

光ファイバに沿った 伸びや温度の分布測定技術



Nakamura Lab.
Optics Group

東京工業大学 科学技術創成研究院
未来産業技術研究所 助教
水野 洋輔

ymizuno@sonic.pi.titech.ac.jp

<https://www.nakamura.pi.titech.ac.jp/ymizuno/>

■ 日本社会が抱える課題

高度経済成長期に導入・整備された
社会インフラの老朽化や
地震等の自然災害による損傷

これまでの診断手法：

少数の専門家による**近接目視・打音調査**
(**定量性・汎用性に欠ける**、**多大な時間を要する**)



センシング技術の導入

■ 現状の電気センサの問題点

電気センサによる**多点診断**

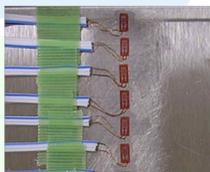
例えば、歪ゲージを複数の測定箇所に設置

利点

(1) 各所の歪が**定量的**に得られる

欠点

- (1) 歪ゲージの設置部位の情報しか得られない
(情報が得られない「**死角**」が必ず存在)
- (2) 歪ゲージの数だけ**電気配線**が必要、煩雑
- (3) **無線センサ**は、膨大な数の検査点を
長期保安するには**電池交換**が実用上の問題



三造試験センター(株)のHPより

■ 本研究の目的

現状の課題を、

光ファイバセンサの導入

によって解決したい

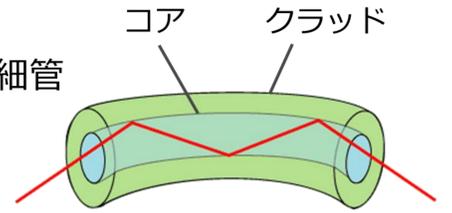


具体的には…

ガス配管・ガスタンクに
光ファイバを「**神経**」として埋め込む
(あるいは**貼り付ける**) ことで、
それらの**損傷を定量的かつ**
死角なしかつ電気配線なしかつ
電池なしかつ高速に測定したい

■ まず、光ファイバとは？

全反射を繰り返すことで、
遠くまで光を伝えられる細管

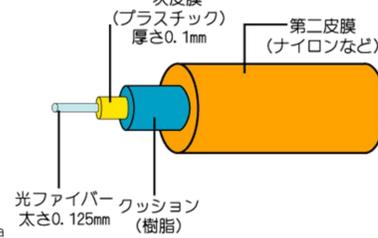


外見



Photo cited from wikipedia

構造



利点

- ・細い
- ・軽い
- ・安い
- ・曲げられる
- ・電磁界の影響を受けない

■ では、分布型光ファイバセンサとは？

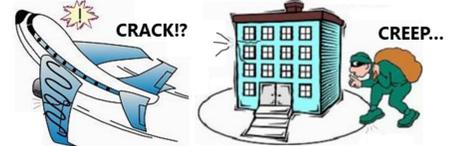
歪(ひずみ=伸び)や温度の分布測定の
ための**光ファイバセンサ**

長い光ファイバに沿った **どの位置で、**
どれくらいの歪や温度が
加わっているか知りたい！！

入射光



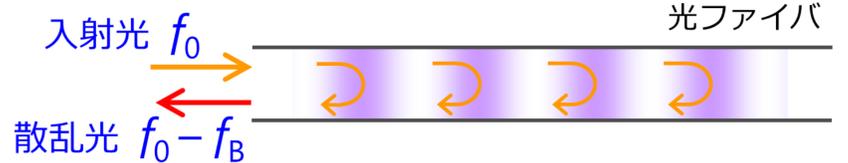
建物・橋梁・パイプライン・ダム・
航空機の翼・風車の羽根などの
ヘルスマonitoringが可能に
“光ファイバ神経網”



Pictures provided by Prof. Hotate

K. Hotate, "Fiber optic nerve systems based on Brillouin scattering for structural health monitoring",
10th Int'l Conf. on Information Optics and Photonics, Keynote Speech, S2, Beijing, China, 2018.

■ 光ファイバ中のブリルアン散乱とは？



- 特徴
- (1) 散乱光の**周波数が低周波側にシフト**
(ブリルアン周波数シフト: **BFS**)
※ 散乱光のスペクトルを
ブリルアン利得スペクトル (**BGS**) と呼ぶ
 - (2) **BFSは** 光ファイバ中の**歪や温度に比例**

BFS → **歪や温度変化の大きさ**

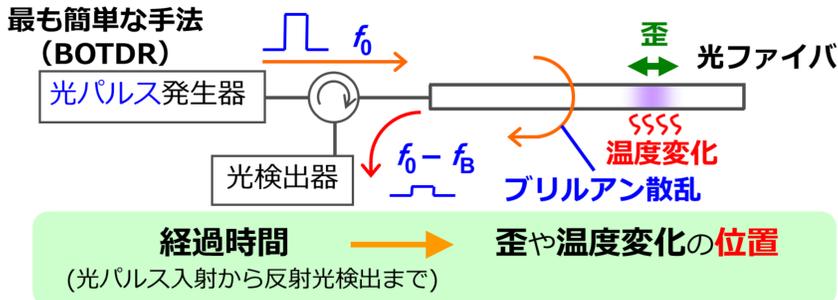
G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics (Academic Press, California, 1995).

■ ブリルアン分布型光ファイバセンサの分類

Brillouin optical ■-**domain** ■ (**BO**■**D**■)

Access types (■)	Domains for resolving locations (■)		
	Time	Frequency	Correlation
Reflectometry (one end)	BOTDR T. Kurashima, 1993	BOFDR A. Minardo, 2016	BOCDR Y. Mizuno, 2008
Analysis (two ends)	BOTDA T. Horiguchi, 1989	BOFDA D. Garus, 1996	BOCDA K. Hotate, 2000

■ Brillouin光相関領域反射計 (BOCDR) とは？



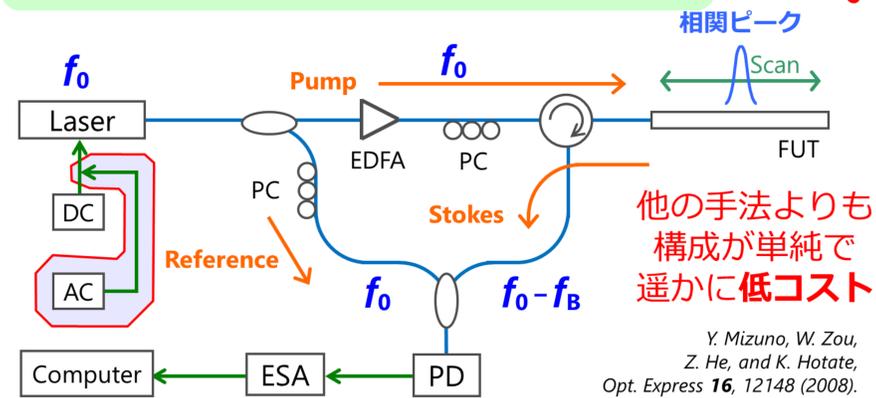
T. Kurashima et al., IEICE Trans. Commun. E76-B, 382 (1993).

我々はこれまでに、**連続光の相関を制御**することで、**任意の位置における光散乱スペクトル (BGS) を抽出**する技術を開発し、**ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)** と名付けた。

Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, Opt. Express **16**, 122148 (2008).

■ BOCDR の構成は？

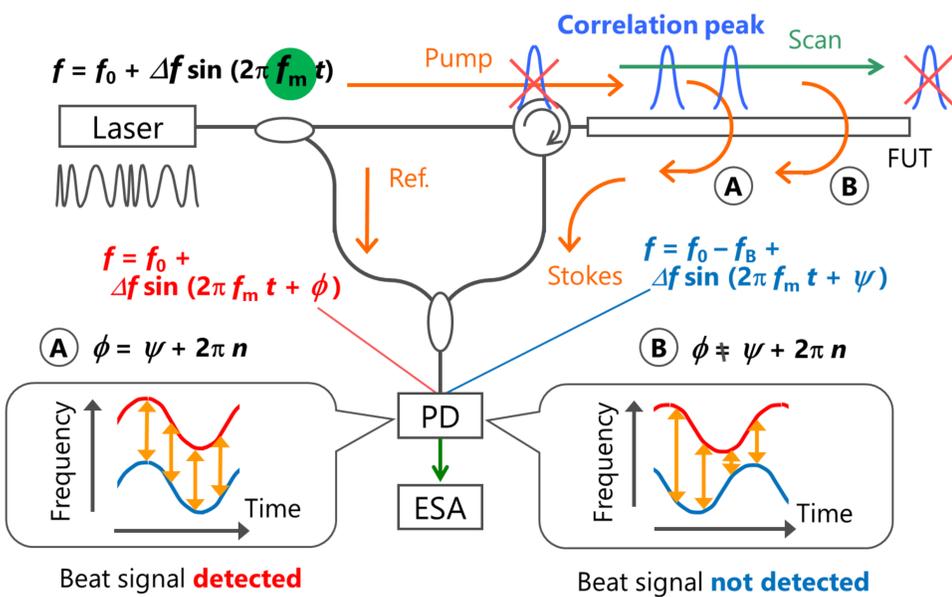
ブリルアン散乱を観測する基本的な系に対し、光源の駆動電流を変調するだけで実装可能



Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, Opt. Express **16**, 12148 (2008).

EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FUT: fiber under test, PC: polarization controller, PD: photo detector

■ BOCDR の動作原理は？



■ BOCDR の性能は？

● 空間分解能

$$\Delta z = \frac{c \Delta \nu_B}{2\pi n f_m \Delta f} > \frac{c}{\pi n BFS}$$

● 測定可能距離

$$d_m = \frac{c}{2n f_m}$$

● 両者の比
(実効的な計測点の数)

$$N = \frac{d_m}{\Delta z} = \frac{\pi \Delta f}{\Delta \nu_B} < \frac{\pi BFS}{2 \Delta \nu_B}$$

c 光速

$\Delta \nu_B$ Brillouin線幅

n コアの屈折率

f_m 変調周波数

Δf 変調振幅

Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, J. Lightwave Technol. **28**, 3300 (2010).

■ BOCDR の特長は？

- (1) **高い信号対雑音比**
(連続光のため光パルス法よりも信号が強い)
- (2) **世界最高の空間分解能** (mmオーダー)
- (3) 光ファイバの**片端からの光入射**で動作
- (4) **ランダムアクセス機能**
(任意の位置のみを高速で計測可能)
- (5) **低コスト** (他の手法よりも遥かに)

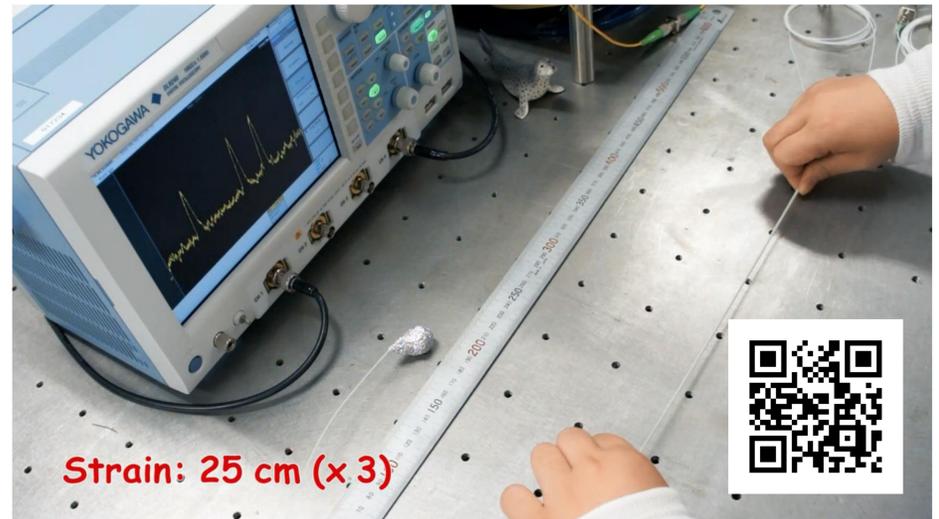
Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate, Opt. Express **16**, 12148 (2008).
Y. Mizuno, Z. He, and K. Hotate, Opt. Commun. **283**, 2438 (2010).

近年、**世界最速動作**の実現にも成功

➔ 片端光入射型で**リアルタイム分布測定**を初実証

Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Fukuda, K. Y. Song, and K. Nakamura, Light: Sci. Appl. **5**, e16184 (2016).
H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, IEEE Photon. J. **8**, 6802807 (2016).

■ デモ動画をお見せしています！



東工大公式 YouTube アカウントより公開中 <https://youtu.be/0TKUivvYbH0>

■ これまでの研究展開

- (1) 測定感度の実験条件依存性の解明 (2017)
- (2) 最終システム出力の形状解析 (2016)
- (3) 世界最短の歪区間検出の実証 (2018)
- (4) 損失無依存動作の実現 (2018)
- (5) プラスチック光ファイバの適用 (2017)
- (6) 実際の構造物に対する動作検証 (2018)
- (7) 偏波保持光ファイバの適用 (2019)
- (8) 10km遠方での動作確認 (2019)
- (9) 歪ダイナミックレンジの拡張 (2019)
- (10) 外部変調方式による各種性能向上 (2019)

■ 現在取り組んでいること

- (1) 最高測定速度の解明
- (2) 最高測定精度の解明
- (3) 小型化による可搬性の向上・低コスト化
- (4) AIを用いた空間分解能の向上
- (5) 正弦波以外の光周波数変調による各種性能向上
- (6) 動画雑音処理技術の導入による精度の向上

■ まとめと企業の方々へのメッセージ

光ファイバに沿った伸びや温度の分布、つまり、「どこにどれくらいの伸びや温度変化があるのか」を教えてくれるオリジナル計測技術「**ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR)**」をご紹介します。

産業界の皆様におかれましては、社会インフラの健全性診断以外で、**この技術が貢献できそうな応用先**をお教え頂けましたら幸いです。