


■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Today OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2012, 保立 和夫

The University of Tokyo / Today OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2012, Kazuo Hotate

学術俯瞰講義 2012

光の科学—未来を照らす究極の技術とアイデア

2012年11月1日、8日

光を導き、活用する

I. 光ファイバの物理と応用

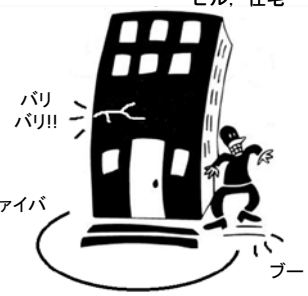
II. 痛みの分かる材料・構造の為の光ファイバ神経網

東京大学 工学部 電気電子工学科

工学系研究科 電気系工学専攻

保立和夫

私の専門分野



「システムフォトニクス」

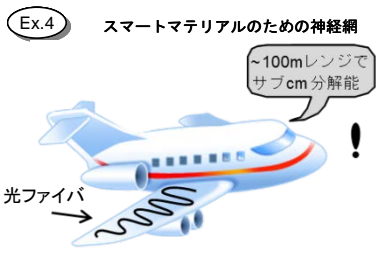
* ユニークなアイディアで新機能を出すシステムを作る。 光の物理とデバイス機能を活用

* 自然体でのシステムアセンブリングではない。

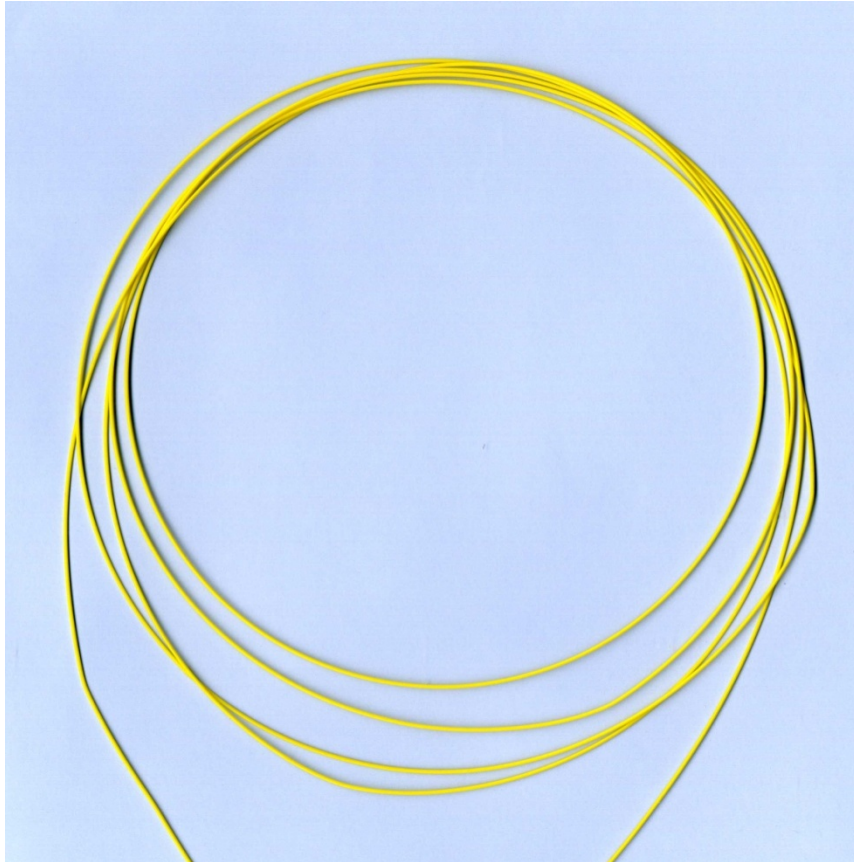
- * フォトニックセンシング
- * フォトニックコンピューティング
- * フォトニックデバイス、など
 - 光ファイバジャイロ
 - 痛みの分かる材料・構造の為の

光ファイバ神経網技術、など

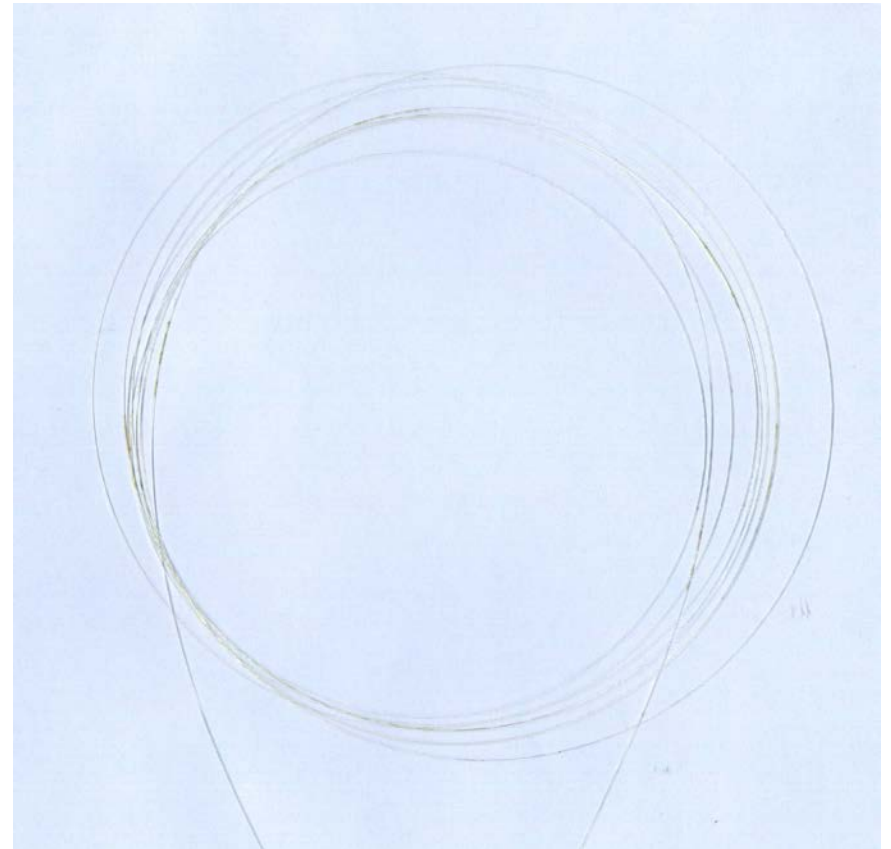
応用先：航空機、土木・建設、...



光ファイバ

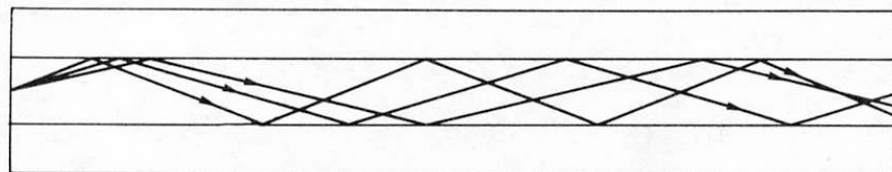


光ファイバ芯線
(ビニール被覆)

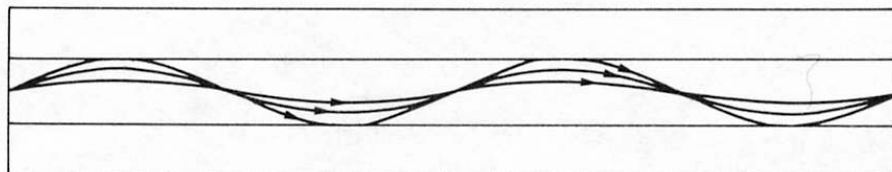


光ファイバ素線
(ナイロン被覆)

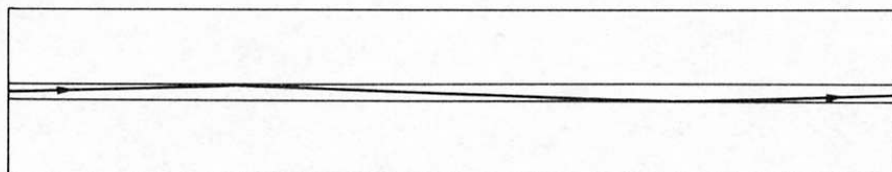
光ファイバ: 光を遠くまで送る仕組み



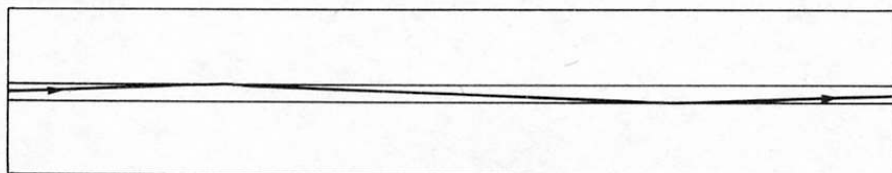
(a) ステップ形多モード光ファイバ



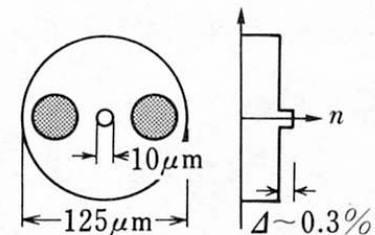
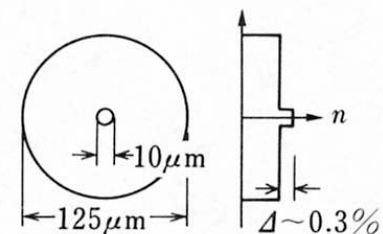
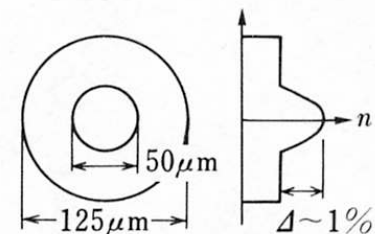
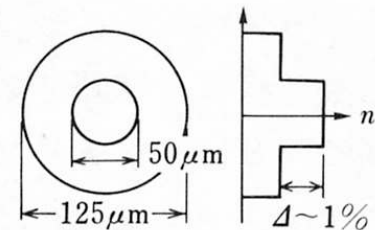
(b) グレーデッド形多モード光ファイバ



(c) 単一モード光ファイバ



(d) 複屈折ファイバ



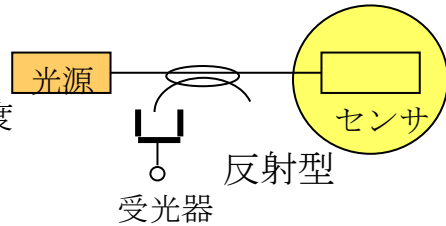
光ファイバセンシング技術の方式分類

電圧・電界
電流・磁界
温度
加速度、等

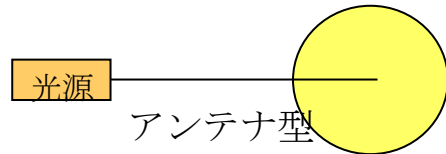


(a) (伝送路としての利用法)

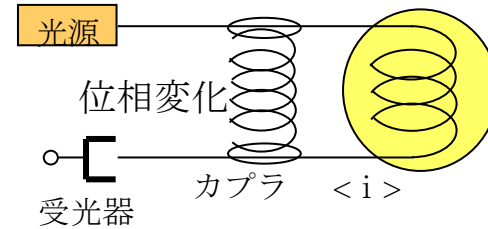
音響
血中O₂
マイクロ波強度
温度、等



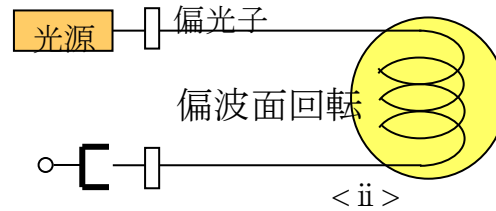
高電圧
インパルス
温度、等



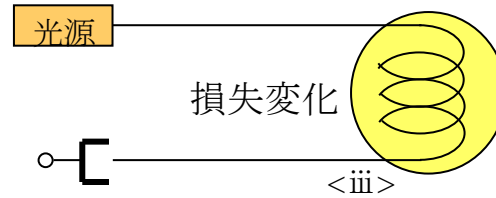
(b) (センサとしての利用法)



温度
圧力
ひずみ
磁界
音圧、等

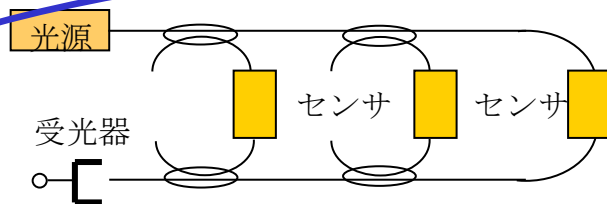


電流
磁界、等
(ファラデー効果)



音圧
(マイクロベンド)
ガス濃度
(エバネッセント波)
放射線、等

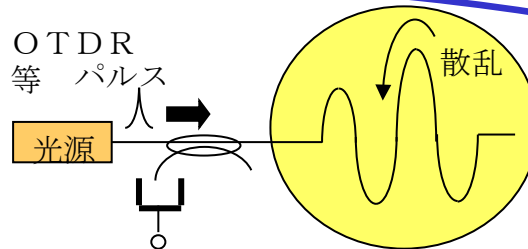
歪み
温度
圧力
音響、等



多点型

(c) (多点型・分布型光ファイバセンサ)

OTDR
等 パルス



分布型

温度分布
ひずみ分布
側圧分布
異常点分布
水漏れ・油漏れ分布
等

痛みの分かる材料・構造・通信網の為の光ファイバ神経網

Bridges

Space crafts

Mountains

F.O. Nerve Systems

Aircrafts

Airports

River Levee

Highways

Slopes

Buildings

Tunnels

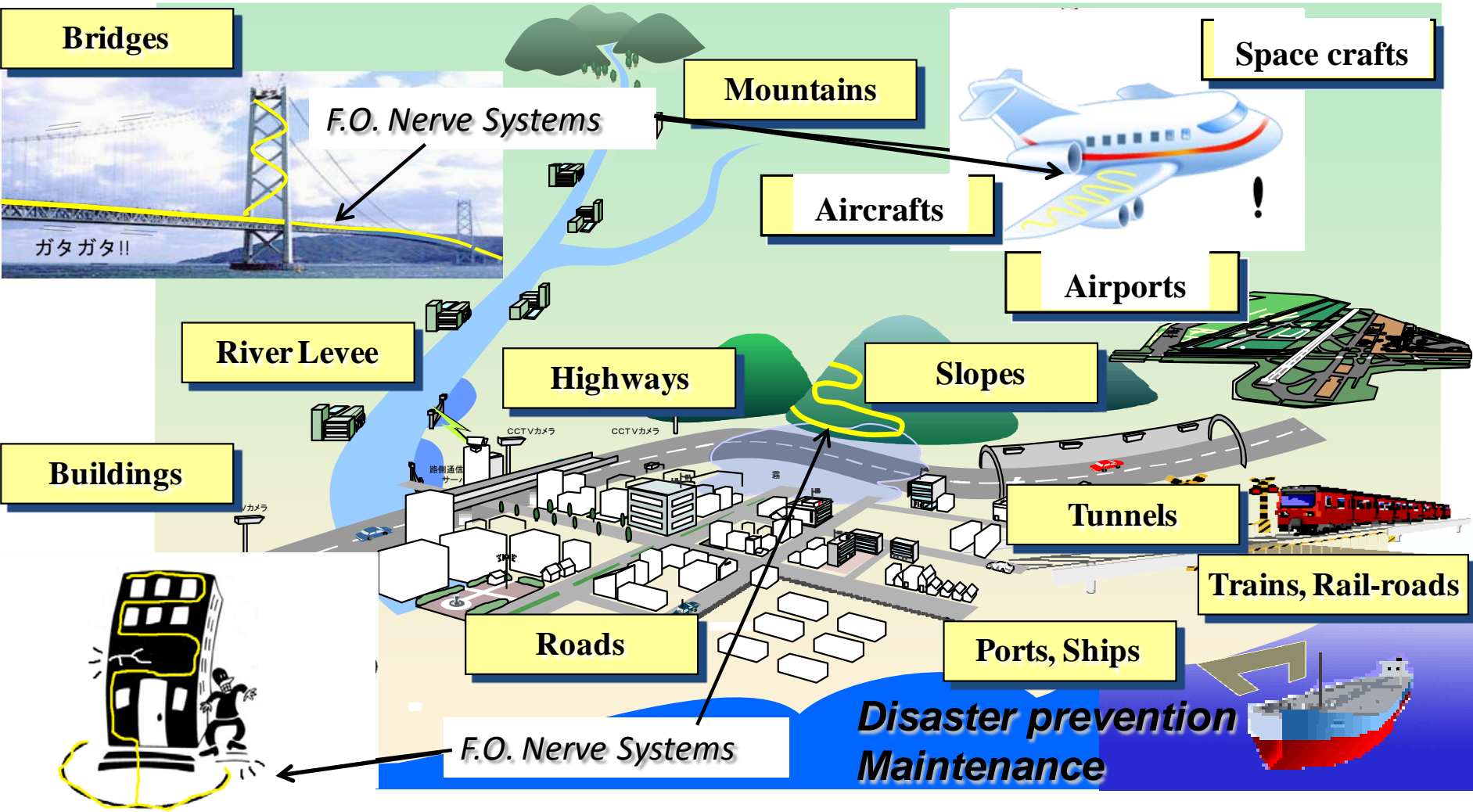
Trains, Rail-roads

Roads

Ports, Ships

Disaster prevention
Maintenance

F.O. Nerve Systems



痛みの分かる航空機: MU-300

*Mitsubishi Heavy
Industry: MU-300*

*Nov. 1, 2007
Twice Flights !!*

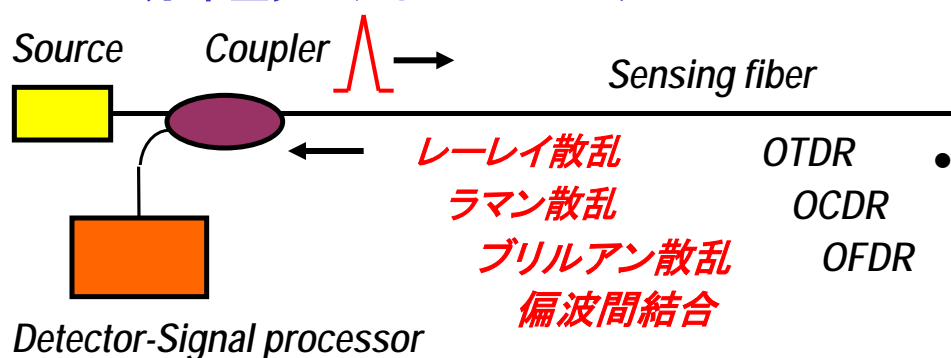


*Mitsubishi Heavy Industry
Yokogawa Electric
The University of Tokyo
RIMCOF*

- * Yari et al. (2008) "Aircraft structural health monitoring using on-board BOFDA system," *Proceedings of SPIE 6933*, Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems 2008, 69330S, Fig.5.

光ファイバ神経網技術

分布型光ファイバセンシング



● ラマン散乱: 温度分布センシング

路面凍結モニタリング(ITS関連) / 電力ケーブル温度管理 / トンネル火災位置検出 / 一般火災警報 . . .

● ブリルアン散乱: 歪分布センシング・温度分布センシング

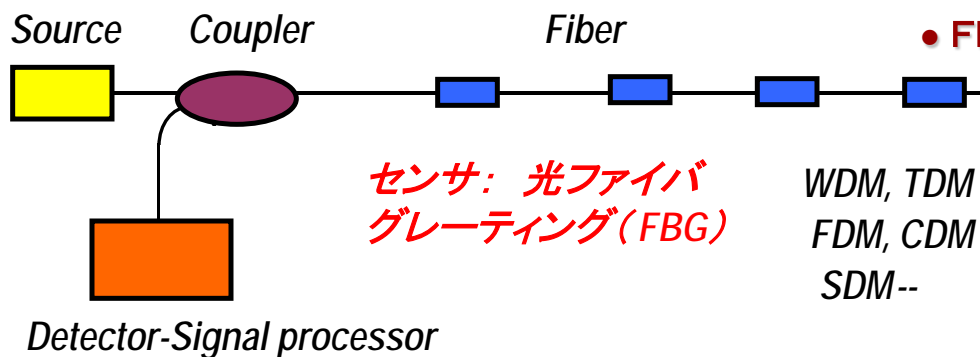
堤防決壊監視 / 大型コンクリートパイプ試験
ダムコンクリート固化モニタリング / 舳網監視
ジャパンチャレンジ丸歪モニタリング . . .

＜光パルス時間分解法: 分解能限界数メートル、
: 測定時間数分＞

痛みの分かる材料・構造の為の神経網

高分解能・高機能連続分布量計測技術が切望

多点型光ファイバセンシング



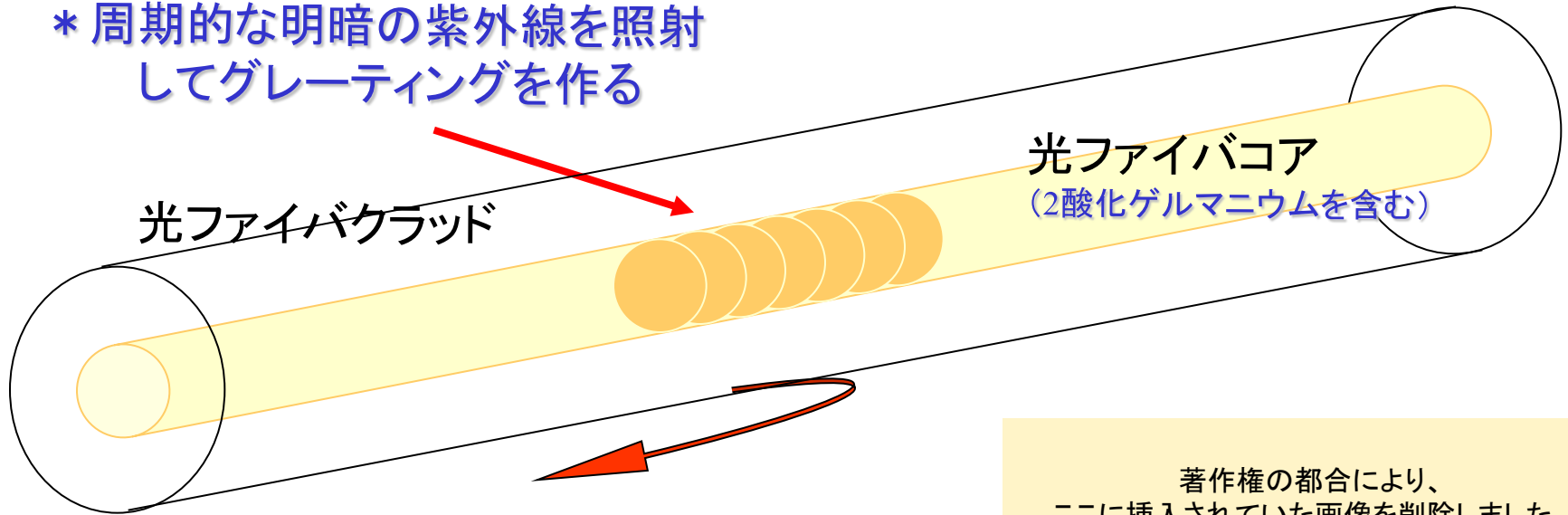
＜FBG / 波長分割法の問題点: 離散的測定＞

● FBG / WDM技術: 歪 / 振動多点センシング

橋梁振動解析 / 釣橋張力監視 / 高層ビル振動監視
ロックボルト張力モニタ / 高圧送電線張力モニタ
油井内圧力・温度監視 / 小型高速艇動的歪モニタ
スペースシャトル燃料タンクモニタ . . .

光ファイバグレーティング

- * 光ファイバコアの屈折率は紫外線で変化する
- * 周期的な明暗の紫外線を照射してグレーティングを作る



屈折率変化周期の2倍の波長を持つ光が戻される: ブラッグ反射

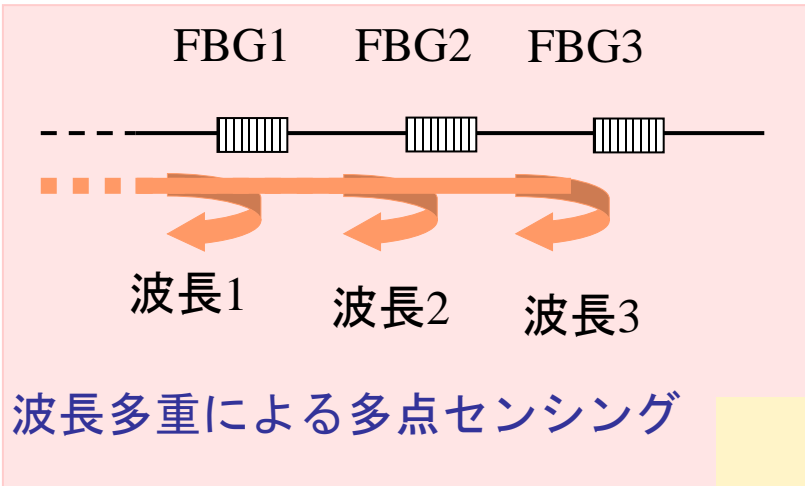
光ファイバの伸縮でグレーティングの周期が変化: 反射波長が変化

著作権の都合により、ここに挿入されていた画像を削除しました。

Figure 15.4 "Strain response of 1,3- μm FBG"

A.D. Kersey, "Multiplexing Techniques for Fiber-Optic Sensors," Chapter 15 in J. Dakin and B. Culshaw (eds.) *Optical Fiber Sensors IV: Applications, Analysis, and Future Trends*, Artech House Publishers, 1997, pp. 369-407.

光ファイバグレーティング: 波長多重化技術



反射波長の異なるFBGを
多重化する

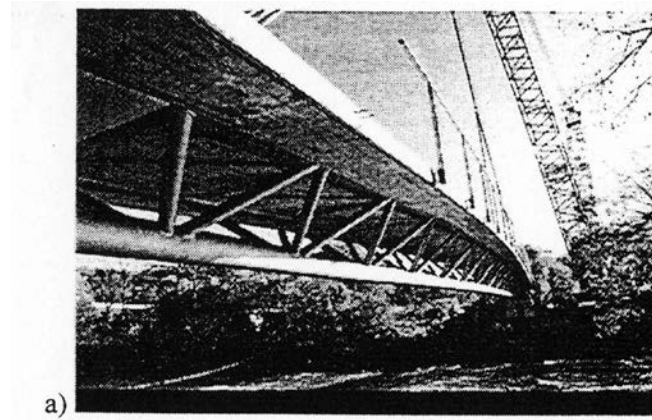
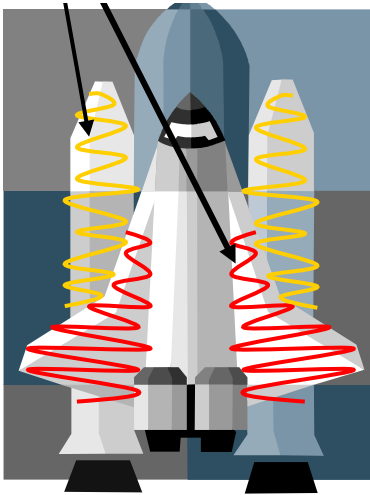
著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

Figure 15.10 "Example of a 12-element FBG array transmission spectrum"

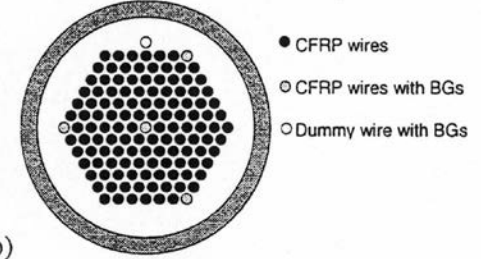
A.D. Kersey, "Multiplexing Techniques for Fiber-Optic Sensors,"
Chapter 15 in J. Dakin and B. Culshaw (eds.)
*Optical Fiber Sensors IV: Applications, Analysis, and Future
Trends*,
Artech House Publishers, 1997, pp. 369-407.

光ファイバグレーティング歪センシング例

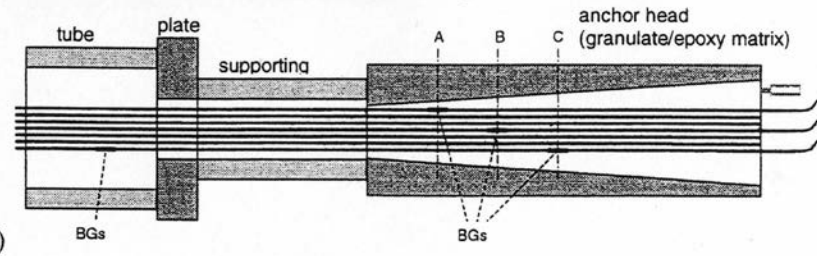
Optical fiber Space crafts



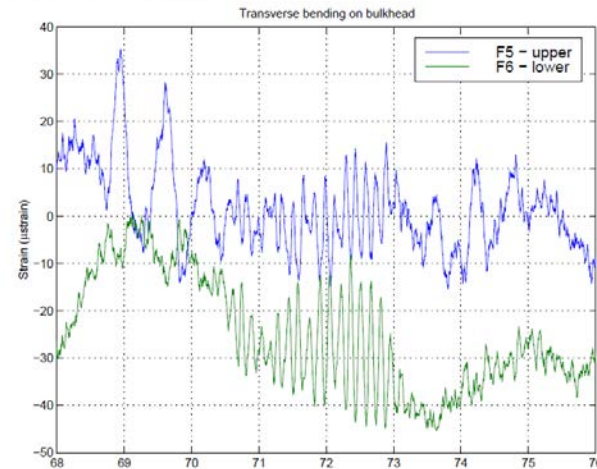
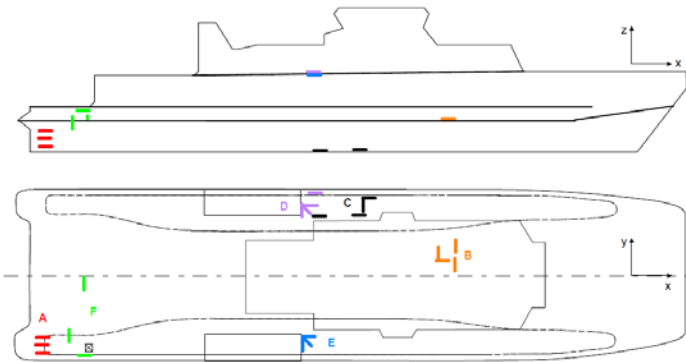
* Nellen et al. (1999) Structurally Embedded Fiber Bragg Gratings: Civil Engineering Applications, Marcus and Culshaw eds., *Fiber Optic Sensor Technology and Applications (Proceedings of SPIE 3860)*, 44-54, p.46, Fig.2.



Bridges



High speed boat monitoring

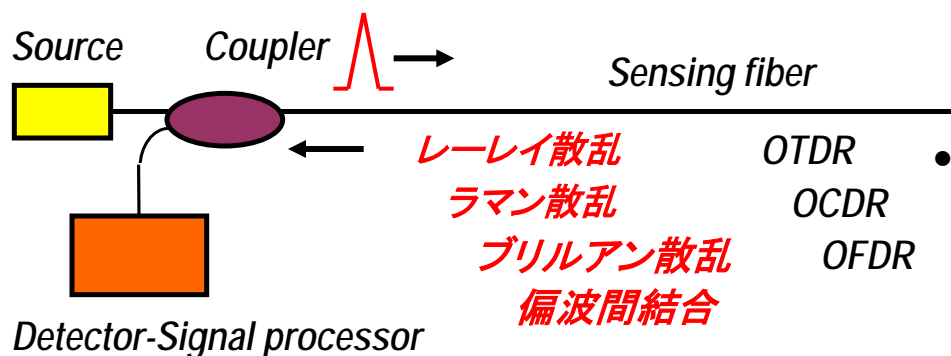


* Pran et al. (1999) Field Test with a Fibre Optic Sensor System on a Mine Counter-Measure Vessel, *FFI Rapport 99/05425*, p.12, Fig.3.1.

* Pran et al. (1999) Field Test with a Fibre Optic Sensor System on a Mine Counter-Measure Vessel, *FFI Rapport 99/05425*, p.27, Fig.5.8.

光ファイバ神経網技術

分布型光ファイバセンシング



● ラマン散乱: 温度分布センシング

路面凍結モニタリング(ITS関連)／電力ケーブル温度管理／トンネル火災位置検出／一般火災警報...

● ブリルアン散乱: 歪分布センシング・温度分布センシング

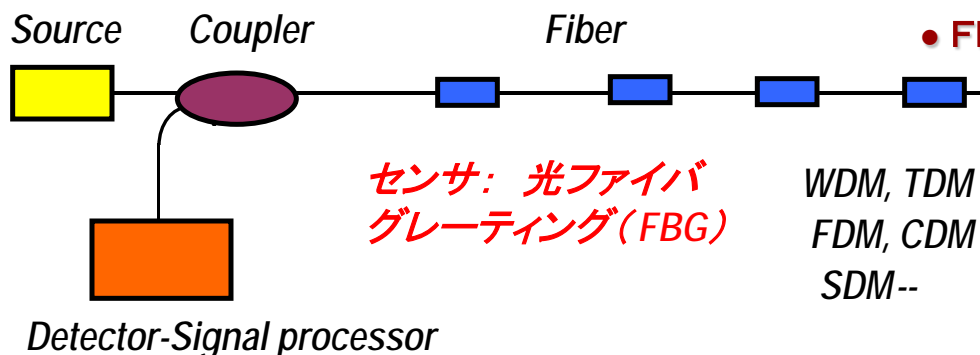
堤防決壊監視／大型コンクリートパイプ試験
ダムコンクリート固化モニタリング／舳網監視
ジャパンチャレンジ丸歪モニタリング...

＜光パルス時間分解法: 分解能限界数メートル、
: 測定時間数分＞

痛みの分かる材料・構造の為の神経網

高分解能・高機能連続分布量計測技術が切望

多点型光ファイバセンシング



＜FBG／波長分割法の問題点: 離散的測定＞

● FBG／WDM技術: 歪／振動多点センシング

橋梁振動解析／釣橋張力監視／高層ビル振動監視
ロックボルト張力モニタ／高压送電線張力モニタ
油井内圧力・温度監視／小型高速艇動的歪モニタ
スペースシャトル燃料タンクモニタ...

光ファイバ中の散乱現象

■ Principles:

Rayleigh scattering

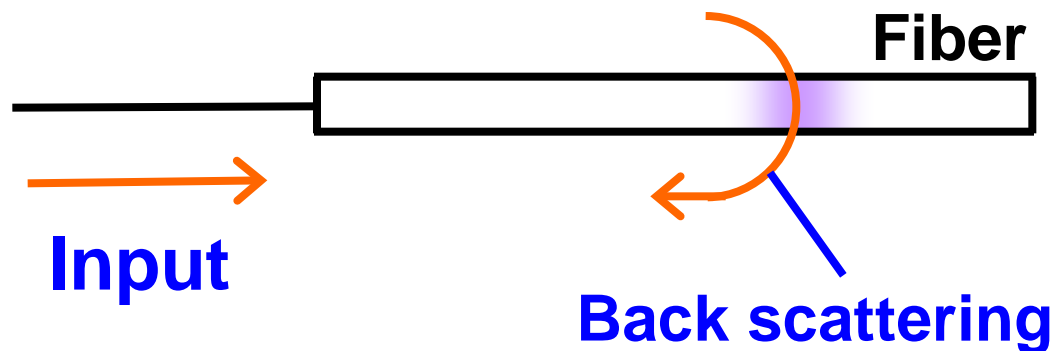
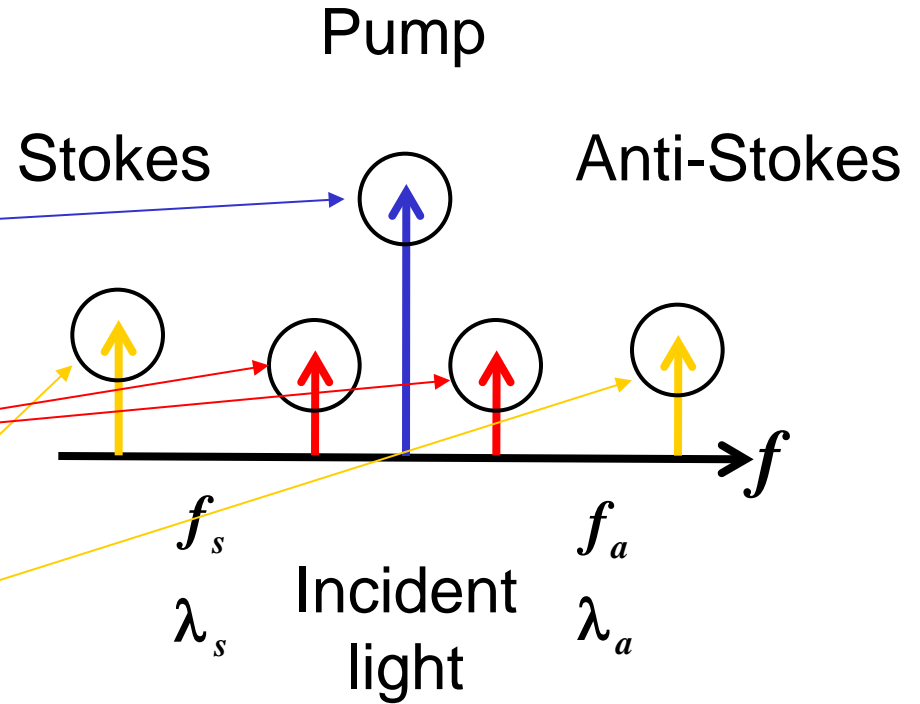
(Original frequency)

Brillouin scattering

(~10GHz)

Raman scattering

(~10THz)



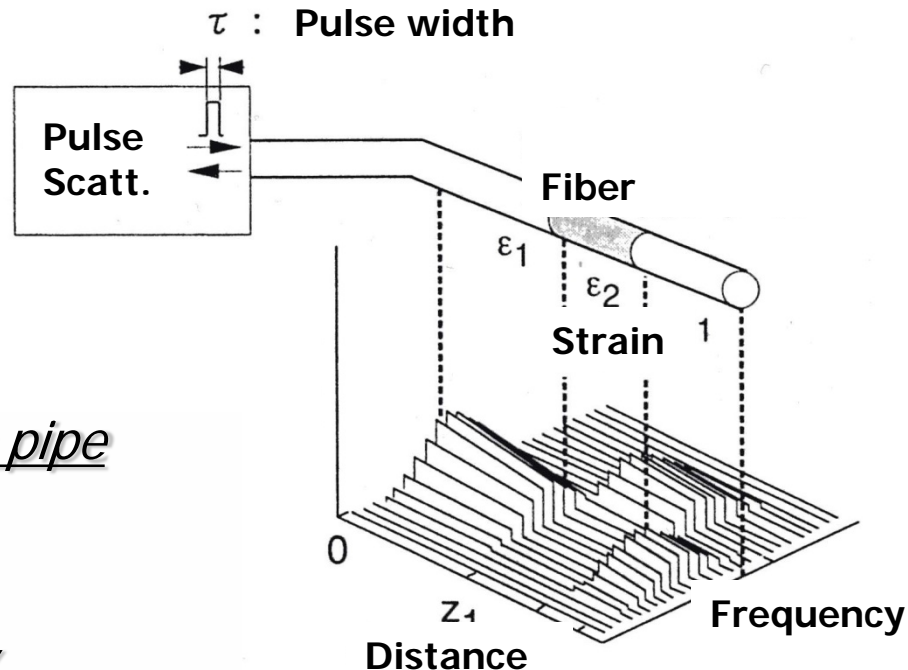
連続分布量センシング

Brillouin Optical Time Domain Reflectometry: NTT の発明

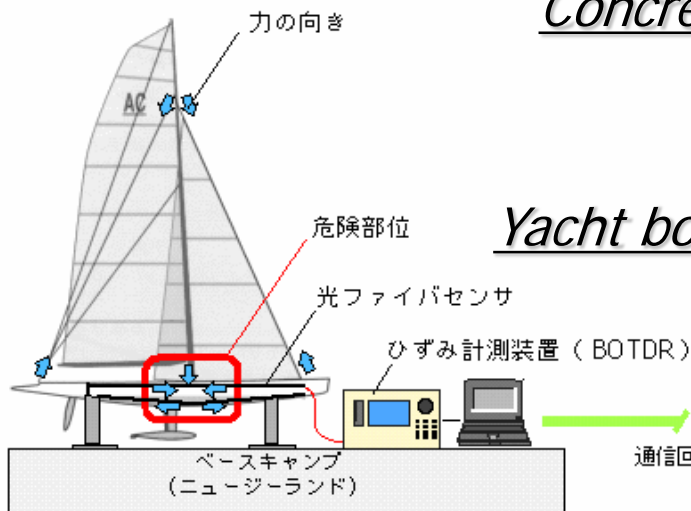
BOTDA

著作権の都合により、ここに挿入されていた画像を削除しました。

Yasue et al. (2000) Concrete Pipe Strain Measurement Using Optical Fiber Sensor, *IEICE Transactions on Electronics E83-C(3)*: 468-474, p.470 Fig.4, p.472 Fig.9.



Concrete pipe

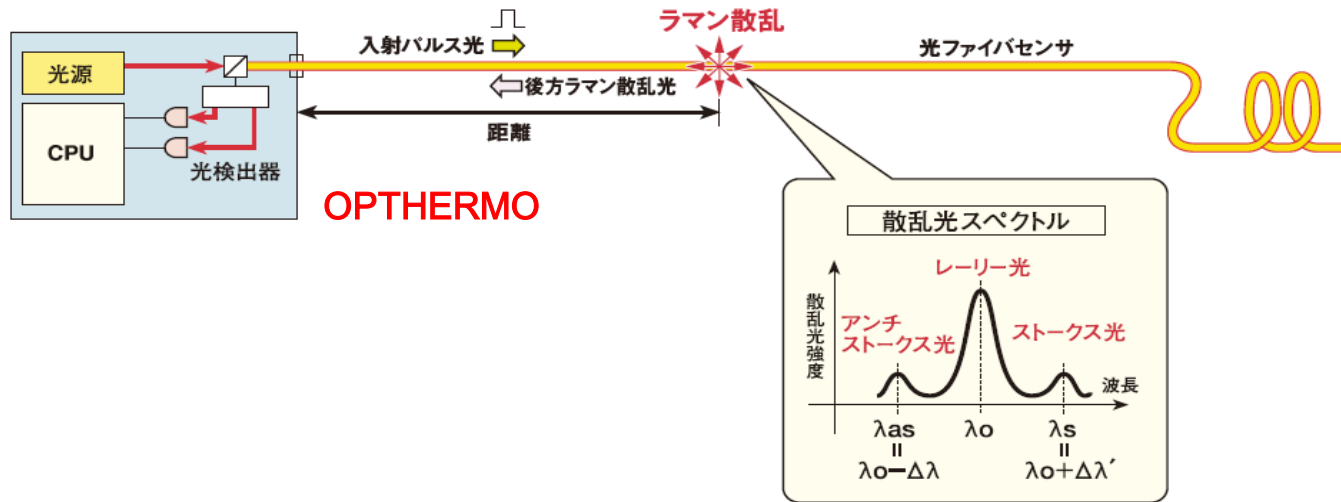


Yacht body

* 成瀬央(2000)「BOTDRによるひずみ分布センシング」『オプトロニクス』19(3): 144-148, p.144、図2

Various field tests

光ファイバラマン散乱温度分布センシング:原理



Power cable temperature monitoring

- Power cable temperature monitoring
- Tunnel/conduit for power cable monitoring
- Common Utility Tunnel management
- Coal Belt-conveyor temperature management and fire detection
- Cable tray or pit temperature management
- Server room temperature monitoring to prevent excess cooling
- LNG Tank leak detection / heat control system
- Steal plant facilities (melting furnace, steam pipeline) monitoring
- Fire alarm system

etc.

* 資料ご提供:株式会社ジェイ・パワーシステムズ

光ファイバ神経網へのさらなる要求

* FBG: 本質的に多点計測

* 時間領域分解法による分布型センシング

- ・空間分解能の限界
- ・測定時間の限界
- ・時間変化情報
- ・測定位置

~1m

~数分

得難い

端から順次

* 時間領域分解法からの脱却の必要性

- ・高空間分解能化
- ・測定時間の高速化
- ・時間変化情報
- ・測定位置

~1cm

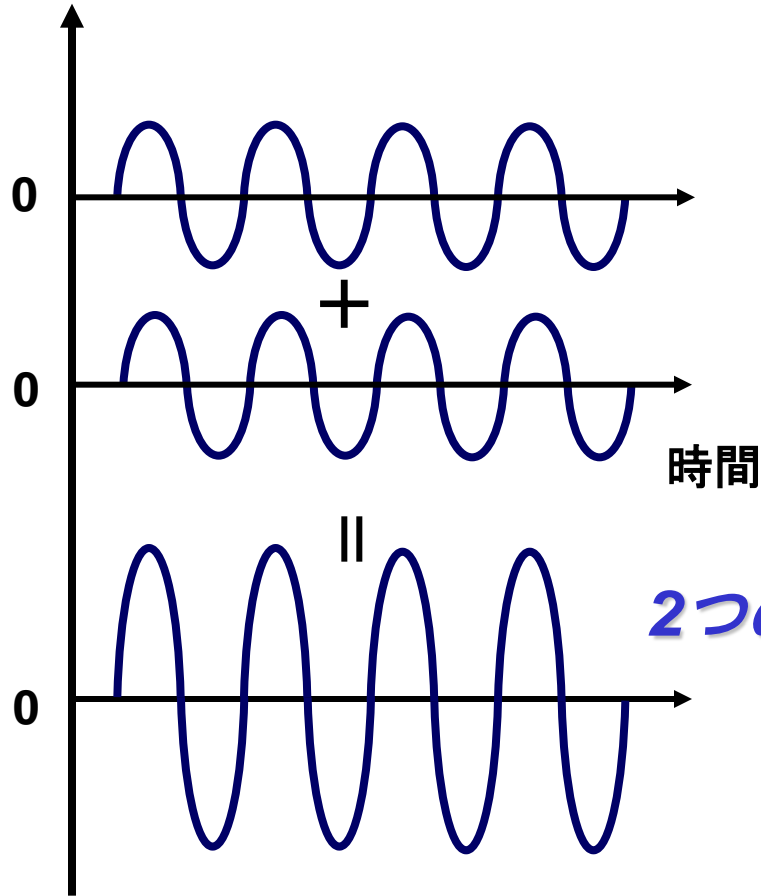
~数ミリ秒

ダイナミック測定

ランダムアクセス

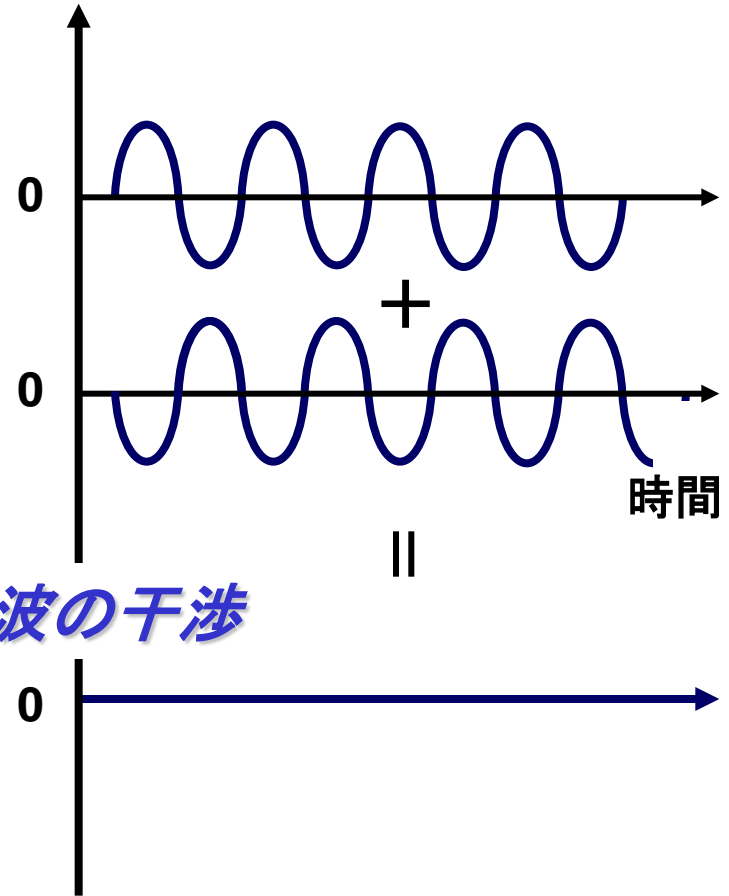
光波干渉の原理

電磁波の振動



同じタイミングの振動だと強くなる

電磁波の振動

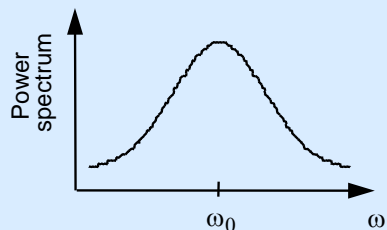


タイミングがずれた振動だと弱くなる

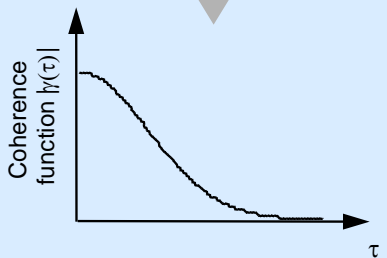
2つの波の干渉

当社のオリジナル技術 光波コヒーレンス関数の合成法

Well known

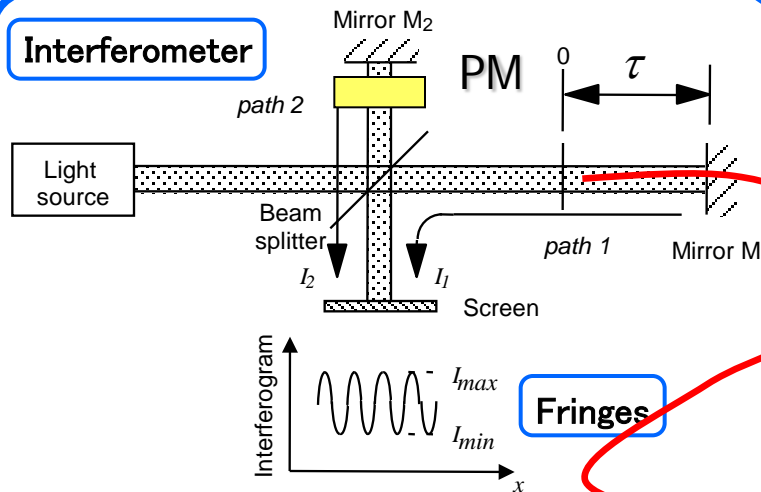


Fourier Trans.



Shape is given

Interferometer



Fringes

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma(\tau)| \quad \gamma: \text{Coherence Function}$$

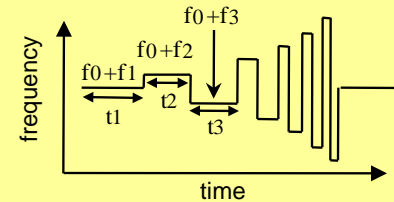
Distribution sensing by CW wave

- No moving parts/ no calculation
- Use of quasi-continuous tuning

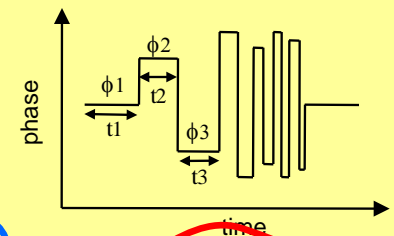
Applications:

- Smart materials, Smart structures
- High resolution reflectometry
- Device and network diagnoses
- Optical tomography, etc.

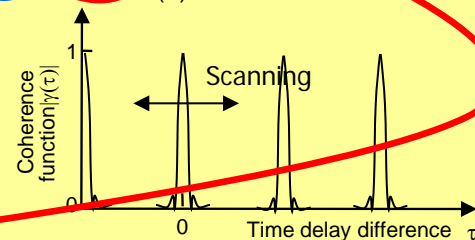
SOCF



(a) Frequency control



(b) Phase control



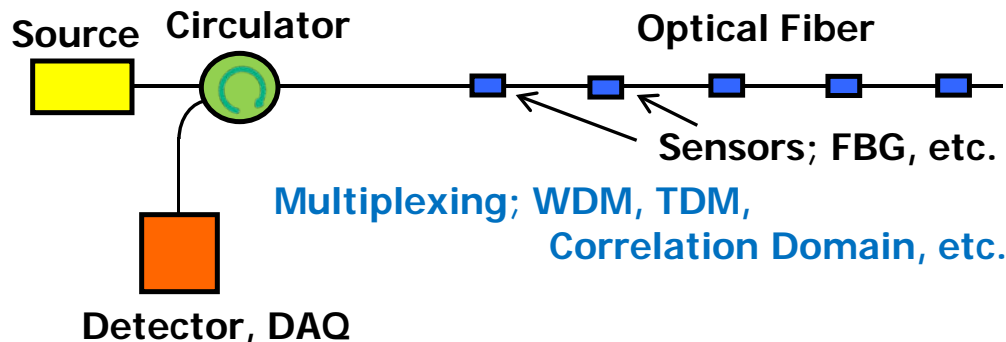
(c) Coherence function

Arbitrary Shape

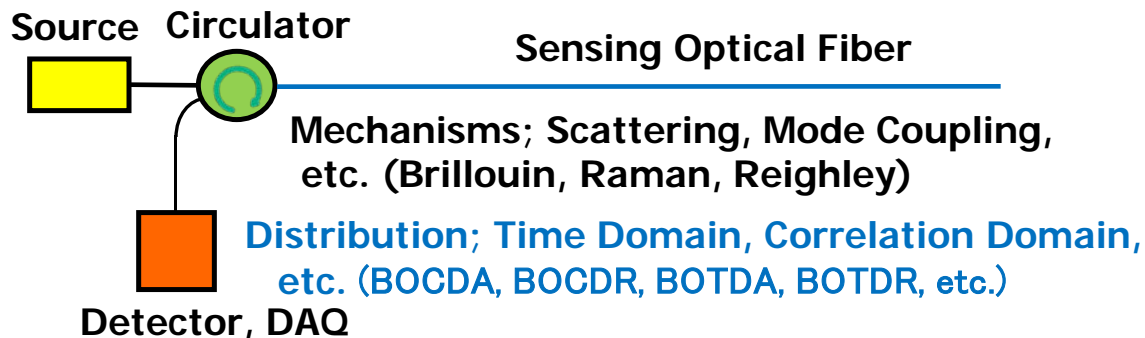
Best Paper Award in OEC,
1992

光ファイバ神経網

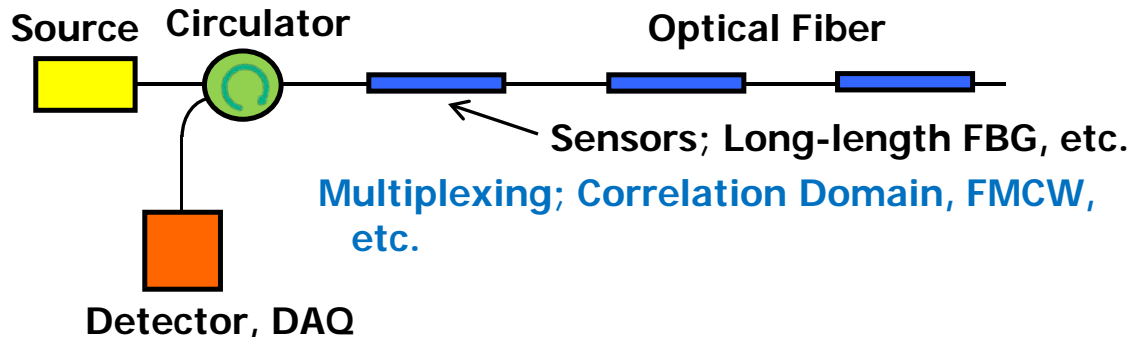
Multiplexed Sensing



Distributed Sensing

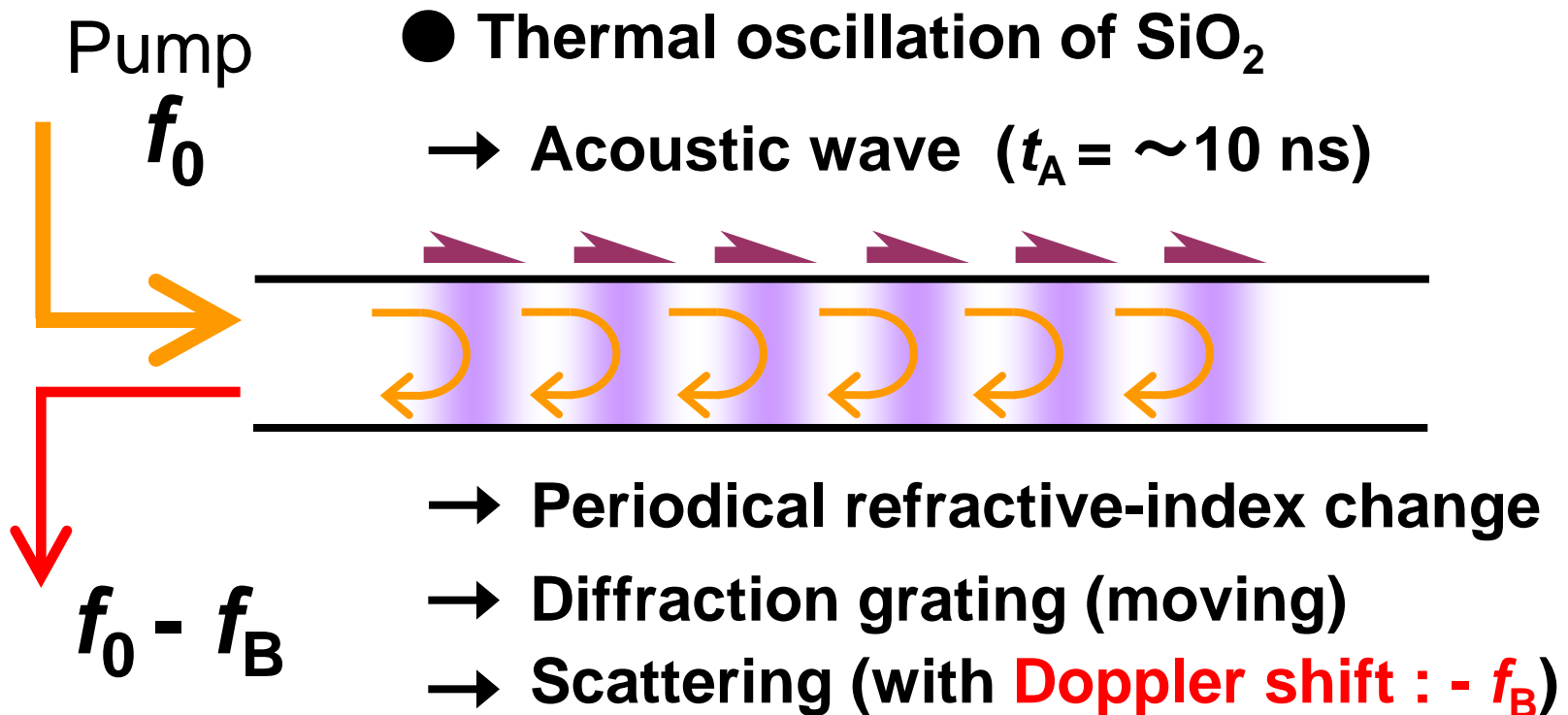


Quasi-distributed Sensing



自然ブリルアン散乱

Spontaneous Brillouin scattering

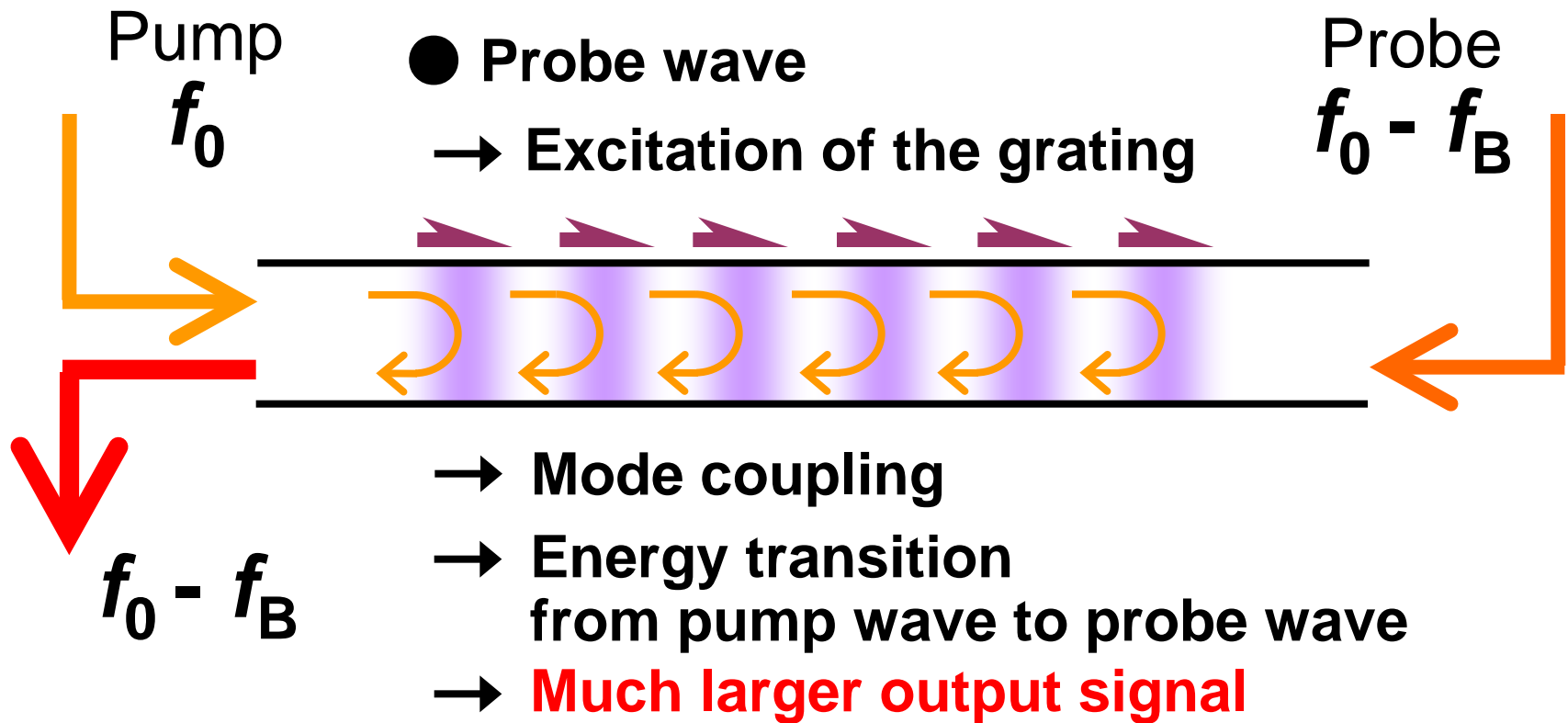


$$f_B = 10.85\text{GHz} (= 0.1\text{nm})$$

$$\text{Reflectivity } R_{\text{SpBrillouin}} = -90\text{dB/m}$$

誘導ブリルアン散乱

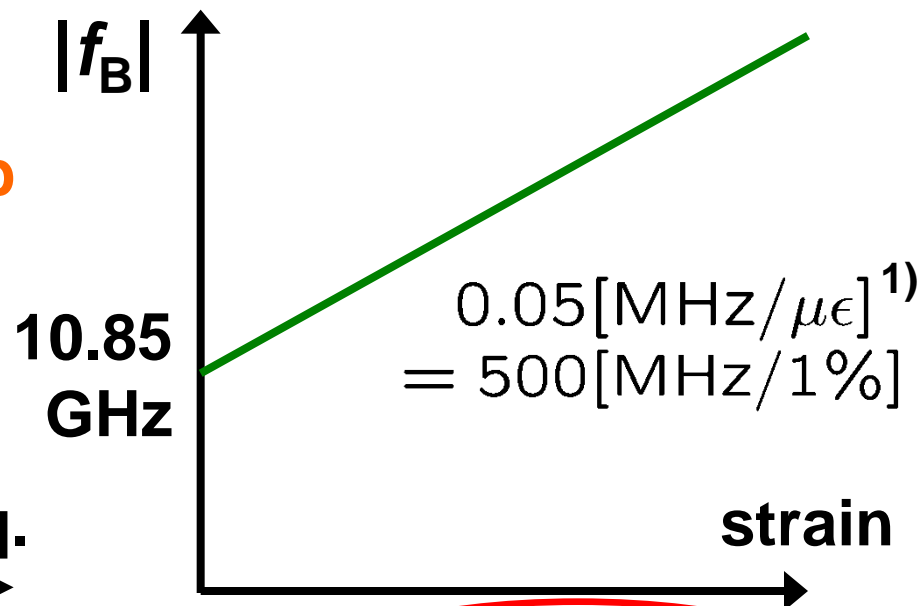
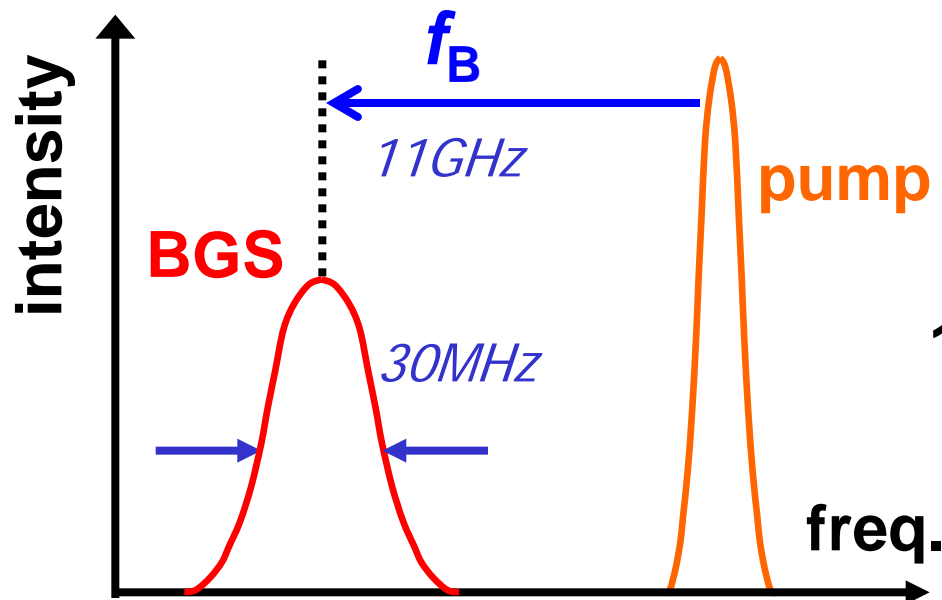
Stimulated Brillouin scattering



$$\text{Reflectivity } R_{\text{StBrillouin}} = -50\text{dB/m}$$

ブリルアン散乱;

温度・歪センシングの原理



* BGS ... Brillouin gain spectrum

cf. $1 [\text{MHz}/^\circ\text{C}]$

1) T. Horiguchi *et al.*, IEEE Photon. Tech. Lett. **1**, 5 (1989).

Doppler shift f_B \longrightarrow strain **magnitude**

f_B : strain **or** temperature ?

ブリルアン散乱を基盤とした分布型センシング技術

■ Position-resolving techniques:

T: Time-domain

C: Correlation-domain

■ Configurations:

R: Reflectometry ... One-end-access sensing

FUT or DUT

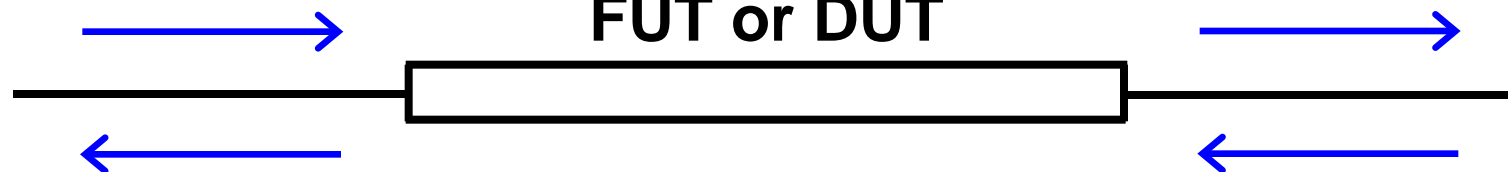
(Spontaneous Brillouin)



A: Analysis system ... Two-end-access sensing

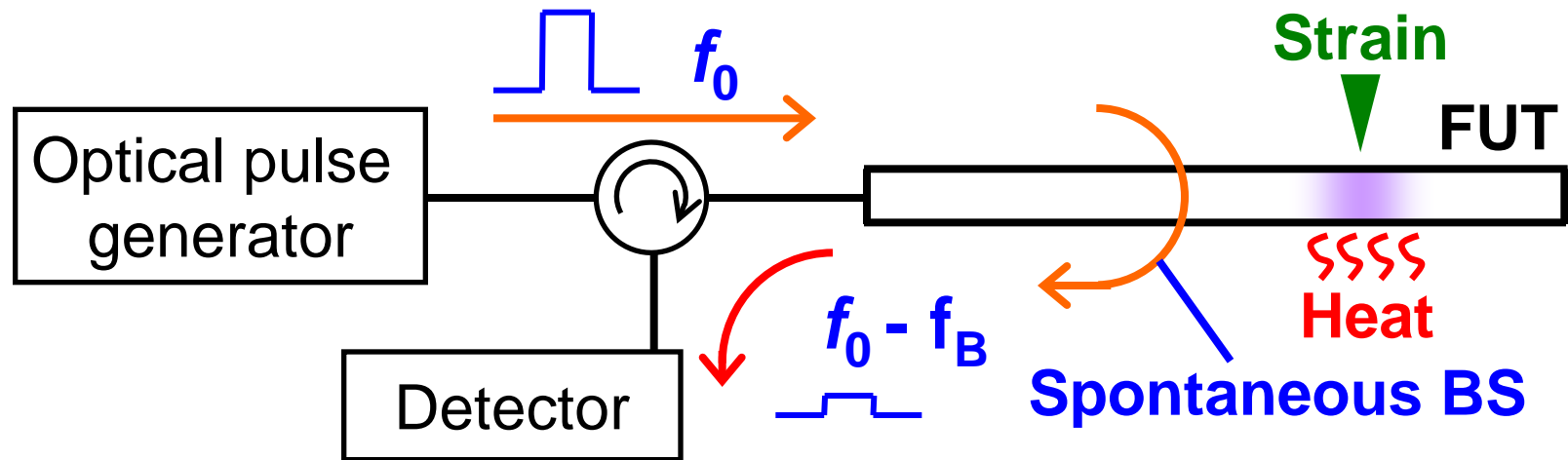
FUT or DUT

(Stimulated Brillouin)



	T	C
R		
A		

ブリルアン光時間領域リフレクトメトリ(BOTDR)



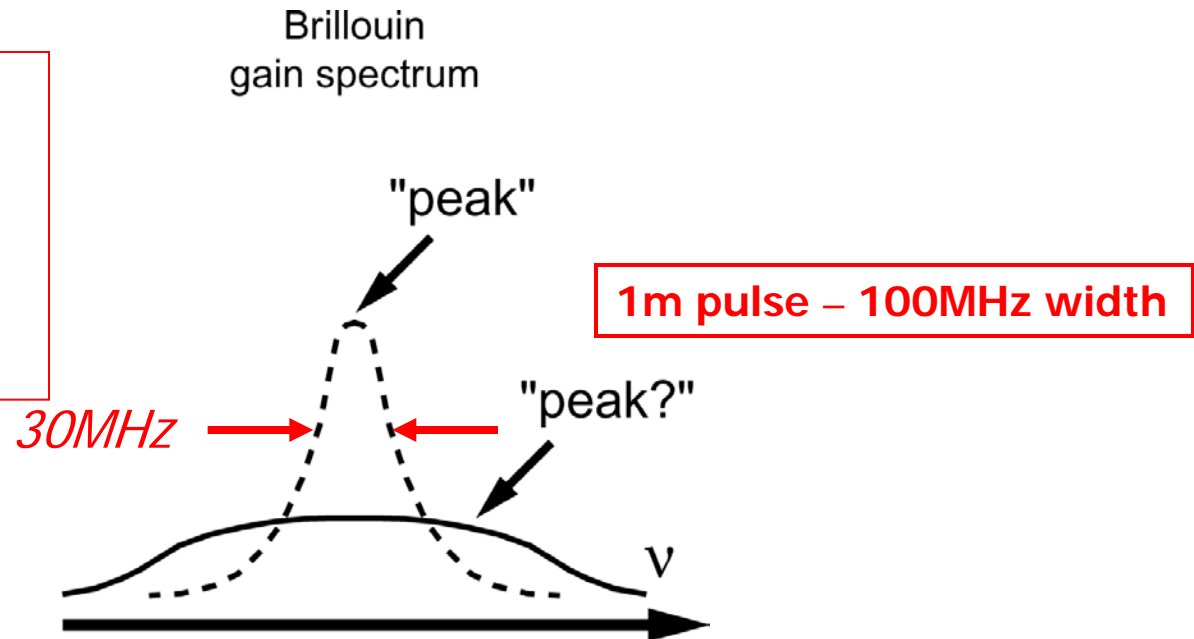
Elapsed time → **strain position**¹⁾
(between launching and receiving pulses)

1) T. Kurashima *et al.*, IEICE Trans. Commun., **E76-B**, 4 (1993).

Linewidth of pulses → **Spatial resolution (>1 m)**

時間領域法での本質的な限界

Trade-off between spatial resolution and strain accuracy in time domain.



Spatial resolution is limited to $\sim 1m$

Integration is required to obtain S/N ratio: *only static sensing*

- Improvement of the **pulsed lightwave technique is required.**
- Distributed measurement **without pulsed lightwave** is needed for **higher spatial resolution and dynamic sensing**



光相関領域解析法:オリジナル技術

Time domain techniques have been much improved.

- *Spectral shape*
- *Specialty fiber*
- *Higher speed electronics for better resolution*

Optical Correlation Domain Techniques :

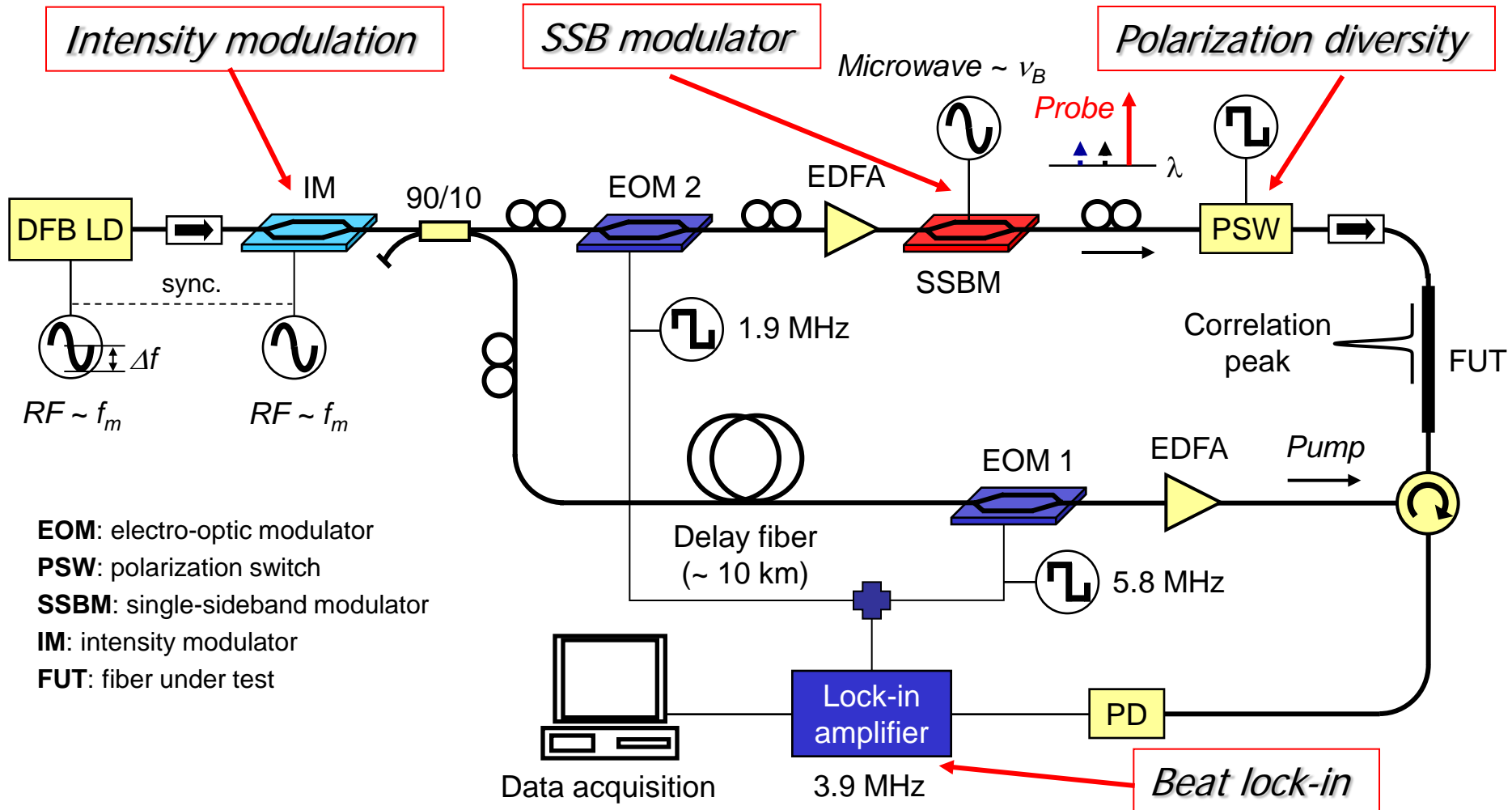
(continuous wave tech. without high speed electronics)

- *Measurement mode* *Random accessibility*
- *Spatial resolution* *1.6 mm*
- *Measurement speed* *1kHz for single point,*
200Hz with random accessibility,
20Hz with total distributed-measurement

BOCDAシステム

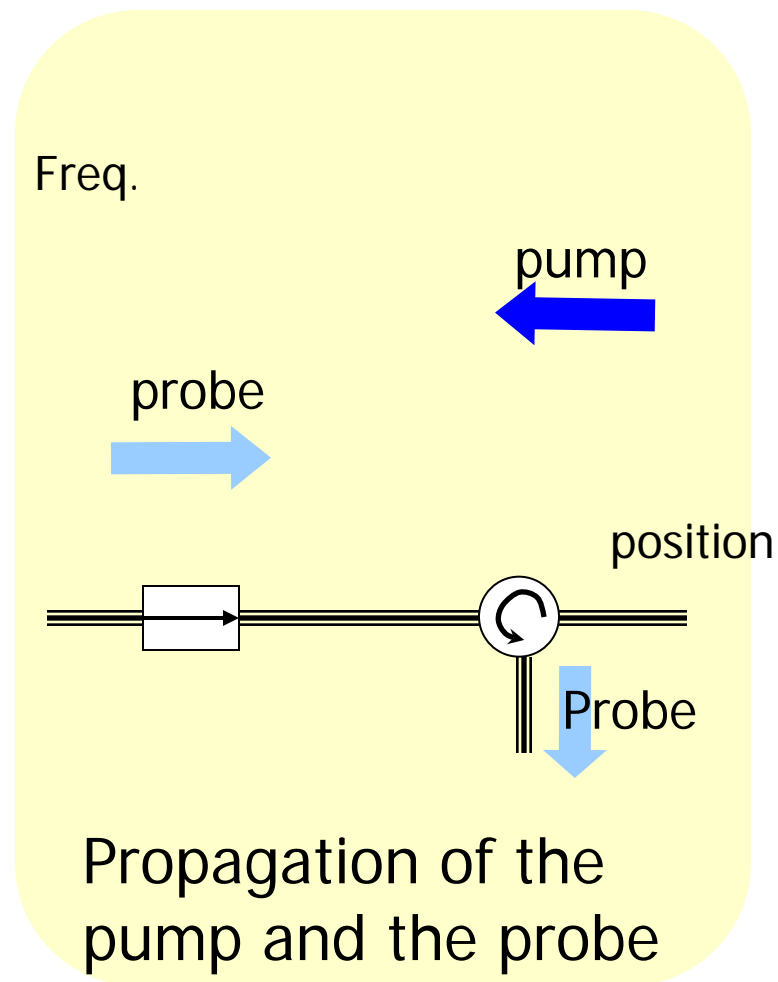
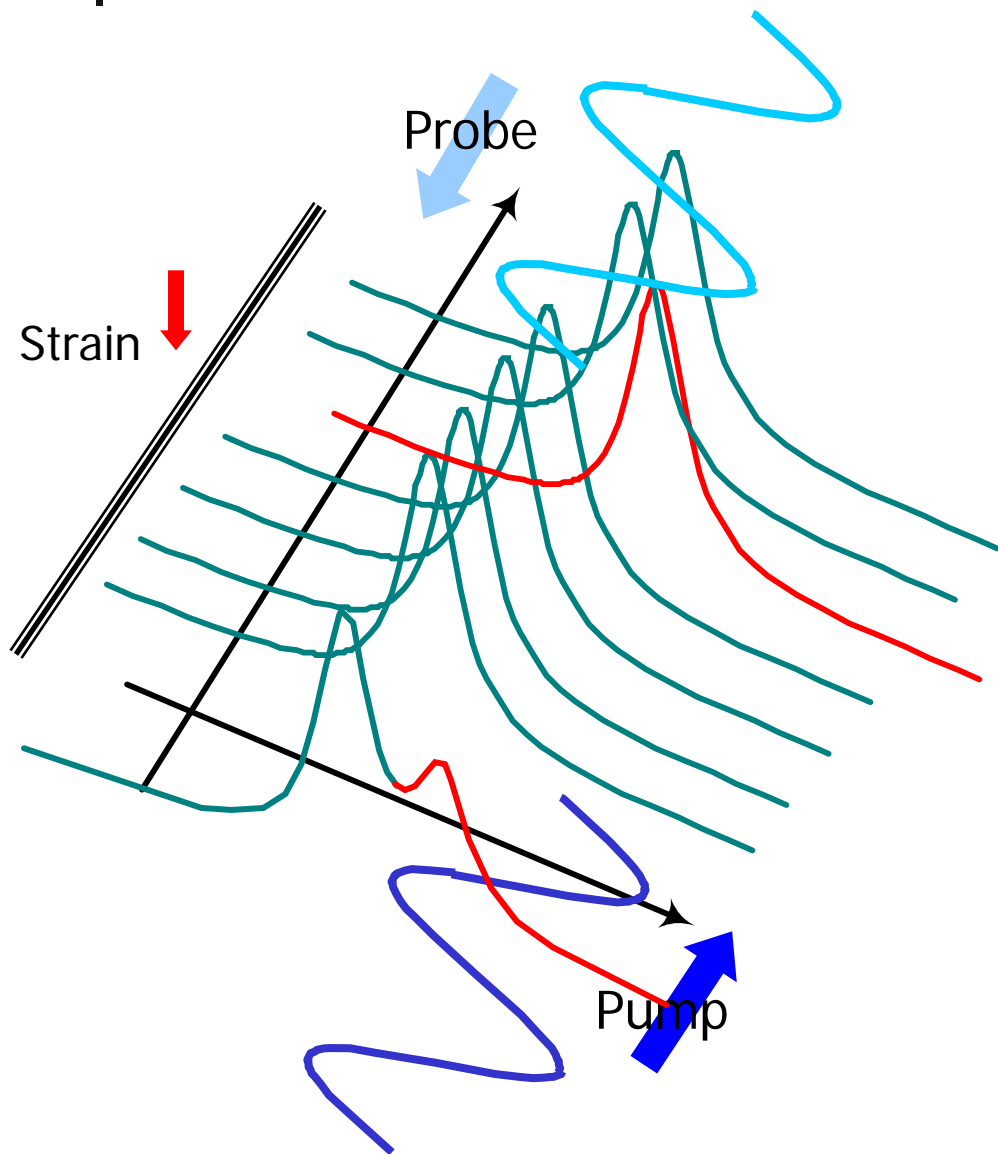
K. Hotate and T. Hasegawa, *IEICE Trans. on Electronics*, Vol.E83-C, No.3, 2000.

K. Hotate, K. Abe and K. Y. Song, *IEEE PTL*, Vol.18, No.24, 2006.

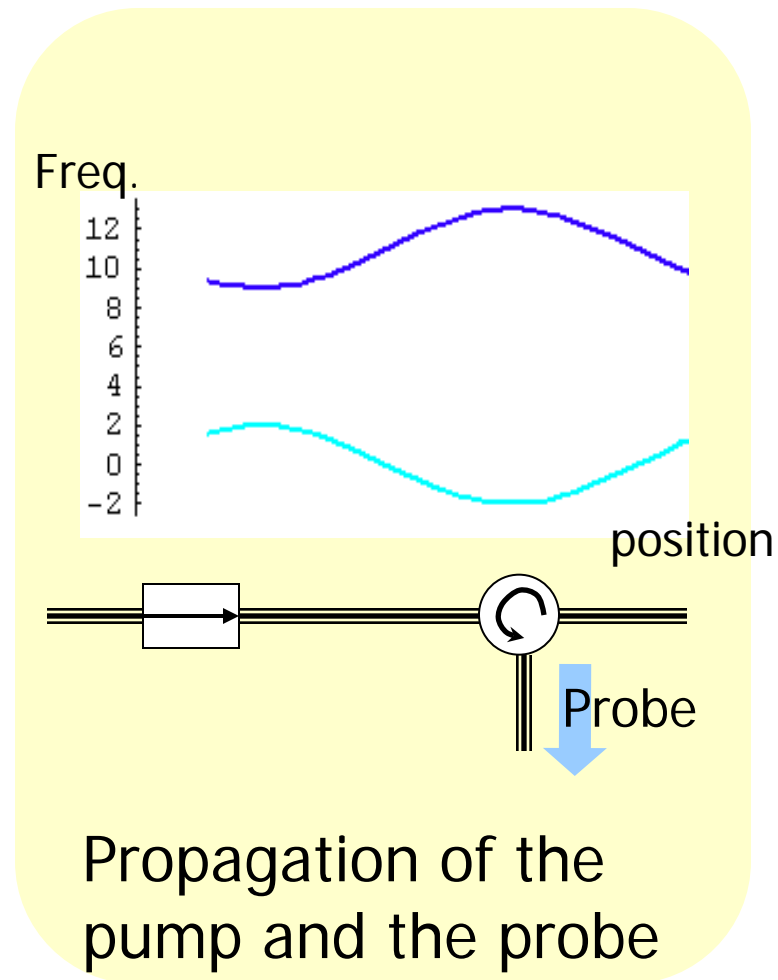
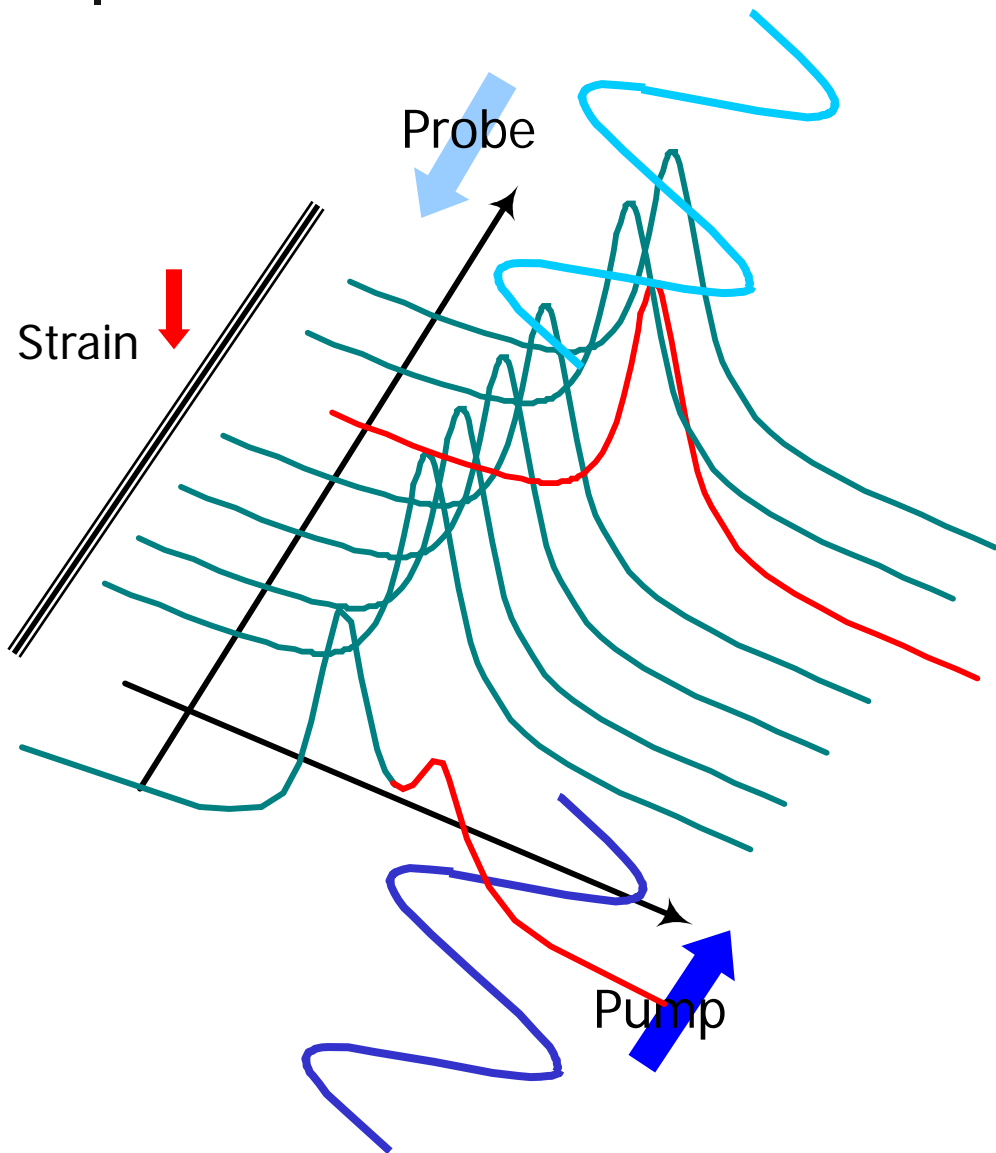


EOM: electro-optic modulator
PSW: polarization switch
SSBM: single-sideband modulator
IM: intensity modulator
FUT: fiber under test

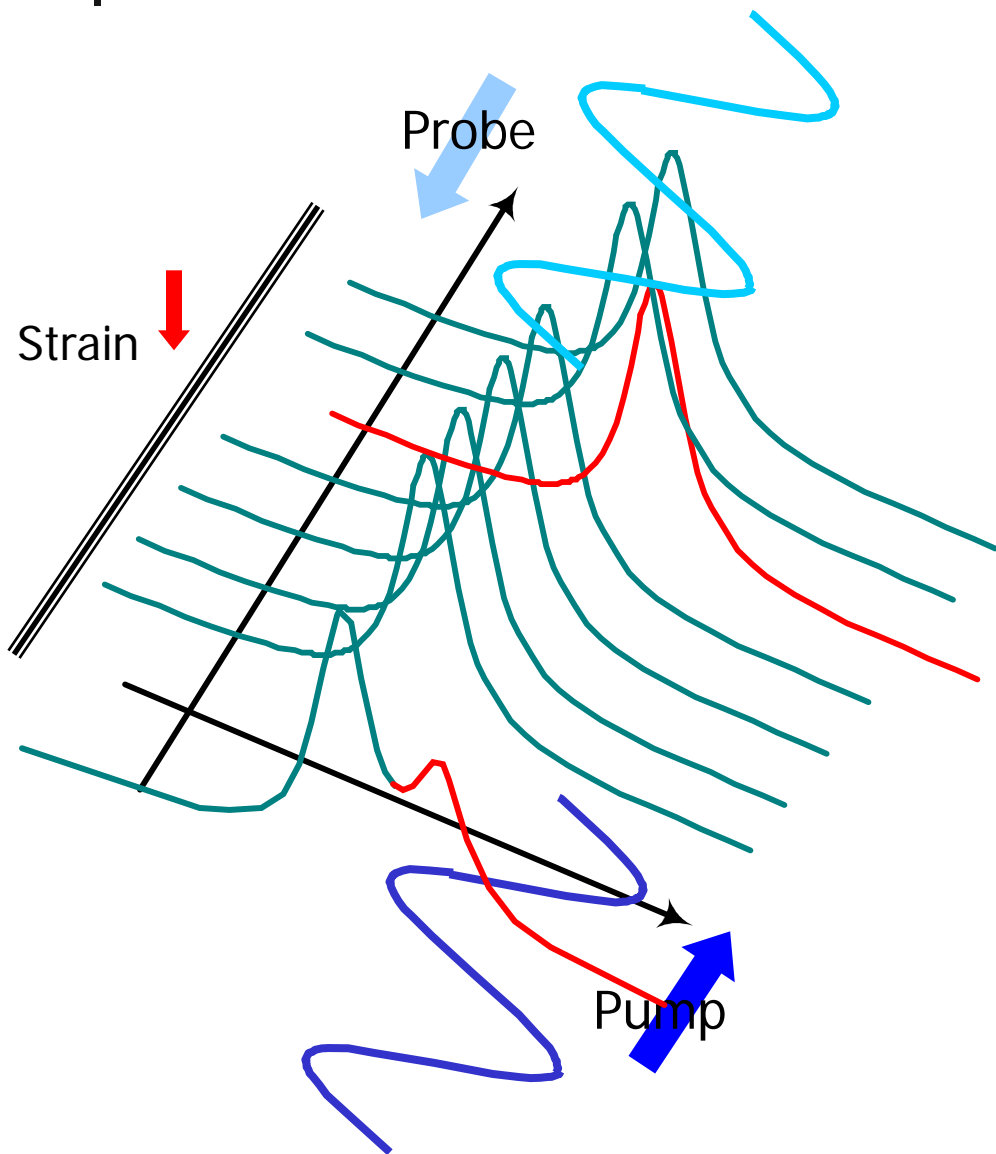
ブリルアン光相関領域解析法の原理



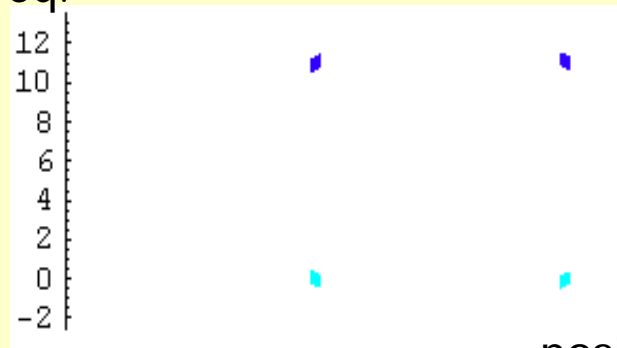
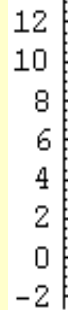
ブリルアン光相関領域解析法の原理



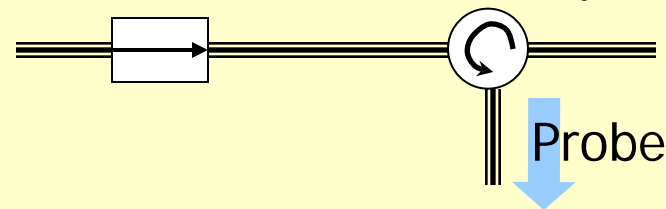
ブリルアン光相関領域解析法の原理



Freq.



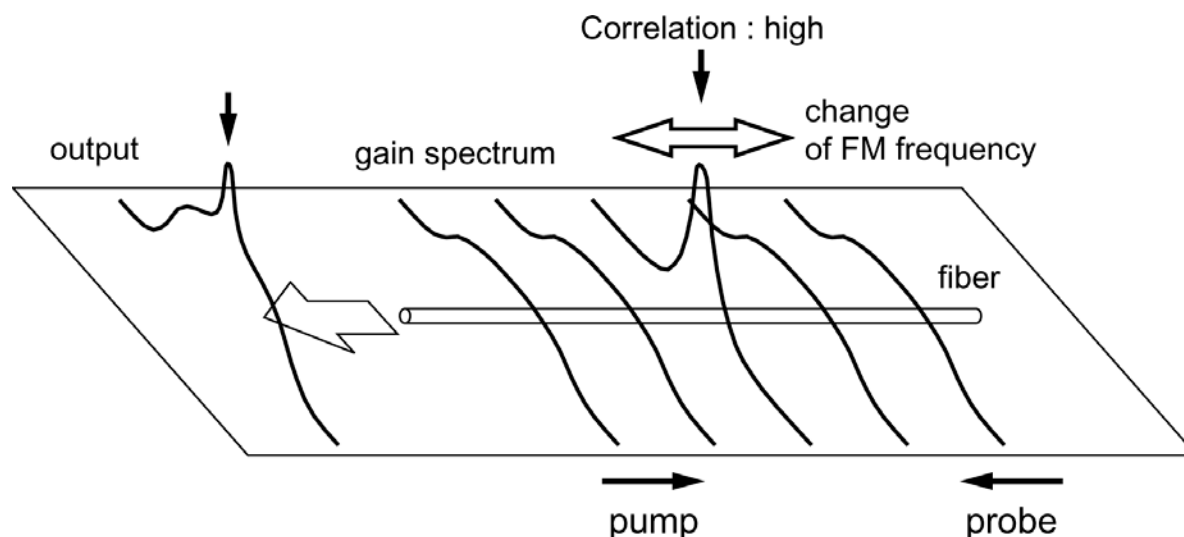
position



Propagation of the pump and the probe

BOCDA 技術の原理

Output : Summation of Brillouin gain along the fiber



- The gain in the position where the correlation is highest can be generated exclusively
- The position can be moved by the FM frequency

Distributed strain measurement can be realized

BOCDA 法の基本式

Basic equation derived from relations between lightwaves and an acoustic wave in Brillouin scattering process

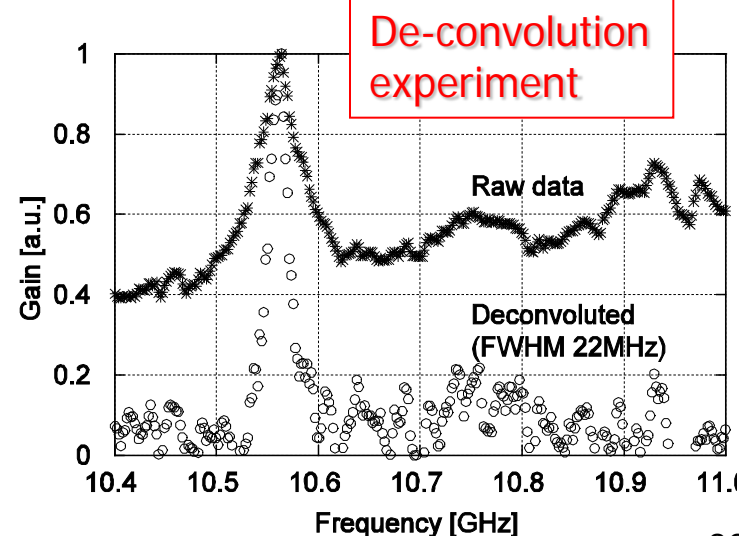
$$g(t_m, \omega_d) = \frac{v_g \overline{P_1}}{A_{eff}} \int_{-\infty}^{\infty} d\zeta \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{2\pi} g_B(\zeta, \omega) S_{bp0}(\varepsilon\tau - \zeta, \omega_d - \omega)$$

Brillouin gain profile obtained in BOCDA System: t_m -position, ω_d -frequency

Intrinsic Brillouin gain profile as functions of position along a fiber and frequency

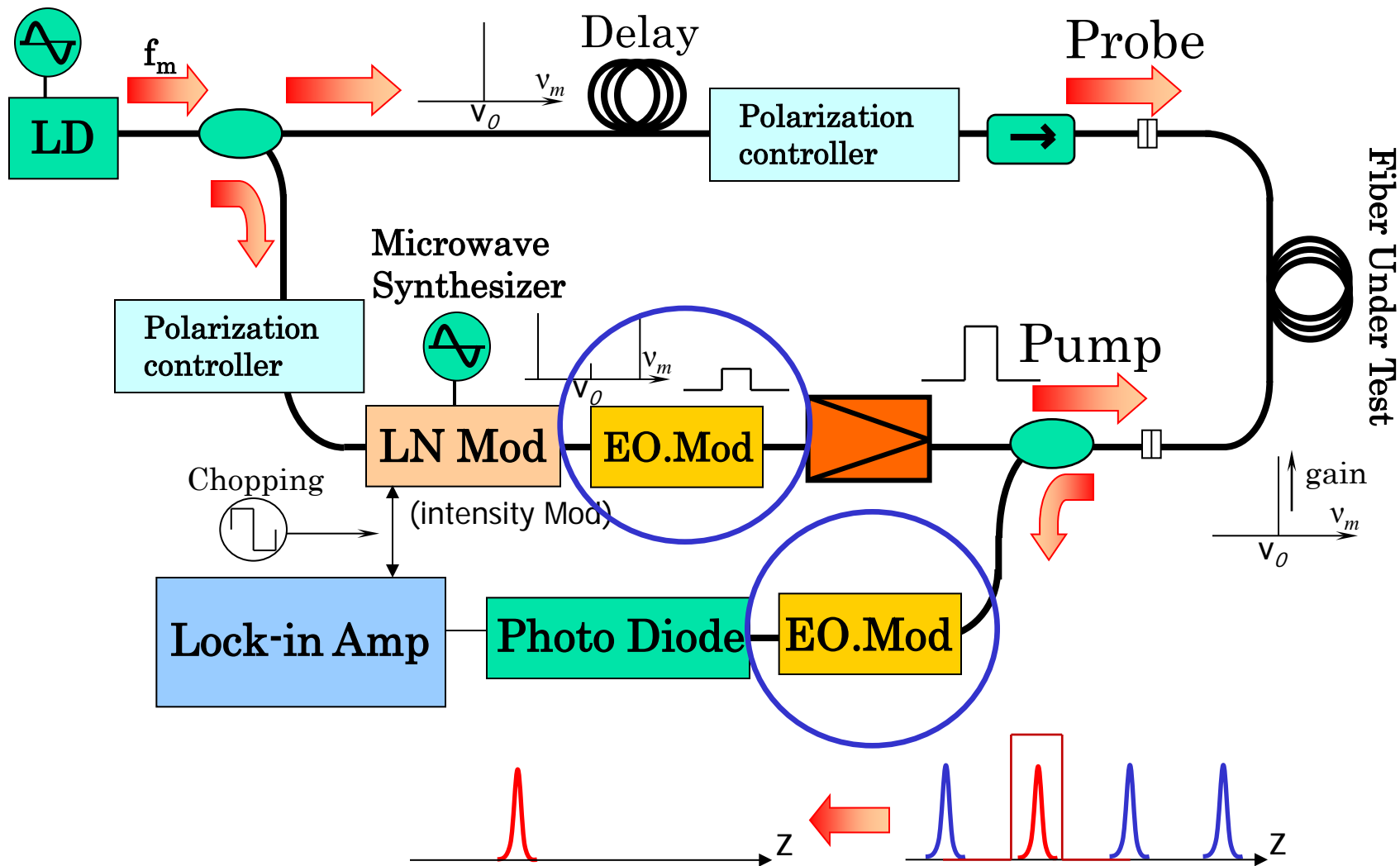
Delta-like function generated by the frequency modulation of a laser source

Convolution between intrinsic Brillouin gain profile and delta-like function generated by BOCDA scheme



時間ゲート法 — 測定レンジの延伸法 —

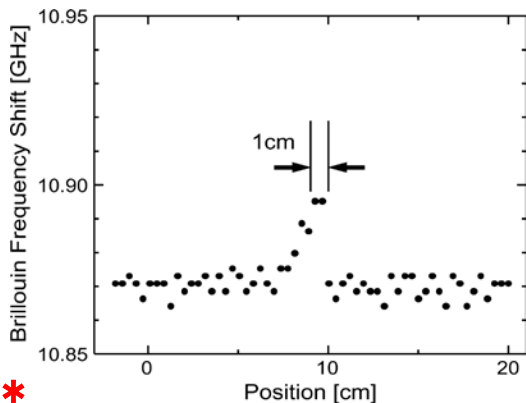
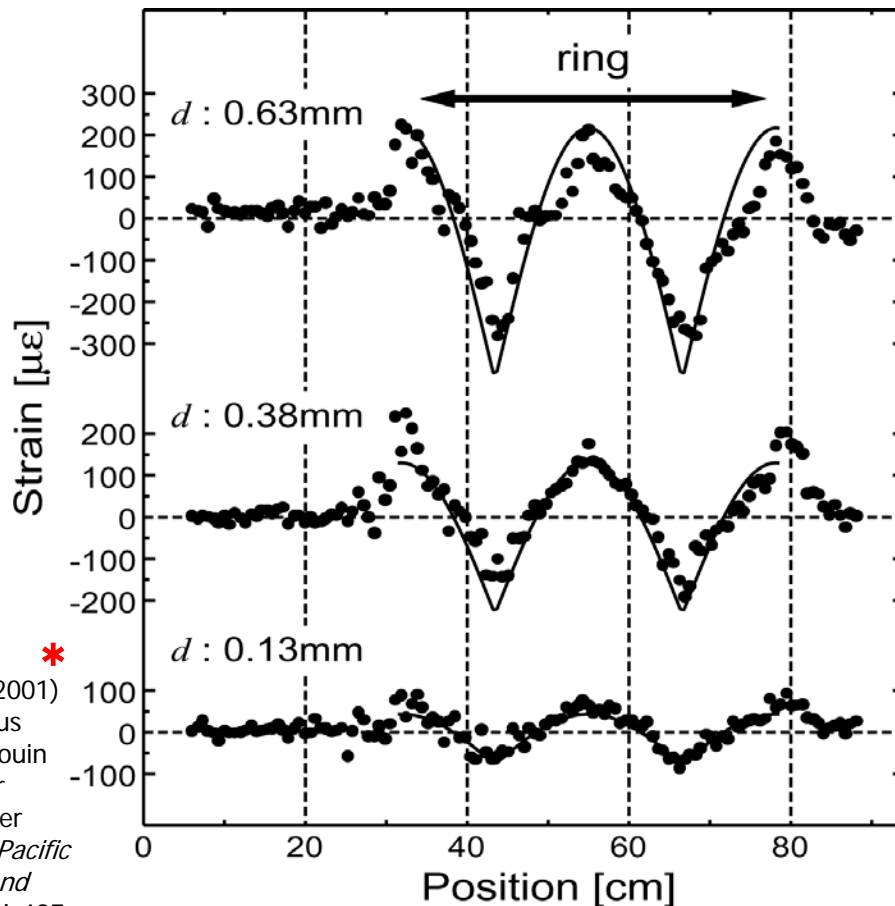
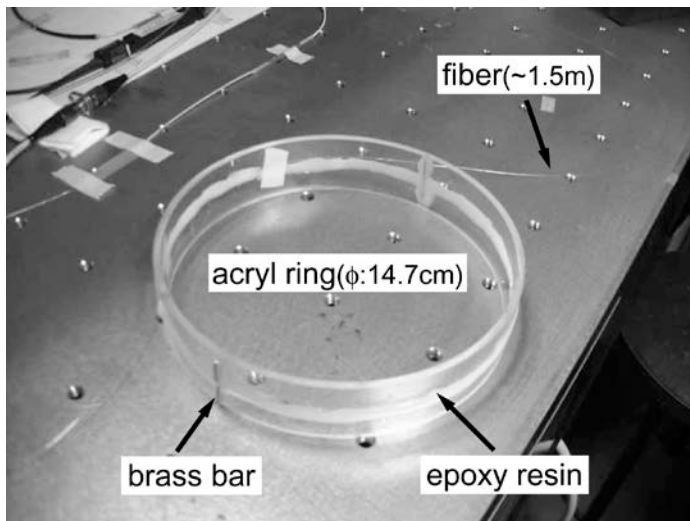
Ando Electric and Univ. of Tokyo



スマート材料の実現

K. Hotate and M. Tanaka, *IEEE PTL*, Vol.14, No.2, 2002.

Sample used in this study



*
<右> Hotate and Tanaka (2001)
"Correlation-based continuous
wave technique of fiber Brillouin
distributed strain sensing for
smart materials with cm order
spatial resolution," *The 4th Pacific
Rim Conference on Lasers and
Electro-optics*: 1-496-497, p.1-497,
Fig.3.

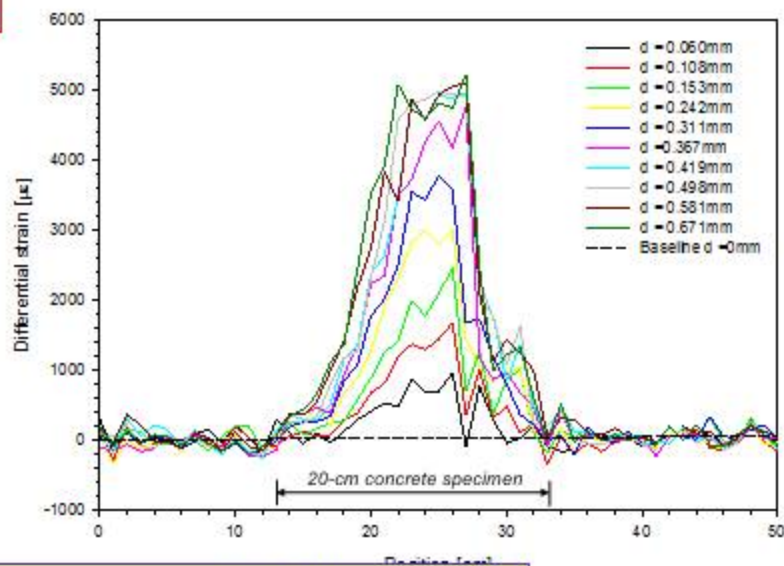
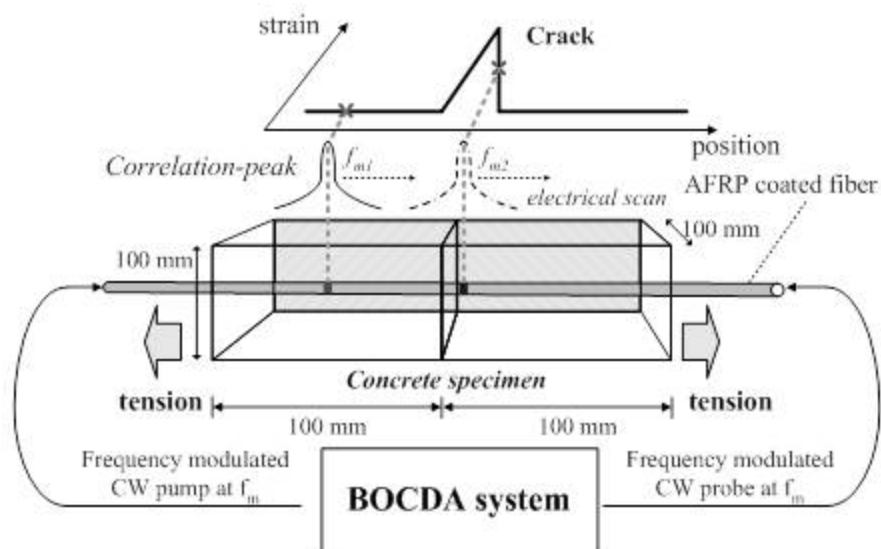
with 1cm spatial resolution !!

*
Hotate and Tanaka (2002) "Distributed fiber Brillouin strain sensing with
1-cm spatial resolution by correlation-based continuous-wave technique,"
IEEE Photonics Technology Letters 14(29): 179-181, p.181, Fig.6.

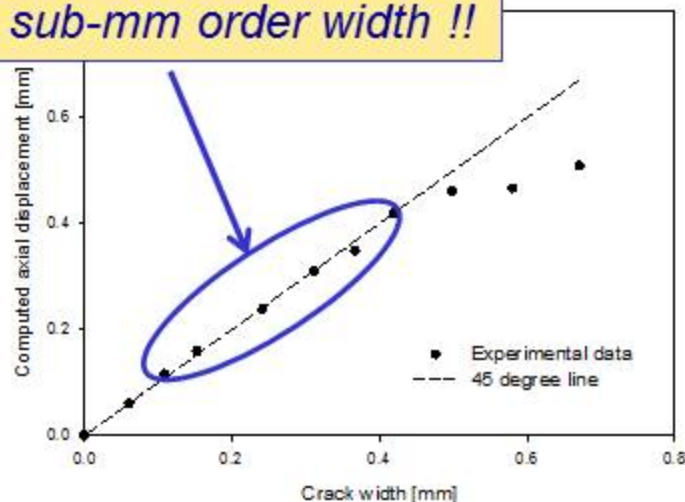
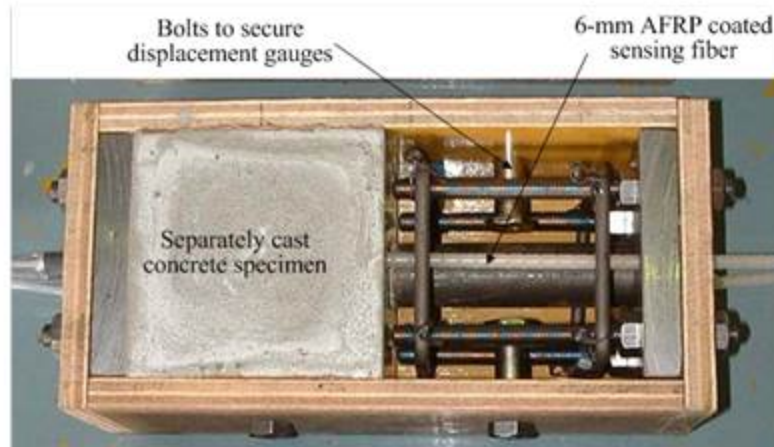
The University of Tokyo

コンクリートのクラック検出

University of Tokyo and Shimizu Corp.

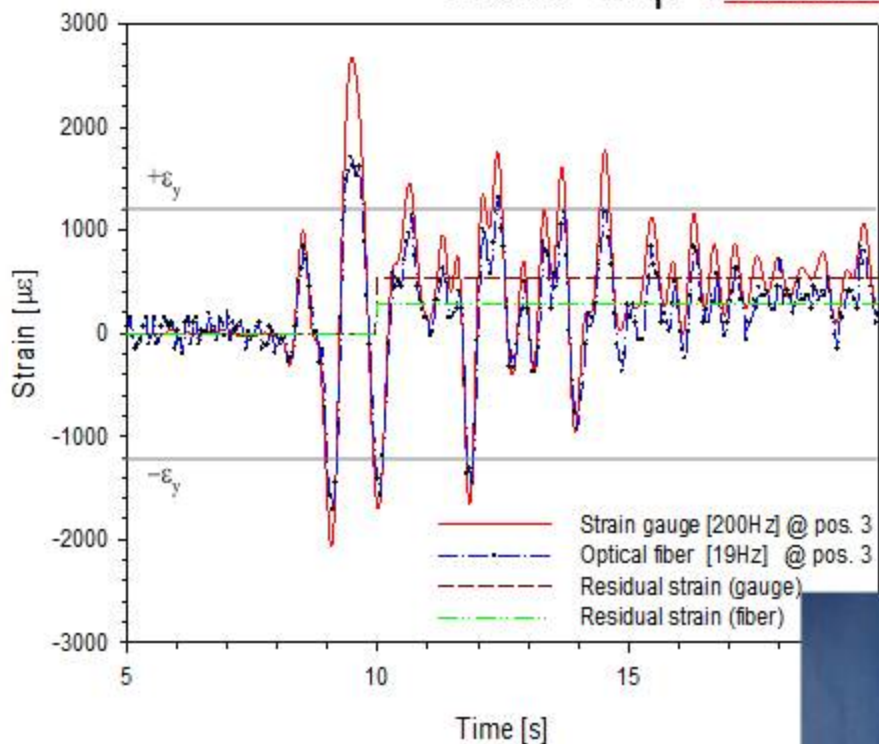


Measurement of the crack with sub-mm order width !!

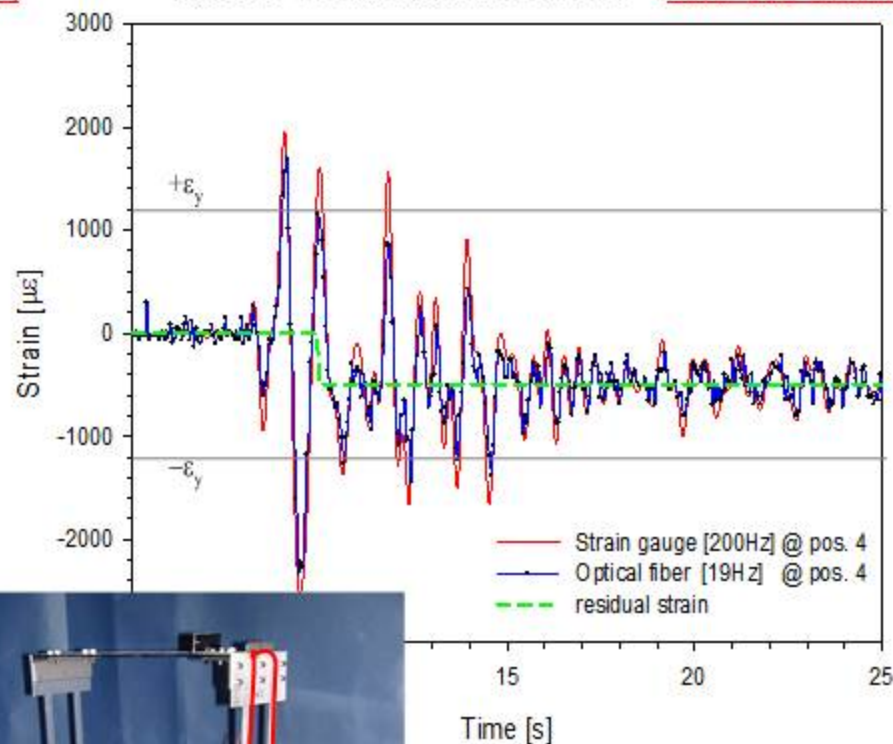


多点同時ダイナミック歪センシング

Video Clip : [0219kobe001.mpg](#)

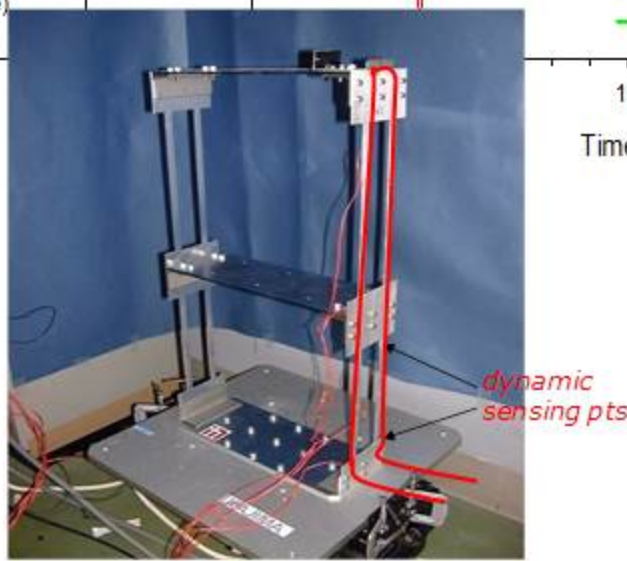


BGS measurement : [Movie_BGS_kobe.wmv](#)



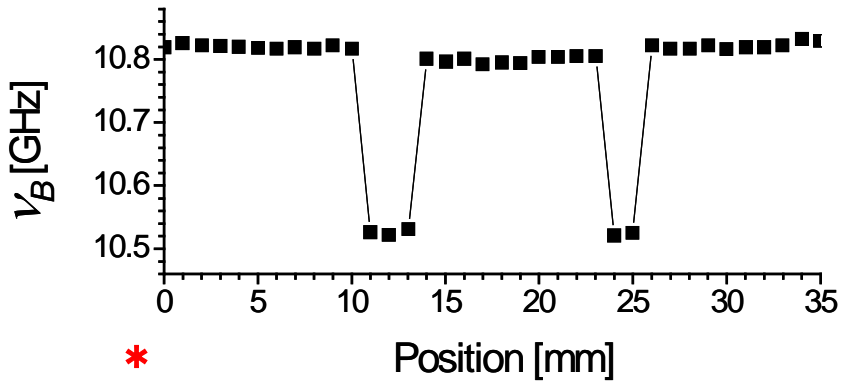
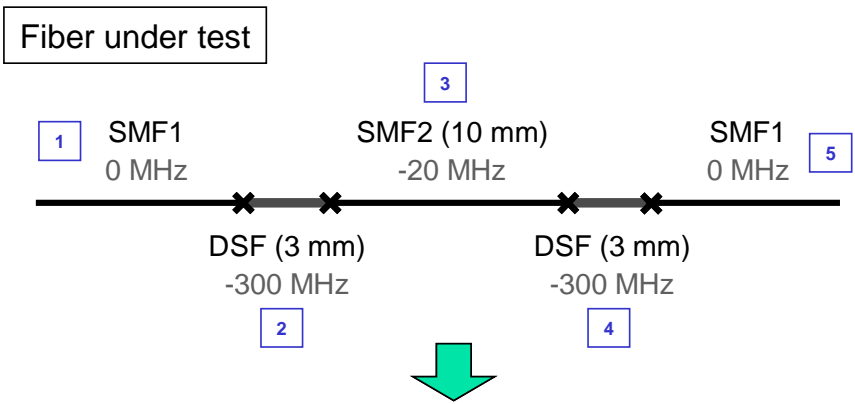
**Random
accessibility !!**

University of Tokyo and Kajima Corp.

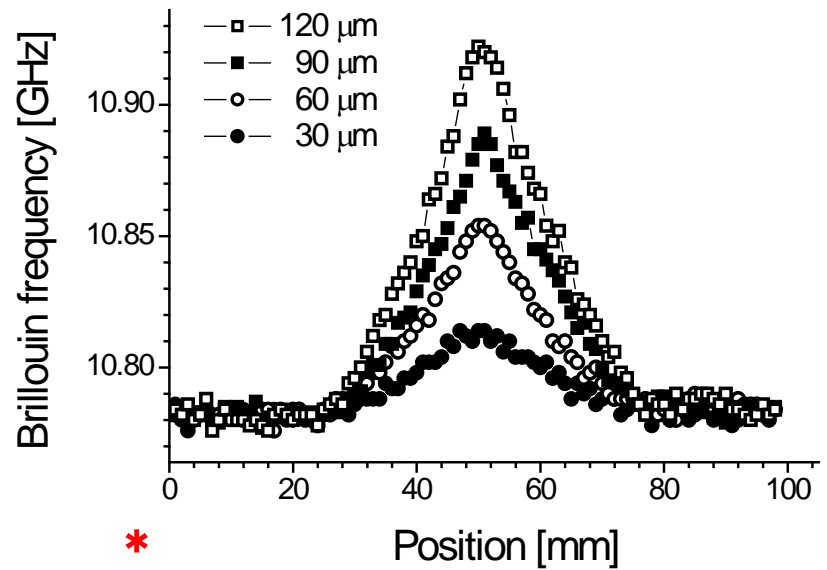
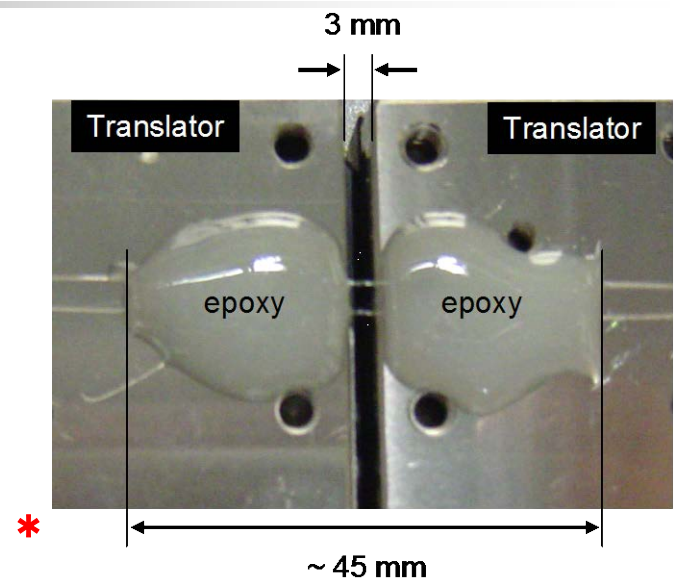


ミリメートル分解能の実現

K.-Y. Song, Z. He and K. Hotate,
OSA Optics Letters, Vol.31, No.17, 2006.



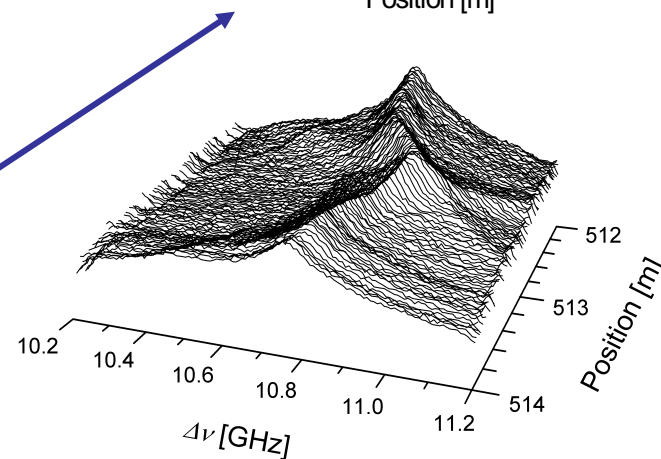
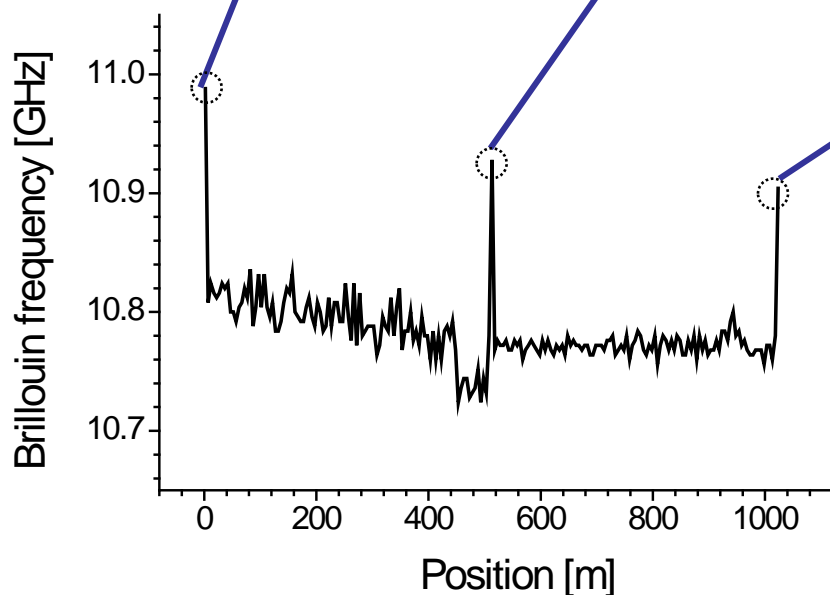
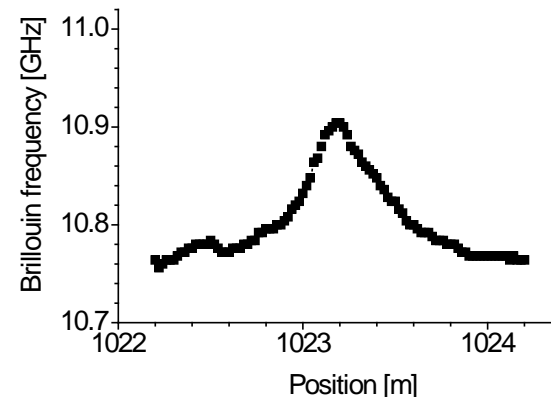
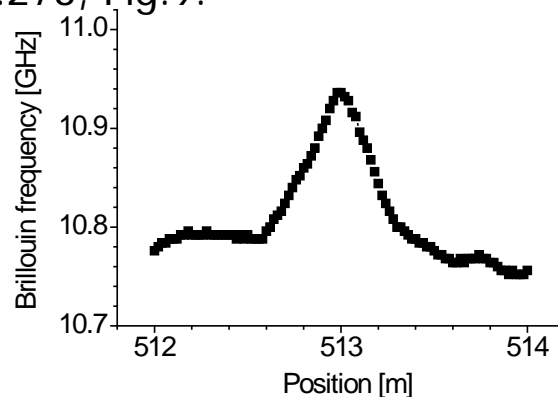
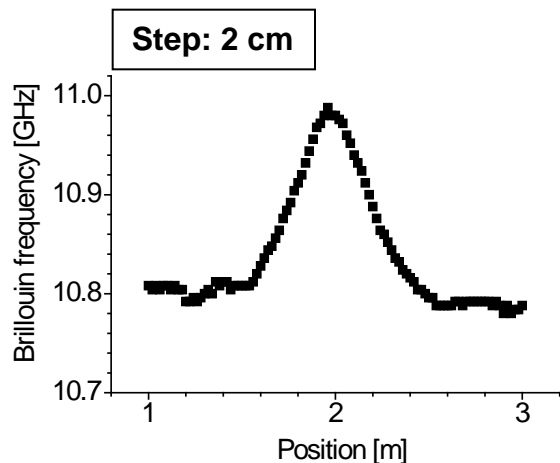
1.6 mm resolution !!



Song *et al.* (2006) "Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis," *Optics Letters* 31(17): 2526-2528, p.2527, Fig.3(a); p.2528, Fig.5.

7cm空間分解能と1,030m測定レンジ

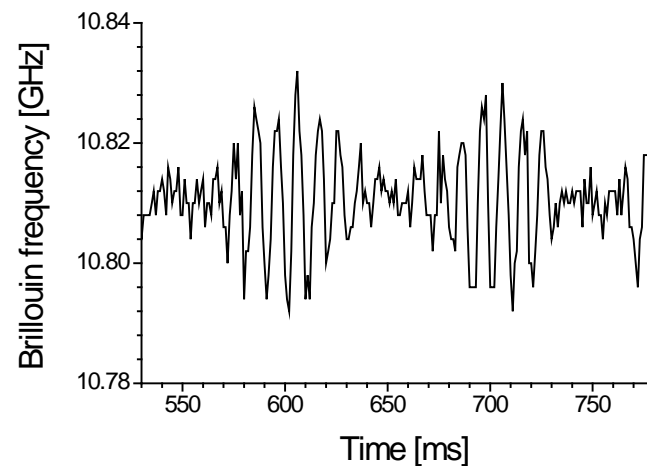
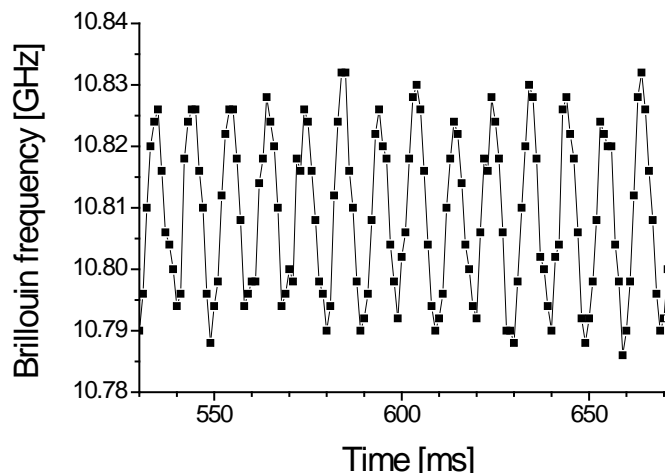
* K. Hotate, H. Arai and K.-Y. Song, *SICE J. of Control, Measurement and System Integration, Vol.1, No.4, 2008 <Invited>*.
p.273, Fig.9.



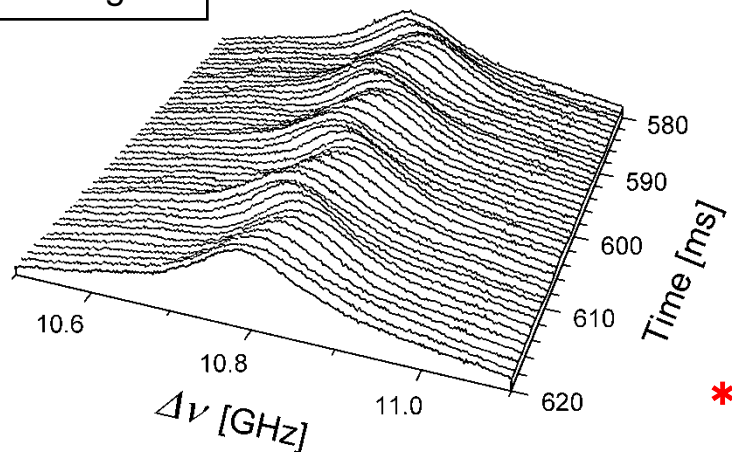
7cm resolution / 1,030m range
100 times enhancement:
Ratio: 14,700

1 KHz サンプリングの実現

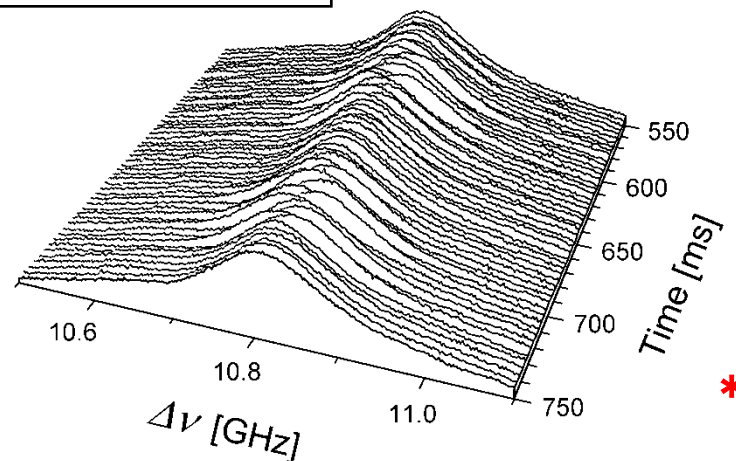
K.-Y. Song and K. Hotate, IEEE PTL, Vol.19, No.23, 2007.



100 Hz signal



100 Hz & AM 10 Hz signal

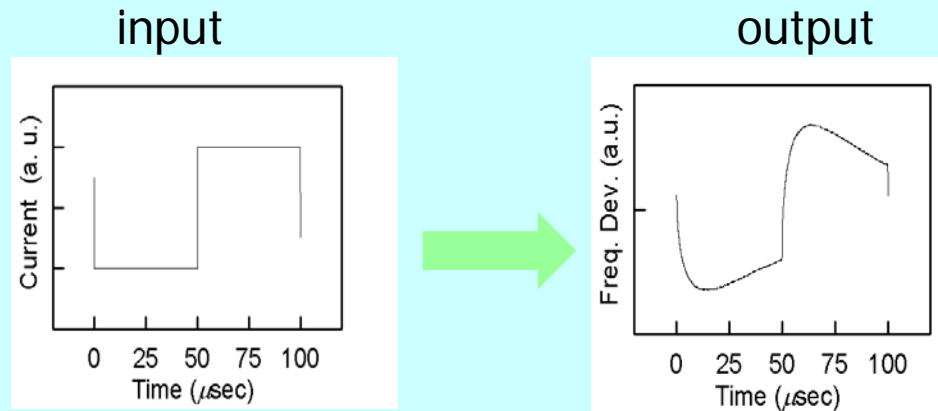
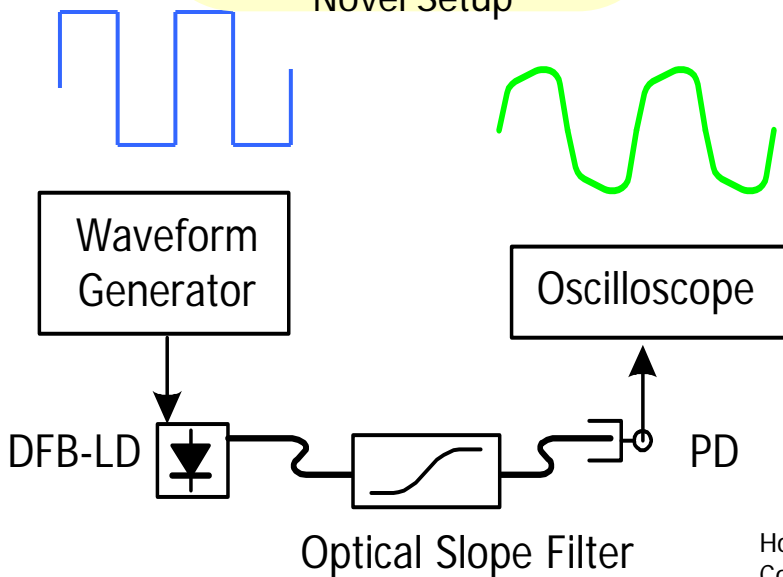
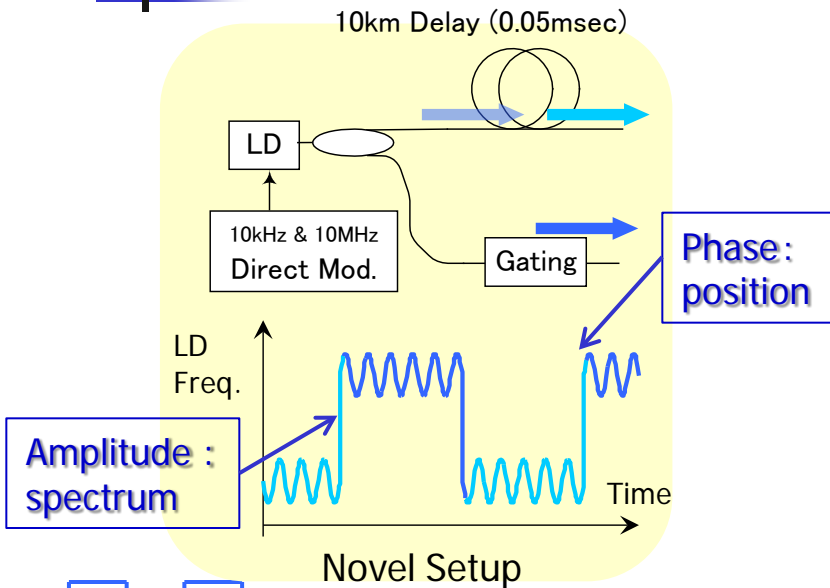


1 KHz sampling with BOCDA

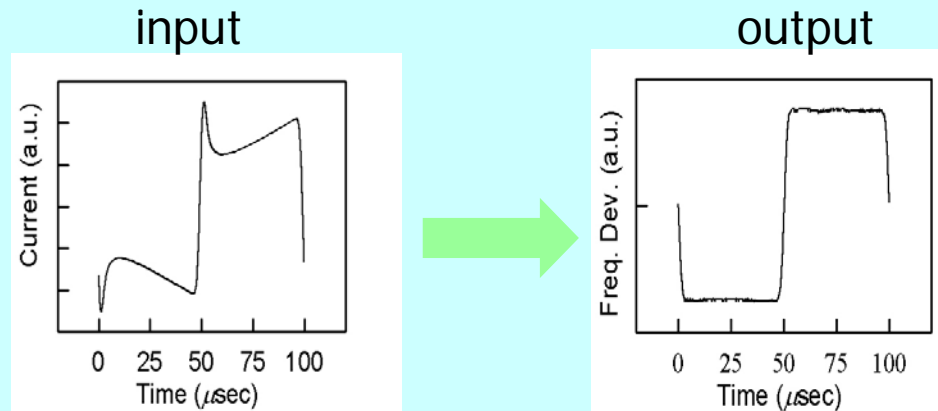
Song and Hotate (2007) "Distributed fiber strain sensor with 1 kHz sampling rate based on Brillouin optical correlation domain analysis," *Proceedings of SPIE 6770*, Optics East 2007, 67700J-6, Fig.8.

ポンプ・プローブ時分割発生方式BCODAシステム

K. Hotate and T. Yamauchi, *JJAP, Vol.44, No.32, 2005.*



W/O compensation



With compensation

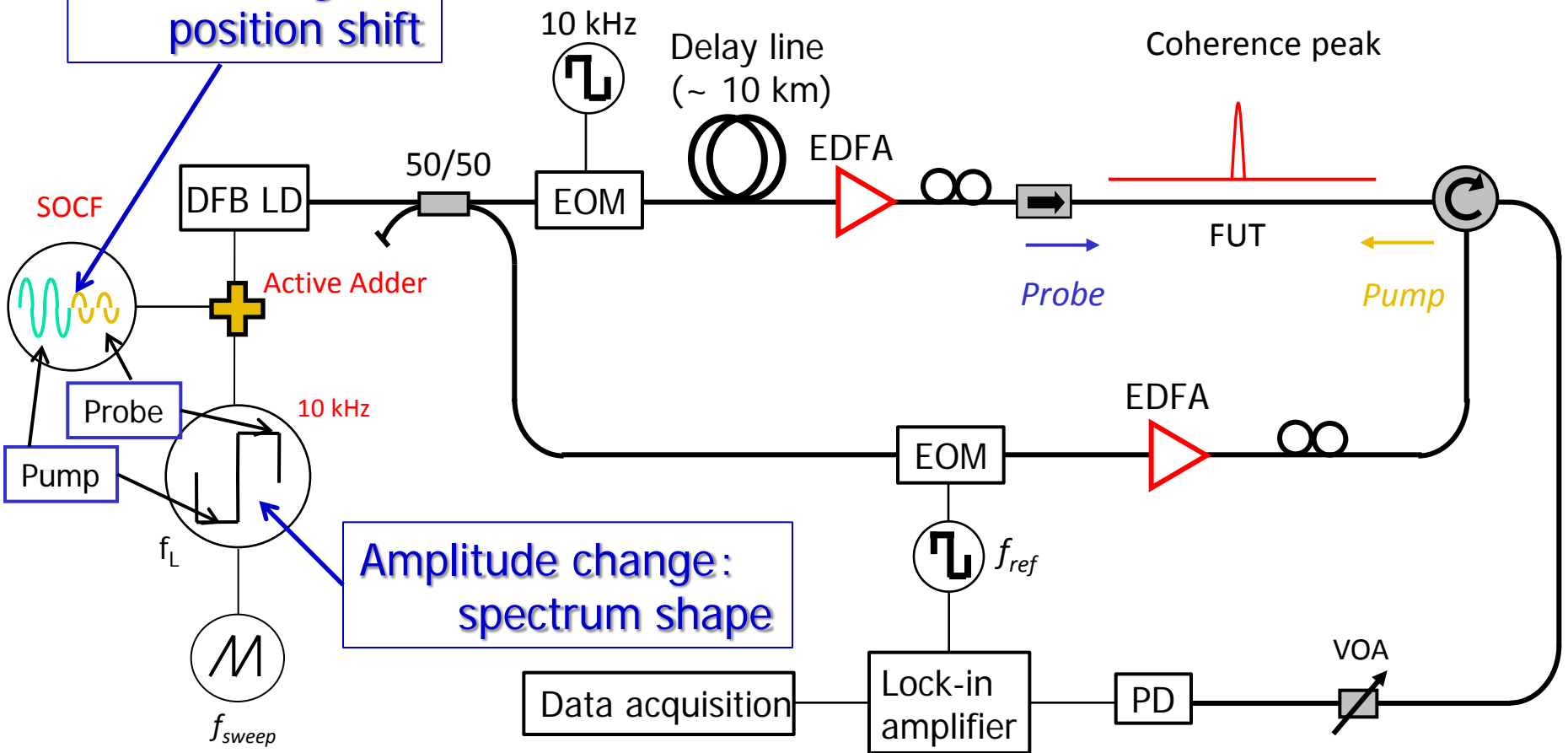
Hotate and Yamauchi (2005) "Fiber-Optic Distributed Strain Sensing System by Brillouin Optical Correlation Domain Analysis with a Simple and Accurate Time-Division Pump-Probe Generation Scheme," *Japanese Journal of Applied Physics* 44(32): L1030-L1033, p.L1032, Figs.4, 6. 41

高速ランダムアクセスの実現

Random accessibility !!

K. Hotate, M. Numasawa, M. Kishi, and Z. He, 3rd Asia Pacific Optical Sensors Conference, WB-3, Sydney, Australia, 2012.

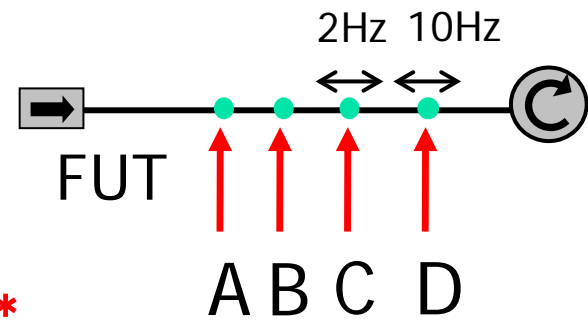
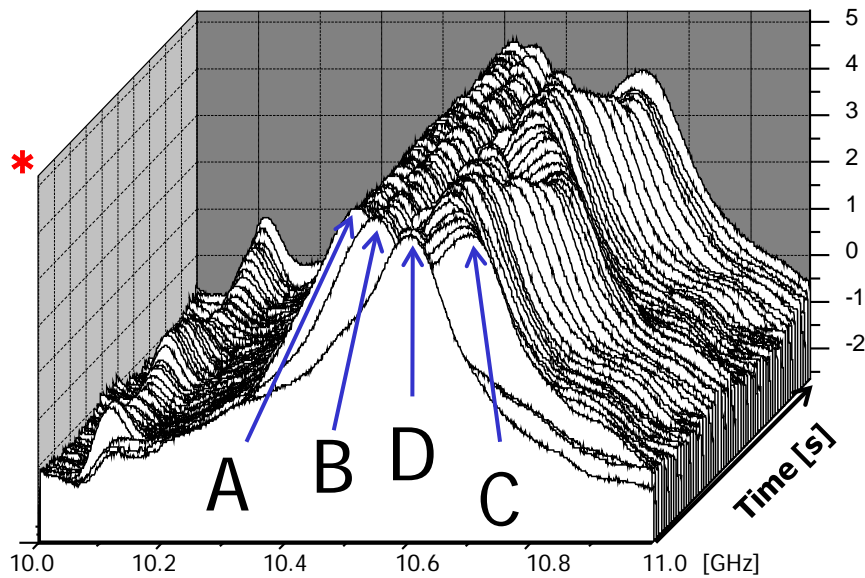
Phase change:
position shift



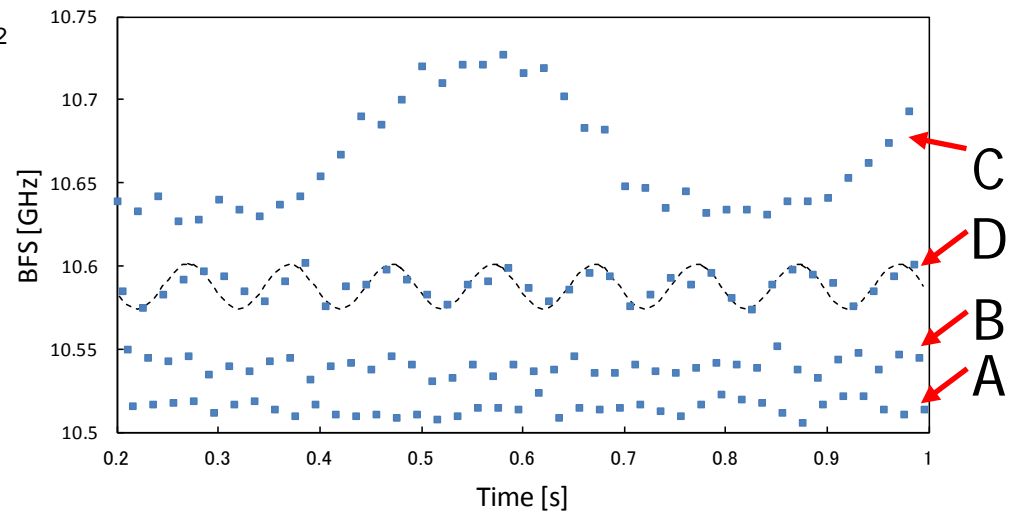
* Hotate et al. (2012) High speed random accessibility of Brillouin optical correlation domain analysis with time division pump-probe generation scheme, *Third Asia Pacific Optical Sensors Conference, 83510W*. Fig.3.

ランダムアクセスによる4点同時動的歪計測

200 Hz total sampling
with Random Accessibility



<左および上>Hotate et al. (2012) High speed random accessibility of Brillouin optical correlation domain analysis with time division pump-probe generation scheme, *Third Asia Pacific Optical Sensors Conference, 83510W*. Fig.8.

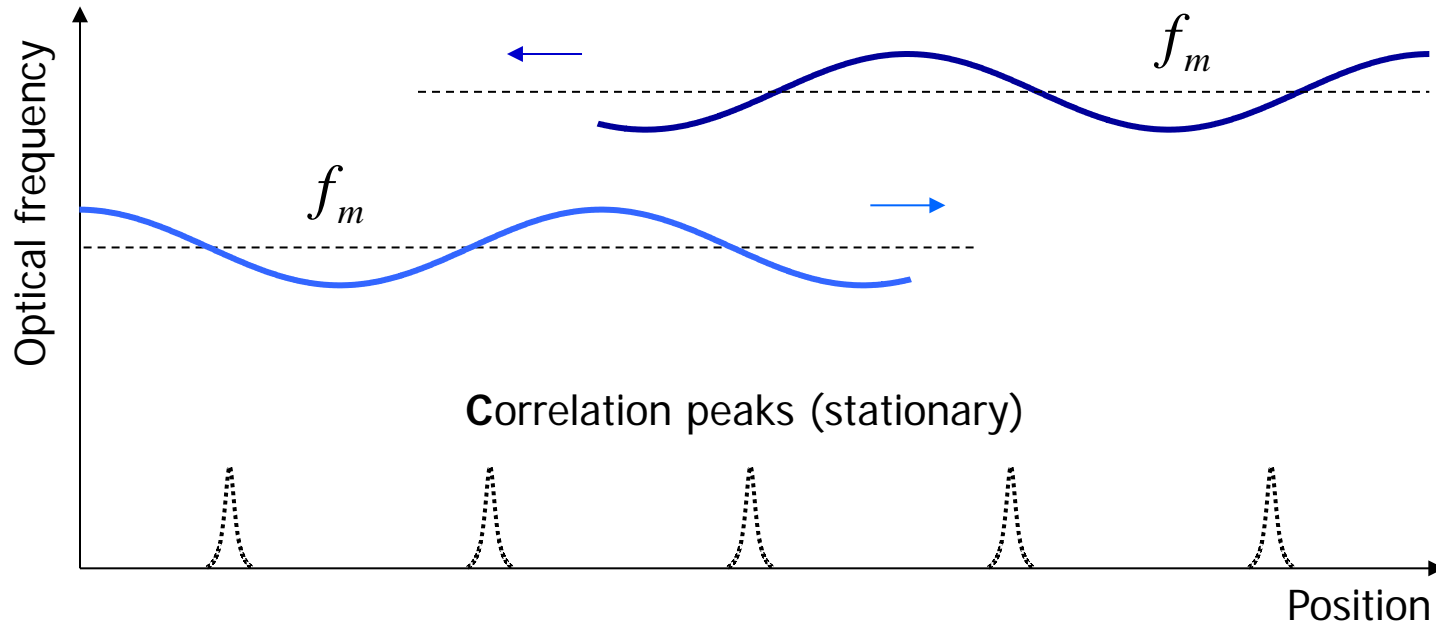


* Hotate et al. (2012) High speed random accessibility of Brillouin optical correlation domain analysis with time division pump-probe generation scheme, *Third Asia Pacific Optical Sensors Conference, 83510W*. Fig.9.

BOCDA法による高速全分布量センシング

The Univ. of Tokyo &
Chung-Ang Univ.

Principle: Differential Frequency Modulation (DFM)

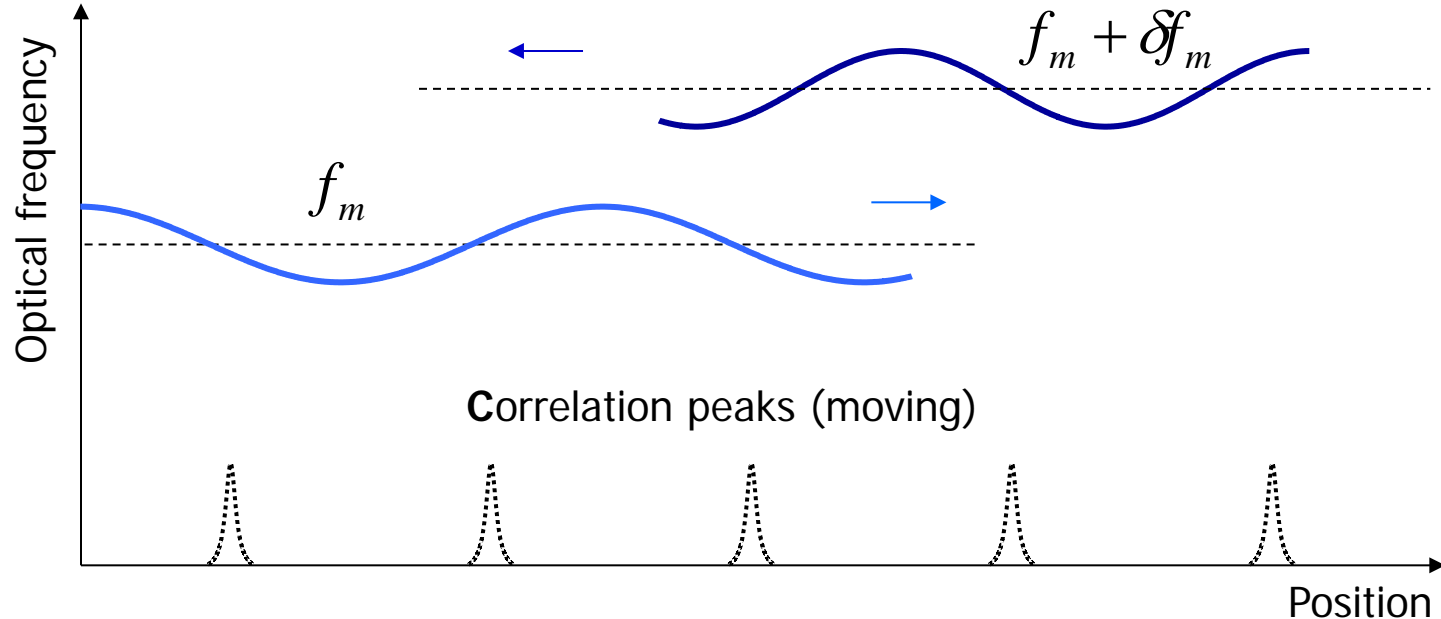


*

BOCDA法による高速全分布量センシング

The Univ. of Tokyo &
Chung-Ang Univ.

Principle: Differential Frequency Modulation (DFM)



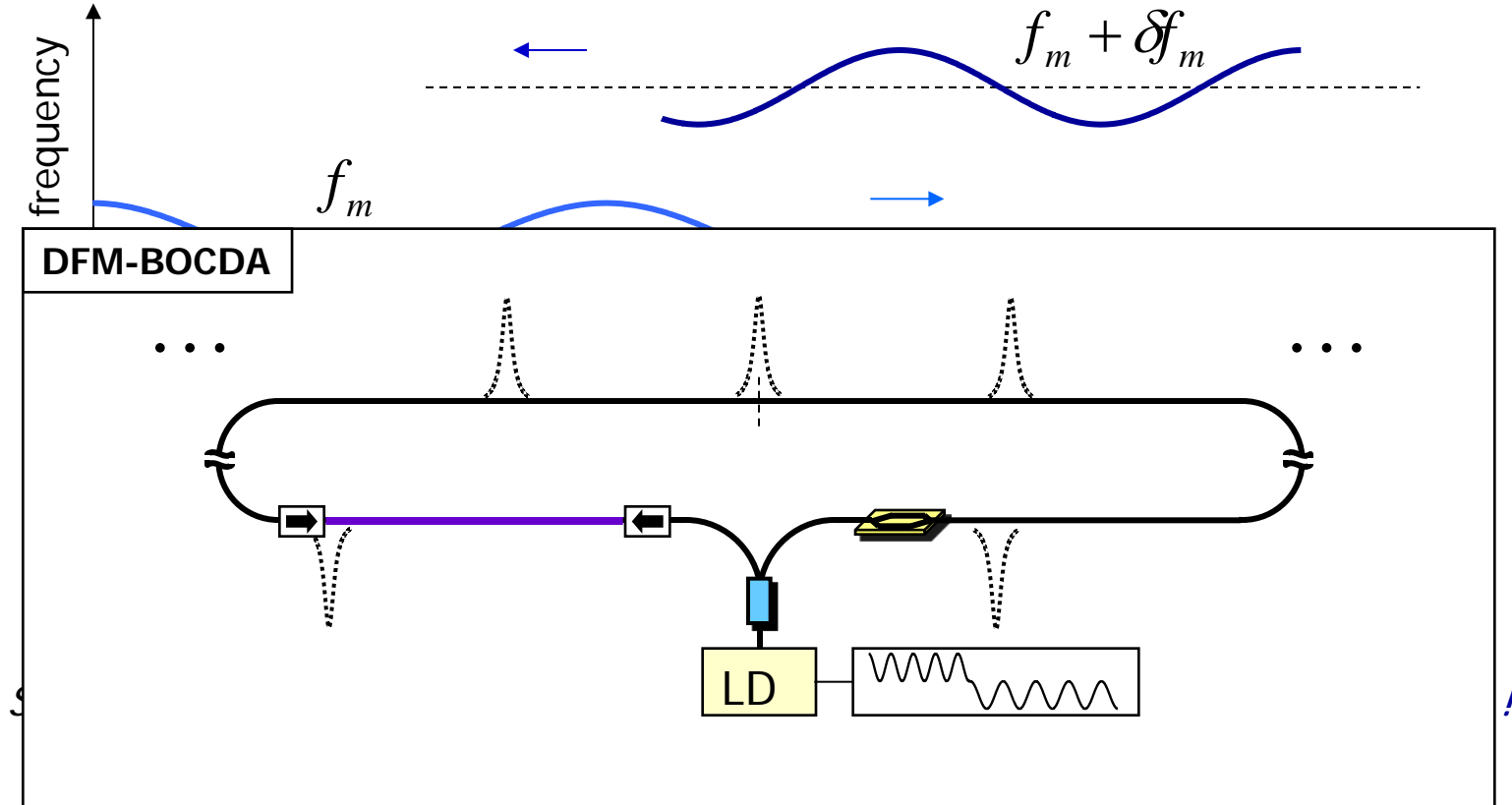
Sweeping correlation peaks are generated by *Differential Frequency Modulation* !

*

BOCDA法による高速全分布量センシング

The Univ. of Tokyo & Chung-Ang Univ.

Principle: *Differential Frequency Modulation (DFM)*



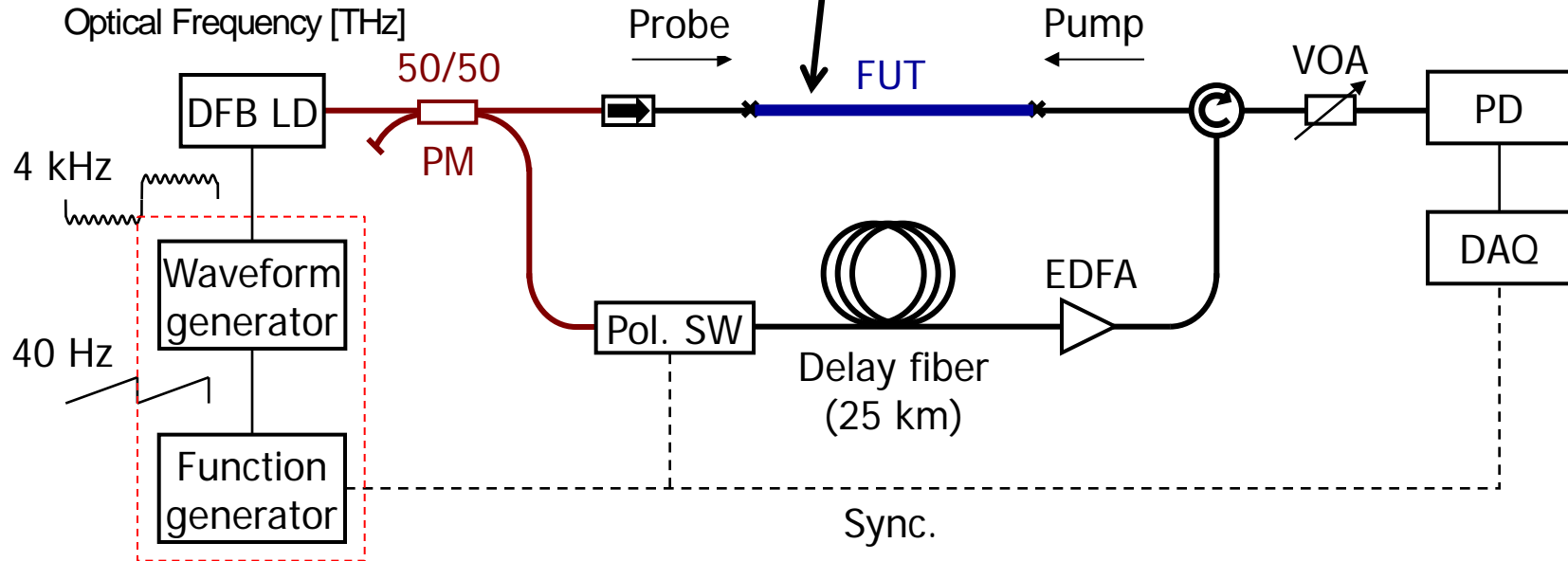
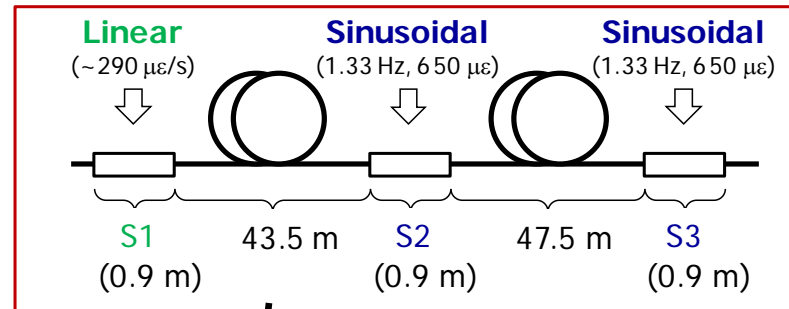
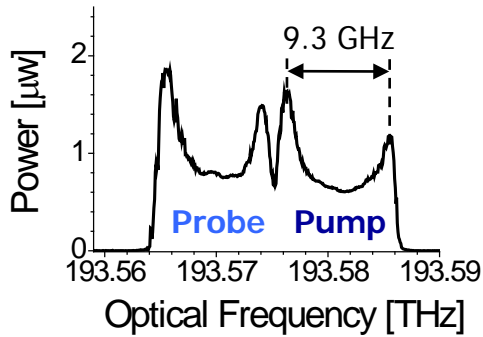
Moving speed: $V = \frac{\delta}{2f_m + \delta} \cdot \frac{c}{n}$

Peak to peak distance: $R = \frac{1}{2f_m + \delta} \cdot \frac{c}{n}$

*

異周波数変調方式BOCDA法

The Univ. of Tokyo & Chung-Ang Univ.



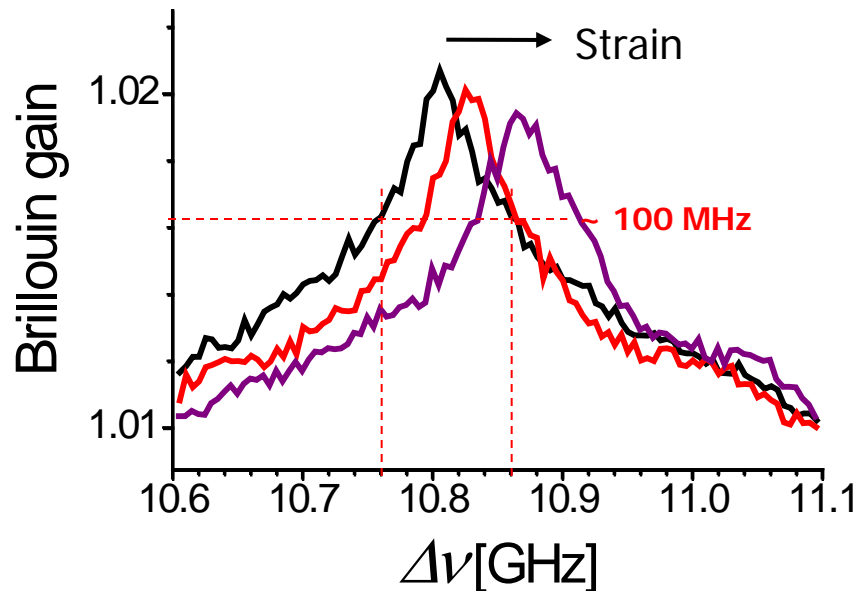
$\Delta\nu$ sweep: 10.6 ~ 11.1 GHz with 5 MHz step (100 traces)

*

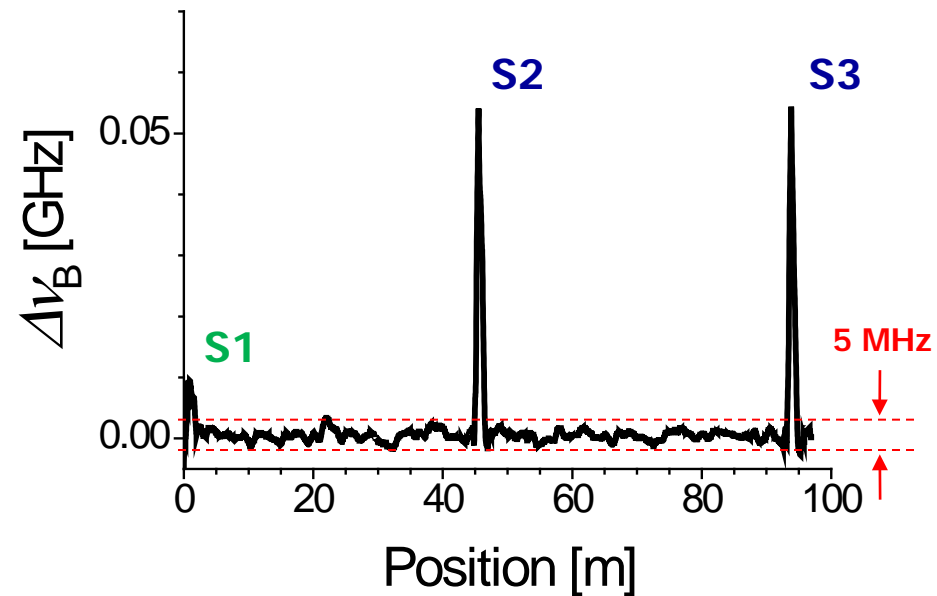
実験結果

The Univ. of Tokyo &
Chung-Ang Univ.

🔗 Brillouin gain spectrum



🔗 Distribution map (scan τ : 50 ms)

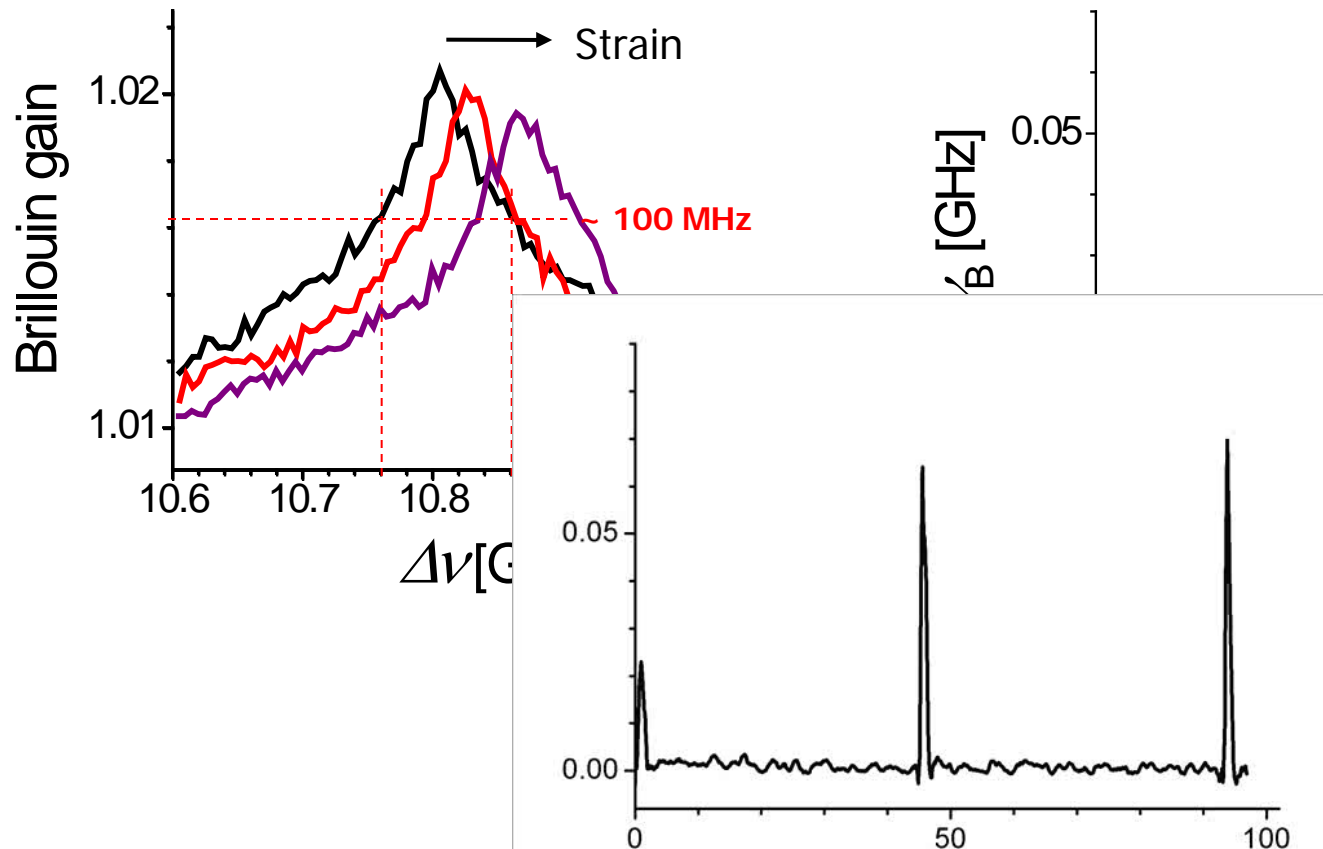


*

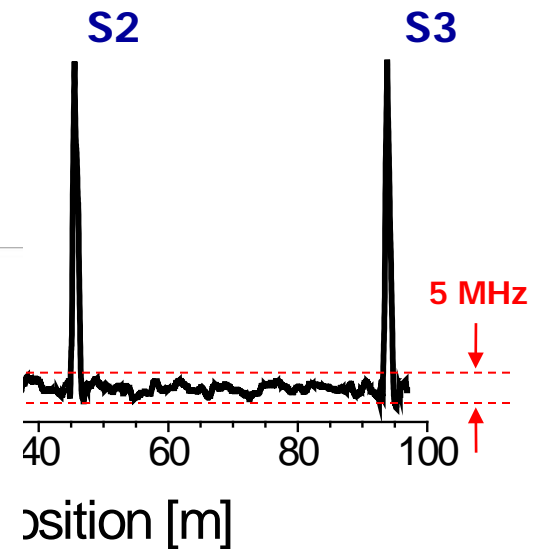
実験結果

The Univ. of Tokyo &
Chung-Ang Univ.

🔧 Brillouin gain spectrum



🔧 Distribution map (scan τ : 50 ms)



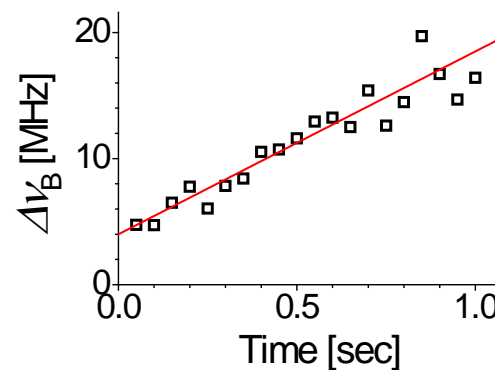
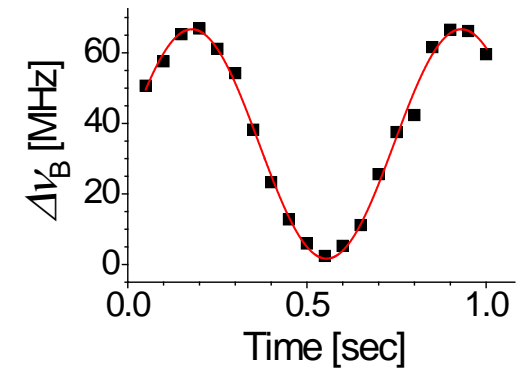
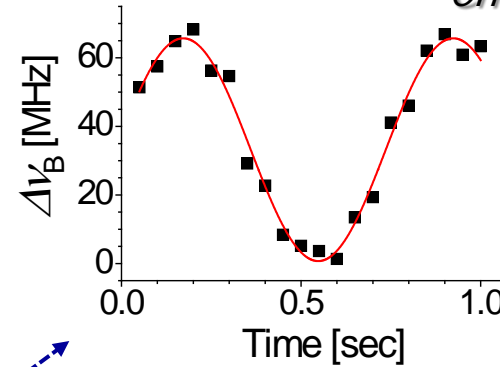
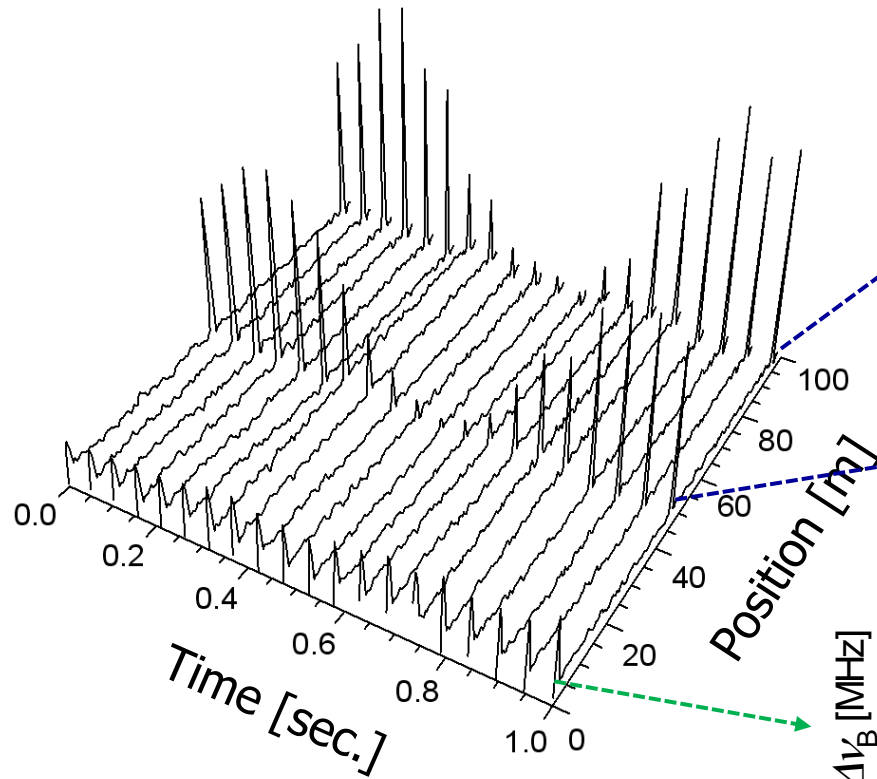
DFM-BOCDA.mpg

*

実験結果

The Univ. of Tokyo &
Chung-Ang Univ.

3D map of strain distribution (1 sec.)



20 traces/sec

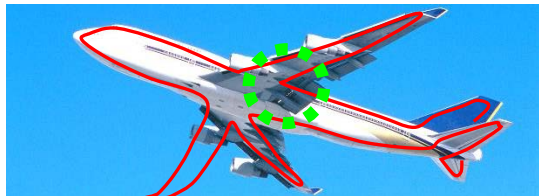
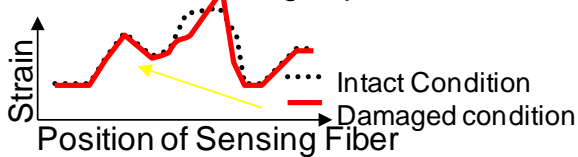
*

BOCDAプロトタイプ: 航空機のヘルスマモニタリング応用

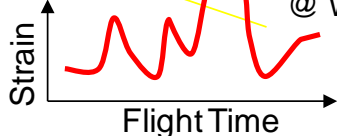
On the Ground Operation
Distributed measurement
 In Flight Operation
Dynamic strain measurement



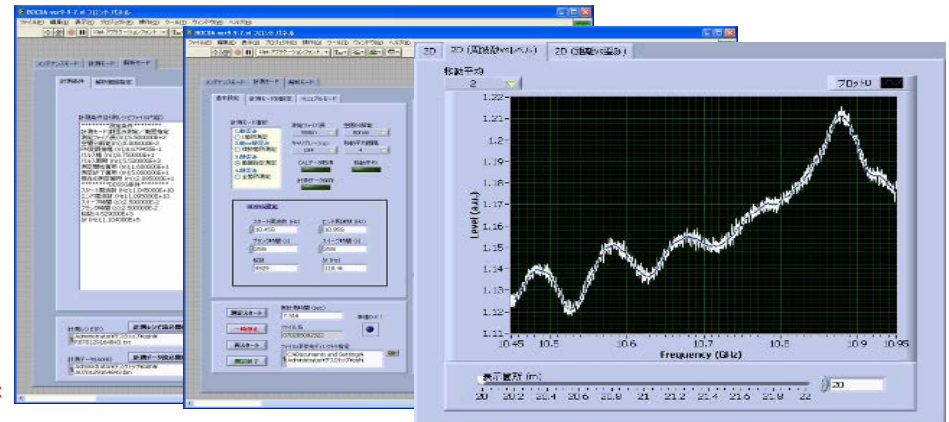
Wide Area Distributed Strain
with high spacial resolution



Loading History
@ Wing Root Point



Mitsubishi Heavy Industry
 The University of Tokyo
 Yokogawa Electric
 RIMCOF



写真(上下): 鎗孝志・石岡昌人・長井謙宏・足立正二・飯田力弘・熊谷芳宏・保立和夫・櫻井建夫(2007)
 「航空機搭載型BOCDA分布型光ファイバセンサ」『第39回光波センシング技術研究会論文集』163-170、
 p.167、図6、および発表スライド

痛みの分かる航空機: MU-300

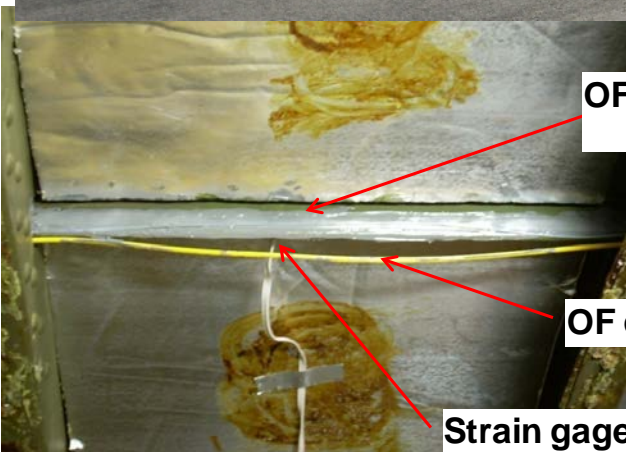
Mitsubishi Heavy Industry
Yokogawa Electric
The University of Tokyo
RIMCOF



Business Jet, MU-300

*

*



OF sensor

OF code

Strain gage
(back side)

*

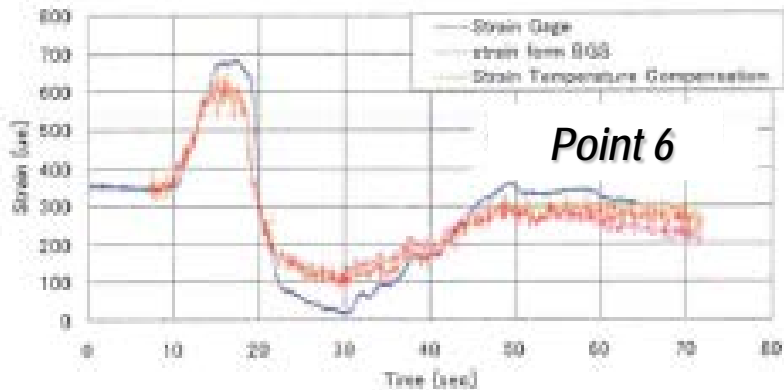
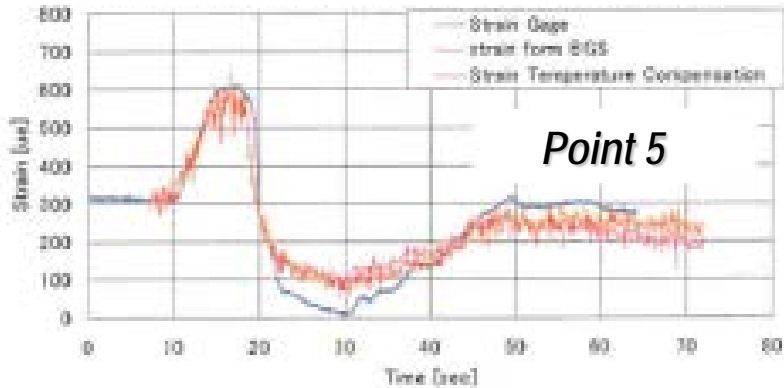
*



T. Yari, "Strain Monitoring by the Brillouin Optical Correlation Domain Analysis Method," Symposium on Advanced Materials & Process Development for Next Generation Aircraft Structures, Tokyo, Jan. 21, 22, 2008. 発表スライド

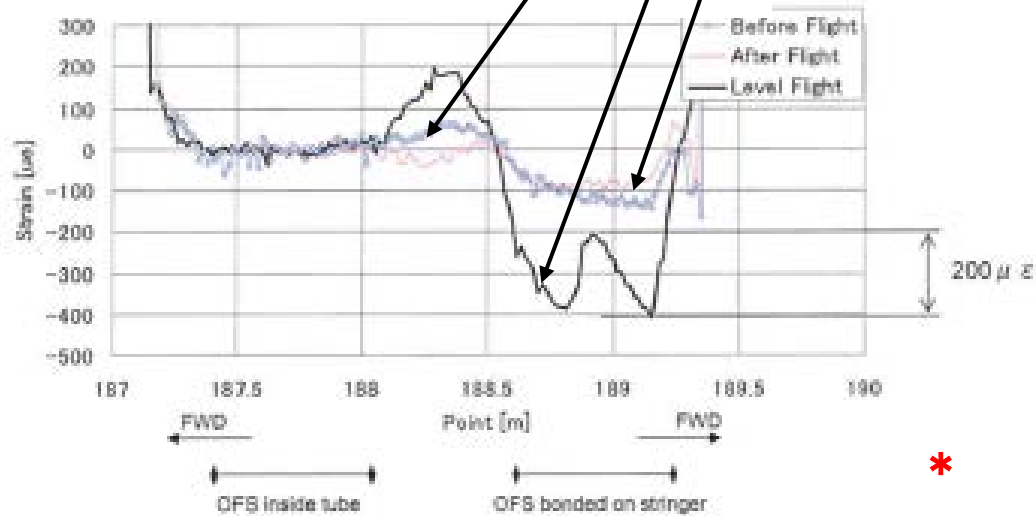
本研究は、経済産業省「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの1テーマである「構造健全性診断技術開発」の一環として、次世代金属・複合材料研究開発協会(現:素形材センター)とMHIの契約に基づき実施したものである。

痛みの分かる航空機: MU-300



Multi-point and Dynamic strain sensing
pull-up 2.7G

Distributed strain sensing
Before flight
Level flight
After flight



*

*



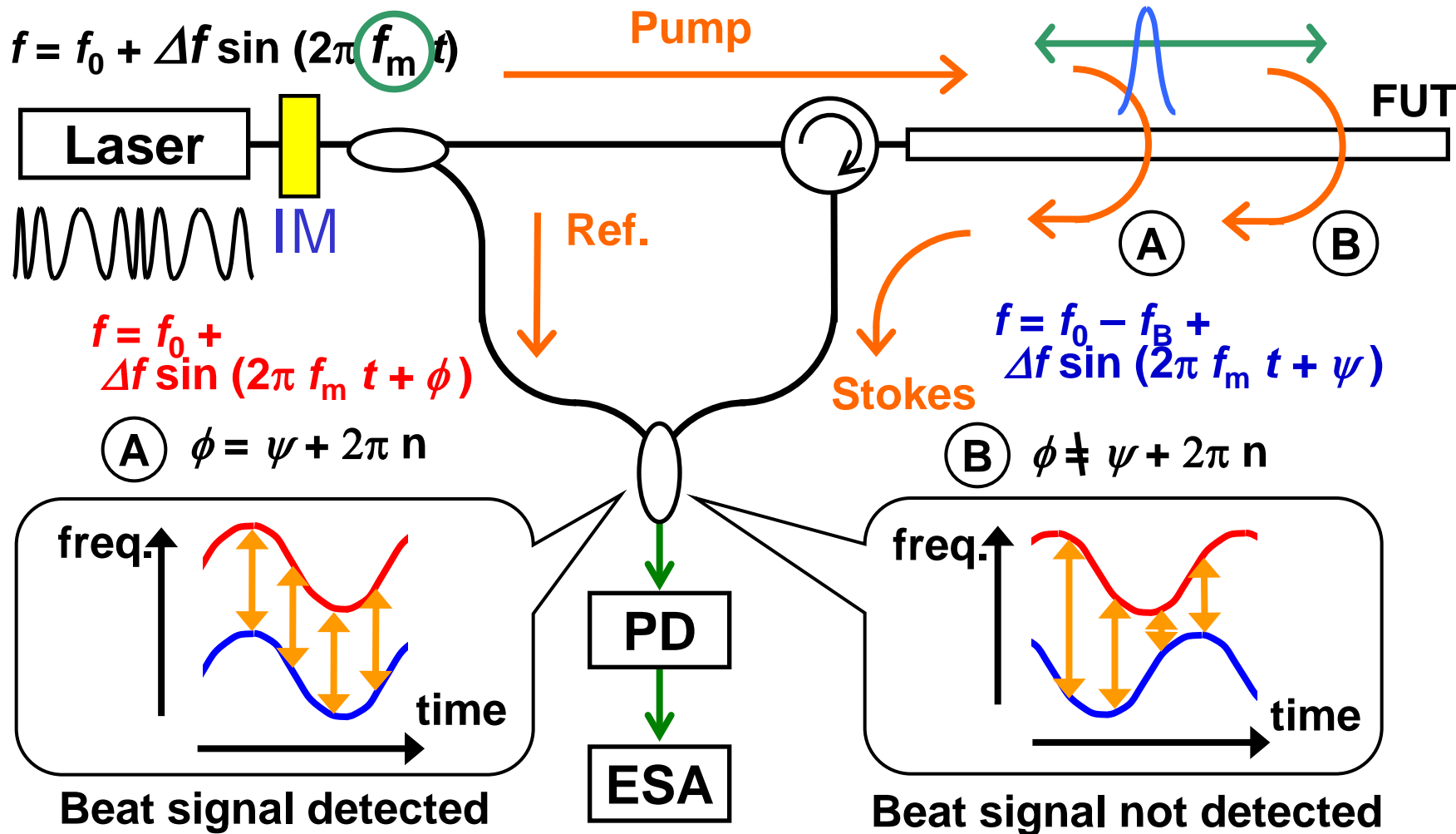
⇒キャビン圧力によるスキンパネルの曲げ **Deformation of skin panel due to the cabin pressure !!**

Mitsubishi Heavy Industry
Yokogawa Electric
The University of Tokyo
RIMCOF

T. Yari, "Strain Monitoring by the Brillouin Optical Correlation Domain Analysis Method," Symposium on Advanced Materials & Process Development for Next Generation Aircraft Structures, Tokyo, Jan. 21, 22, 2008. 発表スライド
本研究は、経済産業省「次世代航空機用構造部材創製・加工技術開発」プロジェクトの1テーマである「構造健全性診断技術開発」の一環として、次世代金属・複合材料研究開発協会(現:素形材センター)とMHIの契約に基づき実施したものである。

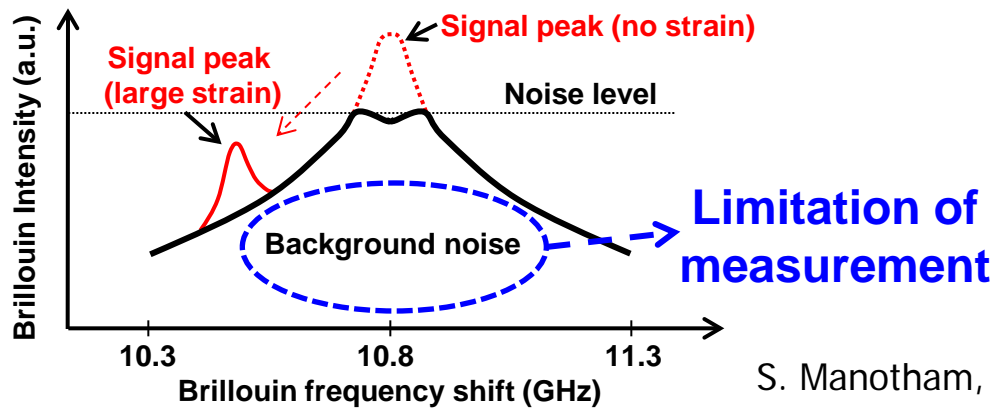
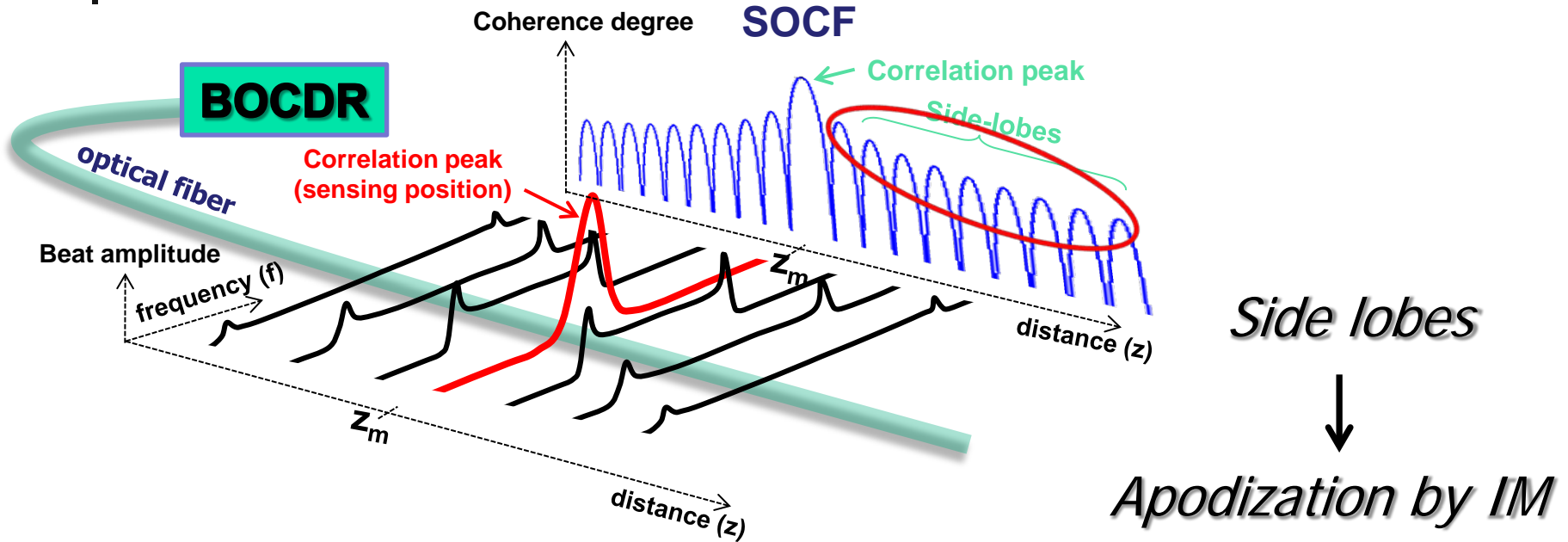
ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ: BOCADR

Y. Mizuno, W. Zou, Z. He and K. Hotate,
OSA Optics Express, Vol.16, Issue 16, 2008.



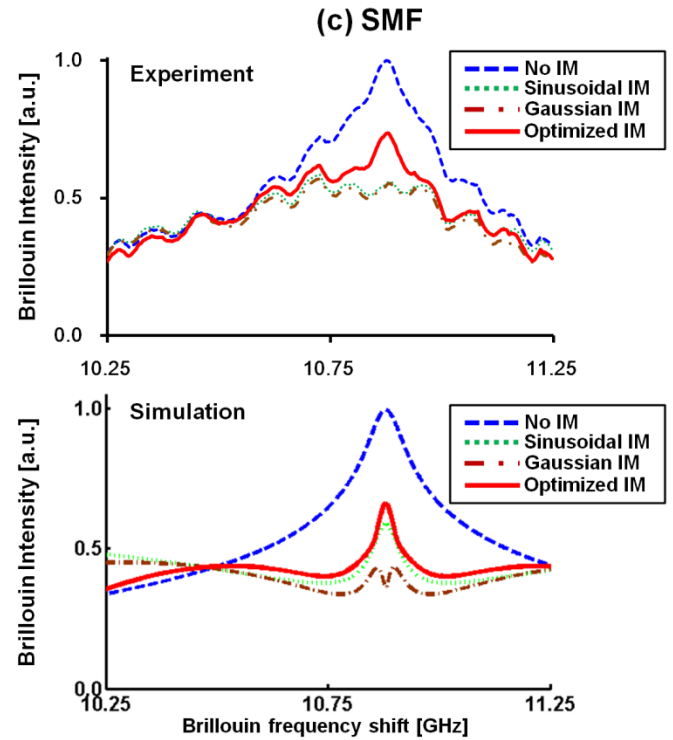
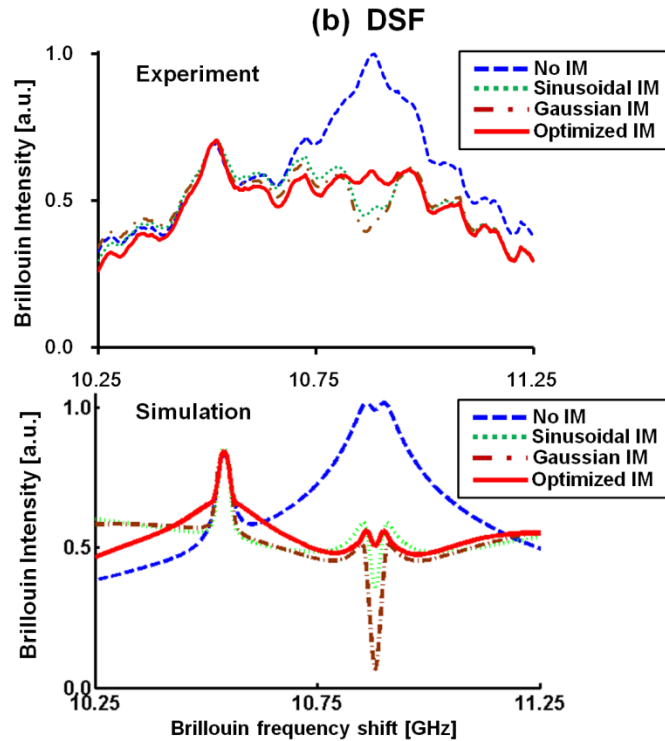
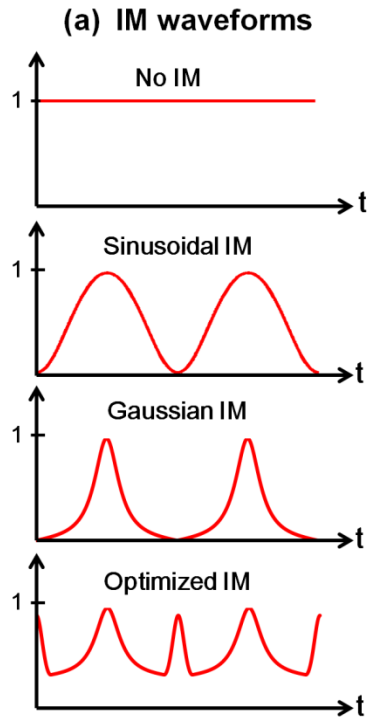
ESA: electrical spectrum analyzer,
 FUT: fiber under test, PD: photo-diode

不要スペクトル成分の形成



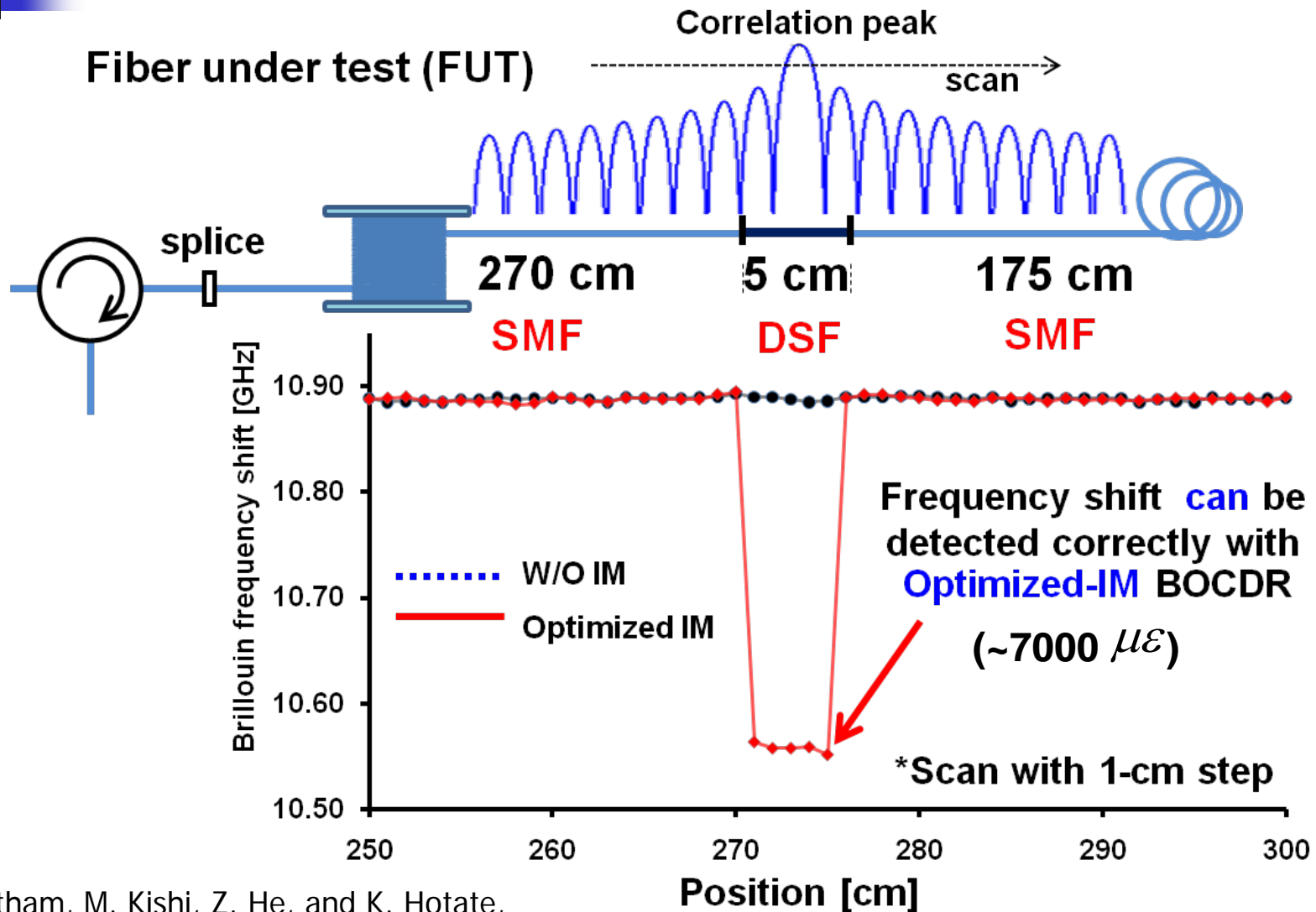
S. Manotham, M. Kishi, Z. He, and K. Hotate, 3rd Asia Pacific Optical Sensors Conference, Th-C23, Sydney, Australia, 2012.

強度変調法の効果



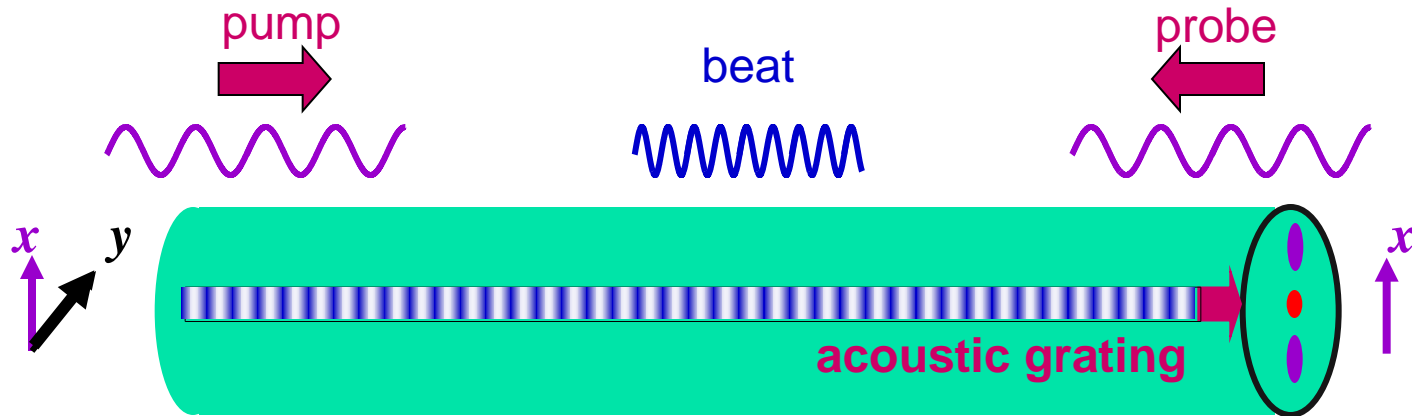
1-cm 空間分解能と

7000 $\mu\epsilon$ 歪ダイナミックレンジの達成



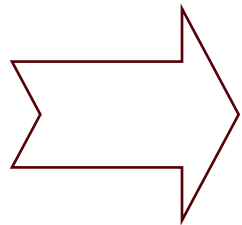
ブリルアンダイナミックグレーティング

Acoustic wave is generated through the stimulated Brillouin scattering by x-polarized light.



acoustic resonance energy $v_B^x = 2n_{eff}^x V_a / \lambda_{op}^x$

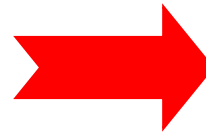
Y-polarized light is found to be reflected by the acoustic grating with a Bragg condition.



Bragg condition:

$$\beta_a = 2\beta_x = 2\beta_y$$

$$\frac{n_x}{\lambda_x} = \frac{n_y}{\lambda_y} \quad \text{or} \quad n_x \cdot f_x = n_y \cdot f_y$$

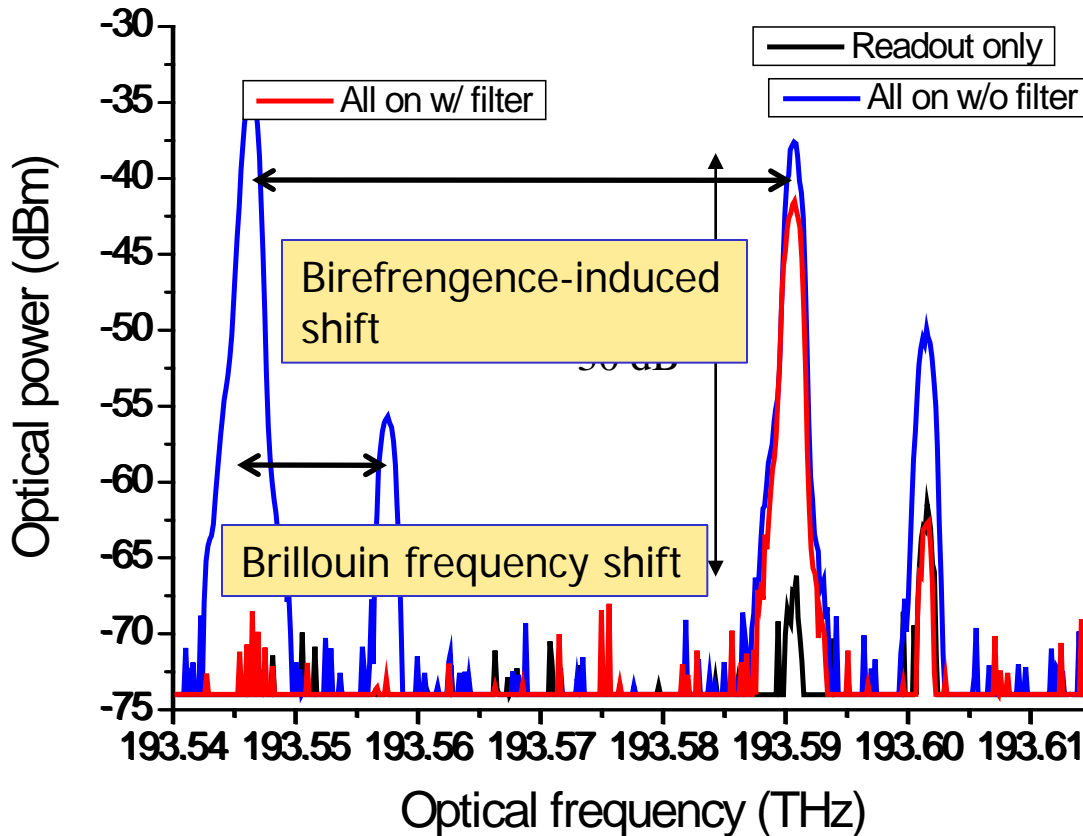


$$f_{yx} = f_y - f_x = \frac{B}{n_y} \cdot f_x$$

frequency deviation

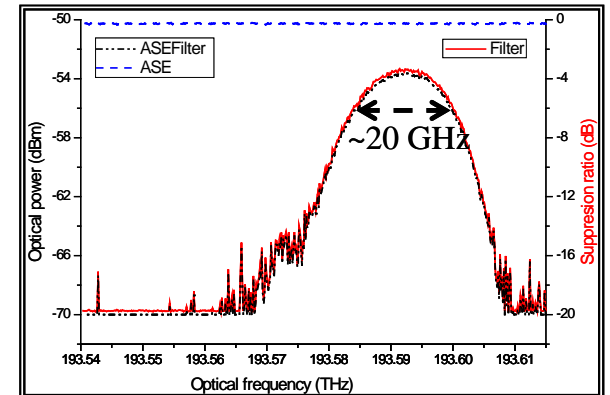
ブリルアンダイナミックグレーティング

* Detected by OSA while y-polarized light is manually tuned to satisfy Bragg condition.



Pump power: ~23 dBm
Probe power: ~-1 dBm

Readout power: ~19 dBm



Filter's reflection spectrum



$$f_{yx} = f_y - f_x = \frac{B}{n_y} \cdot f_x \approx 44.0 \text{ GHz} \Leftrightarrow B = 3.3 \times 10^{-4}$$

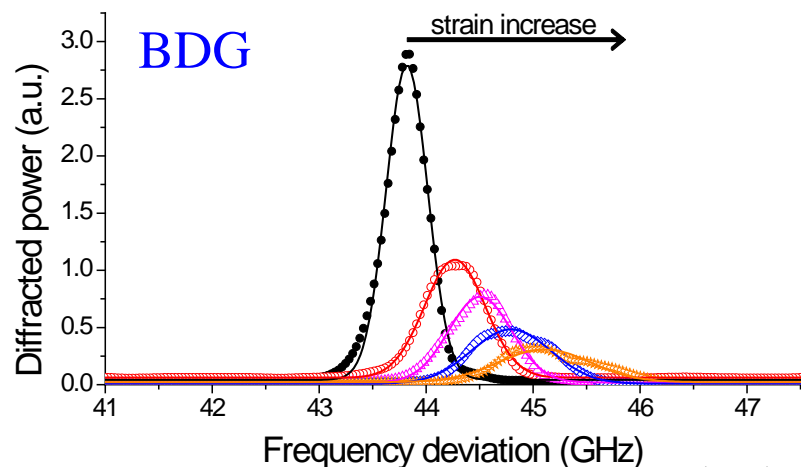
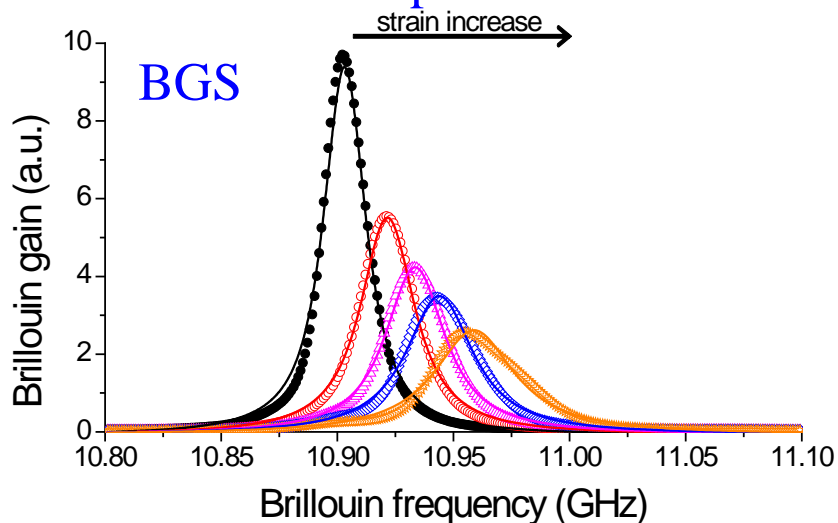
Birefringence-determined frequency deviation

Song, Zou, He, Hotate,
Opt. Lett., 33, 9, 2008.

BGS と BDG 測定による温度と歪の同時測定

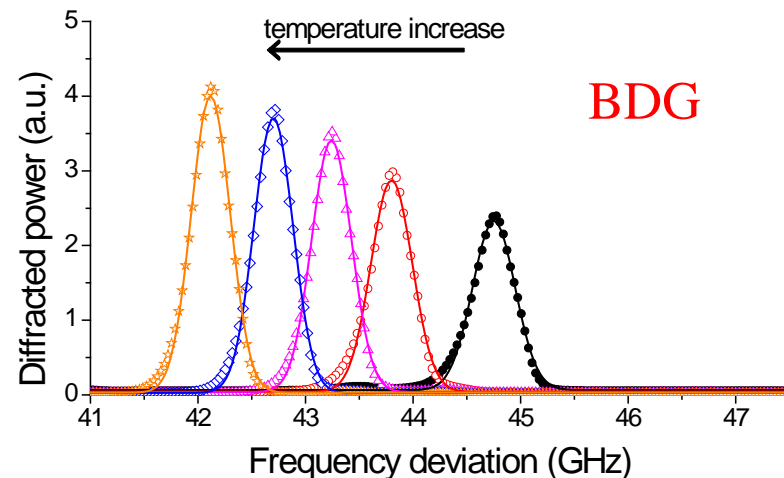
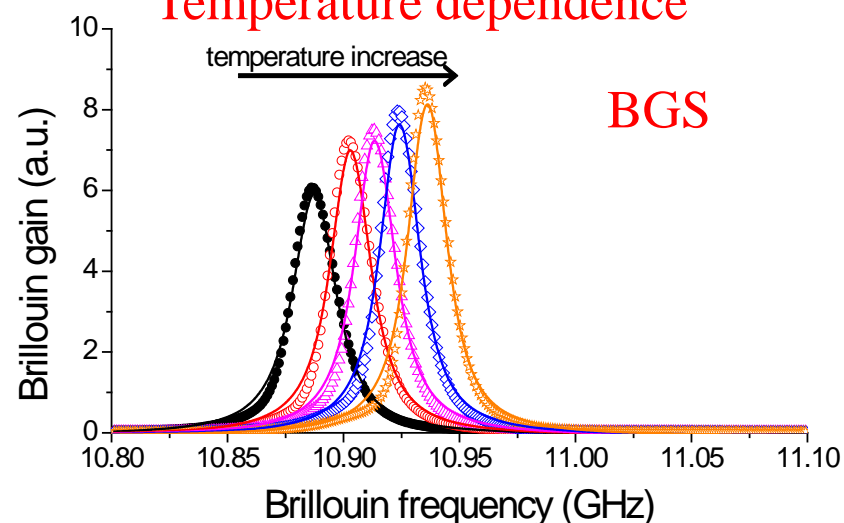
FUT: ~32-m-long Fujikura PANDA-PMF

Strain dependence



W. Zou, Z. He and K. Hotate,
OSA Optics Express, Vol. 17, No. 3, 2009.

Temperature dependence



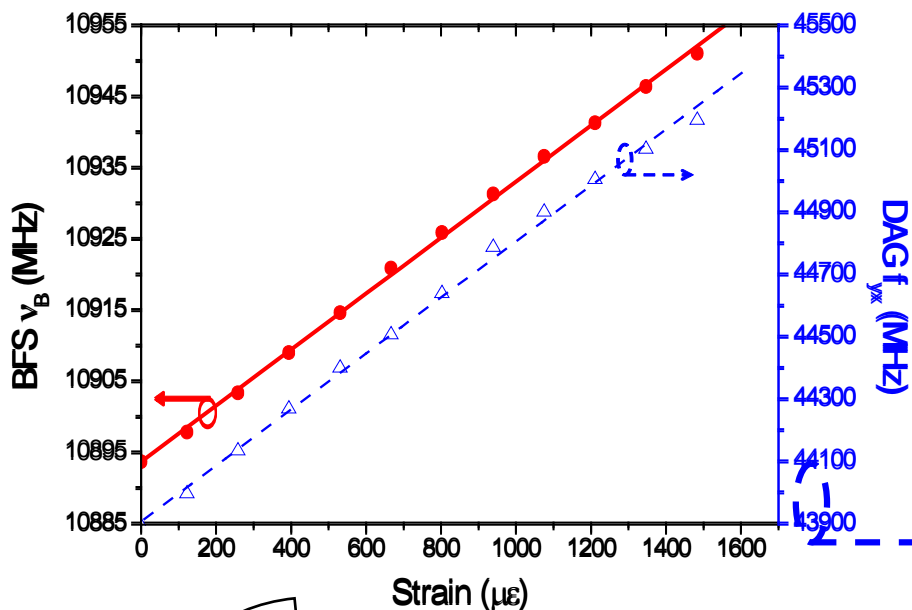
Zou *et al.* (2009) "Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber," *Optics Express* 17: 1248-1255, p.1253, Fig.4.

BGS と BDG 測定による温度と歪の同時測定

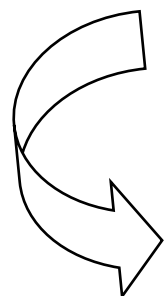
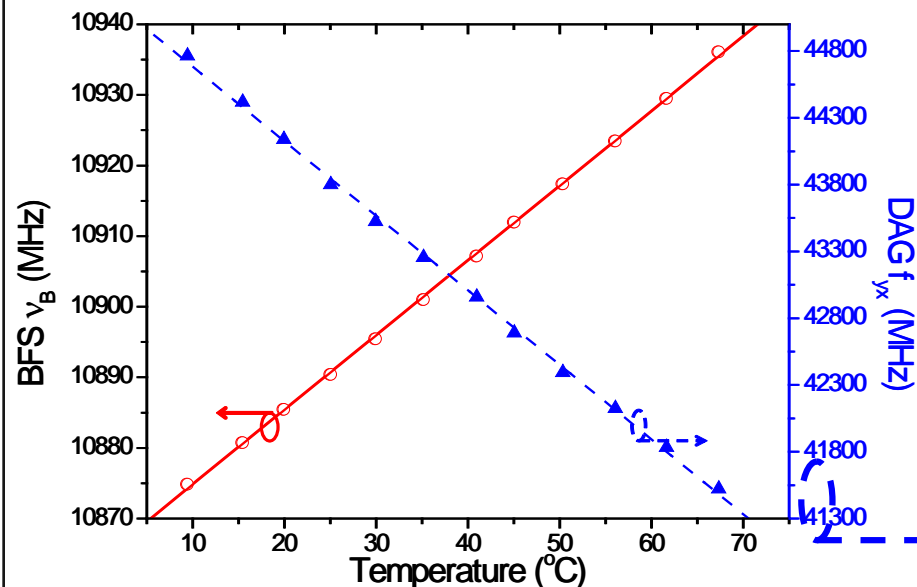
W. Zou, Z. He and K. Hotate,
OSA Optics Express, Vol.17, No. 3, 2009.

FUT: ~32-m-long Fujikura PANDA-PMF

Strain dependence



Temperature dependence



	<i>x-pol.</i> BFS v_B	<i>y-pol.</i> DAG f_{yx}
Strain coefficient (MHz/ $\mu\epsilon$)	$C_v^\epsilon = 0.03938$	$C_f^\epsilon = 0.8995$
Temperature coefficient (MHz/ $^\circ\text{C}$)	$C_v^T = 1.0580$	$C_f^T = -55.8134$

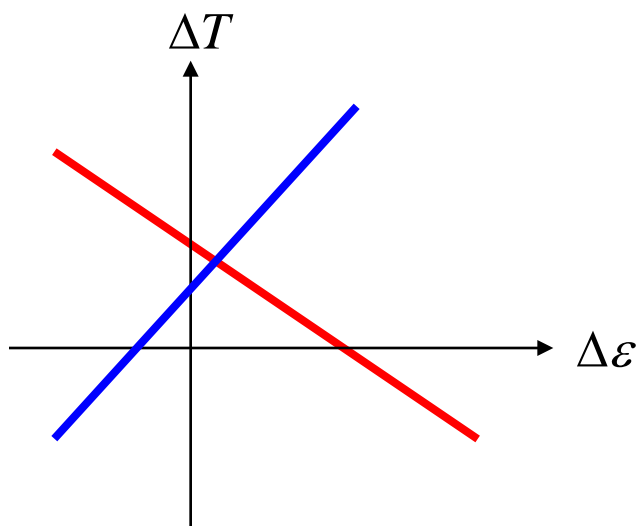


Zou *et al.* (2009) "Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber," *Optics Express* 17: 1248-1255, p.1254, Fig.5.

*

BGS と BDG 測定による温度と歪の同時測定

W. Zou, Z. He and K. Hotate,
OSA Optics Express, Vol. 17, No. 3, 2009.



$$\begin{pmatrix} \Delta \nu_B \\ \Delta f_{yx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_v^\varepsilon & C_v^T \\ C_f^\varepsilon & C_f^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix}$$

$$\begin{matrix} C_v^\varepsilon : 0.0394 \text{MHz}/\mu\varepsilon & C_v^T : 1.058 \text{MHz}/^\circ\text{C} \\ C_f^\varepsilon : 0.890 \text{MHz}/\mu\varepsilon & C_f^T : -55.813 \text{MHz}/^\circ\text{C} \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} \delta \varepsilon \\ \delta T \end{pmatrix} = \frac{1}{C_v^\varepsilon C_f^T - C_v^T C_f^\varepsilon} \begin{pmatrix} C_f^T & -C_v^T \\ -C_f^\varepsilon & C_v^\varepsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \nu_B \\ \delta f_{yx} \end{pmatrix}$$

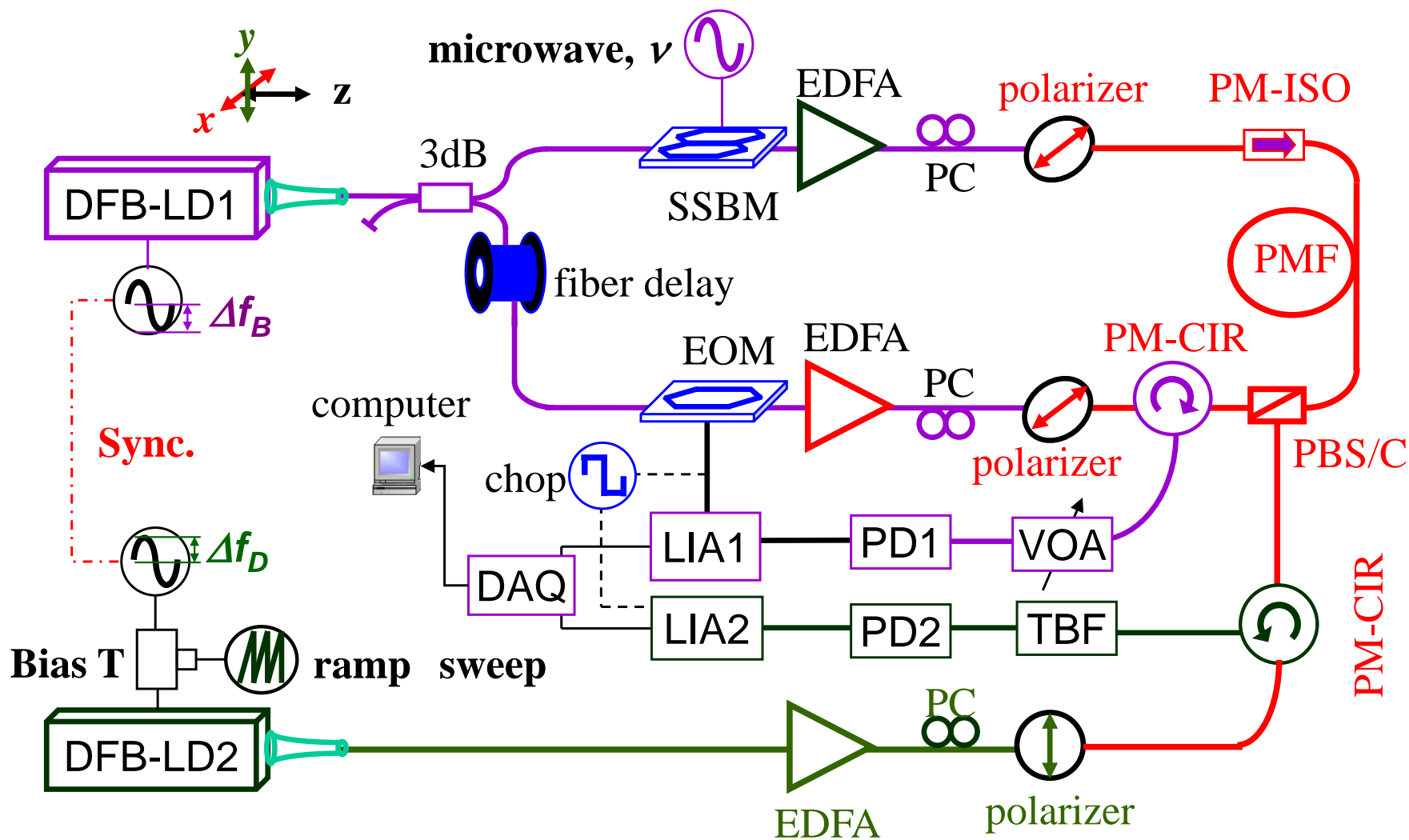
$$\begin{aligned} \delta \nu_B &= 0.1 \text{MHz} \\ \delta f_{yx} &= 4 \text{MHz} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \delta \varepsilon &= 3.1 \mu\varepsilon \\ \delta T &= 0.021^\circ\text{C} \end{aligned}$$

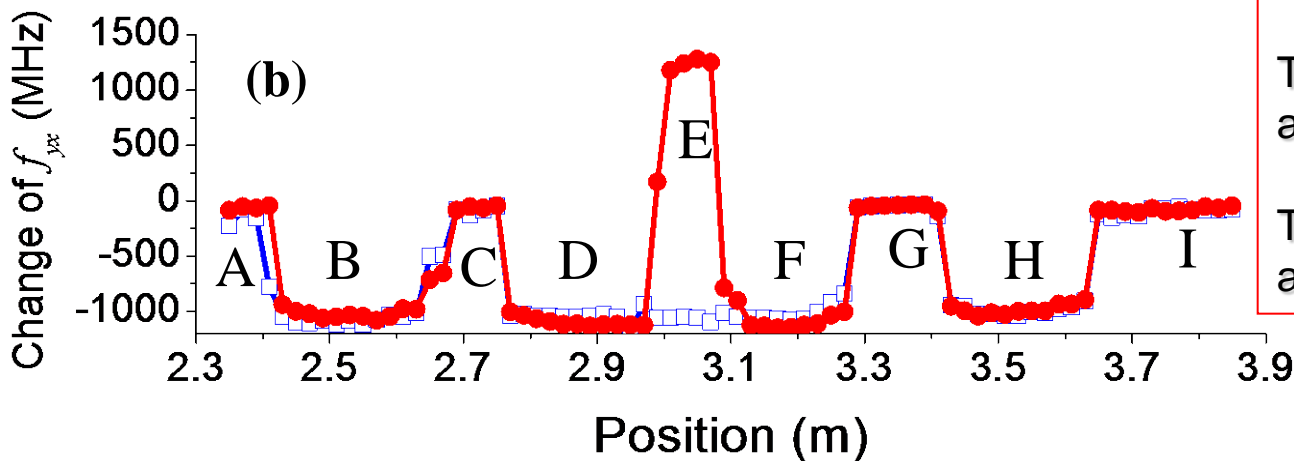
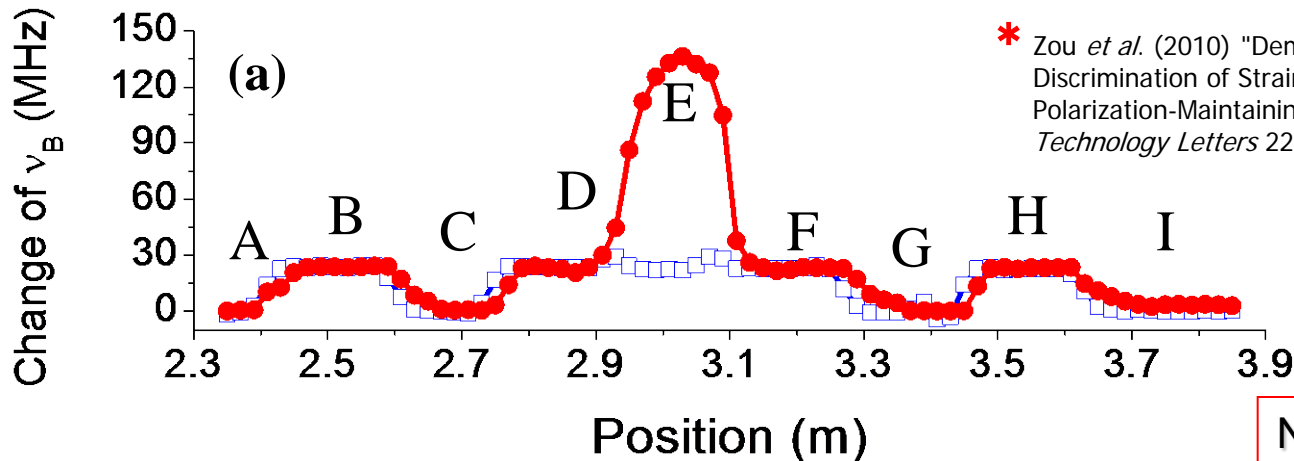
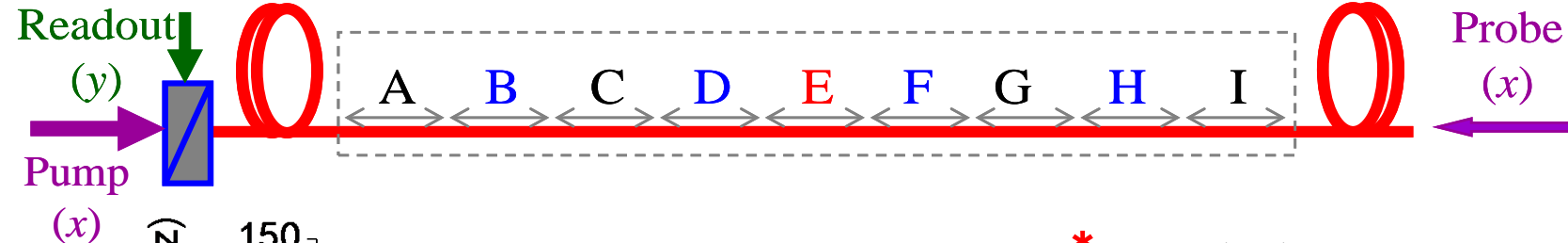
BOCDA法による温度と歪の同時・分離・分布測定

W. Zou, Z. He, and K. Hotate, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 22, No. 8, 2010.



BOCDA法による温度と歪の同時・分離・分布測定

(a) Fiber samples



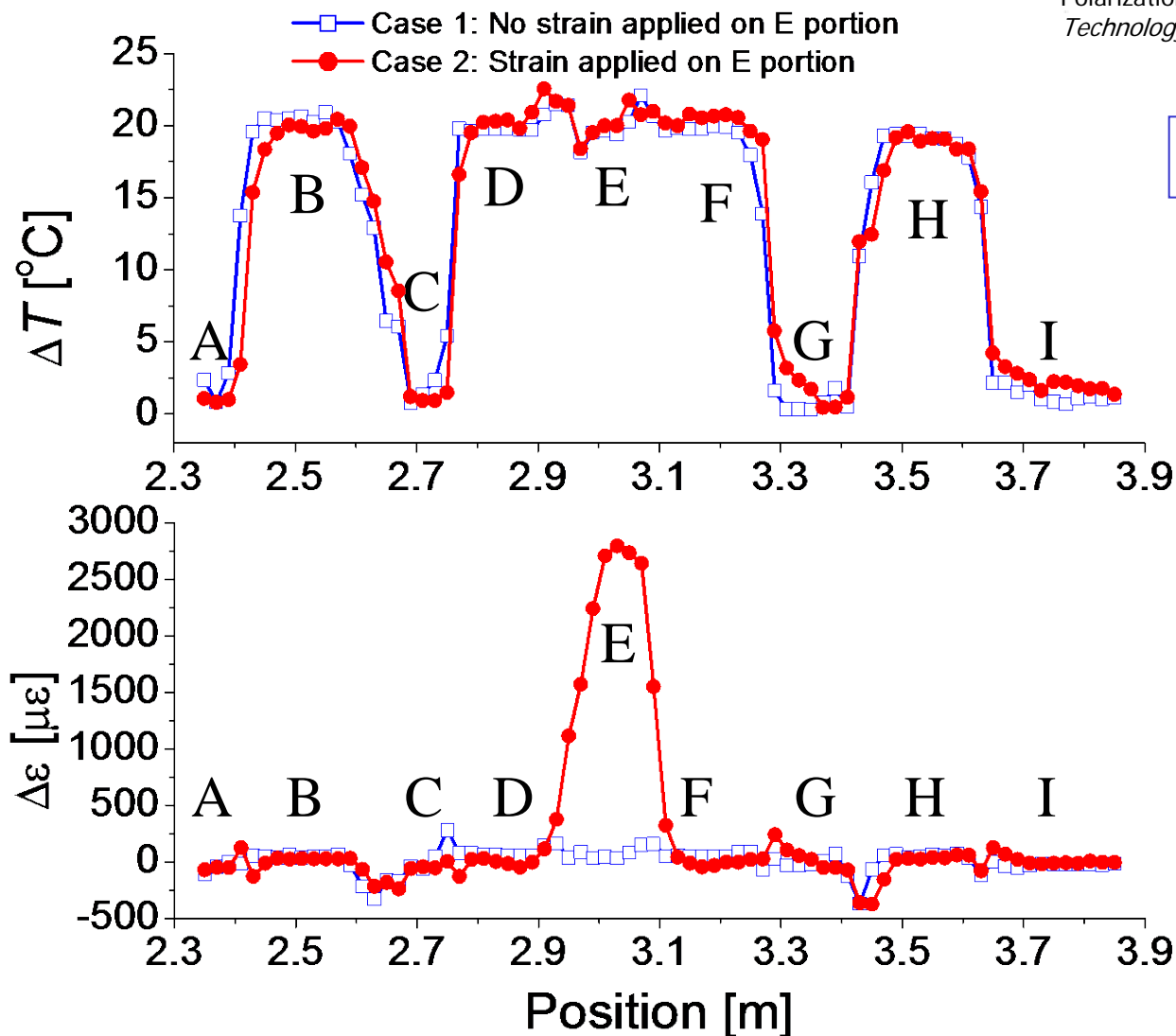
No change at A, C, G, I

Temperature increase at B, D, E, F, H

Temperature and strain applied at E

BOCDA法による温度と歪の同時・分離・分布測定

* Zou *et al.* (2010) "Demonstration of Brillouin Distributed Discrimination of Strain and Temperature Using a Polarization-Maintaining Optical Fiber" *Photonics Technology Letters* 22(8): 526-528, p.528, Fig.4.



Temperature

No change at A, C, G, I

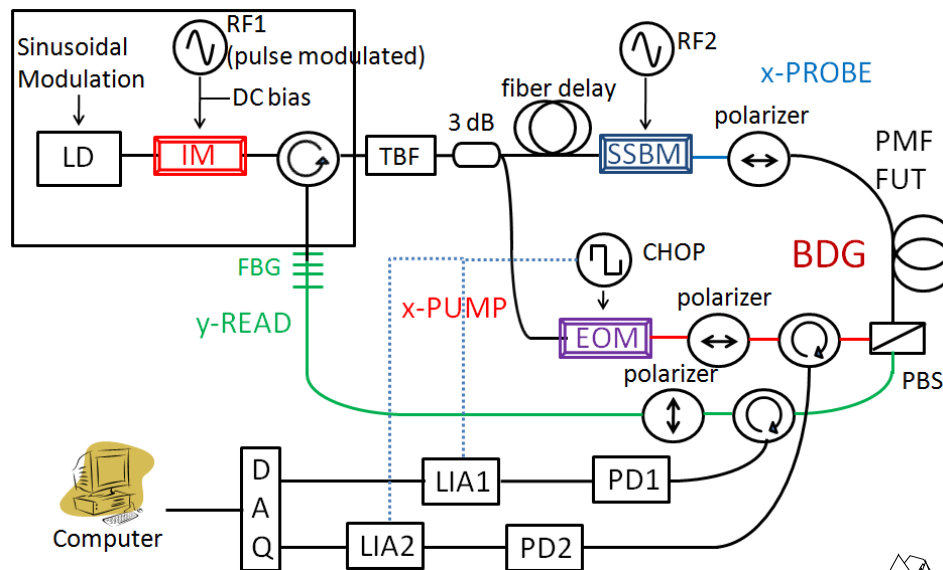
Temperature increase at B, D, E, F, H

Temperature and strain applied at E

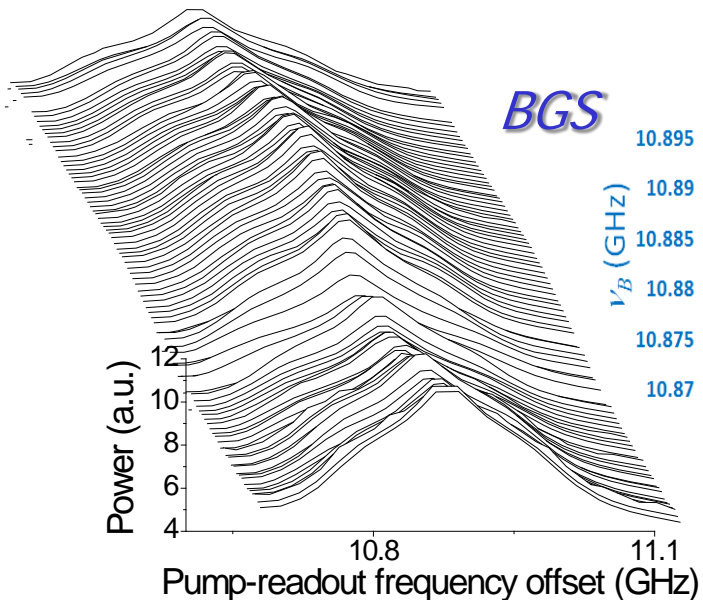
Strain

温度と歪の同時・分離・分布測定: 測定レンジ延伸

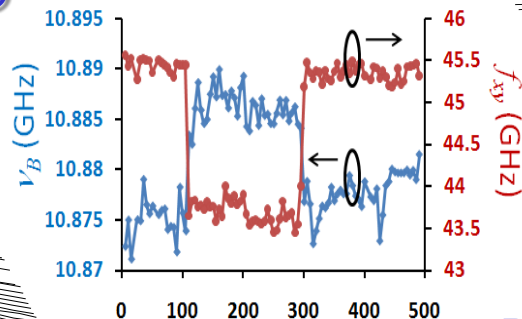
500m range
40 cm resolution



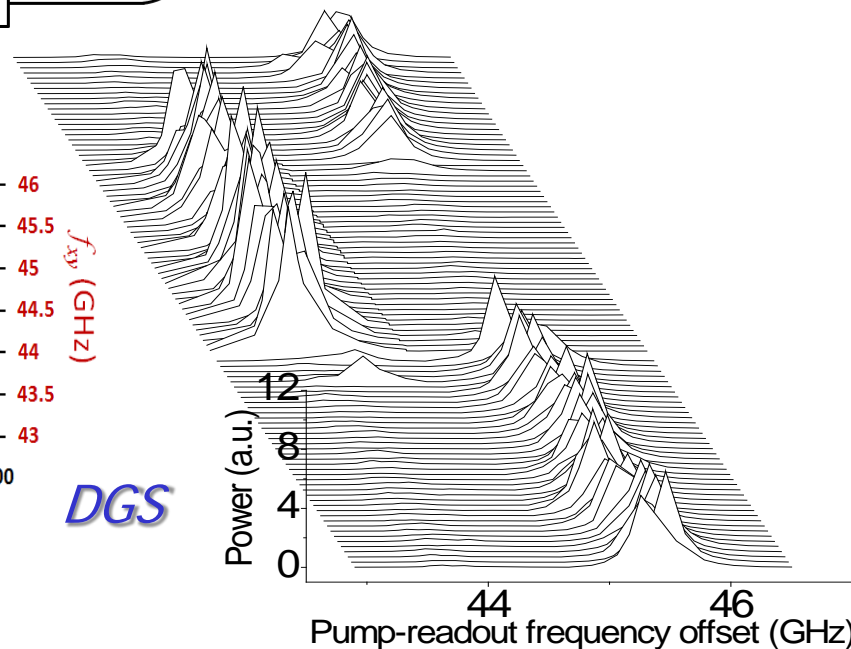
* Yamashita *et al.* (2012) "Measurement Range Elongation Based on Temporal Gating in Brillouin Optical Correlation Domain Distributed Simultaneous Sensing of Strain and Temperature," *Photonics Technology Letters, IEEE* 24(12): 1006-1008, p.1007, Fig.1; p.1008, Fig.3.



BGS



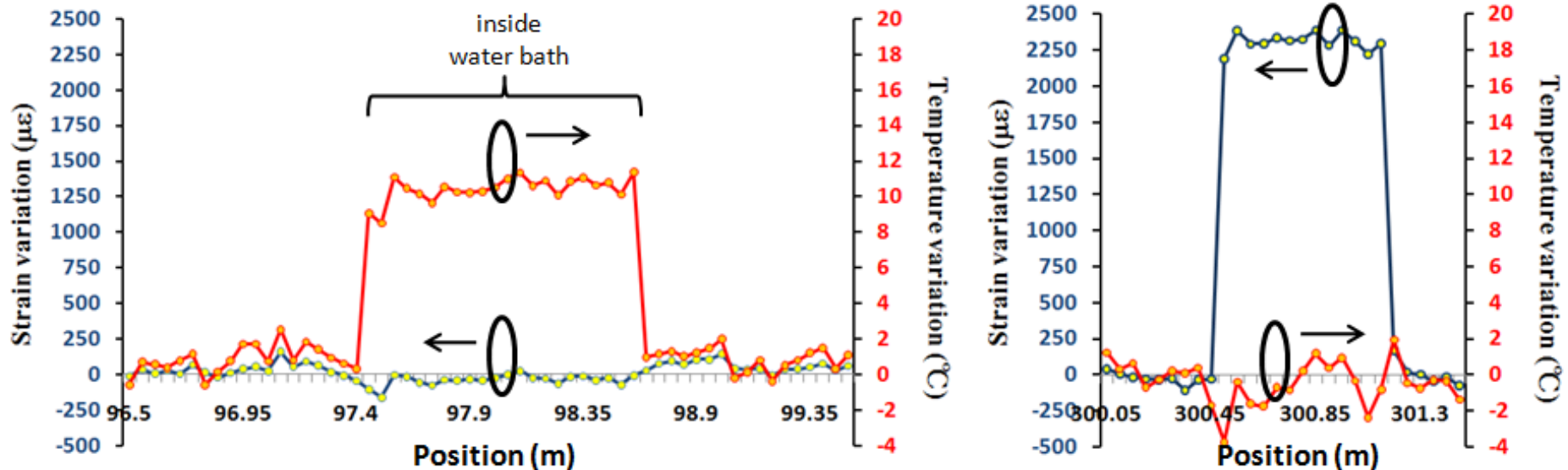
DGS



BOCDA法による温度と歪の同時・分離・分布測定

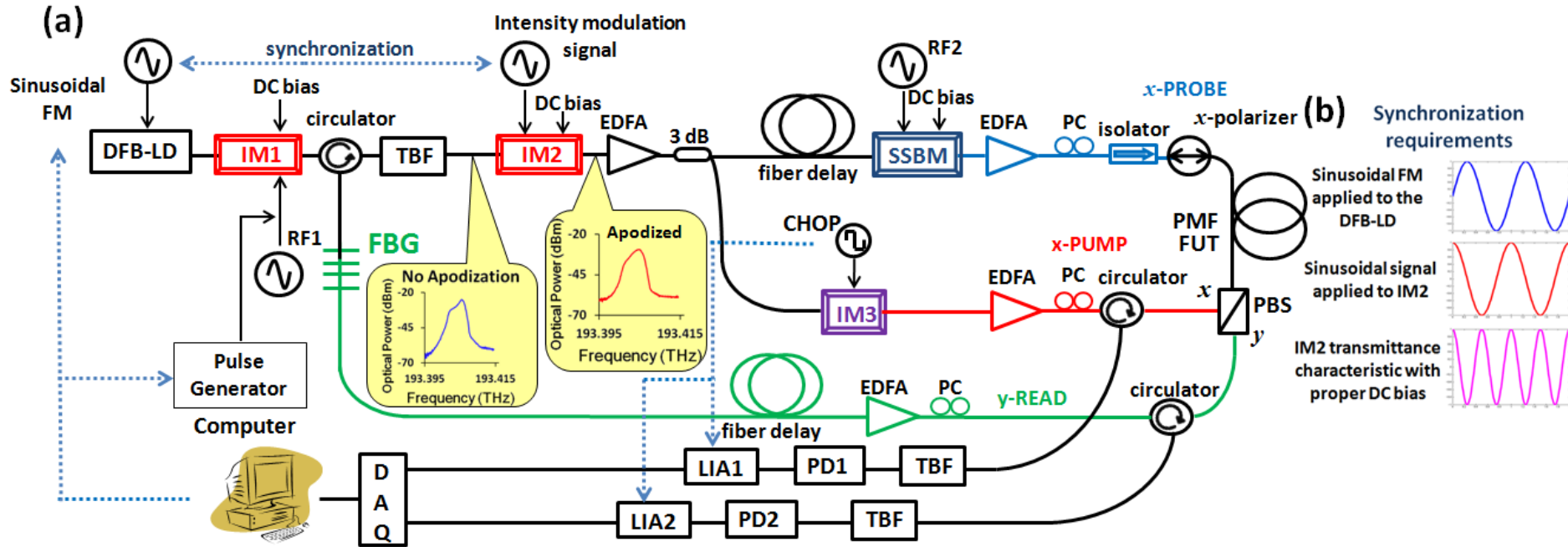
Simultaneous measurement of strain and temperature

* Yamashita *et al.* (2012) "Measurement Range Elongation Based on Temporal Gating in Brillouin Optical Correlation Domain Distributed Simultaneous Sensing of Strain and Temperature," *Photonics Technology Letters, IEEE* 24(12): 1006-1008, p.1008, Fig.4.

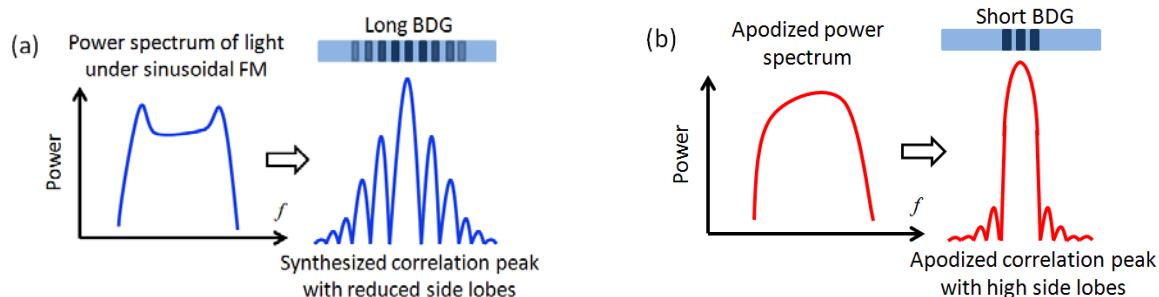


500m range
40 cm resolution

強度変調法による空間分解能の向上

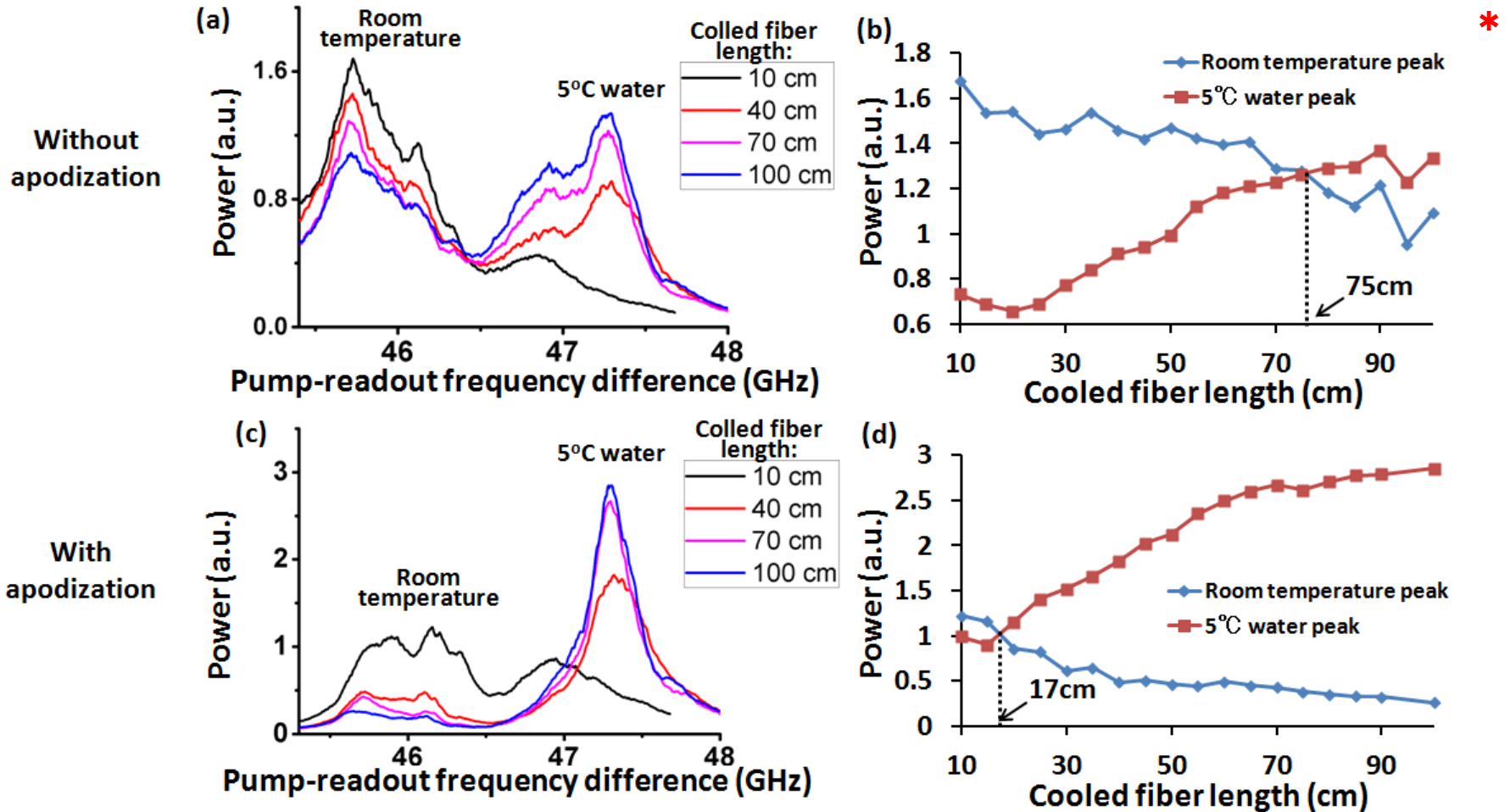


+Side lobes near the correlation peak are reduced by IM for pump and probe.
 +Length of the localized Brillouin dynamic grating are reduced.



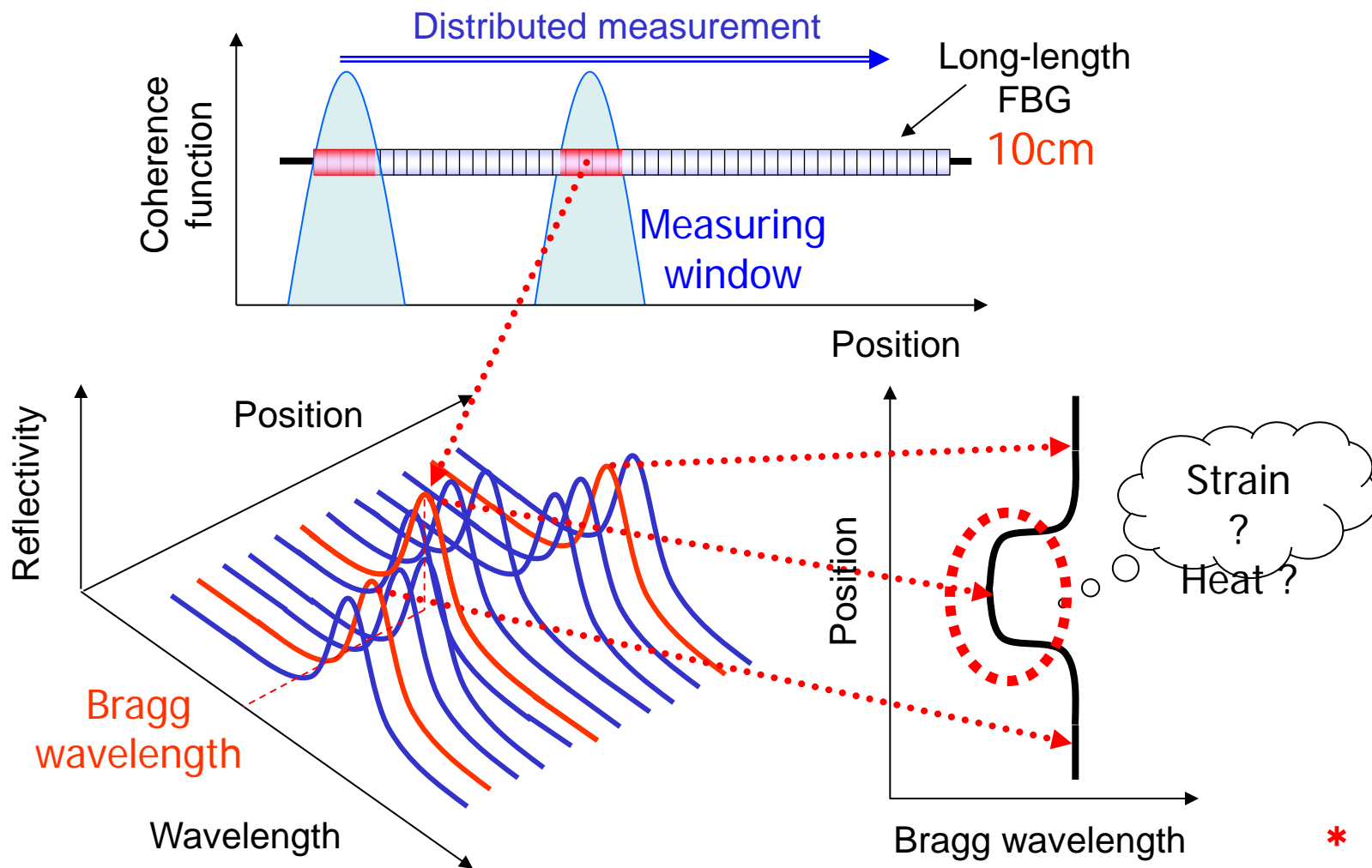
強度変調法による空間分解能の向上

Yamashita *et al.* (2012) "Spatial resolution improvement based on intensity modulation in measurement of Brillouin dynamic grating localized by correlation domain technique," *Proceedings of the 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 84219H, Fig.3.



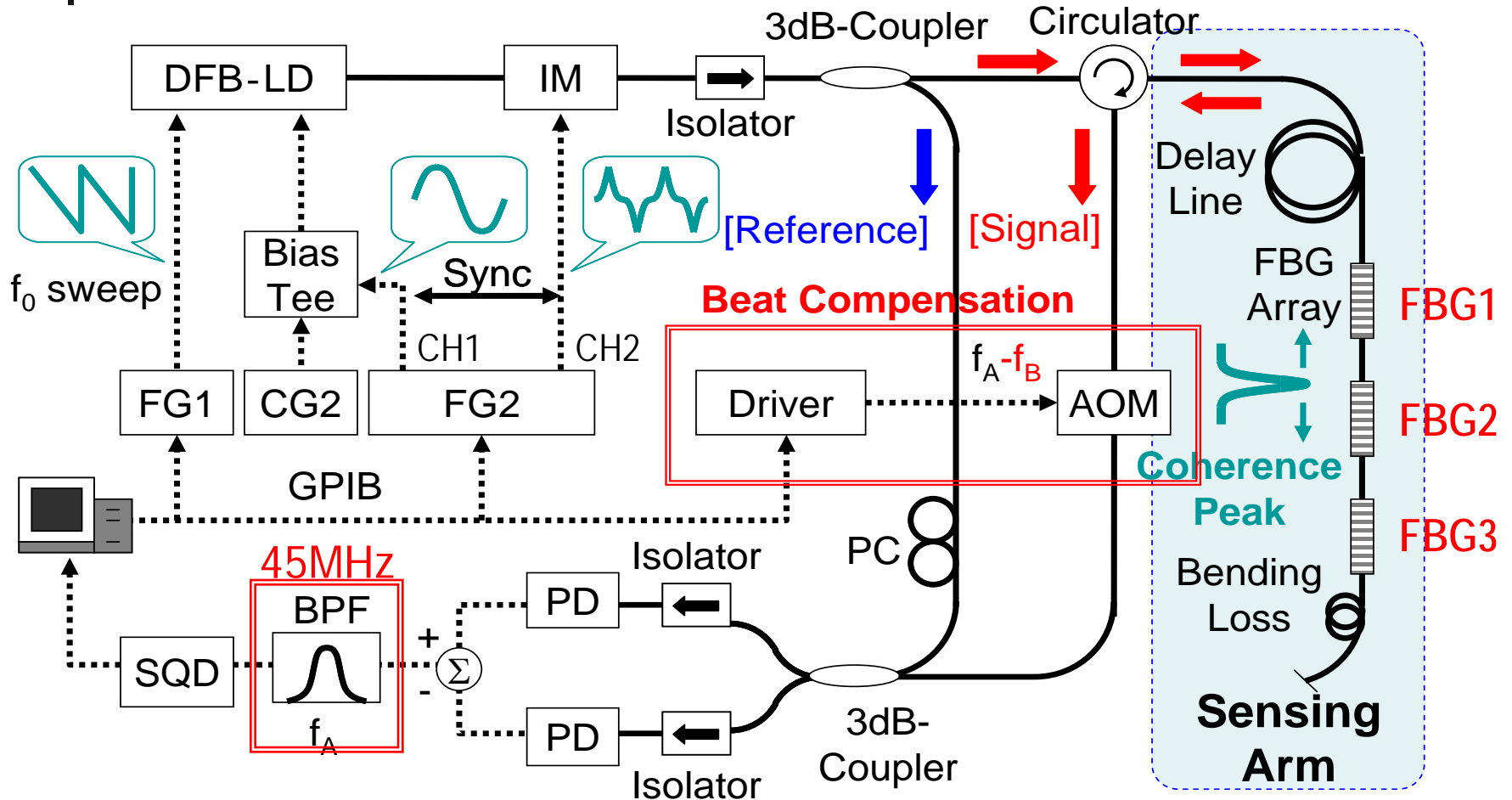
+Spatial resolution is improved by about 5 times.

長尺FBGによる准分布型センシング



Hotate and Kajiwara (2008) "Proposal and experimental verification of Bragg wavelength distribution measurement within a long-length FBG by synthesis of optical coherence function," *Optics Express* 16(11): 7881-7887, p.7883, Fig.2.

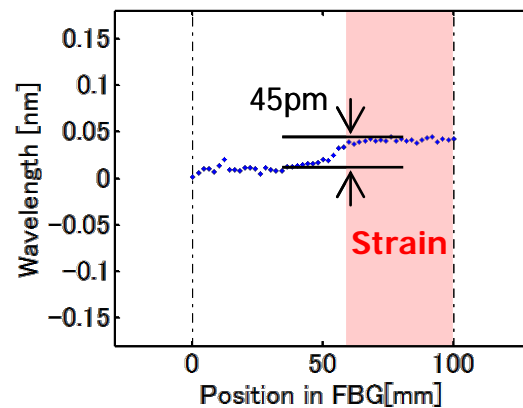
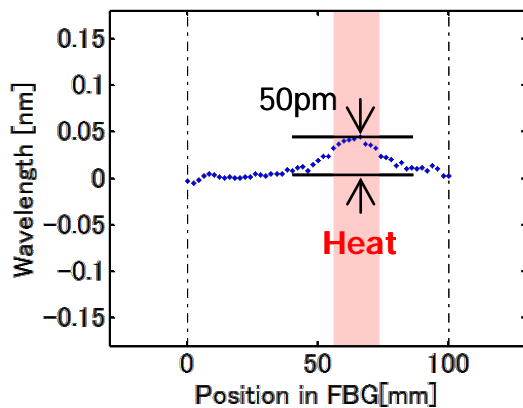
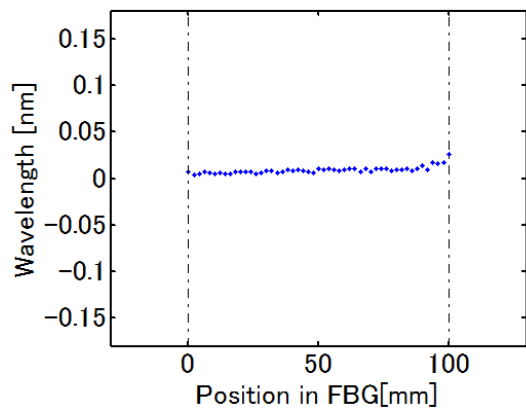
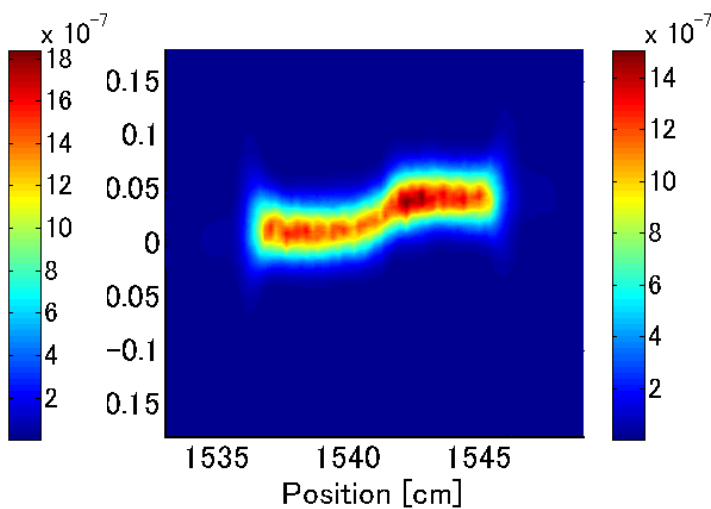
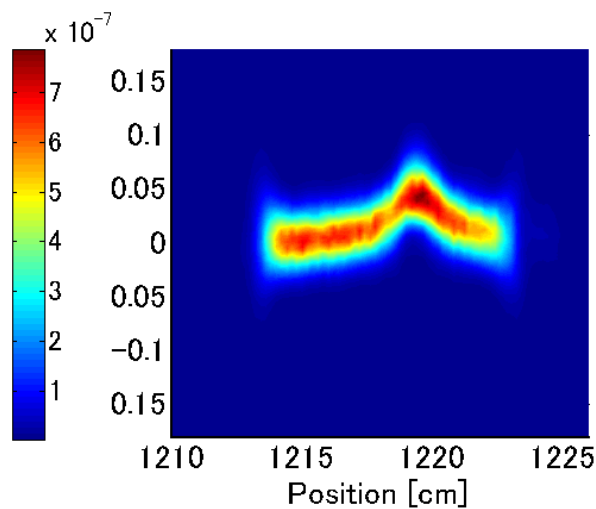
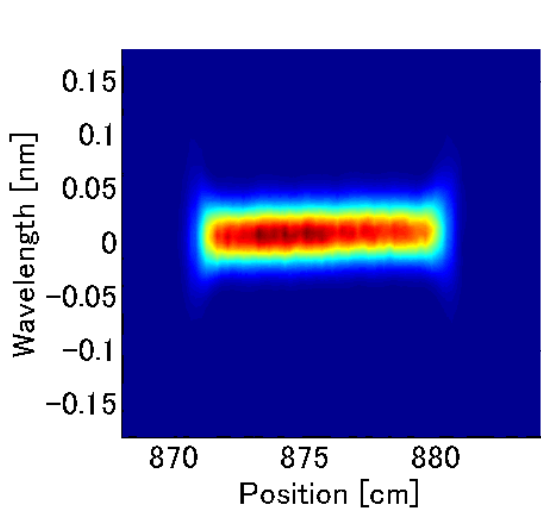
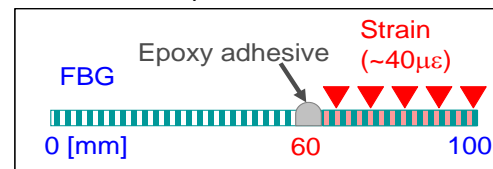
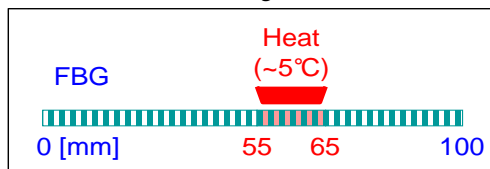
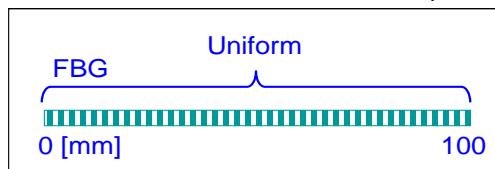
長尺FBGによる准分布型センシング



- $f_1 = 7.6$ [GHz]
- $f_2 = 11.80-11.67$ [MHz], $8.464-8.395$ [MHz], $6.684-6.640$ [MHz] (FBG1,2,3)
- $f_{AOM} = 40.88$ [MHz], 39.26 [MHz], 37.60 [MHz] (FBG1,2,3)

長尺FBGによる准分布型センシング

Kajiwara and Hotate (2009) "Multiplexed long-length fiber Bragg grating distributed sensors based on synthesis of optical coherence function," *Proceedings of the 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, 75032J*, Fig.4.





まとめ

■ Fiber Optic Nerve Systems

- + *BOTDA and BOTDR.*
- + *BOCDA and BOCDR.*

■ Brillouin Optical Correlation Domain Techniques

- + *1.6mm spatial resolution, 1 kHz sampling rate, random accessibility have been realized, without high speed electronics.*
- + *Random accessibility with 200 Hz sampling rate, and total-distributed measurement with 20 traces/sec.*
- + *Applications, such as aircraft SHM, have been demonstrated.*

■ Brillouin Dynamic Grating and Applications

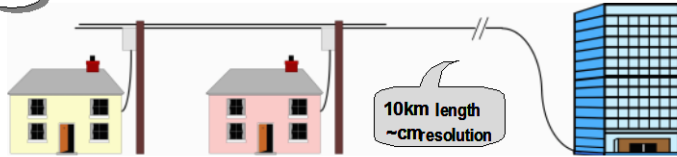
- + *Discriminative measurement of strain and temperature has been realized.*
- + *Spatial resolution has been improved by the intensity modulation scheme.*
- + *Various applications of BDG have been proposed.*

■ FBG based quasi-distributed sensing

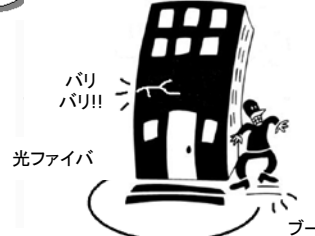
- + *Long-length FBG for short-length distributed measurement head.*
- + *Multiplexing of the long-length FBGs.*

エンジニアリングの研究

Ex.1 Diagnosis System for Fiber to the Home (FTTH)



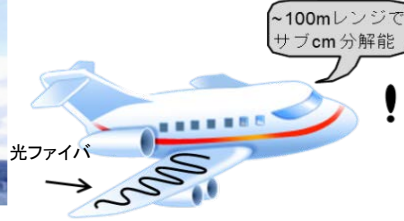
Ex.3 Security and Safety System Buildings



Ex.2 Nerve System for Smart Structures and Materials



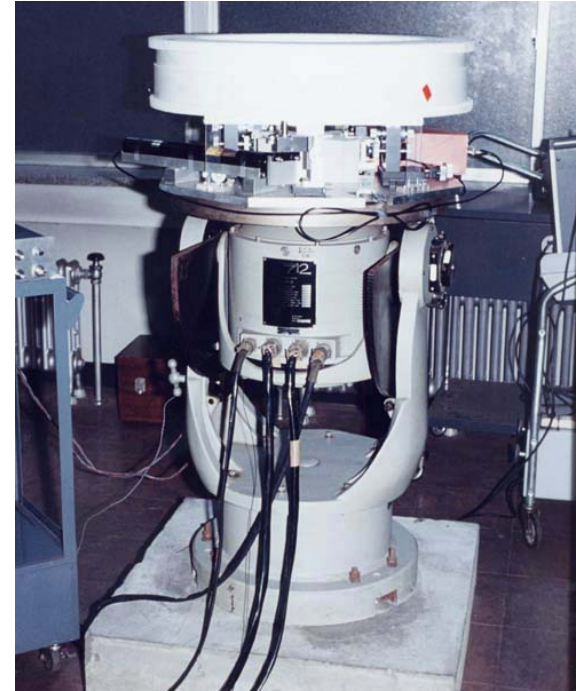
Ex.4 Nerve System for Smart Materials



Security and Disaster Prevention

- ・1.6mm空間分解能
- ・20トレース/秒高速全分布量計測
- ・ランダムアクセス/分布センシング

出来そうもないことを **可能** にする。
物理を使って **手品** をする。



1千万分の1波長の
長さ変化を読む！！

宇宙から日本を見て
目黒区駒場の保立が
見える。



さあ、一緒に手品をしましょう！！

**手品のタネは「知識」。
そして「工夫」が必要。**

**「学び」て思わざれば即ち暗く、
「思い」て学ばざれば即ち危し。**

研究のレイヤー、オリジナリティ、基礎研究

研究のレイヤー

システムの研究

サブシステムの研究

デバイスの研究

マテリアルの研究

基礎研究

オリジナリティは全てのレイヤーで発揮
:
「創造研究」

学んで思い、思いで学ぶ

理論と実験

縦の棒の太い T型学習!

オリジナリティの実現
「こだわり:意地」

光ファイバ神経網が実現する安全・安心社会

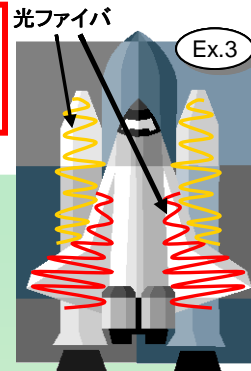
Smart Materials
Structures

Algorithm for analysis

Decision for disaster
prevention

- + Fiber Optic Nerve Systems
- + Materials and Structures that feel pain
- + Preventing disasters

- Interdisciplinary Area for Safety and Security
- Creation of new industries



Space Craft

Ex.2

スマートマテリアルのための神経網

~100mレンジで
サブcm分解能

光ファイバ



Airplain Wing

Mountain

Bridges

River Levee

Air Port

Slopes

Tunnel

Train, Rail

Buildings

防災システム
防犯システム
ビル, 住宅

Road Surface

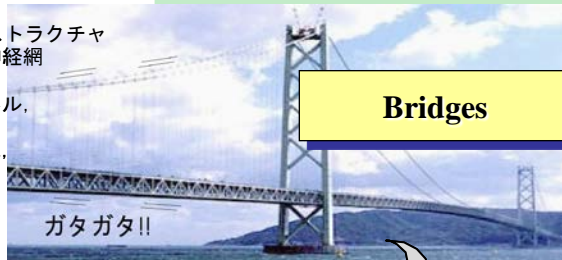
Port, Ships

Earth Quakes, Hurricanes / Maintenance

Ex.1

スマートストラクチャ
のための神経網

橋, トンネル,
高速道路,
堤防, ダム,
.....



数kmレンジで
サブm分解能

CCTVカメラ

CCTVカメラ

路側通信
センサー

CCTVカメラ

光ファイバ

