすいことから、光ビームによるリモートセンシング、例えばレーザーレーダーによる大気の観測が行われている¹⁻³⁾。このような計測手法には残念ながら光ファイバーの必要性は低い。それに対して、光ファイバーを用いることで環境の影響を受けずに観測場所まで光を導けることから、局所的な観測には利用されており、光ファイバーを用いた各種のガス検知が実用化されている。

一方、海洋環境のセンシングは、広大な3次元空間内の計測という意味では大気中の計測と同様であるが、現場まで近づくことが容易でないこと、光が遠方まで届かないことなど大気中の計測とはまったく異なる事情があり、光ファイバーの利用が真剣に考えられている。

ここでは、海洋計測の例を中心に、環境計測への光ファイバーセンサー利用の例について述べる。

1. 大気中のガスの光ファイバーセンシング

近赤外の光を用いて検出するガスとして、H₂S、CO₂、CH₄、C₂H₂などがある。基本原理は、ガスの吸収スペクトルを測定することによってガスの種類と濃度を検出する^{4,5)}。このための光源としては、広範囲の波長を含む光源、複数の線スペクトルをもたせるため波長の異なるLD(laser diode)の組み合わせ、また波長可変光源の利用⁶⁾などが提案されている。いずれも、ガスによって大きく吸収される波長と吸収されない波長に対する光量の比から検出

する原理のセンサーが多い。センサー部分は、光ファイバーから微小レンズ等を利用して光ビームとして気体中に出射し、検出セル中を伝搬させた後にレンズ等で受けて再び光ファイバー伝搬させる構造が用いられている。感度は気体中の光ビームの伝搬距離に比例するので、光ビームを往復させて高感度化を図ることも行われている。また広範囲の空間を伝搬させることで経路全体にわたる測定を行うことができる。この場合は経路にそった積分値の計測を行うことになる。また光ファイバー自身を検出素子として用いる構造のセンサーも提案されている⁷⁾。

ガスセンサーの目的としては、ガス漏れ検知や資源探査などがある⁸⁾。

2. 海洋計測と光ファイバーセンサー

海洋環境に関する基本的な計測項目は、気象関連量を別とすれば、温度、海流(流向、流速)、水圧(深度、密度)、濁度、磁場などの物理量、pH、CO₂、栄養塩(NやP)、酸素関連濃度(DO、BOD、DOD)、溶存有機炭素濃度(DOC)などの化学量、プランクトン(動物、植物)、クロロフィルなどの生物関連量である⁹⁾。

これらの量を計測する手法を分類すると、間接的な計測であるリモートセンシングと直接的計測に分けられ、直接計測はさらに現場へ移動しての計測と、センサーを現場に設置して行う長期計測に分類される¹⁰⁾。リモートセンシングには衛星や航空機による海面上からの(光、電磁波)観測と音波を用いた海中計測があり、広大な面積の情報をほぼリアルタイムで取得できる利点がある半面、計測値の信頼性を高めるためには、他の直接的方法で得た観測値と照合する必要がある。現場へ移動して計測する手法としては、観測船による海上からの観測と、有人潜水船や無人潜水機(remotely operated vehicle: ROV)により観測点に

電子技術総合研究所(〒305-8568 つくば市梅園1-1-4)
E-mail: sosato@etl.go.jp

接近して行う海中計測があり、いずれも精度の高い計測が可能であるが、空間分布と時間変化の情報を分離できない欠点がある。長期観測の方法としては、ブイに取り付けられたセンサーによる観測と海底にセンサーを設置する方法等があるが、これは基本的には場所を定めたポイント計測である。

1本の光ファイバーで多点あるいは連続分布計測が可能なセンサーを構成することもできる光ファイバーセンサー技術^{11,12)}を用いれば、従来の観測手法で困難なリアルタイムで広範囲の空間分布計測を行える可能性がある。ただし、海洋環境の基本量に関しては、光ファイバーセンサーを用いて従来のセンサーよりも精度や分解能の高いデータを得ることは現状では難しい。光ファイバーセンサーの役割は、精度や分解能よりもむしろ、長期・リアルタイム・広範囲・空間分布という、質的に異なるデータを得ることにあるものと考えられる。

センサー開発にあたっては、物理的・化学的な海水環境への対策と生物付着によるセンサー感度の低下に対する対策が必須である。特に化学量のセンサーなど、海水と光とを接触させる必要があるセンサーでは、窓や光ファイバーをはじめとする光学機器の海水による劣化および生物による汚れを防ぐ必要がある。

以下では、海洋環境で使用される光ファイバーセンサー開発研究の例を紹介する。

3. 水温分布計測用の光ファイバー温度センサー

海洋中で水温分布を計測するためには、多数のサーミスターを一定の間隔で並べ、信号線とともに1本のケーブルとしたサーミスター・チェーンが用いられている¹³⁾。これを

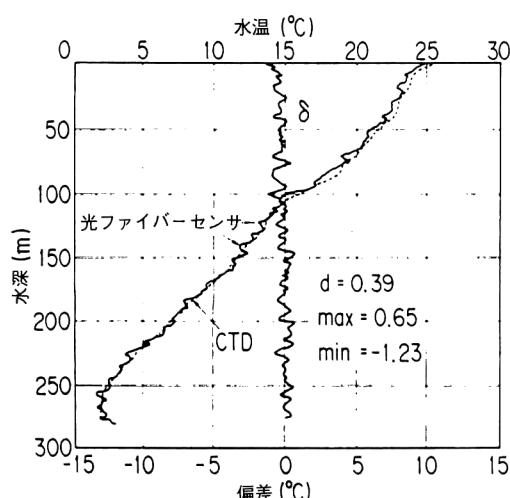


図1 光ファイバー温度分布センサーによる水温鉛直分布の測定値とCTDセンサー測定値の比較。

1本の光ファイバーで置き換えるために、光ファイバー温度分布センサーを海洋計測へ応用する研究が行われている。計測の原理は、陸上で実用化されている光ファイバー温度分布センサー¹⁴⁾と同じであり、光ファイバーの一端から光パルスを入射させ、光ファイバーの各点から戻ってくるラマン散乱光の強度および到着時間から、光ファイバーに添った温度分布を計測するものである。

3.1 鉛直水温分布計測¹⁵⁾

海中における水温の鉛直分布を計測するセンサーの開発が目的である。海水の流れに対抗して、センサーを海表面から鉛直に下ろすためには重りを付けて引っ張る必要のあることや、設置時の取扱いを考慮すると、ある程度の引張強度が必要である。さらに、光ファイバーの強度を劣化させ、また伝送損失増加につながる海水の進入を防ぐため、センサーとなるGI型光ファイバーを内径1.4mmのステンレス管に入れ、さらに内部はジェリー状物質を満たしてある。このセンサー2本と外径1.6mmの亜鉛メッキ鉄線5本を擦り合わせ、外径5mm、全長450m、1m当たりの重量0.1kg、破断強度300kgfのワイヤー状のセンサーとしている。2本のセンサー用光ファイバーは先端で接続しており、往復で温度計測ができる。

水深約300mの富山湾沖合に浮かぶ実験船の横から先端に50kgの錘と深度計を取り付けた光ファイバー温度センサーを海水中に吊るして実験を行った。測定された温度データはXBT(expendable bathythermograph)と呼ばれる使い捨ての投げ込み式サーミスター温度計や、塩分濃度計(電気伝導度計)と温度計、深度計を一体化してロープで上下させて温度等の鉛直分布を計測するCTD(conductivity-temperature-depth)センサーのデータと比較した。

光ファイバーセンサーからの2組のデータの平均から得た温度分布とCTDデータとの比較を図1に示す。この光ファイバー温度分布センサーは、室内実験のデータから、測定時間が10数分のとき、測定距離分解能は5m程度、温度偏差±1°Cと見積もられており、海域実験データも同程度のばらつきとなっている。

従来は、XBT、CTDあるいはサーミスター・チェーンを用いて行っていた水温の鉛直分布の測定に比べて、測定精度も低くまた1回の測定に10数分かかるものの、居ながらに測定できる意義は大きい。

3.2 水面近くの温度分布計測¹⁶⁾

水面付近の水温および気温の分布を測定することを目的としたセンサーの実験である。ここでは10分の測定時間で精度±0.1°Cの温度分布が計測できる温度分布計測システ

ムを用いている。また、距離分解能を稼ぐ意味から、直径140 mmのパイプに6 mmピッチでステンレスパイプに封入した光ファイバーを巻きつけることで、距離分解能50

mmのデータ収集を可能としている。実験システムの概要を図2に示す。

このシステムを用いて諏訪湖において実施した実験は、海洋環境計測光LANの基礎技術確立を目的としたものであり、温度分布センサーのほか、クロロフィル量から植物プランクトンの量を測定するための蛍光光度計も同時に設置している。光度計からのデータを光ファイバーで陸上へ光デジタル伝送するための機器が付属している¹⁷⁾。

3.3 湖底湧水の探査¹⁸⁾

湧水調査を目的として、湖底に温度測定用の光ファイバーケーブルをはわせて実験を行った報告である。光ファイバーは外径3 mm、PVC被覆の通常の光ファイバーコードと呼ばれるものをそのまま用いている。全長1000 mを途中で折り返し、往復500 mの測定を行っている。図3に測定データの例を示す。

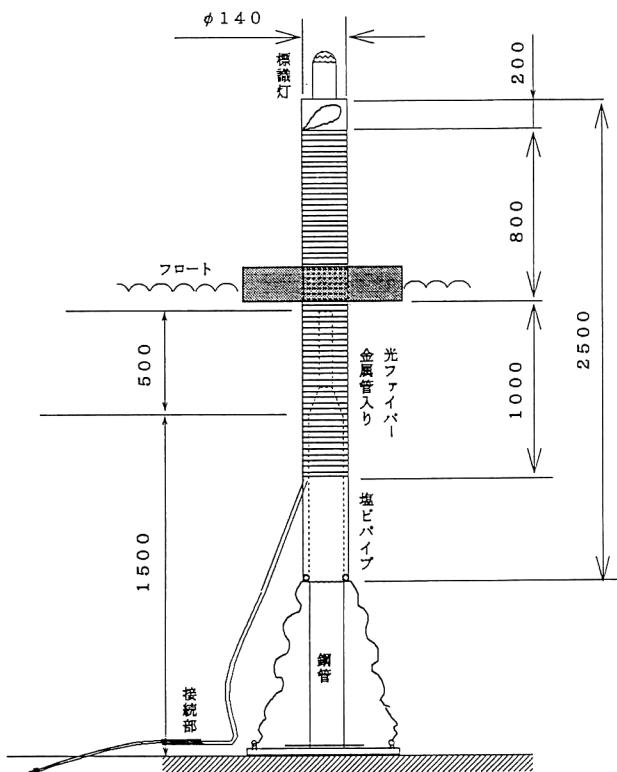


図2 水面付近の温度分布を詳細に測定するための光ファイバー温度分布センサーの構造。

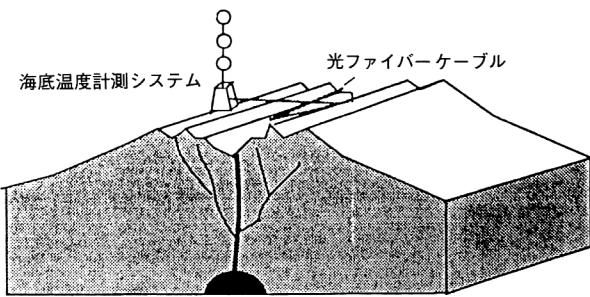


図4 深海底温度測定システムの概念図。

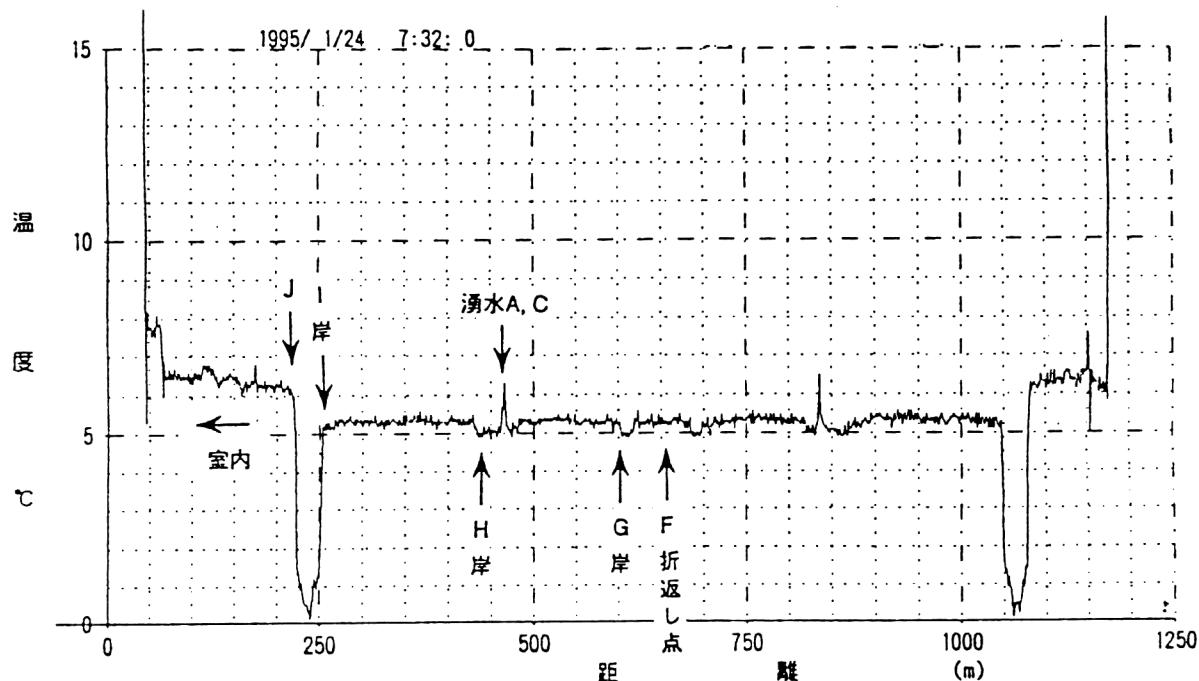


図3 湖底の温度分布測定例。

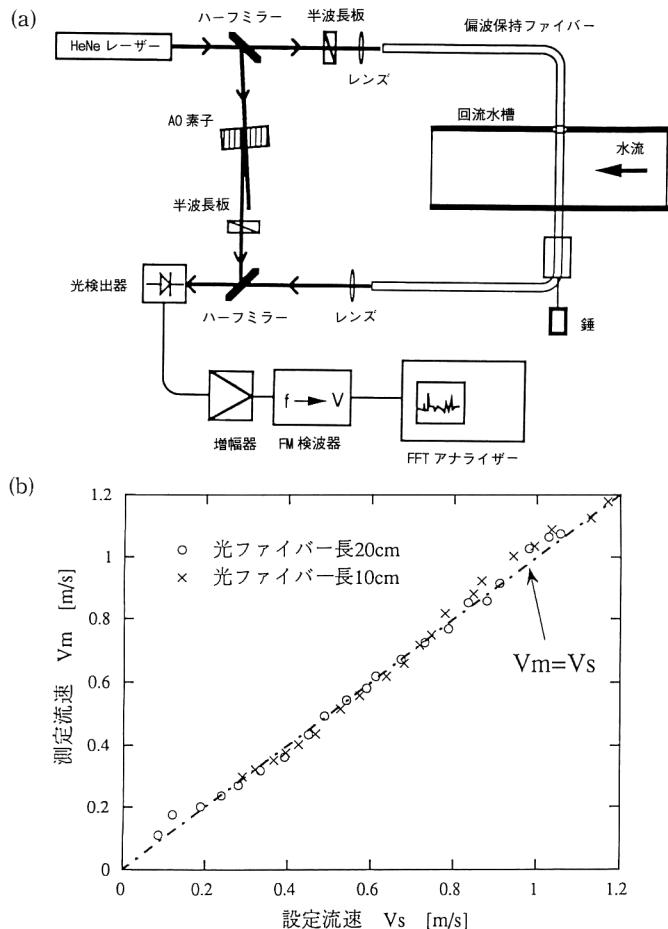


図5 (a) 光ファイバー流速センサーの原理, (b) 回流水槽の設定流速と流速センサーによる測定値。

この研究の最終目標は水深2~3000 mの海底に光ファイバーケーブルを最大4 kmにわたって敷設し、オフラインで1か月から最大1年間の長期観測に適用することである(図4)¹⁹⁾。深海底には熱水鉱床と呼ばれる熱エネルギーと物質の放出があり、その活動の観測を行う。

4. 光ファイバー流速センサー

適当な流速の流体中に置かれた円柱の下流側には、規則的なカルマン渦列が形成される²⁰⁾。カルマン渦が直径 d の円柱側面から単位時間に f 個放出されるとすれば、 St を定数として、流速 U との間に $f = StU/d$ の関係が成り立っている。 St はストローハル数と呼ばれる無次元の定数である。レイノルズ数が $10^{2.5} \sim 10^5$ の範囲で St 数はほぼ一定(約0.2)となるので、渦周波数と流速との間に比例関係が成立し、周波数を測定することで流速が求まる²¹⁾。

流体中に置かれた光ファイバー後方に発生するカルマン渦の影響で光ファイバーが振動して変形すると光弾性効果により伝搬する光の速度が変化するため、振動の様子は出力光の位相変化となって現れる²²⁾。直交する直線偏波面を

もちわざかに速度の異なる2つの光が独立に伝搬するよう作製された偏波保持光ファイバーの場合には、一般に2偏波光の間で位相変化の程度が異なるため、図5(a)に示すように光ファイバーの出射端で両者を干渉させれば位相変化の差により干渉光強度の変動を生じ、振動の検出ができる²³⁾。回流水槽内における実験で得た設定流速と測定された流速の関係の例を図5(b)に示す。

流速分布を測定するために、1本の光ファイバーで多点の流速を測定できる流速分布センサーの研究²⁴⁾も行っている。

5. 植物プランクトンの計測

植物プランクトンでは光合成色素によって、吸収された光エネルギーが光合成に利用されてのち、一部はクロロフィルからの蛍光として外部に放射される²⁵⁾。このクロロフィル蛍光のスペクトルは波長685 nm付近にピークをもつこと、蛍光スペクトル分布のプランクトン種および照射波長による変化は少ないと見かけの色の異なるプランクトン種に対する蛍光強度は照射波長によって大きく変化し、植物プランクトンのもつ色素量によって変化することが、測定結果から知られている。このため、植物プランクトンの観測には、クロロフィル蛍光強度測定が行われている²⁶⁾。

励起光源としては励起効率のよい波長のレーザーが用いられているが、水中の観測地点までレーザー光を光ファイバーで導き、また蛍光を光ファイバーに集めて伝送することにより、植物プランクトンの粒径や個数の計測を *in situ* で行えるシステムを構築できる²⁷⁾。

一方、植物プランクトンの中でもクロロフィル以外にアンテナ色素のフィコビリンを含む種では、570 nm付近にフィコエリスニンの、また650 nm付近にフィコシアニンの蛍光も存在することが知られている。例えば富栄養化した淡水湖で異常増殖する藍藻はフィコシアニンを有し、珪藻や緑藻とは図6(a)に示すように蛍光スペクトルが異なる。特徴的な2つの波長の強度の観測から蛍光スペクトルの違いを知ることができれば、植物プランクトンの種の弁別が可能となる。さらに前述の係数粒径解析システムとの組み合わせで現場計測可能なシステムが研究されている(図6(b))²⁸⁾。

図7には、レーザーレーダーの技術を用いたプランクトン分布計測の考え方を示す²⁹⁾。通常のレーザーレーダーとの違いは、反射光ではなく、微弱な蛍光を測定する必要があるため斜め方向から受光している点にある。海中へレーザー光を導くために光ファイバーを用いている。

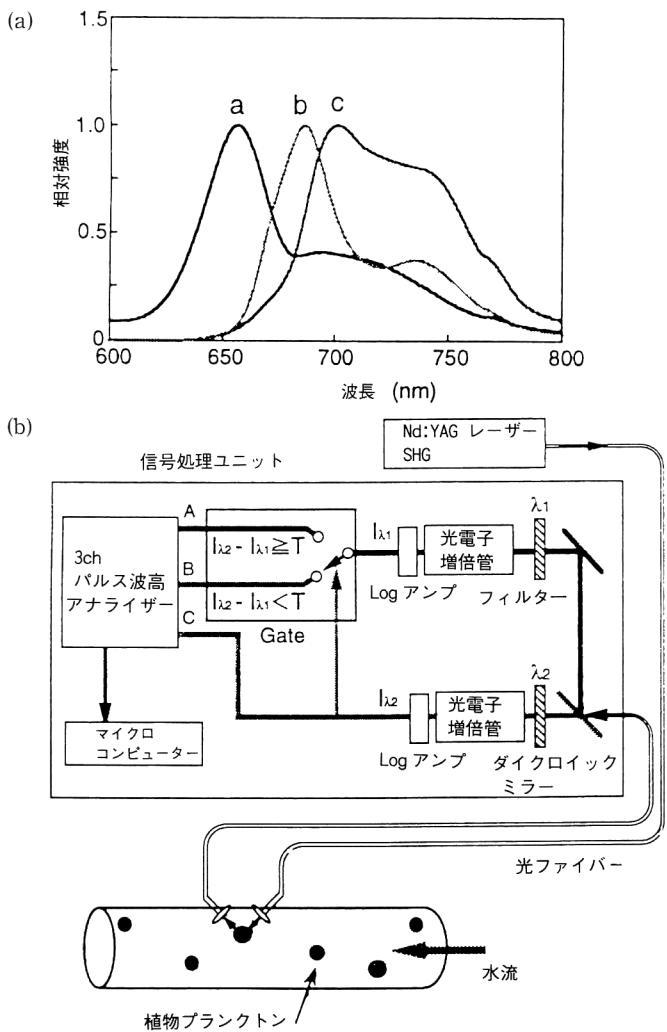


図6 (a) 藍藻および珪藻、緑藻の蛍光スペクトル。aは*Microcystis aeruginosa*, bは*Chaetoceros sp.*, cは*Chlorella reburalis*, 勵起波長: 532 nm. (b) 2波長蛍光検出方式の植物プランクトンセンサー。

6. 光ファイバ音響センサー

ハイドロホン（水中マイクロホン）アレイは海中音の音源方向探査や、海底下の音響地層探査のために用いられる。通常圧電型センサーが用いられるが、これを光ファイバーセンサーで置き換える研究が行われている³⁰⁾。

ここで紹介する光ファイバハイドロホンアレイ³¹⁾の構成要素は、2枚の円形振動板に渦巻き状に光ファイバーを張り付け、その各々をマッハ・ツェンダー干渉計の2本のアームとして、音圧による振動板の動きを光位相変化として検出するハイドロホンである。これを遅延線となる光ファイバーに適当な間隔でカプラーを介して結合させる。

各々のセンサーからの信号の区別は、パルス波を用いて時分割多重(TDM)方式で行う。また正弦波信号でFM変調された光をマッハ・ツェンダー干渉計に通したときの干

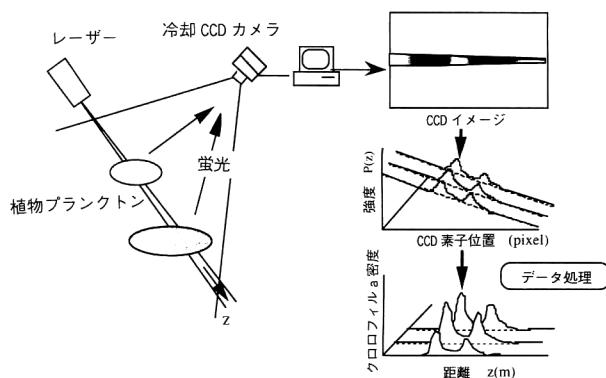


図7 レーザーレーダー方式によるプランクトン分布測定。

涉出力の1次と2次の高調波成分を用いて復調するPGC (phase generated carrier) ホモダイナ方式によって、各々のセンサーの出力を検出する。10CH多重化アレイを試作し、実験を行った結果、各センサーの感度偏差は±1 dB、最小検出限界は53 dB re 1 μPa/√Hzであり、海中雑音の最小値程度まで海中音が検出できる見通しが得られている。図8にシステムの構成を示す。

7. その他の光ファイバ利用海洋計測

その他、海洋観測用光ファイバーセンサーの開発としては海水中のCO₂濃度測定の試み³²⁾の研究などがある。また、計測信号の光ファイバ伝送に関してはニュートリノ検出のためのDUMAND (deep underwater muon and neutrino detection) 計画や海底地震計からのデータ伝送、ROVからの観測データ伝送の例などがあげられる。また平成7年度より海底ケーブルを用いた観測網の研究が始まっており³³⁾、光ファイバーも観測信号伝送のために用いられる。

8. 展望

光ファイバーを用いて大気や海洋の環境計測を行う目的で行われている研究の一端を紹介した。

海洋観測へ光ファイバーセンサーを適用するメリットは多い。しかしながら、海洋観測はデータの継続性と信頼性が重要であり、このことから、データを使用する海洋研究者は新しいセンサーや計測技術の採用に躊躇する傾向がある。また、海中、海底へセンサーや観測機器を設置することや回収することの困難さも、信頼性に関して評価が十分定まっていない新方式の機器の使用に積極的でない理由である。そこで、われわれ工学者の立場としては、光ファイバーを利用することのメリットを地道に説き、また、実際の海洋での実験を通して実績を積む方法をとっている。

一方、深海における計測では、水温変動を1/1000°Cより

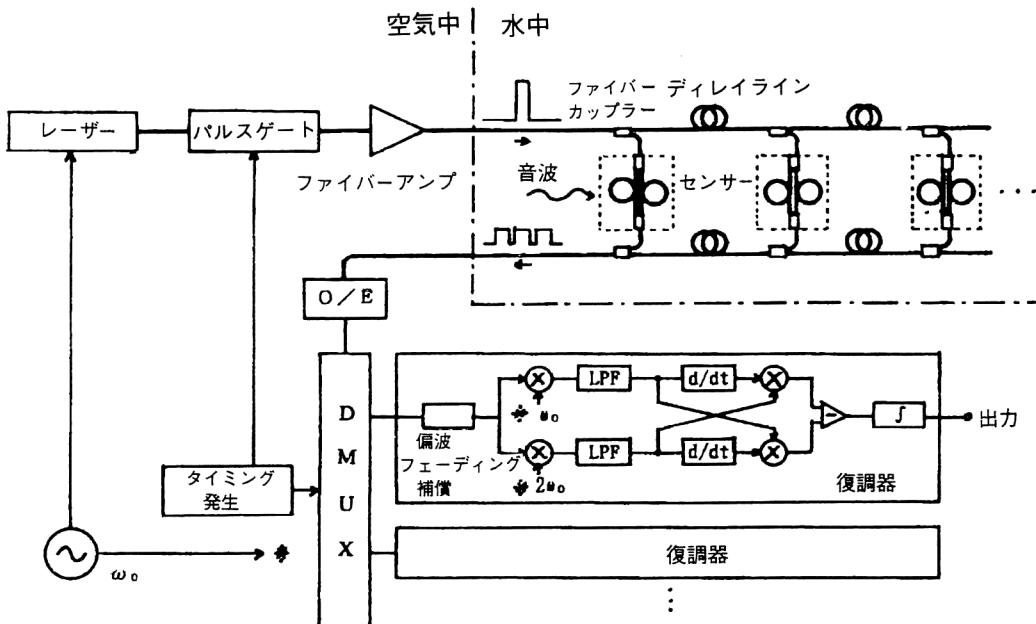


図8 光ファイバーハイドロホンアレイの構成。

細かな分解能で計測したい、あるいは10 mm/s以下での流速を計測したいなどという海洋研究者の要求がある。これらに対しては従来から使われている電気的センサーのほうがコスト面や使いやすさから有利である。したがって光ファイバーセンサーは従来のセンサーと性能に関して競争するのではなく、質的に異なるデータを収集方法として住み分けることが必要である。光ファイバ分布センサーを用いれば(分解能は落ちるが)、ポイントデータではなく広域の分布の様子がリアルタイムで計測できるメリットがあり、従来型センサーと対抗可能である。

このように、実際に使用してもらうためには、原理的にすぐれていることを理論で示すだけでなく、海洋環境で使用できる信頼性のあるセンサーを開発して実績を積むことが重要となる。

文 献

- 1) 田幸敏治, 遠内順平, 南 茂夫(編) : 光測定ハンドブック(朝倉書店, 1994) pp. 782-789.
- 2) 杉本伸夫, 竹内延夫 : “レーザーレーダーによる大気計測”, 応用物理, **63** (1994) 444-454.
- 3) 功刀正行 : “大気汚染計測における最近の技術動向”, センサ技術, **9**, No. 9 (1989) 33-38.
- 4) 布下正宏, 久間和生 : 光ファイバセンサ(情報調査会, 1985) pp. 198-202.
- 5) 例えは、鈴木邦男 : “湿度, ガス, 成分センサ”, センサ技術ハンドブック(日本能率協会, 1983) pp. 265-272.
- 6) G. Stewart, A. Mencaglia, W. Philip and W. Jin: “Interferometric signals in fiber optic methane sensors with wavelength modulation of the DFB laser source,” IEEE J. Lightwave Technol., **16** (1998) 43-53.
- 7) 横山昭彦, 池川幸一, 佐藤泰生, 高見 均, 西本征幸, 松田美一 : “偏心コアシングルモードファイバメタンセンサ”, センサ技術, **12**, No.9 (1992) 27-31.
- 8) 矢島達夫, 霜田光一, 稲葉文男, 難波 進(編) : 新版レーザハンドブック(朝倉書店, 1989) pp. 494-497.
- 9) 日本海洋学会(編) : 海洋環境調査法(恒星社厚生閣, 1979).
- 10) 海洋調査技術学会(編) : 海洋調査フロンティア(海洋調査技術学会, 1994) pp. 204-258.
- 11) J. P. Dakin: “Multiplexed and distributed optical fibre sensor systems,” J. Phys. E: Sci. Instrum., **20** (1987) 954-967.
- 12) 田井修市, 高橋正信, 久間和生, 浜中宏一 : “分布形光ファイバセンサ”, 計測と制御, **26** (1987) 331-336.
- 13) 例えは, 黒木俊郎(編) : 海洋計測法(東京大学出版会, 1972) p. 12.
- 14) 例えは, 和田史生 : “光ファイバによる分布計測”, 第8回光波センシング技術研究会講演論文集, LST8-6 (1991) pp. 39-46.
- 15) 飯高 弘, 佐藤宗純 : “海洋光ファイバ温度分布センサに関する実海域実験”, 日本造船学会論文集, 第169号 (1991) 223-231.
- 16) 飯高 弘, 佐藤宗純, 山口正義, 二島英明 : “光ファイバを用いた新しい海洋計測通信技術の検討”, Proc. Techno-Ocean '94 (1994) pp. 853-858.
- 17) 光技術応用プロジェクトの開発報告書—海洋環境計測光LAN—(光産業技術振興協会, 1994).
- 18) 西村清和, 松林 修, 徳岡隆夫, 三瓶良和 : “光ファイバ分布型温度センサを用いた湖底湧水の探査”, 物理探査学会学術講演会論文集(1995) pp. 320-324.
- 19) 西村清和, 松林 修, 浦辺徹郎, 木下正高, 久保田俊輔 : “光ファイバ分布型広域海底温度測定システム”, 電気学会計測研究会資料, IM-94-55 (1994) pp. 11-18.
- 20) 土屋喜一, 尾方俊史, 植田正之 : “カルマン渦を利用した流量計”, 機械学会誌, **72** (1969) 1072-1081.
- 21) 山崎弘郎, 石川 肥, 栗田良夫 : “カルマン渦流量計”, 計測と制御, **10** (1971) 173-188.
- 22) P. A. Leilabady, J. D. C. Jones, A. D. Kersey, M. Corke and D. A. Jackson: “Monomode fibre optic vortex shedding

- flowmeter,” *Proceedings of International Optical Fiber Sensors* (1984) pp. 35–38.
- 23) 飯高 弘, 佐藤宗純, 戸井暢香, 根本俊雄：“光ファイバを用いた海洋流速センサに関する実験的検討”, 電気学会計測研究会資料, IM-95-77 (1995) pp. 33–42.
 - 24) 柳原直樹, 根本俊雄, 佐藤宗純, 飯高 弘：“光ファイバを用いた振動ベクトルセンサの基礎的検討”, 電気学会計測研究会資料, IM-98-1 (1998) pp. 1–8.
 - 25) 杉森康宏, 坂本 亘(編)：海洋環境光学(東海大学出版会, 1985) pp. 203–222.
 - 26) 日本海洋学会(編)：海洋環境調査法(恒星社厚生閣, 1979) pp. 233–235.
 - 27) 斎藤俊幸, 西本昭男, 角井嘉美, 津田良平：“水中懸濁粒子組成解析のための in situ 吸収スペクトル測定”, 電気学会計測研究会資料, IM-93-46 (1993) pp. 29–38.
 - 28) 斎藤俊幸, 角井嘉美, 西本昭男, 津田良平, 山崎 潔, 木村正勝：“二波長蛍光同時検出方式による藍藻の弁別計測”, 電気学会計測研究会資料, IM-94-54 (1994) pp. 1–9.
 - 29) 斎藤俊幸, 飯高 弘, 佐藤宗純, 日下祐三：“ブイ搭載型小型海中レーザレーダ技術の開発”, 電総研彙報, 61 (1997) 503–510.
 - 30) L. M. Lyamshev and Yu. Yu. Smirnov: “Distributed optical fiber acoustic detectors,” *Acoust. Phys.*, 41 (1995) 467–478.
 - 31) 佐藤陸沢, 新井 宏, 土橋孝治, 小濱俊一：“光ファイバハイドロホンの開発”, 信学技報, OPE95-2 (1995) pp. 7–12.
 - 32) 三戸章裕：“光ファイバを用いた環境水中 CO₂ 濃度センサの試作”, センサ技術, 12, No.8 (1992) 46–50.
 - 33) 「平成 6 年度科学技術振興調整費」海底ケーブルシステムを用いた多目的地球環境モニターネットワーク開発に関する調査報告書(科学技術庁研究開発局, 1995).

(1998年3月17日受理)