

# 干渉型光ファイバーセンサー技術を用いた海洋モニタリングの構想検討

中島 康行 小畑 秀則

光ファイバーセンサーとは、センサー部が光通信で使用される光ファイバー及び光学部品で構成され、周囲から加わる圧力や歪みにより光ファイバーが伸縮する機構を備えて、センサー部を伝搬する光信号の物理量変化を検出するセンサーである。光ファイバーセンサーは、(1)センサー部への電源供給が不要で電氣的雑音の影響を受けにくい、(2)センサー周囲に電子回路が不要で信頼性が高い、(3)細径、軽量かつ低損失で多芯化が容易な光ファイバーによる長距離伝送が可能などの特長がある。主な光ファイバーセンサーとしては、変化する光信号の物理量により、強度検出型センサー、波長検出型センサー及び干渉型(位相検出型)センサーの三つに大別される。

当社では干渉型光ファイバーセンサーの開発<sup>1)</sup>を続け、既に水中音響センサーや水位センサーなどを商品化している。干渉型光ファイバーセンサーの特長は、より微弱な信号を高精度に検出可能で、より多くのセンサーを多重化可能であり、伝送路の擾乱(じょうらん)による強度変動の影響を受けにくいなどが挙げられる。

本稿では、当社で水中音響センサーとして開発した干渉型光ファイバーセンサーを、海洋生物モニタリングへ応用することを構想検討した結果を説明する。

## 海洋生物モニタリング

従来から水質分析などを中心とした海洋環境モニタリングが続けられていたが、SDGsに関連して、海洋生物音の計測が活発化している<sup>2)</sup>(以降は、海洋生物モニタリングと呼ぶ)。

海洋での騒音が海の生態系を乱す問題が懸念され、エアガン(海底資源探査に使う音源装置)や大型商船(原油タンカーなど)が発する大きな騒音が、クジラなどの大型生物の活動に影響を与えたり、プランクトンなどの小さな生物を死に至らしめたりする原因になる。これらの騒音による生態系への悪影響を回避するために、海洋生物モニタリングシステムの開発が期待されている。

一般的な海洋生物モニタリングのデータ計測方法は、電気式センサーの伝送距離や電源供給に制約があるため

(ケーブルの電気抵抗によるが一般に数百m程度)、船舶などで計測海域内を航行し電気式の水音響センサーを一時的に計測海域へ投入・揚収して行われる。一方、干渉型光ファイバーセンサーは陸上から計測海域まで多点計測・長距離伝送が可能のため(数十km以上)、一度、海底に設置すると、広範囲の海洋生物音を常時、高精度に計測可能となり、従来よりも大量のデータを、安定して継続的に収集可能である。従って、干渉型光ファイバーセンサーを海洋生物モニタリングに用いることは非常に有効と言える。

## 干渉型光ファイバーセンサー

干渉型光ファイバーセンサーの概要イメージを図1に、動作原理を図2に示す。光カプラで分岐した片方のファイバーにセンシング機構を備えた光ファイバーコイルがあり、音響信号により動的な圧力変化を受けると、光ファイバーコイルが膨張・収縮して光ファイバーの長さが増減する。光ファイバーの長さが増減すると干渉信号に位相変調が発生し、これを位相復調すると図2に示すような干渉型光ファイバーセンサーで受信した音響信号が抽出されるので、微弱な信号を高精度に検出可能である。

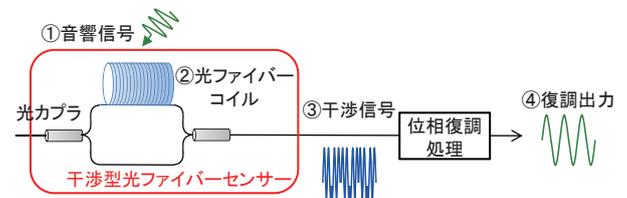


図1 干渉型光ファイバーセンサーの概要図

① 音響信号	② 光ファイバーコイル	③ 干渉信号	④ 復調出力
入力信号なし —	変形なし	位相変化なし	出力信号なし
入力信号:小 〰〰〰	小さく変形(膨張・収縮)	位相変化は緩やか	微弱な信号を高精度に検出可能
入力信号:大 〰〰〰	大きく変形(膨張・収縮)	位相変化は急峻	大きい信号まで検出可能

図2 干渉型光ファイバーセンサーの動作原理

本章では、電気式センサーと比較して多点計測・長距離伝送が可能であること(多重伝送)、他方式の光ファイバーセンサーと比較して微小な信号まで高精度に検出可能であること(高分解能)を説明する。

### (1) 多重伝送

光ファイバーセンサーは多数の信号を多重化して多点計測可能であることが特長である。干渉型光ファイバーセンサーの多重化方式を図3に示す。時分割多重(TDM)は異なるセンサー信号をパルス波形で異なる時間に割り当てて同一の光ファイバー上に伝送する方式であり、図3では光カプラと遅延ファイバーを用いて復調器にパルスが到達する時間を分離することで、二つのセンサーを多重化している。波長分割多重(WDM)は異なるセンサー信号を異なる波長の光に割り当てて同一の光ファイバー上に伝送する方式であり、図3では波長分割多重器を用いて多重化している。空間分割多重(SDM)は異なるセンサー信号を異なる光ファイバーで伝送する方式であり、図3では2本の伝送ファイバーを用いて多重化している。

各方式により多重化数する際の分岐損失が異なるため、多重化数を増やすには、これらの3方式の多重化を効率的に組み合わせた構成を設計する。

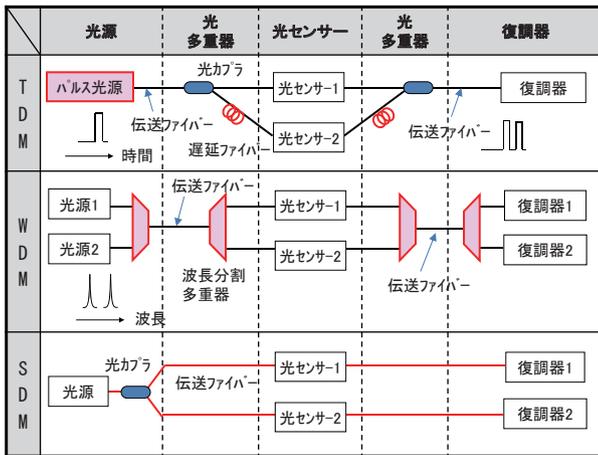


図3 多重化方式の形態

光ファイバー中を伝送する波長 $1.55\mu\text{m}$ の光信号のパワーは $1\text{km}$ あたり約5%しか減衰しないが(伝送損失: $0.2\text{dB/km}$ )、 $100\text{km}$ までの長距離を伝送すると損失が積み重なり99%減衰する。この伝送損失と多重化による分岐損失により多点計測・長距離伝送が可能な範囲が決まるが、数十 $\text{km}$ 以上の範囲にわたり複数のセンサーを多重伝送可能であり一般的な電気式センサーより優れる。

### (3) 高分解能

干渉型光ファイバーセンサーで検出される光の位相は式(1)で与えられる。このとき、 $\phi[\text{rad}]$ は干渉信号位相、 $n$ は光ファイバーの屈折率(約 $1.47$ )、 $L[\text{m}]$ は光ファイバーコイルに巻かれる光ファイバー長、 $\lambda$ は光信号の波長(約 $1.55\times 10^{-6}[\text{m}]$ )である。

$$\phi = \frac{2\pi nL}{\lambda} \dots (1)$$

このとき、復調器の最小位相検出レベルは $\Delta\phi = -100\text{dB ref } 1\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の実績があり、この最小位相検出レベルに対応する光ファイバーの長さ変化の分解能( $\Delta L$ )は式(2)となる。

$$\begin{aligned} \Delta L &= \frac{\lambda}{2\pi n} \Delta\phi \\ &= 0.0002[\mu\text{m}] \dots (2) \end{aligned}$$

これは微小粒子状物質(PM2.5)の大きさ(直径 $2.5\mu\text{m}$ )の1万分の1以下であり、極めて小さい光ファイバーの長さ変化を検出可能であることが分かる。光ファイバーセンサーの受感度は $-140\text{dB ref } 1\text{rad}/\mu\text{Pa}$ 以上の実績があるため、音圧換算での最小検出レベルは $40\text{dB ref } 1\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下であり、これは $2\text{kHz}$ での海況0に相当し、非常に小さい音まで検出可能である。

## 海底設置型光ファイバーセンサーアレイ

複数の干渉型光ファイバーセンサー(本節では、センサーと呼ぶ)を海底に設置することにより、海洋生物音を広範囲にモニタリングするシステムが構築可能である。本システムを海底設置型光ファイバーセンサーアレイと呼ぶ。本節では、システムの検討条件、基本的なセンサーの配置方法及び海底設置型光ファイバーセンサーアレイの検討結果を説明する。

### (1) 検討条件

今回、海洋生物モニタリングシステムを構想検討する際に仮定した検討条件を表1に示す。備考欄には論文<sup>3)</sup>などを参考にした想定を記載した。実際の要求条件が提示されれば今回の想定条件から置き換えることにより具体的なシステム規模を試算可能である。

表1 海洋生物モニタリングの検討条件

番号	項目	内容	備考
a)	ケーブル長	最大370km	陸上から公海までの範囲を想定
b)	最大深度	200m	大陸棚等の浅海域を想定
c)	信号周波数	10Hz~5kHz	・海洋生物や商船等を想定
d)	信号音圧レベル	SL=150dB RMS	・ザトウクジラ: 151~173dB ref 1 μPa (100~800Hz) ・大型商船: 157dB ref 1 μPa (54Hz, 15kt)
e)	雑音音圧レベル	NL=62dB ref 1 μPa/√Hz (1kHz以下)	海況(シーステート)2相当
f)	検出方法	ケーブル敷設範囲で測位が可能な間隔にセンサーを設置	所要SNR: 10dB以上 (生物音の識別が可能なレベルとして想定)

## (2) センサーの基本配置

信号音を検出するには、信号音が周囲環境雑音に埋もれないようにセンサーを配置する必要がある。即ち、表1の信号音圧レベルが各センサー位置で周囲環境雑音に埋もれない距離間隔でセンサーを配置すると、この間隔で配置されたセンサーアレイがカバーする範囲の信号音を漏れなく検出可能である。この基本的な考え方に、表1の検討条件を適用すると式(3)となる。このとき、 $TL[dB]$ は伝搬損失、 $SL[dB]$ は信号音圧レベル、 $NL[dB]$ は周囲環境雑音レベル、 $SNR[dB]$ は信号対雑音比である。

$$\begin{aligned}
 TL &< SL - NL - SNR \\
 &= 150dB - 62dB - 10dB \\
 &= 78dB \dots (3)
 \end{aligned}$$

一般的に、点音源からの伝搬は球面拡散による伝搬損失を生じるため、伝搬損失78dB以下に収まる伝搬距離(R)は式(4)となる

$$\begin{aligned}
 R &< 10^{(TL/20)} \\
 &= 10^{(78dB/20)} \\
 &= 8km \dots (4)
 \end{aligned}$$

また、二つのセンサーから信号音の位置を特定するため、各センサーには複数個の水中音響センサー(本節では受波素子と呼ぶ)を配置し、信号音を受信した時間差から、おおよその到来方位を推定する。ここでは、受波素子は最小限の2個とした。受波素子の間隔は、信号周波数の半波長程度の数メートルが適切である。

このとき、二つの受波素子からなるセンサーが8km間隔で配置され、これをセンサーの基本配置とし、各センサーは式(4)より半径8kmの球状の領域(図4では点線の円弧の範囲内)で発生した150dB以上の信号音を検出可能であり、二つのセンサーで検出することにより信号音のおおよその位置を推定する(図4)。

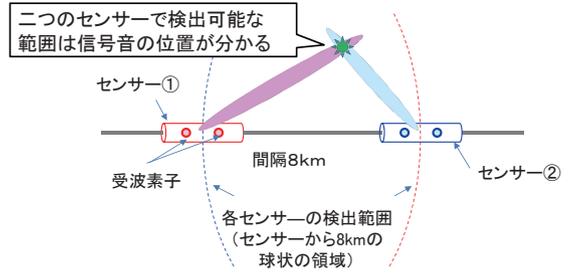


図4 センサーの基本配置

以上のようにセンサーが基本配置されたセンサーアレイの概要イメージを図5に示す。

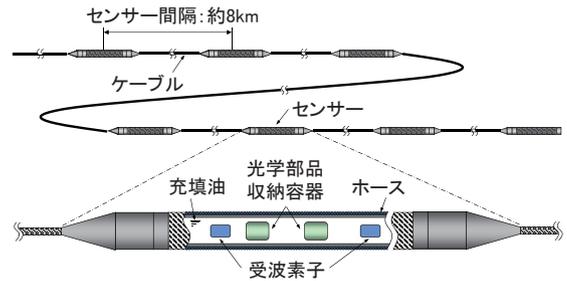


図5 センサーアレイの概要図

## (3) 検討結果

海洋設置型光ファイバーセンサーアレイの検討結果を示す。表1のとおり、設置範囲(伝送距離)が最大370kmまでの範囲で3パターンを検討した。

最初に、パターン①として、光源復調器を1箇所に設置して、多重伝送可能な距離までセンサーを設置する基本構成を検討した。この場合、光源から出た光を往路の光ファイバーに入力し、各々のセンサーを伝搬した信号光が復路の光ファイバーを経て復調器へと戻る。

検討の結果、伝送距離は約56kmであった(図6)。センサー数は合計7個、アレイ検出範囲は図6に示す七つの円(検出範囲:半径8km)を繋いだ約56km×16kmである。

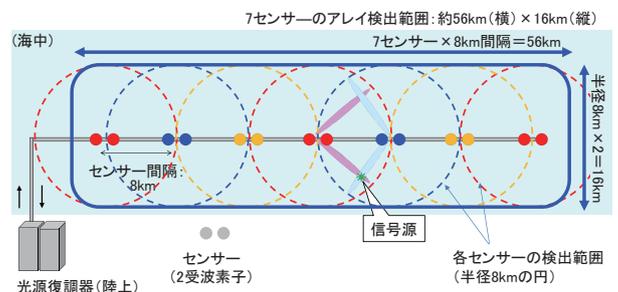


図6 パターン①の概要図

次に、パターン②として、パターン①をベースとして、伝送距離を伸ばすため、光源と復調器とを別々の場所に分けて

設置する場合を検討した。この場合、光源から出た光を往路の光ファイバーに入力し、各々のセンサーを伝搬した信号光は同一の光ファイバーを経て復調器へと更に進んでいくため、パターン①と異なり片道分の伝送損失へと半減し、伝送距離はパターン①の2倍の112kmとなった(図7)。センサー数は14個、アレイ検出範囲は約112km×16kmである。

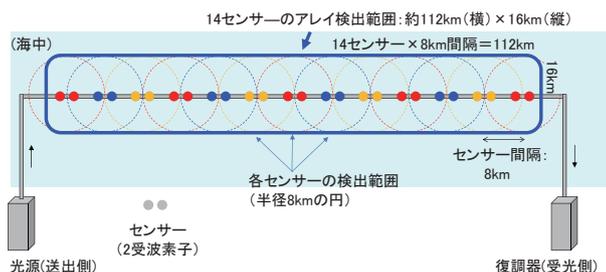


図7 パターン②の概要図

最後に、パターン③として、パターン②をベースとして、電源供給を必要とするが、光中継器を伝送路の途中に追加して距離を伸ばす場合を検討した。光中継器で光信号を+20dB(100倍)以上増幅すると、パターン②の112kmを1ブロックとして3ブロック分まで延伸可能と見積もられ、伝送距離は336kmとなった(図8)。センサー数は42個、アレイ検出範囲は約336km×16kmである。

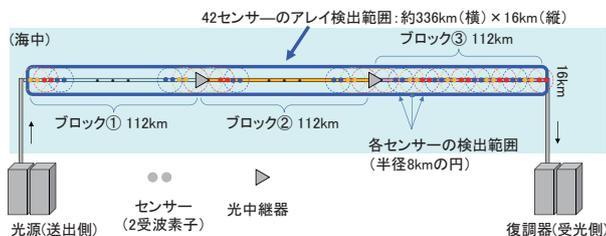


図8 パターン③の概要図

## まとめ

これまで当社で開発してきた干渉型光ファイバーセンサーを用いて、海洋生物音のモニタリングシステムを構想検討した。干渉型光ファイバーセンサーは高分解能で微小な音まで検出可能なため、広範囲の検出が可能である。今回、構想検討の結果、最大で300km以上の範囲まで設置可能と試算できた。

我々は、干渉型光ファイバーセンサーを用いて、センサー感度、センサー数、伝送距離によりさまざまな形態の光ファイバーセンサーアレイをシステム設計する手法をこれまでの技術開発の過程で確立している。また、過去には振動や温度などの物理量を検出する光ファイバーセンサーを試作した

実績もあり、これらを組み合わせて多重化することにより、海洋生物モニタリングと海洋環境モニタリングを統合した、他方式では実現し得ないシステムにまで拡張可能である。

さらには、広範囲にわたり常時モニタリングすることにより、大量の信頼性のあるフィールドデータを収集可能なため、AI技術で海洋生物や船舶種類を自動識別することによって、船舶が海洋生態系に及ぼす影響を総合的に観測するシステムへの拡張性も高い。

以上のように、複数種類のセンサーを組み合わせ、センサーから信号処理までを統合したシステムとして、OKI独自の付加価値の高いソリューションが提供できるよう本開発を進めていきたい。

## 参考文献

- 1) Kenji Saijyou, Chiaki Okawara, Tomonao Okuyama, Yasuyuki Nakajima and Ryotaku Sato: Fiber Bragg grating hydrophone with polarization-maintaining fiber for mitigation of polarization-induced fading, *Acoustical Science and Technology*, 33, 239-246 (2012).
- 2) 朱夢瑤:水産資源モニタリング手法の現状と今後の展望, *OPRI Perspectives No.21(2021)*
- 3) Koki Tsujii, Tomonori Akamatsu, Ryosuke Okamoto, Kyoichi Mori, Yoko Mitani and Naoya Umeda: Change in singing behavior of humpback whales caused by shipping noise, *PLOS ONE*, 13(10), e0204112 (2018).

## 筆者紹介

中島康行:Yasuyuki Nakajima. ソリューションシステム事業本部 特機システム事業部 研究開発部  
小畑秀則:Hidenori Obata. ソリューションシステム事業本部 特機システム事業部 ソナーシステム第二部

## TiPO 【基本用語解説】

### デシベル単位系 (dB)

強度がN倍になる相対値を、 $20\log_{10}(N)[dB]$ として表現する(パワーの場合は $10\log_{10}(N)[dB]$ )。また、基準の $0[dB]$ での値を $ref$  1(単位系)と追記して絶対値を表す。例えば、 $40dB$   $ref$   $1\mu Pa$ は基準値 $0dB$ が $1\mu Pa$ での $40dB$ (=100倍)の音圧を表し、 $100\mu Pa$ に等しい。他には、 $40dB$   $re. \mu Pa$ 、 $40dB/\mu Pa$ などの表現方法もある。

### 海況(SS:Sea State、シーステート)

国際気象機関が定めた海面の粗さを表した階級表示であり、SS0(ゼロ)が最も静かな状態を表す。