

## 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

鹿島建設(株) 正会員 ○藤原航太郎 平野裕之 今井道男  
(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター 川久保政洋 市川恭子 宇田俊秋

### 1. はじめに

地層処分施設の坑道の埋め戻し材の施工では、自重や圧密による沈下によって施工後の坑道界面に隙間が生じる懸念に対して、埋め戻し材を構成するベントナイトの膨潤/自己シール性による閉塞が期待される。こうした隙間の閉塞状態の確認のために、埋め戻し材に生じる膨潤圧を網羅的に把握することが期待される。そこで筆者らは、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いる。本稿では、圧力環境下における光ファイバの挙動を構造解析によって把握し、圧力分布計測に関する実験値を再現するための最適な解析条件について検討した結果を報告する。

### 2. 光ファイバセンサによる圧力分布計測

#### 2.1 圧力分布計測の現状

分布型光ファイバセンサは、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・温度・圧力変化によって周波数シフト ( $\Delta\nu$ ) を起こす現象を利用している (式 (1))<sup>1)</sup>。  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta P$  はひずみ・温度・圧力の変化量を示す。また、  $C_\varepsilon$ ,  $C_T$ ,  $C_P$  はひずみ・温度・圧力の感度を示す係数であり、光ファイバ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。

$$\Delta\nu = C_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon + C_T \cdot \Delta T + C_P \cdot \Delta P \quad \text{式 (1)}$$

圧力感度  $C_P$  は、分布型光ファイバセンサの大幅な精度向上に伴い、圧力計測に関するいくつかの取組みが報告されつつあるなかで着目されてきたパラメータである<sup>1)</sup>。しかし、その計測の原理や仕組みは明らかになっておらず、同パラメータの定量化には課題が残されているのが現状である。

#### 2.2 圧力による光ファイバのひずみ変化

圧力が光ファイバに与える影響のひとつとして、周方向や軸方向にひずみが生じることが挙げられる。このひずみを理論的に求めるにあたり、図-1 に示すように、光ファイバケーブルをガラス部 (散乱光発生部) と被覆部に分けて考える。応力の平衡条件をもとにすれば、周面方向から加わる圧力  $p$  によって、ガラス部の軸方向に生じるひずみ  $\varepsilon_{zg}$  は式 (2) のような理論式として表現される<sup>2)</sup>。

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

式 (2) と表-1 に示す材料物性値を用いれば、圧力 0.1MPa 時にガラス部の軸方向に生じるひずみ  $\varepsilon_{zg}$  は、  $-6.6\mu$  (マイナスの符号は圧縮方向を表す) と算出できる。しかし、本理論式が成立するのは、  $f \ll 1$ ,  $E_p \ll E_g$  の条件下のみであり、その適用範囲は限られている。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の導出を試みた。

表-1 材料物性値

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

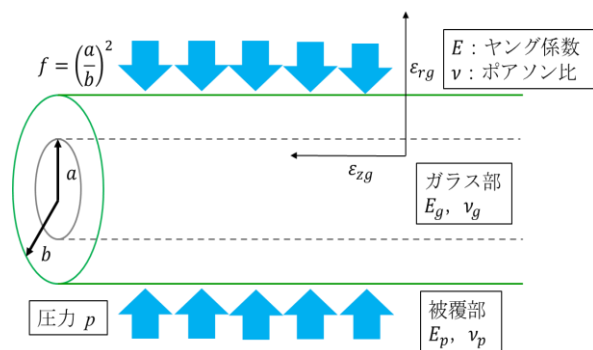


図-1 理論式の座標系およびパラメータの定義

キーワード モニタリング, 光ファイバ, 圧力計測, FEM

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 TEL 042-485-1111

### 3. 有限要素解析

#### 3.1 解析モデル

被覆部外径 0.9mm 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 1mm 分を表-2 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表-3 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ような境界条件とした。

解析条件の適切性を検討するために、加圧条件が異なる 2 種類のモデルで解析を行った。圧力が光ファイバの周面のみ作用するモデル（A モデル）、周面および軸断面に作用するモデル（B モデル）の 2 通りを設定した。B モデルの詳細を図-2 に示す。

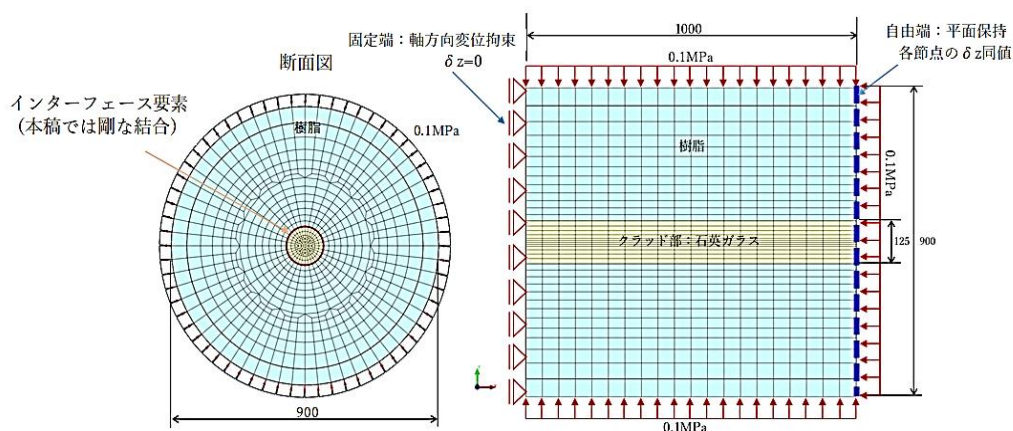


図-2 光ファイバの解析モデル（B モデル）

#### 3.2 解析結果

0.1MPa 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表-4 に示す。A モデルでは、自由端側から圧力が作用しないため引張ひずみが生じる結果になったと考えられる。0.1MPa の水圧環境下に光ファイバを設置した加圧試験<sup>3)</sup>によれば、約-6μ のひずみが得られた。そのため、B モデルの解析条件の方が、実際の挙動を再現するためには適切な条件と考えられる。

#### 4. まとめ

光ファイバによる圧力分布計測の実用化に向けて、構造解析によって圧力環境下における光ファイバの挙動の把握を試みた。異なる条件で解析を行い、実験と比較した結果、適した解析条件を明らかにすることができた。今回得られた解析条件に関する知見を踏まえ、圧力感度の高い光ファイバケーブルの設計や原位置での光ファイバケーブルの配置など、実用化に向けた更なる検討が望まれる。なお、圧力が光ファイバに与える影響として、本稿では“ひずみ”に着眼したが、“屈折率変化”も挙げられることを付記する。

**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係る技術開発事業【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) 岸田ほか, Study of Optical Fibers Strain-Temperature Sensitivities Using Hybrid Brillouin-Rayleigh System, 2014.
- 2) B.Budiansky ほか, Pressure sensitivity of a clad optical fiber, pp.4085-4088, 1979.
- 3) 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, 第77回土木学会年次講演会予稿, 2022 (投稿中)。

表-2 使用したモデル要素

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

表-3 インターフェース要素の剛性

	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

表-4 解析および試験の結果

	解析値 Aモデル	解析値 Bモデル
発生ひずみ(μ)	20.0	-6.7