

光ファイバセンシングの 新たな応用分野を拓く



東京工業大学 精密工学研究所

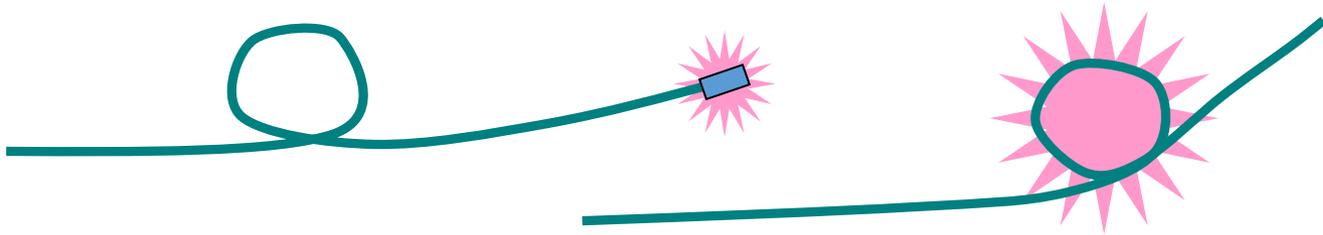
中村健太郎

本日の内容

- 光ファイバセンサとは： おさらい
- プラスチック光ファイバ(POF)の利用
 - 1) プラスチックだと何が違うか
 - 2) OTDRによる測定
 - 3) ブリルアン方式
- 音に関わる応用
 - 1) 騒音測定用マイクロホンアレイ
 - 2) 空中超音波測定用ファイバプローブ
 - 3) MHz超音波用プローブ
 - 4) 医用応用の最近の話題

光ファイバセンサとは

{ センシング = 光ファイバ自身または特殊構造
信号伝送 = 光ファイバ



特長 : 長距離測定可能、耐電磁ノイズ性能
電気絶縁性、防爆、高感度

究極の分布型・多点型センサ

分布型センサと多点型センサ

分布型センサ



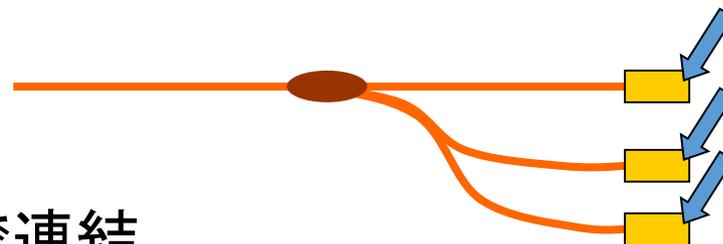
光ファイバに沿って連続的にセンシング

光ファイバ自身の性質を利用

レーリー散乱、ラマン散乱、ブリルアン散乱

パルス法、周波数掃引法、コヒーレンス関数の合成法等

多点型センサ



点型センサ素子を光ファイバで連結

FBGセンサ (-6 pm/MPa, 1.2 pm/ $\mu\epsilon$, 12 pm/ $^{\circ}\text{C}$ @1550nm)

OTDR法、WDM法

測定原理(検出原理)の大分類

振幅: **強度変調型**
(偏波を含む)

光 $E = A \cos(\omega t + \phi)$

位相
光路長変化
ドップラ効果

干渉型

周波数 $\omega = \frac{2\pi}{\lambda} c$

光の伝搬速度

ドップラ効果
非線形散乱

波長

ファイバグレーティング

分類

| | | | | |
|----------------|------------------------|-----------------|-------------------|-----|
| ファイバを伝送路とする | <p>反射型</p> | 強度変調型 | 多点型 | |
| | <p>透過型</p> | | | |
| | <p>検出型</p> | | | |
| ファイバ自身をセンサとする | <p>グレーティング書き込み</p> | <p>ブラッグ反射</p> | (ひずみ・温度・音波) | 分布型 |
| | <p>ファラデー効果</p> | | (磁界・電流) | |
| | <p>干渉型</p> | <p>マイケルソン</p> | (変位・速度・加速度・圧力・音波) | |
| | | <p>マツハ・ツェンダ</p> | (温度・圧力・音波・屈折率) | |
| | | <p>ファブリ・ペロ</p> | (変位・速度・加速度・圧力・音波) | |
| | | <p>リング</p> | (温度・圧力・音波・ジャイロ) | |
| | | <p>サニヤック</p> | (ジャイロ(角速度)・側圧・音波) | |
| | | <p>直交2偏波間</p> | (側圧) | |
| | <p>曲げ・マイクロベンディング損失</p> | | (圧力・音波・油漏れ) | |
| | <p>レーリー散乱</p> | | (ひずみ) | |
| <p>ラマン散乱</p> | | (温度) | | |
| <p>ブリルアン散乱</p> | | (ひずみ) | | |
| <p>蛍光</p> | | (光・放射線・化学) | | |

強度変調型

- 変位・速度・加速度
- 圧力・音波・振動
- 温度・電流・電圧
- 磁界・電界
- 屈折率・放射線・化学物質

グレーティング
(FBG、LPFG)

多点型

分布型

何が測定できるのか？

- ひずみ.....光弾性(光路長)、ブリルアン散乱、FBG
- 応力(圧力)・・光弾性、外部ダイヤフラム、FBG
- 音波.....光弾性、外部ダイヤフラム、FBG(ソナー)
- 加速度.....外部カンチレバー
- 回転速度.....サニヤック効果 (光ファイバジャイロ)
- 温度.....光路長、ラマン散乱 (温度分布センサ)
- 電流(磁界)・・ファラデー効果 (光ファイバ電流センサ)
- 電界.....カー効果
- 化学物質・物性
- 放射線
- その他

光ファイバセンサの応用



光ファイバセンサ国際会議OFSのScope(1/2)

1. Physical, Mechanical & Electromagnetic Sensors:

Temperature, Pressure, Strain, Vibration, Acceleration, Flow, Rotation, Displacement, Magnetic Field, Electric Field, Current, and Voltage

2. Chemical, Environmental, Biological and Medical Sensors:

Remote Spectroscopy, Environmental Monitoring, In-vivo Monitoring, Agent Detection, Trace Analysis

3. Interferometric & Polarimetric Sensors:

Gyroscopes, Hydrophones, Geophones, and Acoustic Sensor Arrays

4. Photonic Crystal Fiber Sensors & Devices:

Photonic Crystal Fibers, Hollow Core Fibers, Nanomaterials and Nano-Optical Devices and Diffractive Optics

5. Homeland Security & Defense Applications:

Bioagent and Biohazard Sensors, Intrusion Detection, Perimeter Security, Littoral and Underwater Sensors

光ファイバセンサ国際会議OFSのScope(2/2)

6. Smart Structures and Materials:

Structural health monitoring, Strain and Deformation Sensors, Fiber Embedding Techniques, Condition Monitoring Algorithms

7. Distributed Sensing:

Time, Frequency and Coherence Domain Reflectometry, Rayleigh, Raman and Brillouin Detection Techniques, and Sensing Cable Designs

8. Multiplexing and Sensor Networking:

Topologies and Theories, Multiplexing Techniques, and FBG Applications

9. Passive & Active Devices for Photonic Sensing:

Sources, Detectors, Modulators, Specialty Fibers, Integrated Optics Devices, Fiber Gratings, MEMS, Micro-optic Components, and MEMS

10. Commercial Systems & Field Tests:

Relevant Installations and Field Demonstration of Photonic-based Sensing Systems, Metrology Projects, and Commercialization Efforts

光ファイバセンサ技術の成り立ち

構造ヘルスマニタリング
電力系統
ジャイロ

応用

設置技術
ソフトウェア

光ファイバ
技術

検出技術

シングルモード、マルチモード
ファイバグレーティング (FBG)
マイクロストラクチャードファイバ (PCF)
マルチコアファイバ (MCF)

干渉計測
空間分解技術
多重化技術

光デバイス

光源 (レーザー、SLD、波長可変)、受光器
変調器、ファイバカップラ、サーキュレータ
AWG、フィルタ、機構部品

光ファイバ自身をセンサとした場合の感度

応力(ひずみ): 伸び、屈折率変化(弾性光学効果)

温度 : 熱膨張、屈折率の温度特性

磁界 : ファラデー効果(偏波)

静水圧Pによる位相変化 $\Delta\phi/\phi$ (光ファイバの圧力感度)

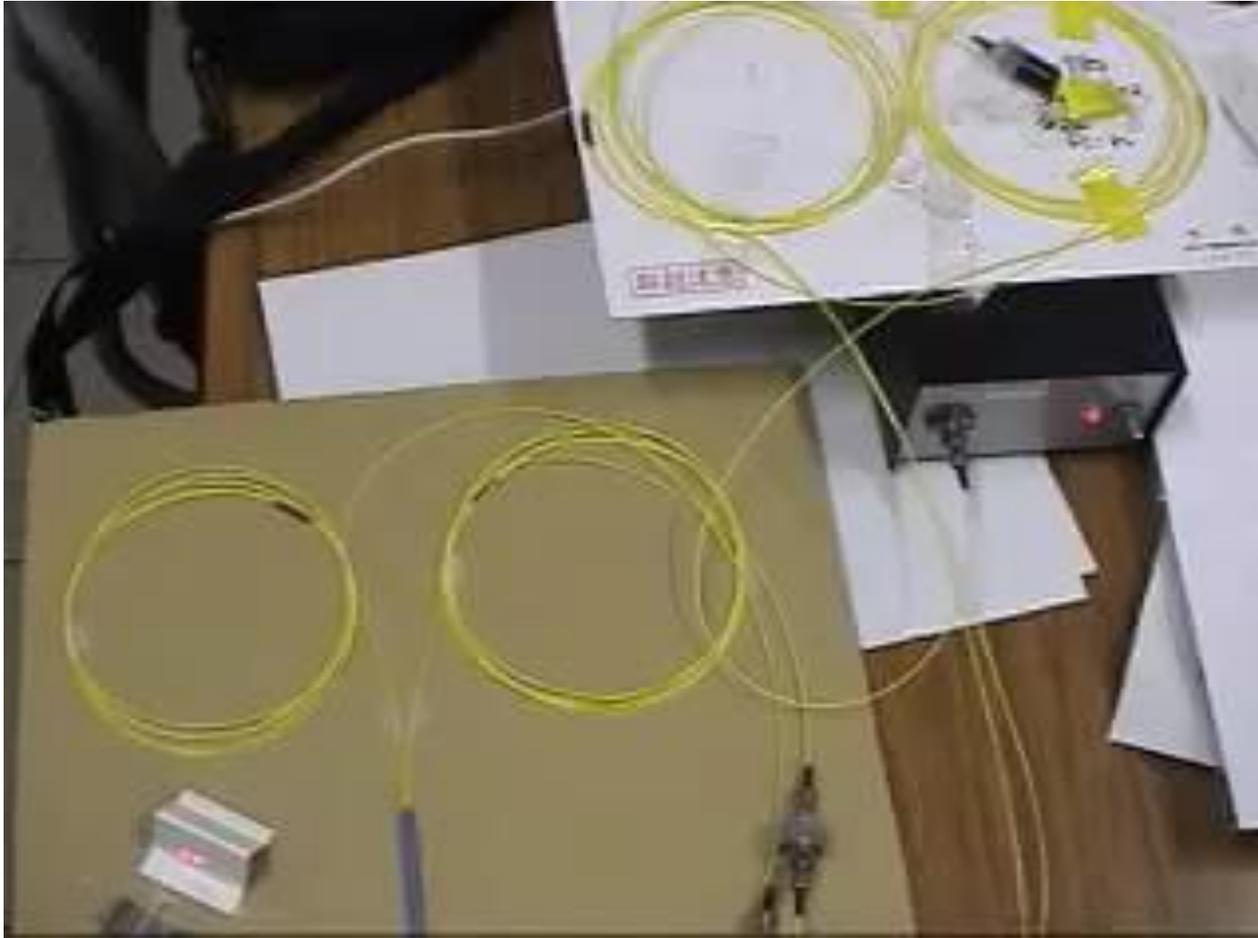
$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \varepsilon_z - \frac{n^2}{2} [(P_{11} + P_{12})\varepsilon_r + P_{12}\varepsilon_z]$$

この式は、光ファイバの圧力感度を表す。式中の各項は以下の通り定義されている。

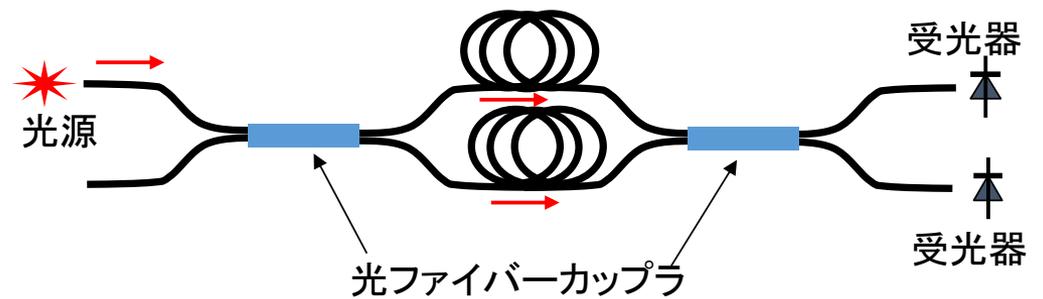
- ε_z : 軸方向ひずみ
- n^2 : コアの屈折率
- $(P_{11} + P_{12})\varepsilon_r + P_{12}\varepsilon_z$: 径方向ひずみと光弾性定数の関数

ファイバ長により感度をかせぐ＝ファイバコイル

光ファイバによるマツハツェンダ干渉系デモ

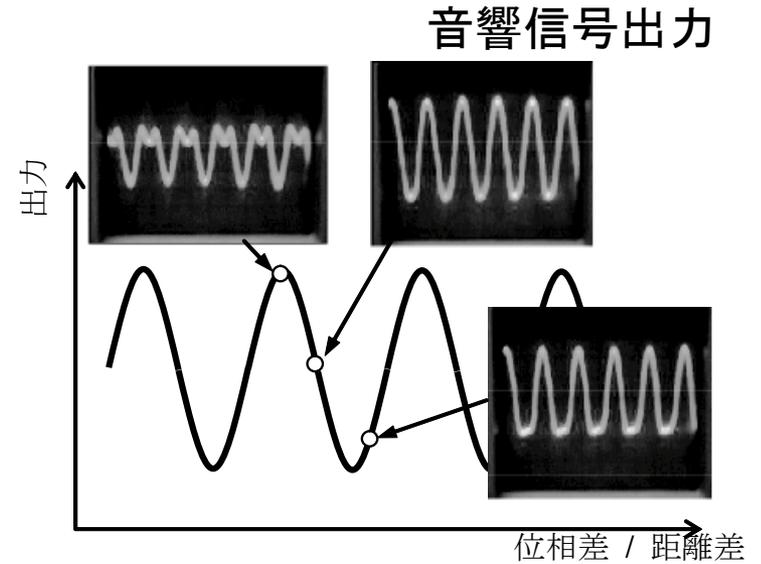
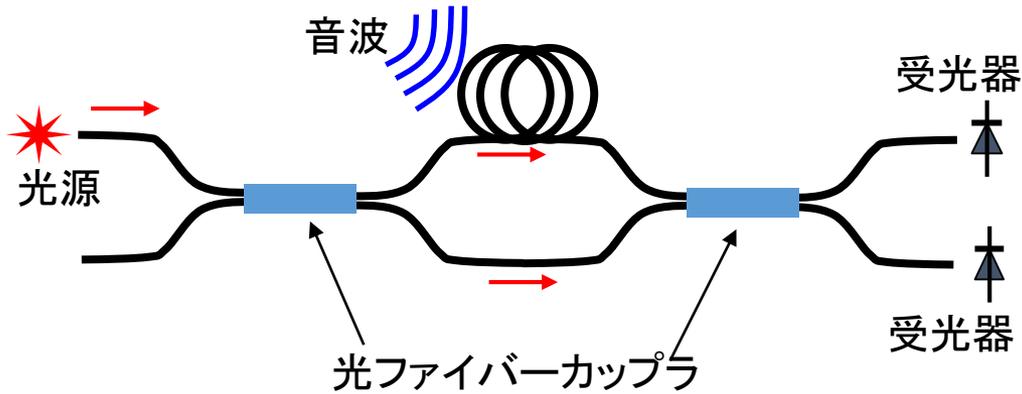


動画

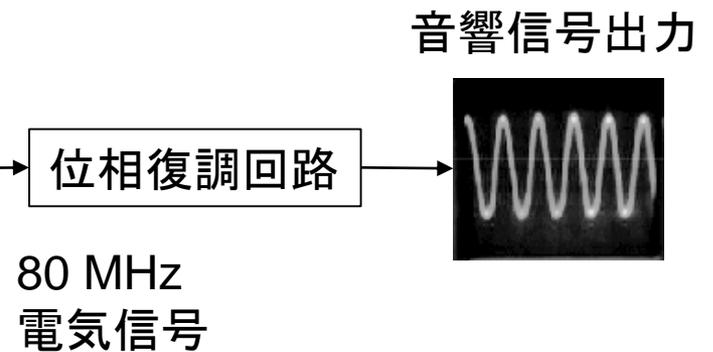
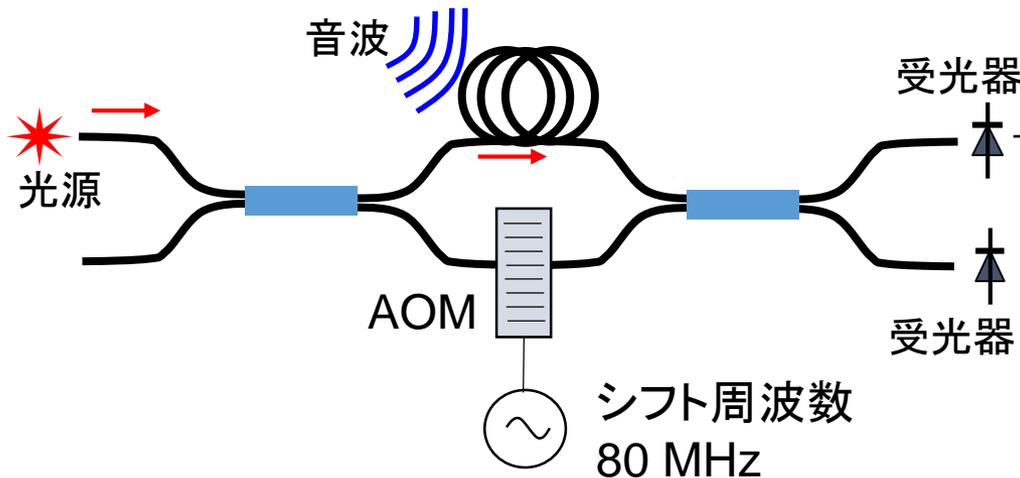


実用的にはヘテロダイン検出を利用

ホモダイン干渉

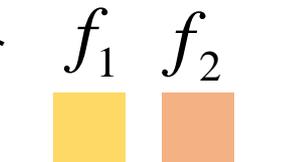


ヘテロダイン干渉 (概念図)

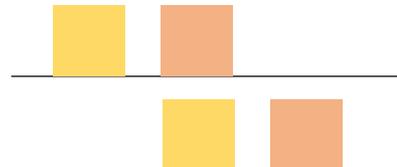


多素子ハイドロホン(水中マイクロホン)アレイとして使われている(曳航ソナー、沿岸監視用ソナーなど?)

周波数シフト
の異なるパ
ルス・ペア



入力

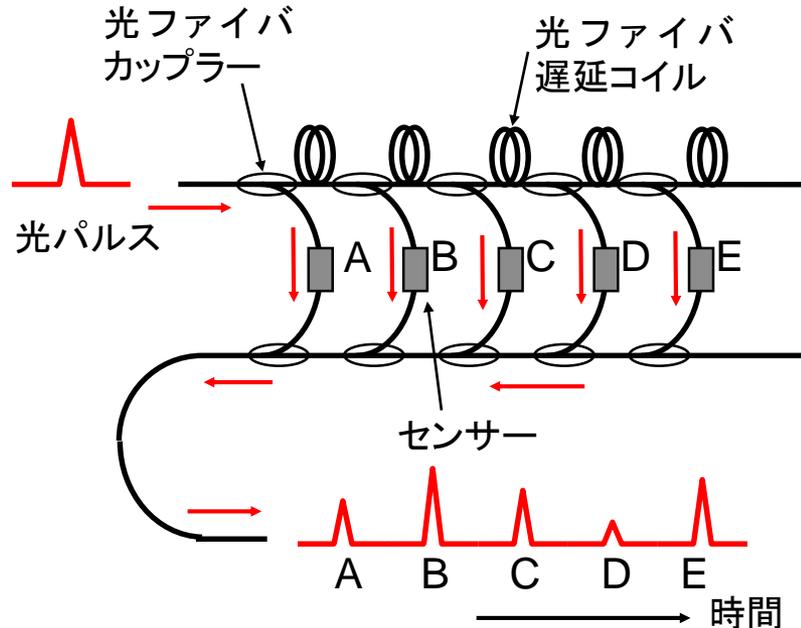


時間差でヘテ
ロダイン

$$f_1 - f_2$$

出力

時分割多重に よるアレイ化

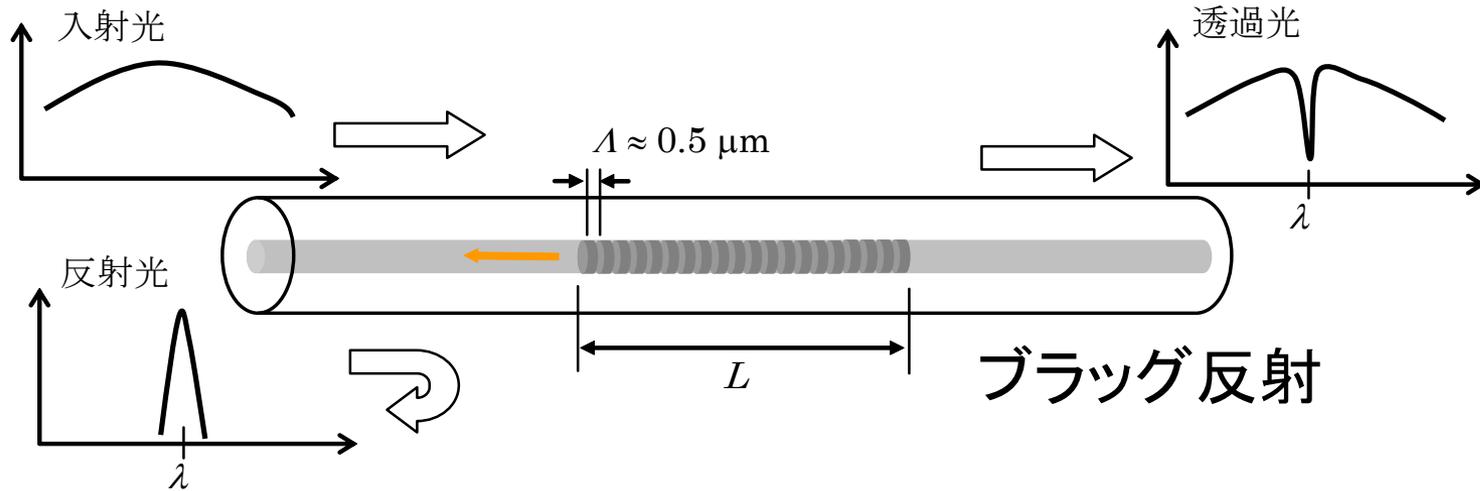


時分割多重のシステムを複数並列にしたり、その他の多重化方式も併用して、256素子程度のものも作られている。

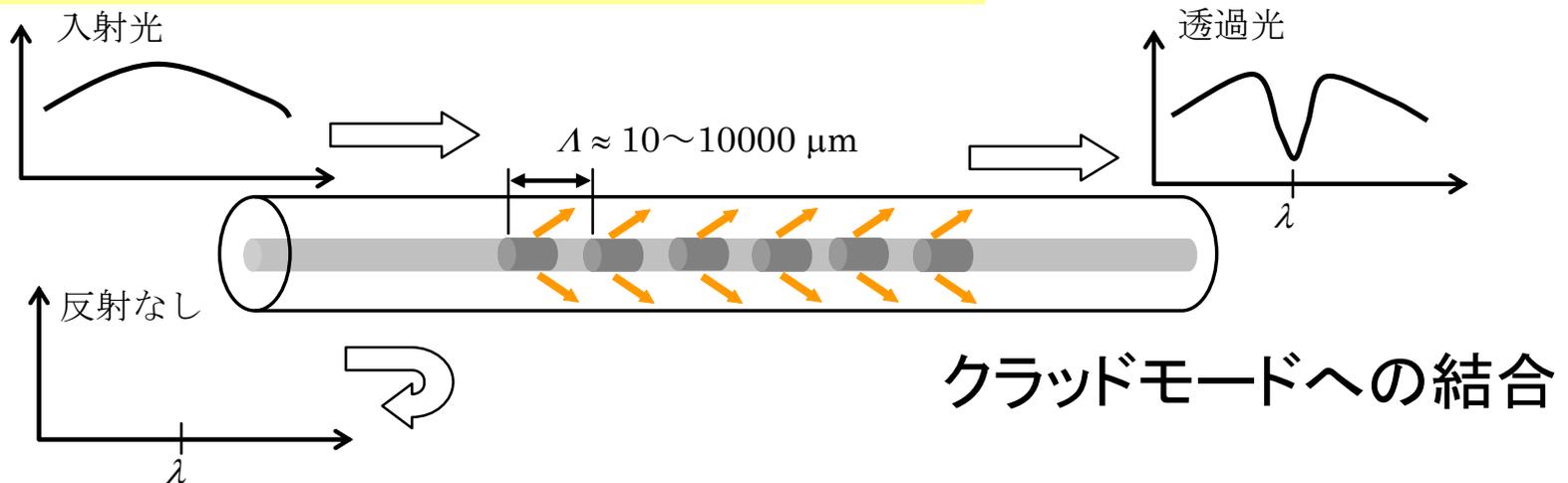
ファイバ・グレーティングによるセンサ

屈折率を長手方向に周期変調
波長選択性

ファイバ・ブラッグ・グレーティング **FBG**

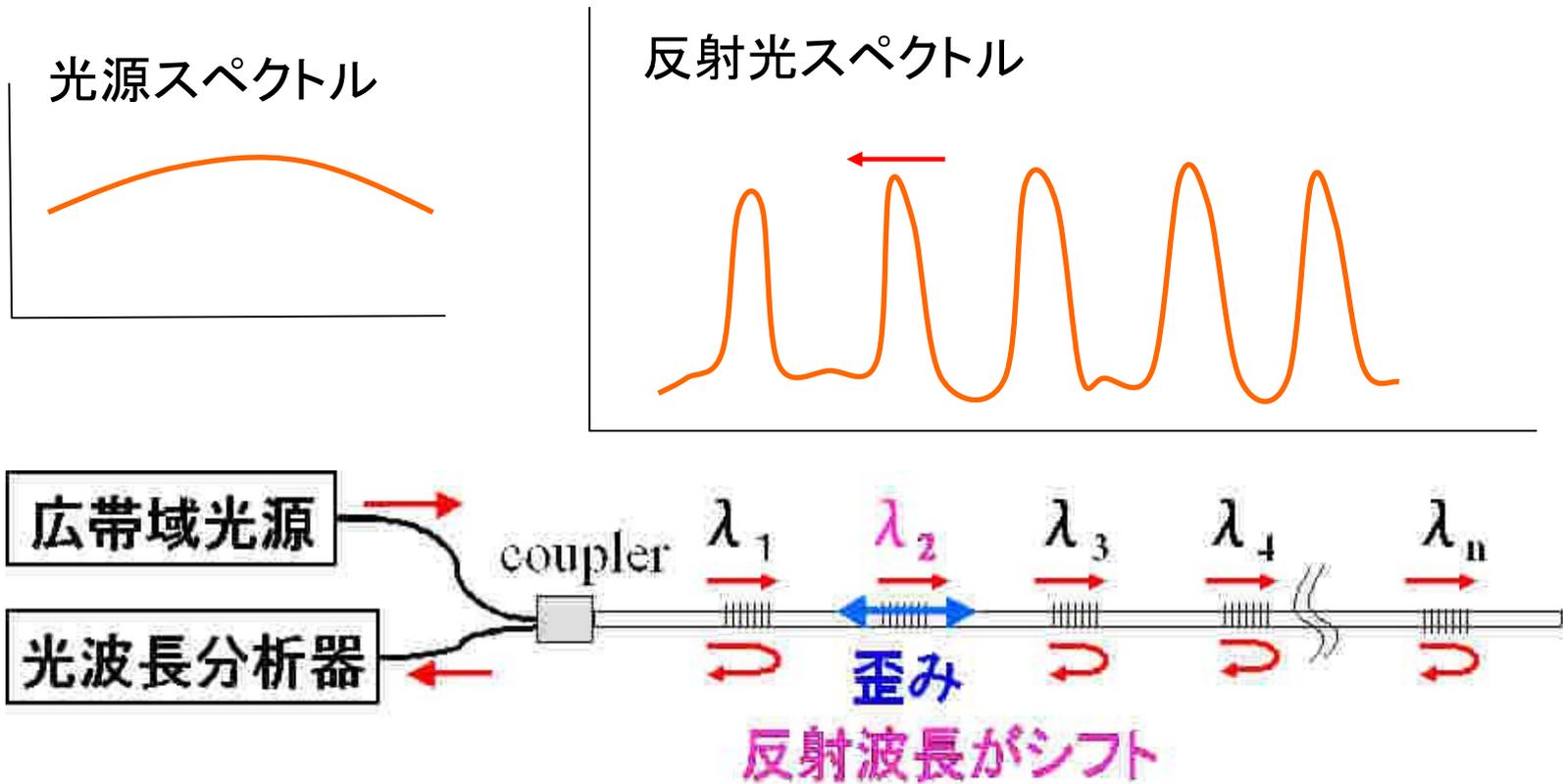


長周期ファイバ・グレーティング **LPFG**



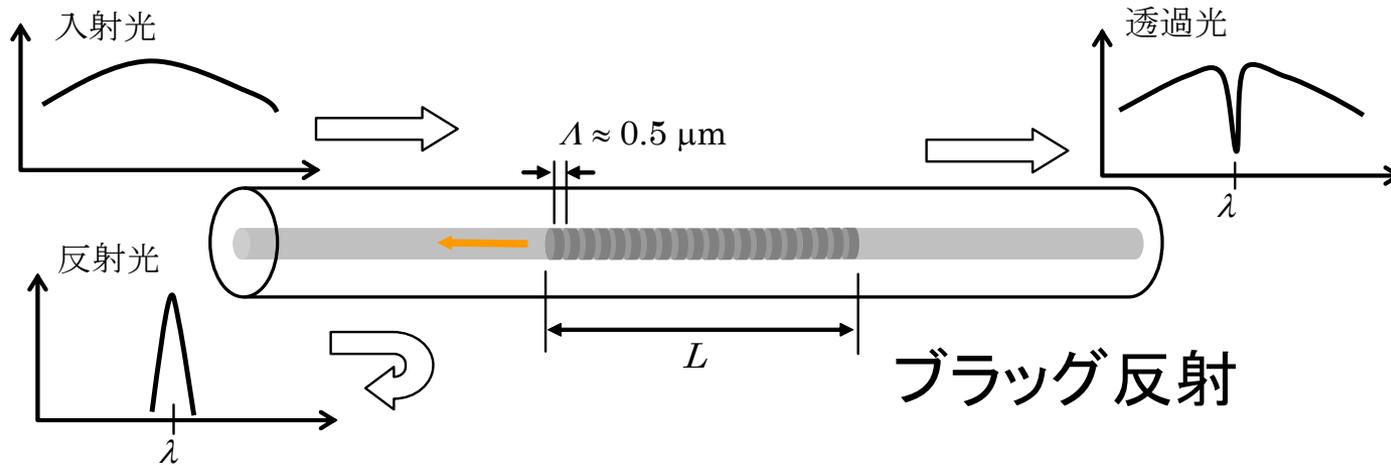
波長多重方式を用いたFBGによる多点同時測定

最も多く検討されているファイバセンサ



反射中心波長の異なったFBGを直列に1本のファイバに配置
光波長でセンサを識別する、そのシフト量で歪(温度)を測定

FBGセンサ



感度 : -6 pm/MPa, 1.2 pm/ $\mu\epsilon$, 12 pm/ $^{\circ}\text{C}$ @ 1550nm

これまで行われた研究開発

高感度検出法

高速検出法

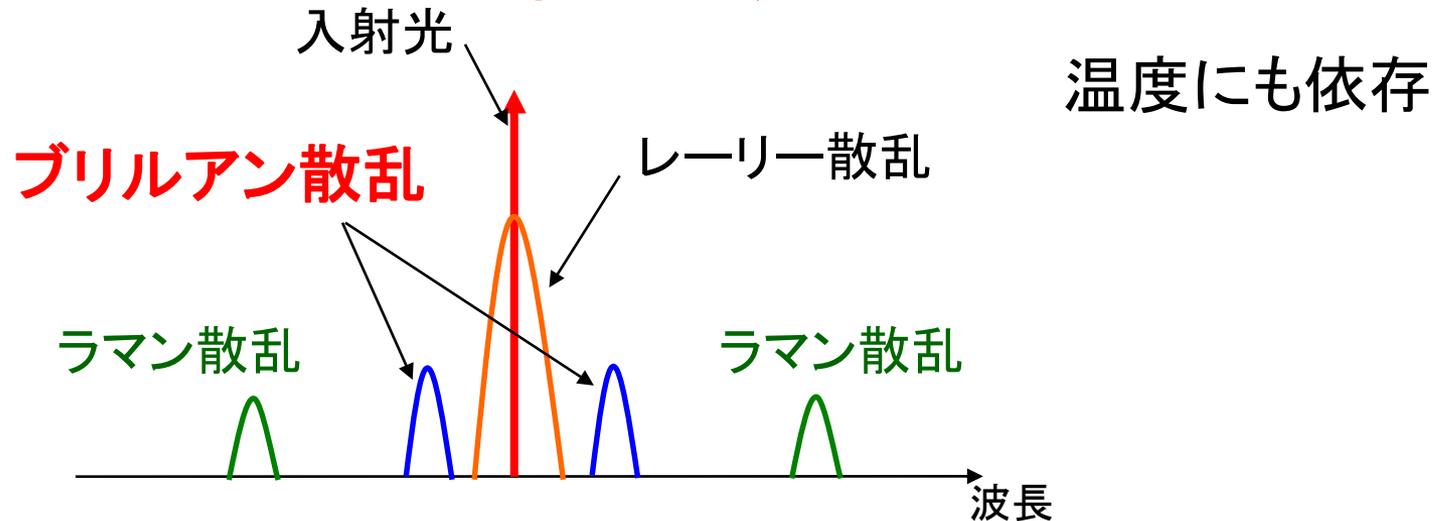
温度感度とひずみ感度の分離

多重化手法

フィールドテスト、製品化

光ファイバ中の後方散乱の利用

- ・(フレネル反射) = 端面、破断面、傷
- ・レーリー散乱 = 不均一
- ・ラマン散乱 = 熱振動(強度が温度に依存) 10数THz
- ・**ブリルアン散乱 = 音響波(波長変化が歪に依存) 11 GHz**



歪による周波数変化(1%の歪みで0.5 GHz)

温度による周波数変化 (1°Cで1 MHz)

分布型センサの空間位置分解法

1. **OTDR**法・・・光パルス入射、時間から場所を知る
2. **OFDR**法・・・光周波数(波長)を掃引
3. **OCDR**法・・・光のコヒーレンスの性質を利用

空間分解能の高い方法が研究されている。

空間分解能、測定できる距離、測定速度などのトレードオフ

光ファイバセンサ技術の成り立ち

構造ヘルスマニタリング
電力系統
ジャイロ

応用

設置技術
ソフトウェア

光ファイバ
技術

POF

検出技術

シングルモード、マルチモード
ファイバグレーティング (FBG)
マイクロストラクチャードファイバ (PCF)
マルチコアファイバ (MCF)

干渉計測
空間分解技術
多重化技術

光デバイス

光源 (レーザー、SLD、波長可変)、受光器
変調器、ファイバカップラ、サーキュレータ
AWG、フィルタ、機構部品

本日の内容

●光ファイバセンサとは： おさらい

●プラスチック光ファイバ(POF)の利用

- 1) プラスチックだと何が違うか
- 2) OTDRによる測定
- 3) ブリルアン方式

●音に関わる応用

- 1) 騒音測定用マイクロホンアレイ
- 2) 空中超音波測定用ファイバプローブ
- 3) MHz超音波用プローブ
- 4) 医用応用の最近の話題

プラスチック光ファイバ(POF)

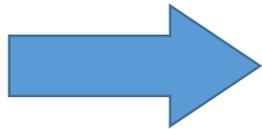
ポリマー材料(アクリルなど)で構成

コア径が大: 120 - 980 μm

- 安価な敷設コスト
- POF間の容易な結合
- 高い柔軟性 (>50%の歪に耐える)
- 高い安全性

光伝搬損失がシリカファイバよりも大
マルチモードのため低速(帯域狭い)

可視光帯(~600 nm)で光伝搬損失が最低



低損失化の研究も進展中

GI型もあり(高速化)。SMも研究中

フッ素化加工により、低損失帯域を拡張

POFをセンサとして用いる場合の特徴

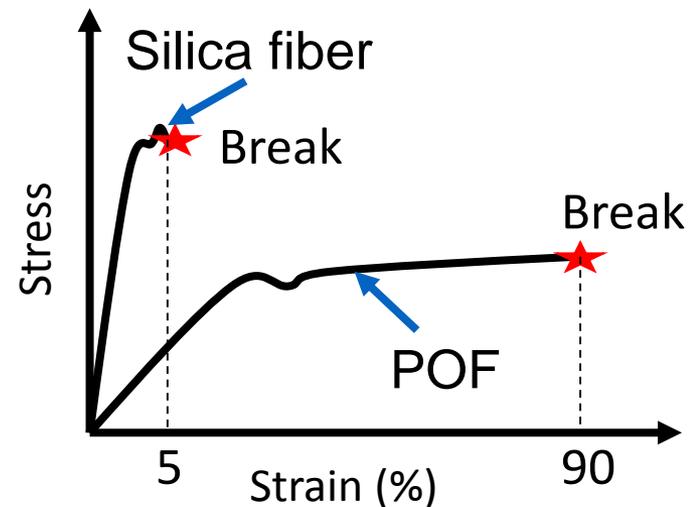
| | POF | シリカ |
|---------|---------|---------|
| 距離 | < 100 m | > 10 km |
| 帯域 | △ | ◎ |
| 最大ひずみ | > 50 % | ~5 % |
| 埋め込み | ○ | △ |
| センシング特性 | 不明 | 既知 |

大変形に耐える

+メモリ効果

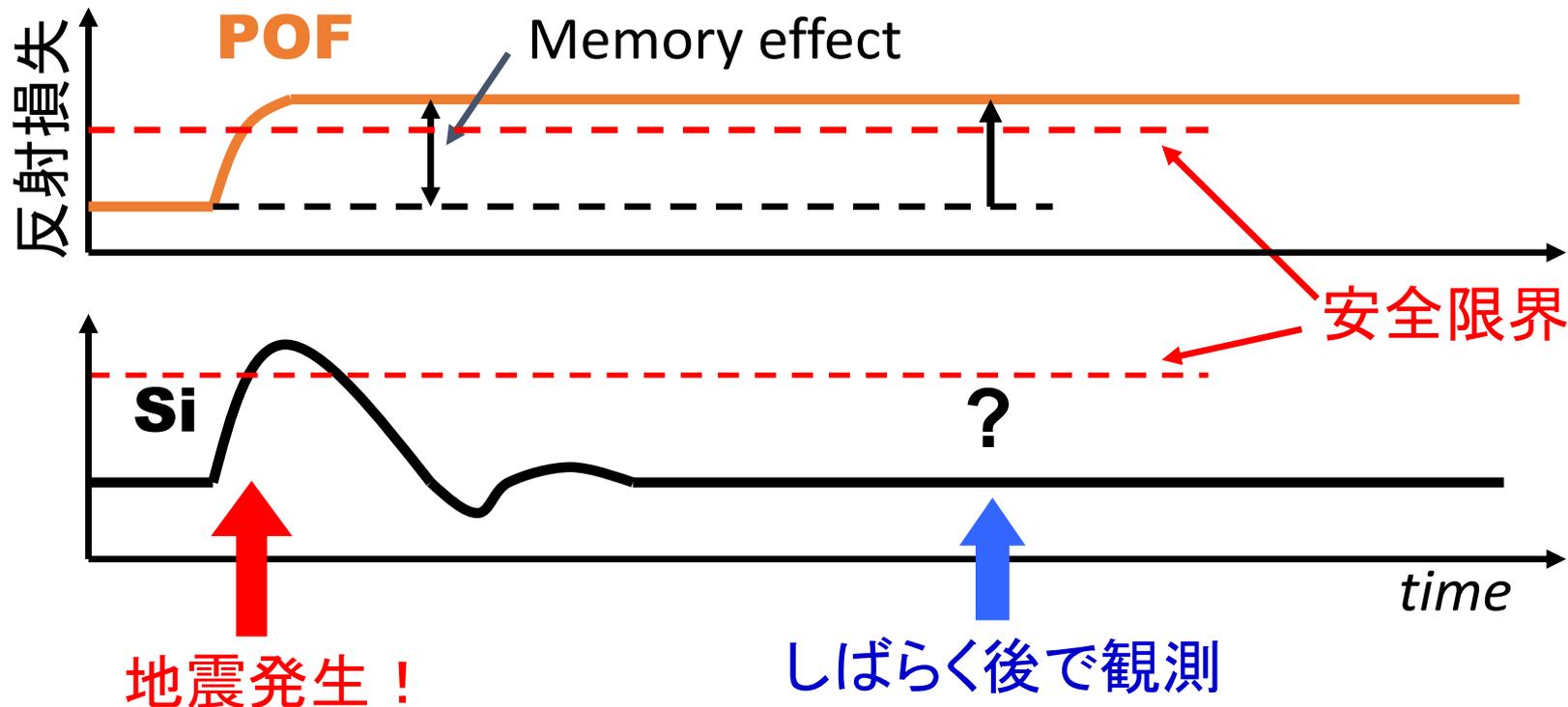
取り扱いが容易

(埋め込みが容易)



POFのメモリ効果

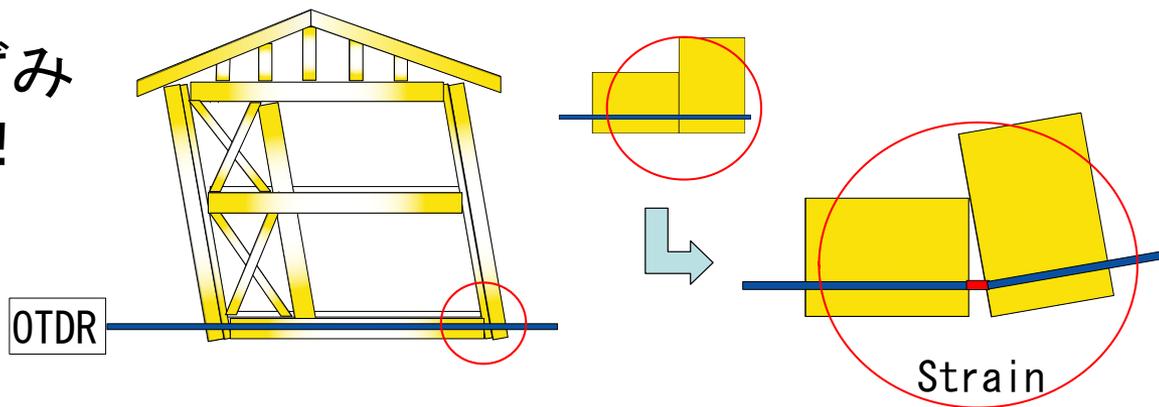
大ひずみ = 塑性変形 = 光学特性も変化したまま



地震発生!

しばらく後で観測

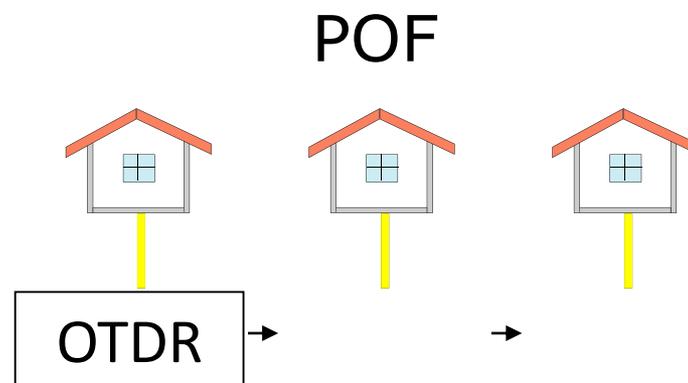
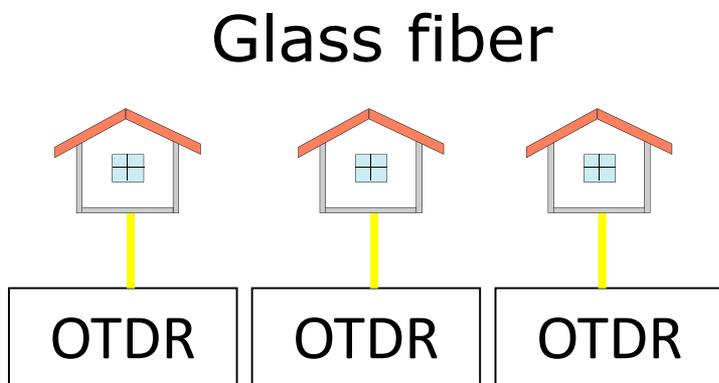
建物が経験した最大ひずみ
値をPOFが記憶している!



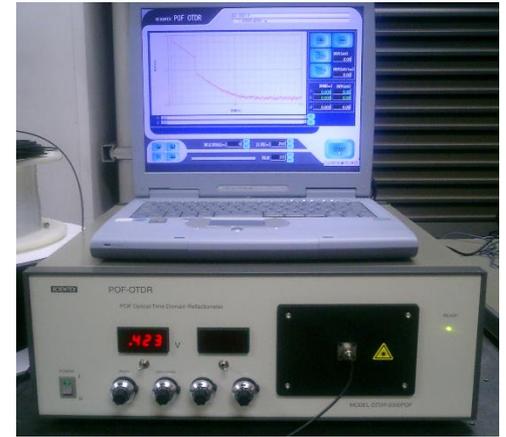
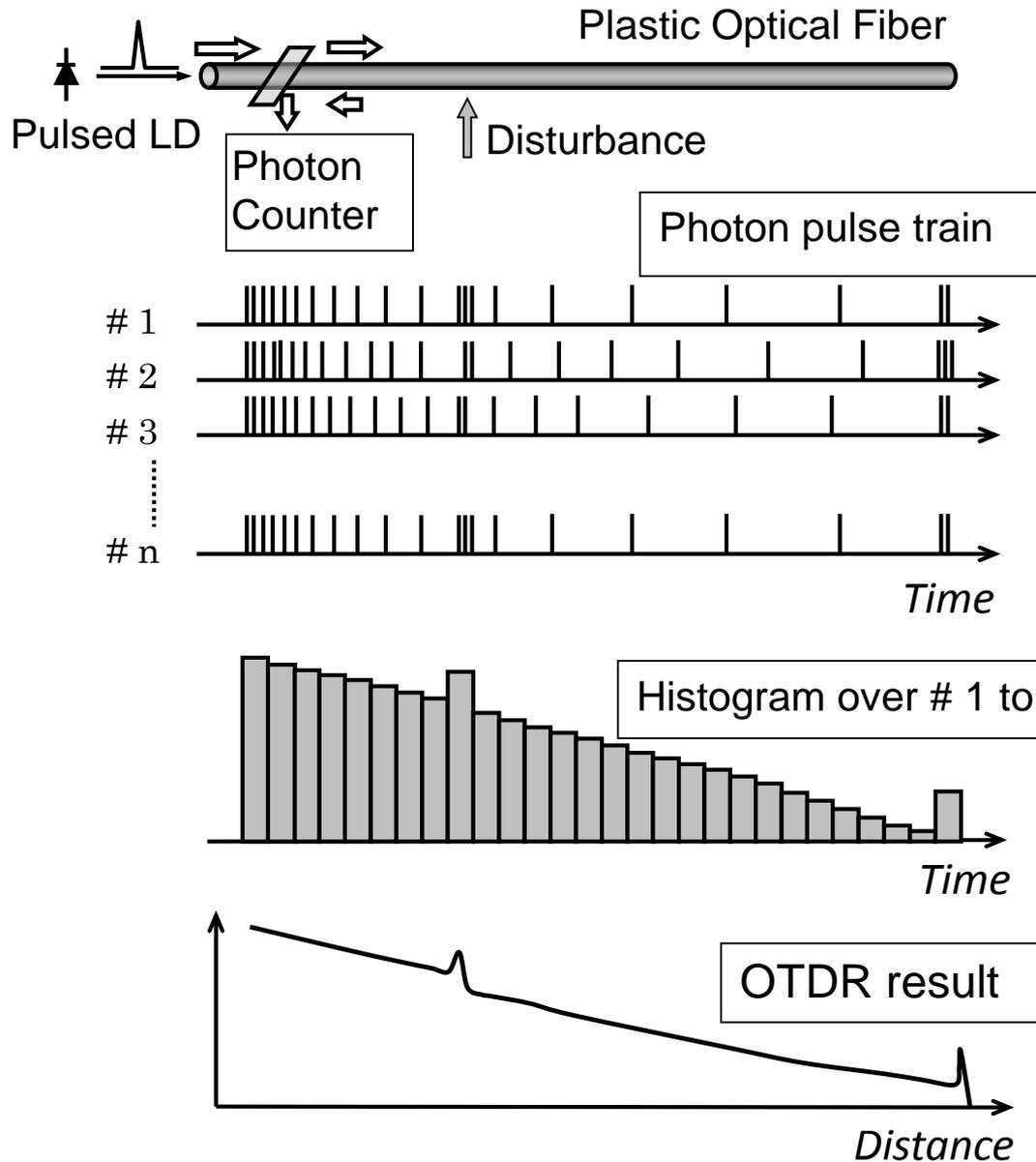
POFのメモリ効果の使い方

POFは伝送距離100mまで → 小型構造物
解析装置のコストが問題(小型構造物ゆえ)

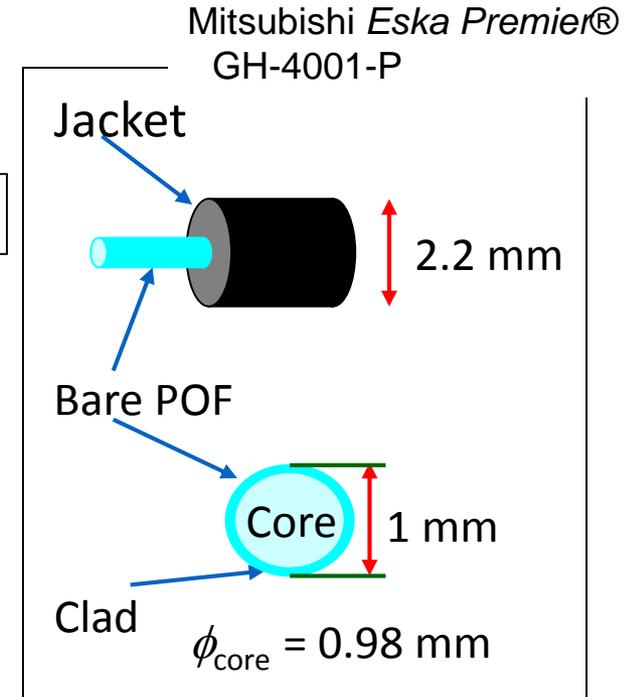
解析装置は不要・ファイバの敷設のみ＝巡回検査



フォトン計数法によるOTDR

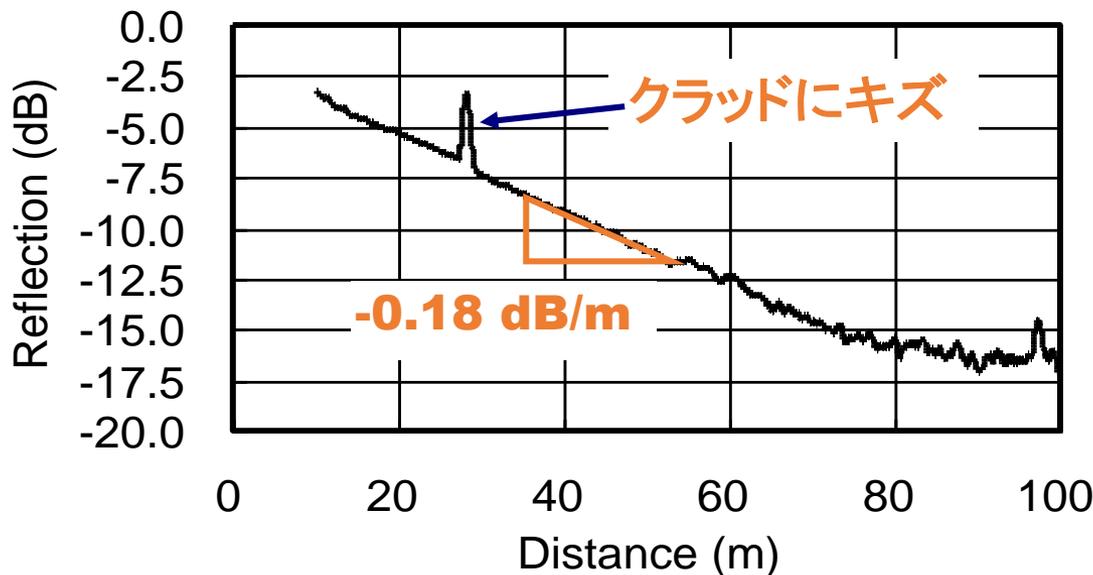


SCIENTEX社製 MODEL OTDR-2000POF



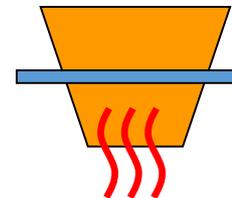
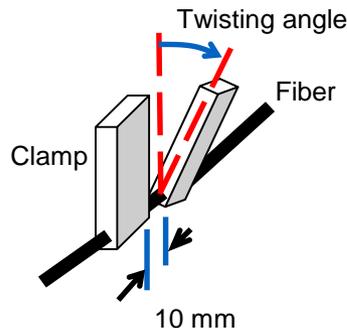
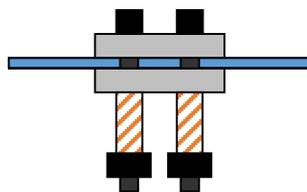
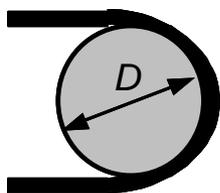
OTDRによるPOFのセンサ特性検討

OTDR応答の例



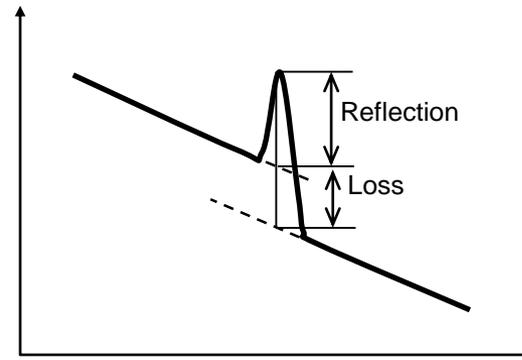
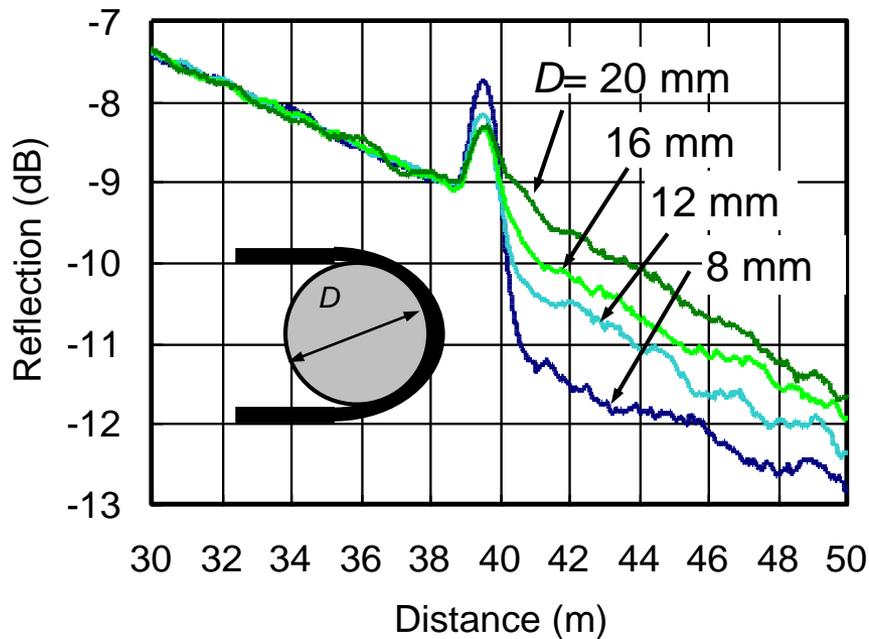
検討項目

曲げ、 引っ張り、 側圧、 ねじり、 温度上昇

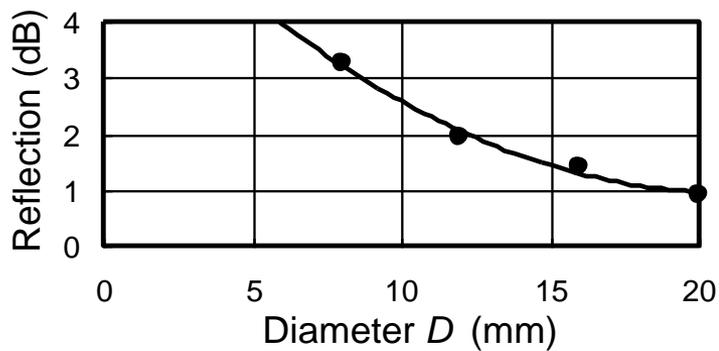


反射、透過損、...

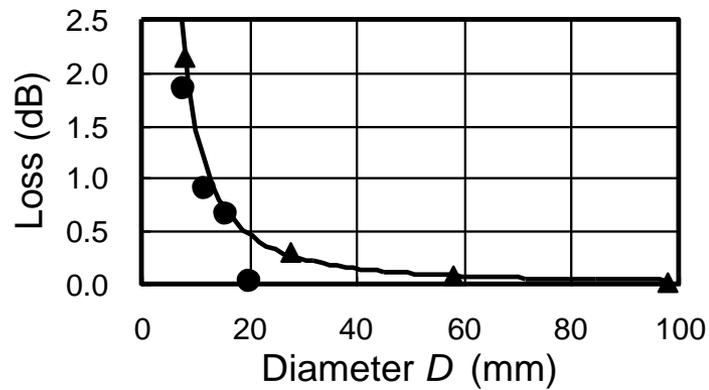
曲げの影響



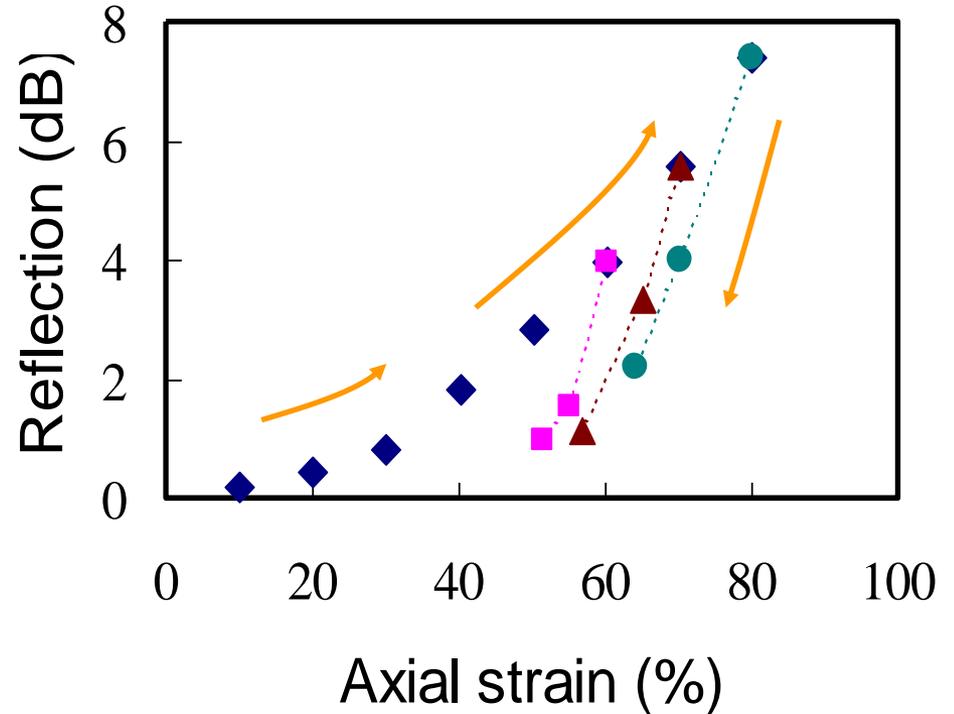
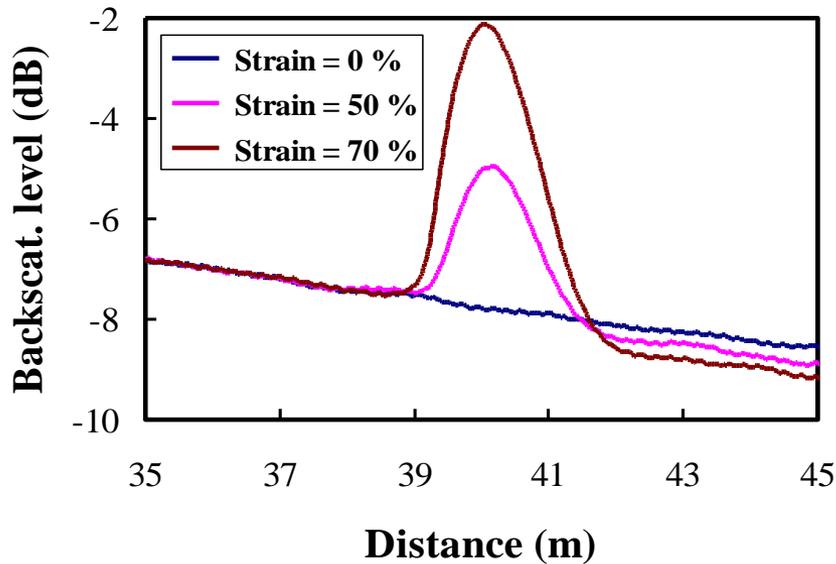
反射量



損失量



引っ張りひずみの影響

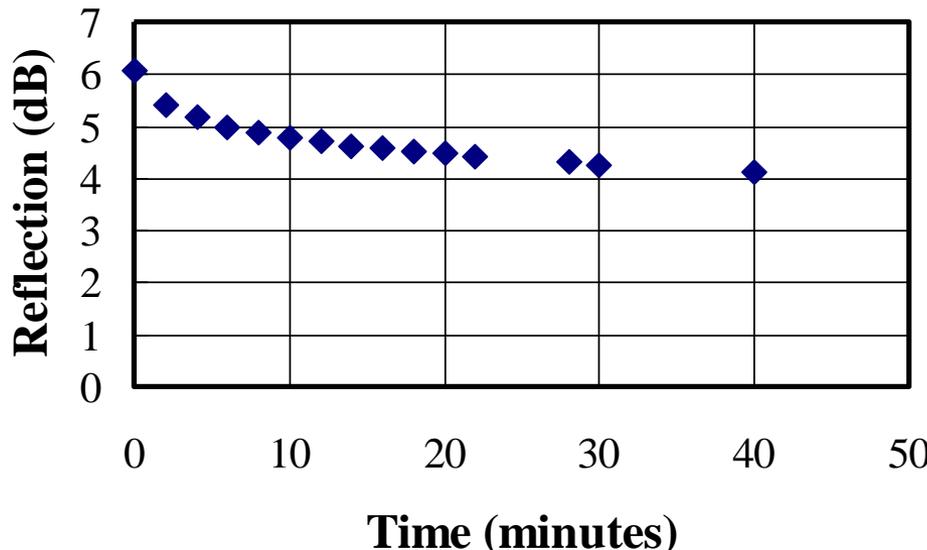


大変形後に外力を解除すると・・・

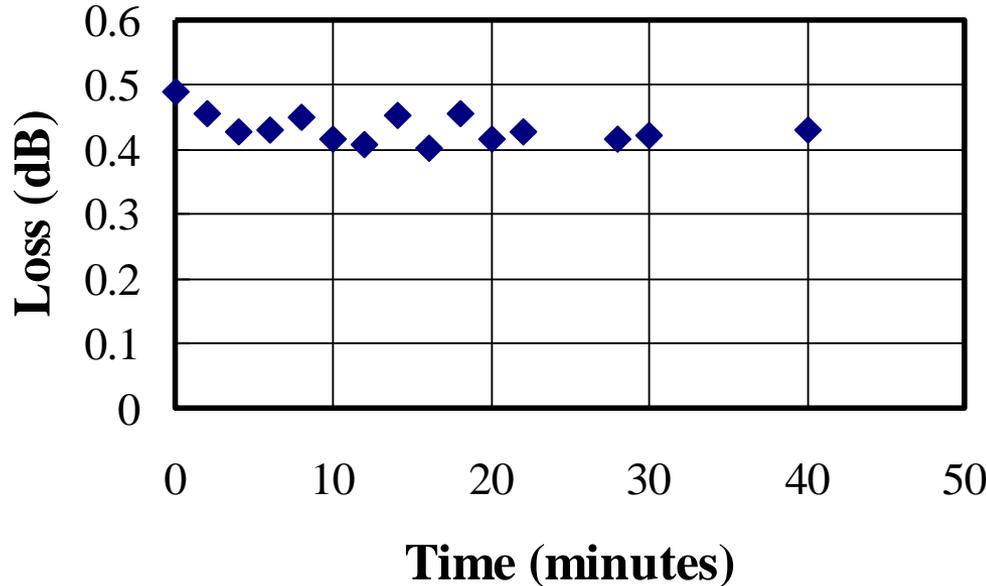
ひずみが残留(塑性変形)

光の反射量ももとに戻らない(メモリー効果)

反射・透過損の時間変化(60%引っ張りひずみ)



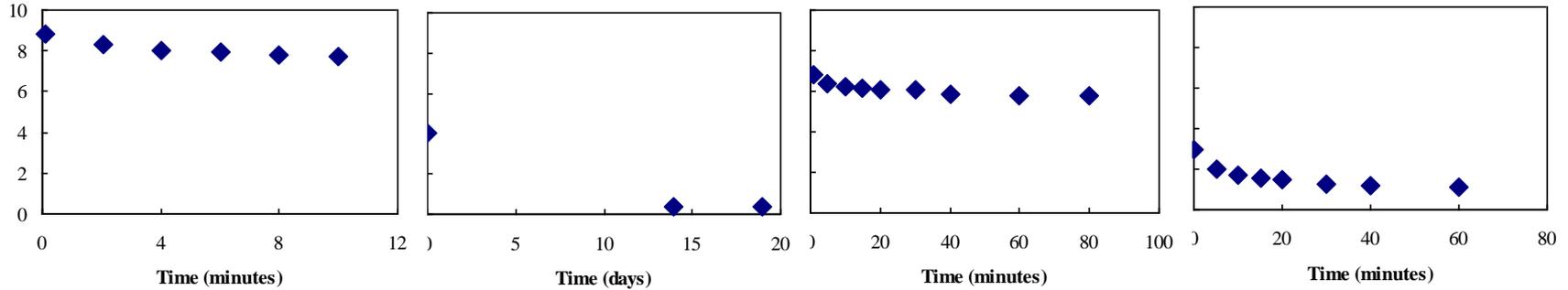
反射にはクリープがある



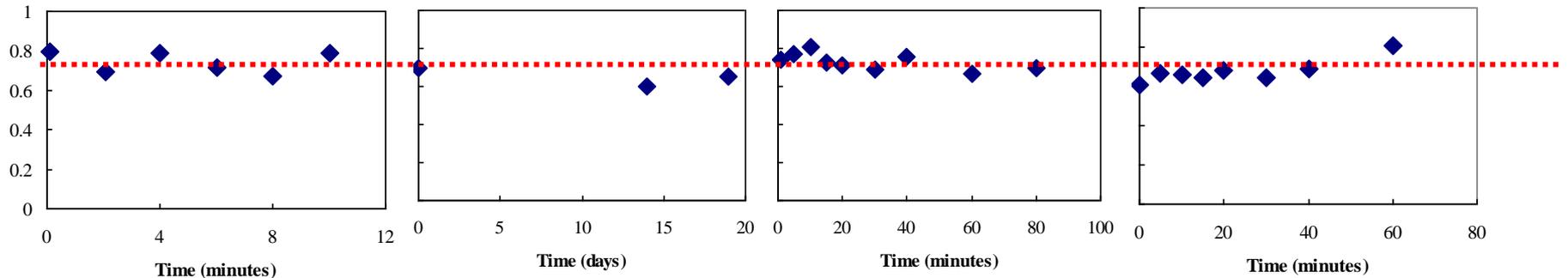
透過損はあまり変化しない

繰り返し引っ張りひずみ(80%)試験

反射



透過損



応力印加

応力解放

応力印加

応力解放

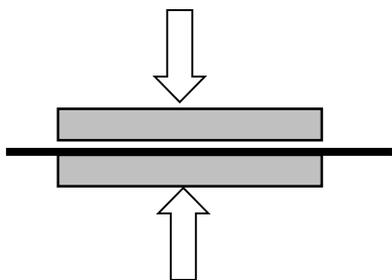
3週間

1日間

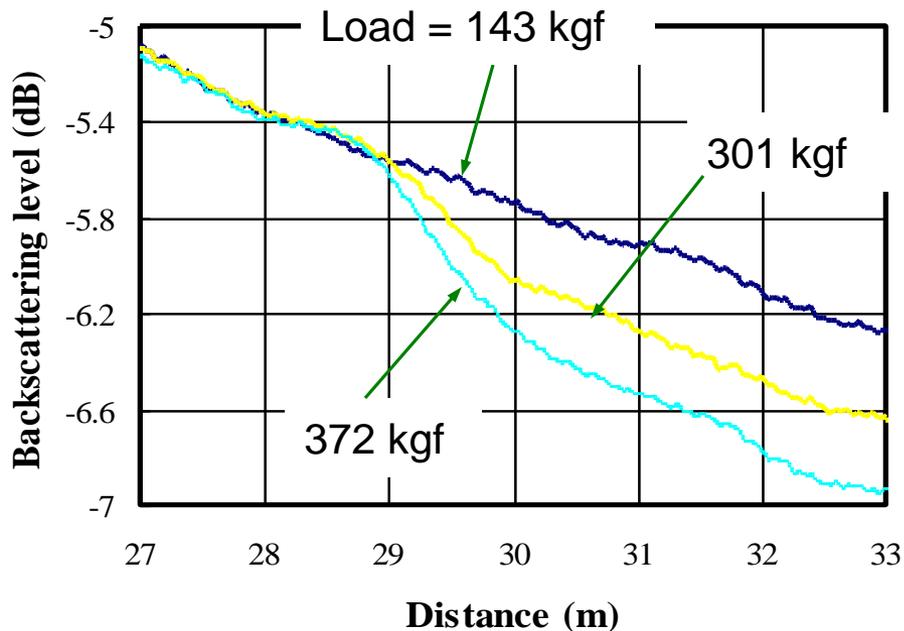
残留ひずみ量 = 50%

time

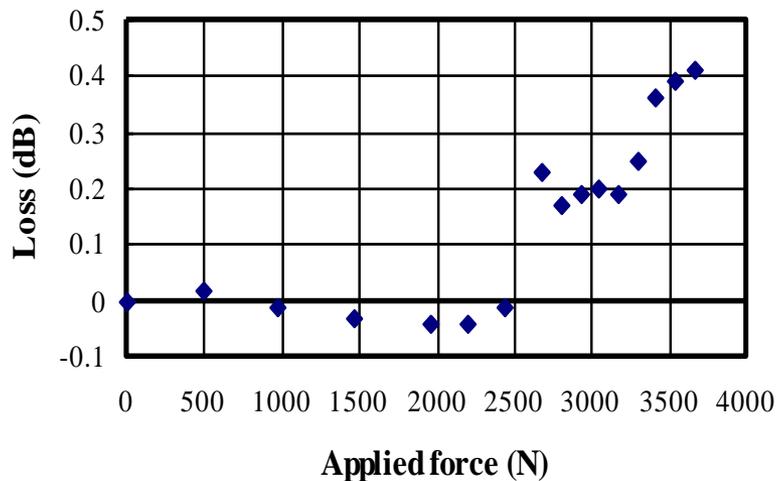
側圧の影響



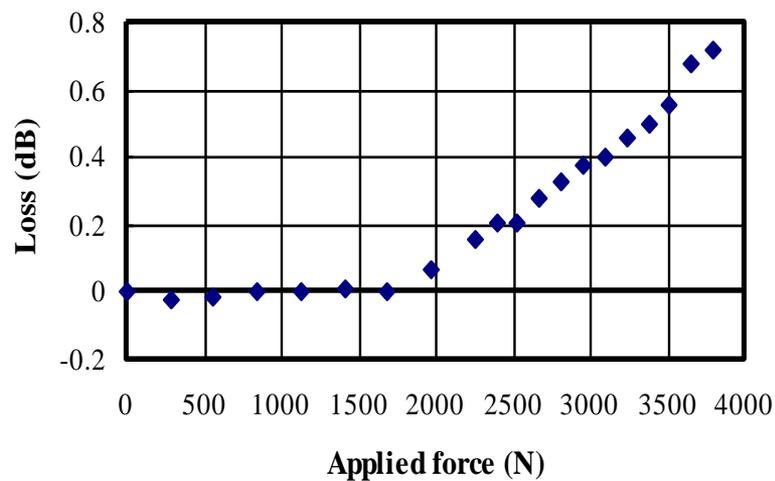
反射=小、損失=大



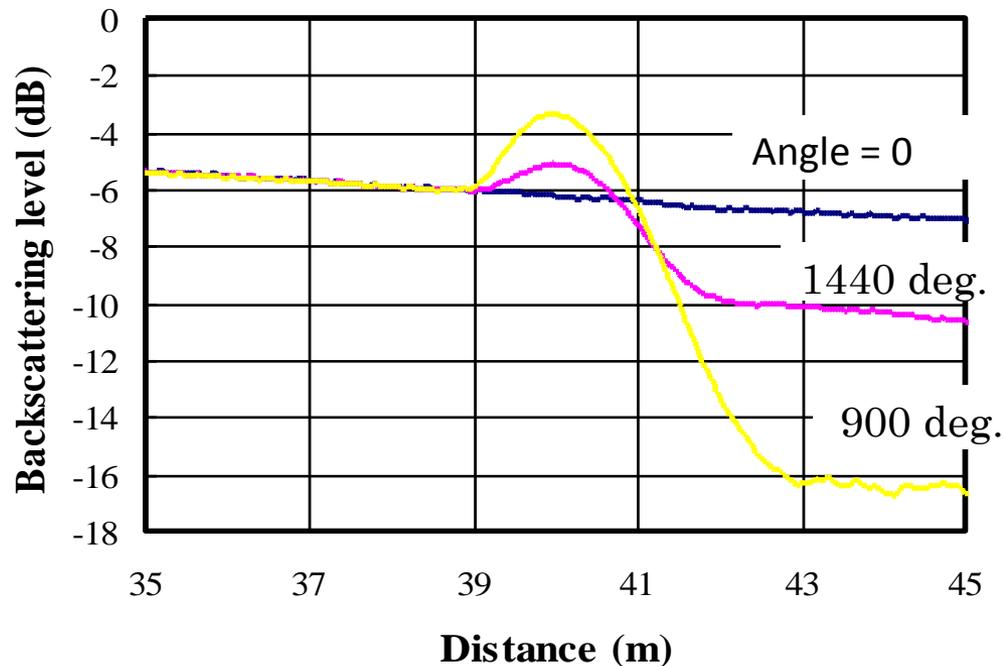
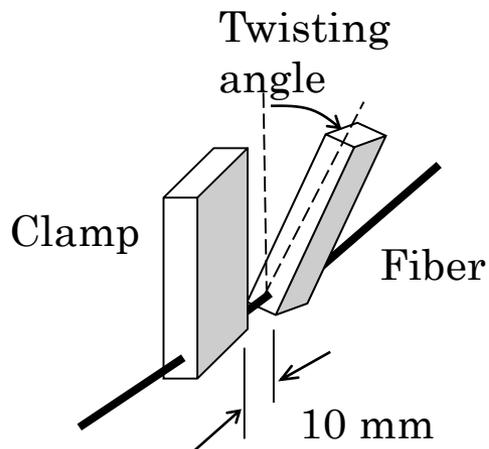
ファイバーケーブル



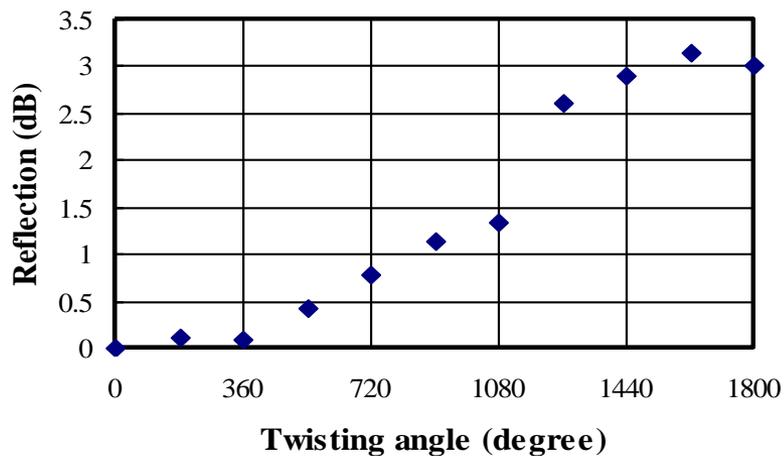
ベアファイバ



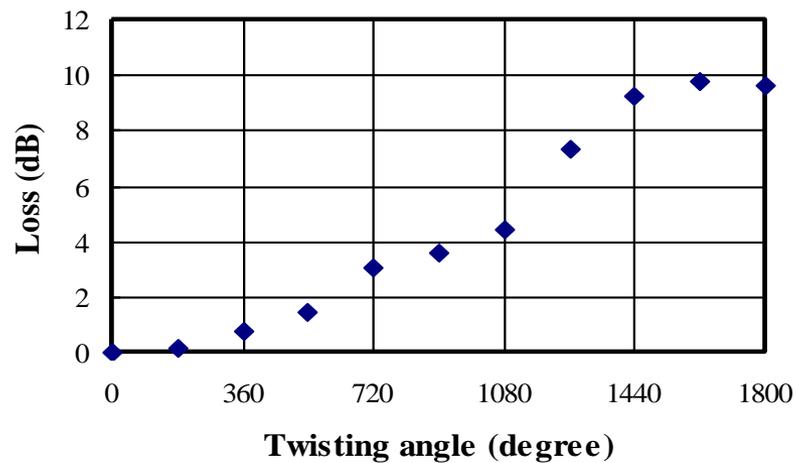
ねじりの影響



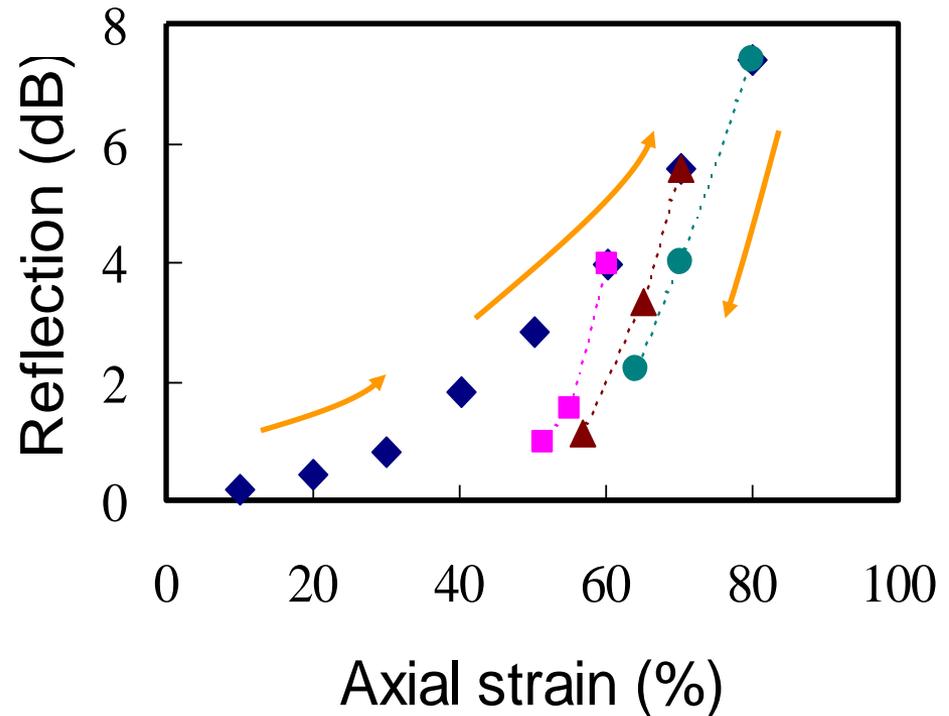
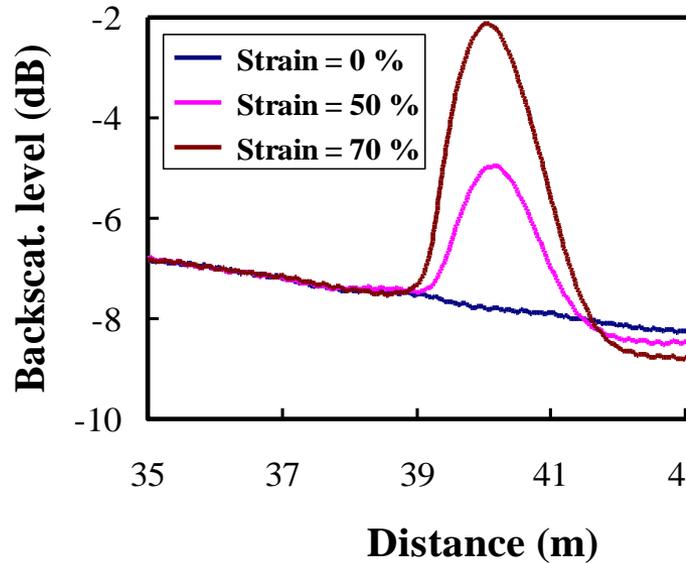
反射



損失



引っ張りひずみの影響

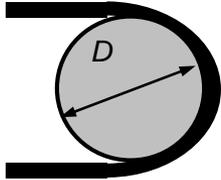
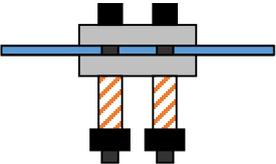
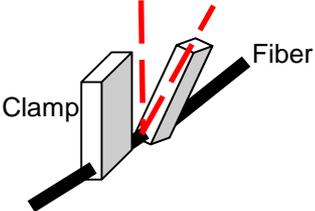


大変形後に外力を解除すると・・・

ひずみが残留(塑性変形)

光の反射量ももとに戻らない(メモリー効果)

外乱による応答の差 = 反射量と損失量

| | | |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 曲げ |  | 反射 < 損失 |
| 側圧 |  | 反射 = 0、損失のみ |
| ねじり |  | 反射 < 損失 |
| 引張り |  | 反射 > 損失 |

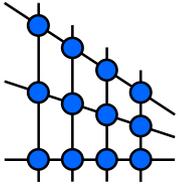
本日の内容

- 光ファイバセンサとは： おさらい
- プラスチック光ファイバ(POF)の利用
 - 1) プラスチックだと何が違うか
 - 2) OTDRによる測定
 - 3) ブリルアン方式

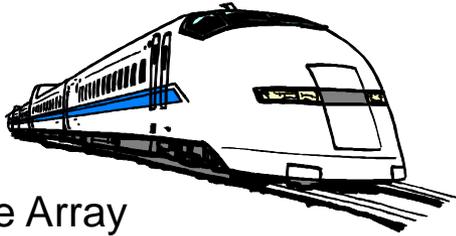
- 音に関わる応用
 - 1) 騒音測定用マイクロホンアレイ
 - 2) 空中超音波測定用ファイバプローブ
 - 3) MHz超音波用プローブ
 - 4) 医用応用の最近の話題

空中可聴音測定ニーズと課題

騒音測定・音源探査



Microphone Array



空力騒音は速度の6乗に比例

リニアモーターカー……トンネル微気圧波の問題

従来型マイクロホンアレイ



ケーブル取り回しがたいへん

光ファイバセンサでアレイマイクロホンを……課題は？

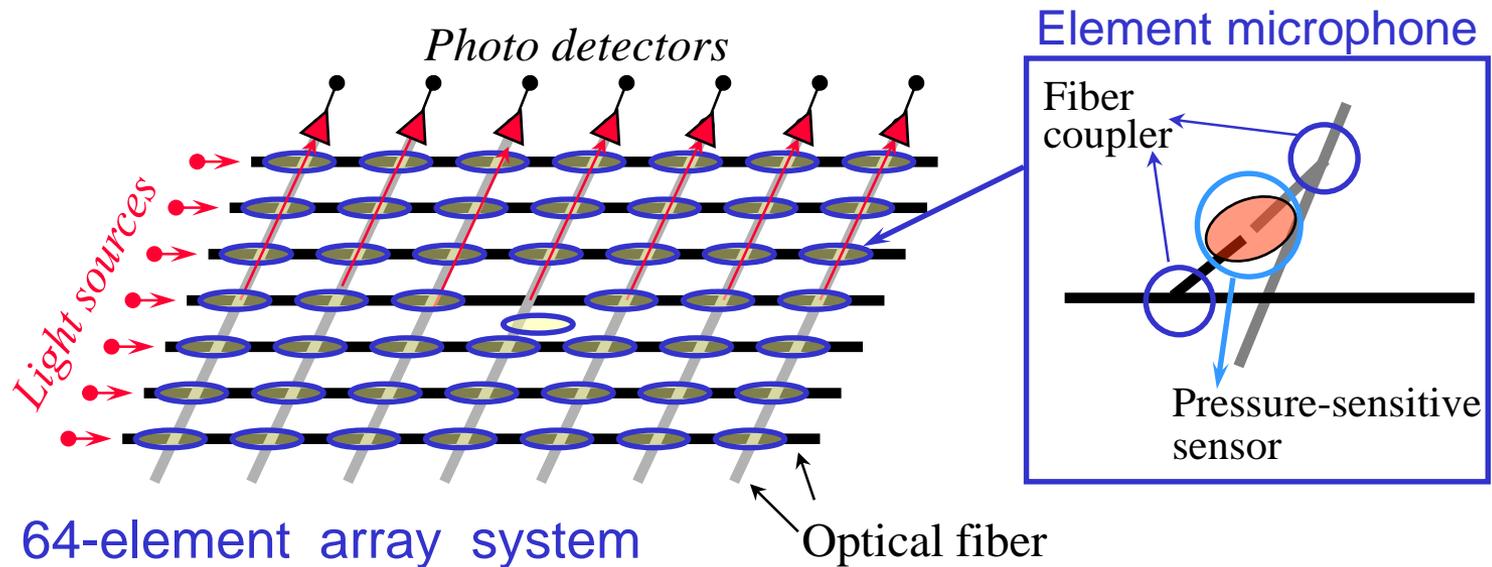
高感度………最小可聴音0 dB \rightarrow 20 μ Pa \rightarrow 1 pW/m²

周波数範囲……10 Hz \sim 10 kHz (高速検出が必要)

空中マイクロホンアレイ 例1

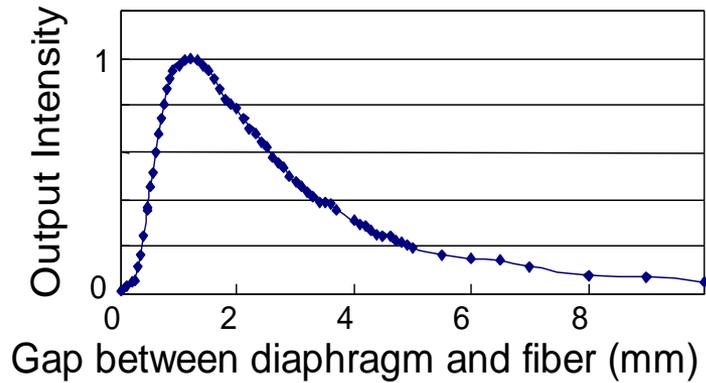
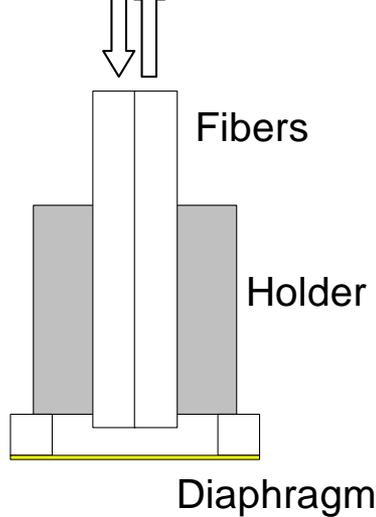
マトリクス配置・高速時分割多重

- 縦・横の光ファイバ列
- 横方向ファイバ＝光源
- 縦方向ファイバ＝受光素子
- 全ての交点に音圧センシング機構
- 音圧によって光結合強度を変調

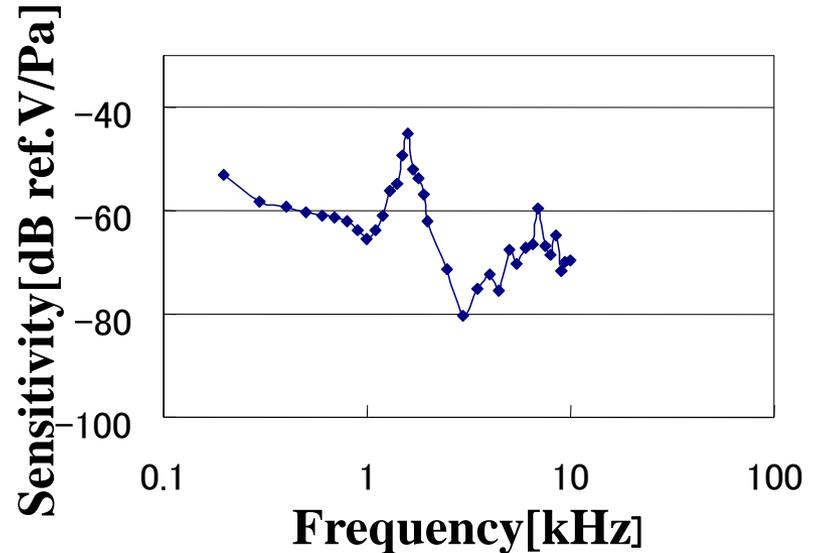
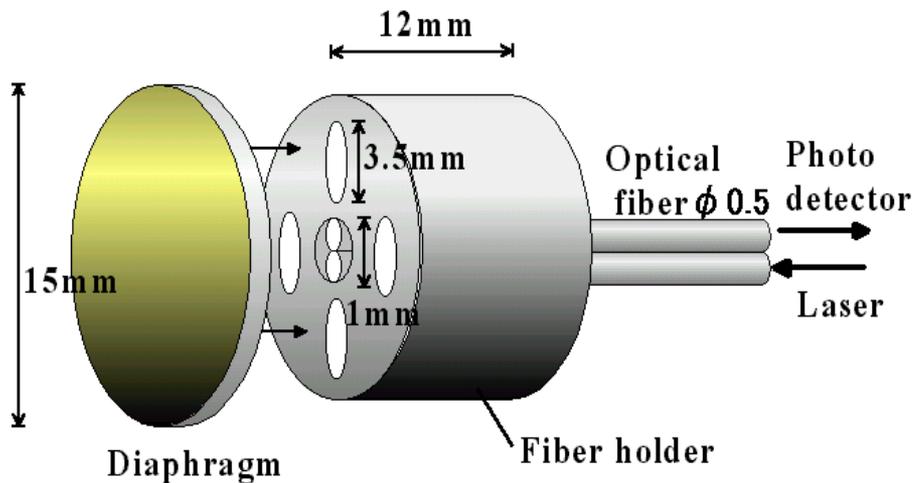


素子マイクロホンの構造と特性

To Light Source To Photo Detector

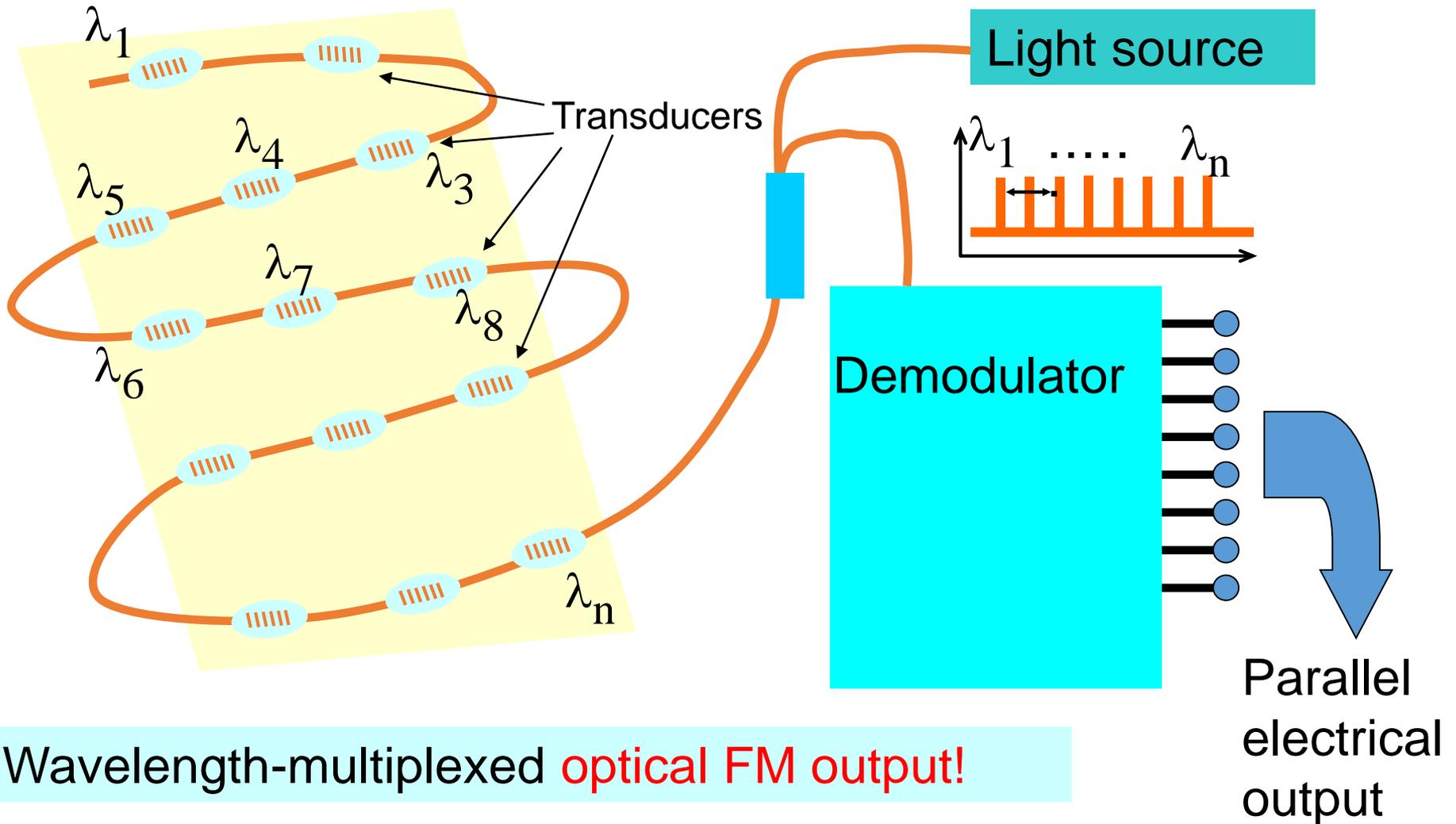


- 振動膜からの反射を利用
- 投光・受光2本の光ファイバ
- 振動による光強度変調



空中マイクロホンアレイ 例2

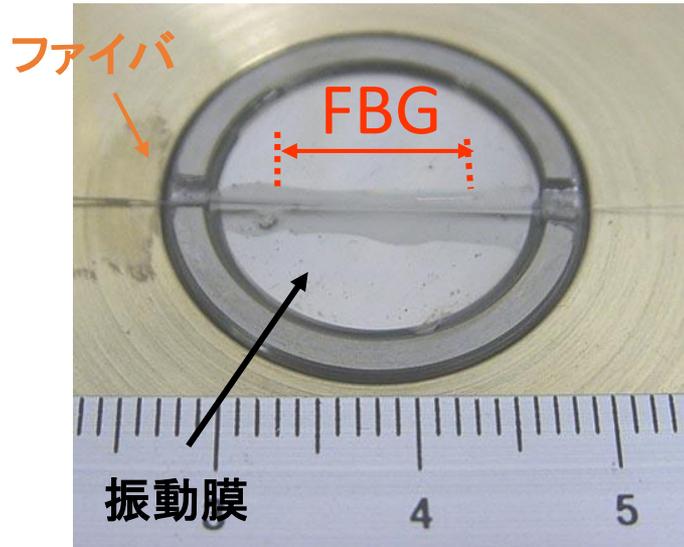
FBGマイクロホンアレイ



Wavelength-multiplexed **optical FM output!**

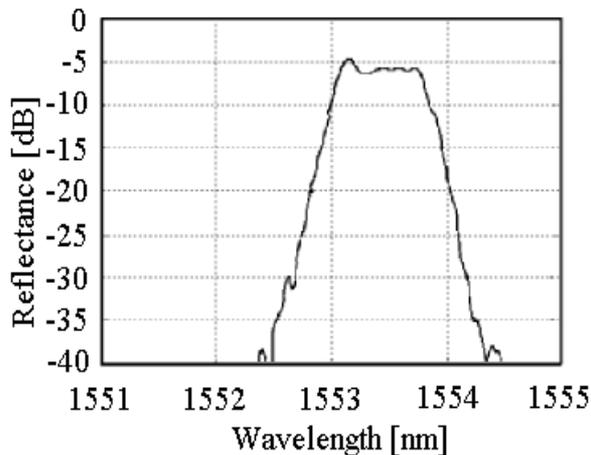
Parallel
electrical
output

FBGマイクロホンの構造と特性



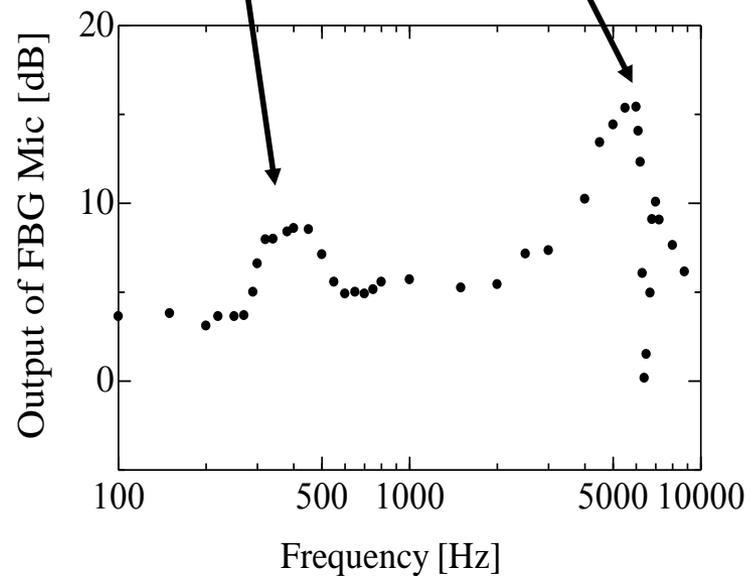
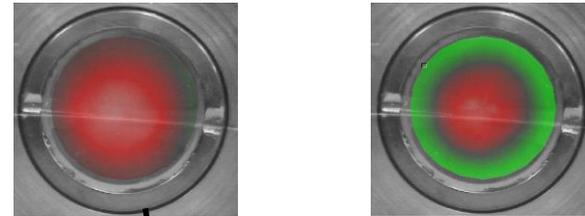
チタン $t = 5 \mu\text{m}$

FBG反射スペクトル

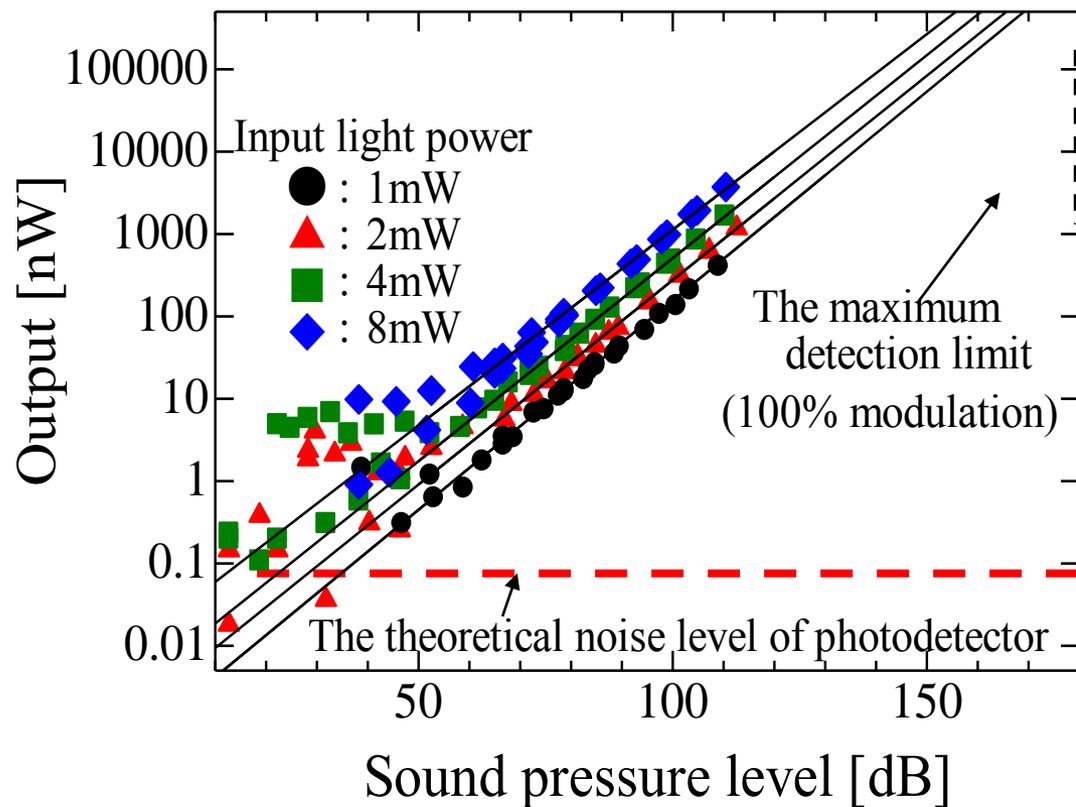


振動膜の振動により反射スペクトルも振動する

音圧 \rightarrow 光FM変調



感度の測定(ダイナミックレンジ)



Sensitivity per 1 Pa (SPL)



0.05 %

(Theoretical sensitivity **0.1 %**)

Minimum detectable SPL

=35dB (measured)

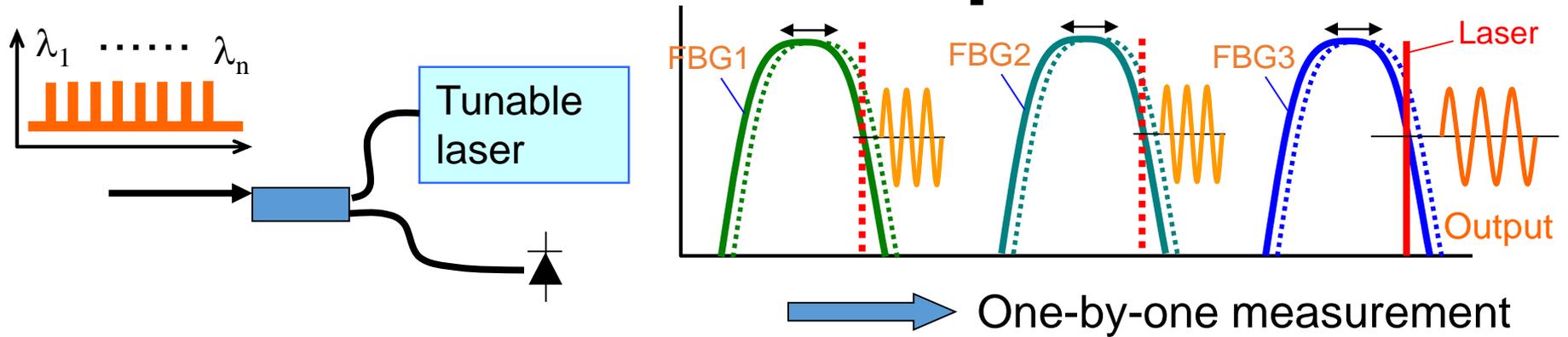
30dB (Photo detector
@ 1mW)

Maximum detectable SPL

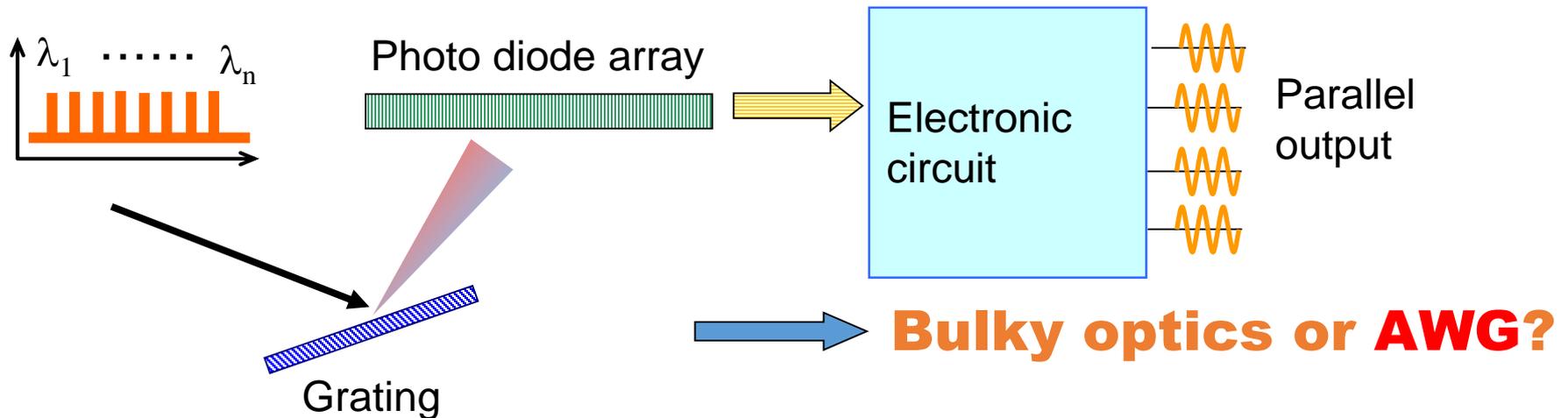
=160dB (Prediction)

信号検出の方式

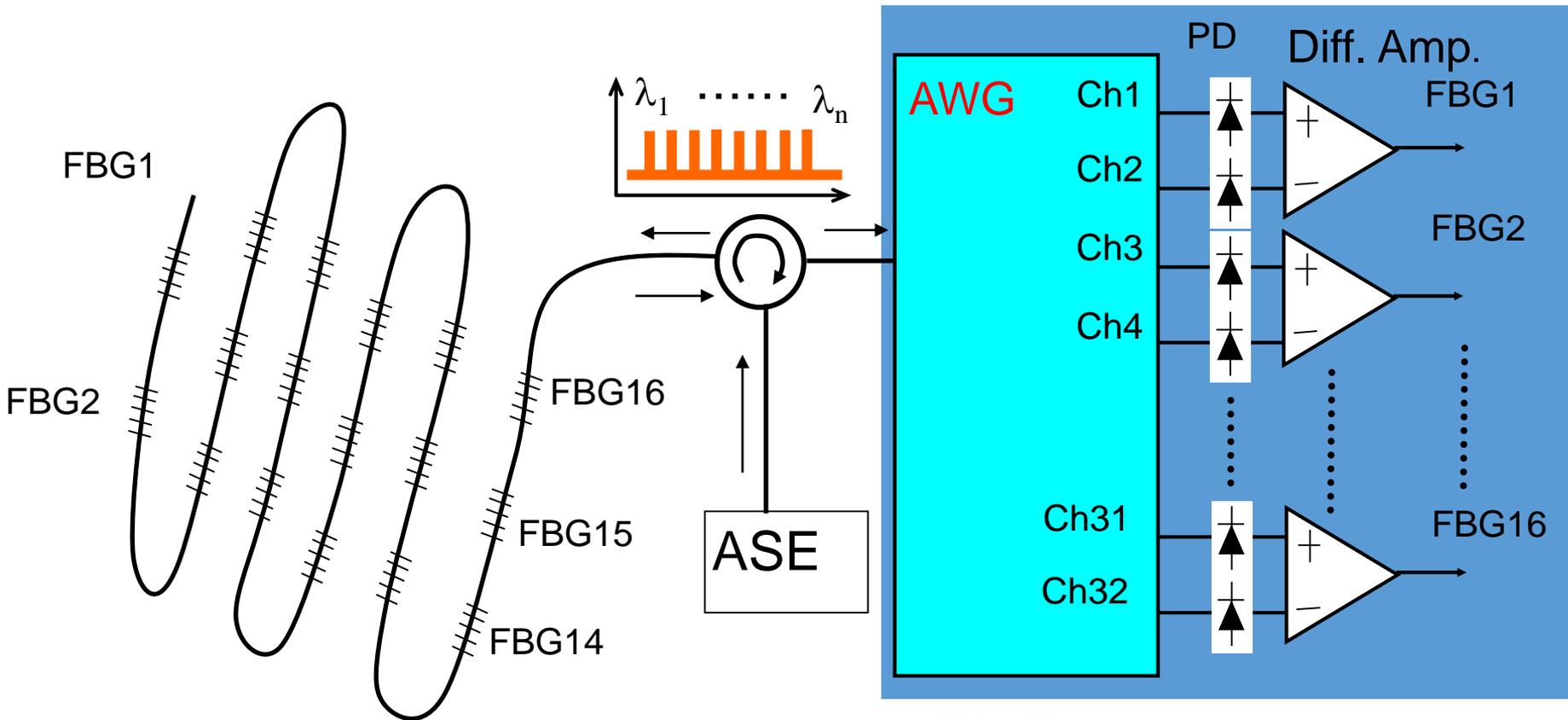
1. Tunable laser + FBG-slope



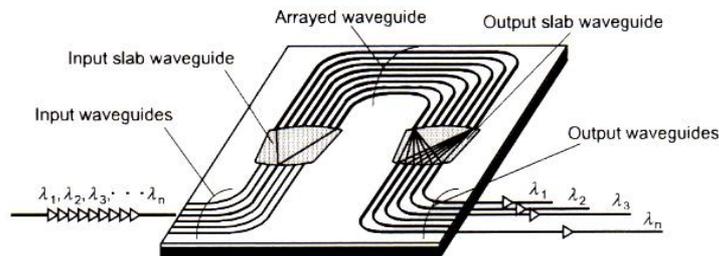
2. White light source + wavelength analyzer



AWGによる信号検出

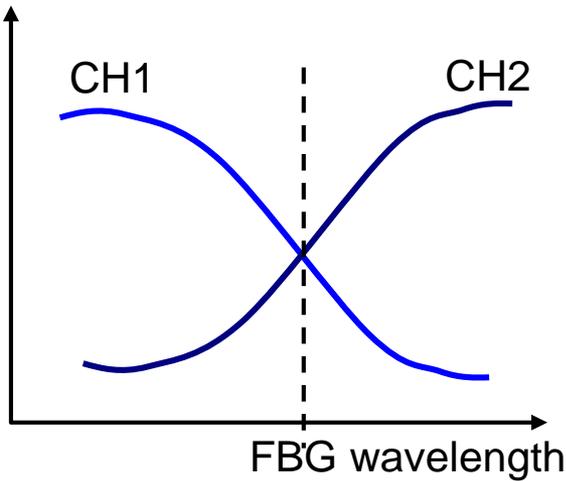


FBG mic. array

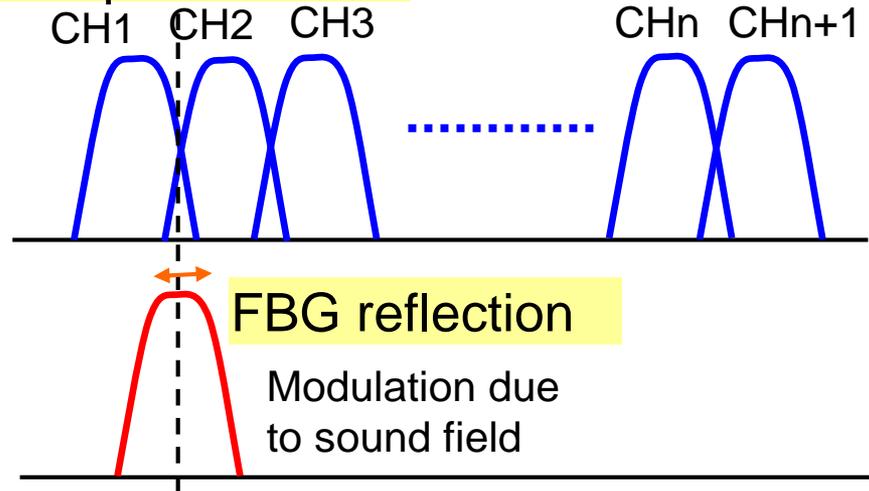


差動による信号検出

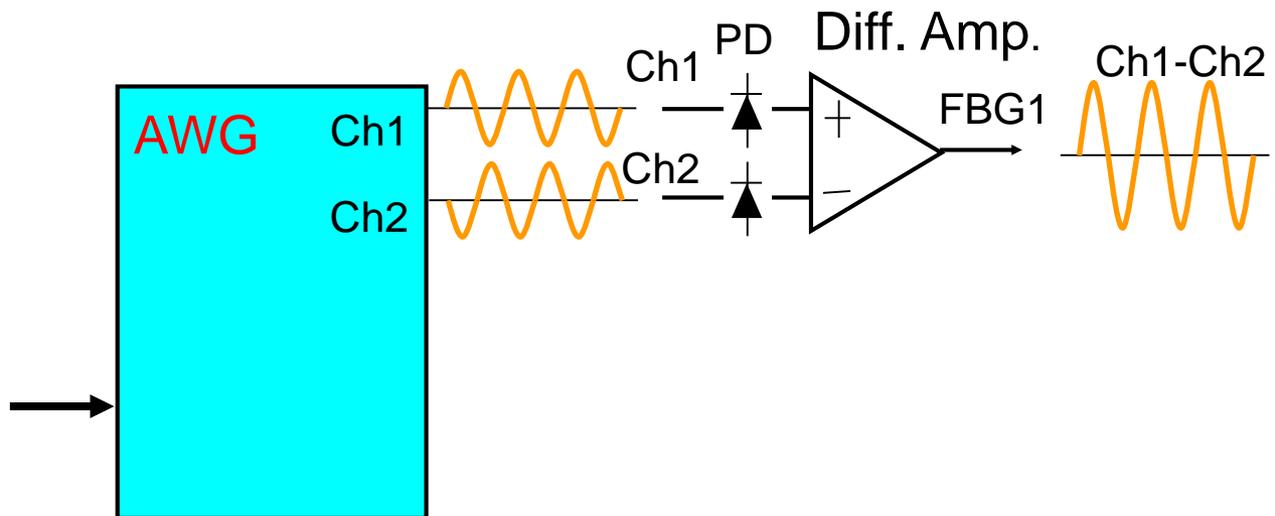
DC outputs



AWG pass bands



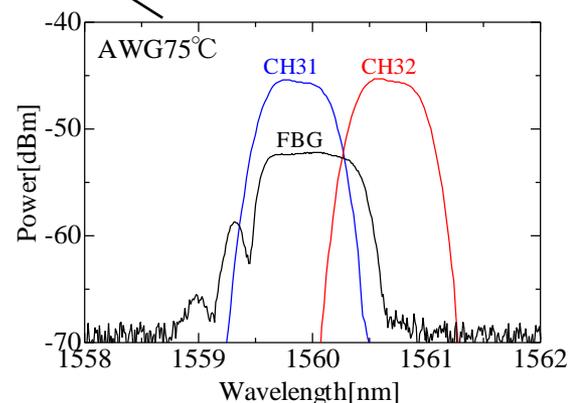
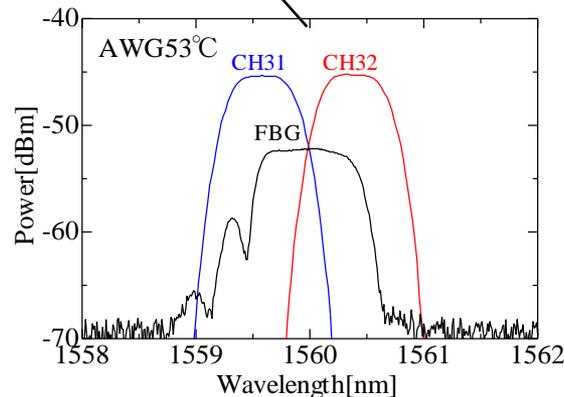
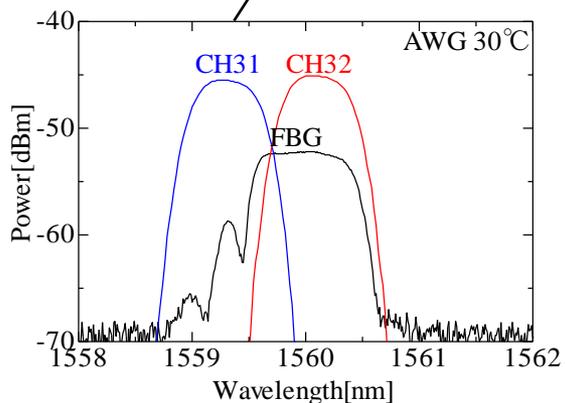
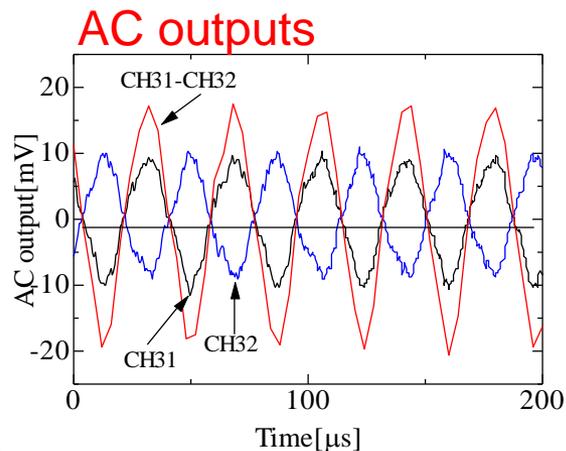
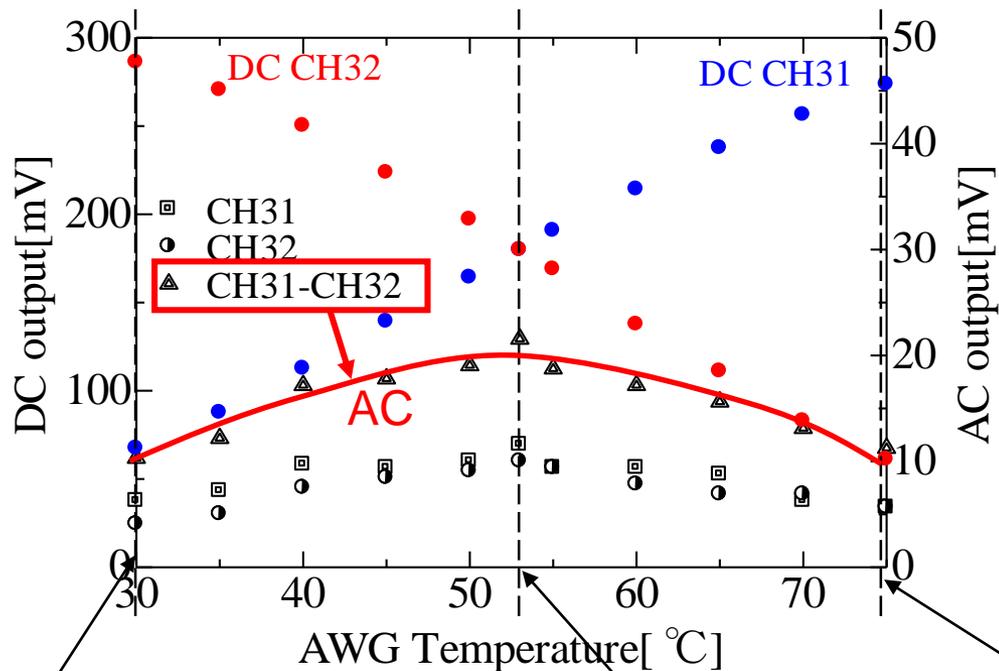
Temperature-controlled for wavelength tuning



動作点の検討

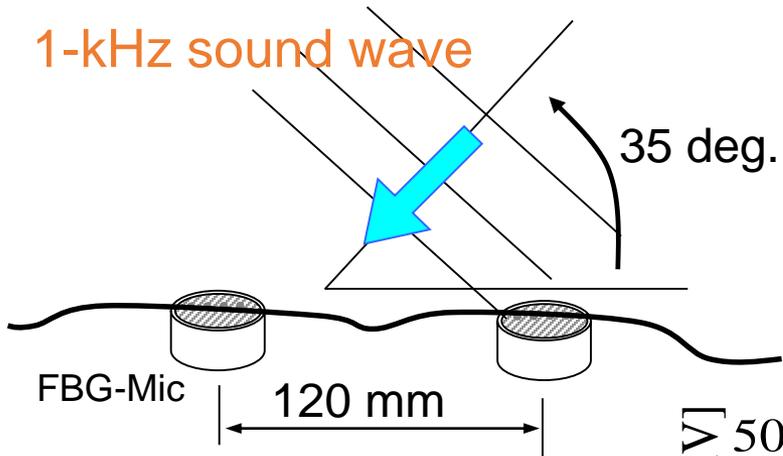
AWG wavelength was changed by the temperature control of the substrate.

DC and AC outputs at CH31 and CH32 were measured.



動作例 (1/2)

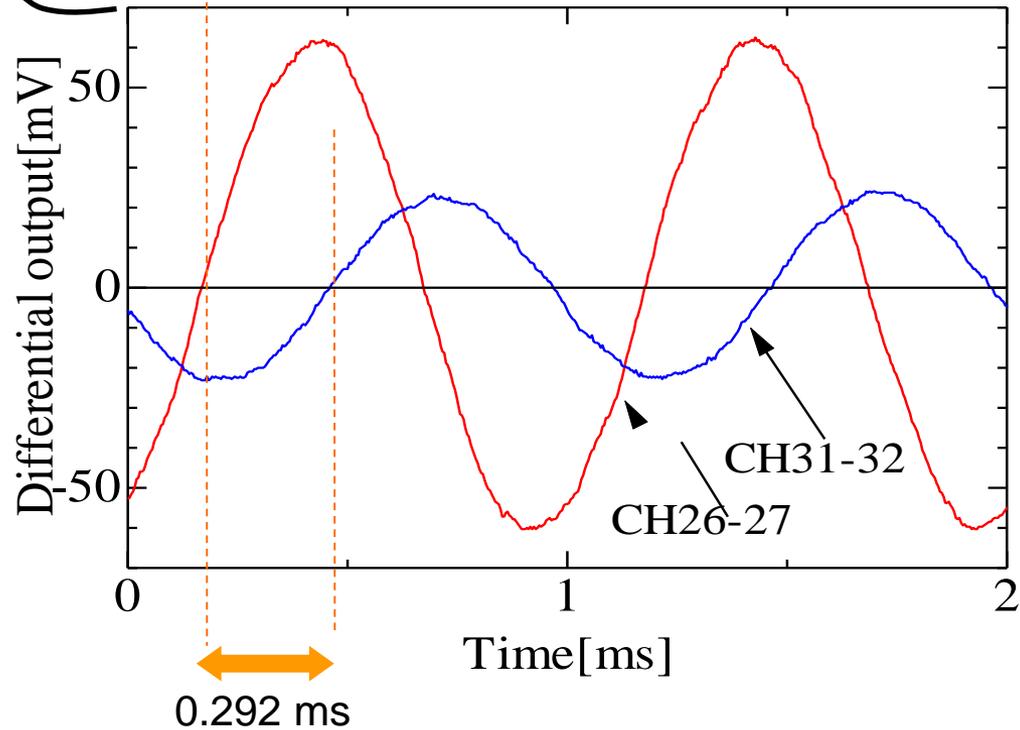
1-kHz sound wave



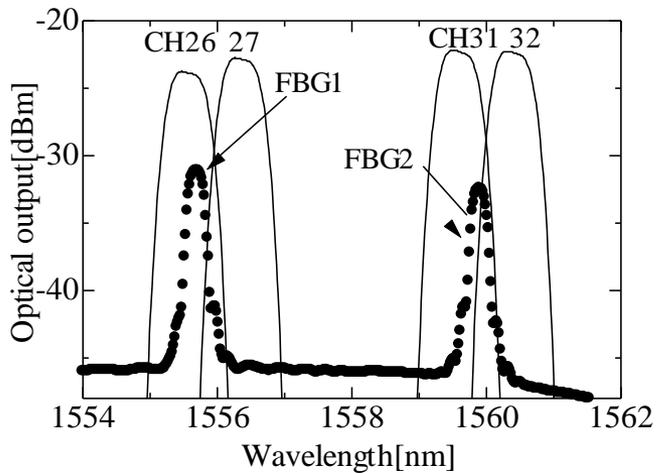
Time delay should be

$$\frac{120 \cos 35^\circ}{340} = 0.289 \text{ ms}$$

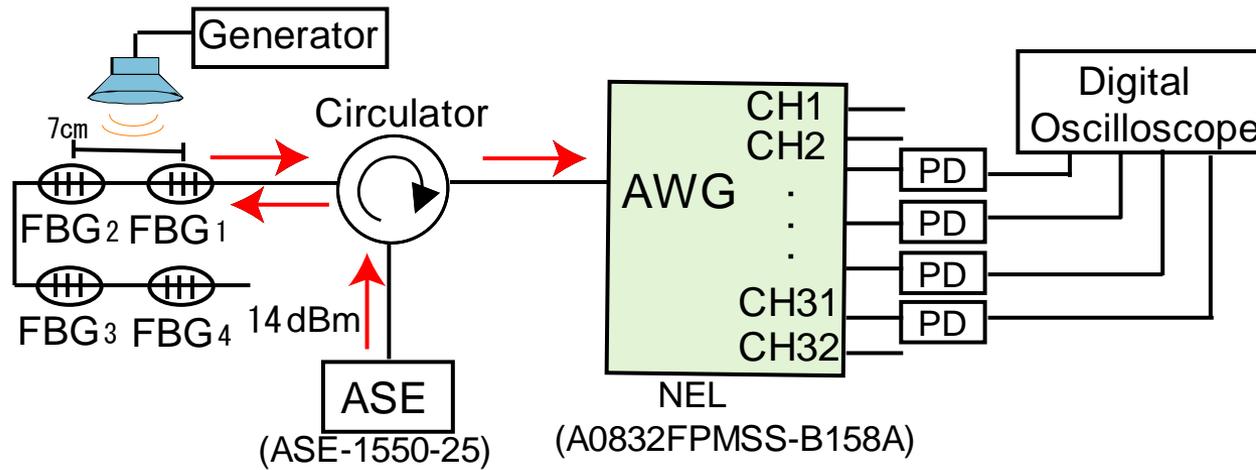
Waveforms at differential outputs



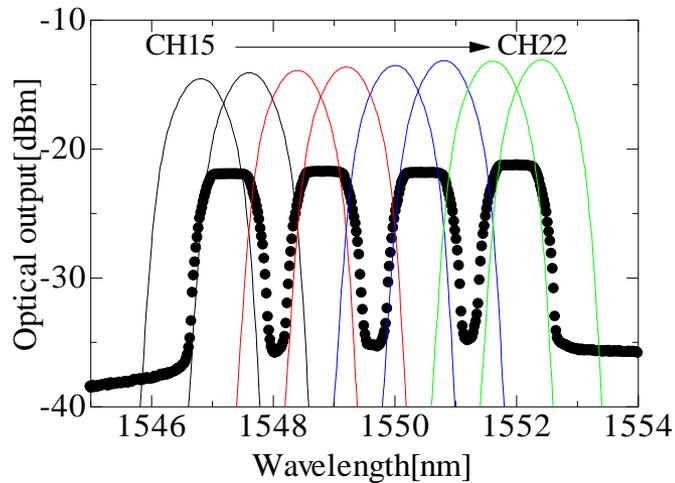
Operation point



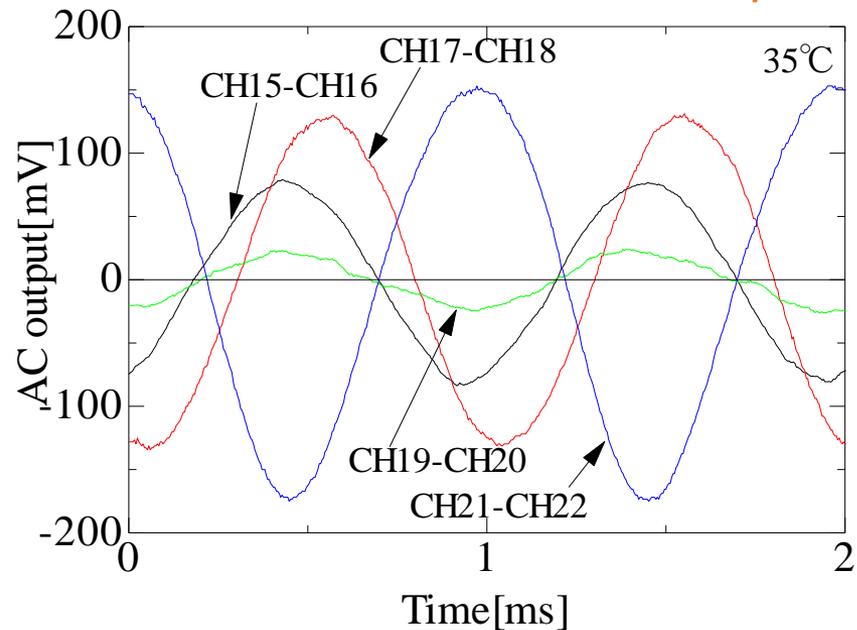
動作例 (2/2)



Operation point



Differential outputs



超音波音場測定ニーズと課題

水中MHz音場

工業： 精密洗浄・・・メガソニック 洗浄効果・洗浄むら

医用： HIFU治療 集束超音波による癌治療（前立腺等）
新規診断装置（光超音波）

バイオ： 遺伝子導入等

空中強力超音波（20 – 100 kHz）

超音波浮揚、その他

課題： 細かい音圧プローブが必要

音圧の絶対値を知りたい・高音圧・線形性

水中MHz超音波機器の開発

工業 従来の超音波洗浄器・・・38 kHz, 100 kHzなど
半導体、LCDガラス等の精密洗浄・・・1 MHz
1 MHzの超音波の水中での波長1.5 mm
大型洗浄槽、キャビテーションコントロール

HIFU治療（集束高強度超音波による癌治療）

前立腺がん、その他
専用超音波トランスデューサの開発

高周波超音波による骨折治療器

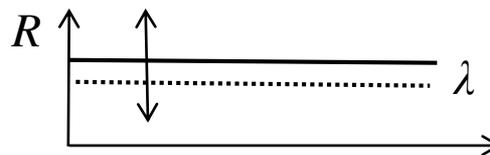
新規超音波診断（エラストグラフィ等）での高強度
超音波の利用拡大・・・さまざまな機器検証

ニードル型光ファイバハイドロホン

光ファイバ先端に微小な音圧感度構造 → 微小な音圧プローブ



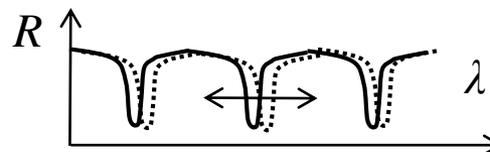
端面反射型



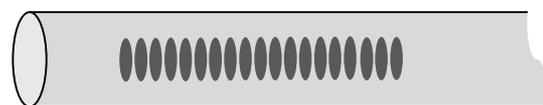
光強度変化



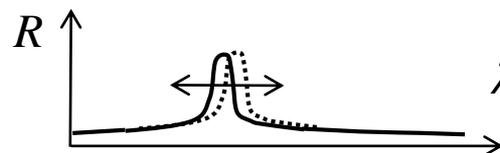
FP型



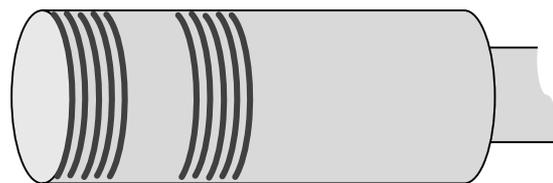
光波長変化



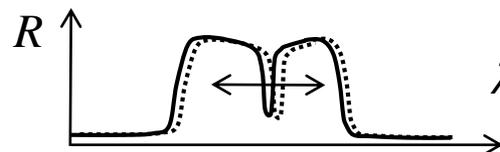
FBG型



光波長変化



DBR-FP型



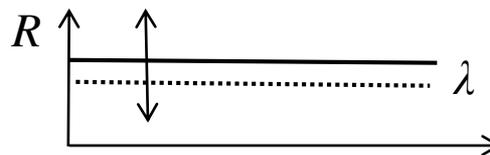
光波長変化

MHz超音波検出用、そこそこの感度、堅牢、方式によってはアレイ化

1. 端面反射型

光ファイバを切断しただけ。

外径125 μm
コア径10 μm

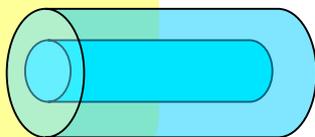


光強度変化

光ファイバ端部での光の反射係数 $R = \left(\frac{n_f - n_a}{n_f + n_a} \right)^2 = 0.0036$

水 $n_a = 1.33$

$n_f = 1.5$



$$\frac{R' - R}{R} \approx \frac{2\Delta n}{n_f - n_a} = 1.8 \times 10^{-9} p$$

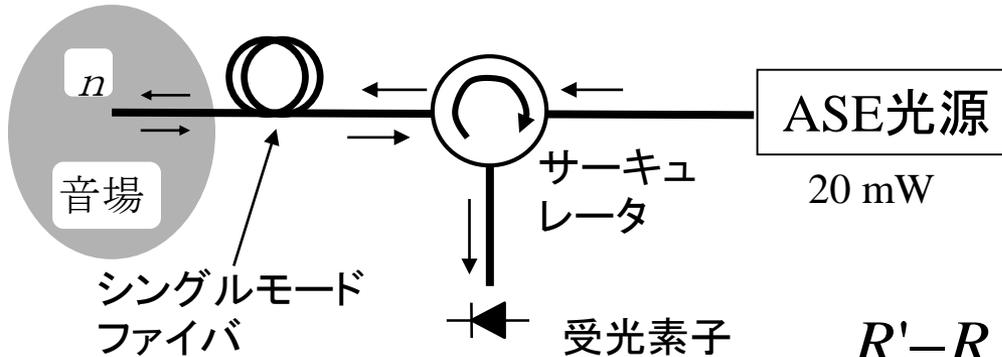
音圧 p による屈折率変化
(Eykmann)

$$\Delta n = \frac{(n_0 - 1)(n_0^2 + 1.4n_0 + 0.4)}{(n_0^2 + 0.8n_0 + 1)\rho c^2} p = 1.54 \times 10^{-10} p$$

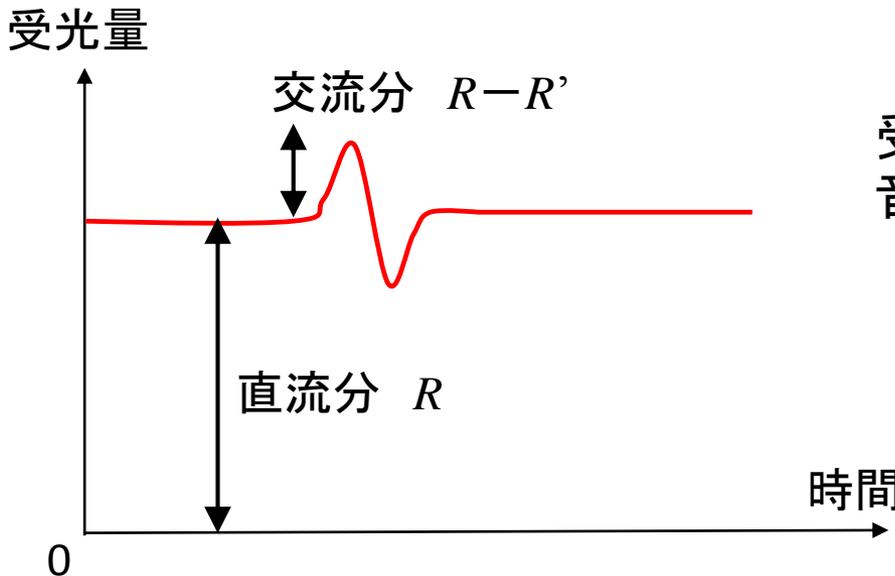
Eisenmengerが水中Shock wave
の測定に利用

J. Stardenraus and W. Eisenmenger,
Ultrasonics, Vol.31, No.4, pp.267-273, 1993.

1. 端面反射型(実際の構成例)



$$\frac{R'-R}{R} \approx \frac{2\Delta n}{n_f - n_a} = 1.8 \times 10^{-9} p$$



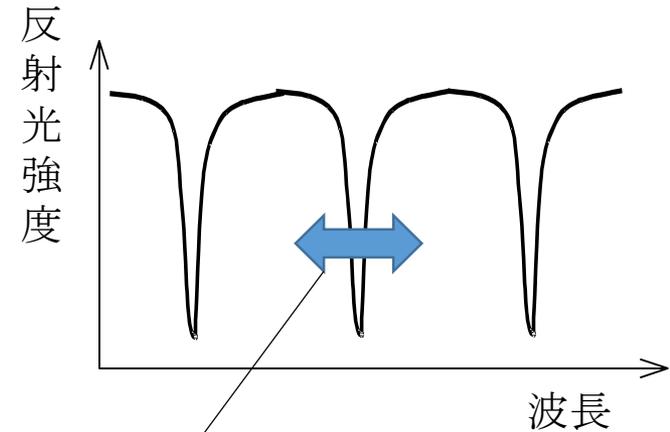
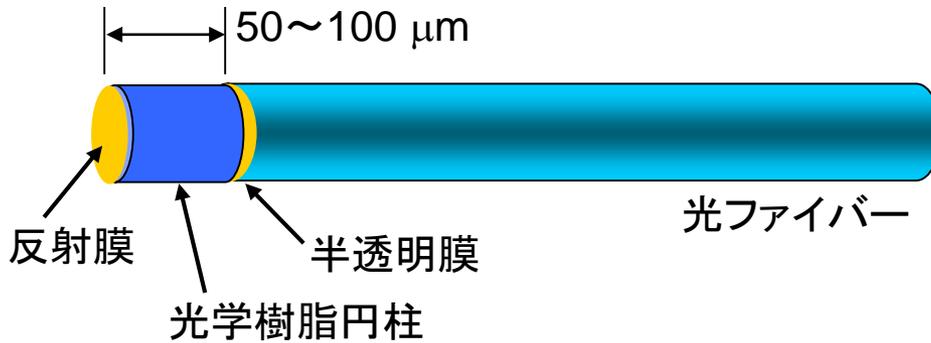
受光量の直流分と交流分の比から
音圧の絶対値を推定可能

→原理的には**校正不要**

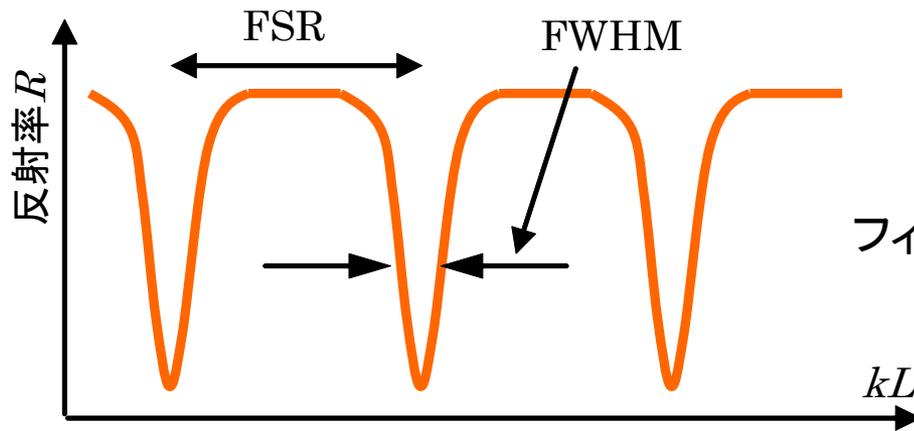
- 低感度
- 泡が先端に付くと測定不可

2. FP(Fabry-Perot)型

光ファイバ先端に微小なFP共振器



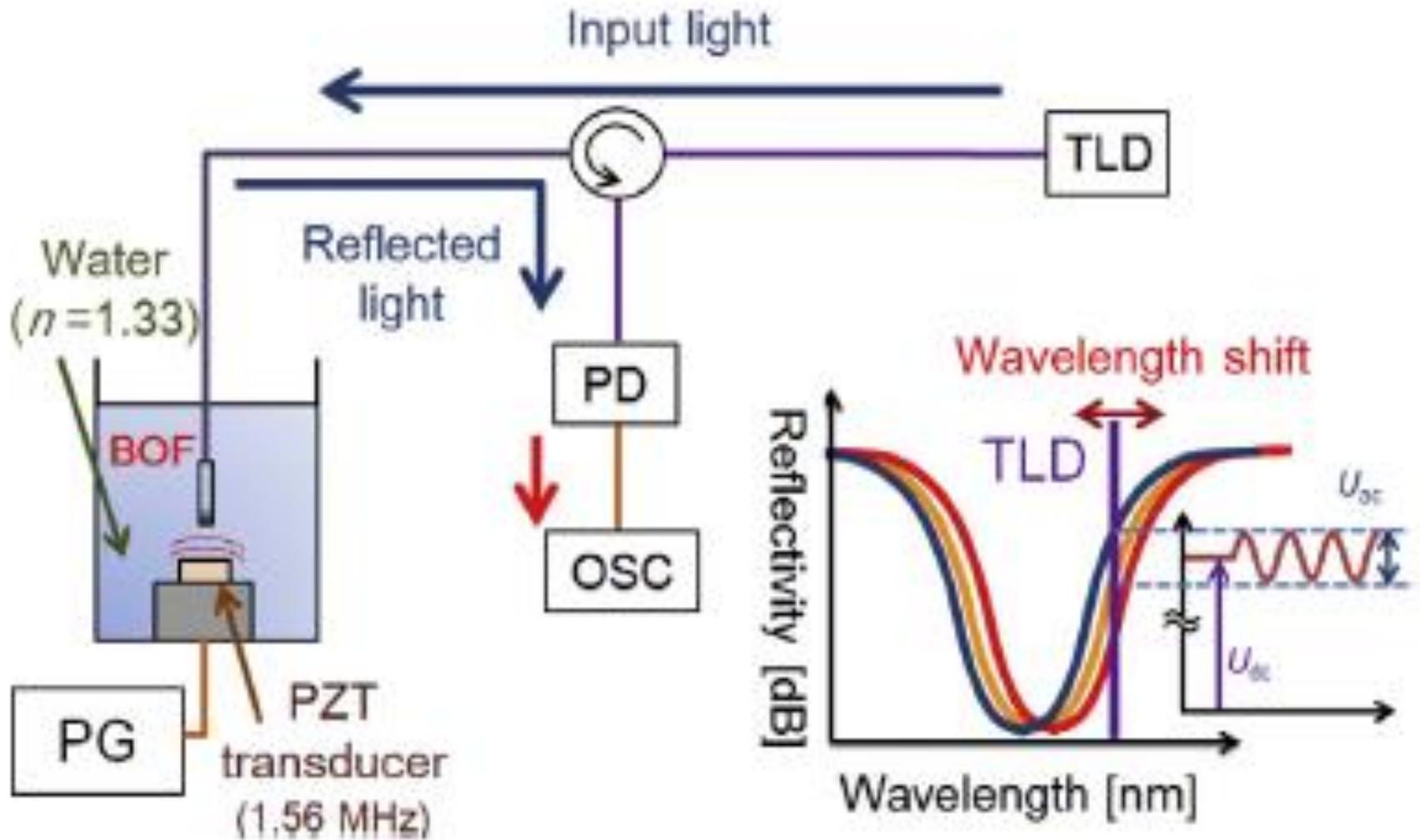
音圧による光共振波長変調



$$\text{フィネス } F = \frac{FSR}{FWHM} \approx \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

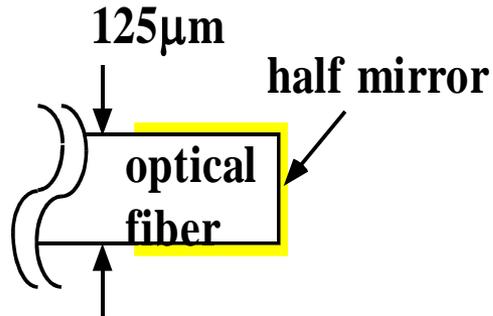
反射膜の反射係数で感度設計

信号復調方法の一例

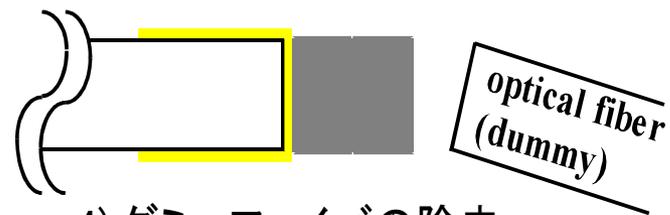


動作点を動的に追跡する手法が実際は必要

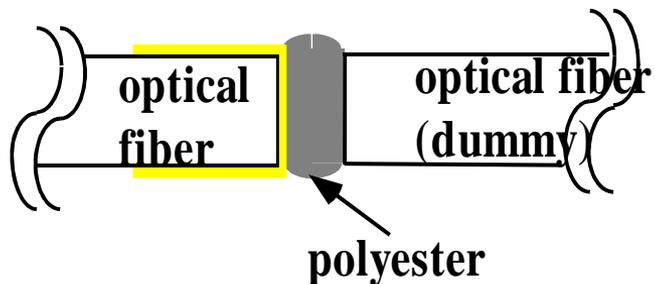
製作方法



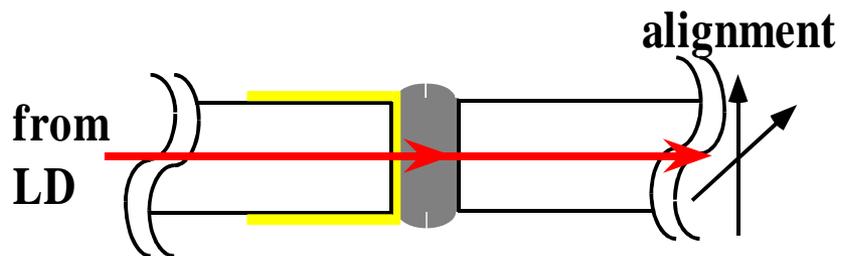
1) 金ハーフミラーの蒸着



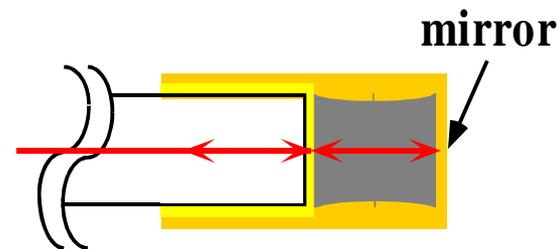
4) ダミーファイバの除去



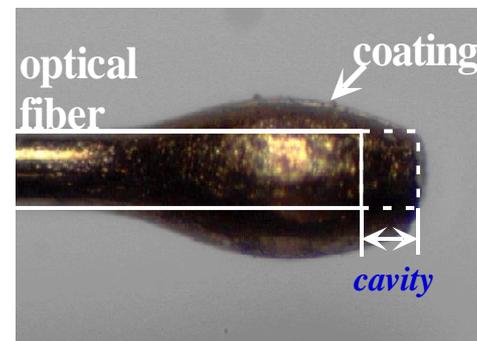
2) ダミーファイバを対向設置し、間に高分子を注入



3) ファイバにレーザを通して中心軸の調整



5) 金ミラーの蒸着



ファブリ・ペロー型光ファイバ音場プローブ

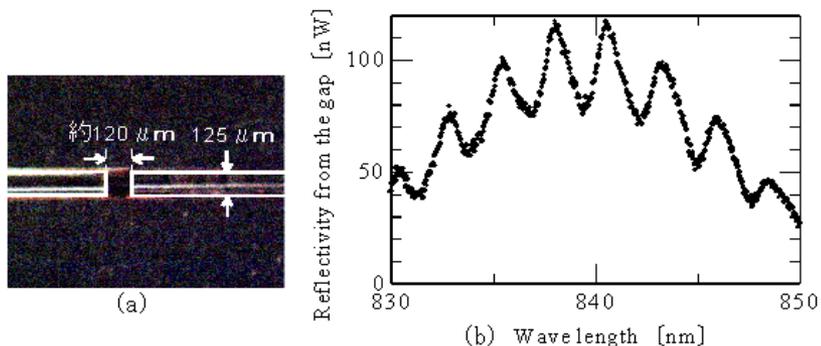
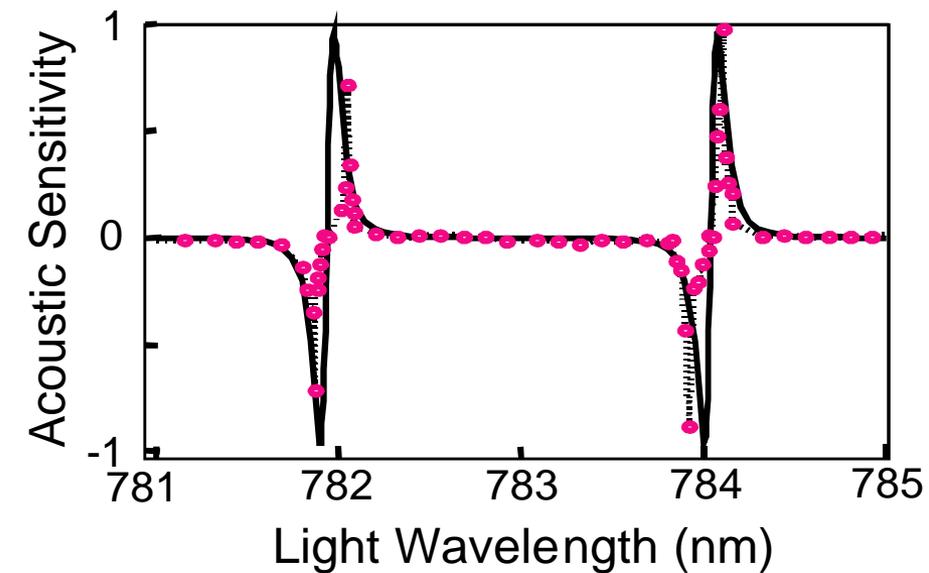
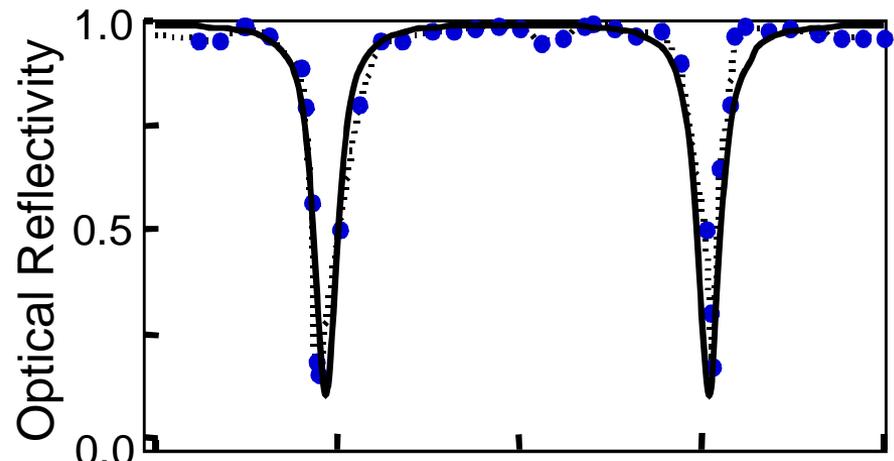
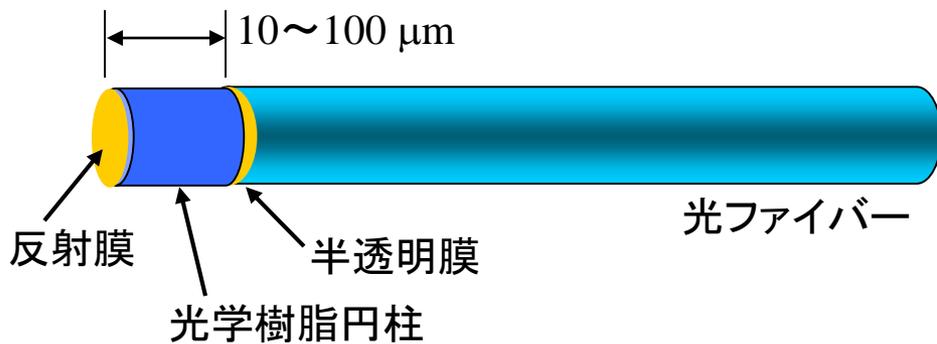


Fig.4.2.2 空気層間隔：約120 μm (a)顕微鏡写真 (b) 干渉の様子

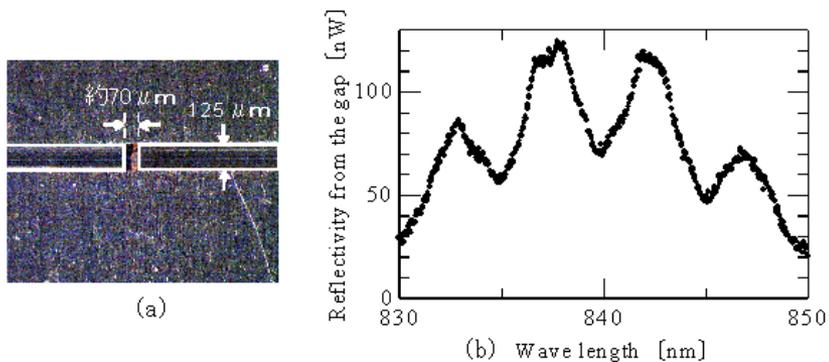
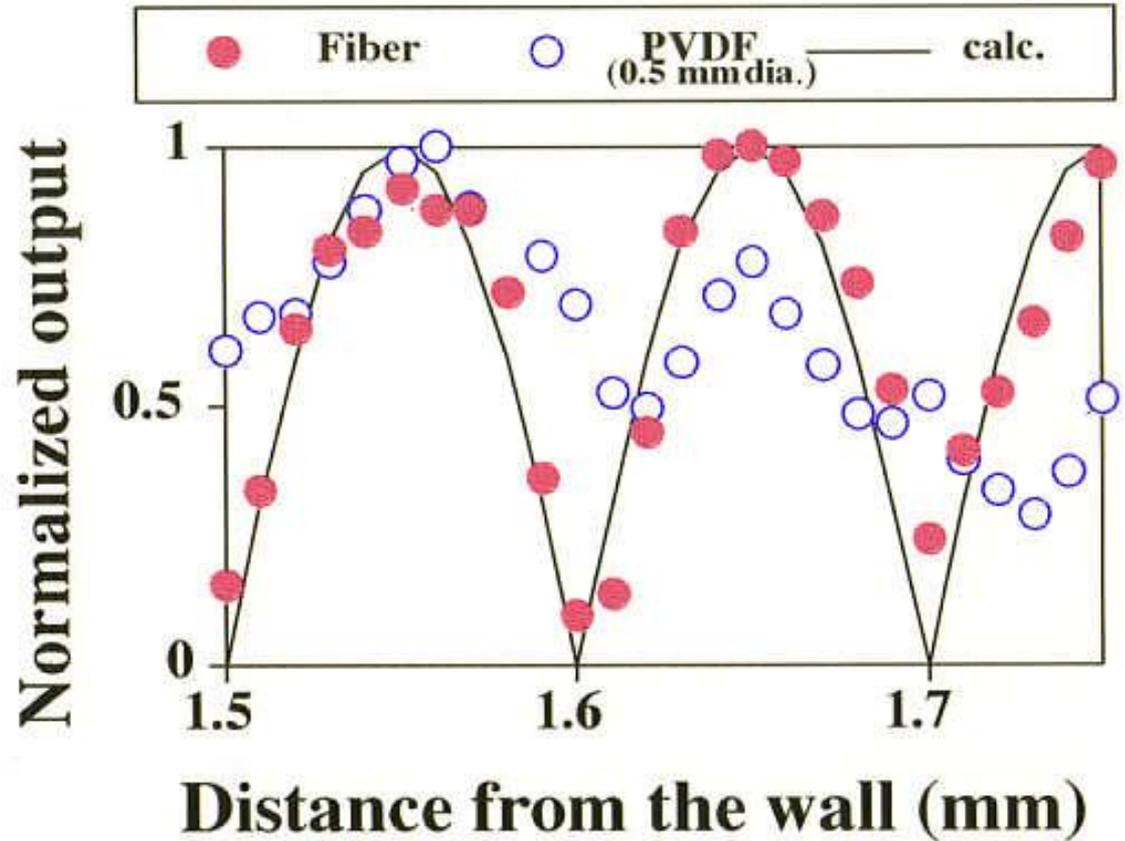
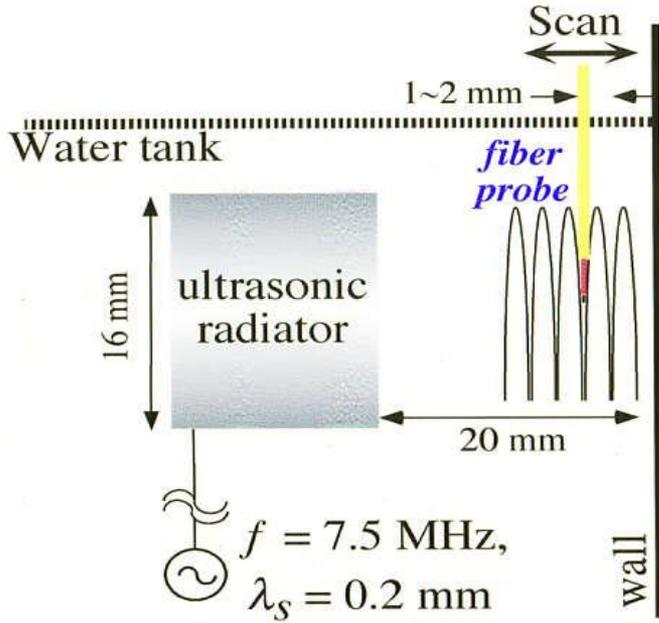


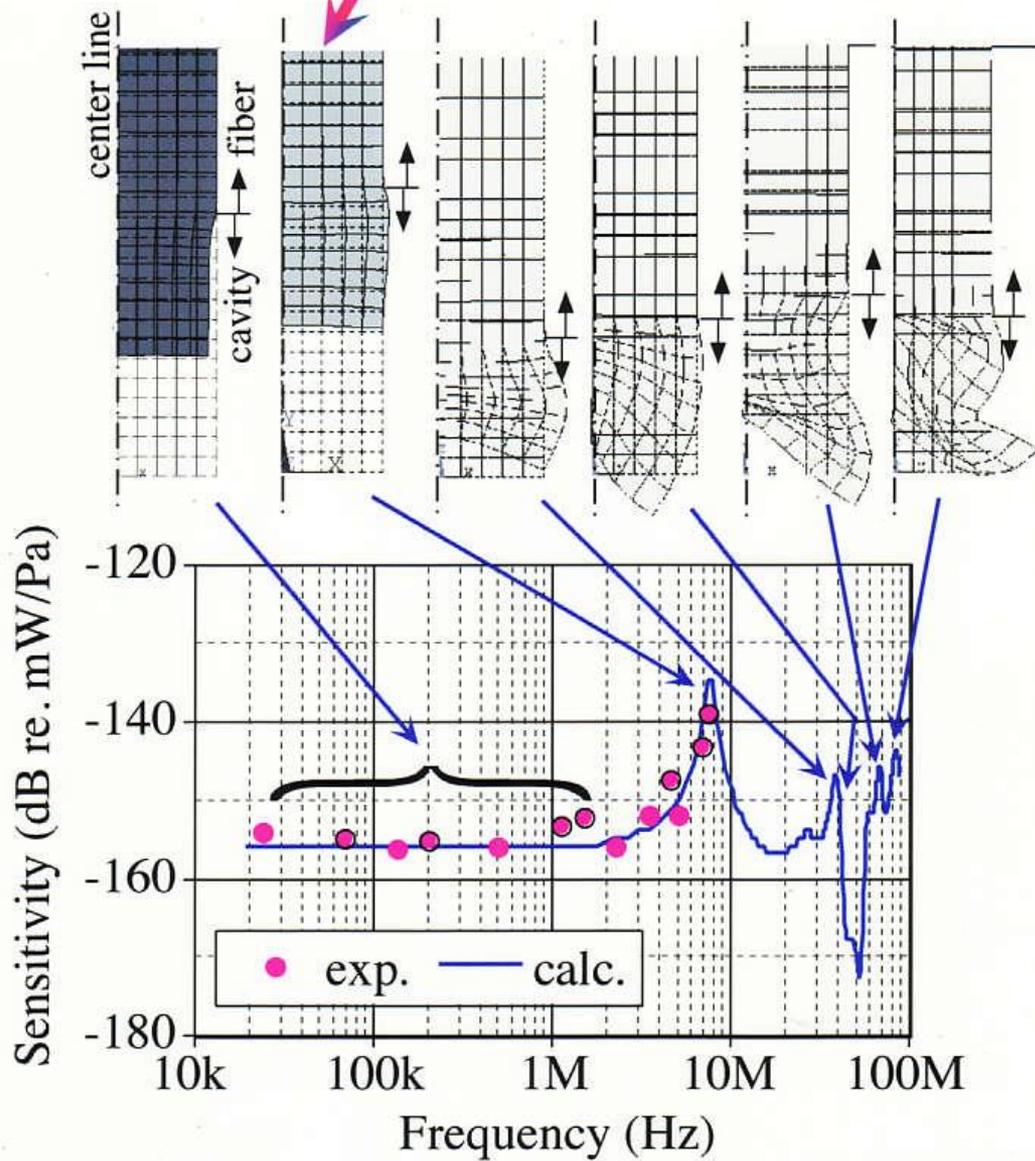
Fig.4.2.3 空気層間隔：約70 μm (a)顕微鏡写真 (b) 干渉の様子

7.5 MHz定在波音場の計測

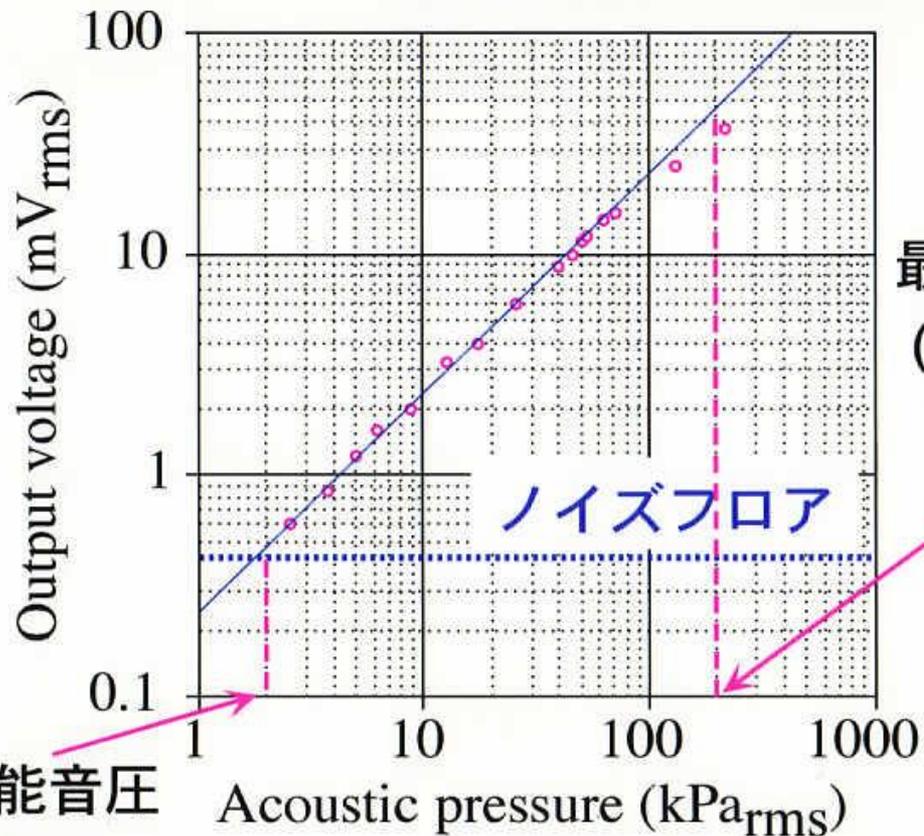


周波数特性

この振動モードの
共振周波数が上限



ダイナミックレンジ

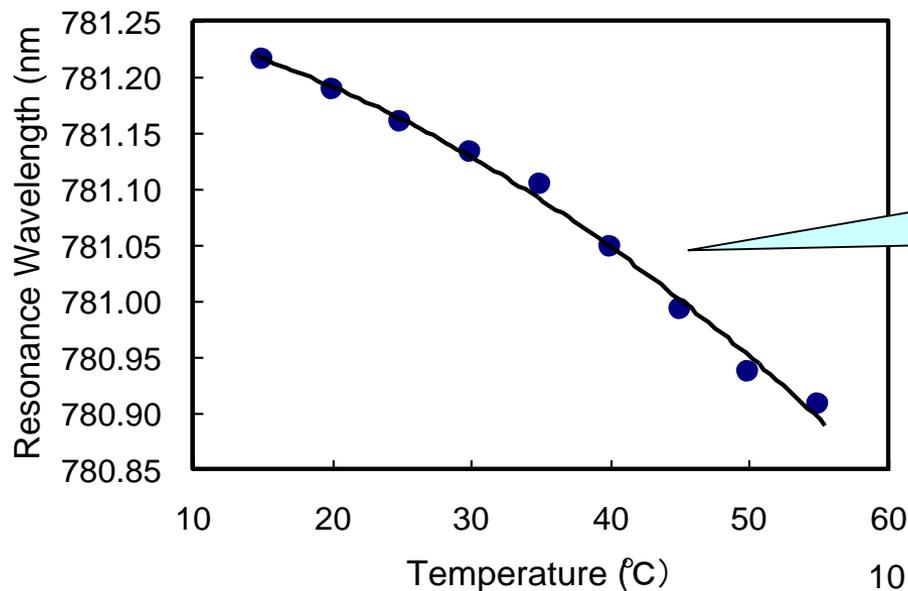


最大測定可能音圧
(実測 : 200 kPa_{rms}
理論 : 600 kPa_{rms})

最小測定可能音圧
(実測 : 2 kPa_{rms}
理論 : 0.4 kPa_{rms})

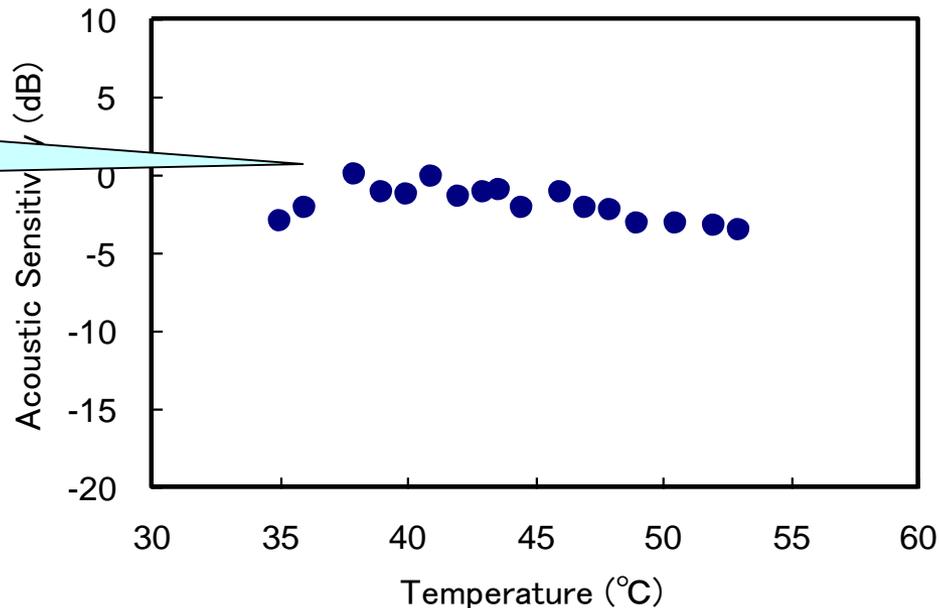
ダイナミックレンジ
→40 dB (実測) 、 63 dB (解析)

音圧と温度の同時計測

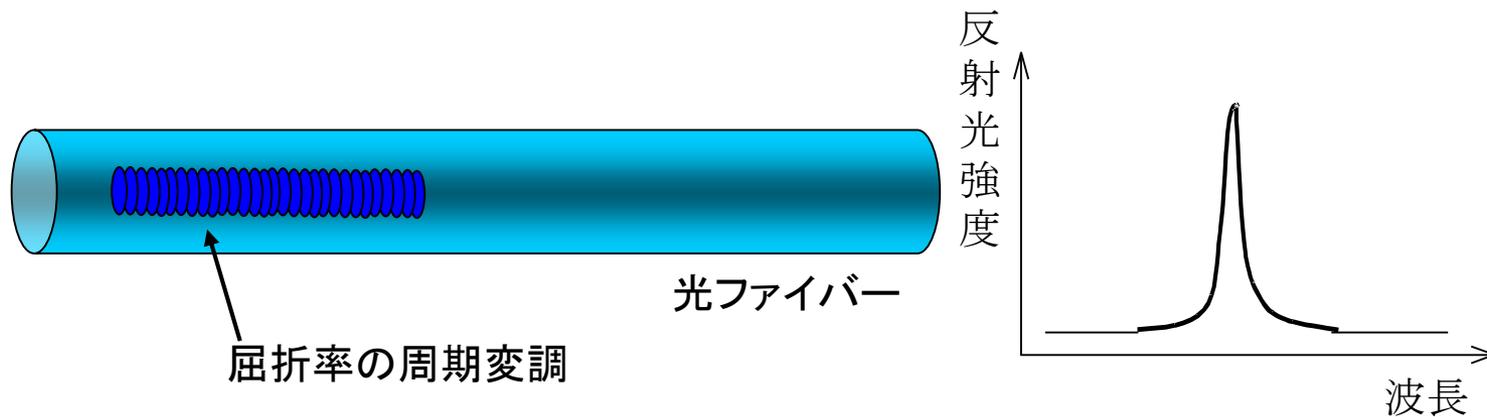


FPピークの温度特性
-11 pm/°C

超音波による光強度変調出力
ほぼ一定



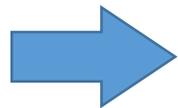
3. FBG(Fiber Bragg grating)型



光ファイバのコアに屈折率の周期変調(100~数1000ペア)
Bragg条件に合った周期(FBG) cf. 長周期(LPFG)
紫外線による書き込み

反射波長の圧力感度 $= -6 \text{ pm/MPa}$

反射波長の伸びひずみ感度 $= 1 \text{ pm}/\mu\epsilon$

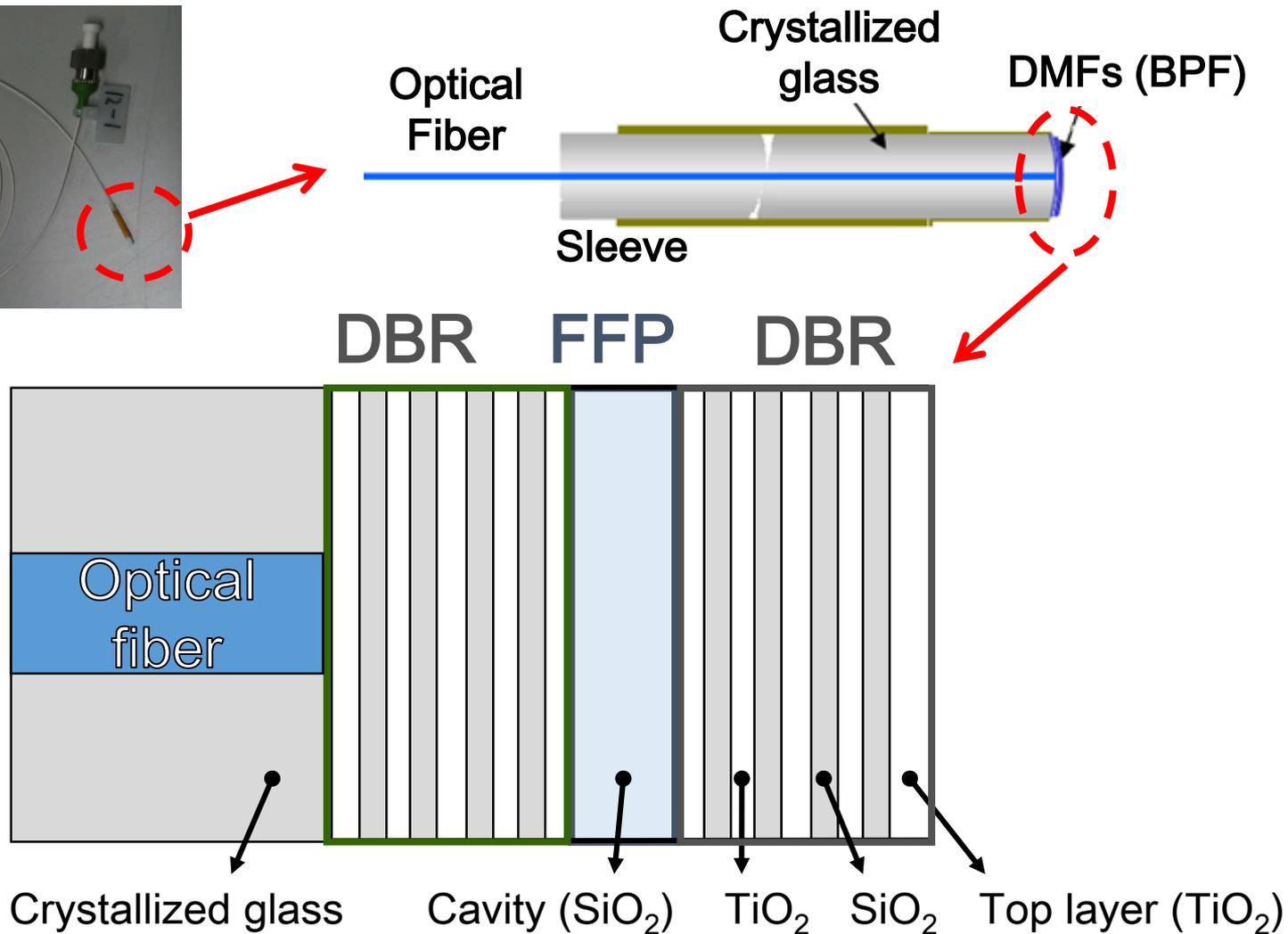
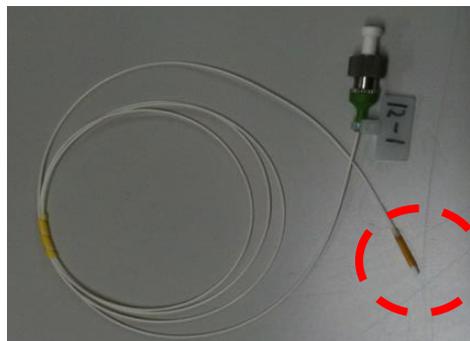


波長多重によるアレイ化が容易

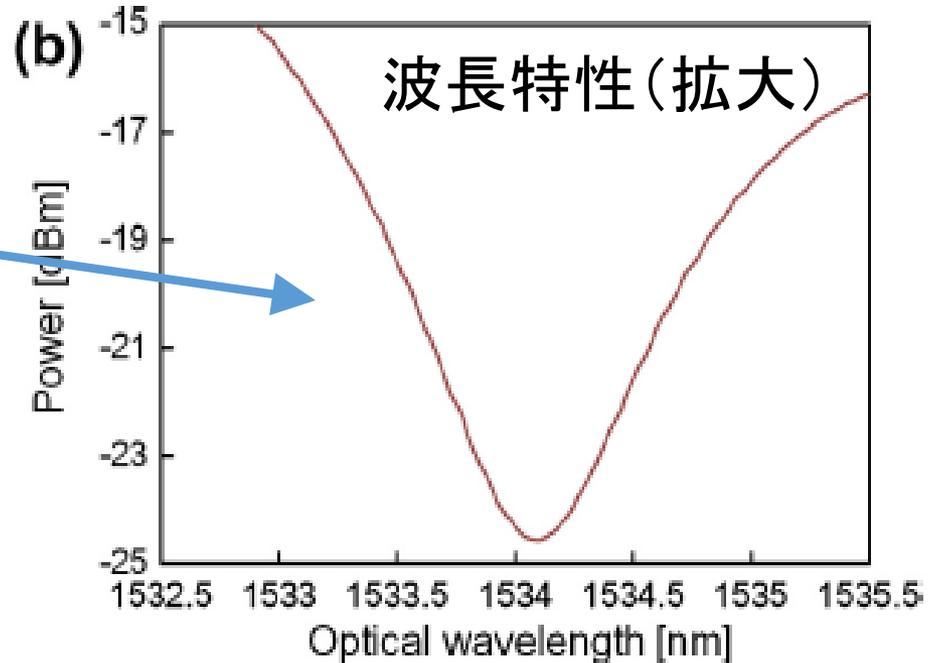
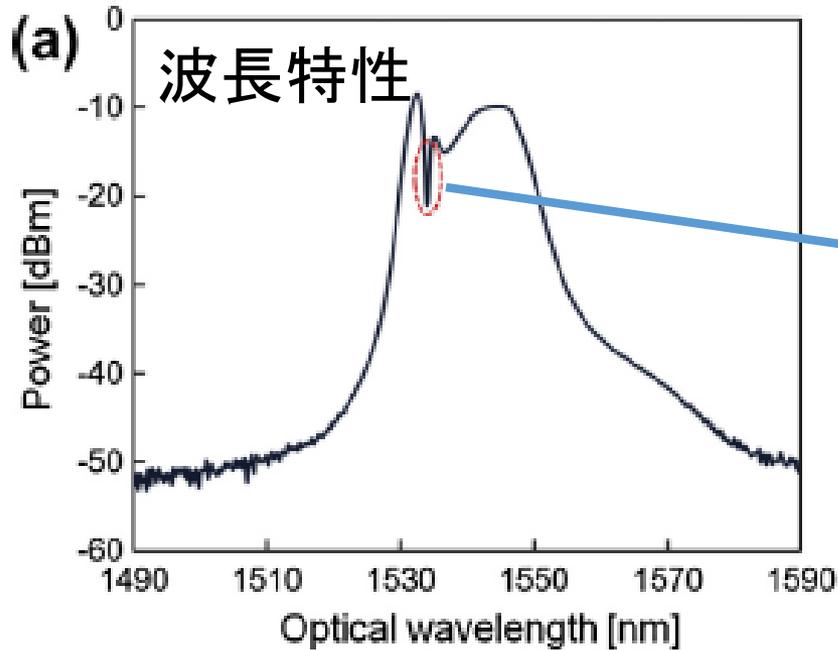
4. DBR-FP型

FP型の反射膜を分布型ミラーに変更
光学薄膜技術により、製作が容易

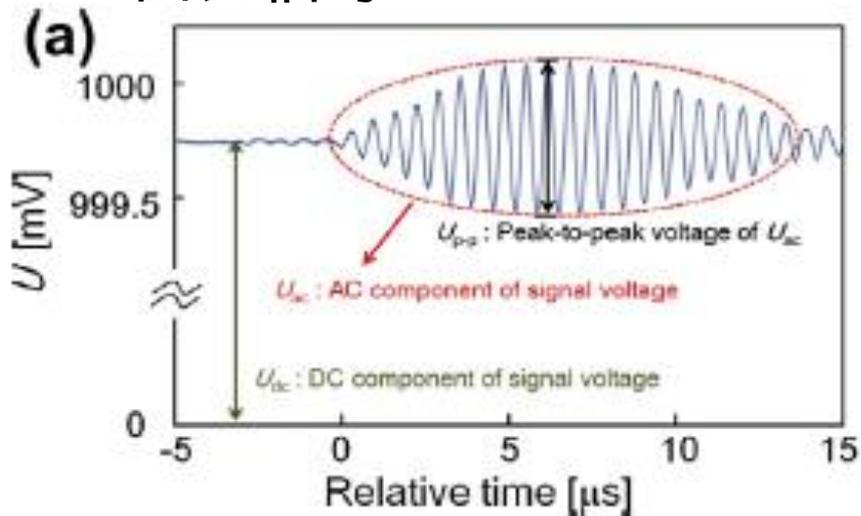
渡辺製作所様ご提供



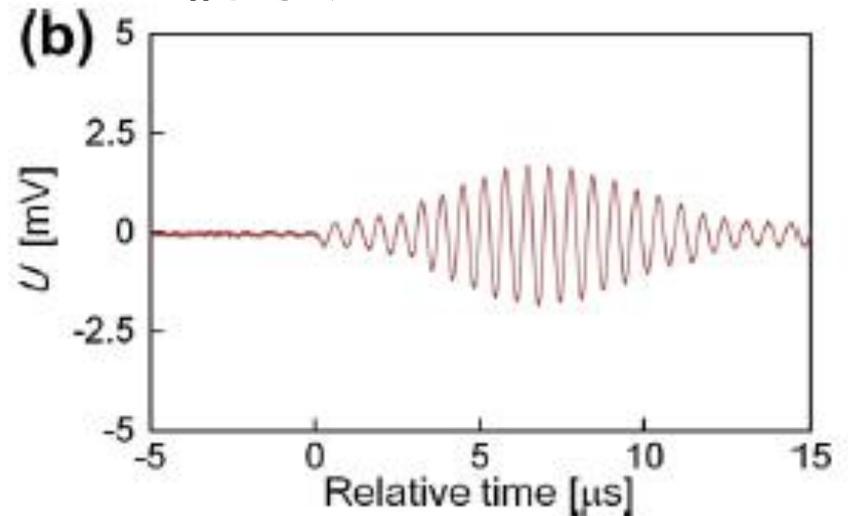
DBR-FP型の特性例



出力信号



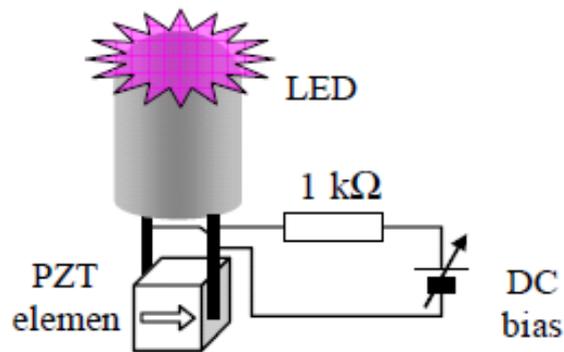
出力信号(PVDF hidroホン)



追加:肉眼で超音波を「見る」マイクロホン

従来 → ルミノール法

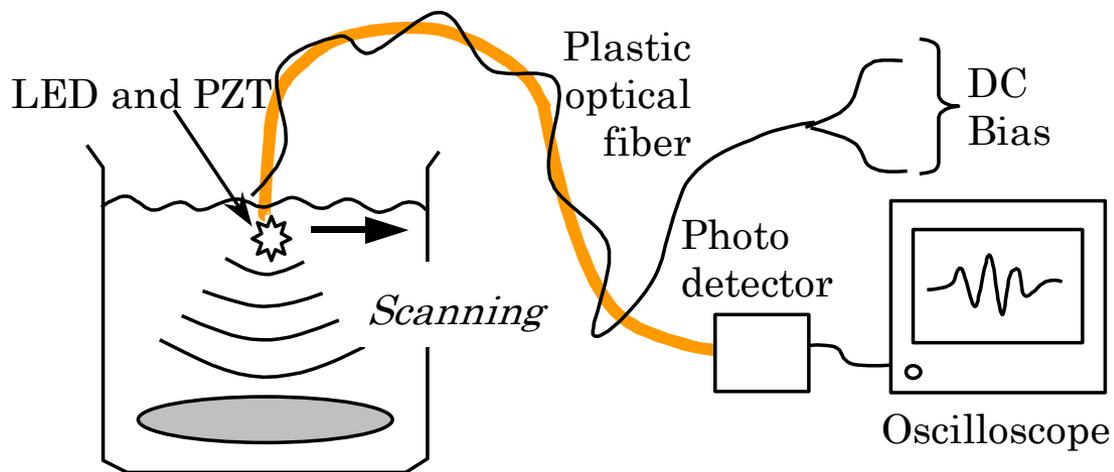
提案 → 圧電素子とLEDによるセンサ素子



音圧 → PZTで電圧発生 → LED点灯

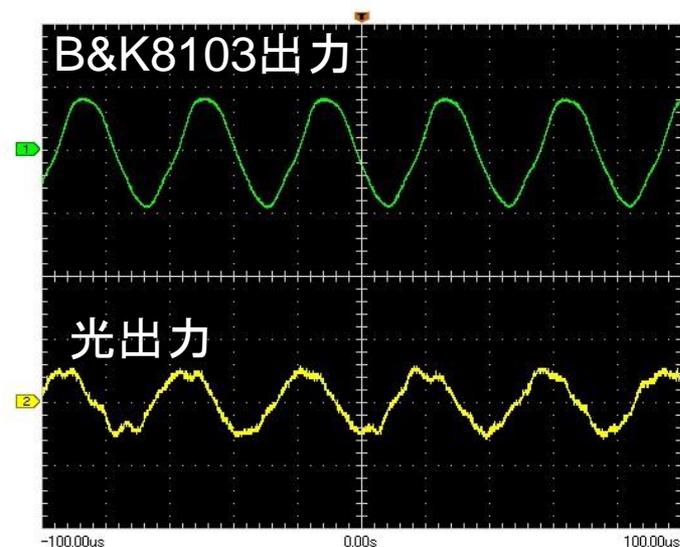
低音圧の対象は直流バイアス印加

マイクロホンとしての構成



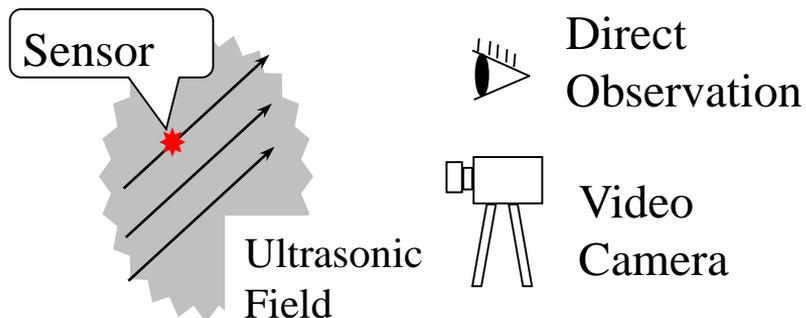
- センサ部 = PZT素子 + LED
- ケーブル = プラスチック光ファイバ
- DCバイアス

長距離ケーブル引き回し可能

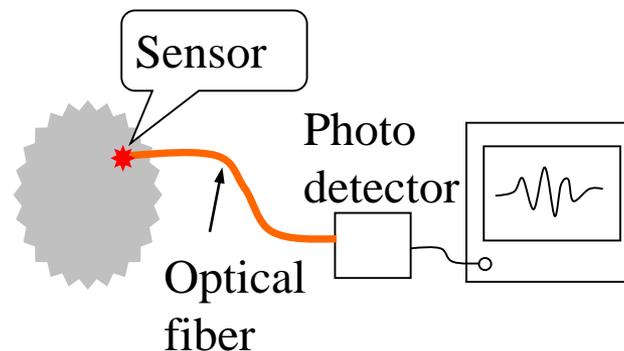


さらに発展した使い方

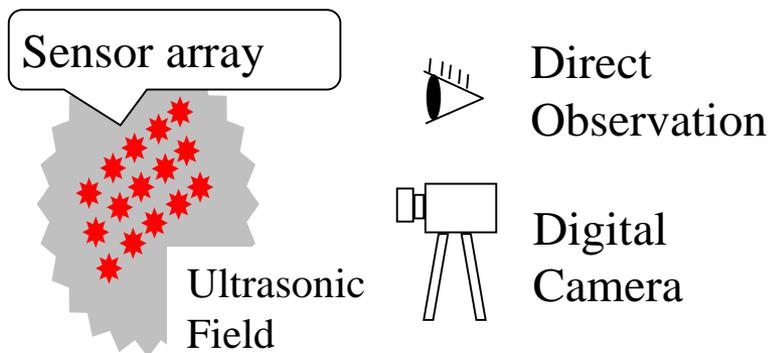
1) Single



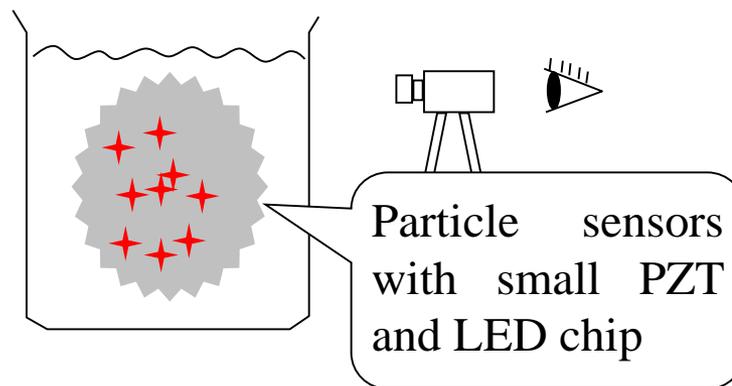
2) Optical Fiber Output



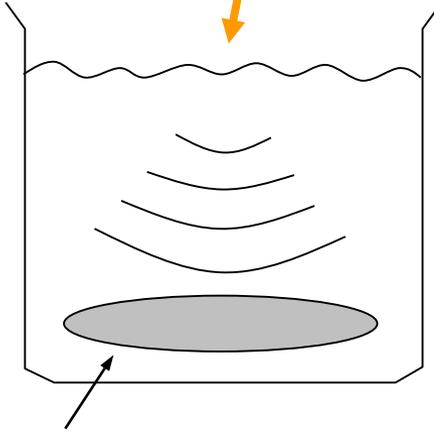
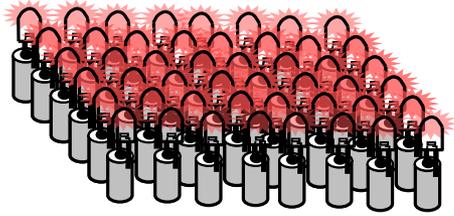
3) Array



4) Sensor Dust



観測例 (500kHz集束音場)



**Concave
transducer**



光ファイバ先端に微小な音圧感度構造を有した音圧プローブのまとめ



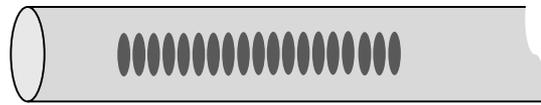
端面反射型

水中音圧を直接測定
低感度



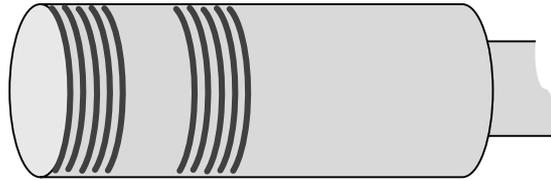
FP型

高感度
製作法に工夫が必要



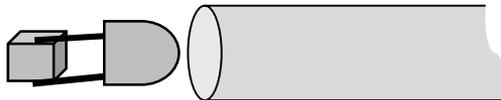
FBG型

製作容易、感度設定も自由、×長い
波長多重によるアレイ化



DBR-FP型

大量生産向き(蒸着技術)
頑健構造が可能、×大きい



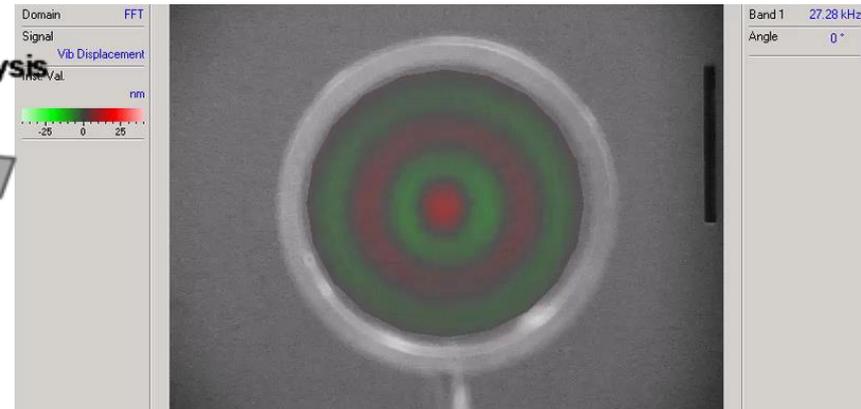
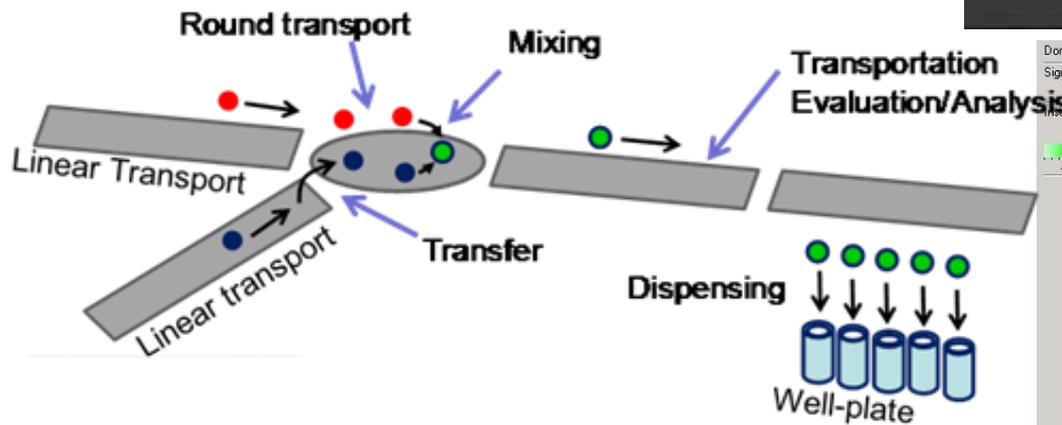
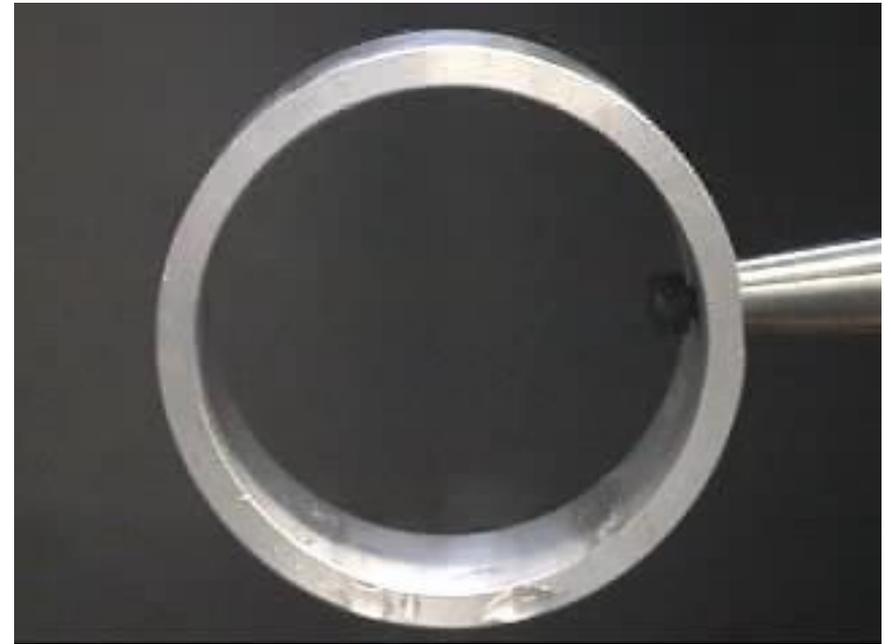
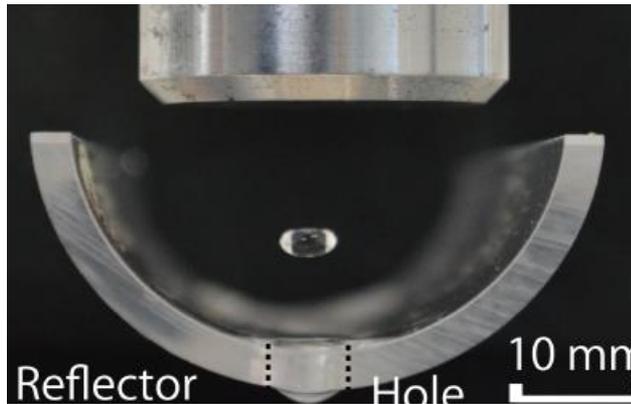
PZT-LED型

従来 hidroホン(ピエゾ)とのハイブリッド

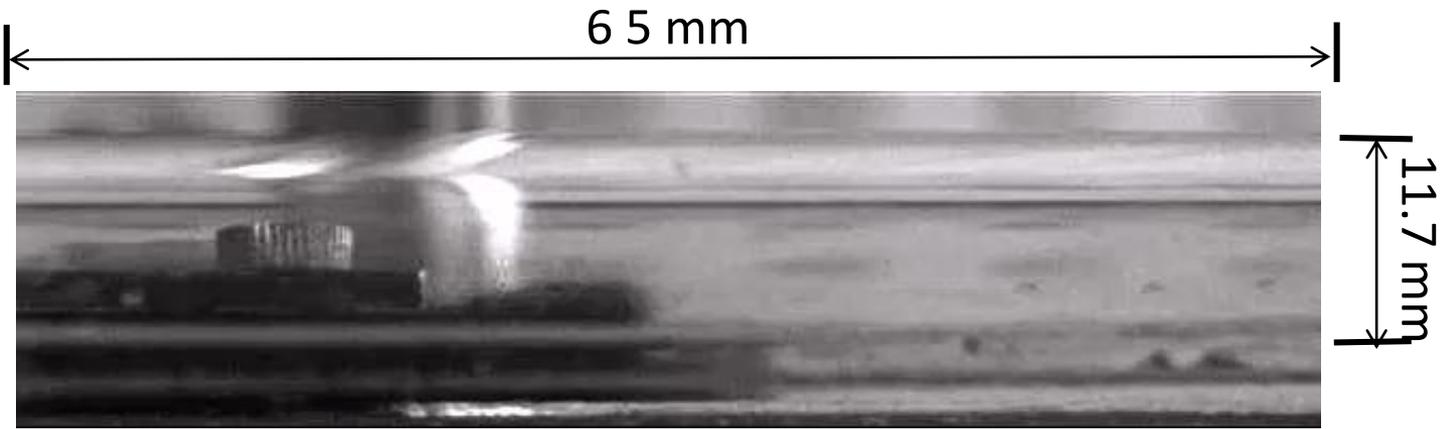
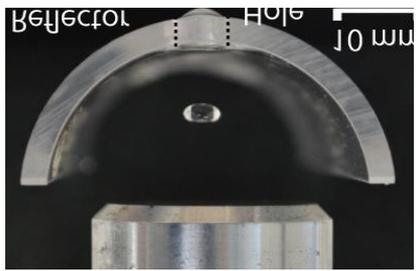
光波長出力型は信号復調方式が複雑になるが、光強度の影響少ない。

空中ハイパワー超音波での用途

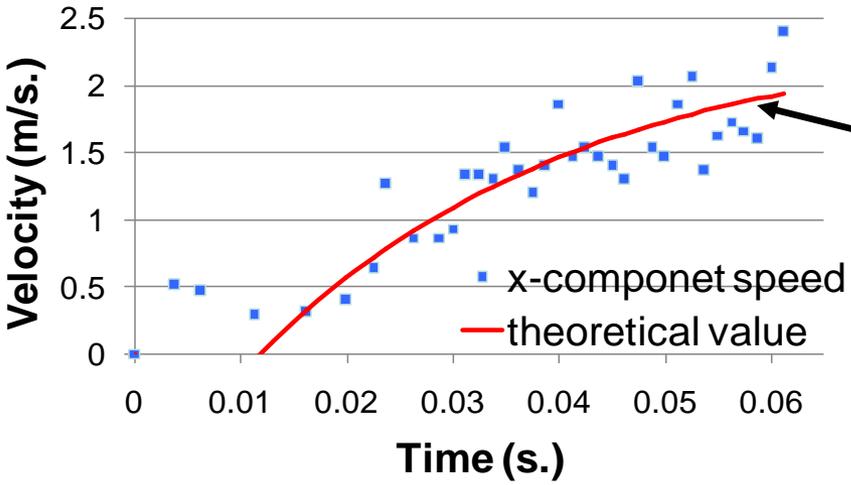
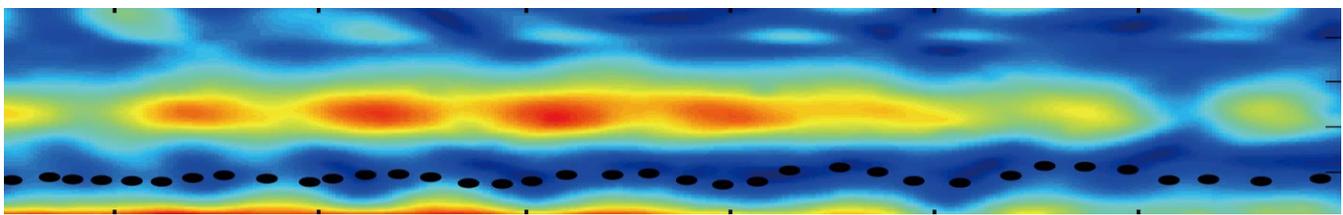
液滴の超音波浮揚・・・非接触での搬送、混合、分析



エタノール液滴の非接触搬送 (直径1.5 mm 1.38 g)



1/40 Slow Playback

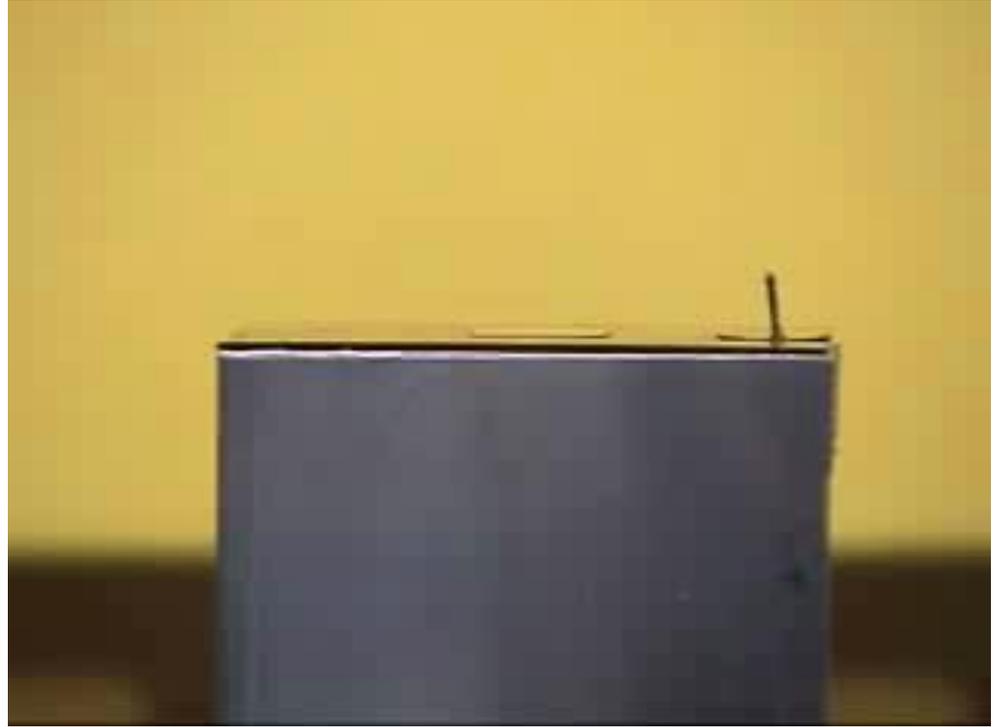


$$v(t) = v_0 (1 - \exp(-t/\tau))$$

Terminal Velocity:
 $v_0 = 2.3 \text{ m/s}$

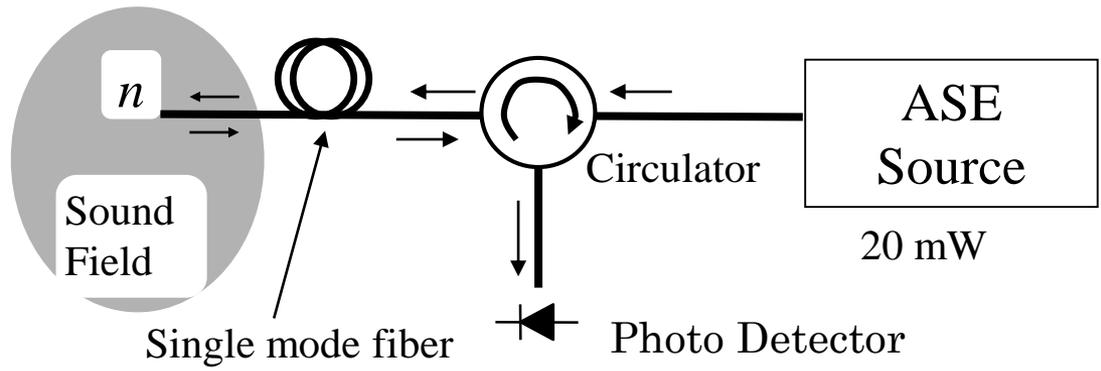
空中ハイパワー超音波での用途

大型ガラス基板の非接触搬送



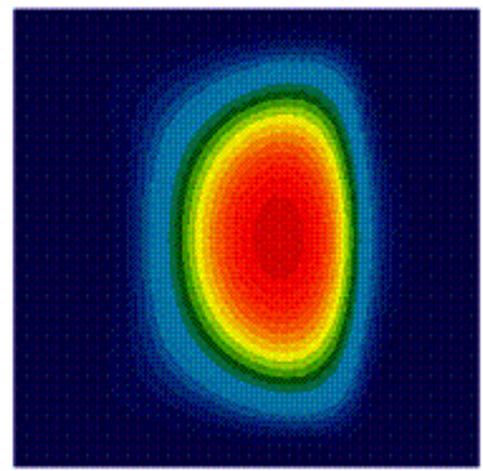
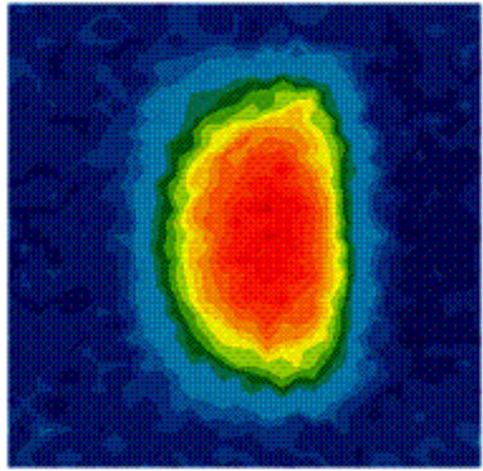
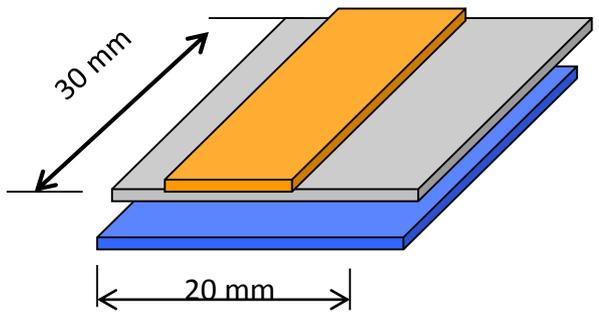
微小ギャップ内の音場分布を測りたい

光ファイバプローブによる空気ギャップ内音圧測定



音圧分布
(実測)

音圧分布
(FEM)



医用画像診断のトレンド

- *従来、反射強度画像などから疾患を診断
- *硬さなど新たな量の画像化 → 疾患の早期発見

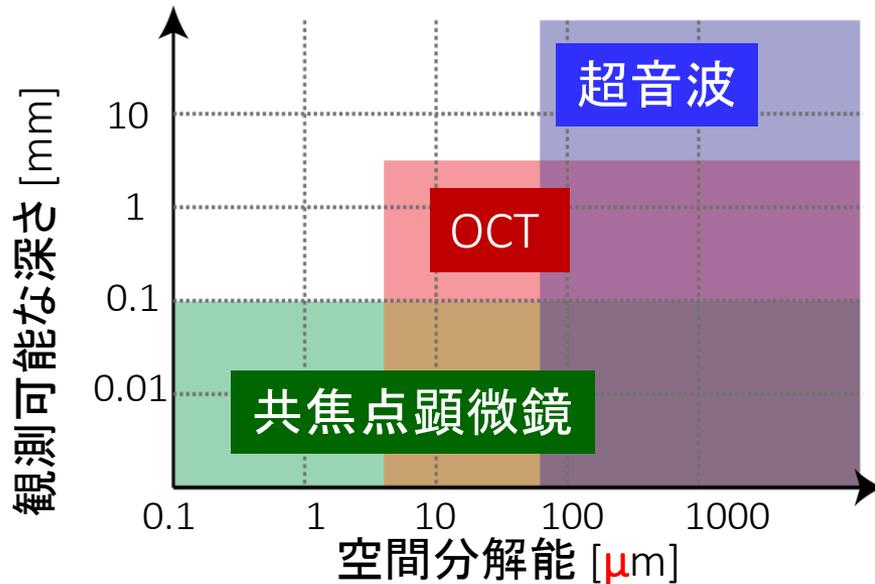
エラストグラフィ: 生体を外部から圧迫し、生体の変位量や弾性波速度から硬さを推定し、カラーマップで表示

医用応用 1 OCT内視鏡とエラストグラフィ

OCT (Optical Coherence Tomography) とは

光の干渉を用いた断層測定装置

眼科などで普及
内視鏡への応用が展開中



OCTの特徴 (santec社調べ)

- 水平方向分解能：約10 μm
- 深さ方向分解能：約20 μm
- 観測可能な深さ：～3 mm

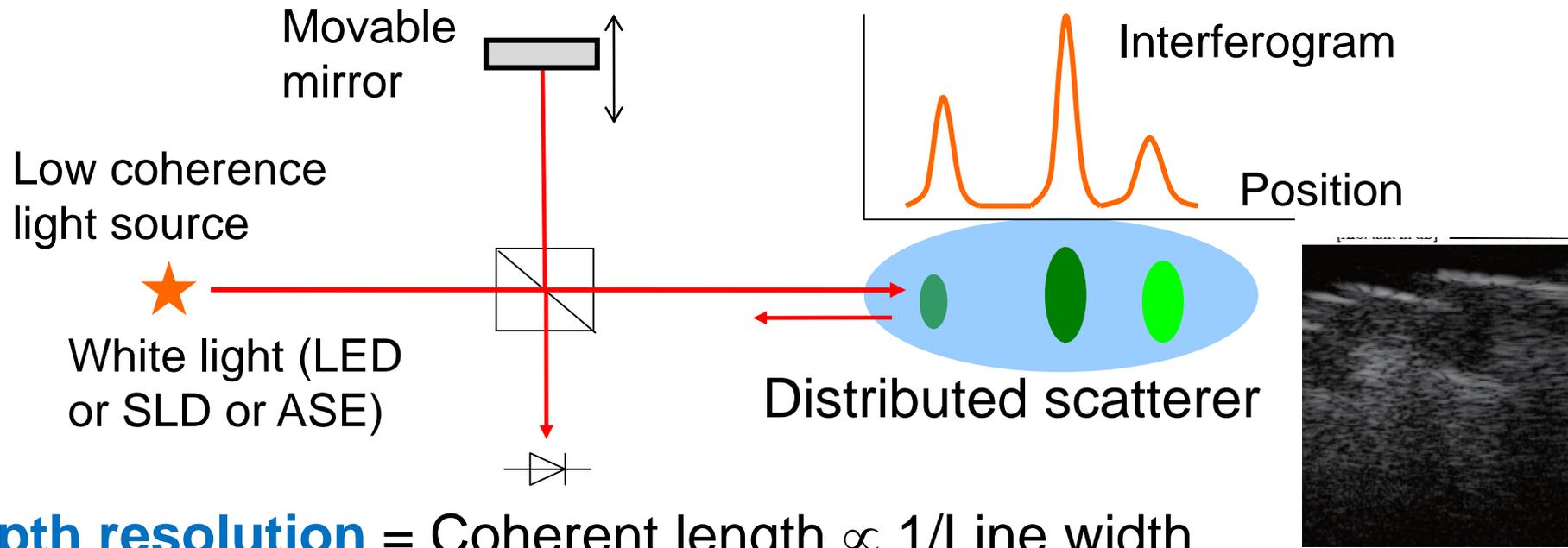
X線CT, MRI, 超音波と比較して
高分解能、リアルタイム、
安価なシステム

微小領域における硬さ計測への期待が高まっている

→ 血管、胃壁、皮膚などの疾患診断に適用できる可能性

OCTの原理

低コヒーレンス干渉計の原理



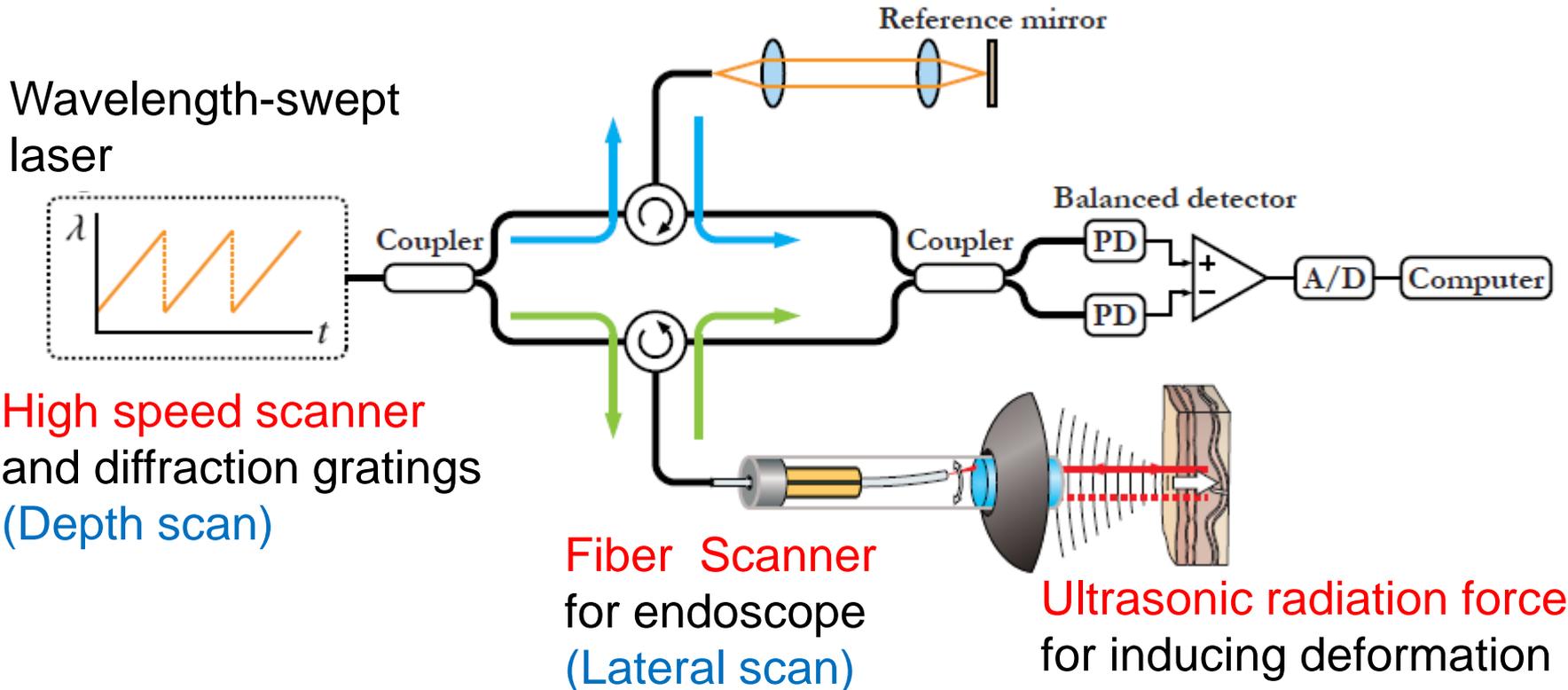
Depth resolution = Coherent length \propto 1/Line width
< 10 μ m

Penetration < Several mm

SS-OCT

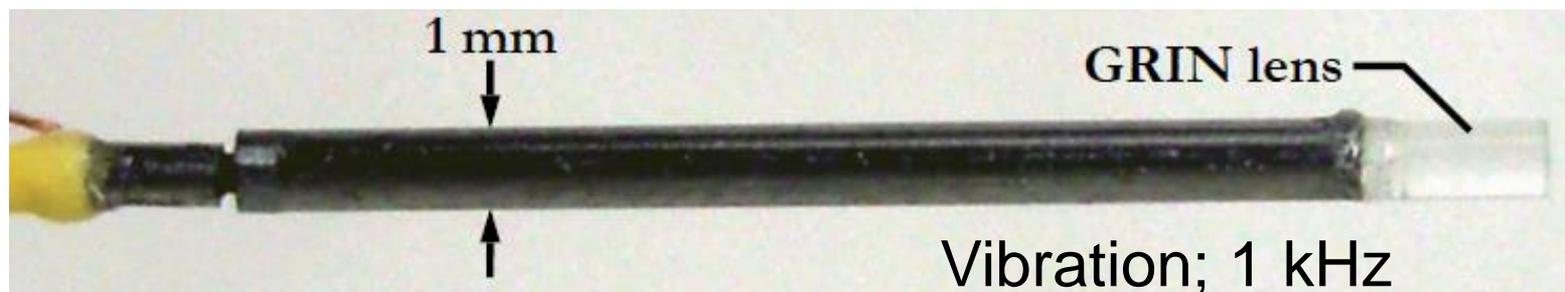
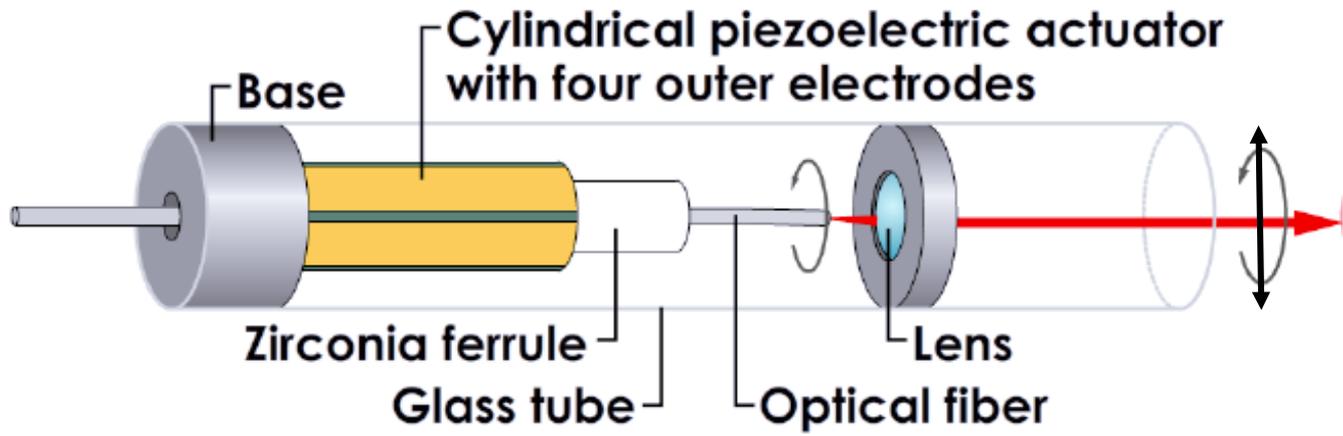
Swept-source OCT 高いSN比

OCT エラストグラフィ



光ファイバ干渉計で構成

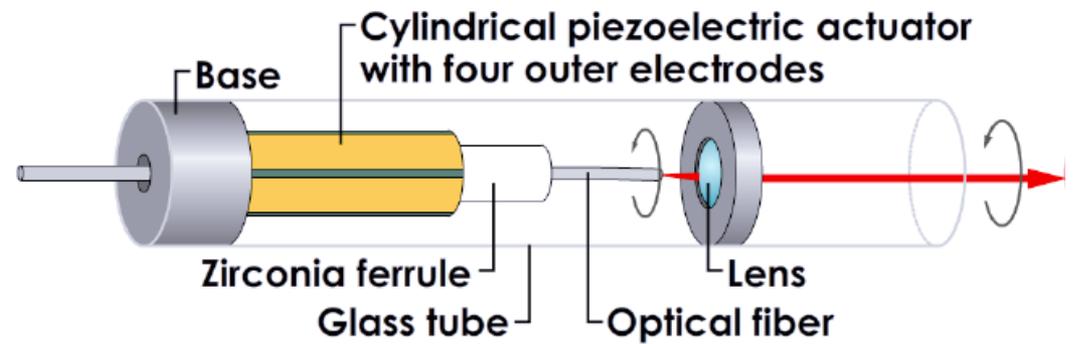
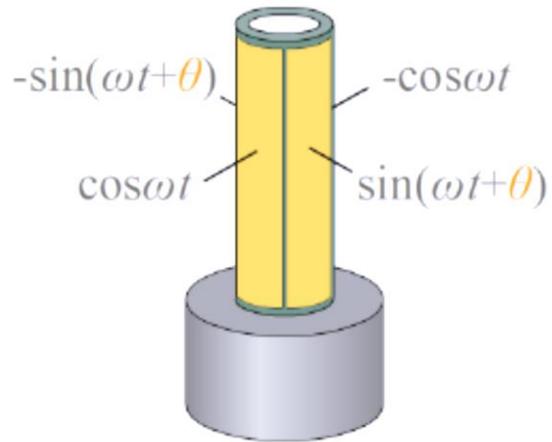
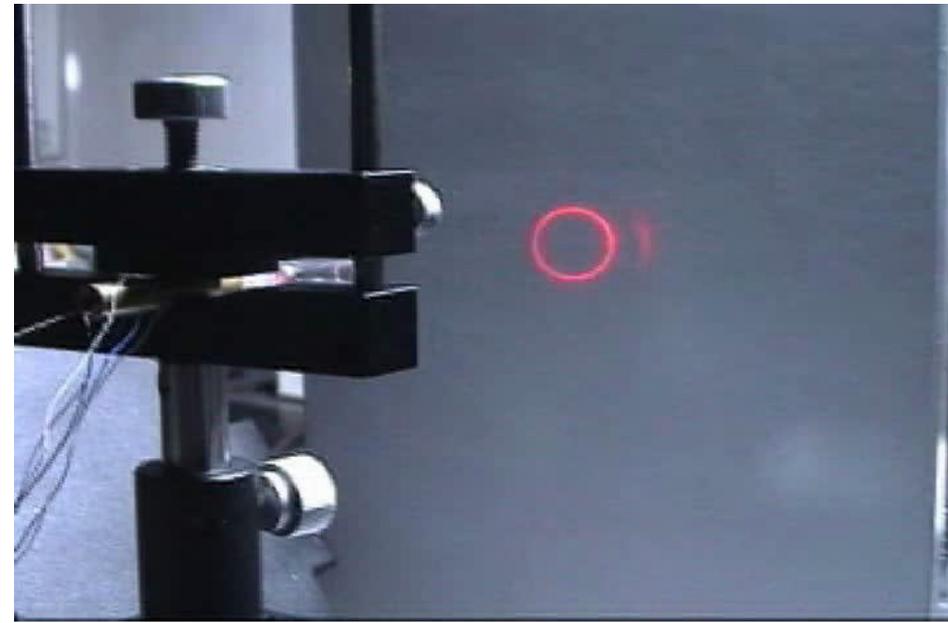
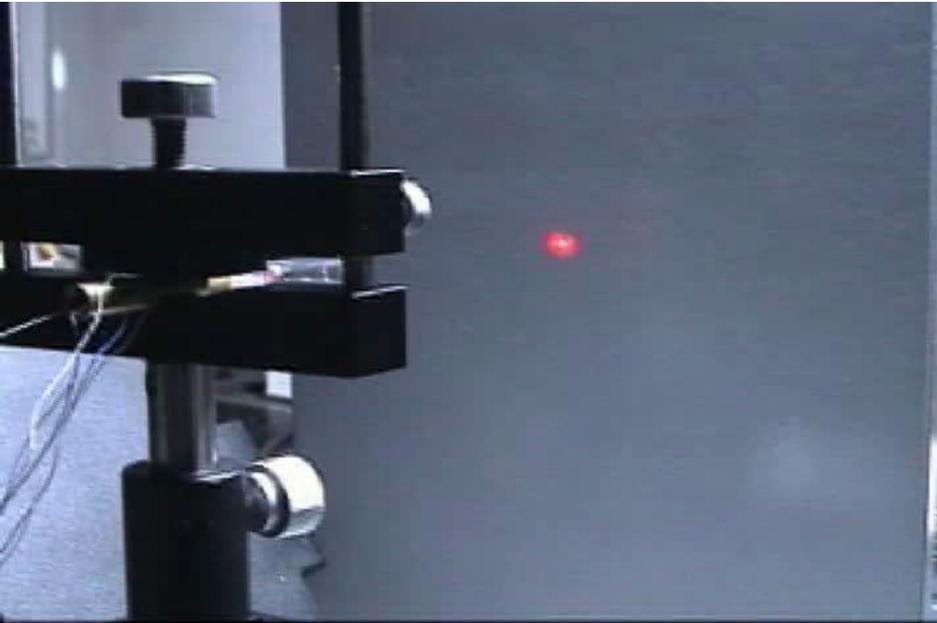
内視鏡用走査……光ファイバの振動



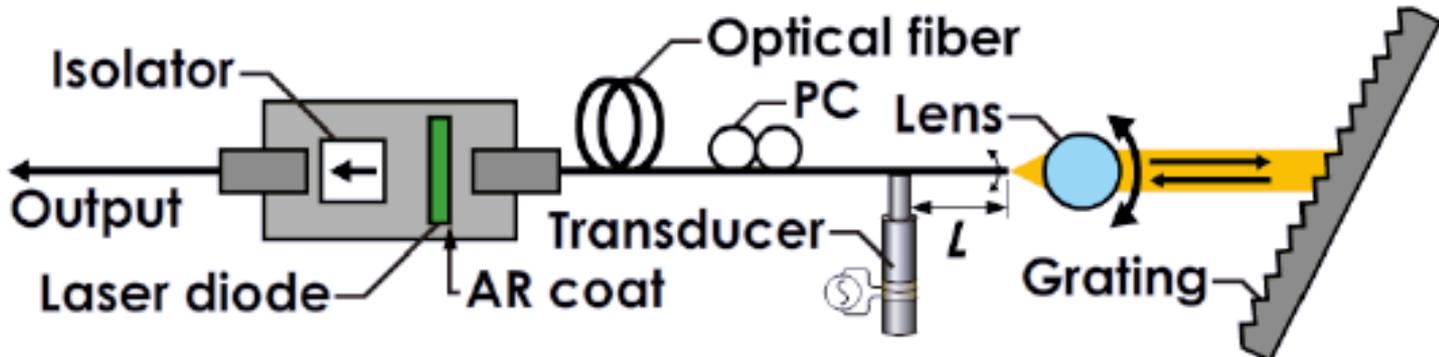
PZT element (outer diameter 0.4 mm, inner diameter 0.2 mm and length 5 mm)

Vibration; 1 kHz
1st bending mode: $L=10$ mm

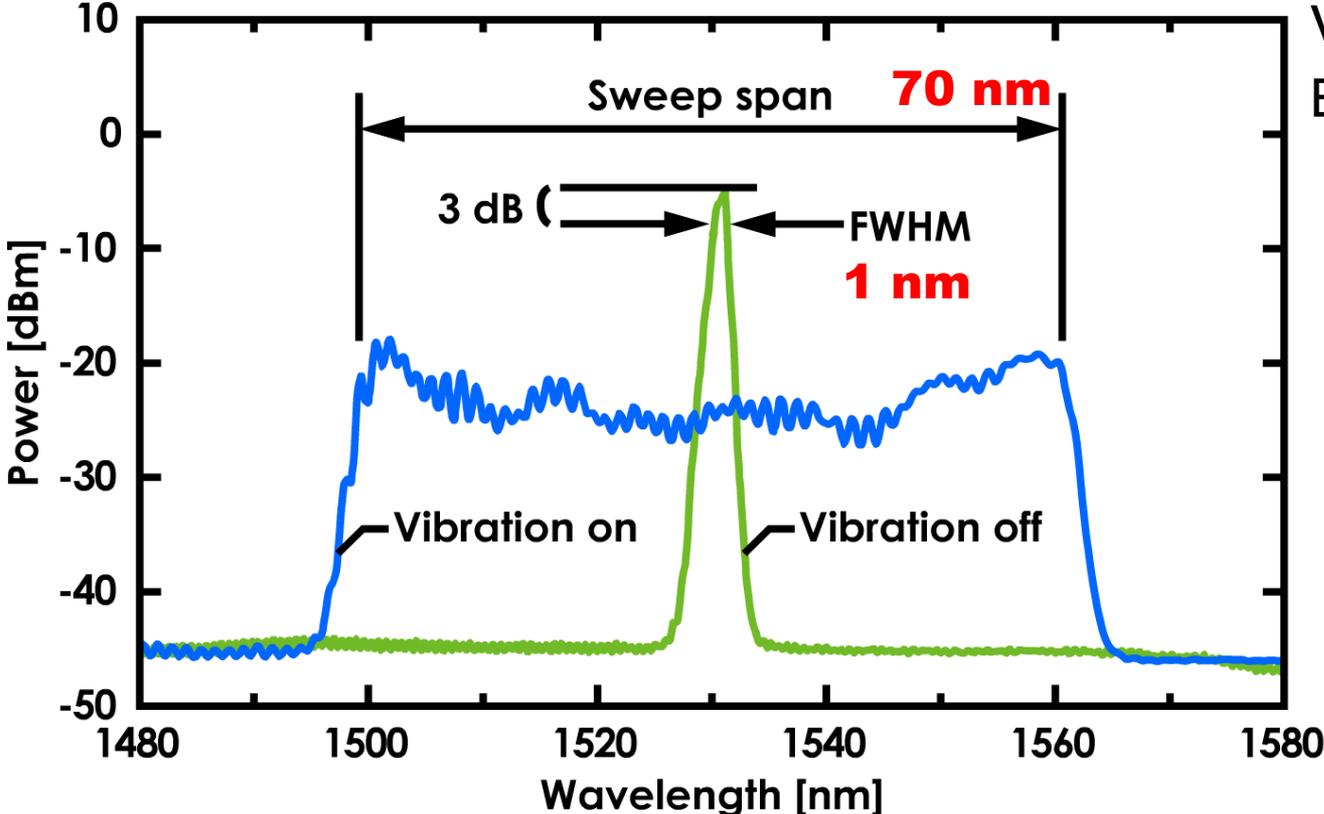
走査のようす



ファイバ振動による高速掃引光源



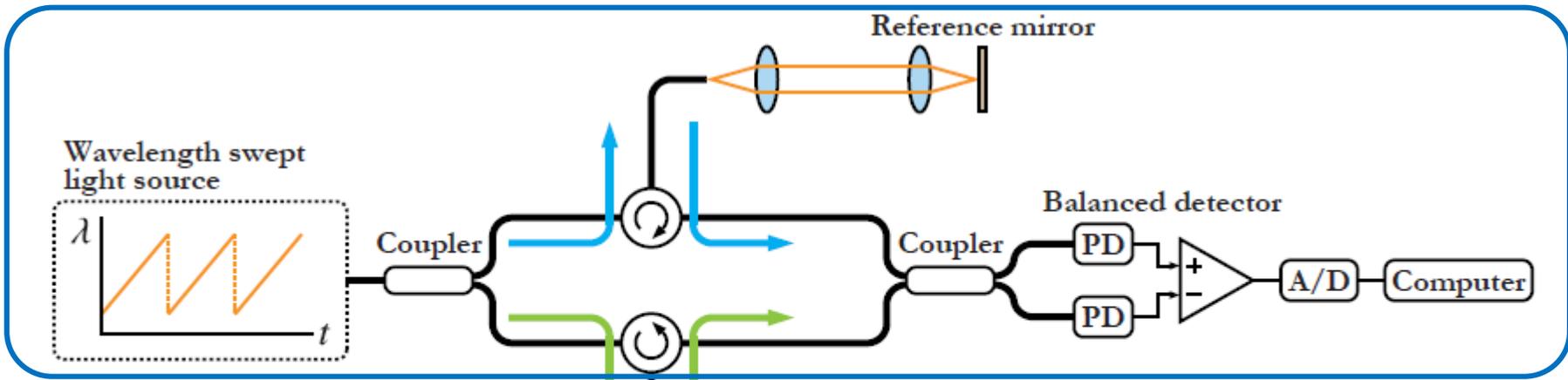
Spectrum measured by an OSA



Vibration; 84 kHz
Effective sweep rate
=168 kHz

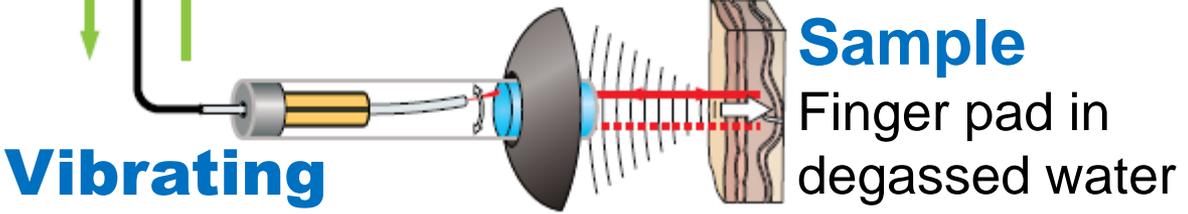
Line width is too thick for OCT.

実験系



OCT system

IV-2000, Santec Co.
MEMS-based scanner
Wavelength; 1330 nm
Sweep span; 110 nm
Sweep rate; 20 kHz
Depth resolution; 9 μm in water



Vibrating fiber probe
Freq.; 1 kHz
Amp.; 100 μm

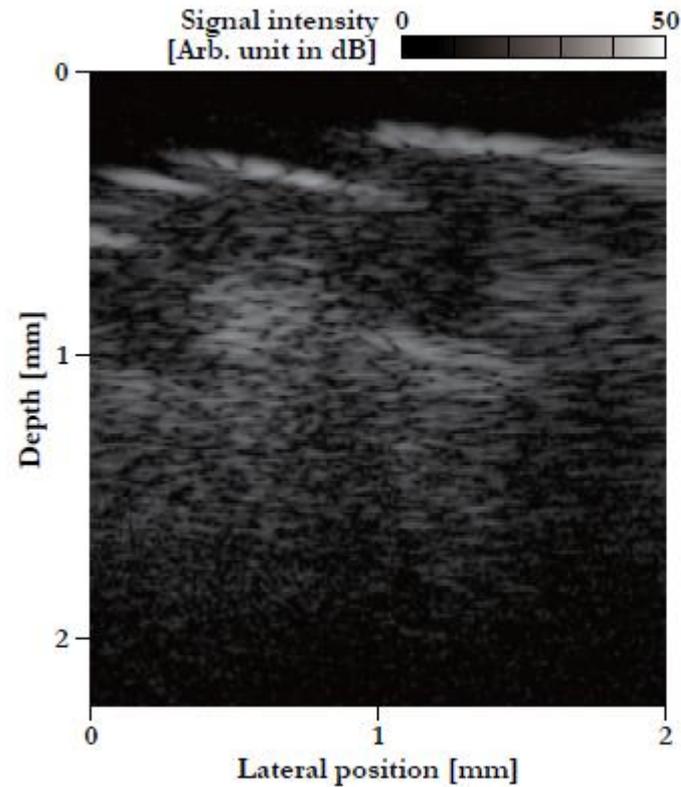
Focused transducer
Outer dia., 10 mm;
Inner dia., 3 mm
Radius of curvature, 15 mm
Sinusoidal burst waves of 10,000 cycles at 2.2 MHz.

Imaging area
Depth; 2 mm (Resol.=9 μm)
Width; 2 mm (400 lines)
Frame rate 50 fps

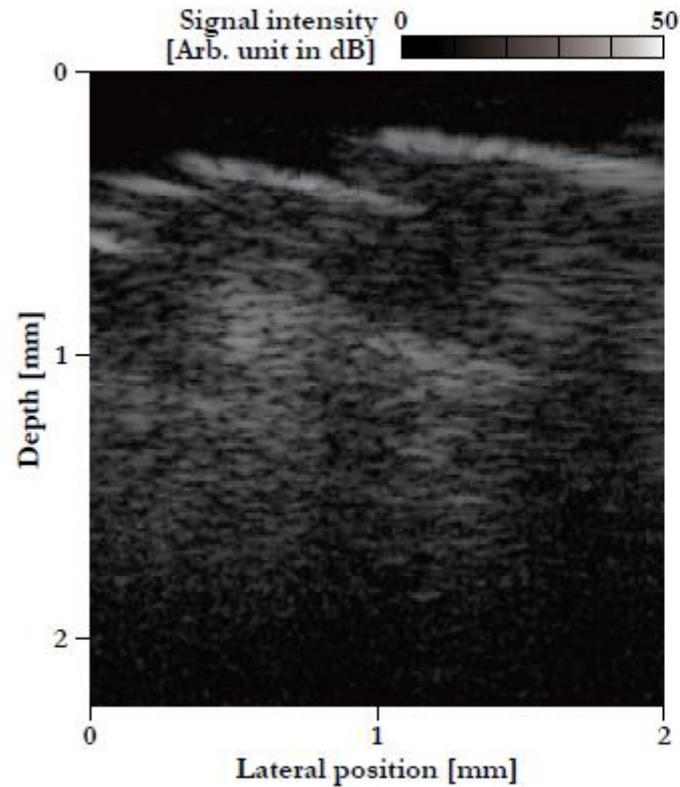
OCT 画像

Before US radiation

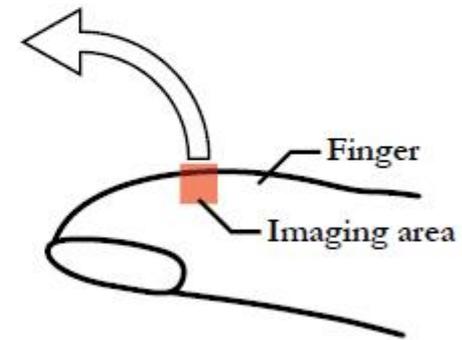
After US radiation



(a) Stationary condition.

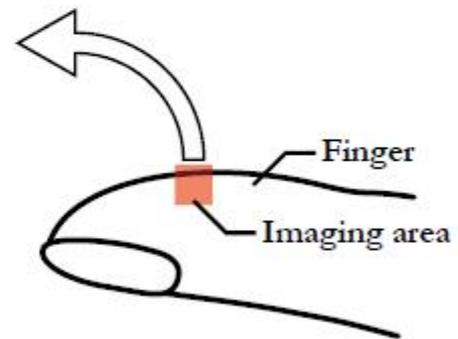
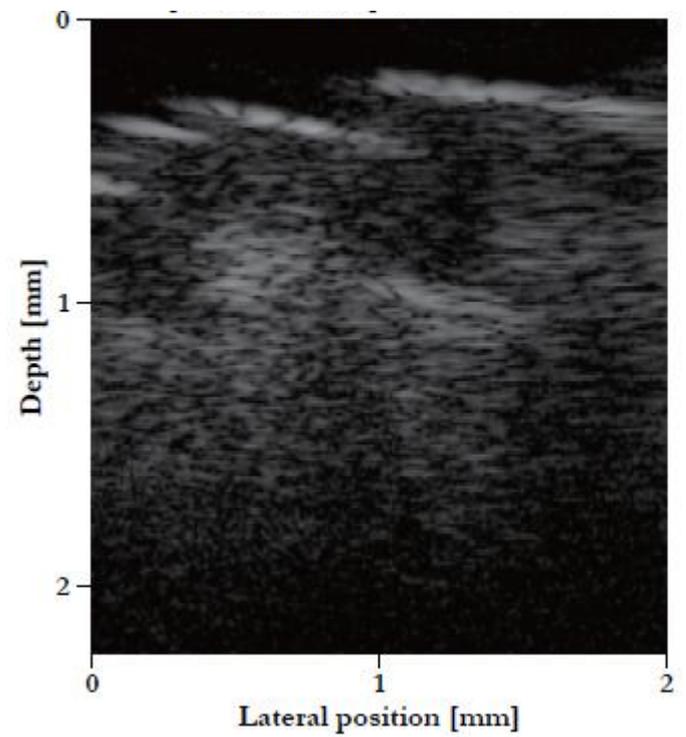
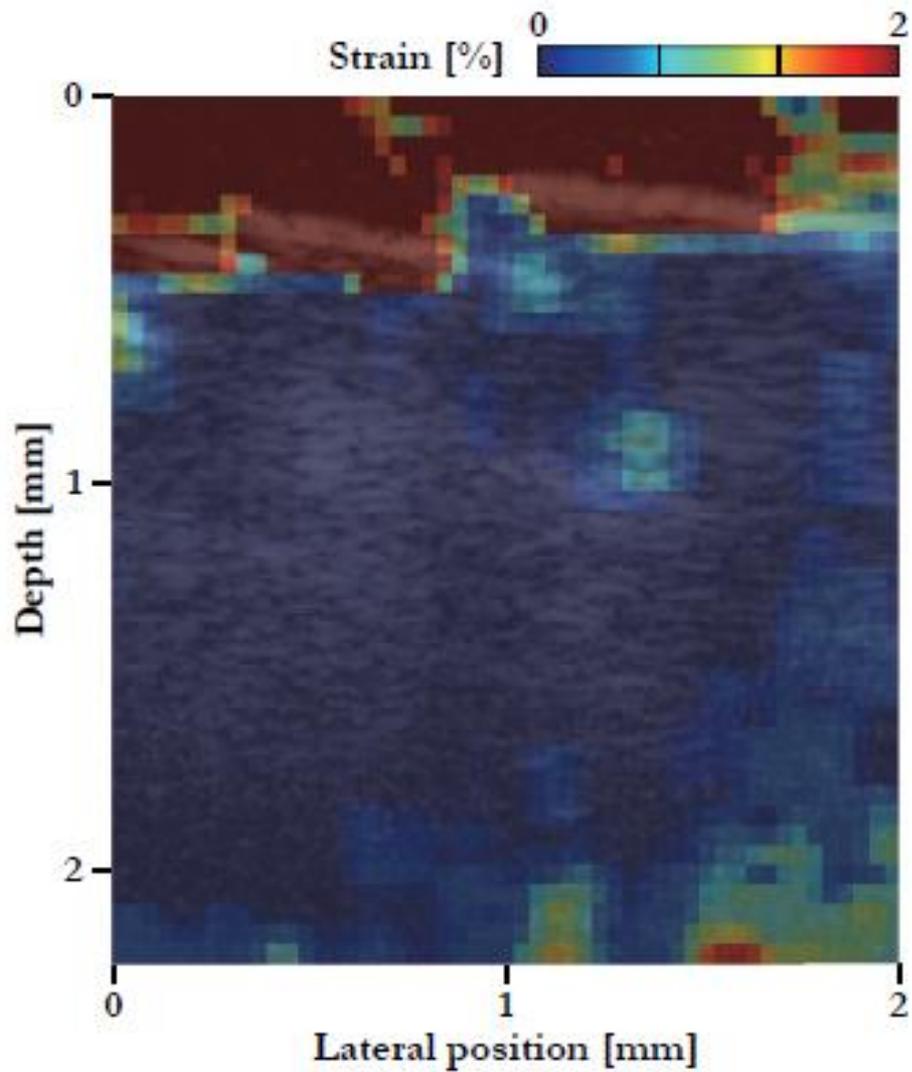


(b) During deformation.



Maximum displacement in
depth direction = 50 μm .

画像の差分をとると



医用応用 2 : 光超音波・・・ホットなトピック

従来の超音波画像

圧電トランスデューサで
超音波パルスを送受信

光超音波画像

光パルス照射で超音波発生
圧電素子で超音波受信

光の吸収により超音波発生(光音響効果)

光波長により対象を選択

例: **毛細血管造影**

がんには毛細血管発達

光超音波用の**造影剤**の研究も盛んに

受信も光ファイバ化した全光ファイバ構成も

まとめ

POFによるセンサ・・・メモリ効果などの機能性

必要な特性にファイバを調整して作成可能？

音響用ファイバセンサ・・・ニッチな分野だがニーズ高い

音源探査用大規模アレイマイクロホン

超音波用高周波プローブ

医用分野・・・超音波と光を組み合わせた新たな方式

OCTエラストグラフィ、光超音波