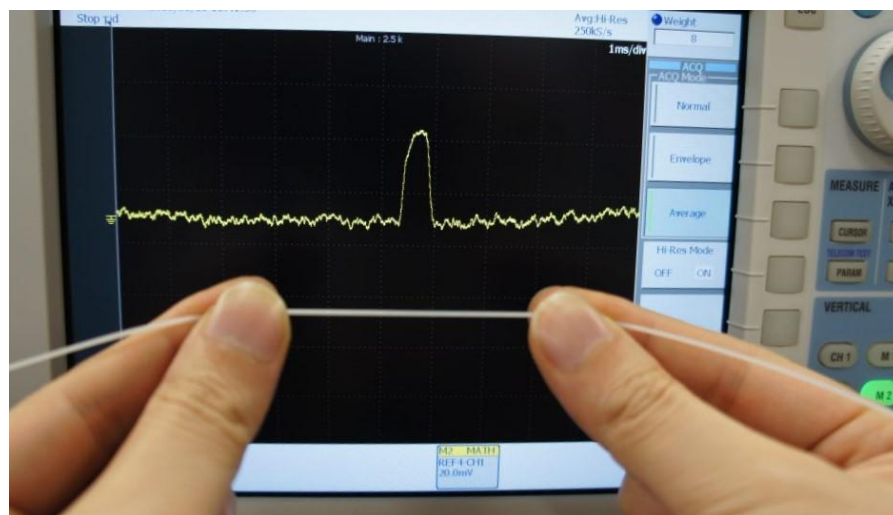


分布型光ファイバセンシングの最新展開



横浜国立大学 大学院工学研究院

水野 洋輔

令和2年度「一般研究助成」を賜りまして、
誠にありがとうございました。深く御礼申し上げます。

国民生活の安全・安心に寄与する 分布型光ファイバセンシング

1. 背景と目的
2. 分布型センシングの原理
3. BOCDRの最新展開
4. POFヒューズ（おまけ）
5. まとめ



モランディ橋の崩落（伊, 2018.8）



頻発する地震による被害（日本）

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

社会インフラの**健全性診断**の需要の高まり

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**など

- × 定量性に欠ける
- × 多大な時間を要する
- × 人材が不足している
- × 教育コストが大きい



センシング技術の導入

電気センサによる多点診断

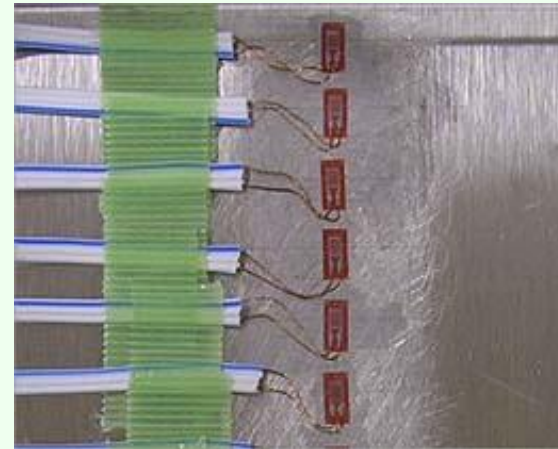
例えば、歪ゲージや温度計を複数の測定箇所に設置

利点

- (1) 各所の歪・温度が**定量的**に判明

欠点

- (1) 歪ゲージ・温度計の設置部位の情報のみ
(情報が得られない**「死角」**が必ず存在)
- (2) 歪ゲージ等の数だけ**電気配線**が必要、煩雑



Adapted from 三造試験センター

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…

さまざまな社会インフラに
光ファイバを「**人工神経**」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
高速かつ**精密**に測定したい

“神経”をもち、自分で痛みがわかる構造物 「スマートストラクチャ」の実現



橋梁



ダム



鉄道



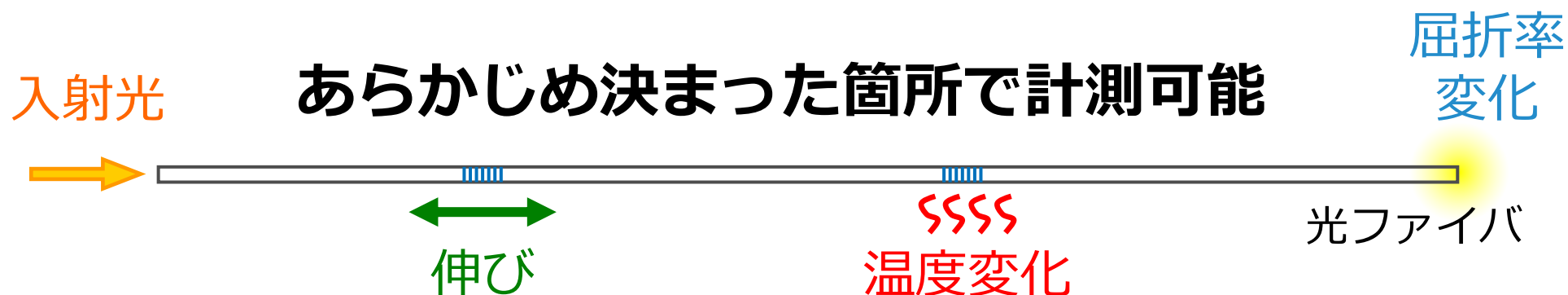
パイプライン



工場

Adapted from
Yahoo News

1. 単点型・多点型センサ



本日のメイントピック

2. 分布型センサ



国民生活の安全・安心に寄与する 分布型光ファイバセンシング

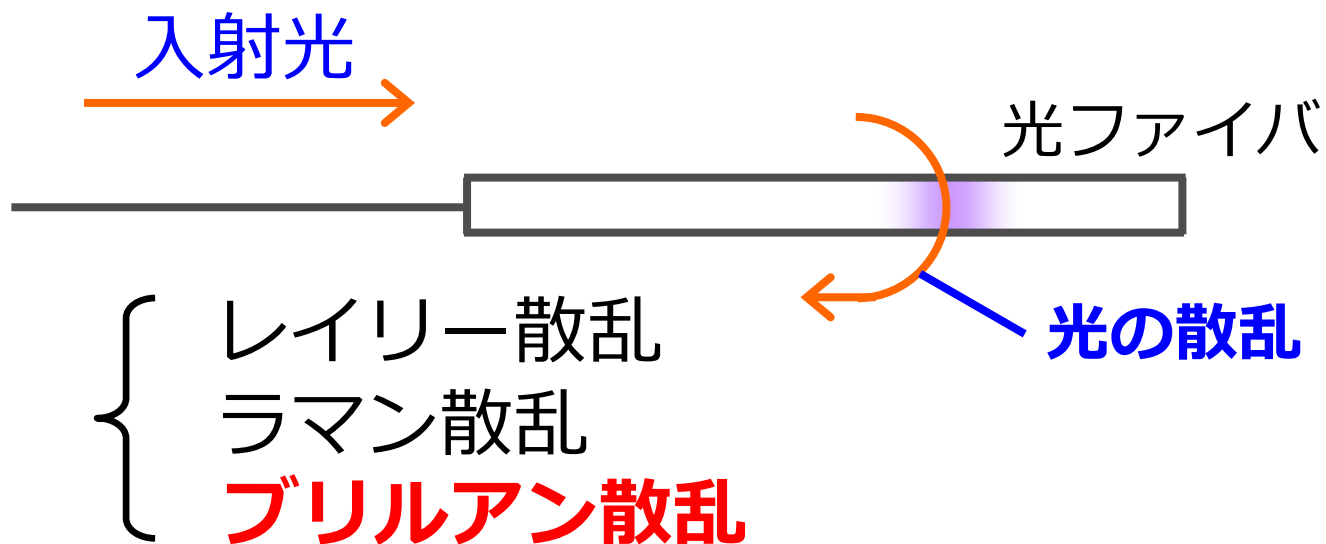
1. 背景と目的
2. 分布型センシングの原理
3. BOCDRの最新展開
4. POFヒューズ（おまけ）
5. まとめ

歪や温度の分布測定を実現するには・・・

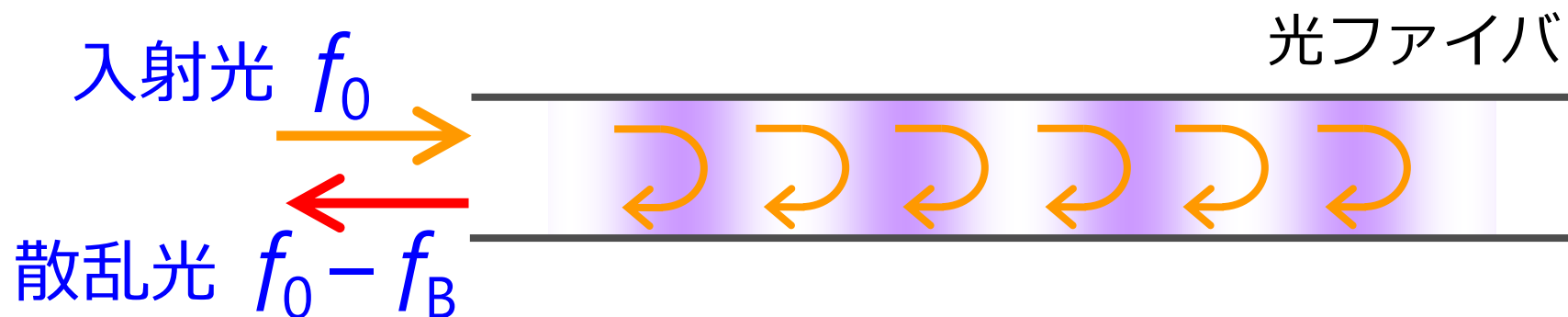


光ファイバ中の光の散乱現象

(光ファイバ中では 基本的には 反射光となる)



光ファイバ中のブリルアン散乱

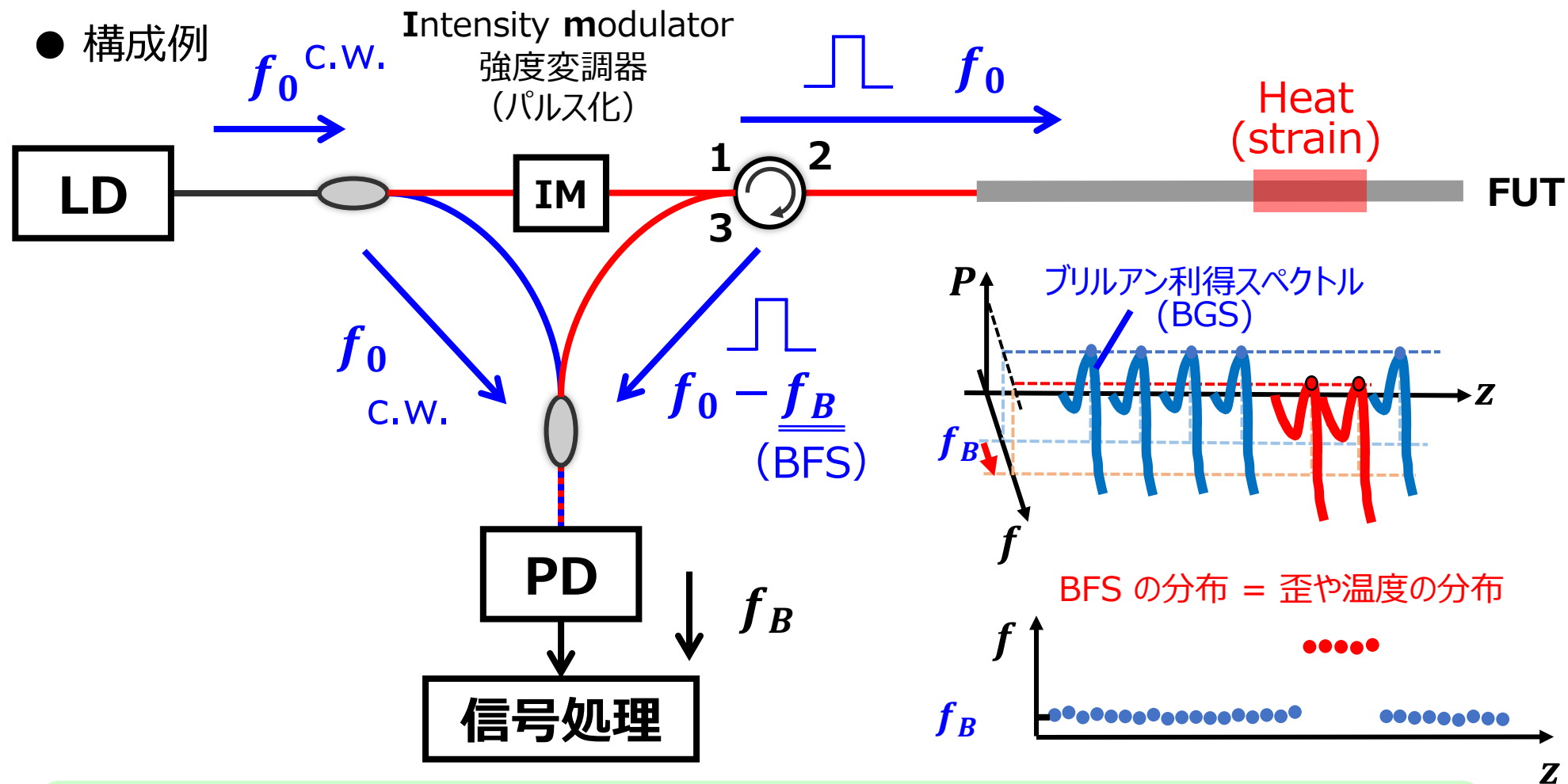


- 特徴 {
- (1) 散乱光の周波数が低周波側にシフト
(ブリルアン周波数シフト: **BFS**)
※ 散乱光のスペクトルを
ブリルアン利得スペクトル (**BGS**) と呼ぶ
 - (2) **BFS**は 光ファイバ中の歪や温度に比例

BFS → 歪や温度変化の大きさ

Brillouin optical ■-domain ■ (BO■D■)

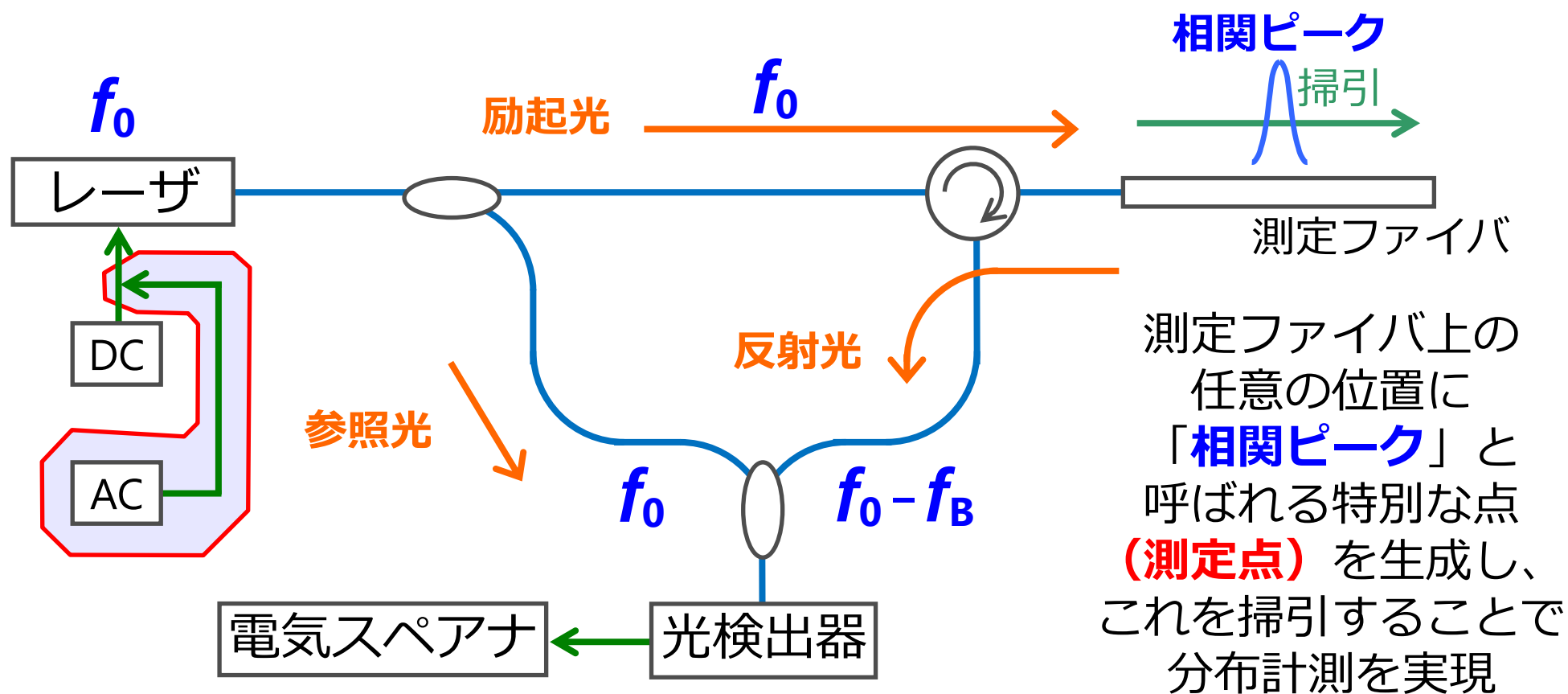
Access types (■)	Domains for resolving locations (■)		
	Time	Frequency	Correlation
Reflecto- metry (one end)	BOTDR T. Kurashima, 1993	BOFDR A. Minardo, 2016	BOCDR Y. Mizuno, 2008
Analysis (two ends)	BOTDA T. Horiguchi, 1989	BOFDA D. Garus, 1996	BOCDA K. Hotate, 2000



経過時間
(光パルス入射から反射光検出まで)

歪や温度変化の位置

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**選択的に抽出**する技術を開発し、**BOCDR** と名付けた。



- 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

n コアの屈折率

f_m 変調周波数

$\Delta \nu_B$ ブリルアン線幅

Δf 変調振幅

国民生活の安全・安心に寄与する 分布型光ファイバセンシング

1. 背景と目的
2. 分布型センシングの原理
3. BOCDRの最新展開
4. POFヒューズ（おまけ）
5. まとめ

利点

連続光に基づく

→ 光パルス法よりも**散乱信号が強い**

高空間分解能 (サブcmオーダー)

*Y. Mizuno, Z. He, and K. Hotate, Opt. Commun. **283**, 2438 (2010).*

*S. Manotham, M. Kishi, Z. He, and K. Hotate, Proc. SPIE **8351**, 835136 (2012).*

光ファイバの**片端からの光入射**で動作

ランダムアクセス機能により任意位置で高速計測可

他の手法よりも遥かに**低コスト**

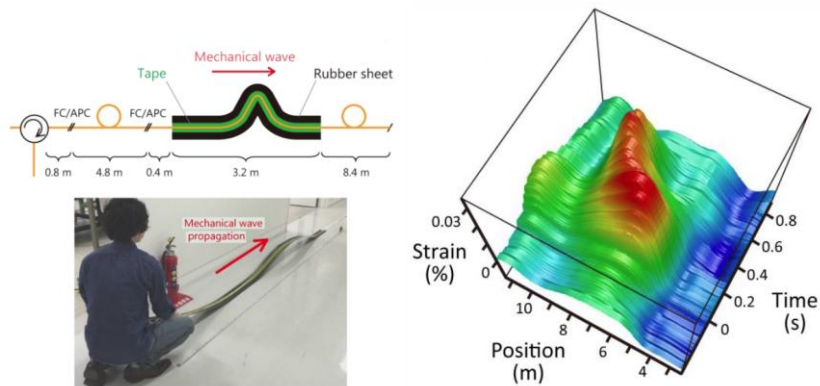
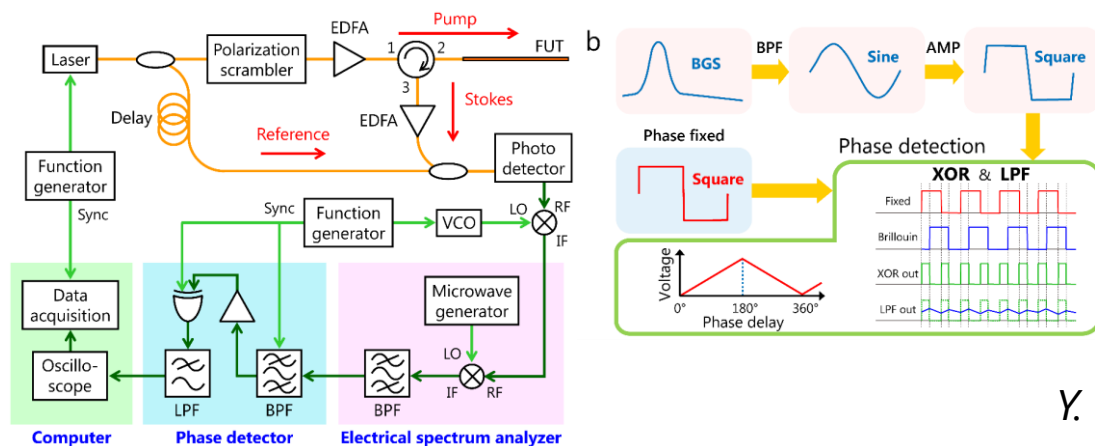
従来までの欠点

低速な周波数掃引によって散乱スペクトルを取得

→ 比較的**低い測定速度** (サンプリングレート < 20 Hz)

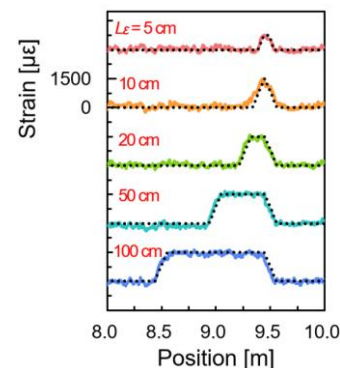
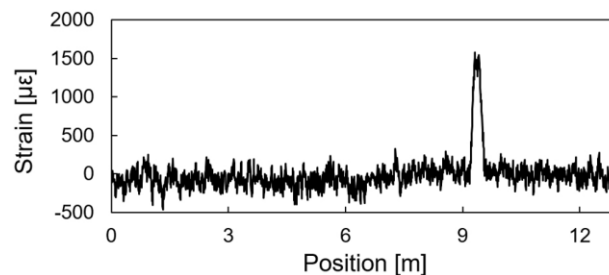
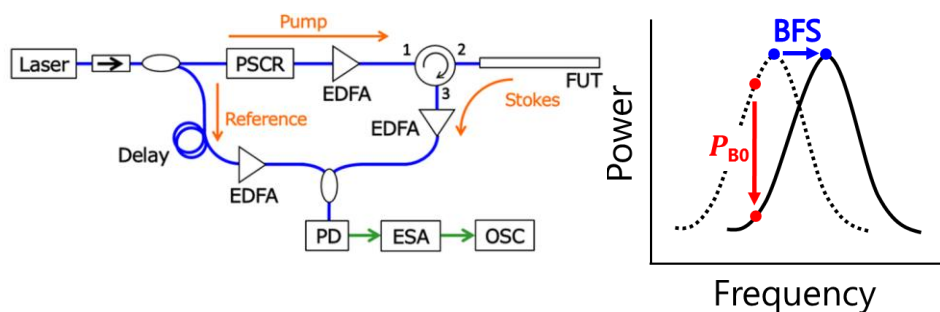
*Y. Mizuno, Z. He, and K. Hotate, IEEE Photon. Technol. Lett. **21**, 474 (2009).*

(1) 位相検出 BOCDR



Y. Mizuno, et al, *Light: Sci. Appl.* **5**, e16184 (2016).

(2) 傾斜利用 BOCDR

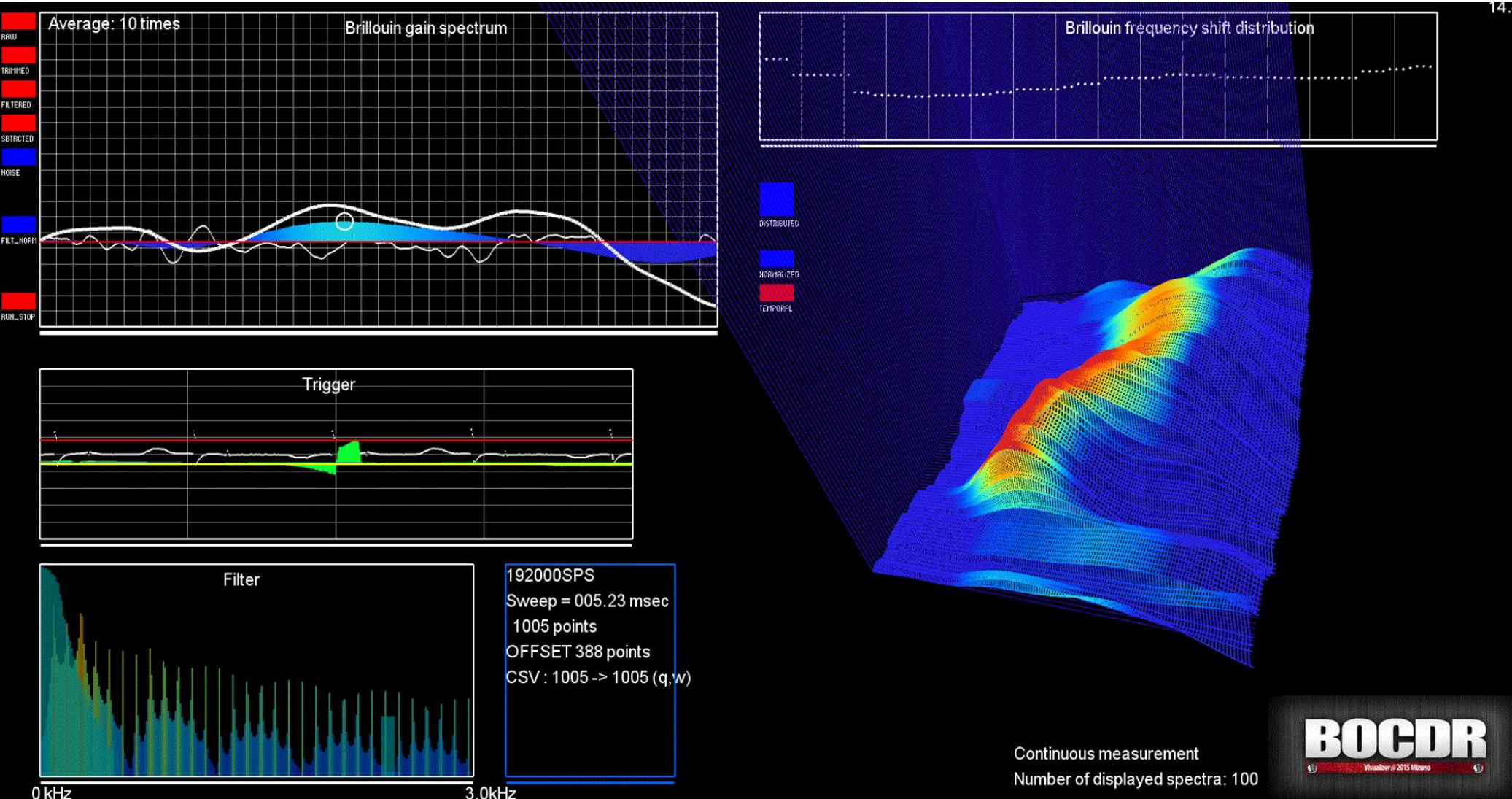


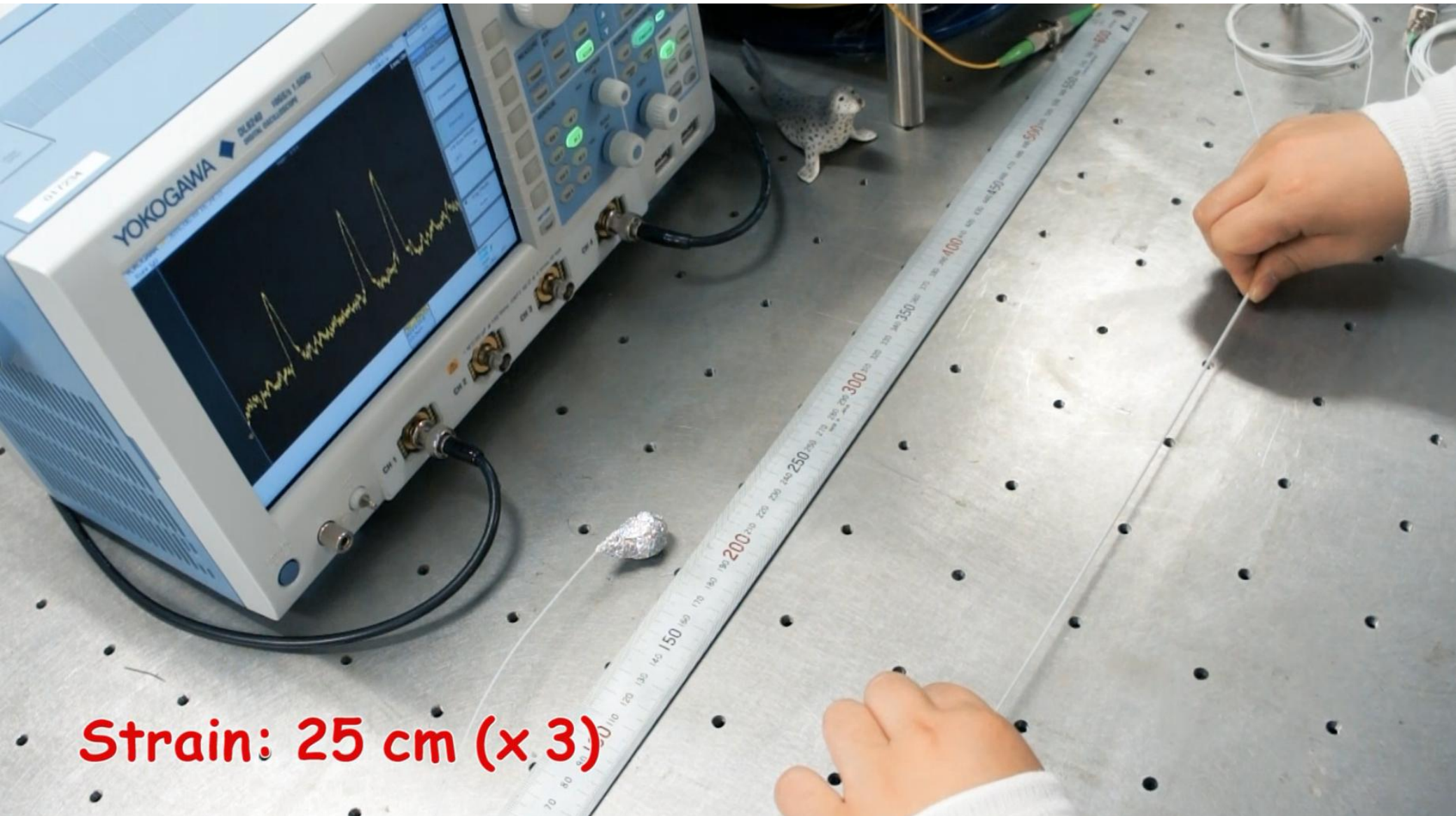
H. Lee, et al., *IEEE Photon. J.* **8**, 6802807 (2016).

(3) 高速エレクトロニクス BOCDR

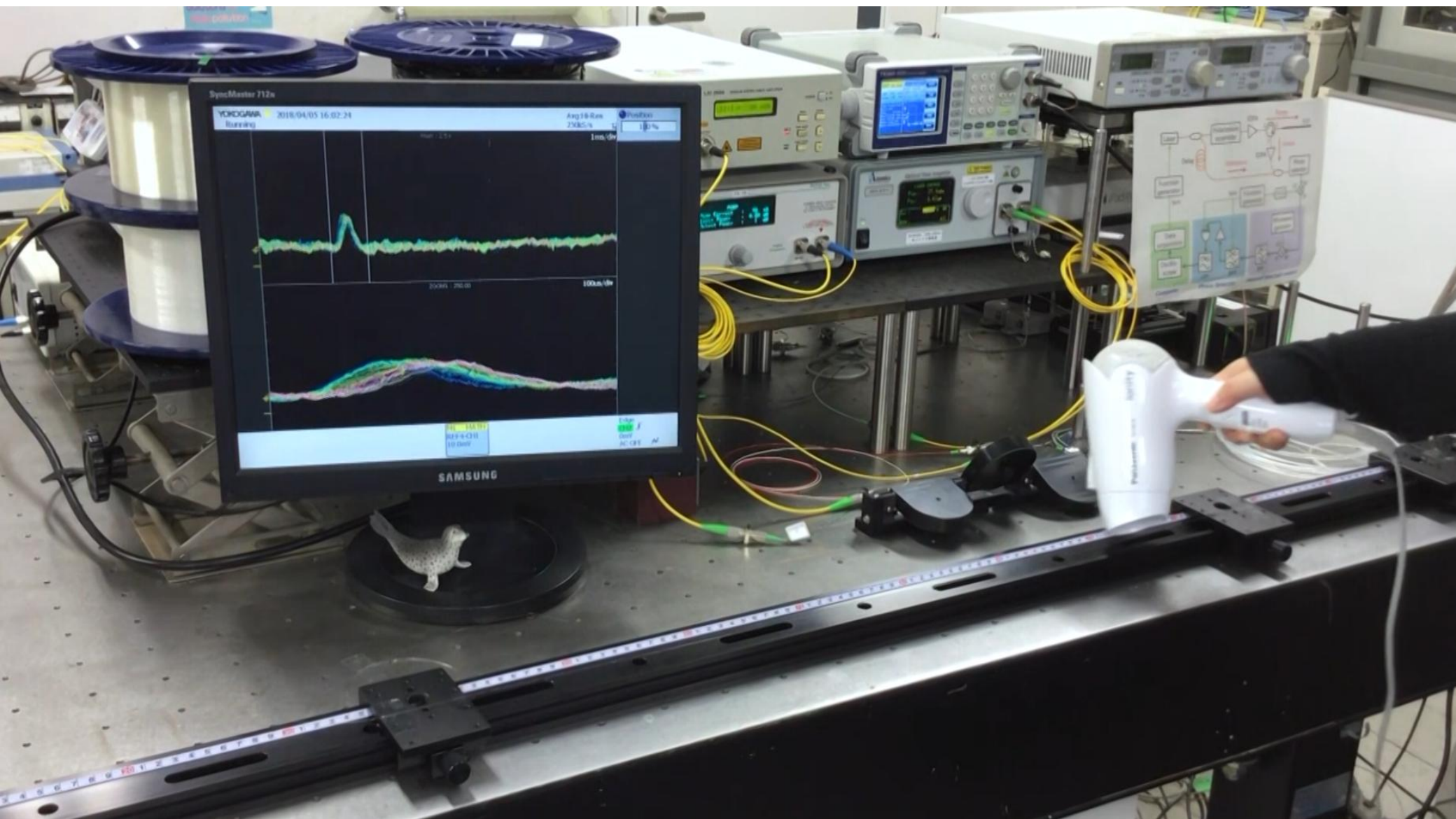
K. Noda, et al., *Proc. CLEO 2024*, paper AM3A.1.







Strain: 25 cm (x 3)



電気スเปアナによる周波数掃引の撤廃により
>100 kHz の高速サンプリングレートが実現
(位相検出BOCDR & 傾斜利用BOCDR)

Y. Mizuno, et al., Light: Sci. Appl. 5, e16184 (2016).

H. Lee, et al., IEEE Photon. J. 8, 6802807 (2016).



しかし...

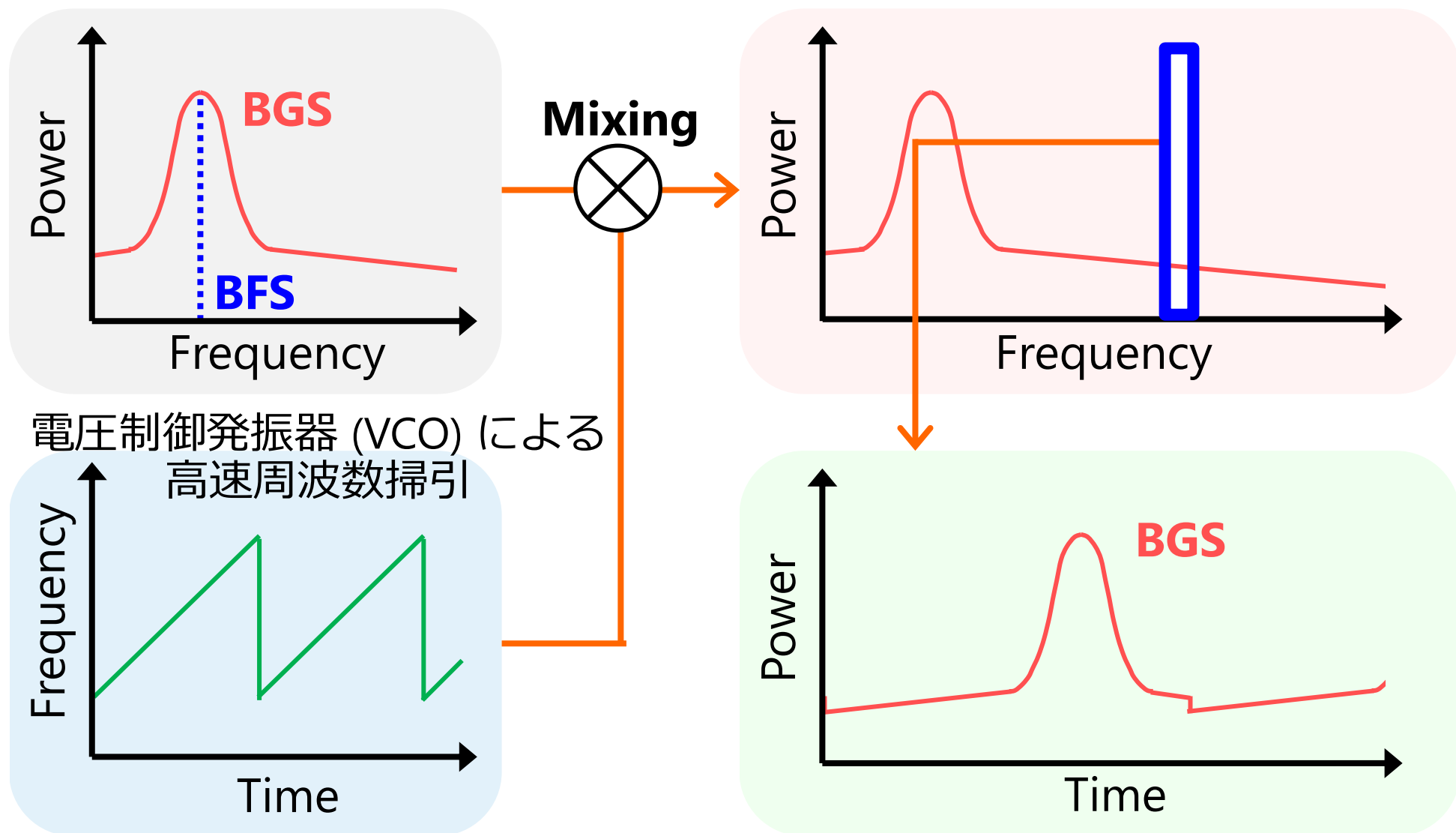
歪ダイナミックレンジ (測定可能な歪レンジ) が
0~0.2% に制限されてしまう

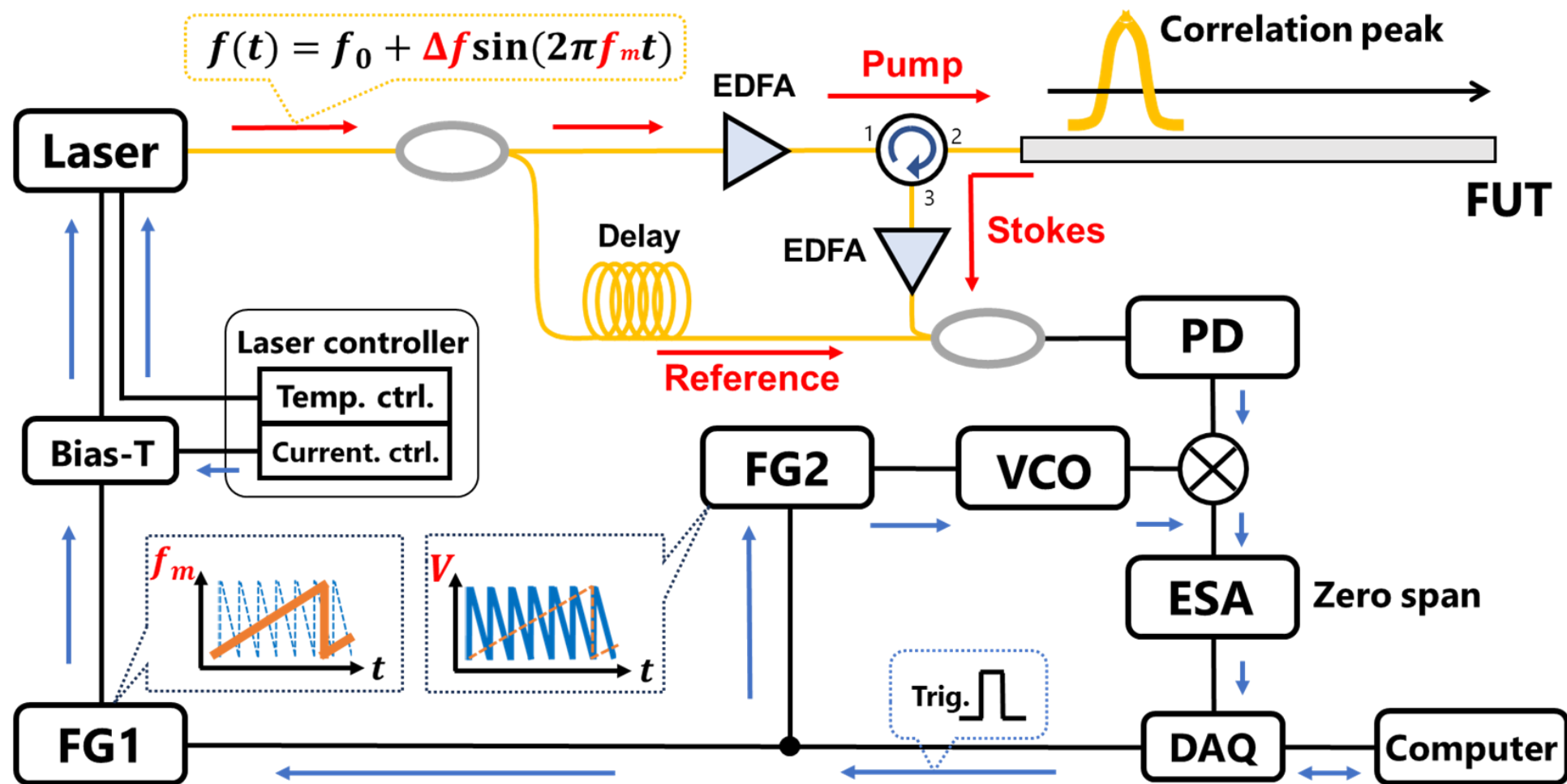


そこで...

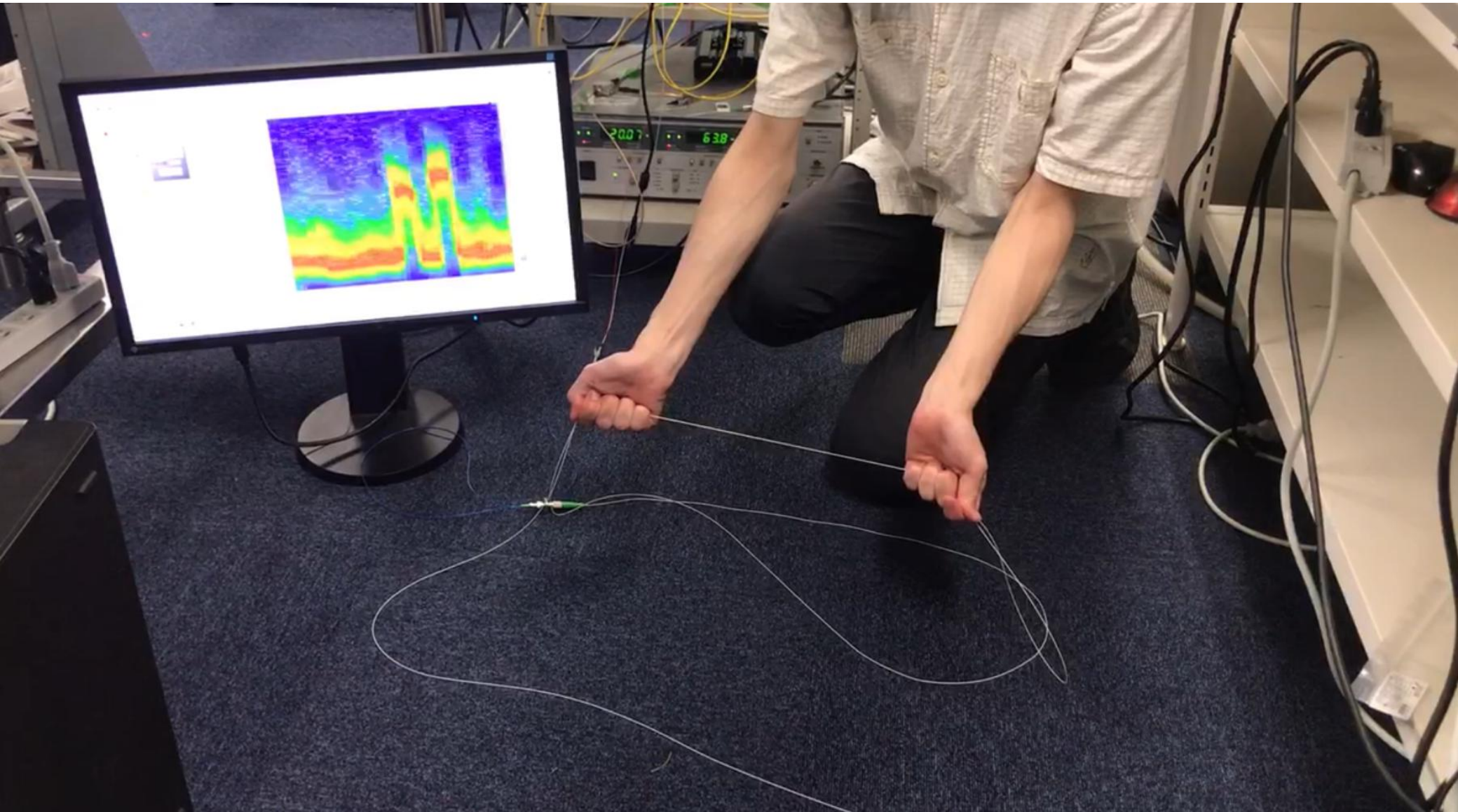
歪ダイナミックレンジの制限のない高速BOCDR

散乱スペクトル (BGS) の周波数領域から時間領域への変換





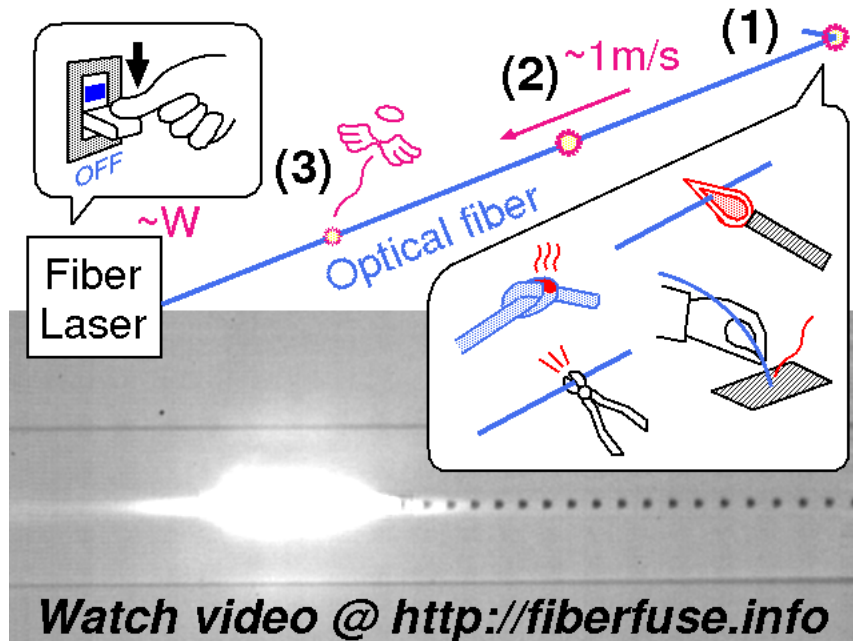
DAQ: data acquisition, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FG: function generator, FUT: fiber under test, PD: photodetector, VCO: voltage-controlled oscillator



国民生活の安全・安心に寄与する 分布型光ファイバセンシング

1. 背景と目的
2. 分布型センシングの原理
3. BOCDRの最新展開
4. POFヒューズ（おまけ）
5. まとめ

光ファイバが勝手に壊れていく現象!?



Courtesy of Dr. S. Todoroki

1. 高パワー光の入射
2. 局所的な加熱
3. 光吸収の劇的増大
4. 光放電の発生
5. 光ファイバを壊しながら光源に向かって伝搬

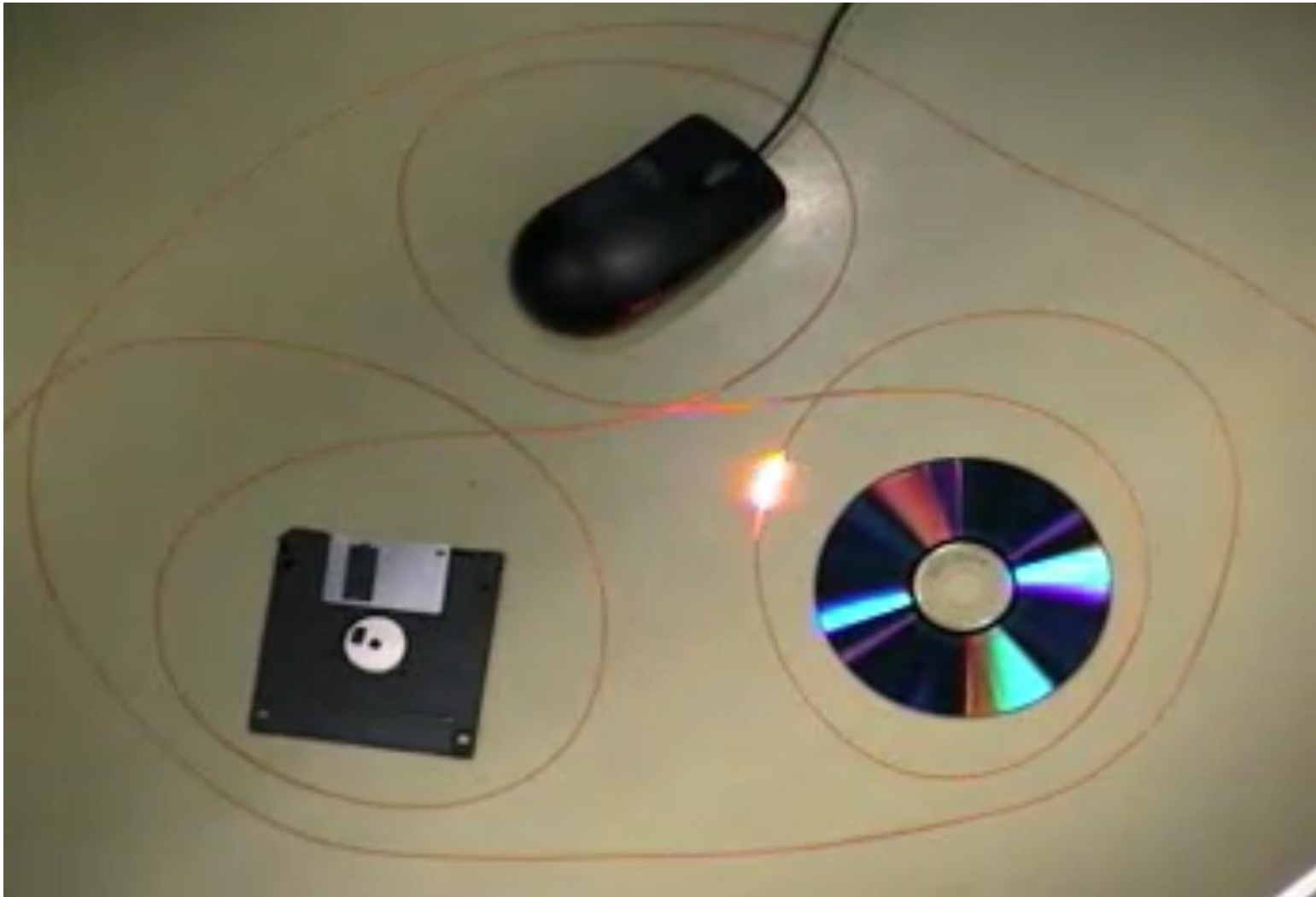
R. Kashyap et al., Electron. Lett. **24**, 47 (1988).

R. Kashyap, Opt. Express **21**, 6422 (2013).

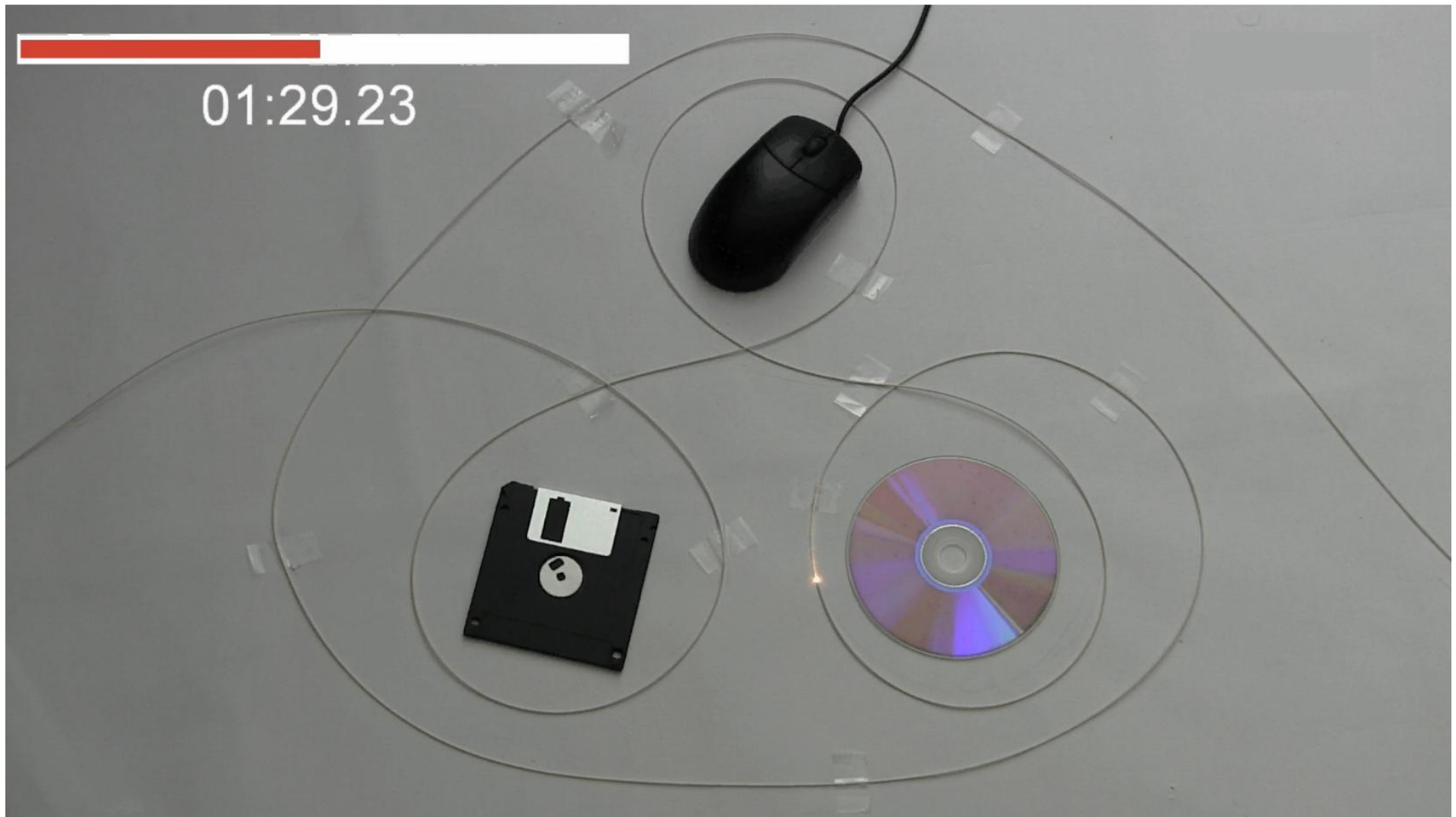
S. Todoroki, *Fiber Fuse* (Springer, Tokyo, 2014).

1本の光ファイバで伝送できる
最大の光パワーを決める要因の一つ

健全な通信のため、光ファイバヒューズの発生は回避したい



S. Todoroki et al., Opt. Express **13**, 6381 (2005).



Y. Mizuno et al., *Appl. Phys. Lett.* **104**, 043302 (2014).
Movie available at www.youtube.com/watch?v=t0k_B6EOQhg





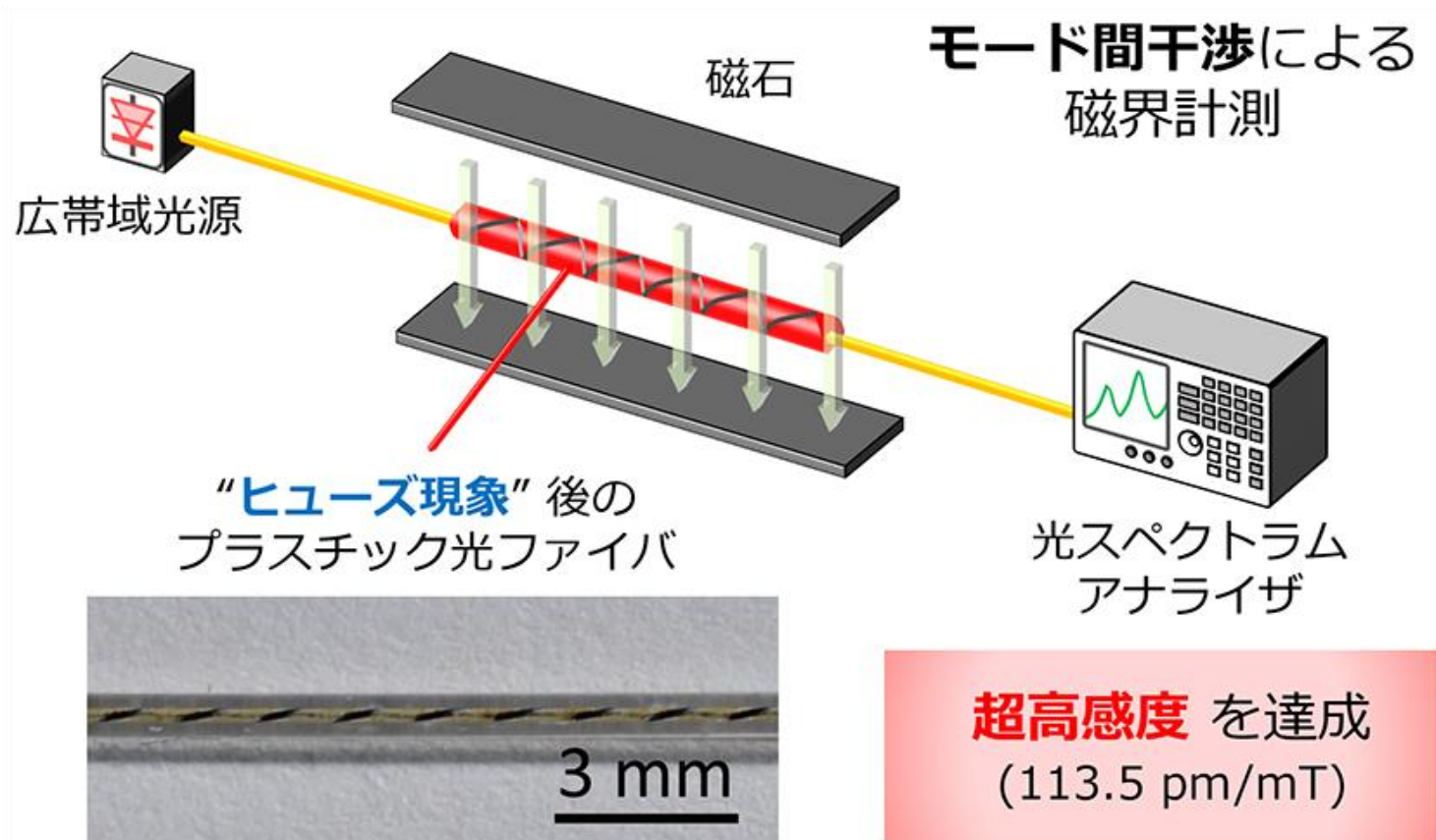
Y. Mizuno et al., IEEE Photon. J. 6, 6600307 (2014).

Y. Mizuno et al., Sci. Rep. 4, 4800 (2014).

現在、特性解明と工学応用が推進されています。
(その1例を次ページ以降で紹介)

A. G. Leal-Junior, Y. Mizuno et al., Adv. Photon. Res. 2, 2000078 (2021).

ヒューズ後のPOFが磁界に反応することを初めて発見し、 モード間干渉センサに組み込むことで、 低コストかつ超高感度な磁界計測に成功



電力系統の各種機器、発電機やモータなどで磁界センサが必要な場面で、電気絶縁性、長距離伝送性といった本センサの特徴が活かされ得る。

また、**強電磁界環境、特に防爆性や耐雷性が要求される現場での電磁環境調査への応用**が期待される。

科学新聞（2020年12月18日）



市販の光ファイバーで磁界計測 超高感度、電磁波漏れ対策に 応用へ 横浜国大

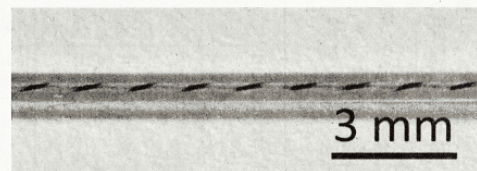
1/20(水) 7:14 配信 5



市販の光ファイバーを工夫してセンサーとして使い、磁界を超高感度に計測する技術を開発したと、横浜国立大や東京工業大、芝浦工業大などの国際研究チームが19日までに発表した。

電子機器やモータなどから漏れ出る電磁波が他の電子機器に悪影響を与えない

光ファイバー用いて 超高感度で磁界計測



ヒューズ発生後のプラスチック光ファイバーの顕微鏡写真

横浜国立大学の水野洋輔准教授、東京工業大学の中村健太郎教授、芝浦工業大学の李ヒョノ助教、ブラジル・エジリトサント連邦大学のアルナルド・リール・ジュニア教授、ポルトガル・アウェイロ大学のカルロス・マルクス博士らの国際共同研究チームは、プラスチック光ファイバーヒューズという新たな物理現象に基づき、光ファイバーを用いて磁界を計測することに成功。モード間干渉と呼ばれる簡素な構成で、1・3・5 pT/mTという超高感度を達成した。

研究チームは、2014年に発見した新現象「プラスチック光ファイバーヒューズ」に着目して研究を進めてきた。これまで光ファイバーセンサーの研究で主に用いられていたのは、通信向けに広く利用されている石英ガラス光ファイバーであるが、この光ファイバーでは数%伸びるだけで切れてしまう。これに対して、100%を超える巨大な伸びにも耐えられるほど高い柔軟性をもちのがプラスチック光ファイバーである。研究チームは、高パワー光の照射により光ファイバーに発生した光放電（輝点）がその光ファイバーを破壊しながら光源に向

横浜大など 高い柔軟性もつプラスチックが鍵

かつて伝搬する現象（ヒューズ現象を初めて観測）その後のヒューズが起きた後のプラスチック光ファイバーに、螺旋状の炭素線が残ることを解明した。

そこで今回、ヒューズ後のプラスチック光ファイバーが反応することを初めて見て、モード間干渉センサーに活用することで、低コストかつ高精度な磁界計測に成功した。5 cmの光ファイバーを用いた場合、センサーの出力スペクトルのピーク波長1・3・5 nm/mTという極めて高感度でシフトすることを実証した。同センサーは、日本国内の磁気の大変さ（地磁気）と同等の微小な磁界の変化を検出することが可能。これはルビウム添加石英ファイバーに比べて約100倍の感度である。

水野准教授の話「磁界センサアプローチで、電界センサ実装を試みる予定です。また使用する光の波長や光ファイバーの長さを最適化すること、同電界センサーの感度を向上させていきたい」

国民生活の安全・安心に寄与する 分布型光ファイバセンシング

1. 背景と目的
2. 分布型センシングの原理
3. BOCDRの最新展開
4. POFヒューズ（おまけ）
5. まとめ

分布型光ファイバセンシングの基礎から
最新展開までをご紹介します

まだまだ課題は多いが
技術進展の余地は十分に残されており、
社会の需要に整合した技術をつくっていきたい

矢崎科学技術振興記念財団様から
研究助成を賜りましたこと、
改めまして、深く感謝申し上げます

ありがとうございました !!