

## 分布式光ファイバーセンサーによる静水圧環境下におけるひずみ測定

小暮哲也\*・堀内侑樹\*\*・木山 保\*<sup>3</sup>・西澤 修\*<sup>3</sup>・薛 自求\*<sup>3</sup>・松岡俊文\*\*

### 要 旨

任意の点でひずみ計測が可能な分布式光ファイバーセンシングを静水圧下で使用するため、常圧および静水圧下での光ファイバーのひずみ応答特性を調べた。まず、常圧下での金属平角棒の曲げ試験により、平角棒に接着した光ファイバーのブリルアン散乱光、レイリー散乱光を利用して得られる光ファイバーの線方向ひずみと、同時に測定された同一方向のひずみゲージによる値との関係を調べた。次に試料を封圧下におき、上記周波数シフトと平角棒の圧縮変形による光ファイバーの線方向ひずみとの関係を調べた。その結果、静水圧下の周波数シフトは被測定物の変形による光ファイバーの線方向変形に加え、静水圧で生じる光ファイバーの径方向変形の影響も受けることが定量的に明らかにされた。

光ファイバーの線方向ひずみを $\varepsilon_z$ 、径方向ひずみを $\varepsilon_r$ 、ブリルアンおよびレイリー散乱光の周波数シフトを $\Delta f$ とすると、 $\Delta f$ は $\Delta f = A\Delta\varepsilon_z + B\Delta\varepsilon_r$ の1次式で表された。したがって、静水圧下で得られた周波数シフトから光ファイバーの線方向ひずみを求めるには、光ファイバーの径方向変形に対する補正が必要である。さらに、分布式光ファイバーセンサーを用いて測定した静水圧下でのベレア砂岩の円柱供試体のひずみも、同様の補正によりひずみゲージによる結果に近い値を示した。以上の結果から、静水圧下における分布式光ファイバーセンサーによるひずみ測定手法の有効性が明らかになった。

**キーワード：**光ファイバー・分布式センサー・静水圧・ひずみ測定・ブリルアン散乱光・レイリー散乱光

### 1. はじめに

地層変形モニタリングは、対象層の深度にかかわらず重要である。深層については近年、二酸化炭素回収貯留(CCS)や、メタンハイドレート開発といった地下利用および地下資源開発にかかわる新事業について、数百メートル以深における地層変形問題が指摘されている。CCS事業については、CO<sub>2</sub>の圧入に伴い貯留層内の間隙水圧が上昇すると、圧入井周辺の地表面が隆起することがInSalahプロジェクトにおける観測により明らかになった(例えば、Onuma and Ohkawa, 2009; Rutqvist et al., 2010; Durucan et al., 2011)。地層の変形量が大きくなると地層に亀裂が生じる可能性があり、CO<sub>2</sub>の安全な貯留

に影響を与える。したがって、地層変形モニタリングが重要である。また、メタンハイドレート開発においては、メタンハイドレート胚胎層の圧力減少によるメタンハイドレートの分解が海底地すべりや地盤崩壊を引き起こす可能性が指摘されている(例えば、Ashi, 1999; Kvenvolden, 1999)。そのため、地すべりの発生を予測するために斜面の不安定化を示す兆候を観測する必要がある。海底でのひずみ測定方法の改良や長期モニタリングの必要性が強調されている(例えば、Urgeles et al., 2007)。一方、浅層における地層変形には、揚水などに伴う地盤沈下や傾斜地における地すべりなどがある。これらは人間の生活圏と重なり住居や社会インフラなどに与える影響が大きく、変形量を監視するためにモニタリ

2013年12月6日原稿受付；2014年9月26日受理

\* 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域  
(当時：(公財)地球環境産業技術研究機構 CO<sub>2</sub>貯留研究グループ)  
〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060

\*\* 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻  
〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1 棟

\*<sup>3</sup> (公財)地球環境産業技術研究機構 CO<sub>2</sub>貯留研究グループ  
〒619-0292 京都府木津川市木津川台 9-2

ングが欠かせない。

地層変形モニタリングをする際には、深度にかかわらず対象範囲を一括してモニタリングできることが望ましい。もし深度方向に連続的なモニタリングが可能であれば、どの深度で変形が生じても検知できる。すなわち、深度方向に種類の異なる地層(岩石)が分布する場合、それぞれの地層(岩石)のひずみを検知できるため、地層(岩石)ごとに異なる破壊ひずみに対する測定時点での累積ひずみの割合をモニタリングできる。これは地層(岩石)の安定性を評価する上で極めて重要である。したがって、対象範囲の局所的な変形を検知するために、深度方向に連続したモニタリングが望ましい。変位計の埋設により地層の変形を観測できるが、変位計の場合、埋設場所を事前に決める必要があるほか、作業の点から多数の変位計を埋設できないため、深度方向に連続的なモニタリングには適さない。

深度方向に連続的なデータ取得が可能なモニタリング手法として、石油・天然ガス開発分野などで発展してきた、分布式光ファイバーセンシング技術がある。光ファイバーは石油開発分野において、石油回収率増加のための水蒸気圧入や生産される石油の流量制御の際に、温度分布を数千mの坑井内で連続して把握する技術として使用されてきた(例えば、Brown et al., 2000)。また、近年、ケーシングの変形モニタリングにも光ファイバーが使用されている(例えば、Earles et al., 2011)。具体的には、ケーシング内部に設置された光ファイバーにより線方向ひずみの変化を測定し、ケーシングの変形を評価している。このように、分布式光ファイバーセンシングの対象は徐々に広がりつつあるが、光ファイバーによる地層変形モニタリングが行われた例はない。連続的なひずみ測定が可能である特徴を生かし地層のひずみ変化を測定できれば、上述した地下利用・資源開発・防災などの分野におけるモニタリング技術の向上に大きく貢献できる。ここでは従来行われてきた光ファイバーによるひずみ測定法の問題点を整理し、金属および岩石試料を用いた基礎的実験を行い、その結果をもとに光ファイバーによる地層変形モニタリングの可能性について議論する。

## 2. 光ファイバーセンシング技術

光ファイバーによりひずみ、温度およびひずみから換算される圧力を計測する技術(以下、光ファイバーセンシング技術と表記)は、点センサー方式と分布式センサー方式に分けられる。点センサー方式はあらかじめ光ファイバーの特定のポイントに加工を施すもので、特定ポイントにおいて高感度・高精度なデータ取得が可能である。この方式は分布式センサー方式に比べ広く普及しており、代表的なものにFBG(Fiber Bragg Grating)がある。FBG方式による温度およびひずみ測定の分解能はそれ

ぞれ0.0023°C(Ahmad et al., 2012)、10 nε(Liu et al., 2012)である。FBG方式により金属材料、トンネルや橋梁などの構造物、岩盤などのひずみが測定されている(例えば、Merzbacher et al., 1996; Maaskant et al., 1997; Liu et al., 2012)。

この方式では光ファイバー上に測定ポイントを加工し光が損失するため、1本の光ファイバーに加工できる最大測定ポイント数は5000~6000である(例えば、Earles et al., 2011)。ここで、使用する光ファイバーの最大測定ポイント数が6000で各ポイントを等間隔で配置すると仮定した場合、CCSでは貯留層の深度が通常1000~3000mであるため、地表から貯留層までをモニタリングする際にセンサーは2~6点/mの割合で加工される。データ欠損の可能性や、岩相ごとの変形量評価のためのFMI検層結果との比較を考慮すると、測定点はより多い方が望ましい。また、測定ポイントの加工に伴う費用は1カ所につき1万円以上であり(例えば、サイロード株式会社; レイサーモ工業株式会社)、低価格化が課題である。一方、分布式センサー方式では、FBG方式のように光ファイバーを加工せず、加工による光の減衰がないため、光の伝送距離が大きい(光が光ファイバーを通過中に伝送距離に応じて減衰することは、点・分布式センサー方式に共通)。そのため、FBGをはじめとする点センサー方式より長距離の測定が可能である。石油ガス生産や石油増進回収時の坑内温度分布の連続モニタリングでは分布式センサー方式が多く用いられ、DTS(Distributed Temperature Sensor)と呼ばれる(例えば、藤木ほか, 2010)。近年、分布式センサー用計測機器の発達により、温度測定の分解能は理想的な測定条件下で0.0096°C(NEUBREX,私信)と向上しており、FBGと同様に高精度な測定が可能となりつつある。したがって、点センサー方式の短所である、センサーの加工に伴うコストの高さや限定される測定点数を克服する手法として、分布式センサー方式が注目されている。

分布式センサー方式では、温度変化および光ファイバーの伸縮ひずみの変化を同時に測定可能である(例えば、保立, 2010)。しかし、これまでの結果は主として常圧下のものであり、特にひずみ測定については、現状の知見だけでは地下環境のモニタリングに使用できる保証がない。なぜなら、光ファイバーの断面は円形で、圧力を受けると線方向に加え径方向にもひずみが生じる。すなわち、光ファイバーの径方向ひずみの変化が測定に与える影響を把握する必要がある。したがって、分布式センサー方式を地層変形モニタリングに利用する場合、静水圧下での光ファイバーの特性を明らかにする必要がある。

## 3. 分布式光ファイバーセンサーによる測定原理

分布式光ファイバーセンシングとは、光ファイバーそ

のものをセンサーとして利用し、その光ファイバーに生じた局所的な温度およびひずみ変化の分布を測定する技術である。使用する光ファイバーには固定された測定点が存在せず、測定の都度決定される測定条件によりデータの空間解像度が変化する。しかし、ひとたび測定（モニタリング）を開始すると、測定条件を変更しない限り空間解像度は一定であるため、ある点からの後方散乱光の周波数シフトを測定し続ける。したがって、測定条件を決定した時点で光ファイバー内に測定点が設定されると考え、本研究では後方散乱光が発生する場所を「測定点」と定義する。このとき、データの空間解像度とは、測定点の間隔を指す。測定点の数や間隔は、光ファイバーの長さや測定機器の性能によって決まる。

測定には、光ファイバー内で発生する散乱光を利用する。光ファイバーの素線は、ガラス（熔融石英）からなる高屈折率のコアを低屈折率のクラッド層で包んでいる（Fig. 1）。コアに入射されたレーザー光パルスは光ファイバー内部で散乱される。散乱光には、ブリルアン、ラマン、レイリーの3種類がある。このなかでブリルアンおよびレイリー散乱光は、温度とひずみの変化量測定に利用できる（例えば、Johnston and Kaminow, 1968; Parker et al., 1997; Froggatt and Moore, 1998; 小山田ほか, 2007）。

ブリルアン散乱光はガラス分子の音響的振動により生じる。光ファイバーに光が入射すると、材料である二酸化ケイ素の熱振動（Fig. 2a）により微弱な音響的格子振動（音響フォノン）が発生する。この音響的格子振動（音響フォノン）と入射光との相互作用により発生する光の散乱をブリルアン散乱という（Fig. 2b）。入射光強度が強い場合、入射光および発生したストークス光との非線形結合により格子振動が強くコヒーレントに励振され、ストークス光の誘導散乱が発生するが、これを誘導ブリルアン散乱と呼ぶ（岡本, 1992）。光の強度は後方散乱のときに最も大きくなり、周波数は入射光に比べ約 10 GHz 低下する。周波数がずれる量（周波数シフト量）は光ファイバーの温度変化量と伸縮ひずみ量に比例するため、ブリルアン散乱光を用いた分布式光ファイバーセンシングが実現する（保立, 2010）。実際の測定では、光フ

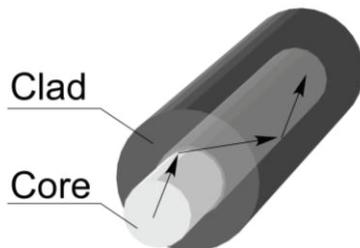


Fig. 1. Core and clad making up optical fiber. Incident and reflected light travels through the core with higher reflective index than those of the clad.

ファイバー上のある点で温度あるいはひずみが増加した場合、温度あるいはひずみ変化の前後でその点での散乱光の周波数も変化する。したがって、センサーとして使用する光ファイバーについて、周波数シフト量と温度あるいはひずみの変化量との関係を事前に明らかにしておけば、温度あるいはひずみ変化後に生じたブリルアン散乱光の周波数シフト量の情報から温度あるいはひずみ変化量を求められる。

一方、レイリー散乱光は、光ファイバーに光が入射した際、ガラス物質の屈折率のゆらぎ（ガラス密度のランダムな変化）が原因となり発生する。散乱光自体は周波数変化を伴わない。コヒーレントなレーザー光パルスを送って入射端で得られるレイリー散乱光強度の時間変化は、散乱光間の干渉効果が顕著な波形（時間一強度波形と呼ぶ）となる。分布式光ファイバーセンシングは、レイリー散乱光が持つ以下の性質を利用する。レイリー散乱光は、光ファイバー周囲の環境（ひずみあるいは温度）変化に伴いその時間一強度波形が変化する。環境変化後に入射光の周波数をシフトさせると、あるシフト量のときに環境変化前と同じ時間一強度波形が得られる。シフト量の大きさは、環境変化の大きさに依存する。したがって、散乱波の到達時刻から散乱光発生場所を同定すれば、そ

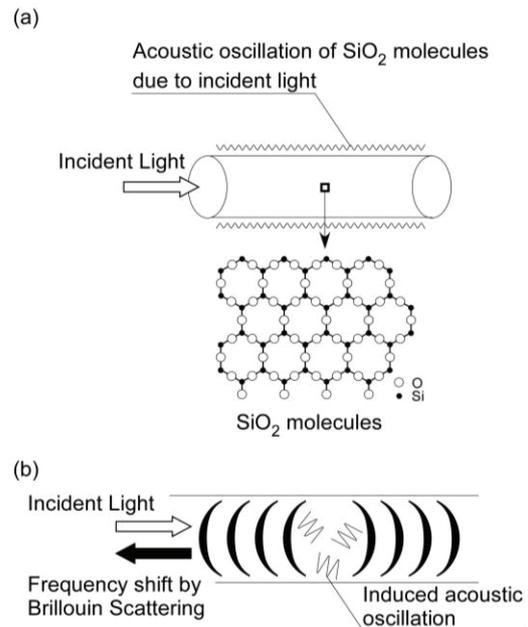


Fig. 2. Schematic illustrations of the frequency shift by the stimulated (or induced) Brillouin scattering. (a) Acoustic oscillations of  $\text{SiO}_2$  are induced by an injection of strong light beam (e.g. laser) into an optical fiber because of the effect of the electro-striction by the incident light. (b) The backward-scattered light contains frequency shifts caused by photon-phonon interactions; the Brillouin scattering.

の場所での環境変化量を評価できる (小山田ほか, 2007)。通常, 入射光の周波数は約 190 THz であり, 環境変化前後で同一の時間-強度波形を得るために調節される入射光の周波数シフト量は数 MHz である。

本研究では, ブリルアン散乱光およびレイリー散乱光を用いた測定をそれぞれ, ブリルアン測定, レイリー測定と呼ぶ。さらに, 文章中の「周波数シフト」とは, ブリルアン測定では環境変化に伴うブリルアン散乱光の周波数シフト, レイリー測定では, 環境変化に伴うレイリー散乱光の時間-強度波形を一致させるために調節された入射光の周波数シフトである。

上述したとおり, ブリルアンおよびレイリー測定では温度, ひずみ変化に応じて周波数シフトが生じるため, 以下のように表される:

$$\Delta f = f(T, \varepsilon) \quad (1)$$

ここに,  $\Delta f$  は周波数シフト,  $T$  は温度,  $\varepsilon$  は光ファイバーに生じるひずみである。ブリルアンおよびレイリー散乱光の周波数シフト量は, 温度とひずみの変化に比例することが知られている (例えば, Yamauchi, 2010)。ここで, 温度とひずみは独立に変化しそれぞれ周波数シフトを引き起こすため, 測定される周波数シフト量は, 温度およびひずみによるものの和となる。したがって, (1)式は具体的に以下のように表される:

$$\Delta f_p = \alpha_p \Delta T + \beta_p \Delta \varepsilon \quad (p = B \text{ or } R) \quad (2)$$

ここに,  $\Delta T$  は温度変化量,  $\Delta \varepsilon$  はひずみ変化量, そして  $\alpha$  および  $\beta$  はそれぞれ温度とひずみの感度係数である。感度係数は光ファイバーの製品毎に異なるため, 使用前に室内試験を行いそれぞれの感度係数を求める。また, 添え字  $p$  は  $B$  でブリルアン散乱光,  $R$  でレイリー散乱光を表す。したがって, 光ファイバー上の温度やひずみ変化量を算出するために, ブリルアンあるいはレイリー測定の周波数シフト量を測定する必要がある。

(2)式を用いて温度あるいはひずみを求める際, 片方が一定, あるいはその変化量が既知のとき, (2)式の変数は 1 つとなり, 生じた周波数シフトからその変数の変化量を算出できる。しかし, 温度とひずみが同時に変化し, かつどちらの変化量も不明な場合, ブリルアンあるいはレイリー測定のいずれかの周波数シフト量だけでは温度およびひずみの変化量を区別できない。そのため, ブリルアンおよびレイリー測定両方における周波数シフト量を測定し, 連立方程式を解き温度とひずみの変化量を計算する必要がある。

本研究では, ブリルアンおよびレイリー測定における周波数シフトを測定するためにニューブレクス(株)社製

の測定機 NBX-7020 を用いた。NBX-7020 は, ブリルアン散乱光用に PPP-BOTDA (Pulse Pre-Pump Brillouin optical Time Domain Analysis), レイリー散乱光用に TW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflectometry) と呼ばれる二つの解析システムを持つため, 一台でブリルアンおよびレイリー測定における周波数シフトを測定可能である。したがって, 温度とひずみが同時に変化した場合でも, 連立方程式を解き温度とひずみの変化量を計算できる。PPP-BOTDA および TW-COTDR の詳しい原理については, 岸田ほか (2013) を参照されたい。

NBX-7020 による測定点の最小間隔は 20 mm である。測定点の間隔を 20 mm とした場合, 使用する光ファイバーに沿って NBX-7020 の入射端から 20 mm 間隔で測定点が決まる。入射端からの距離は光の速度と反射時間から計算される。測定点の最小間隔は 20 mm であるが, 移動平均を取り 10 mm 間隔でデータを表示できる。NBX-7020 では, PPP-BOTDA および TW-COTDR とともに, 空間分解能や測定範囲 (=光ファイバー長) などの設定条件により一回当たりの測定の所要時間が変化する。本研究における測定の所要時間は PPP-BOTDA および TW-COTDR とともに 5 分弱であった。PPP-BOTDA および TW-COTDR は同時に動作せず, PPP-BOTDA 測定の終了と同時に TW-COTDR 測定が開始する。したがって, PPP-BOTDA と TW-COTDR を 1 セットとする 1 回の測定の所要時間は 10 分弱である。

#### 4. 分布式光ファイバーセンサーによる ひずみ測定試験

分布式光ファイバーセンシングによる静水圧環境下におけるひずみ測定として, 次の三種類の室内試験を行った。金属平角棒を対象とした(1)常圧下における試験, および(2)静水圧 (封圧)下における試験。(3)(2)の結果を踏まえた静水圧下における岩石のひずみ測定試験。以下に, それぞれの試験について述べる。

##### 4.1 常圧下におけるひずみ測定

###### 4.1.1 方法

アルミニウム (Al) および銅 (Cu) 製平角棒の片持ちはりに荷重を作用させてひずみを測定した (Fig. 3)。平角棒の大きさは, 幅 30 mm, 長さ 600 mm, 厚さ 3 mm である。おもりから 50 mm 離れた点から長軸に沿って, 光ファイバー素線をエポキシ系樹脂で接着した。また, おもりから 250 mm, 380 mm 離れた 2 点にひずみゲージ (共和電業製: KFG-5-120-C1-11N30C2, ゲージ長 5.0 mm, 基盤長 9.4 mm, ゲージ率 2.09) を接着した (Fig. 3)。おもりの重さを 200 g, 400 g, 600 g と変化させ, 平角棒に生じるひずみを光ファイバーとひずみゲージに

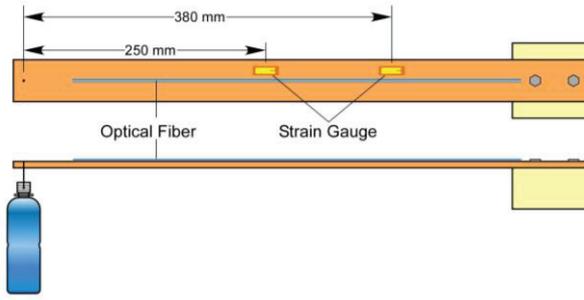


Fig.3. Schematic illustration of strain measurements under atmospheric pressure conditions. Optical fiber and strain gauges measure the strain of a cantilever beam made of metallic plates.

より測定した。

測定では、波長  $1.55 \mu\text{m}$  中心周波数  $193.1 \text{ THz}$  の光を  $5 \sim 30 \mu\text{sec}$  の間隔で光ファイバーに入射し、ブリルアンおよびレイリー測定における周波数シフトを測定した。ブリルアン散乱光の周波数帯は  $10.70 \sim 11.00 \text{ GHz}$ 、レイリー散乱光では  $193.50 \sim 193.65 \text{ THz}$  である。また、ひずみの距離分解能を  $20 \text{ mm}$  とした（移動平均をとるためデータ表示は  $10 \text{ mm}$  間隔）。この条件下では、ひずみの測定精度は  $1.6 \mu\epsilon$  である。なお、本測定に使用した光ファイバー（日立電線社製シングルモードファイバー：BBG-SM-BR）の感度係数は事前の室内試験により取得されており（Yamauchi, 2010）、ひずみ感度係数は Table 1 の通りである。ひずみ感度係数は、Yamauchi (2010) で BBG-SM-BR のブリルアン散乱光に対してのみ測定されたが、その後の試験により BBG-SM-BR のレ

Table 1. Sensitivity coefficient of the optical fiber for strain measurements used in this study.

Type	Strain Sensitivity	
	$\beta_B [\text{MHz}/\mu\epsilon]$	$\beta_R [\text{GHz}/\mu\epsilon]$
BGM-SM-BR	0.0507	-0.155
BBG-HF	0.0532	-0.162

イリー散乱光、また、後述する別の光ファイバー（BBG-HF）のブリルアンおよびレイリー散乱光についても測定された。

今回の試験は  $25^\circ\text{C}$  に保たれた室内で行われた。したがって、周波数シフトはひずみ変化のみによって引き起こされるため、ひずみ変化量は(2)式右辺の第二項のみで計算される：

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta f_p}{\beta_p} \quad (p = B \text{ or } R) \quad (3)$$

#### 4.1.2 結果

Fig. 4 にブリルアン測定、レイリー測定、およびひずみゲージによる結果を示す。ブリルアンおよびレイリー測定によるひずみは、周波数シフト量を(3)式に代入して計算された。本試験では周波数シフトの原因はひずみだけであるため、ブリルアンおよびレイリー測定からそれぞれ独立にひずみが求まる。ひずみゲージの結果は、ゲージ率により補正された値である。Fig. 4a, Fig. 4b はそれぞれアルミニウム、銅の平角棒について、おもりからの距離に対するひずみを示す。ブリルアンおよびレイ

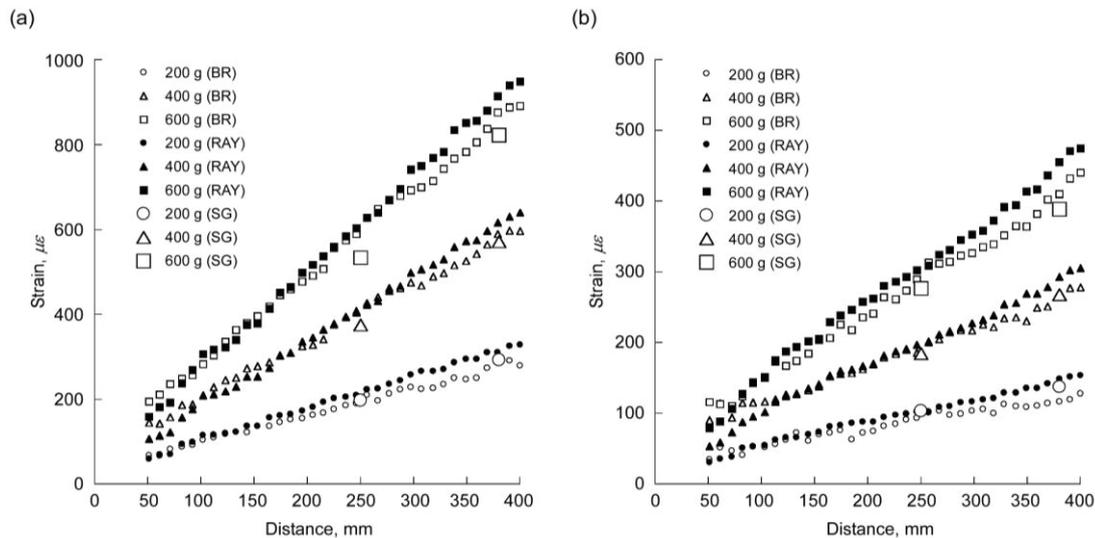


Fig.4. Results of strain measurements of (a) aluminum and (b) copper plate by Brillouin and Rayleigh scattering and strain gauges under atmospheric pressure conditions. Abbreviations denote as: BR for Brillouin; RAY for Rayleigh; SG for strain gauge. Optical fiber and strain gauge have almost the same accuracy for strain measurements.

リー測定とひずみゲージによる各値はいずれもほぼ等しい。したがって、分布式光ファイバーセンシングによる常圧下でのひずみ測定はひずみゲージとほぼ同精度であることが確認された。

今回使用したひずみゲージは基盤長が 9.4 mm であるため、連続的に隙間なくひずみゲージを敷き詰めれば、およそ 10 mm 間隔で連続的なひずみ測定が可能である。しかし、ひずみゲージによるそうした連続的な測定は、ひずみゲージの数が増えるほど作業面で困難になる。その点、分布式光ファイバーセンシングは測定距離と無関係に連続的なデータを容易に取得可能である。

## 4.2 静水圧下における金属のひずみ測定

### 4.2.1 方法

(2)式のひずみは本来テンソル量であるが、これまでは便宜的に光ファイバーの線方向だけを考えてきた。これは、常圧下における光ファイバーは被測定物の変形によって主に線方向にひずみが生じるためである。実際には線方向に加えポアソン比の大きさに応じた径方向ひずみも生じるが、既存研究では径方向ひずみが周波数シフトに及ぼす影響が評価されていない。地層の変形を測定する場合は、光ファイバー全体がセメント中に埋設されるなどして地層に固定される。この場合、光ファイバーには線方向の張力(または圧縮力)だけでなく、周囲からの圧力も作用する。このような封圧により生じる径方向ひずみが周波数シフトに与える影響を明らかにするため、金属の平角棒に静水圧を作用させ、分布式光ファイバーセンシングによりひずみを測定した。

測定には、アルミニウム、銅、ステンレス (SUS)、真鍮 (Brass) の 4 種類の平角棒を用いた。平角棒のサイズは 1) の試験で用いたものと同じである。それぞれの金属のヤング率および体積弾性率は Table 2 の通りである (国立天文台編, 2004)。

試験システムを Fig. 5 に示す。Fig. 3 の光ファイバーおよびひずみゲージを接着した平角棒を揮発性油を圧力媒体とする容器内に設置した (Fig. 5)。この他、平角棒のひずみ測定に関与しない余分な光ファイバー素線を束状に数回巻いたテンションフリーな光ファイバー

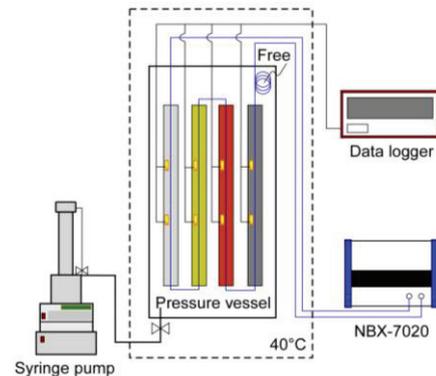


Fig.5. Schematic illustration of strain measurements of metallic plates under static pressure conditions. Optical fiber and strain gauges measure the strain of metallic plates induced by the changes of oil pressure.

(Free)も容器内に設置した。封圧は 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 MPa と段階的にシリンジポンプ (Teledyne ISCO 社製: 500D) で制御した。試験は 30°C に保たれた恒温室内で行われ、圧力容器自体も加温用ラバーヒーターにより 30°C に保持された。

測定の時間間隔はひずみゲージが 1 分、光ファイバーが 10 分である。封圧を 1 MPa に上昇させ数時間放置したあと、平角棒のひずみゲージの値が 30 分以上変化しないことを確かめ、その際のひずみゲージの値、ブリルアン、レイリーの各周波数を初期値とした。以降、順次昇圧し、同様の手順で各封圧におけるひずみと周波数シフトを測定した。なお、ひずみの距離分解能および測定精度は、常圧下における試験と同様にそれぞれ 20 mm (データ表示は 10 mm 間隔) および 1.6  $\mu\epsilon$  である。

### 4.2.2 封圧を考慮しない場合の結果

各封圧でのブリルアンおよびレイリー測定における周波数シフトを、温度一定条件のもとに(3)式によりひずみに換算する。Fig. 6 に、封圧 1 MPa 時のひずみを 0 として封圧の大きさに応じたひずみ変化を示す。符号は正で膨張を、負で圧縮を表す。Fig. 6 には、圧力  $P$  と体積弾性率  $K$  から計算される平角棒のひずみ (Calculated), およびひずみゲージ (Strain gauge) と光ファイバーのブリルアン (Brillouin) とレイリー散乱光 (Rayleigh) による測定値をプロットした。静水圧環境下における被測定物の変形は、以下の関係で表される (例えば、山口・西松, 1991) :

$$\Delta P = K \Delta \epsilon_v \quad (4)$$

Table 2. Young's modulus, Poisson ratio and bulk modulus of the metallic plates used in this study.

	Al	Cu	SUS	Brass	Quartz
Young's modulus [GPa]	70.3	129.8	209*	100.6	73.1
Poisson's ratio	0.345	0.343	0.29*	0.35	0.17
Bulk modulus, $K$ [GPa]	75.5	137.8	168*	111.8	36.9
$K/K_{\text{Quartz}}$	2.05	3.73	4.55	3.03	1.00

\*Mean value of iron (steel).

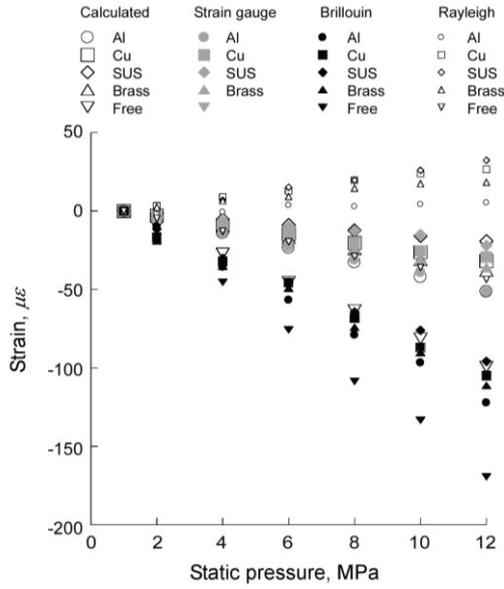


Fig.6. Results of strain measurements of metallic plates under static pressure conditions. There is no “Free” data for strain gauge because no strain gauges can be applied on optical fiber. The results obtained by fiber optic measurements do not correspond to calculated values, whereas those obtained by the strain gauges do well.

ここに、 $\Delta P$  は圧力変化量、 $K$  は被測定物の体積弾性率、 $\Delta \epsilon_v$  は被測定物の体積ひずみ変化量である。等方・均質な弾性体の各軸方向ひずみの大きさは、(4)式中の $\Delta \epsilon_v$  の

1/3 であると仮定し(例えば、山口・西松, 1991), 試験で得られる平角棒のひずみを以下の式により計算した:

$$\Delta \epsilon_z = \frac{\Delta P}{3K} \tag{5}$$

ここに、 $\Delta \epsilon_z$  は試料長軸方向のひずみ変化量である。 $K$  には Table 2 中の値を用いた。Fig. 6 からは、ひずみの計算値とひずみゲージによる測定値がほぼ等しく、封圧の増加に伴い試料が圧縮される様子がわかる。一方、光ファイバーの周波数シフトから計算されたひずみは、ブリルアンおよびレイリー測定とも計算値と大きく異なる。ブリルアン測定では計算値やひずみゲージによる測定値に比べひずみ量が大きく、またレイリー測定による結果は、封圧増加にもかかわらず金属の膨張を示した。したがって、静水圧下において光ファイバーでひずみを測定する場合には、測定される周波数シフト量を常圧のひずみ感度係数で除するだけでは不十分である。

#### 4.2.3 圧力変化時の周波数シフト量からひずみへの換算

圧力変化時に測定された周波数シフト量を光ファイバーの線方向ひずみに換算するため、換算式の導出を試みた。Table 3 に、実際に測定された周波数シフト量  $f_{p-meas}$ 、(5)式で計算されるひずみが測定された場合に生じる周波数シフト  $f_{p-cal}$  ((3)式より計算), そして両者の差  $f_{p-cal} - f_{p-meas}$  を示す。Fig. 7 は  $f_{p-cal}$  に対する  $f_{p-cal} - f_{p-meas}$  を表す。それぞれのプロットに対し 0 を通る直線で近似し、直線の傾き  $(f_{p-cal} - f_{p-meas}) / f_{p-cal}$  を求めた。その傾きを、光ファイバーの素材である熔融石英と各金属の体積弾性率

Table 3. Measured and theoretical values of frequency shift under the change of static pressure, and the difference between the two.

Differential pressure, MPa	Measured frequency shift, $f_{p-meas}$					Theoretical frequency shift, $f_{p-cal}$					$f_{p-cal} - f_{p-meas}$				
	Al	Cu	SUS	Brass	Free	Al	Cu	SUS	Brass	Free	Al	Cu	SUS	Brass	Free
<i>Brillouin</i> [MHz]															
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-0.50	-0.86	-0.58	-0.96	-0.81	-0.23	-0.15	-0.09	-0.18	-0.48	0.26	0.71	0.49	0.78	0.33
3	-1.81	-1.62	-1.53	-1.79	-2.30	-0.70	-0.46	-0.28	-0.55	-1.44	1.11	1.16	1.26	1.23	0.86
5	-2.88	-2.31	-2.30	-2.50	-3.84	-1.17	-0.77	-0.46	-0.92	-2.40	1.70	1.54	1.84	1.58	1.44
7	-4.00	-3.45	-3.26	-3.76	-5.50	-1.64	-1.08	-0.64	-1.29	-3.36	2.36	2.37	2.62	2.47	2.14
9	-4.90	-4.41	-3.85	-4.58	-6.76	-2.11	-1.39	-0.83	-1.66	-4.33	2.79	3.01	3.02	2.92	2.44
11	-6.19	-5.31	-4.86	-5.64	-8.58	-2.58	-1.70	-1.01	-2.03	-5.29	3.61	3.61	3.85	3.61	3.30
<i>Rayleigh</i> [GHz]															
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.21	-0.51	-0.23	-0.39	0.75	0.72	0.47	0.28	0.56	1.46	0.50	0.98	0.51	0.95	0.71
3	0.10	-1.36	-1.06	-1.02	2.00	2.15	1.41	0.84	1.69	4.39	2.05	2.77	1.90	2.71	2.39
5	-0.57	-1.98	-2.33	-1.42	3.03	3.58	2.35	1.40	2.81	7.32	4.15	4.34	3.73	4.23	4.29
7	-0.44	-3.06	-3.06	-2.26	4.50	5.01	3.30	1.96	3.93	10.24	5.44	6.35	5.02	6.19	5.74
9	-0.66	-3.70	-4.01	-2.68	5.60	6.44	4.24	2.52	5.06	13.17	7.10	7.94	6.53	7.74	7.58
11	-0.81	-4.12	-5.02	-2.86	6.75	7.87	5.18	3.08	6.18	16.10	8.68	9.30	8.09	9.05	9.35

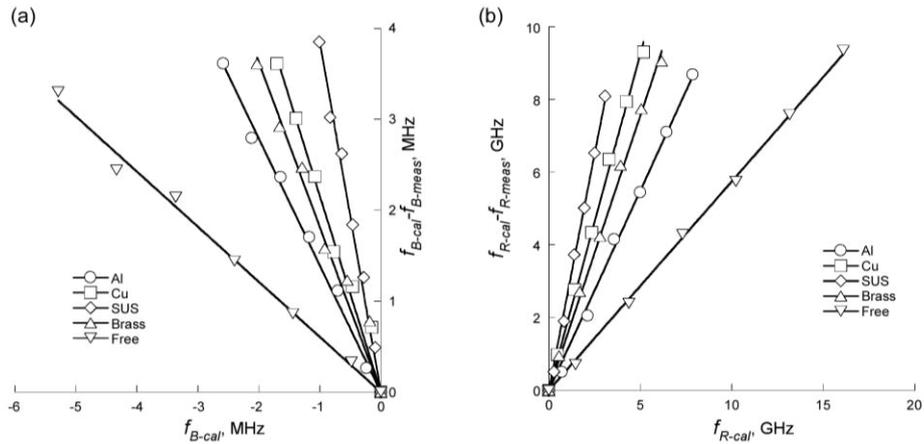


Fig.7. Relationship between  $f_{p-cal}$  and  $f_{p-cal}-f_{p-meas}$  for (a) Brillouin and (b) Rayleigh scattering. Inclination increases in order of Free, Al, Brass, Cu and SUS for both graphs.

の比  $K/K_{Quartz}$  (Table 2) に対して Fig. 8 にプロットした。Fig. 8 より,  $(f_{p-cal}-f_{p-meas})/f_{p-cal}$  と  $K/K_{Quartz}$  の間に強い相関が認められた。この関係を表す近似式を検討したところ, べき関数により良く近似された。周波数シフト量の比について整理すると, 以下の式で表される:

$$\frac{f_{B-meas}}{f_{B-cal}} = 1 + 0.53 \left( \frac{K}{K_{Quartz}} \right)^{1.32} \quad (6)$$

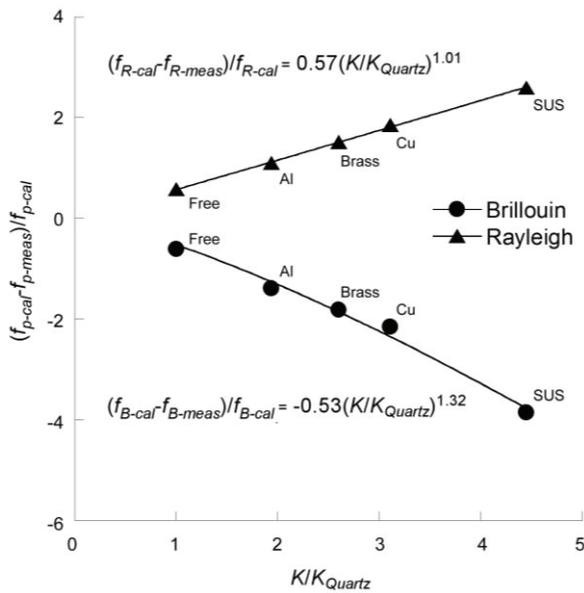


Fig.8. Relationship between  $K/K_{Quartz}$  and  $(f_{p-cal}-f_{p-meas})/f_{p-cal}$ . They have a strong correlation with each other. The coefficient in the equations have different sign: plus for Rayleigh and minus for Brillouin scattering.

$$\frac{f_{R-meas}}{f_{R-cal}} = 1 - 0.57 \left( \frac{K}{K_{Quartz}} \right)^{1.01} \quad (7)$$

(6), (7)式を用いて  $f_{p-cal}$  を求め, 感度係数で除してひずみに換算した結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 では, アルミニウム, 銅, ステンレス, 真鍮についてひずみゲージ, ブリルアンおよびレイリー測定で得られたひずみの大きさが計算値とほぼ等しい。したがって, 今回の試験で用

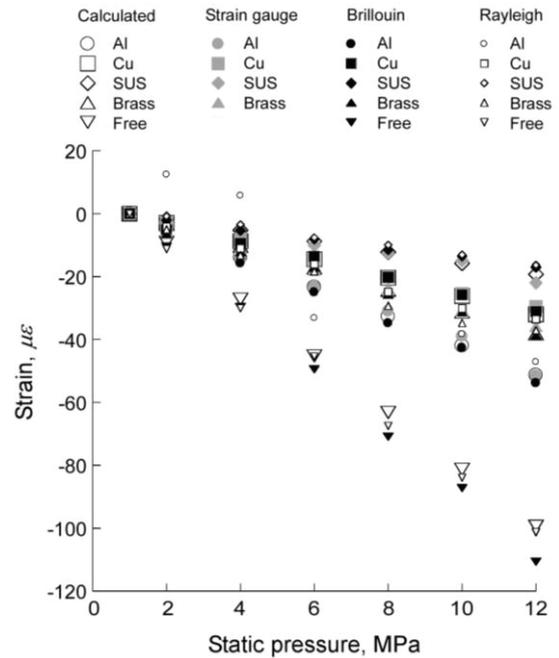


Fig.9. Comparison of strains which were measured by strain gauges, calculated by the equations (6) and (7) and theoretical value. Corrected values of "Brillouin" and "Rayleigh" correspond well to those of "Calculated" and "Strain gauge".

いた平角棒については、(6)、(7)式を用いれば静水圧下においても光ファイバーの線方向のひずみ変化を正確に評価できる。(6)、(7)式は今回の試験で測定された周波数シフト量を計算値に換算するための経験式であるため、測定対象物の大きさが変化した場合など、他の試験時に適用可能とは限らない。

(6)、(7)式では、 $K/K_{Quartz}$ の値が小さいほど、すなわち光ファイバーによる測定対象が熔融石英に比べ小さい体積弾性率を持つ場合には、 $f_{p-meas}$ が $f_{p-cal}$ に近づく。このとき、周波数シフトの測定値をそのままひずみ感度係数で除し、ほぼ正確なひずみの値を計算できる。一方、被測定物が金属など、熔融石英より大きい体積弾性率を持つ物質のとき、 $f_{p-meas}$ と $f_{p-cal}$ は異なるため、 $f_{p-meas}$ をそのままひずみに換算しても線方向ひずみを正しく評価できない。そのため、(6)、(7)式を用いて $f_{p-cal}$ を計算する必要がある。

(6)、(7)式より、静水圧環境下で測定される周波数シフトには、光ファイバーおよび被測定物の体積弾性率との間に強い相関が示された。これは、静水圧環境下では、被測定物の変形によって生じる光ファイバーの線方向ひずみに加え、静水圧によって生じる光ファイバーの径方向ひずみも周波数シフトを引き起こすことを示唆する。

#### 4.2.4 光ファイバーの径方向ひずみによる周波数シフト

以上のように、静水圧環境下では周波数シフト量をひずみ感度係数で除すのみでは光ファイバーで計測されるひずみに換算できない。以下でこの原因を考える。

4.1における常圧下での金属平角棒の曲げ試験では、平角棒の変形に対応した応力が光ファイバーの線方向に加えられたため、光ファイバーに線方向ひずみが生じた。4.2の試験では、封圧により光ファイバーは線方向だけでなく径方向にも変形し、径方向ひずみが生じる。すなわち、光ファイバーは試料の変形による線方向の応力(封圧下では圧縮力)と、封圧による径方向の圧縮力を受けて変形し、これらの変形が周波数シフトとして観測さ

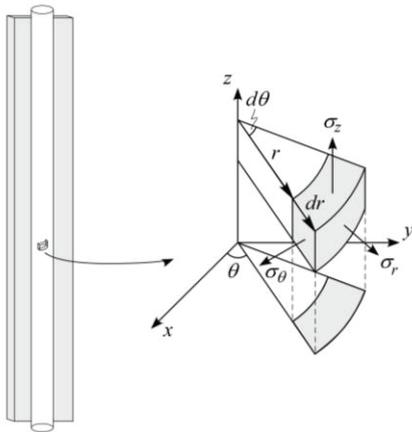


Fig.10. Principal stress generated on a columnar isotropic elastic medium.

れる。

光ファイバーは被測定物に接着しているため、光ファイバーの $\varepsilon_r$ は被測定物のひずみに等しく、(5)式で表される。いっぽう光ファイバーの $\varepsilon_r$ は光ファイバー自身の応力-ひずみの関係から求められる。Fig. 10に示す円柱座標系を用いると、軸対称変形に対して以下の関係が成り立つ：

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E} \{ \sigma_i - \nu(\sigma_j + \sigma_k) \} \quad (i, j, k = r, \theta, z) \quad (8)$$

ここに、 $E$ 、 $\nu$ はそれぞれ、光ファイバーコア(石英)のヤング率、ポアソン比である。軸方向応力 $\sigma_z$ 、径方向応力 $\sigma_r$ 、周方向応力 $\sigma_\theta$ は、静水圧下であるため $\sigma_r = \sigma_\theta (=P)$ となり、径方向ひずみ $\varepsilon_r$ は次式で表される：

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \{ \sigma_r - \nu(\sigma_r + \sigma_z) \} = \frac{1}{E} \{ (1-\nu)\sigma_r - \nu\sigma_z \} \quad (9)$$

ここで、 $E$ 、 $\nu$ 、 $\sigma_r (=P)$ は既知であるため、 $\varepsilon_r$ を計算するためには、被測定物の変形により光ファイバーに作用する応力 $\sigma_z$ を求める必要がある。すなわち、(5)式で計算される光ファイバーの線方向ひずみに対応して光ファイバー内に発生する軸応力である。これは次の直交座標系に対する応力-ひずみ関係式によって求められる：

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ここに、 $\sigma_{ii}$ は軸方向応力(主応力)、 $\tau_{ij}$ はせん断応力、 $\varepsilon_{ii}$ は線方向ひずみ、 $\gamma$ はせん断ひずみである。静水圧下では直線状の光ファイバー中にせん断応力は作用しないので、 $\tau_{ij}=0$ となる。 $z$ 軸に直交する方向はどの方向も等価であるため $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_r (= \varepsilon_\theta)$ となる。軸方向応力 $\sigma_z$ は次式で表される：

$$\sigma_z = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left( \frac{2\nu}{1-\nu} \varepsilon_r + \varepsilon_z \right) \quad (11)$$

Table 4. Axial and radial strain generated on the optical fiber adhered to a metallic plate during the increase of static pressure. Positive sign denotes compressive strain.  $\varepsilon_z$  is calculated by the equation (5), then,  $\varepsilon_r$  is calculated by substituting the value of  $\varepsilon_z$  into the equation (12).

Differential pressure, MPa	Strain, $\mu\varepsilon$									
	Al		Cu		SUS		Brass		Quartz	
$\sigma_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-4.4	-9.8	-2.4	-10.2	-2.0	-10.2	-3.0	-10.1	-9.0	-9.0
3	-13.2	-29.4	-7.3	-30.5	-6.0	-30.7	-8.9	-30.2	-27.1	-27.1
5	-22.1	-49.1	-12.1	-50.8	-9.9	-51.1	-14.9	-50.3	-45.2	-45.1
7	-30.9	-68.7	-16.9	-71.1	-13.9	-71.6	-20.9	-70.4	-63.2	-63.2
9	-39.7	-88.3	-21.8	-91.4	-17.9	-92.0	-26.8	-90.5	-81.3	-81.3
11	-48.6	-107.9	-26.6	-111.7	-21.8	-112.5	-32.8	-110.6	-99.4	-99.3

(11)式を(9)式に代入し、光ファイバーの $\varepsilon_r$ を表す次式を得る：

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(1+\nu)(1-2\nu)\sigma_r - \nu\varepsilon_z \quad (12)$$

Table 4に各金属の体積弾性率と熔融石英のヤング率とポアソン比を用い、(5)および(12)式により求められた $\varepsilon_z$ と $\varepsilon_r$ を示す。熔融石英のデータは平角棒に拘束されない区間の光ファイバーより得た。平角棒に貼付された光

ファイバーでは、線方向ひずみが平角棒により制限されるため、 $\varepsilon_z$ が $\varepsilon_r$ より小さい。 $\varepsilon_z$ と $\varepsilon_r$ の差は、光ファイバー(熔融石英)と被測定物の体積弾性率比  $K/K_{Quartz}$  が大きいほど大きくなる。すなわち、体積弾性率が最も大きいSUSで最大となり、体積弾性率が最も小さいAlで最小となる。

同様に、(12)式の $\varepsilon_z$ にひずみゲージの実測値を代入し、求めた $\varepsilon_r$ をTable 5に示す。光ファイバーにはひずみゲージを貼付できないため、熔融石英のひずみは記載されない。Table 5中の $\varepsilon_z$ はTable 4中の値とほぼ等しく、また、(12)式により計算された $\varepsilon_r$ 同士もほぼ等しい。

Table 5. Axial and radial strain generated on the optical fiber adhered to a metallic plate during the increase of static pressure. Positive sign denotes compressive strain.  $\varepsilon_z$  is measured by strain gauges, then,  $\varepsilon_r$  is calculated by substituting the value of  $\varepsilon_z$  into the equation (12). There is no data for fused silica because strain gauges cannot be adhered on optical fiber.

Differential pressure, MPa	Strain, $\mu\varepsilon$							
	Al		Cu		SUS		Brass	
$\sigma_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-4.5	-9.8	-3	-10.1	-1.5	-10.3	-4	-9.9
3	-14.5	-29.2	-8.5	-30.2	-6.5	-30.6	-11	-29.8
5	-23	-48.9	-14.5	-50.4	-10	-51.1	-18	-49.8
7	-31	-68.7	-20	-70.5	-12.5	-71.8	-24	-69.9
9	-39	-88.4	-25.5	-90.7	-15	-92.5	-31	-89.8
11	-51.5	-107.4	-29.5	-111.2	-22	-112.5	-36	-110.1

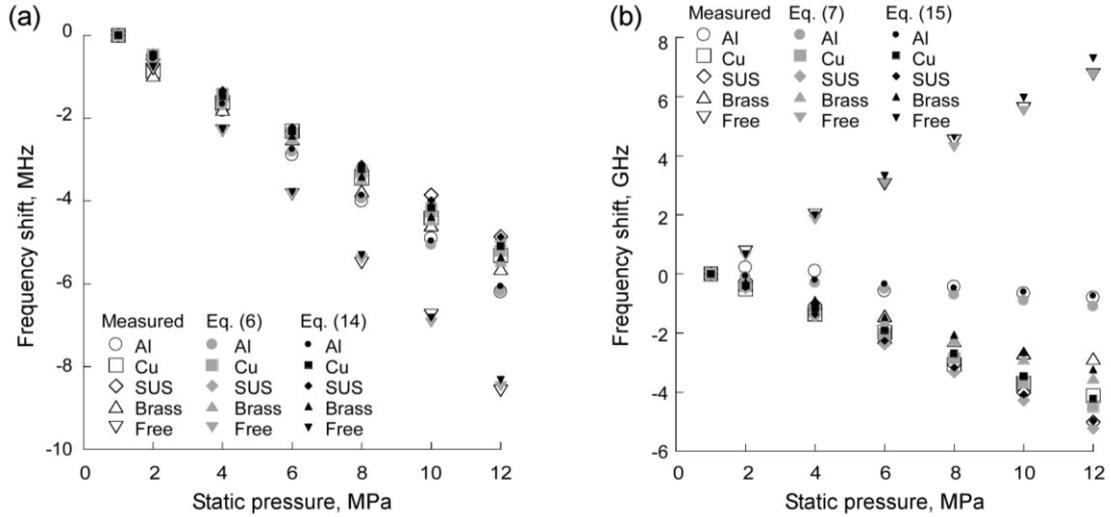


Fig.11. Comparison between measured and calculated value of frequency shift. They have strong correlation with each other. Calculated value was derived from the equations (14) for (a) Brillouin scattering and (15) for (b) Rayleigh scattering.

後方散乱光の周波数シフト量は、温度やひずみの変化量に比例する (例えば Yamauchi, 2010)。このうち、ひずみを線方向と径方向に分けると、測定される周波数シフト量は、それぞれのひずみがもたらす周波数シフト量の和となると仮定する。すると、 $\varepsilon_z$ 、 $\varepsilon_r$  と周波数シフトの関係は、次の線形式で表示される：

$$\Delta f_i = A_i \Delta \varepsilon_z + B_i \Delta \varepsilon_r \quad (i = B \text{ or } R) \quad (13)$$

ここに、 $A_i$  および  $B_i$  はひずみ感度係数であり、 $A_i$  を線方

向ひずみ感度係数、 $B_i$  を径方向ひずみ感度係数とする。ここでは、Table 5 のひずみデータおよび Table 3 の周波数シフトのデータ ( $f_{p-meas}$ ) を用いて、回帰分析により  $A_i$  および  $B_i$  の最適値を求めた。その結果、ブリルアン測定では  $A_B = 0.0497 \text{ MHz}/\mu\varepsilon$ 、 $B_B = 0.0346 \text{ MHz}/\mu\varepsilon$  (相関係数: 0.999, 標準誤差:  $A_B = 0.0043$ ;  $B_B = 0.0014$ )、レイリー測定では  $A_R = -0.130 \text{ GHz}/\mu\varepsilon$ 、 $B_R = 0.0707 \text{ GHz}/\mu\varepsilon$  (相関係数: 0.989, 標準誤差:  $A_R = 0.0096$ ;  $B_R = 0.0032$ ) を得た。すなわち、ブリルアンおよびレイリー測定における周波数シフトは以下の式で表される：

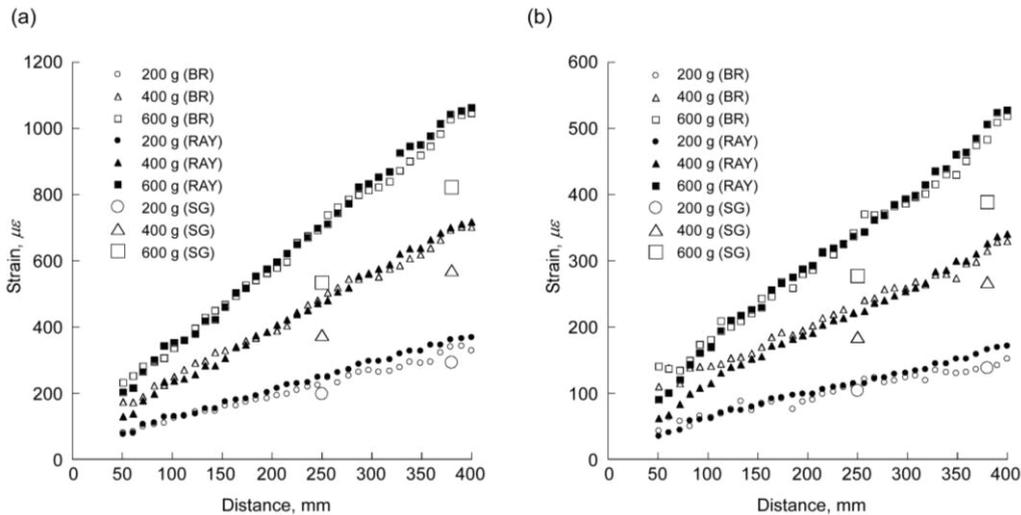


Fig.12. Results of strain measurements of (a) aluminum and (b) copper plate by Brillouin and Rayleigh scattering and strain gauges under atmospheric pressure conditions. Abbreviations follow those in Fig. 4. Strains were calculated by Eq. (13) with new sensitivity coefficient of strain obtained by this study for Brillouin and Rayleigh scattering. Results from both scatterings are almost the same with each other, however, those from optical fiber and strain gauge are not.

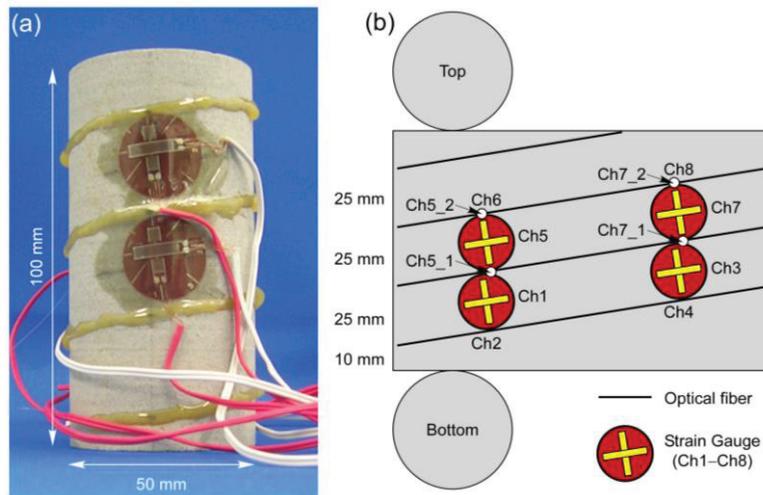


Fig.13. Adhesion of optical fiber and strain gauges to a core of Berea sandstone. (a) A photo and (b) a development view. Symbols Ch5\_1, Ch5\_2, Ch7\_1 and Ch7\_2 show measuring points of optical fiber which are closest to Ch5 and Ch7.

$$\Delta f_B = 0.0497\Delta\varepsilon_z + 0.0346\Delta\varepsilon_r \quad (14)$$

$$\Delta f_R = -0.130\Delta\varepsilon_z + 0.0707\Delta\varepsilon_r \quad (15)$$

(14), (15)式中の $\Delta\varepsilon_z$ と $\Delta\varepsilon_r$ に Table 4 のひずみデータを代入し、得られた周波数シフト量の計算値を、測定値および(6), (7)式による計算値とともに Fig. 11 にプロットした。Fig. 11 は、(14), (15)式が、封圧作用下において測定された周波数シフトをよく再現することを示す。すなわち、封圧作用下における周波数シフトは光ファイバーの軸および径方向ひずみの大きさに支配される。

(6), (7)式は常圧下で測定された感度係数を用いて静水圧下における周波数シフト量を補正する経験式であり、被測定物の体積弾性率が必要である。一方 (14), (15)式は光ファイバー固有の性質を表す関係式である。測定に用いる光ファイバーの感度係数を決めておけば、いかなる条件でもひずみを求められる。そこで、(14), (15)式を用いて、4.1 で測定された常圧下のひずみ (Fig. 4) を再計算する。(14), (15)式中の $\varepsilon_r$ は(12)式により表されるが、常圧下では(12)式の第一項が 0 となるため、 $\varepsilon_r = -\nu\varepsilon_z$ となる。これを(13)式に代入すると、周波数シフト量は $\varepsilon_z$ をパラメータとする次式で表される：

$$\Delta f_p = (A_p - \nu B_p) \Delta\varepsilon_z \quad (p = B \text{ or } R) \quad (16)$$

そこで、 $\Delta f_p$  を  $(A_p - \nu B_p)$  で除し  $\Delta\varepsilon_z$  を計算した。結果を Fig.12 に示す。Fig. 12 では Fig. 4 に比べブリルアンとレイリー測定のプロットがお互いにより近接した。しかし、Fig. 12 では光ファイバーとひずみゲージの測定結果の差が Fig. 4 より大きい。これは、今回の実験では光フ

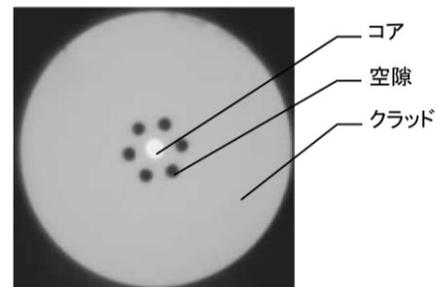
ァイバーの周囲が接着剤に覆われており、接着剤が光ファイバーの変形に影響した可能性がある。また、新たに感度係数を取得した試験では、封圧変化で生じる小さなひずみをもとに係数を決定した。したがって、大きなひずみを与える実験により、さらに正確な感度係数を得られるかもしれない。このように、今回得られた感度係数の信頼性についてさらなる検証が必要である。

今回の実験および結果解析により、 $\varepsilon_r$ による周波数シフトが明らかになった。したがって、周波数シフトのパラメータは(2)式で「温度とひずみ」であったが、正しくは、「温度および線・径方向ひずみ」である。しかし、(12)式の通り $\varepsilon_r$ は $\varepsilon_z$ で表されるため、実際のパラメータは「温度と線(あるいは径)方向ひずみ」である。

### 4.3 静水圧下における岩石のひずみ測定

#### 4.3.1 方法

4.2 で議論した静水圧環境下における光ファイバーセンシングを地層のひずみ測定に応用できるか検討するため、室内試験により岩石試料のひずみ測定を試みた。用いた岩石は直径 50 mm、長さ 100 mm のベレア砂岩である (Fig. 13a)。このベレア砂岩は明瞭な堆積構造をも



(「日立電線グループ光ファイバ製品総合カタログ」に加筆・修正)

Fig.14. A cross-sectional view of holey fiber (BBG-HF).

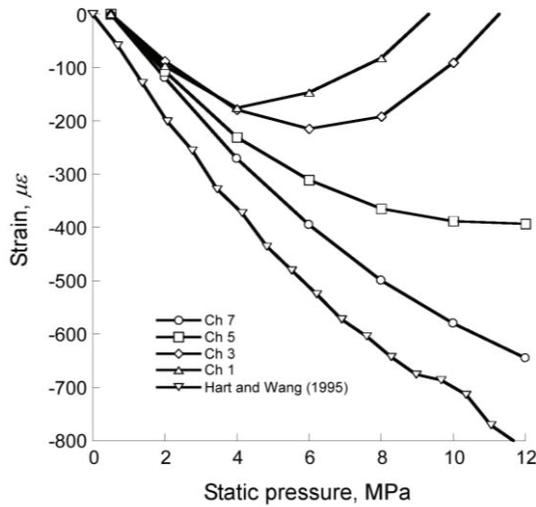


Fig.15. Results of strain measurements for Berea sandstone by strain gauges. Strains vary widely with channels. Weakly-bonded strain gauges measure strain incorrectly except Ch7: strain of Berea sandstone measured by Hart and Wang (1995) almost corresponds with that of Ch7.

つが、今回の試験には試料軸が層理面に垂直な試料を用いた。試験前にベレア砂岩を超音波洗浄し、50°Cで1週間炉乾燥させた。試料の乾燥後、屈曲に対するエネルギー損失がきわめて小さい光ファイバー（日立電線社製超低屈曲損失ホーリーファイバー：BBG-HF）とクロスタイプひずみゲージ（共和電業製：KFG-10-120-D16-11L1M2S、ゲージ長：10 mm）をアラライトで試料に接着した（Fig. 13a）。光ファイバーは25 mm 間隔で試料にらせん状に巻きつけた（Fig. 13b）。

このとき、光ファイバーが水平となす角は約 10 度である。Fig. 13b 中 Ch1 から Ch8 はひずみゲージを表すが、このうち Ch1, 3, 5, 7 は光ファイバーの軸と同方向のひずみを、Ch2, 4, 6, 8 は光ファイバーに直交方向のひずみを測定する。また、Fig. 13b 中の矢印で示される Ch5\_1, Ch5\_2, Ch7\_1, Ch7\_2 は、それぞれ Ch5 と Ch7 の直上直下の光ファイバー上の測定点である。

BBG-HF には、屈曲による光の損失を抑えるためクラッド部に空隙がある（Fig. 14）。ここで、BBG-HF のひずみ感度係数は静水圧下で測定されていない。そのため、周波数シフトの値をひずみに換算する際には、BBG-HF の常圧下での感度係数（Table 1）から補正する(6)および(7)式を用いる。(6)、(7)式中の  $K$  にはベレア砂岩の体積弾性率として 6.6 GPa (Hart and Wang, 1995) を用いた。この値は 10 MPa の封圧下で測定されたひずみにより計算された。封圧の大きさにより体積弾性率は変化するが、ひずみの計算結果に及ぼす影響は小さいと考えられるため、本研究では各封圧での計算に 6.6 GPa を用いた。

#### 4.3.2 試験システム

試験は、Fig. 5 に示される平角棒の試験と同様のシステムで行われた。圧力容器は 40°C に保たれた恒温室内に設置され、圧力容器自体もヒーターにより 40°C に保持された。光ファイバーとひずみゲージの信号線は、フィードスルーを通して圧力容器から取り出され、恒温室外の NBX-7020 およびデータロガーにそれぞれ接続された。

#### 4.3.3 試験手順および条件

試料設置後、ヒーターおよび恒温室の温度を 40°C に上昇させ、温度が安定した後、封圧上昇過程における岩石試料のひずみ変化を測定した。まず、封圧を 0.5 MPa に設定し、30 分以上ひずみ変化のない時点でのひずみゲ

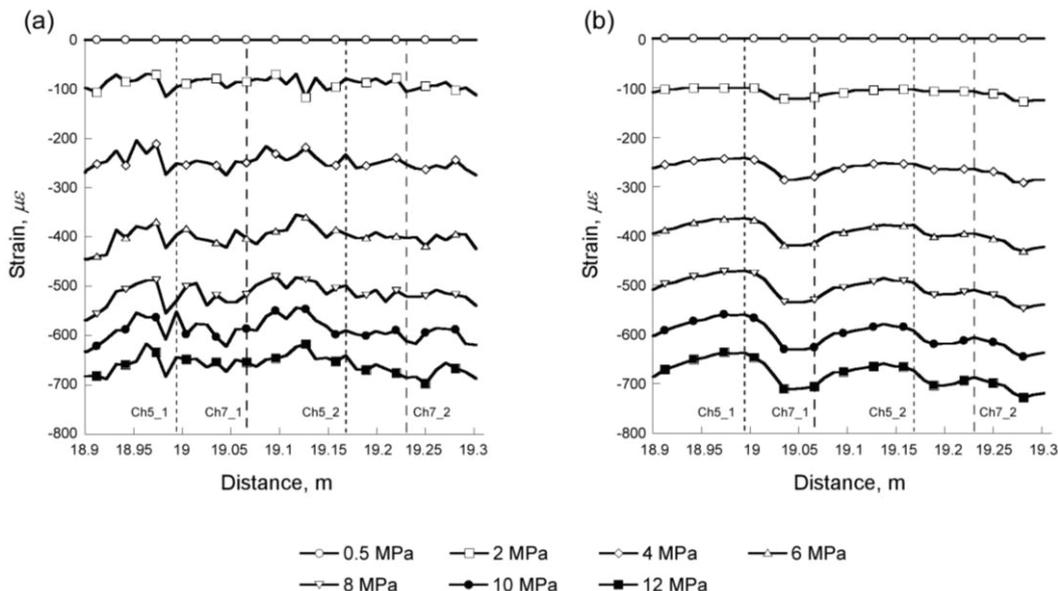


Fig.16. Results of strain measurements for Berea sandstone by optical fiber. (a) Brillouin and (b) Rayleigh scattering.

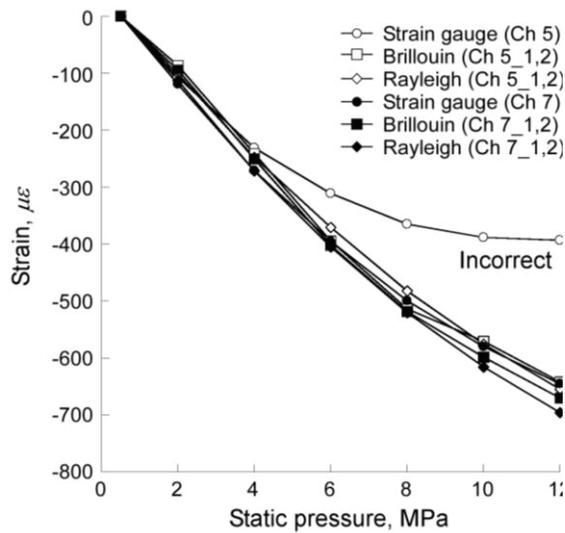


Fig.17. Results of strain measurements for Berea sandstone by strain gauges and optical fiber. Fiber optic distributed sensor system measures strains as accurate as strain gauge (Ch7) under static pressure conditions taking account of both axial and radial strain of optical fiber.

ージの値、ブリルアンおよびレイリー散乱光の周波数シフト量を初期値とした。さらに、2, 4, 6, 8, 10, 12 MPa に昇圧し、初期値からのひずみ変化量と周波数シフト量を測定した。

#### 4.3.4 ひずみ測定結果

Fig. 15 は、光ファイバーと同方向のひずみゲージ Ch1, 3, 5, 7 の値を表す。封圧 2 MPa ではひずみゲージのすべてのチャンネルで 100  $\mu\epsilon$  程度の圧縮ひずみが測定されたが、4 MPa で各チャンネルの値がばらつきはじめた。6 MPa 以降には、封圧の上昇にもかかわらず、Ch1 および Ch3 による測定結果は試料の膨張を示した。したがって、Ch1, 3 では試験途中でひずみゲージが剥離するなど、ゲージ破損の可能性がある。また、Ch5 および Ch7 では封圧が 12 MPa に達するまで圧縮ひずみが測定されたが、Ch5 のひずみは Ch7 より小さい。特に、8 MPa 以降のひずみ変化量が著しく小さい。本測定結果と比較するため、Hart and Wang (1995) が静水圧下でひずみゲージにより測定したベレア砂岩円柱供試体のひずみ変化を Fig. 15 にプロットした。Hart and Wang (1995) のひずみ変化は Ch7 と調和的である。ひずみの絶対量の違いは個体差と考えられる。したがって、Ch7 はベレア砂岩のひずみを正確に測定できたと考えられる。一方、Ch5 は正確に測定できなかった可能性がある。花崗岩などの緻密な岩石に比べ、砂岩の表面は粒子による凹凸が際立ったため、砂岩へのひずみゲージの接着は技術的難度が高い。

Fig. 16a, b に示す光ファイバーの結果は、それぞれ、

ブリルアンおよびレイリー散乱光の周波数シフト量を (6), (7) 式に代入し計算したものである。Fig. 16 の横軸は NBX-7020 の光の入射口からの距離を表し、表示範囲は試料に巻きつけられた光ファイバーに相当する。横軸上には Ch5\_1, Ch5\_2, Ch7\_1, Ch7\_2 の位置も点線で示した。周波数シフトは 20 mm 間隔で測定されたが、データ取得後の空間補正により、Fig. 16 には 10 mm 間隔のひずみが示されている。Fig. 16 は、封圧上昇に伴う試料全体のひずみ変化を示す。供試体の直径 0.050 m (50 mm) および光ファイバーと水平がなす角約 10 度を考慮すると、供試体の軸方向の同一直線上で光ファイバーにより測定されたひずみは、Fig. 16 の横軸約 0.16 m ごとに表される。光ファイバーは試料に 3-4 周巻かれており、ブリルアン測定よりなめらかなひずみ分布を示すレイリー測定の結果 (Fig. 16b) からは、約 0.16 m ごとにひずみ変化の周期性を確認できる。局所的なひずみ量の差は、岩石の不均質性に起因すると考えられる。

分布式センサー方式による岩石のひずみ測定結果の信頼性を確認するため、Fig. 17 に封圧に対するひずみゲージ、ブリルアンおよびレイリー測定によるひずみ測定結果をプロットした。ひずみゲージは Ch5 および Ch7, ブリルアンおよびレイリー測定は Ch5 および Ch7 付近の値として、各封圧における Ch5\_1 と Ch5\_2 および Ch7\_1 と Ch7\_2 の平均値をプロットした。Ch7 付近ではひずみゲージと光ファイバーによる結果が等しい。また、Ch5 付近ではひずみゲージの結果が著しく小さく、光ファイバーによる結果は Ch7 とほぼ等しい。したがって、前述のとおり、Ch5 のひずみゲージの結果は不正確だった可能性が高い。Ch7 のひずみゲージと Ch5 および Ch7 付近のブリルアンおよびレイリー測定によるひずみ変化量がほぼ等しいため、分布式光ファイバーセンシングはひずみゲージと同程度の精度で岩石のひずみを測定できる。

## 5. 結論

静水圧環境下で分布式光ファイバーセンサーを用いたひずみ測定の特徴を調べるため、圧力容器内に設置した金属平角棒およびベレア砂岩のひずみを測定し、以下の結果を得た：1) 従来光ファイバーの線方向の変形によってのみ生じると考えられていた周波数シフトは、静水圧環境下では、被測定物の変形によるファイバーの線方向の変形に加え、静水圧により生じるファイバーの径方向の変形によっても生じる；2) ファイバーの径方向の変形を考慮して補正された周波数シフト量を用いれば、分布式光ファイバーセンシングによりひずみゲージと同程度の精度でひずみを測定できる。以上のことから、静水圧環境下で分布式光ファイバーセンシングによりひずみを測定する際は、使用する個別の光ファイバーの圧力依存

性を事前に把握する必要がある。

本研究では、静水圧下における周波数シフトの発生原因を明らかにするとともに、光ファイバーの軸および径方向ひずみの変化量に応じた周波数シフト量の係数（ひずみ感度係数）を決定し、測定された周波数シフト量から被測定物のひずみへの計算式を得た。これを用いて、静水圧下で測定された周波数シフト量から、軸および径方向ひずみ変化量を計算できた。今後、封圧下でより大きな線ひずみが生じる実験を行い、高精度なひずみ感度係数の取得を目指す。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、ニューブレクス株式会社の山内良昭博士には周波数シフトの解析手法等をご教授頂いた。また、(公財)地球環境産業技術研究機構 (RITE) CO<sub>2</sub>貯留研究グループの研究員諸氏には有益なご指摘・議論をして頂いた。ここに、記して謝意を表します。なお、本研究は経済産業省の補助事業「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術研究開発」の成果の一部である。

## 参 考 文 献

- Ahmad, H., Latif, A.A., Zulkifli, M.Z., Awang, N.A. and Harun, S.W. (2012): Temperature sensing using frequency beating technique from single-longitudinal mode fiber laser, *IEEE Sensors Journal*, **12**, 2496–2500.
- Ashi, J. (1999): Large submarine landslides associated with decomposition of gas hydrate, *Landslide News*, **12**, 17–20.
- Brown, G.A., Kennedy, B. and Meling, T. (2000): Using fibre-optic distributed temperature measurements to provide real-time reservoir surveillance data on Wytch Farm field horizontal extended-reach wells, Society of Petroleum Engineers, 62952-MS.
- Durucan, S., Shi, J.Q., Sinayuc, C. and Korre, A. (2011): In Salah CO<sub>2</sub> storage JIP: Carbon dioxide plume extension around KB-502 well - New insights into reservoir behaviour at the In Salah storage site, *Energy Procedia*, **4**, 3379–3385.
- Earles, D.M., Stoesz, C.W., Surveyor, N., Pearce, J.G. and DeJongh, H.A. (2011): Fiber optic strain sensing at the sand face enables real-time flow monitoring and compaction mitigation in openhole applications, Society of Petroleum Engineers, 147439.
- Froggatt, M. and Moore, J. (1998): High-Spatial-Resolution Distributed Strain Measurement in Optical Fiber with Rayleigh Scatter, *Applied Optics*, **37**, 1735–1740.
- 藤木信裕・入沢辰之介・坂牧和博・根本克己 (2010): 光ファイバーによる坑内温度・圧力分布同時モニタリング, 石油技術協会誌, **75**, 411–420.
- Hart, D.J. and Wang, H.F. (1995): Laboratory measurements of a complete set of poroelastic moduli for Berea sandstone and Indiana limestone, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 17741–17751.
- 保立和夫 (2010): 光ファイバによる分布型歪みセンシング技術, 電気学会誌, **110**, 676–679.
- Johnston, W.D. and Kaminow, I.P. (1968): Temperature dependence of Raman and Rayleigh scattering in LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub>, *Physical Review*, **168**, 1045–1054.
- 岸田欣増・李 哲賢・西口憲一・山内良昭・グジク アーター (2013): SMFにおけるひずみと温度が識別できるハイブリッド分布測定システムの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, **112**, 37–42.
- 小山田弥平・今濱 睦・保莉和男 (2007): 多周波数で測定したレイリー散乱波形に基づく歪・温度の高精度分布測定法, 電子情報通信学会技術研究報告, **107**, 83–88.
- Kvenvolden, K.A. (1999): Potential effects of gas hydrate on human welfare, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **96**, 3420–3426.
- Liu, Q., Tokunaga, T., Mogi, K., Matsui, H., Wang, H. F., Kato, T. and He, Z. (2012): Ultrahigh resolution multiplexed Fiber Bragg Grating sensor for crustal strain monitoring, *IEEE Photonics Journal*, **4**, 996–1003.
- Maaskant, R., Alavie, T., Measures, R.M., Tadros, G., Rizkalla, S.H. and Guha-Thakurta, A. (1997): Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring, *Cement and Concrete Composites*, **19**, 21–33.
- Merzbacher, C.I., Kersey, A.D. and Friebele, E.J. (1996): Fiber optic sensors in concrete structures: a review, *Smart Materials and Structures*, **5**, 196–208.
- 国立天文台編 (2004) : 理科年表平成 17 年版, 丸善, 東京, p375.
- 岡本勝就 (1992) : 光導波路の基礎, コロナ社, 東京, p361.
- Onuma, T. and Ohkawa, S. (2009): Detection of surface deformation related with CO<sub>2</sub> injection by DInSAR at In Salah, Algeria, *Energy Procedia*, **1**, 2177–2184.
- Parker, T.R., Farhadiroushan, M., Handerek, V.A. and Rogers, A.J. (1997): Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers, *Optics Letters*, **22**, 787–789.
- レイサーモ工業株式会社, “商品情報”, <http://www.raythermo.com/shopdetail/0030000000002/003/O/page1/order/> (最終閲覧日: 2013 年 11 月 29 日)
- Rutqvist, J., Vasco, D.W. and Myer, L. (2010): Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO<sub>2</sub> injection and ground deformations at In Salah, Algeria, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **4**, 225–230.

サイ・ロード株式会社, “光ファイバー通信用製品, FBG”,  
<http://sairoad.jp/fiberproducts/component/fbg/> (最終閲覧  
 日: 2013年11月29日)

Urgeles, R., Camerlenghi, A., Ercilla, G., Anselmetti, F.,  
 Brückmann, W., Canals, M., Gràcia, E., Locat, J.,  
 Krastel, S. and Solheim, A. (2007): Scientific ocean  
 drilling behind the assessment of geo-hazards from  
 submarine slides, *Eos, Transactions American*

*Geophysical Union*, **88**, 192.

山口梅太郎・西松裕一 (1991): 岩石力学入門, 東京大学出版会,  
 東京, p331.

Yamauchi, Y. (2010): A measurement method to determine  
 strain and temperature coefficients in fiber optic sensors,  
*Proceedings of the Asia Pacific Workshop on Structural  
 Health Monitoring (APWSHM), Tokyo, Japan.*

## Fiber optic strain measurements using distributed sensor system under static pressure conditions

Tetsuya Kogure\*, Yuki Horiuchi\*\*, Tamotsu Kiyama\*<sup>3</sup>, Osamu Nishizawa\*<sup>3</sup>, Ziqiu Xue\*<sup>3</sup>  
 and Toshifumi Matsuoka\*\*

### ABSTRACT

The effects of hydrostatic pressure on strain measurements by using fiber optic distributed sensor system were elucidated through laboratory experiments. Strains of metallic plates and a cylindrical core of Berea sandstone were measured under hydrostatic pressure by using a system that measures strains by the frequency shifts of Brillouin and Rayleigh scattering in an optical fiber, together with simultaneous measurements by strain gauges. The measurements revealed that the radial strain of the optical fiber due to the hydrostatic pressure considerably affect the frequency shifts as well as the strain along the fiber line. The effects of two strains on the frequency shifts,  $\Delta f$ , are expressed as  $\Delta f = A\Delta\varepsilon_z + B\Delta\varepsilon_r$ . where  $\Delta f$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_r$  are the Brillouin or Rayleigh frequency shifts, the fiber strain along the line and radial directions, respectively.  $A$  and  $B$  are the coefficients corresponding to the effects of the two directional strains for the Brillouin or Rayleigh frequency shifts.  $A$  and  $B$  are determined as  $0.0497 \pm 0.0043$ ,  $0.0346 \pm 0.0014$  (MHz/ $\mu\varepsilon$ ) for the Brillouin and  $0.130 \pm 0.0096$ ,  $0.0707 \pm 0.0032$  (GHz/ $\mu\varepsilon$ ) for the Rayleigh. Our experimental technique was also successfully applied for monitoring the deformation of sandstone under static pressure. The results assure accurate strain measurements by means of the fiber optic distributed strain measurements system.

**Keywords:** optical fiber, distributed sensor system, static pressure, strain measurements, Brillouin scattering, Rayleigh scattering

Manuscript received December 6, 2013; Accepted September 26, 2014.

\* Department of Geoscience, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University  
 1060, Nishikawatsu-cho, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

\*\* Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University  
 C1-1-109, Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan

\*<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> Storage Research Group, Research Institute of Innovative Technology for the Earth  
 9-2, Kizugawadai, Kizugawa, Kyoto 619-0292, Japan