

分布型光ファイバ圧力センサの開発に向けた実験的検討

Experimental Study for Development of Distributed Optical Fiber Pressure Sensor

平野 裕之 藤原 航太郎 今井 道男
川久保 政洋¹⁾ 市川 恭子^{1) 2)} 宇田 俊秋¹⁾

要 約

光ファイバ中で生じる散乱光の周波数は、光ファイバの温度やひずみの変化でシフトする。この現象を利用して、光ファイバそのものを有感部とした分布型の温度センサやひずみセンサが開発され、構造物のモニタリングなどへの適用・展開が図られている。近年、光ファイバ計測のうち、高い輝度が得られるレイリー散乱光に着目した計測器が普及し、高い精度で周波数シフトが計測されるようになり、温度やひずみの変化以外の周波数シフトの要因が探索されるようになった。本研究では、分布型光ファイバ圧力センサの開発に向けて、数値解析と加圧試験の両面から圧力が分布型光ファイバひずみ計測結果に及ぼす影響を確認し、圧力によるひずみ変化のメカニズムの解明を試みた。

目 次

- I. はじめに
- II. 光ファイバ計測と圧力影響
- III. 分布型光ファイバ圧力センサ
- IV. 有限要素解析
- V. 加圧試験
- VI. おわりに

I. はじめに

実大構造物のひずみの計測は、ひずみゲージなどのセンサを表面や内部に敷設して行われるが、センサ数が多いと計測ケーブルが膨大となるため、特徴的な部位にのみ設置されることが多い。これに対し、温度やひずみの変化を線状に計測できる分布型光ファイバセンサ¹⁾は光ファイバのみで温度やひずみの変化を効率よく多点計測できる。例えば、グラウンドアンカーやPC橋のワイヤーに光ファイバを組み込んでワイヤーに沿ったひずみ分布を計測し、張力の分布推定に活用できることが試適用により確認されている。また、光ファイバ計測技術の向上に伴い、温度やひずみ以外の計測の可能性も議論されるようになってきている。

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術開発分野

における坑道の埋め戻し施工では、施工後の埋め戻し材の自重や圧密により坑道天端に隙間が生じる可能性がある。このような隙間は、事前の施工試験などでその容積を把握し、埋め戻し材の設計に反映することで地下水の浸潤にともなうベントナイトの膨潤により閉塞させることができる。例えば、坑道天端の隙間を模擬した要素試験を行い、埋め戻し材の膨潤により坑道天端に作用する圧力を計測し、埋め戻し材の乾燥密度と膨潤圧の関係から坑道天端における乾燥密度の適切性を判断することなどが考えられる。ベントナイトの膨潤による自己シール性の性能確認の方法として、模擬坑道や地下サイトにおける実証試験などが考えられ、埋め戻し材の膨潤で生じた圧力の分布計測技術の開発が期待されている。このような背景から筆者らは、光ファイバ全長にわたって連続的な情報が得られる分布型光ファイバセンサを利用した圧力計測技術の開発に取り組んできた²⁾。本稿では、外部圧力のみを因子とした加圧試験を実施し、圧力変化に対する分布型光ファイバセンサの計測結果（出力値）との相関を整理した。また、加圧試験結果との比較・検証ツールとして有限要素解析を採用し、加圧試験結果と有限要素解析結果を踏まえて、圧力変化が分布型光ファイバセンサに与える影響について考察したので報告する。

1) 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター Radioactive Waste Management Funding and Research Center

2) 日本エヌ・ユー・エス株式会社 JAPAN NUS CO., LTD.

キーワード : 光ファイバセンサ, 圧力計測, 放射性廃棄物処分, モニタリング

Keywords : optical fiber sensor, pressure measurement, radioactive waste disposal, monitoring

II. 光ファイバ計測と圧力影響

1. 計測原理

光ファイバに入射された光の一部は、石英ガラスに吸収されたり散乱したりする³⁾。散乱光にはレイリー散乱、ブリルアン散乱、ラマン散乱があり、計測用途に応じて選択されている。光ファイバによる温度やひずみの変化の計測には、主にブリルアン散乱とレイリー散乱が利用される。ブリルアン散乱は透明な固体や液体に単色光を入射したときに物質中の音波（伝搬する圧力波：密度波）により生じる非弾性散乱（入射波のエネルギーが保存されない散乱）で、光ファイバのような固体媒質の場合、音響フォノン（格子振動の量子）によって発生する。散乱光の周波数は光ファイバ中の音速によって決まり、光ファイバ中の音速を決める石英ガラスのヤング係数や密度、屈折率が温度やひずみの変化に比例する特性をもつため、入射光からのブリルアン散乱の周波数シフトを計測して温度やひずみの変化の情報を得ることができる⁴⁾。一方、レイリー散乱は光ファイバ自身が持つ密度のゆらぎ（音波のように伝搬しない密度の分布）による光の弾性散乱（入射波のエネルギーが保存される散乱）で、散乱光の波長は入射光と変わらない。しかし、光ファイバ中の多数のレイリー散乱点から計測機に届く光は干渉を起こしてレイリー散乱ピーク中に微細な散乱パターンを形成することが知られている。パターンマッチング技術で算出される散乱パターンのずれは、温度やひずみの変化と比例するため、温度やひずみの微小変化の計測に利用されている。なお、光ファイバ中ではラマン散乱も発生するが、温度による散乱光の輝度から温度計測が行われるだけでひずみに対しては原理的に感度がないことが知られている（Fig.1）。

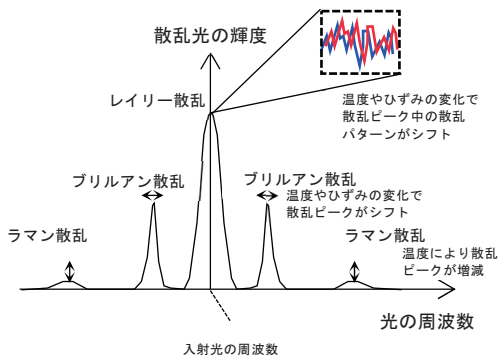


Fig.1 光ファイバ中の散乱光と周波数シフト (Scattered Light in Optical Fiber and Frequency Shift)

分布型光ファイバセンサを用いた計測では、光ファイバに入射してから散乱光が計測機に到達するまでの時間差で計測位置を特定する。散乱光スペクトル（周波数を横軸にして散乱光強度の成分を示したグラフ）を計測位置ごとに求め、予め記録した初期状態と比較して周波数シフトを得て温度やひずみの変化に換算する。そのため光ファイバそのものを

センサとして利用し、光ファイバの全長に沿って温度やひずみの変化を計測することができる。従来の熱電対やひずみゲージによる温度やひずみの計測では、各計測点にセンサを設置し計測ケーブルを配線するため、高密度な分布計測を行うことは困難であったが、分布型光ファイバセンサであれば、1本の光ファイバケーブルを配線すれば多数の計測点のデータを得ることができ、計測を効率よく行うことができる。

2. 光ファイバ計測結果への圧力影響

光ファイバに光を通過させて生じた散乱光のスペクトルが、ひずみと温度の変化によって周波数シフト ($\Delta\nu$) を起こす現象は式 (1) のように表される⁵⁾。 $\Delta\varepsilon$, ΔT は、それぞれひずみと温度の変化量である。また、 C_ε , C_T はひずみ感度係数と温度感度係数で、光ファイバの石英ガラス部の物性値やケーブル被覆部の種類などによって異なる定数である。

$$\Delta\nu = C_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon + C_T \cdot \Delta T \cdot \dots \dots \dots (1)$$

分布型光ファイバセンサの計測はブリルアン散乱光で盛んに行われていたが、散乱光スペクトルの周波数シフトを求める解析技術の向上などによりレイリー散乱光でも行われるようになり、周波数シフトが高い精度で得られるようになった。その結果、周波数シフトに、温度やひずみの変化に加えて圧力変化 ΔP が影響しているとした式 (2) への拡張が検討されるようになった。ここで C_P は圧力感度係数である。

$$\Delta\nu = C_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon + C_T \cdot \Delta T + C_P \cdot \Delta P \cdot \dots \dots \dots (2)$$

光ファイバ計測への圧力影響は、水中音波計測分野において長く研究されている。Budiansky らは、静水圧中の被覆のない光ファイバを通過する光が、圧力により位相差を $-2.2 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ の割合で変化させること、被覆のある光ファイバは、樹脂製の被覆材の厚さや材質によって、圧力影響が最大 38 倍まで高められること（ポリエチレンコーティングの場合）、光ファイバに作用する圧力によって、光ファイバの軸方向ひずみによる力学的な要因、径方向ひずみによる力学的な要因、石英ガラス部の屈折率が変化するなど光学的な要因の 3 種類があると主張している⁷⁾。

Luca らのレビュー論文⁶⁾には、静水圧中では軸方向ひずみの影響が最大であると解析的に検討されたと説明されている。また、光ファイバ計測の圧力感度を高める方法として、被覆材の厚さや材質を工夫する方法、圧力で変形しやすい材質や形状に光ファイバを固定する方法、光ファイバの断面構造を圧力感度が高くなるように工夫する方法があることが紹介されている。

しかし、レイリー散乱光の計測技術が向上した近年の研究において、これまでのところ式 (2) の検証は行われておらず、 C_P を定量化したデータも少ないのが実状である。光ファイバの圧力影響を計測した研究の中には、光ファイバの被覆条件の違いにより、圧力による周波数シフトの大きさや極性が異

なるデータを含んだ結果を報告したものがあるが、明確な説明は記述されていない⁸⁾。

Ⅲ. 分布型光ファイバ圧力センサ

筆者らは式(2)が成立することを前提として分布型光ファイバ圧力センサを考案し、圧力計測への適用性の確認を進めている。被覆条件が異なる2本の分布型光ファイバを同じ圧力環境下にセットして同時に計測し、両者の周波数シフトの差を取り、温度とひずみの影響を相殺して圧力影響だけを抽出する手法である (Fig.2)。

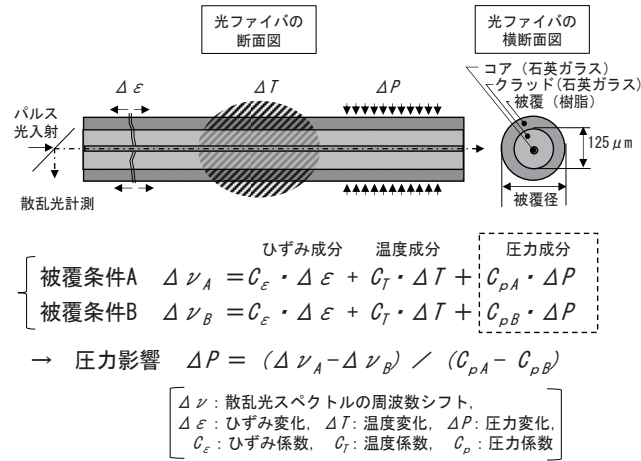


Fig.2 分布型光ファイバ圧力センサの考え方 (Concept of Distributed Optical Fiber Pressure Sensor)

この手法が成立するためには次の条件が満たされなければならない。

- ・ 圧力に比例して散乱スペクトルが周波数シフトを起こすこと (式(2)が成立すること)
- ・ 被覆条件が異なる2本の光ファイバ出力値の差を取り、温度とひずみの影響が十分相殺されること (Fig.2 で C_ε と C_T が一定で被覆条件への依存が小さい)

考案した分布型光ファイバ圧力センサの実現性を示し、様々な圧力条件に適したセンサを設計できるようになるためには、光ファイバ計測への圧力影響メカニズムの解明が欠かせない。そこで、本稿では、温度一定の静水圧 (均等圧) 条件下の加圧試験で得られたひずみと、有限要素解析で算出したひずみを比較した (Fig.3)。加圧試験で光ファイバに生じたひずみが圧力の影響だけであれば両者はよく一致し、そうでなければ、その他の光学的要因の寄与が高いと推定できる (Table 1)。

なお、本稿では、光ファイバはシングルモード光ファイバを、光ファイバ計測はレイリー散乱光を分析する Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry (TW-COTDR) 方式を指す。

Ⅳ. 有限要素解析

1. 圧力による光ファイバのひずみ変化 (理論検討)

光ファイバを Fig.4 に示すように半径 a のガラス部と半径

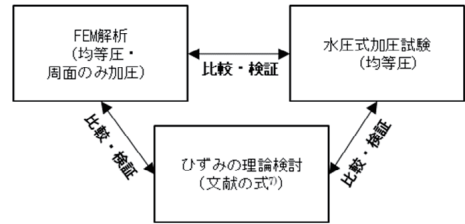


Fig.3 分布型圧力センサ開発に向けた検討 (Study for Development of Distributed Pressure Sensor)

Table 1 光ファイバ計測への圧力影響検討の特徴 (Characteristics of Pressure Effect Study on Optical Fiber Measurement)

	理論	解析	試験
特徴点	・ 圧力影響感度が圧力による位相遅れ ($\Delta\phi/\phi$) として整理されている。 ・ 第1項はひずみの変化影響。 ・ 第2項は屈折率変化の影響。	・ 圧力が加えられた光ファイバのひずみが算出される。 ・ 圧力が加えられた光ファイバでレイリー散乱光を計測すると周波数シフトが観測される。	・ 圧力が加えられた光ファイバでレイリー散乱光を計測すると周波数シフトが観測される。
留意点	・ 近似条件により適用限界がある。 ・ 材料は均質でスケール則が成立。	・ 圧力による屈折率変化の影響 (理論式第2項) は算出されない。 ・ 材料は均質でスケール則が成立。	・ 光ファイバ計測値への圧力影響を要因別に分離できない。

b の被覆部に分けてモデル化し、応力の平衡条件にもとづいて静水圧 p によるガラス部の軸方向ひずみ ε_{zg} を式で表すと式(3)のようになる⁷⁾。ここで、 E_g , E_p はガラスと被覆材のヤング係数、 ν_g , ν_p はガラスと被覆材のポアソン比である。また、 $f = (a/b)^2$ である。

$$\varepsilon_{zg} \approx -\frac{1-2(1-f)\nu_p-2f\nu_g}{fE_g+(1-f)E_p} p \dots \dots \dots (3)$$

式 (3) に Table 2 に示す材料物性値を代入し、例えば、圧力 0.1 MPa におけるガラス部の軸方向ひずみ ε_{zg} を算出すると、 $-6.6 \mu\varepsilon$ (マイナスの符号は圧縮方向を表す) を得ることができる。しかし、この理論式が成立するのは、 $f \ll 1$ 及び $E_p \ll E_g$ の条件下のみであり、その適用範囲は限られている。例えば、ガラス部半径 a が 0.125 mm、被覆部半径 b が 0.150 mm の光ファイバの場合、 $f=0.69$ となり $f \ll 1$ と言えなくなる。また、面外変形が考慮されておらず、光ファイバのように曲げ剛性が低い材料での適用性は明らかではない。そこで、理論式以外の手段として、有限要素解析によって光ファイバに生じるひずみを算出した。

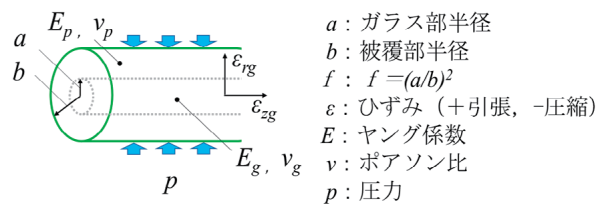


Fig.4 理論式の座標系及びパラメータの定義 (Definition of Coordinate System and Parameter of Theoretical Formula)

Table 2 材料物性値 (Material Properties)

部 位	半径 (mm)	ヤング係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν (-)
ガラス部	$a = 0.0625$	$E_g = 73000$	$\nu_g = 0.17$
被覆部	$b = 0.45$	$E_p = 2400$	$\nu_p = 0.38$

2. 有限要素解析⁹⁾

(1) 解析モデル

ここでは被覆部外径 0.90 mm の光ファイバケーブルを対象に、三次元の静的有限要素解析を実施した。解析モデルは、長さ 1 mm 分を Table 3 に示す要素で分割し、ガラス部と被覆部間のインターフェースとして Table 4 に示す剛性を与えた要素 (剛な結合) を設定した。また、固定端は軸方向のみを変位拘束し、自由端は平面を保持する境界条件とした。解析条件の適切性を検討するために、圧力が光ファイバの周面だけに作用するモデル (A モデル) と、周面及び自由端の軸断面に作用するモデル (B モデル) の 2 通りの解析を行った。B モデルの詳細を Fig.5 に示す。静水圧条件は、地層処分施設の坑道埋め戻し材の膨潤圧を想定し 0.1 MPa と仮定した。

Table 3 解析で使ったモデル要素 (Model Elements Used in Analysis)

部 位	使用要素
光ファイバ	1次のソリッド要素 (6面体, 5面体)
ガラス部と被覆部間	面インターフェース要素

Table 4 インターフェース要素の剛性 (Stiffness of Interface Elements)

	法線方向剛性 (GPa/mm)	円周方向せん断剛性 (GPa/mm)	軸方向せん断剛性 (GPa/mm)
接触時	1.0E+5	1.0E+5	1.0E+5

(2) 解析結果

0.1 MPa の圧力が作用した時に、ガラス部に生じる軸方向ひずみの解析結果を Table 5 に示す。A モデルでは、ガラス部の軸方向ひずみが引張を、その他の方向のひずみが圧縮を示し、圧力が光ファイバの周面だけに加わると、光ファイバは軸方向に伸び、且つ、径は減少していた。一方、B モデルでは、いずれの方向のひずみも圧縮を示し、静水圧により光ファイバの体積が収縮していた。

V. 加圧試験¹⁰⁾

1. 加圧試験の概要

加圧試験装置の概要を Fig.6 に示す。内径 110 mm、高さ 1,000 mm、厚さ 15 mm のアクリル製の耐圧容器にシリンジポンプで精製水を送水し、流量制御により静水圧を調整・保持した。光ファイバは耐圧容器上蓋の貫通孔を介して耐圧容器の底まで垂らし、貫通孔と光ファイバの隙間は接着剤で止水した。静水圧に対する周波数シフトの応答を得るため、

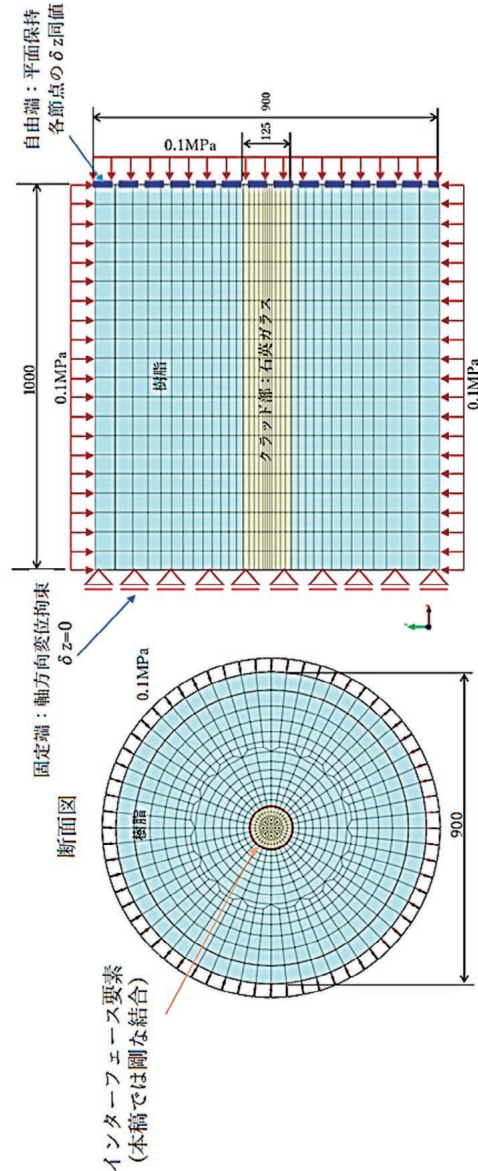


Fig.5 光ファイバの解析モデル (B モデル) (Analysis Model of Optical Fiber (B Model))

Table 5 ひずみの解析結果 (被覆径 0.90 mm, 圧力 0.1 MPa) (Strain Analysis Result for Coating Diameter 0.90mm, Pressure 0.1 MPa)

ひずみの方向	解析値 Aモデル	解析値 Bモデル
軸方向 ϵ_{zg} ($\mu\epsilon$)	20.0	-6.65
半径方向 ϵ_{rg} ($\mu\epsilon$)	-4.76	-0.134
周方向 $\epsilon_{\theta g}$ ($\mu\epsilon$)	-4.76	-0.134

0.1 MPa 刻みで最大 1.0 MPa まで昇圧し、その後段階的に降圧させた。なお、静水圧を調整した直後は、値が安定したことを確認してから計測を行った。試験装置は恒温槽内に設置し、温度を $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ に保った環境の中で試験を行った。

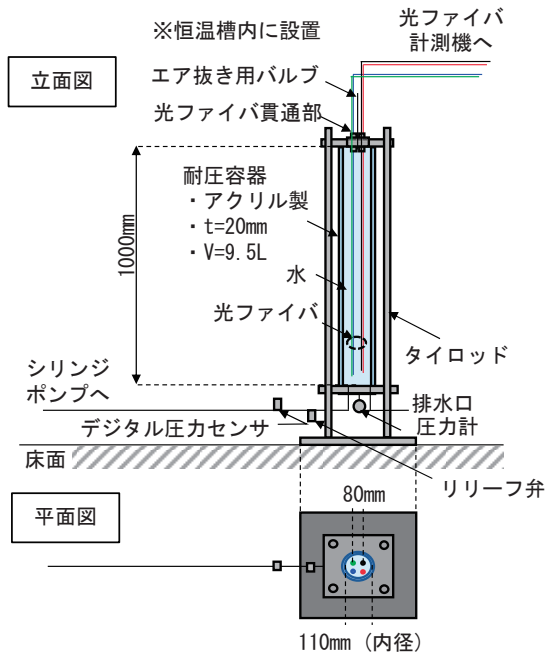


Fig.6 水圧式加圧試験装置の概要
(Overview of Hydrostatic Pressurization Test Equipment)

加圧試験には、Fig.1 に示した圧力センサ用の光ファイバに適した組合せ選定の参考とするため、被覆条件が異なる4種類の光ファイバ(被覆径 $\phi 0.15$ mm, $\phi 0.25$ mm, $\phi 0.50$ mm, $\phi 0.90$ mm ; クラッド径 0.125 mm 共通)を用いた。サイズや材質を Table 6 に、外観を Photo 1 に示す。4種類の光ファイバを同時に加圧し、耐圧容器の中央位置(光ファイバの端部から 500mm の位置)のデータで代表させて静水圧との関係を確認した。

2. 加圧試験の結果と考察

静水圧と周波数シフトの関係を Fig.7 に示す。4種類の光ファイバの周波数シフトが全て静水圧に比例する傾向が確認された。また、被覆径が太い程、静水圧に対する感度が高くなる傾向であった。最も静水圧への感度が高かった被覆径 $\phi 0.90$ mm の圧力感度係数(式(2)の C_p)は約 5.4 GHz/MPa であった。これらの結果は、静水圧が石英ガラスへ伝わる際に、被覆材の材料定数や厚さの影響を受けていることを示している。

被覆径 $\phi 0.90$ mm とほかの3種類の被覆径の圧力係数が大きく異なっていた理由として、被覆径が一定以上ないと圧力影響が顕在化しない、被覆の製造工程における硬化条件が表層と内部で異なり、表層の条件が強くなる薄い被覆では違いが表れにくかった、など、有限要素解析で線型と仮定していた材料特性が現実と異なっていた可能性などが考えられる。

被覆径 $\phi 0.90$ mm の光ファイバの水圧 0.1 MPa における周波数シフトの試験値をひずみに換算すると値は約 $-5 \mu\epsilon$ で、水圧による光ファイバのひずみを有限要素解析で算出した値とよく一致した (Table 7)。両者の一致は、静水圧による光ファイバ計測への圧力影響は、軸方向ひずみの影響が支配的

で、屈折率変化などその他の光学的影響が占める割合は小さいことを意味する。

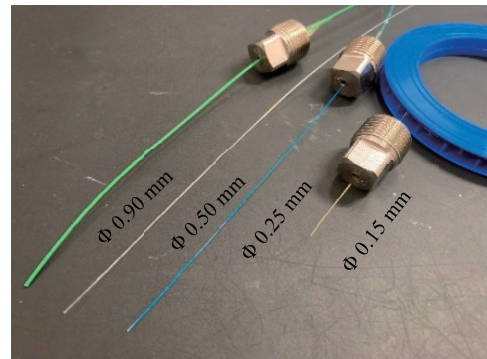


Photo 1 加圧試験で対象とした光ファイバ
(Optical Fiber used in Pressurization test)

Table 6 加圧試験で対象とした光ファイバの仕様
(Specification of the Optical Fiber Targeted in the Pressure test)

No.	外径 [mm]	クラッド径 [mm]	被覆厚 [mm]	被覆材質
1	0.15	0.125	0.0125	ポリイミド樹脂
2	0.25	0.125	0.0625	UV硬化樹脂
3	0.50	0.125	0.1375	UV硬化樹脂
4	0.90	0.125	0.3875	UV硬化樹脂

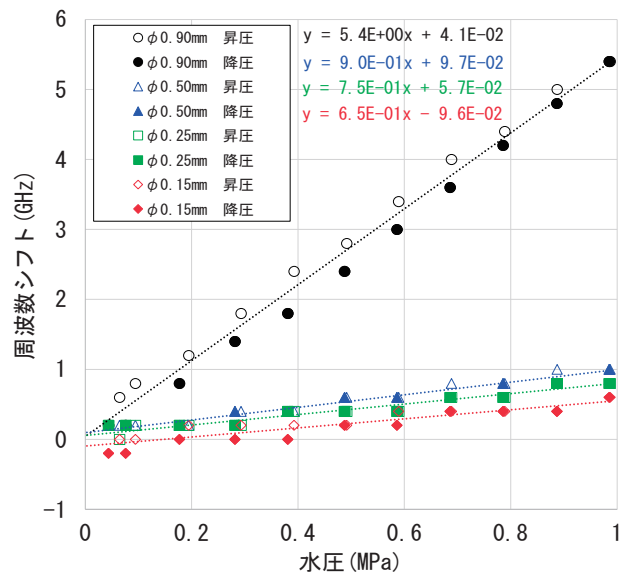


Fig.7 加圧試験結果 (静水圧と周波数シフトの関係)
(Pressurized Test Result (Relationship between Hydrostatic Pressure and Frequency Shift))

Table 7 試験値と解析値の比較

ひずみ ($\mu\epsilon$) の成分	光ファイバ被覆径: $\phi 0.90$ mm, 静水圧: 0.1 MPa	
	試験値	解析値
軸方向 ϵ_{zg}	-5	-6.65
効果	力学・光学	力学のみ

VI. おわりに

分布型光ファイバセンサに作用する圧力が計測値（周波数シフト）に与える影響について、加圧試験および有限要素解析を実施し、考察した。その結果、静水圧による周波数シフトへの影響は軸方向ひずみに起因した成分が支配的であった。この結果は、被覆が薄い光ファイバの圧力影響に対する理解を深める必要があるものの、2本の光ファイバの差をとって圧力成分を検知する分布型光ファイバセンサの実現性を強く示唆していると考えられる。

今回行った解析と加圧試験は、静水圧のみを光ファイバへ加えた場合の光ファイバへの影響に対するものである。圧力以外に温度のみ、ひずみだけに影響因子を絞った要素試験は別途行う必要がある。また、地層処分施設の坑道埋め戻し材が膨潤して生じた圧力の計測など、非等方的な圧力条件や、温度・ひずみ・圧力が同時に変化する条件での要素試験も別途行い、センサの特性を評価して、技術を確立していく必要がある。

謝 辞

本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業「令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業【JPJ007597】（地層処分施設閉鎖技術確証試験）」の成果の一部である。

参考文献

1) 保立ほか；光ファイバセンサ入門，光防災センシング振興協会，2021.

- 2) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター；令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書，2022.
- 3) 工藤恵栄；光物性基礎，オーム社，1996.
- 4) 水野洋輔，中村健太郎；光ファイバ中のブリルアン散乱とそのセンサ応用，超音波テクノ，Vol. 26, No.3, 2014.
- 5) K. Kishida et al. ; Study of Optical Fibers Strain-Temperature Sensitivities Using Hybrid Brillouin-Rayleigh System , Photonic Sensors, Vol. 4, No.1, 2014.
- 6) Luca Schenato, et al. ; Distributed optical fiber pressure sensors, Optical. fiber technology., Vol.58, 2020.
- 7) B. Budiansky et al., Pressure sensitivity of a clad optical fiber, 1979, pp.4085-4088.
- 8) A. Puzrin, C. Rabaiotti, et al. ; Distributed fiber optic strain sensing in pavements, Eidgenossisches Department fur Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt fur Strassen, Vol. 1654, 2019.
- 9) 藤原ほか；光ファイバによる圧力分布の計測技術の開発に向けた解析的検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，2022.9, CS12-30.
- 10) 平野ほか；分布型光ファイバ圧力センサの開発に向けた検討のための加圧試験，土木学会年次講演会講演概要集，2022.9, CS12-29.

Experimental Study for Development of Distributed Optical Fiber Pressure Sensor

Hiroyuki Hirano, Kotaro Fujiwara, Michio Imai, Masahiro Kawakubo¹⁾, Kyoko Ichikawa¹⁾²⁾ and Toshiaki Uda¹⁾

The frequency of scattered light generated in an optical fiber shifts due to the influence of temperature and strain on the optical fiber. Taking advantage of this phenomenon, distributed temperature sensors and strain sensors using the optical fiber itself as a sensible part have been developed, and are being applied and deployed for monitoring of structures. In recent years, among the various types of optical fiber measurements, measuring instruments focusing on Rayleigh scattered light that can obtain high brightness have become widespread, and measurement with high accuracy has come to be performed, and frequency shift factors other than temperature and strain have been searched. In this study, toward the development of a distributed optical fiber pressure sensor, we confirmed the effect of pressure on the distributed fiber optical sensor from both numerical analysis and a pressure test, and attempted to elucidate the mechanism of this effect.