

# 光ファイバーによるCO2圧入サイトの 地層安定性観測技術開発について

*Application of distributed optical fiber sensors  
in geomechanical monitoring*

薛 自求 (xue@rite.or.jp)

公益財団法人 地球環境産業技術研究機構

# 光ファイバーの構造

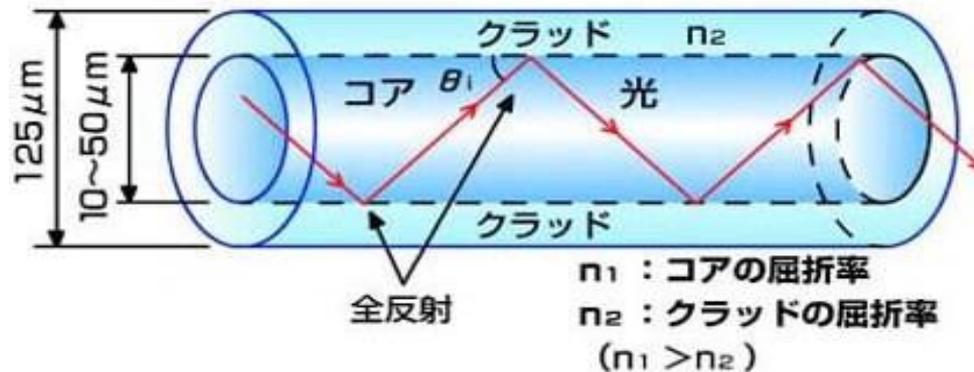
(迷光をコアに戻し、伝送損失を抑える)

Cladding

Core

(光はコアを通過して伝送される)

Buffer Coating (外部環境や物理的損傷から保護)



# 光ファイバーセンシング技術

電気センサー  
(電圧、電流)

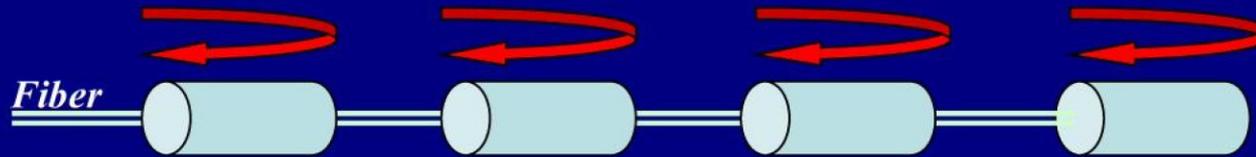
電気 →→ 光

光ファイバー

(光波の強さ、位相、周波数)

**多点型**

Multi-point (quasi-distributed) Sensor



*Multiple Sensing Elements*

**分布型**

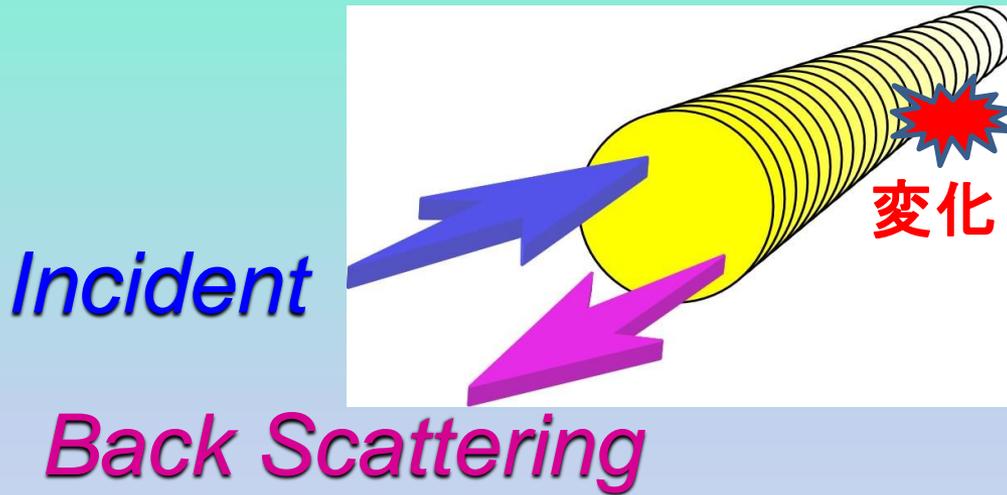
Distributed Sensor



*Fiber itself is Continuous Sensing Element*

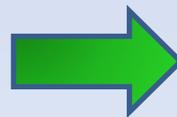
(Dria, SPE/DL 2012)

# 光ファイバーの計測原理



ラマン散乱光, ブリルアン散乱光, レイリー散乱光  
(Raman) (Brillouin) (Rayleigh)

Brillouin & Rayleigh  
Scattering



**ひずみ・温度**  
の変化量測定に利用

# 光ファイバー測定技術の現状

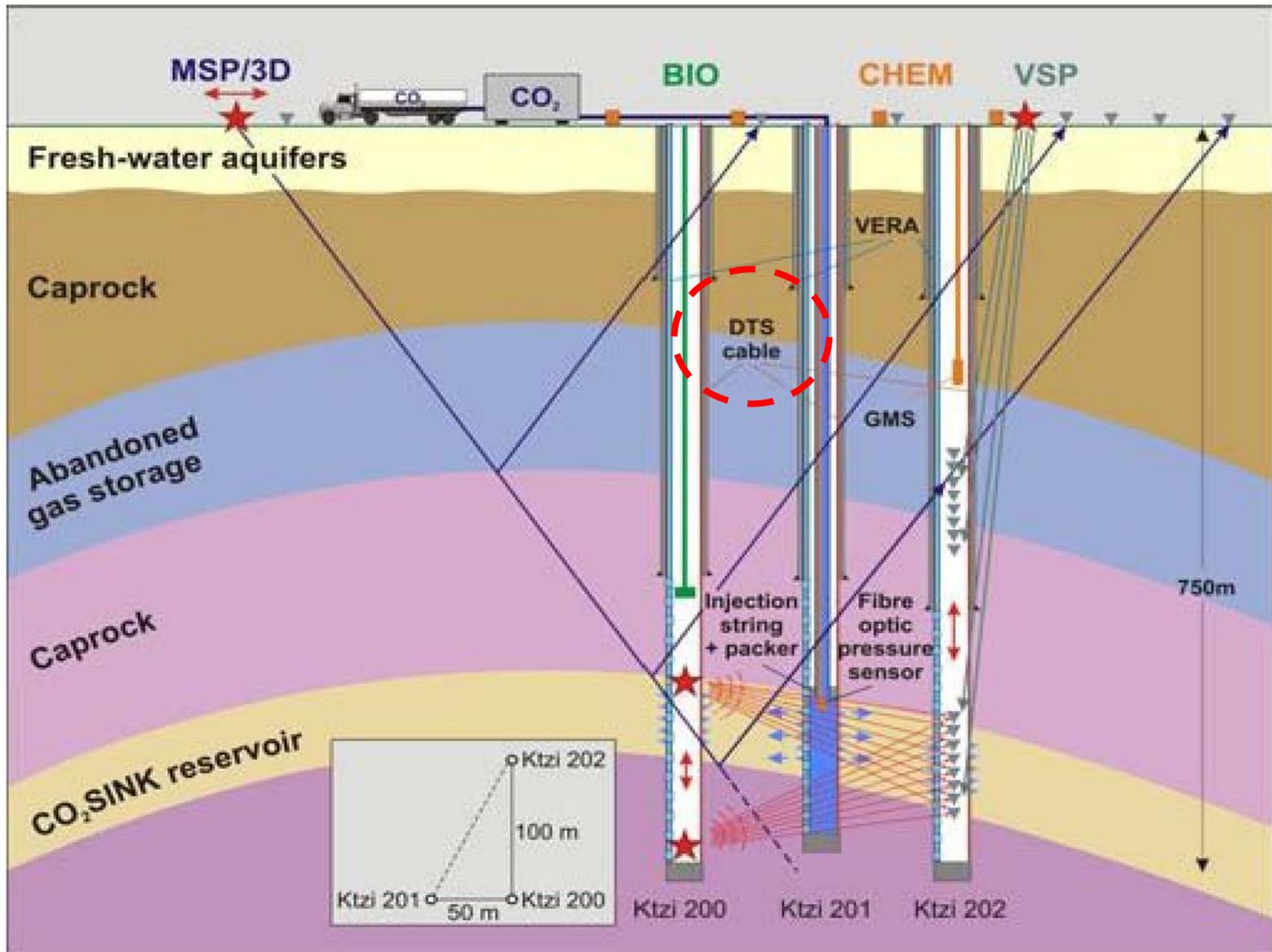
## ➤ 既存技術 (Commercial & Developed)

- DTS・・・Distributed **T**emperature **S**ensor
- DTSS・・・Distributed **T**emperature **S**train **S**ensor
- DPTS・・・Distributed **P**ressure **T**emperature **S**ensor
- DAS・・・Distributed **A**coustic **S**ensor

## ➤ 新しい技術開発 @RITE

- DTPSS・・・Distributed **T**emperature **P**ressure  
**S**train **S**ensor

# 分布型光ファイバー温度センサー(DTS)@Ketzin

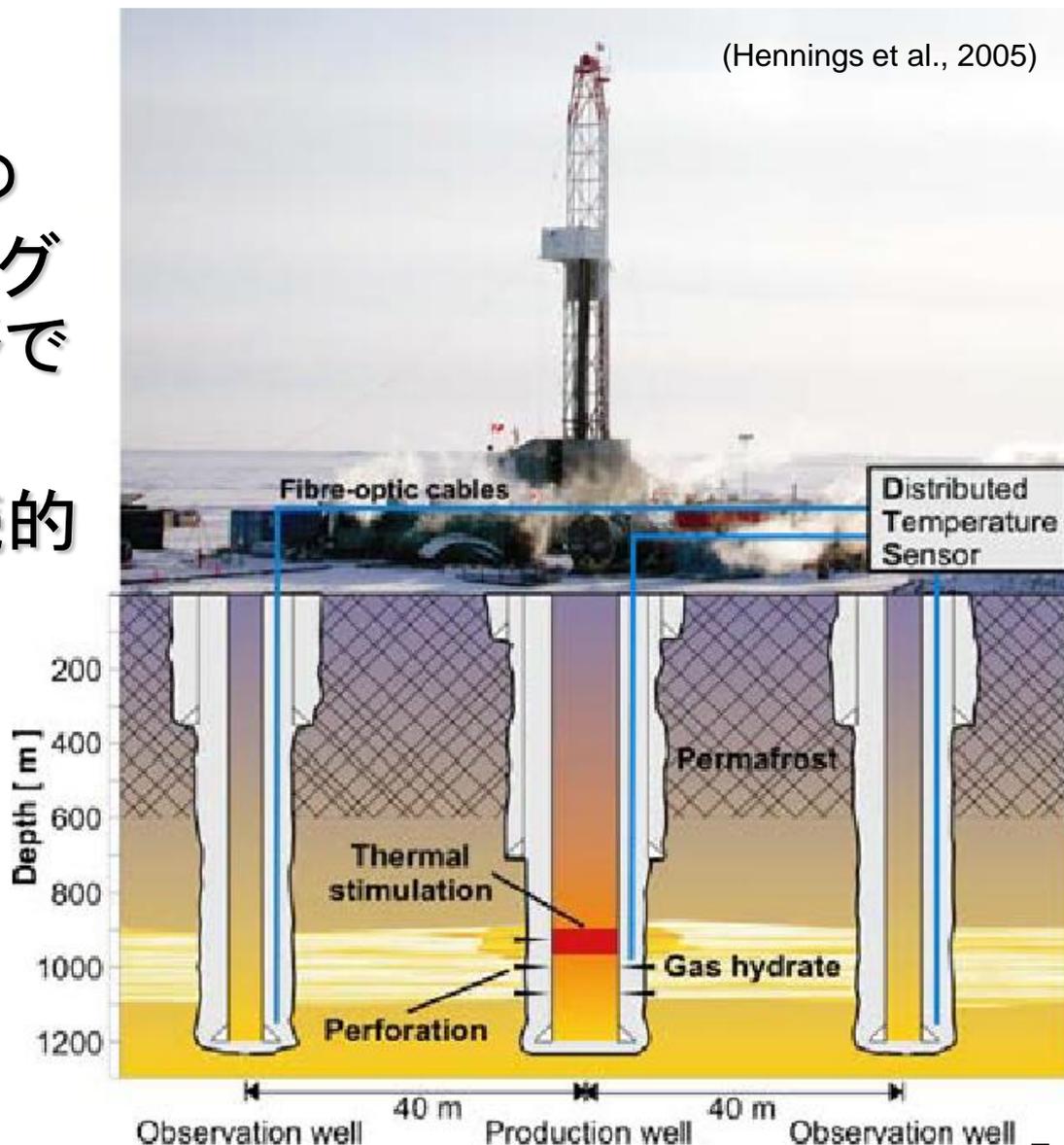


# 坑井における光ファイバー測定技術

- 坑井管理／生産のため  
温度・変形をモニタリング  
(石油・ガス田開発分野で  
実用化)
- 深度方向における連続的  
データ取得が可能

流体の温度・ケーシング  
の変形を計測可能

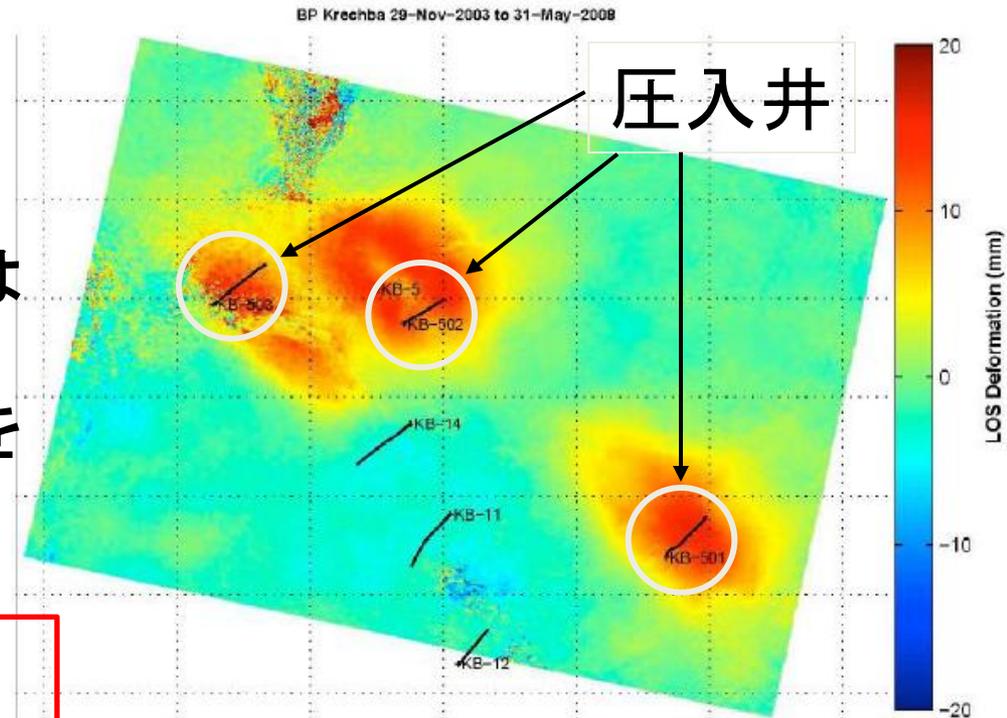
地層変形も計測できる？



# 貯留層 & 遮蔽層の力学的安定性評価

- In Salahにおける地表の隆起  
→CO<sub>2</sub>圧入に伴う地層水圧の増加が原因
- 遮蔽層の安定性に影響
- 従来の変位計による計測では計測点が限定
- 深度方向における地層変形を連続的に把握する必要

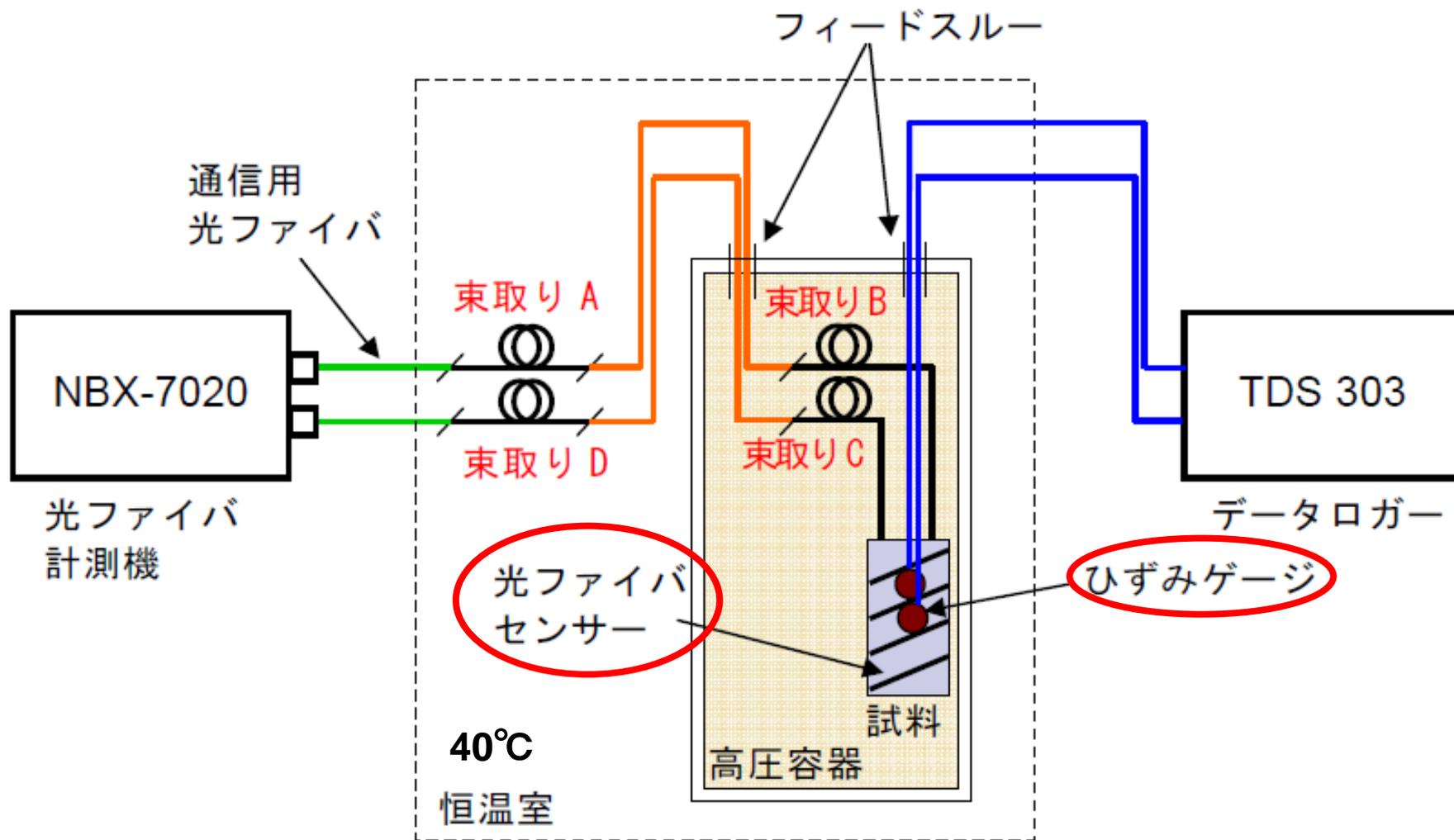
深度方向の連続的なデータ取得方法はあるか？



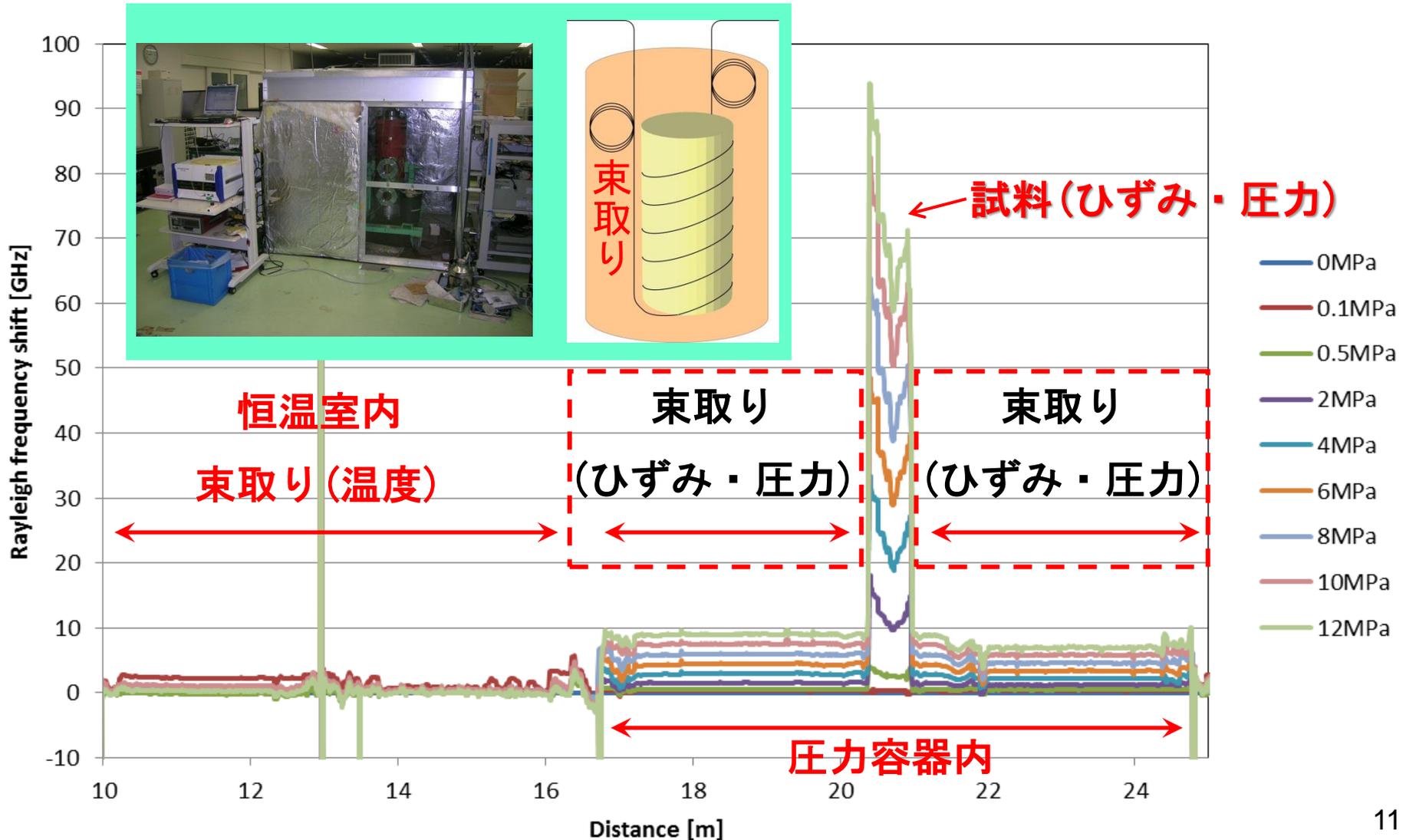
(Durucan et al., 2011, Energy Procedia 4)



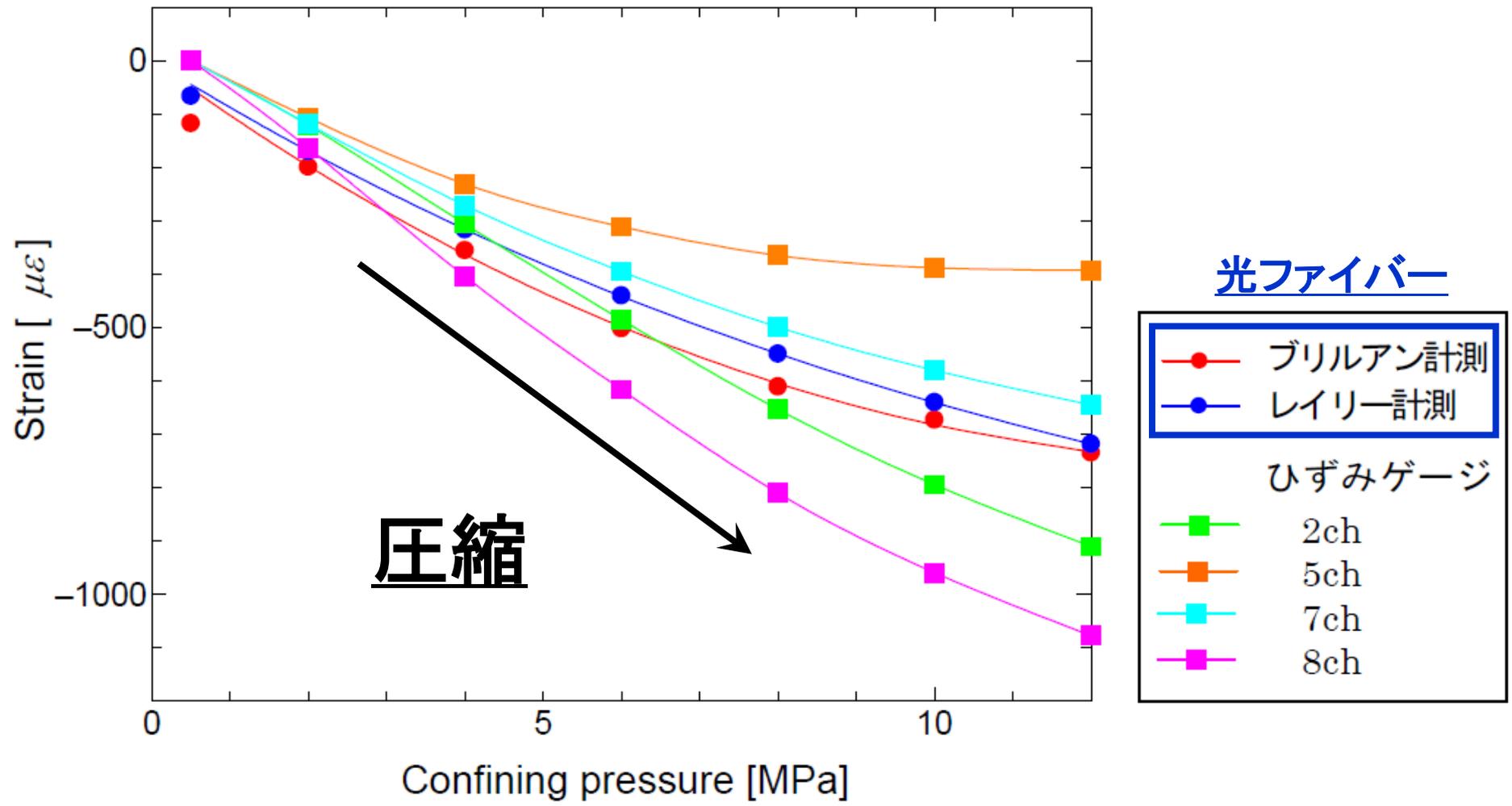
# 室内実験システムの概念図



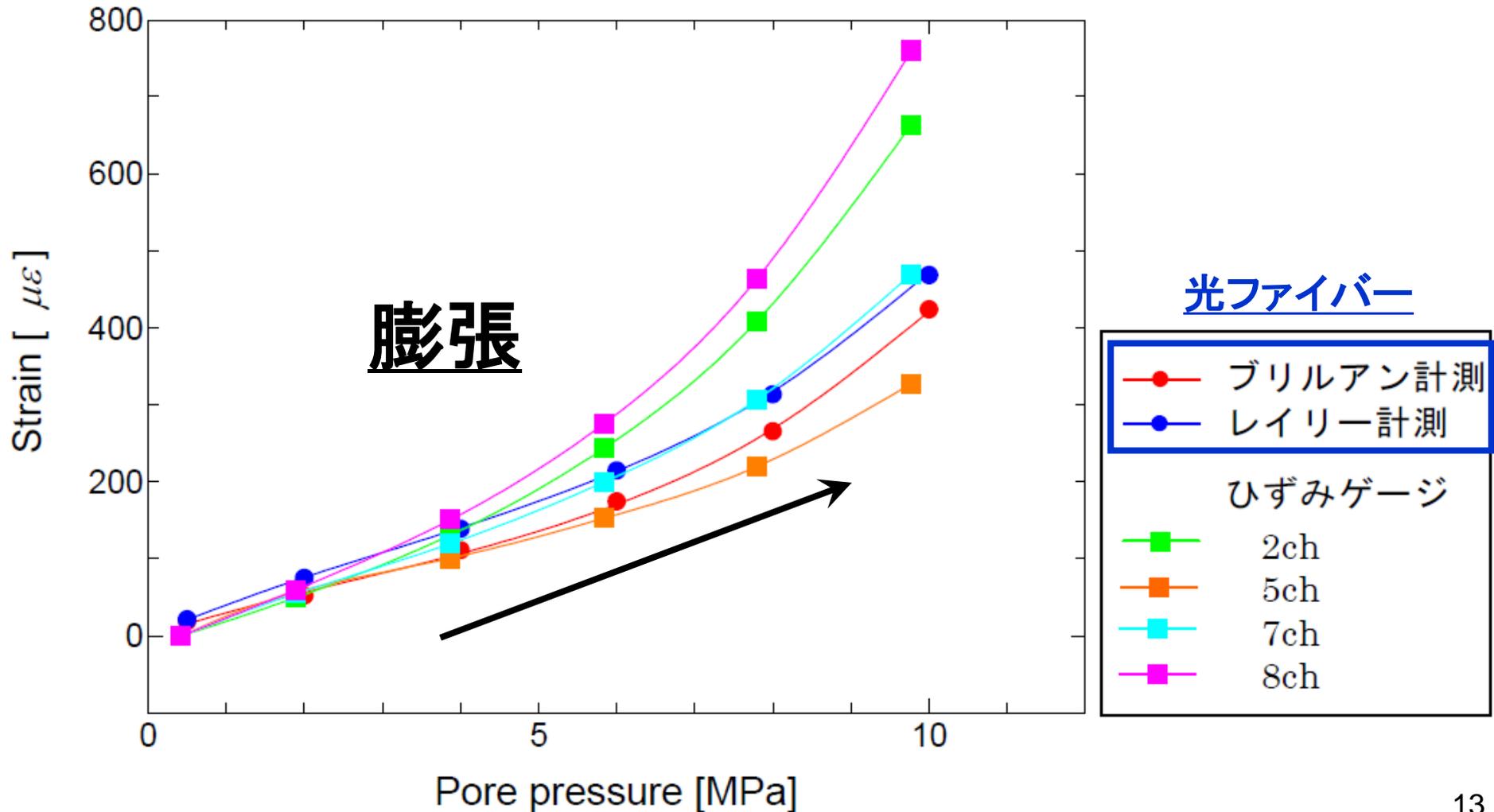
# 圧力増加に伴う周波数シフト



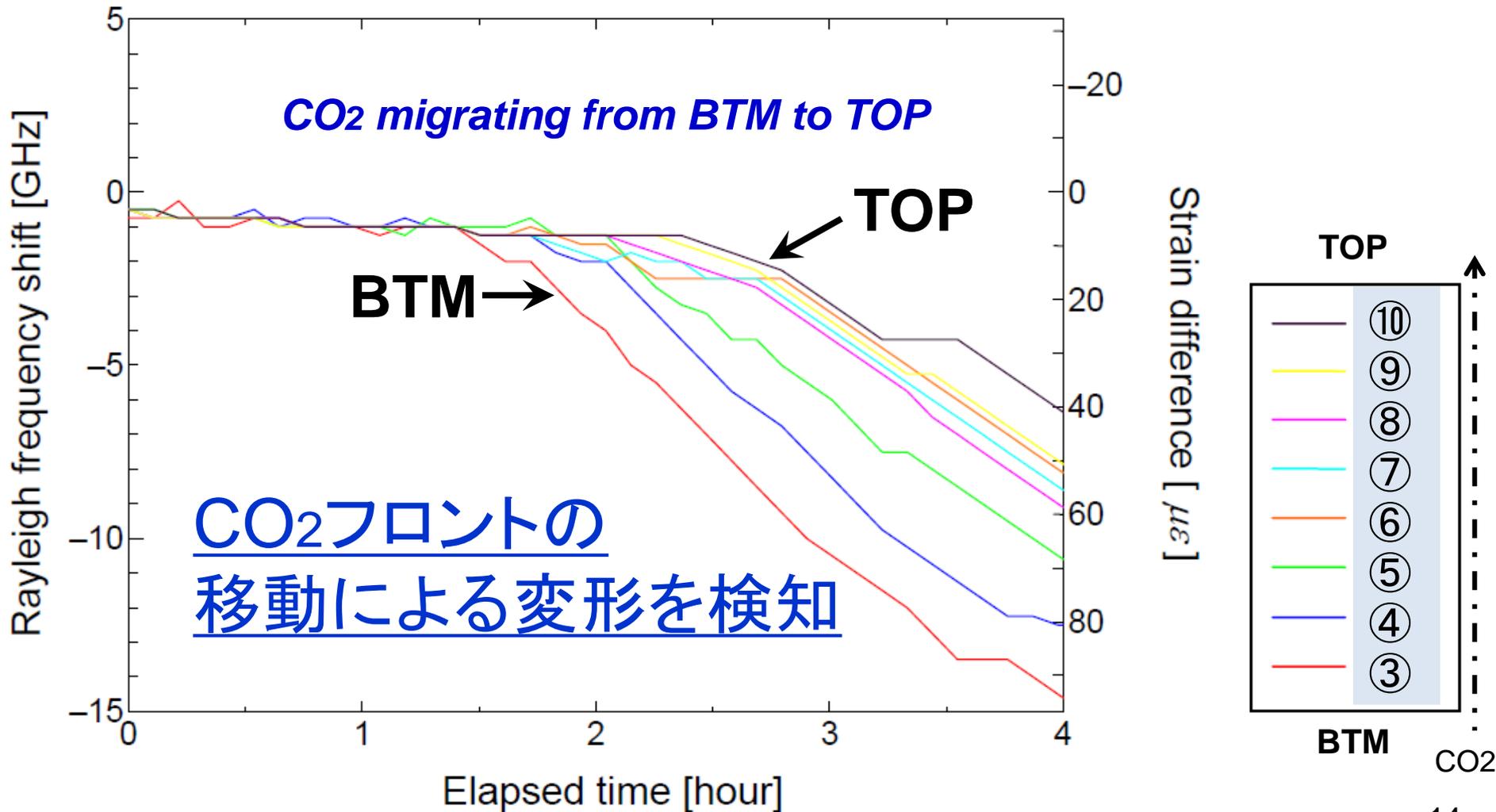
# 静水圧負荷過程のひずみ測定



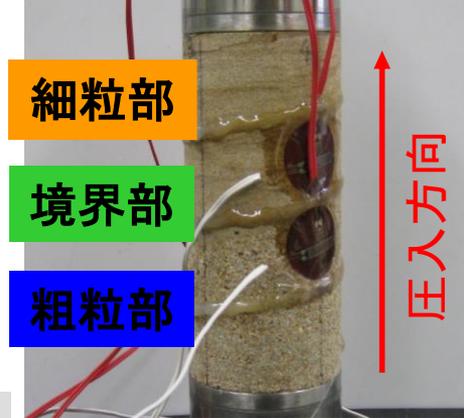
# 間隙水圧増加過程のひずみ測定



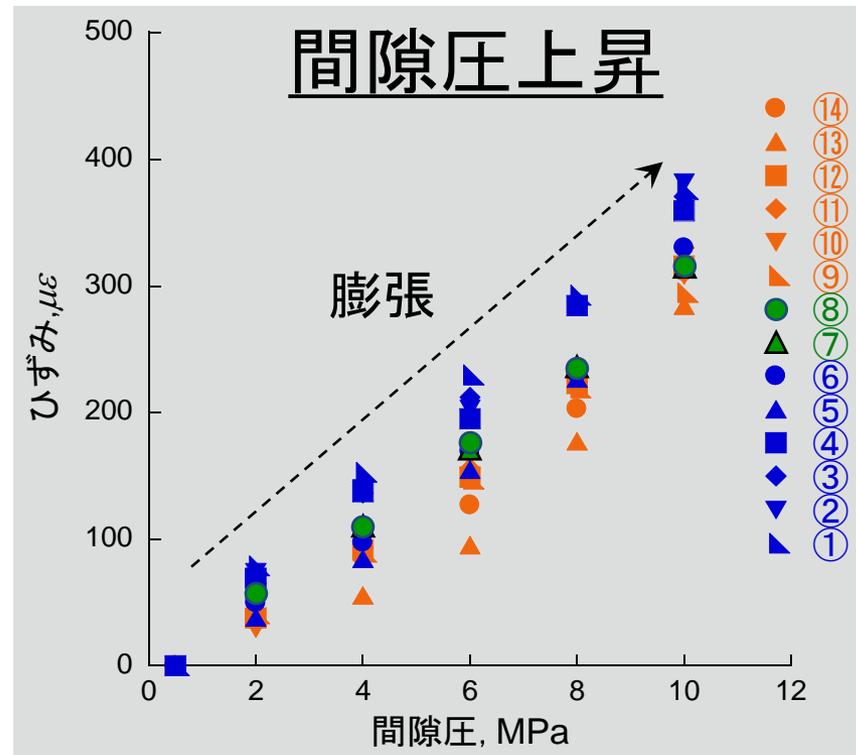
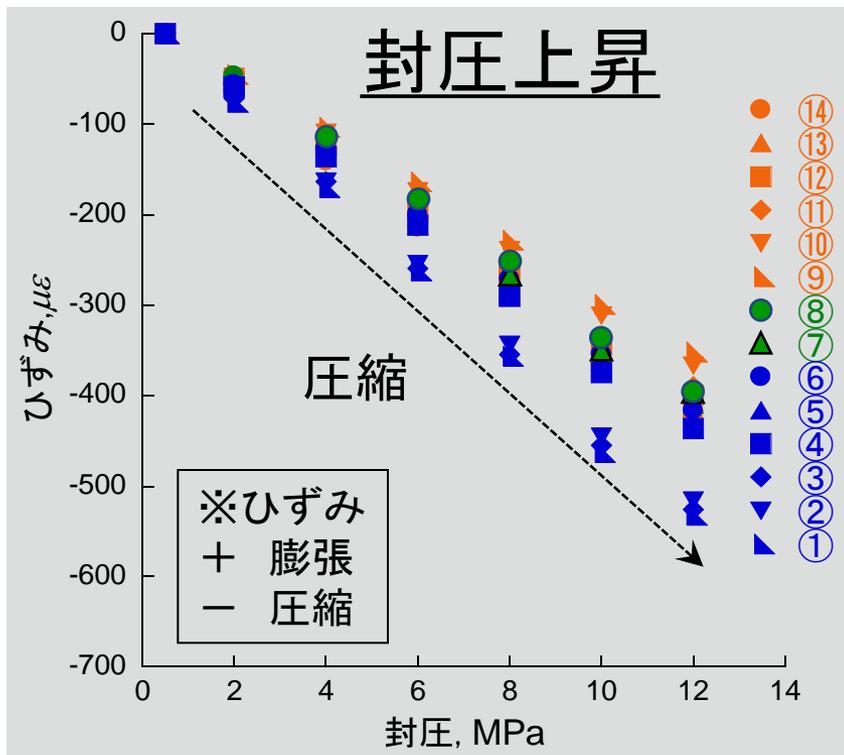
# 超臨界CO<sub>2</sub>注入時のひずみ変化



# 静水圧・間隙圧上昇時のひずみ変化

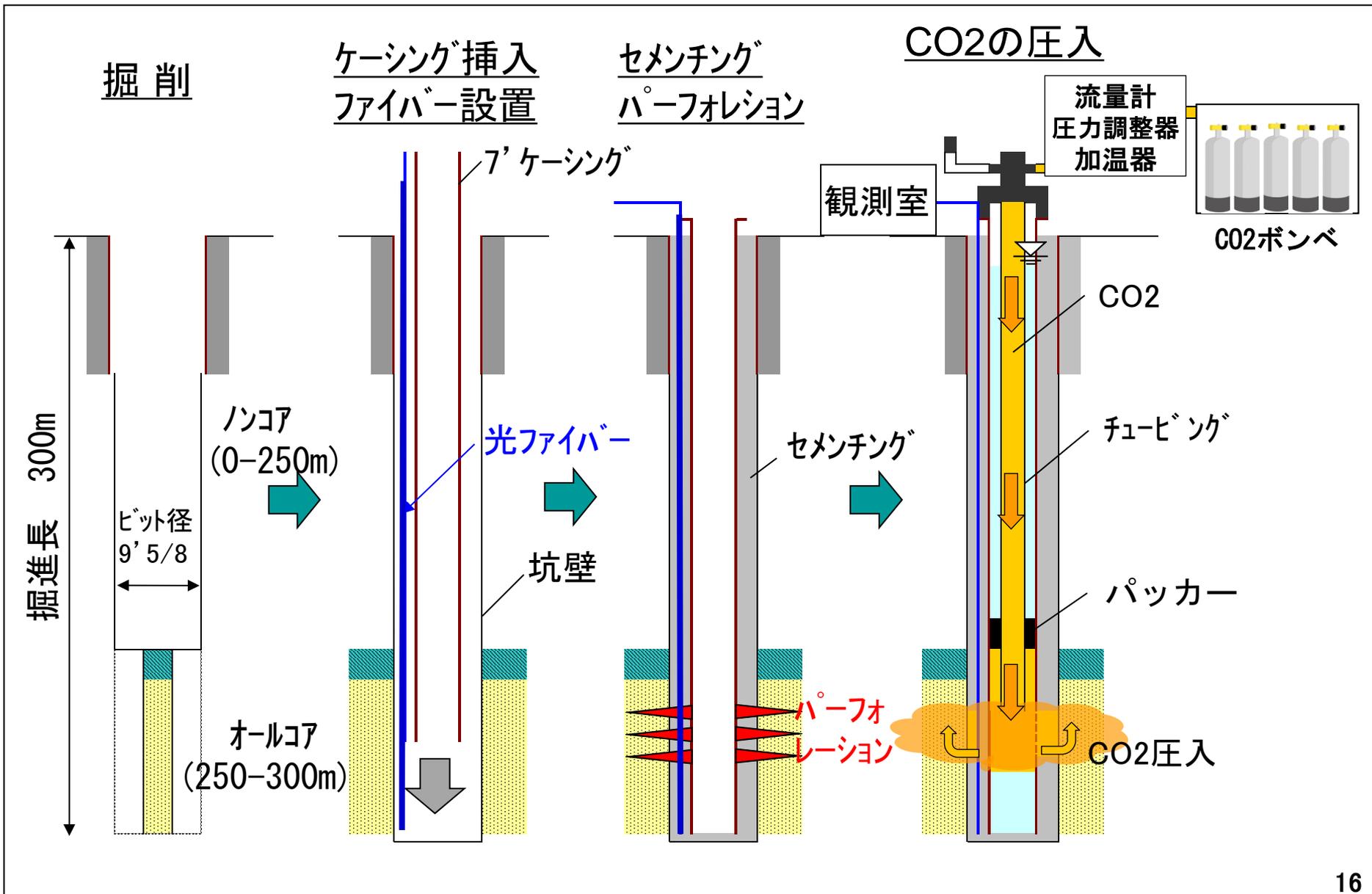


● : 粗粒部      ● : 境界部      ● : 細粒部

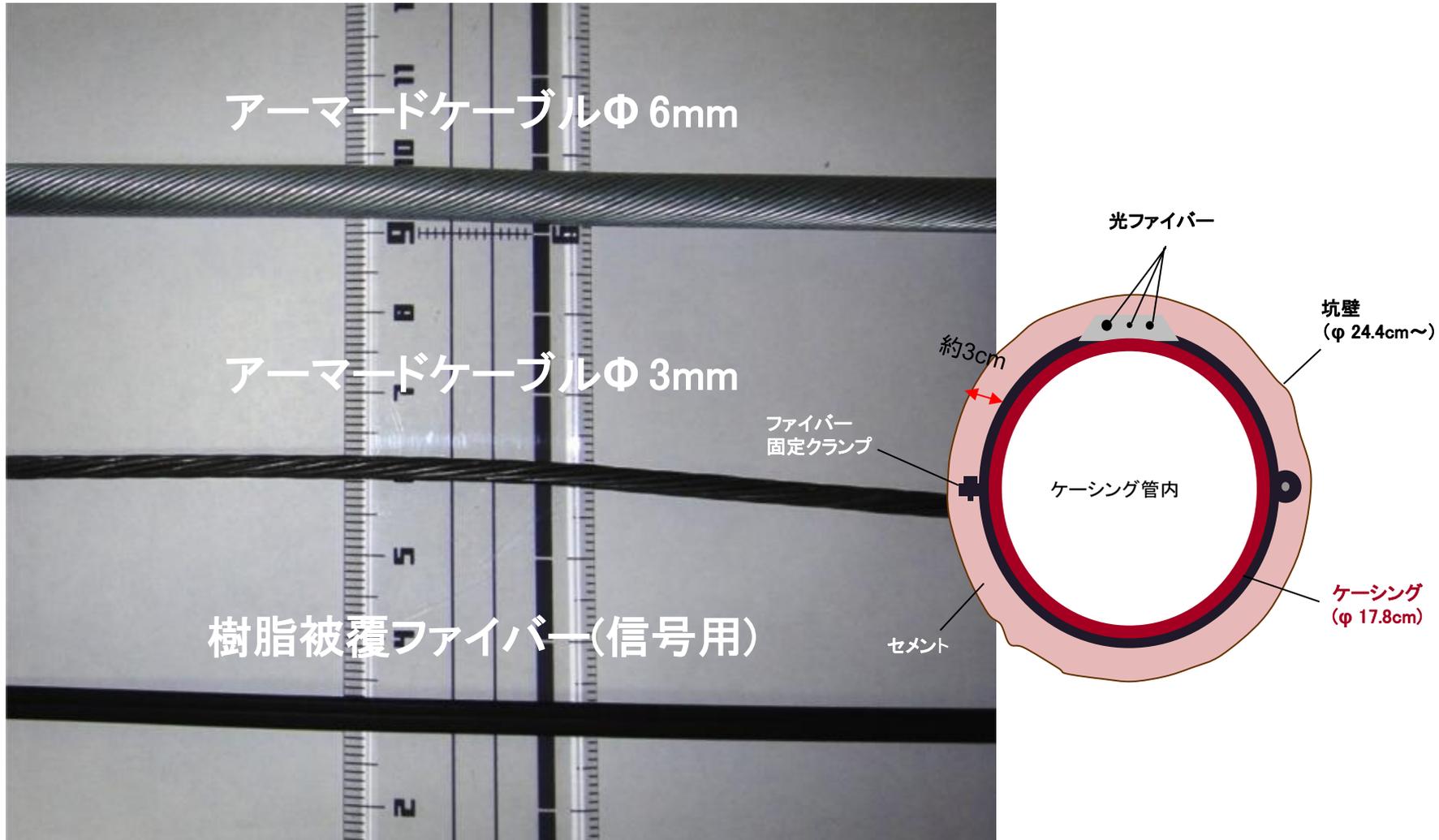


- ひずみは粗粒部で大きく、細粒部で小さい
- 粗粒部と細粒部のひずみの違いが判別できる

# 光ファイバーを用いた現場試験



# 既存ファイバーの現場実験 → → → 埋設型ファイバーの仕様検討 (光ファイバー試作へ)



# 光ファイバー設置について

光ファイバーを屈曲・断線なく挿入・設置

**経験やノウハウの蓄積**

- プロテクターとクランプを自作・改良(肉薄化、信号ロス軽減)
- セントライザを通常より多めに利用



カップリングプロテクター  
(10m@30個)

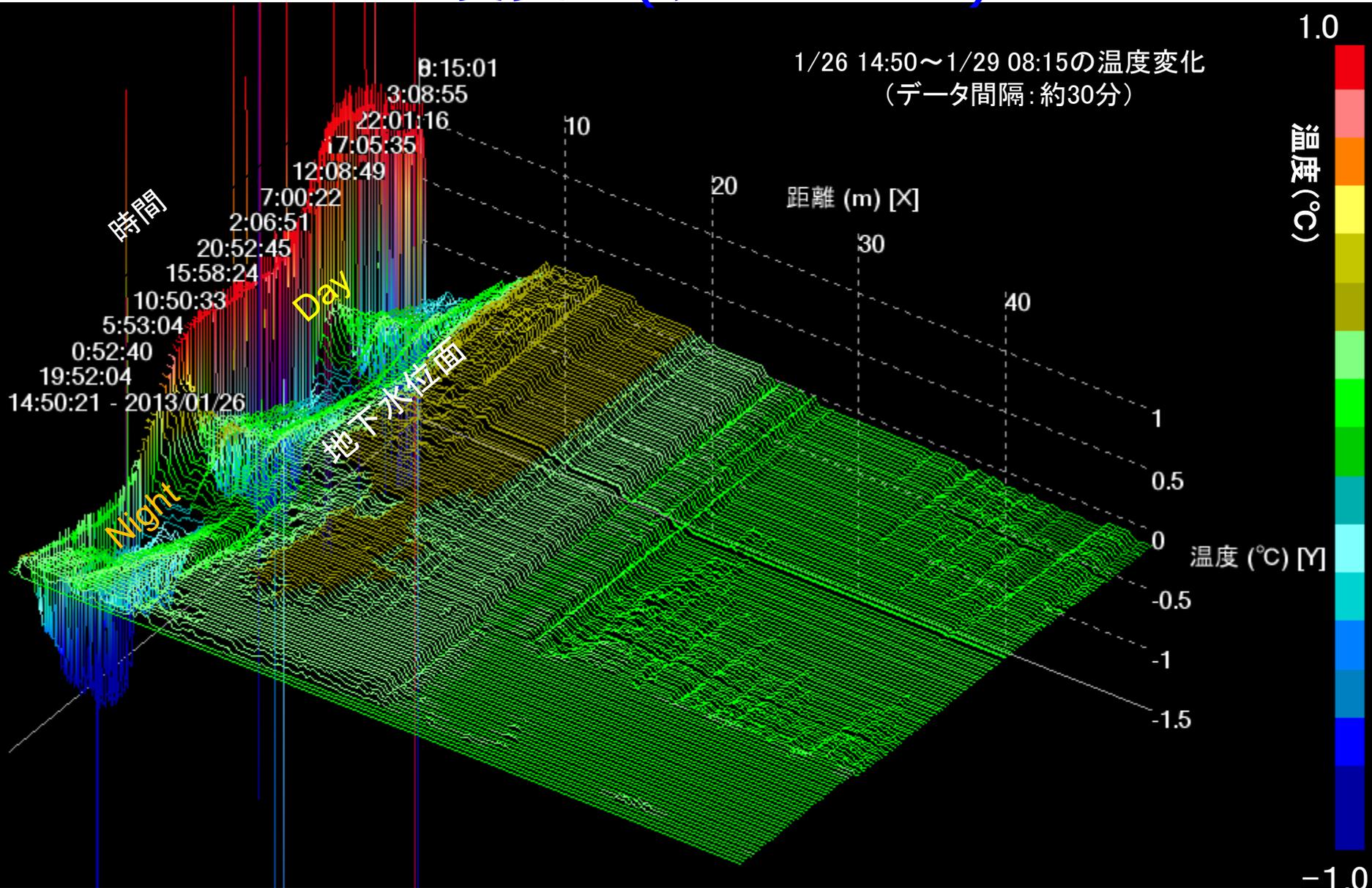


ファイバー固定用クランプ  
(10m@30個)



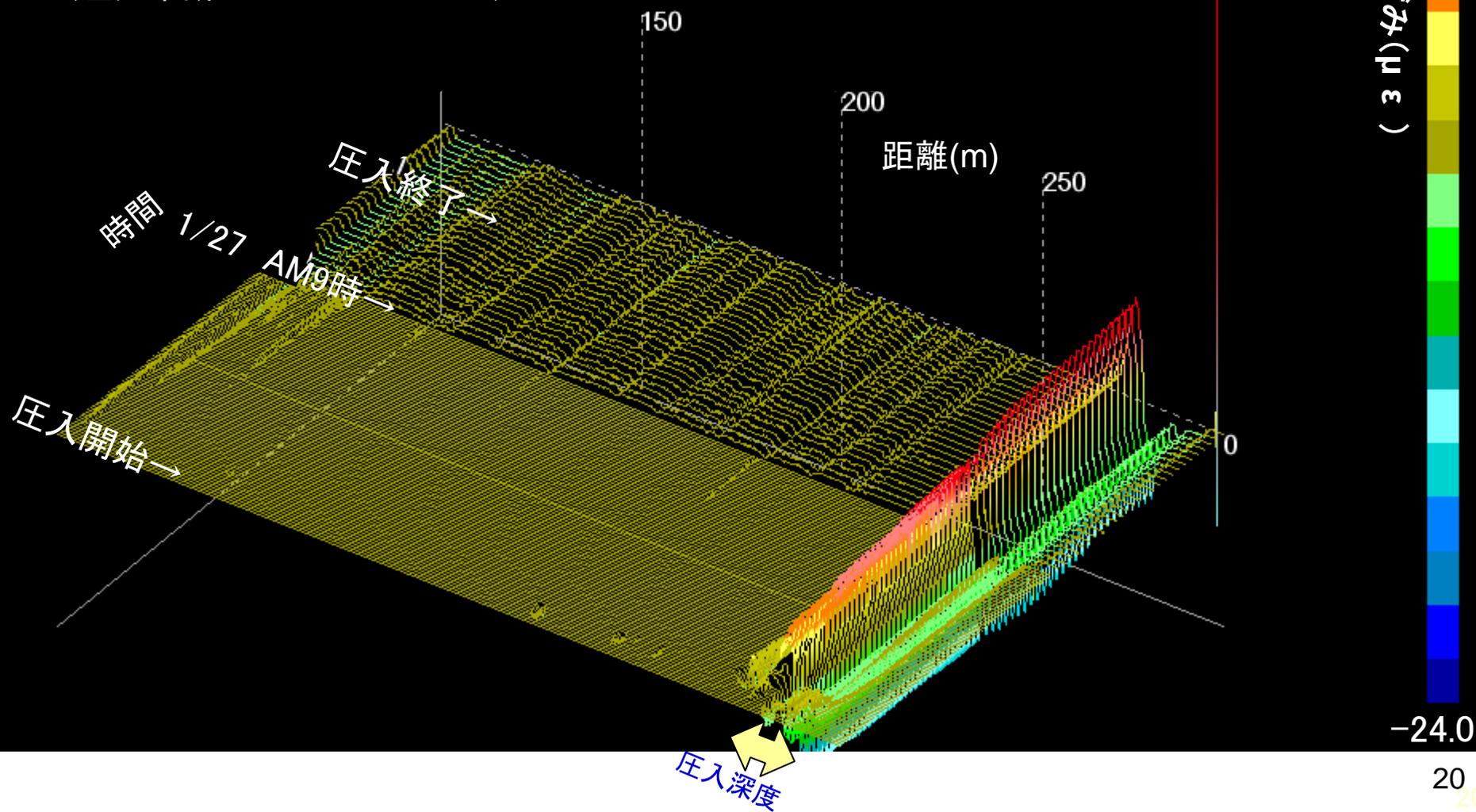
セントライザを利用した  
ファイバー最下部の固定

# 温度変化(坑口～50m)



# CO<sub>2</sub>圧入時の地層ひずみの経時変化

CO<sub>2</sub>圧入開始1/26 15:03  
CO<sub>2</sub>圧入終了1/27 18:00  
(圧入中断1/27 10:10~13:10)



# CO<sub>2</sub>圧入時の計測結果

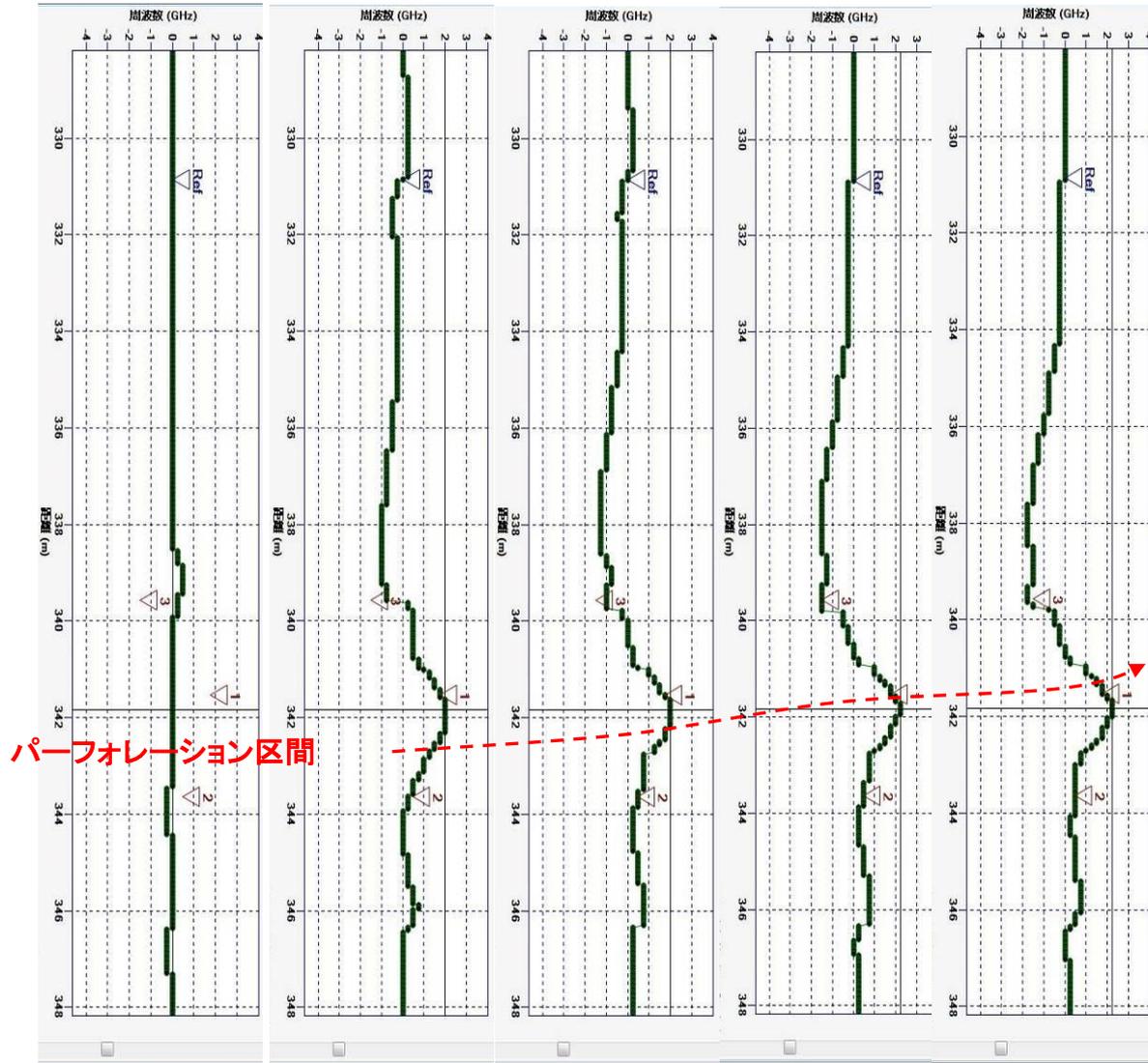
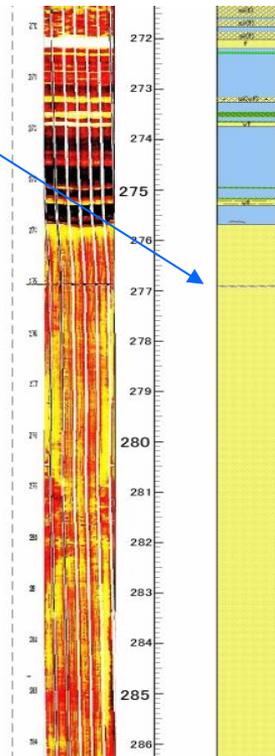
1層PTSファイバ(Rayleigh)による地層変形の計測状況(温度・圧力情報含む)

CO<sub>2</sub>圧入1時間後      3時間後      5時間後      10時間後      15時間後

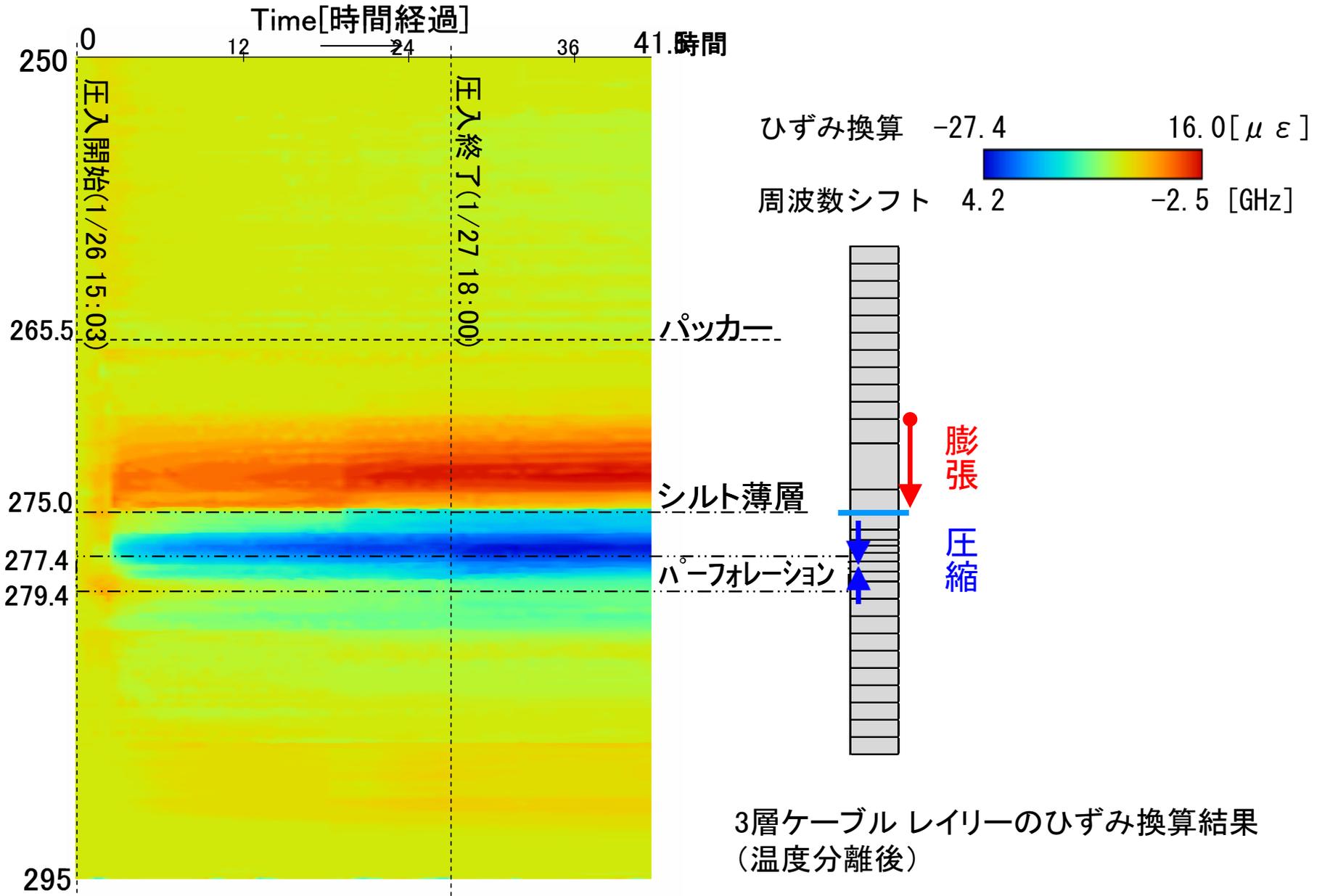
Ref : パッカーの位置  
 Δ 3 : Siltの位置  
 Δ 1~Δ 2 : パーフォレーション区間

EMI      柱状図

シルト薄層



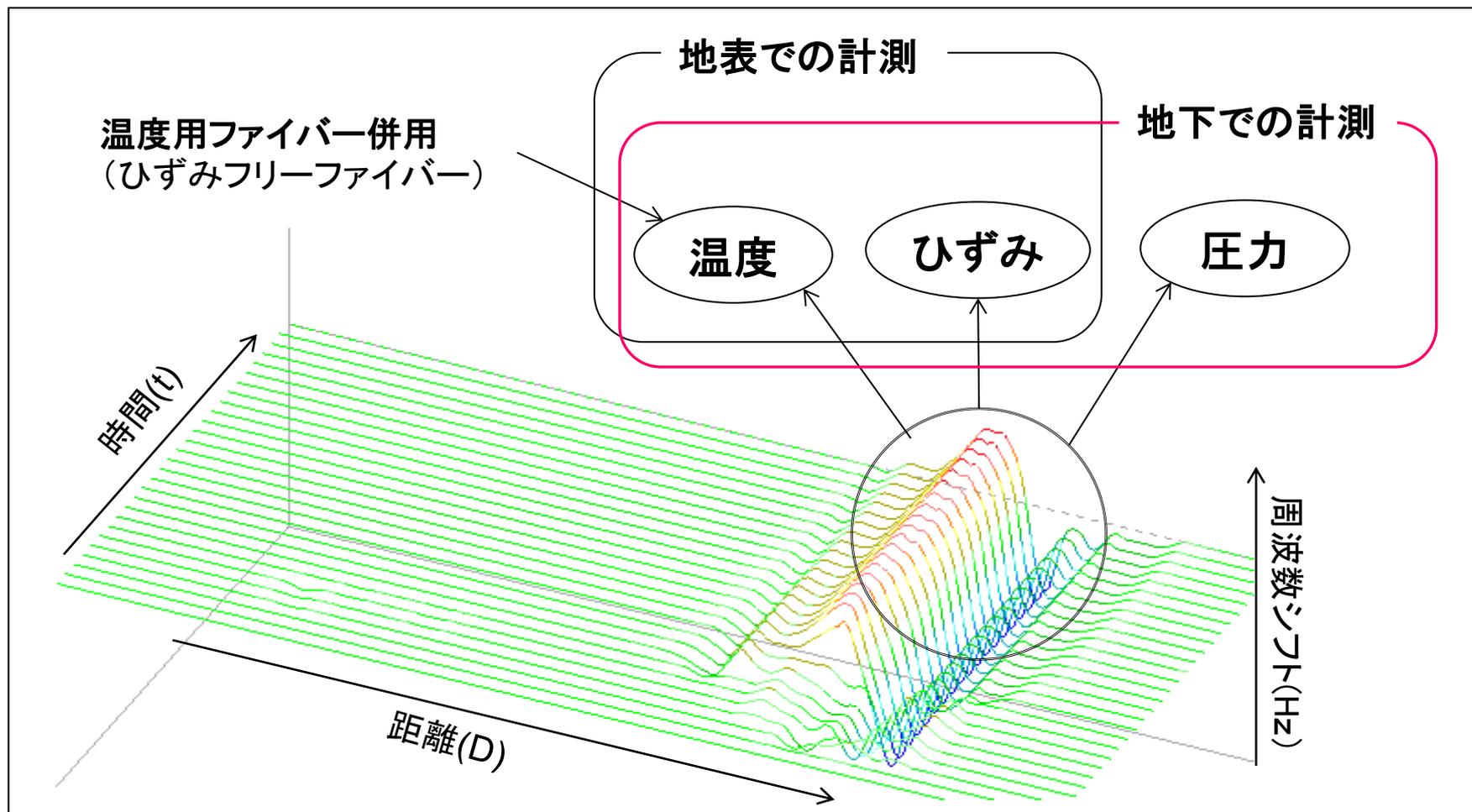
# CO<sub>2</sub>圧入時の地層変形



# 地下深部におけるひずみ計測について

光ファイバーは、**温度**・**圧力**・**ひずみ**に反応

→坑井(ケーシング外側)に設置した場合、ひずみ、圧力の分離が課題



# Brillouin & Rayleigh Scattering による温度、ひずみ測定

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

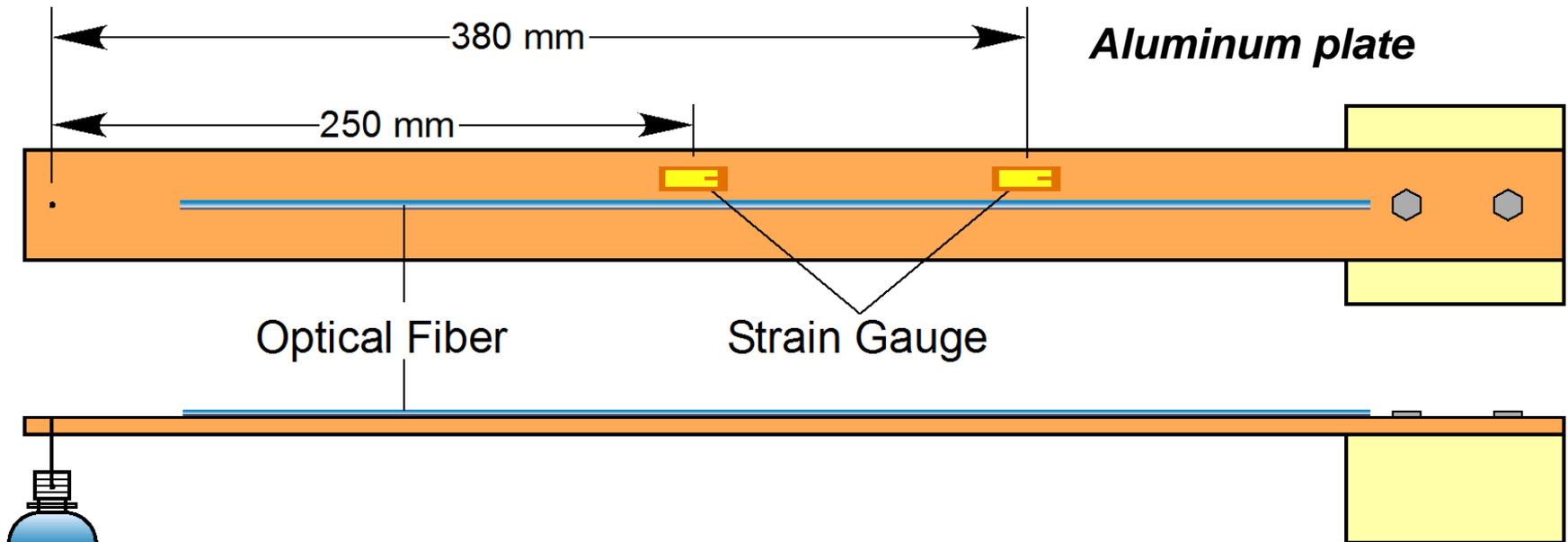
$\Delta f$  は周波数シフト， $T$  は温度，  
 $\varepsilon$  はファイバーに生じるひずみ

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

$\Delta T$  は温度変化量， $\Delta \varepsilon$  はひずみ変化量，

$\alpha$  および  $\beta$  はそれぞれ温度とひずみの感度係数

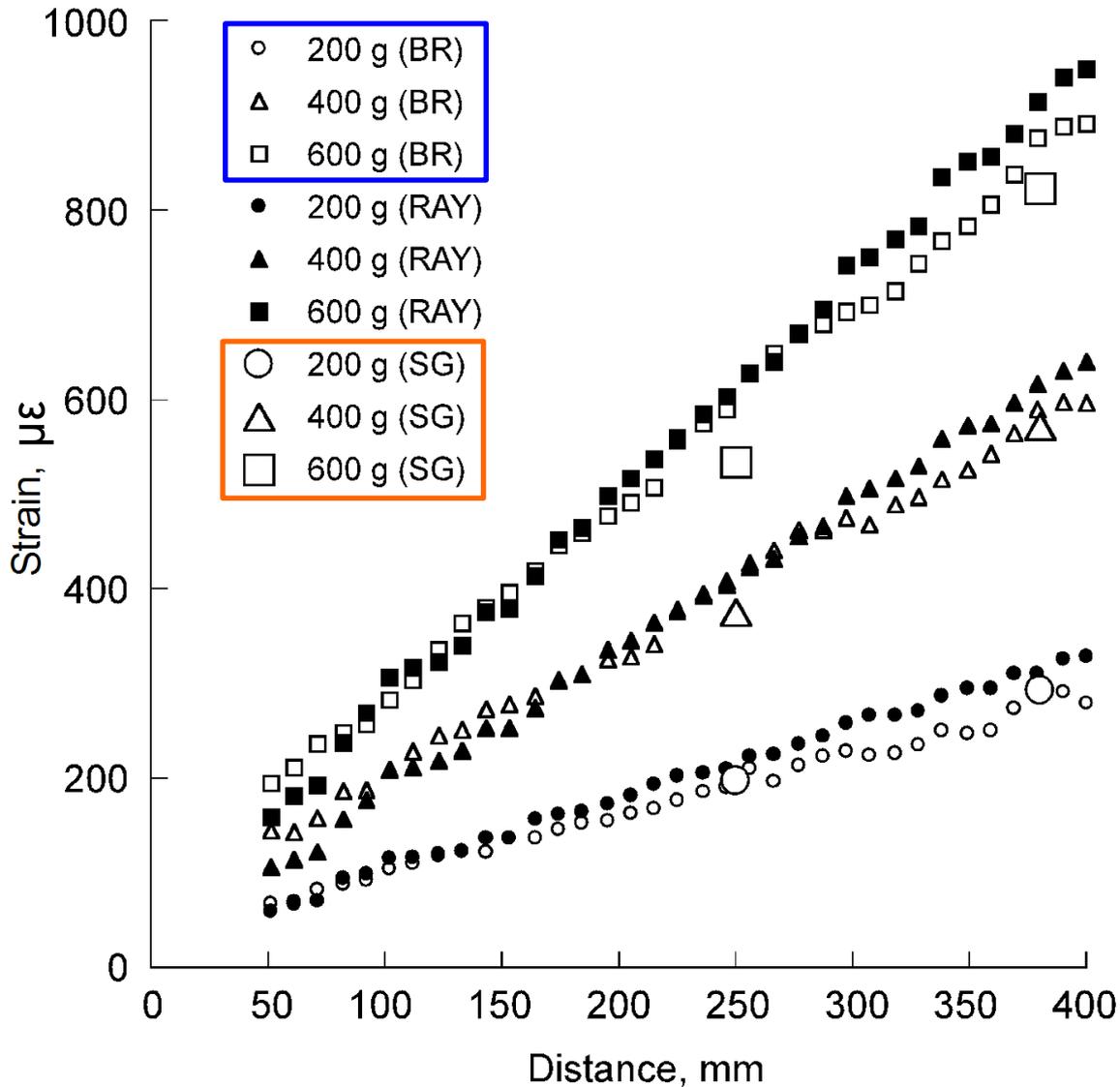
# 室温の条件下における片持ち梁のひずみ測定



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

線方向のひずみの感度係数

# Strains: Brillouin & Rayleigh Scattering, Strain gage



大気圧下(温度一定)では、光ファイバーがひずみゲージと同精度でひずみ測定ができた。

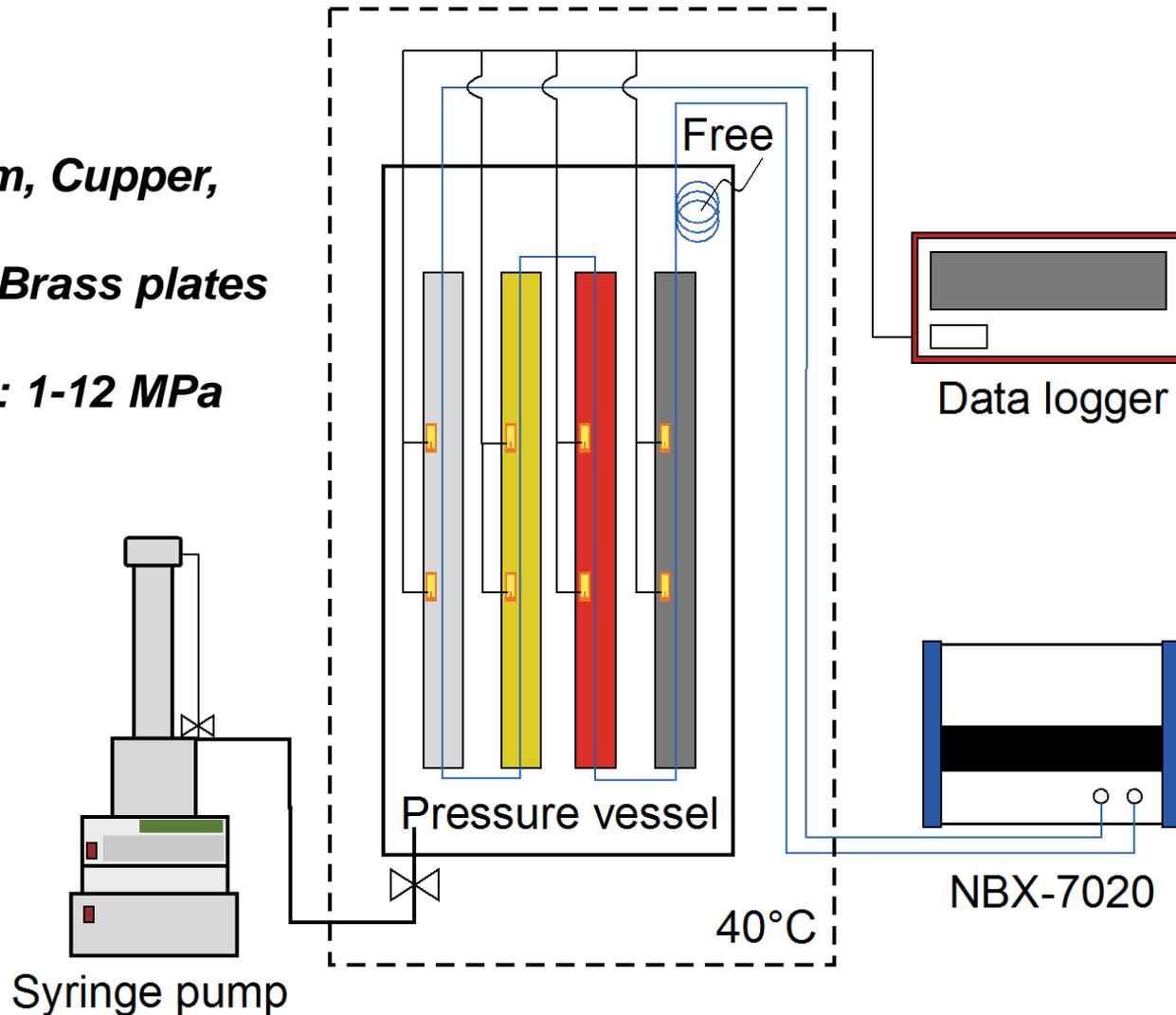
光ファイバー: **ひずみ分布**

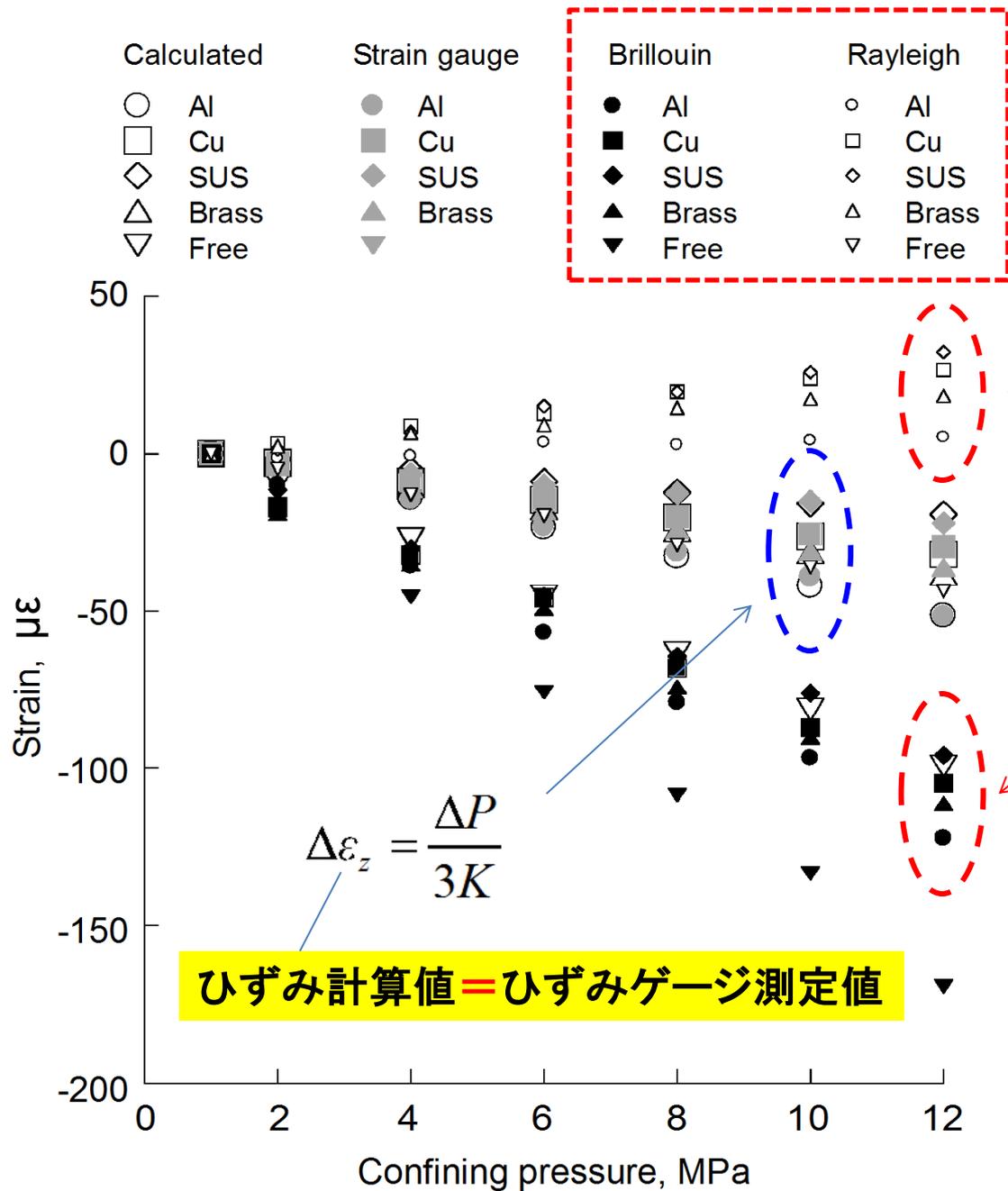
ひずみゲージ: **計測点のみ**

# Strain measurements under hydrostatic pressure

## Optic fiber vs Strain gage

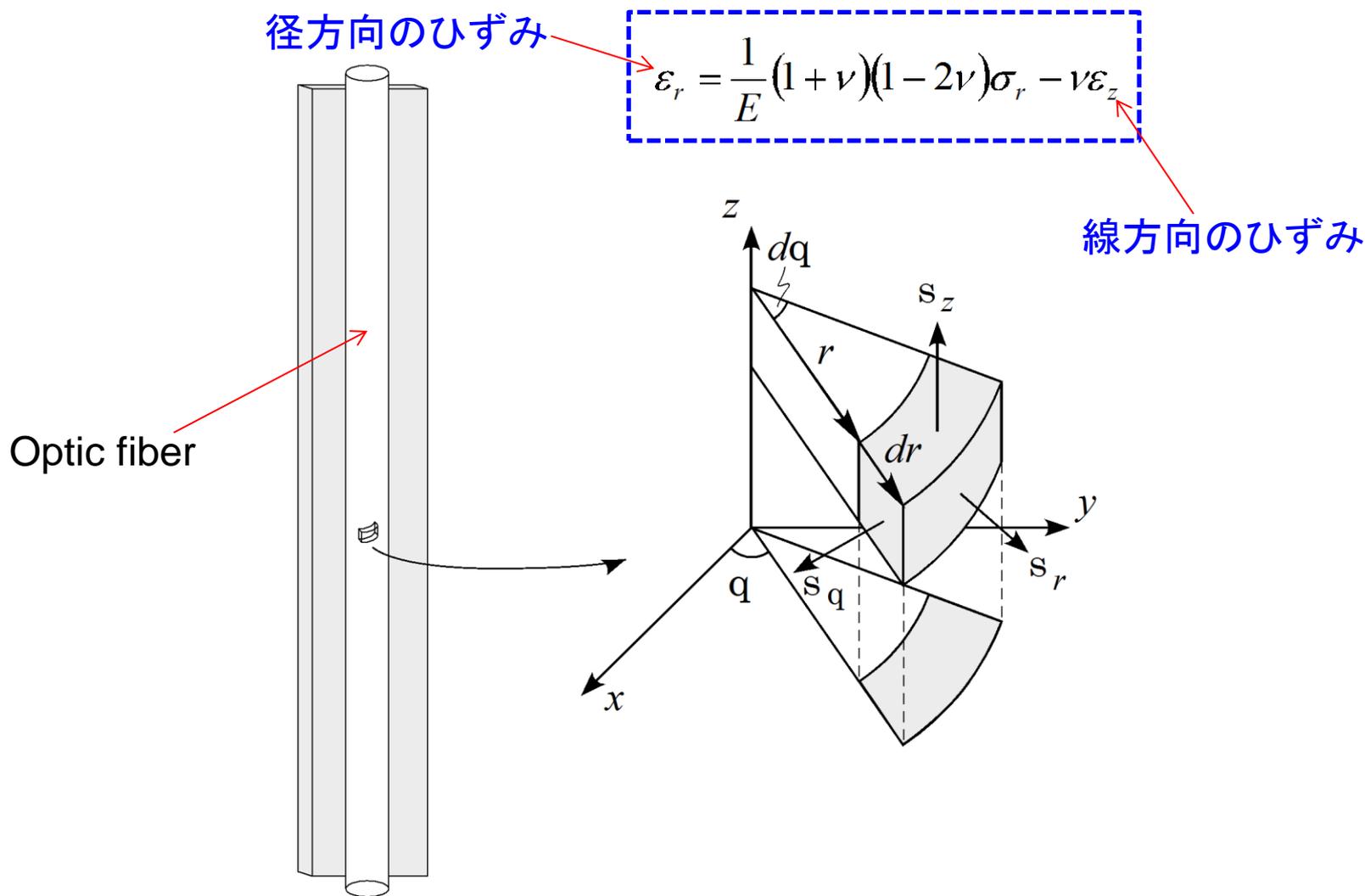
*Aluminum, Copper,*  
*SUS304, Brass plates*  
*Pressure: 1-12 MPa*





# 圧力条件下における光ファイバーを用いたひずみ測定

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



# 静水圧下における光ファイバーの線方向 & 径方向のひずみ

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

線方向のひずみ: ひずみゲージの実測値

表一1

Differential pressure, MPa	Strain, $\mu\varepsilon$							
	Al		Cu		SUS		Brass	
	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$	$\varepsilon_z$	$\varepsilon_r$
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

# 線方向 & 径方向のひずみと周波数シフト関係式

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

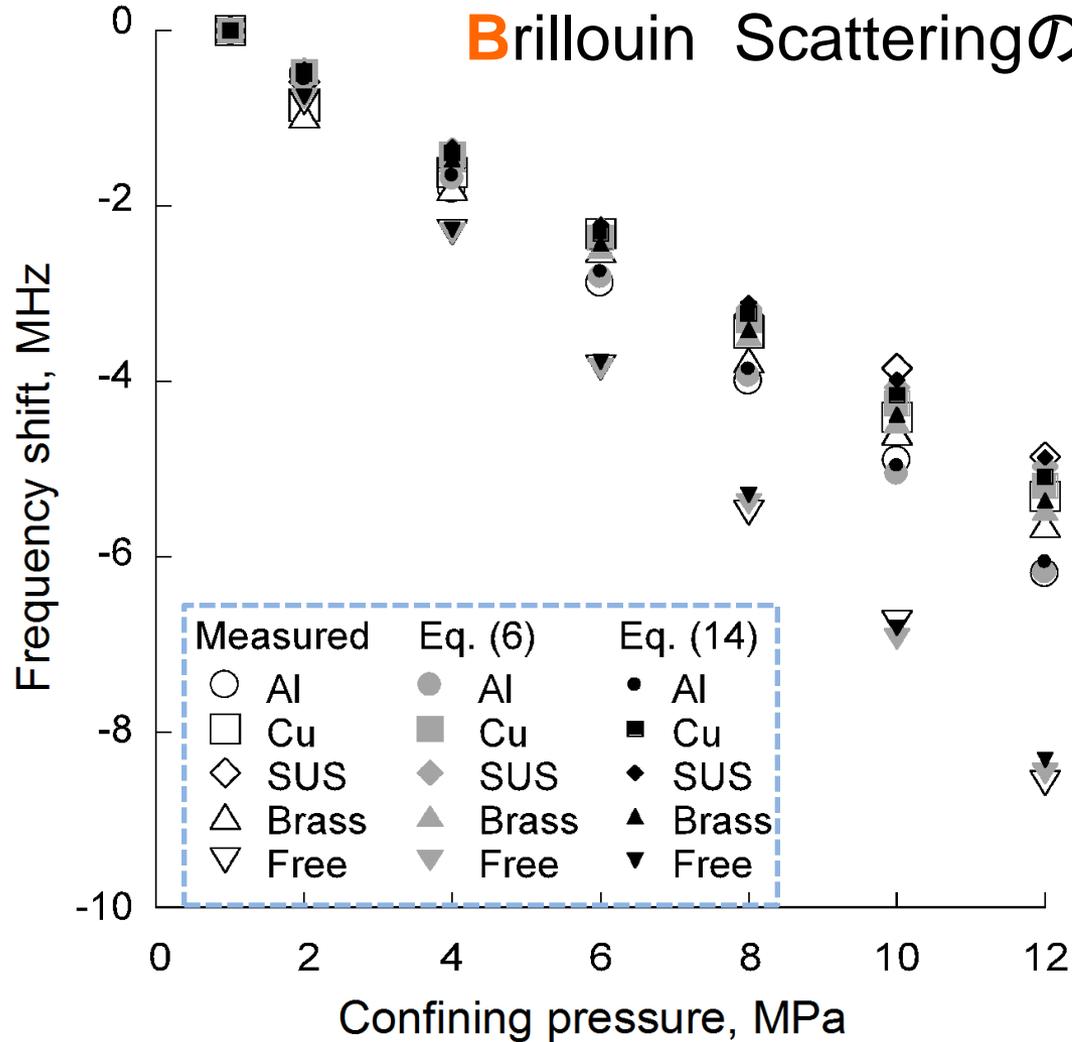
表-1のひずみデータと周波数シフトの実測値を基に、回帰分析により線方向 & 径方向ひずみの感度係数(A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub>)を最適値を求めた。

$$\Delta f_B = 0.0497 \Delta \varepsilon_z + 0.0346 \Delta \varepsilon_r$$

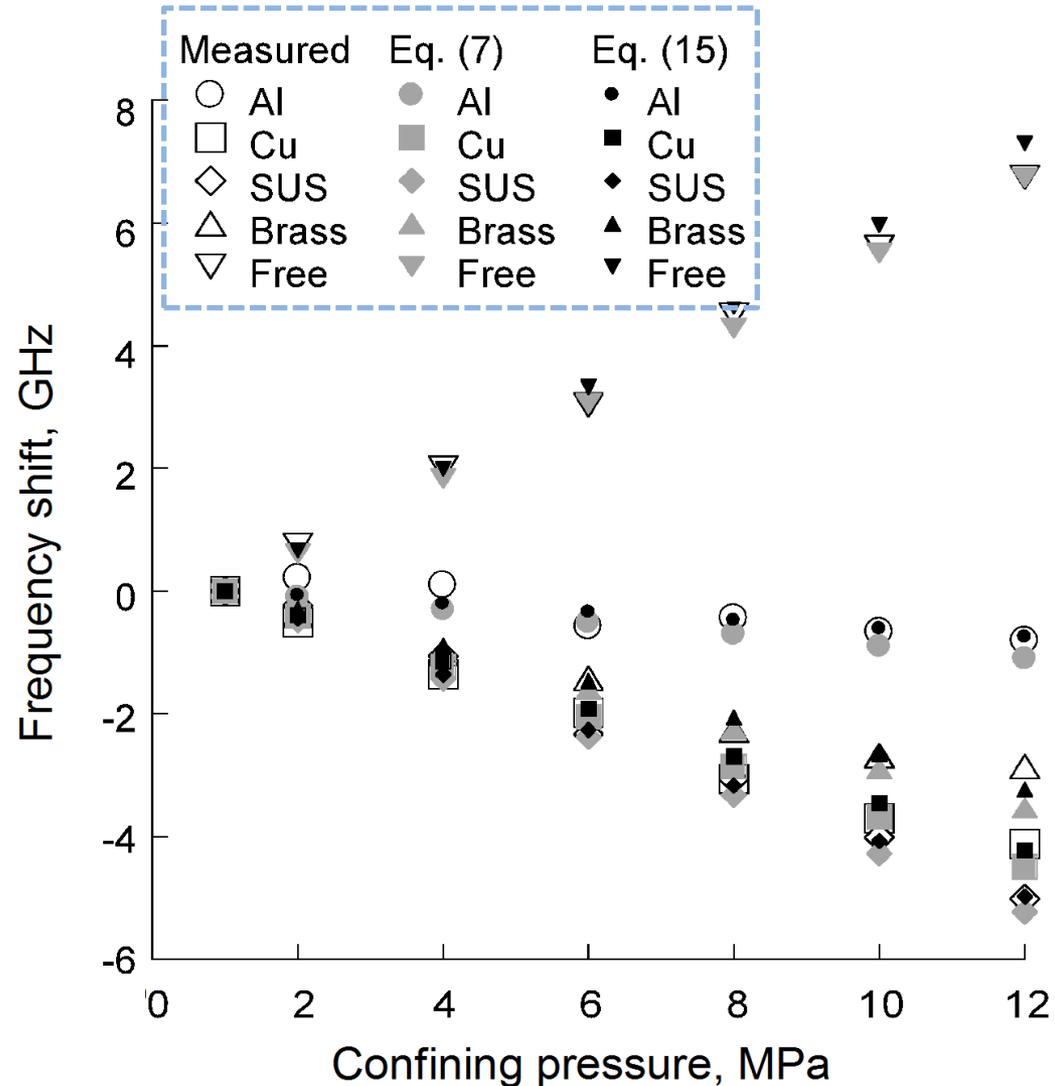
$$\Delta f_R = -0.130 \Delta \varepsilon_z + 0.0707 \Delta \varepsilon_r$$

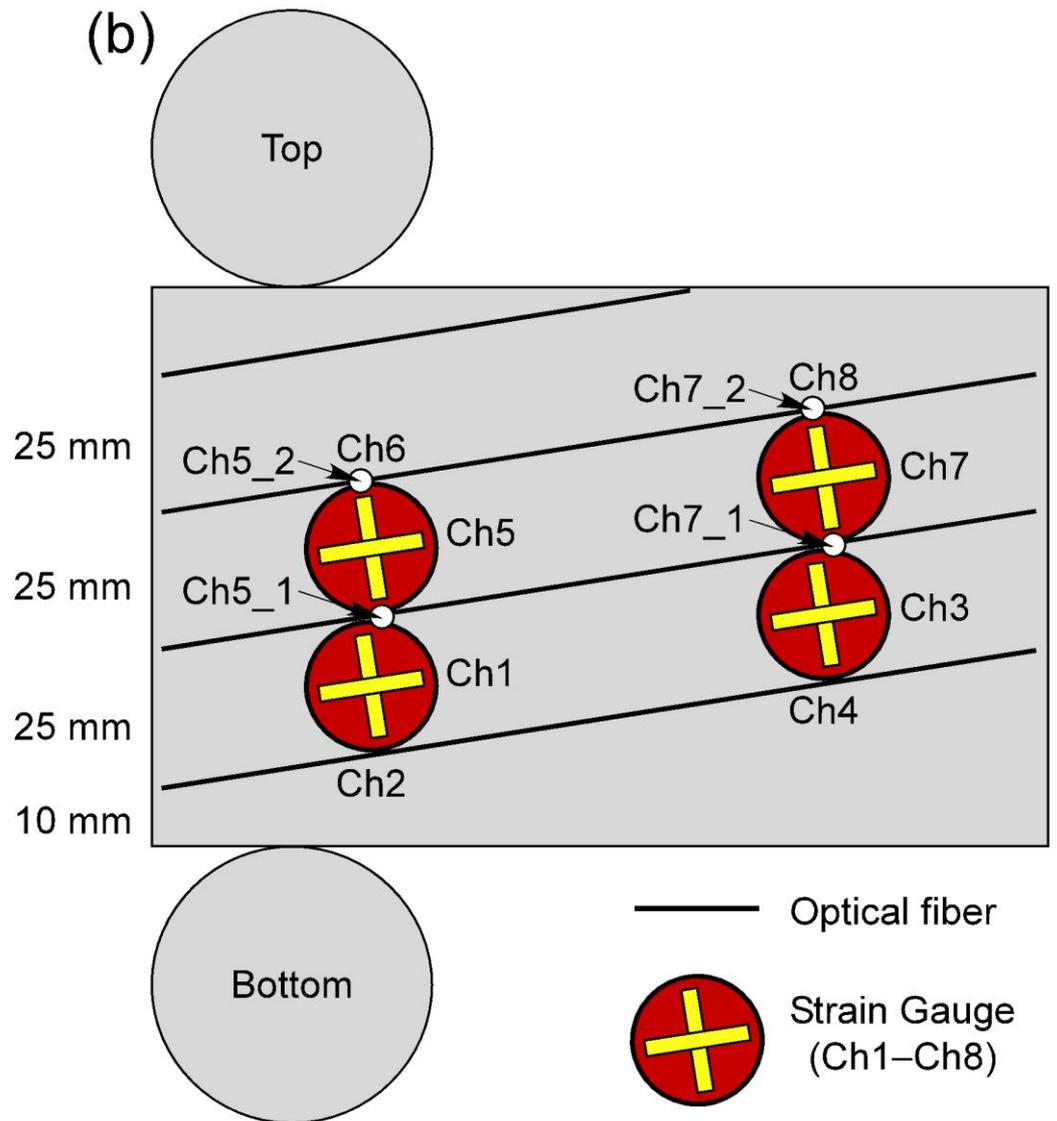
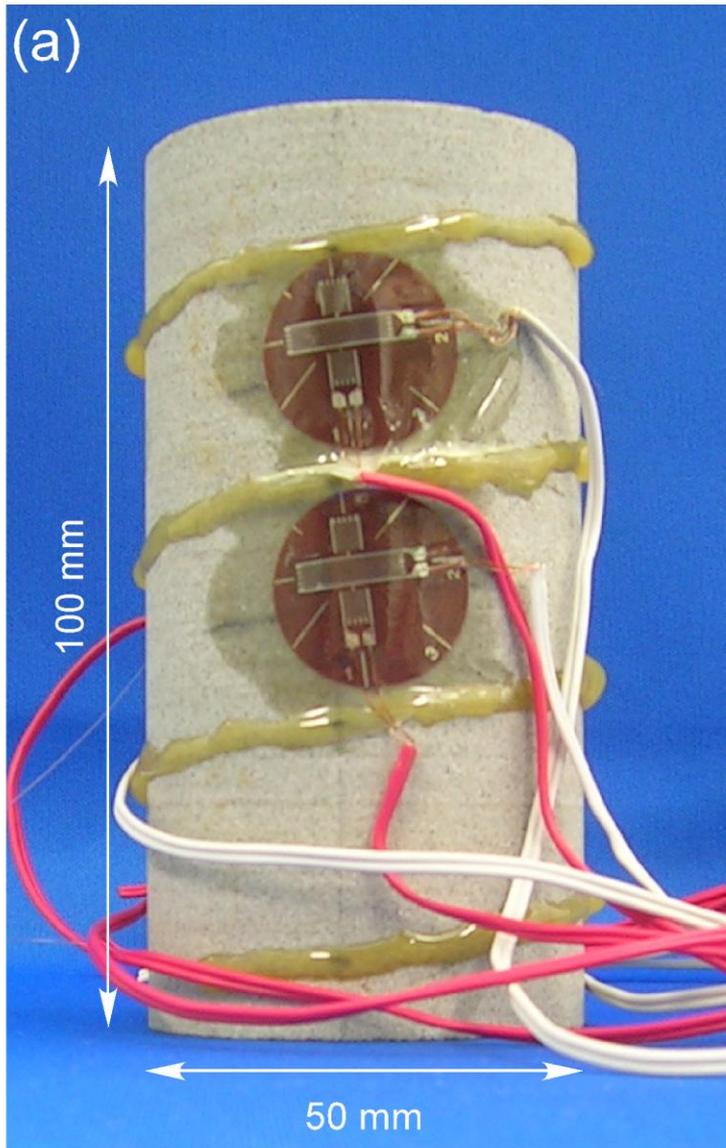
## 径方向ひずみの影響も考慮した

Brillouin Scatteringの計算結果 (Eq.14)

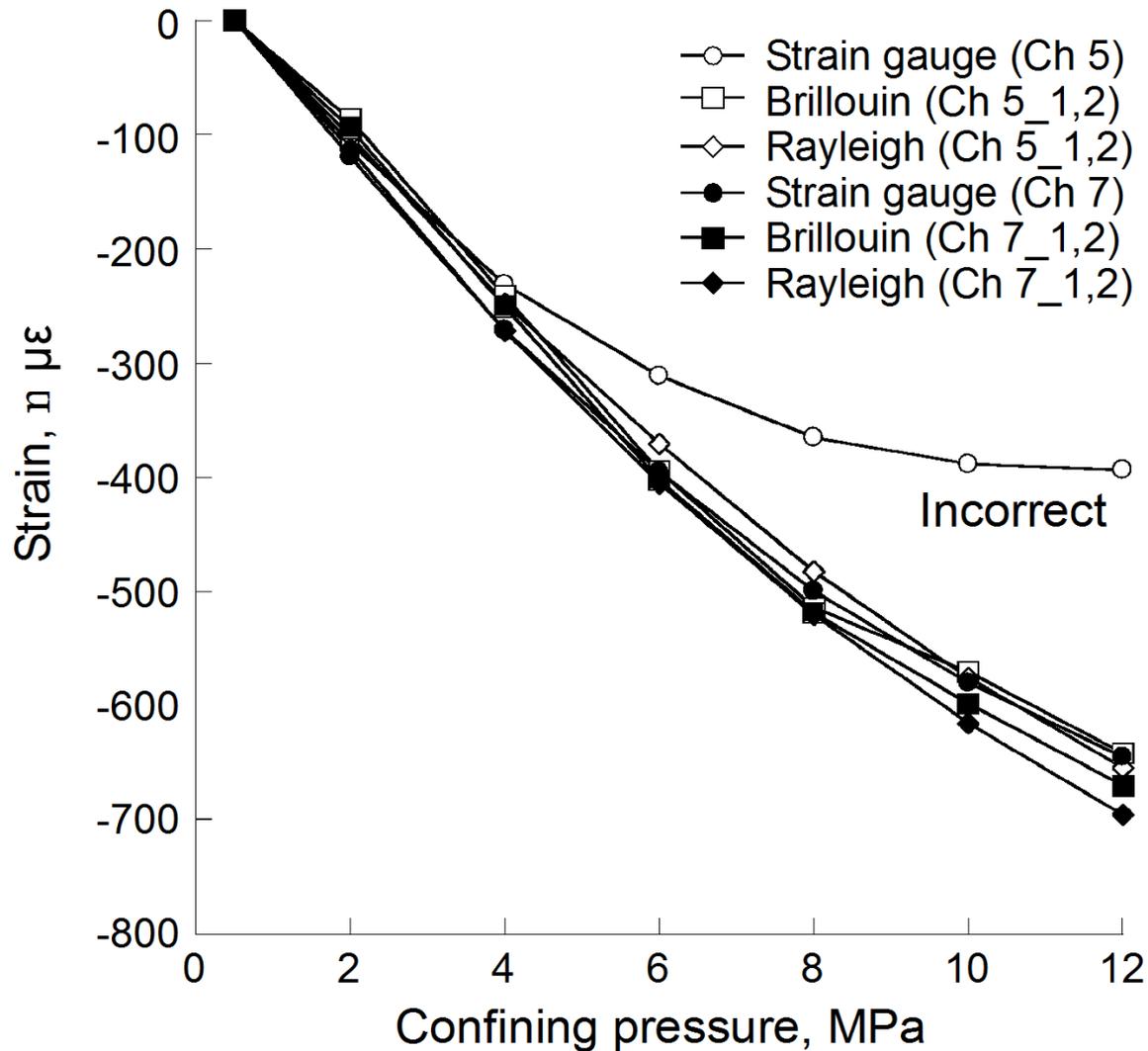


# 径方向ひずみの影響も考慮した Rayleigh Scatteringの計算結果 (Eq.15)





# 静水圧下の砂岩試料のひずみ測定結果 Optic fiber vs Strain gage



# まとめ

- 光ファイバーによるひずみ**測定手法を確立**し、大気圧下だけでなく、地下深部の圧力条件下でも**ひずみゲージと同等精度**で測定できることを金属材料と岩石試料を用いて確認した。
- 粗粒部と細粒部を有する砂岩試料を用いた静水圧下の圧縮実験では、光ファイバーで測定されたひずみが**粗粒部と細粒部**の圧縮特性を適切に反映できた。
- 光ファイバーを地中に埋設した場合は、埋設深度方向の地層特性を反映した**ひずみ測定結果**が**連続的に**得られるため、深部貯留層圧力の増加が地表の変状との関連性を明らかにできるようになった。
- 光ファイバー測定技術は、CO<sub>2</sub>圧入サイトの地層の**力学的安定性**のモニタリングだけでなく、**CO<sub>2</sub>漏洩の早期検出**にも役立つ。
- 温度・圧力・ひずみの測定結果を基に、CO<sub>2</sub>地中貯留の安全性だけでなく、地上 & 地中**構造物の安全管理**にも活用できる。

## 謝 辞

本研究は経済産業省の「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発」委託業務の成果の一部であり、記して謝意を表します。また、光ファイバー測定技術開発にご協力いただいた(株)ニューブレクス、(株)フジクラ、(株)関東建設、物理計測コンサルタント(株)、RITE貯留研究グループの関係者には厚く御礼を申し上げます。