

# KTN光偏向器によるOCTイメージング への応用

近江雅人

大阪大学大学院医学系研究科  
保健学専攻

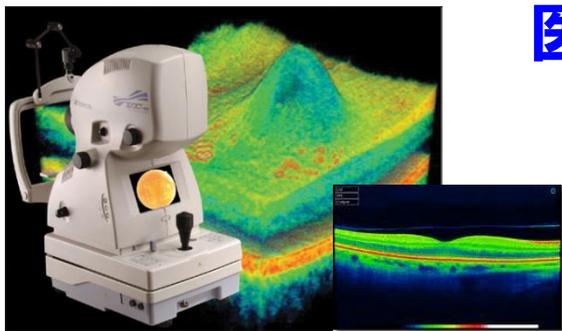
1. はじめに
2. OCTの種類と高速化技術
3. KTN結晶とは
4. KTN光偏向器を用いた**高速SS-OCT**
5. KTN光偏向器を用いた**高速En face OCT**
6. KTN光プローブを用いた**硬性内視鏡型OCT**
7. まとめ

# 光干渉断層計(OCT)

生体表皮下1~2mmの断層イメージを10~20ミクロンの空間分解能で取得できる最新の光断層イメージング技術。

**診断技術**として医療現場に急速に普及

眼底検査用OCT



Carl Zeiss社

**医療用途**

皮膚科用OCT



Michelson  
Diagnostics社

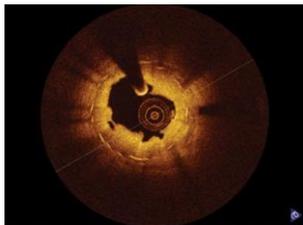
**研究・工業用途**

SS-OCT装置



Thorlabs社

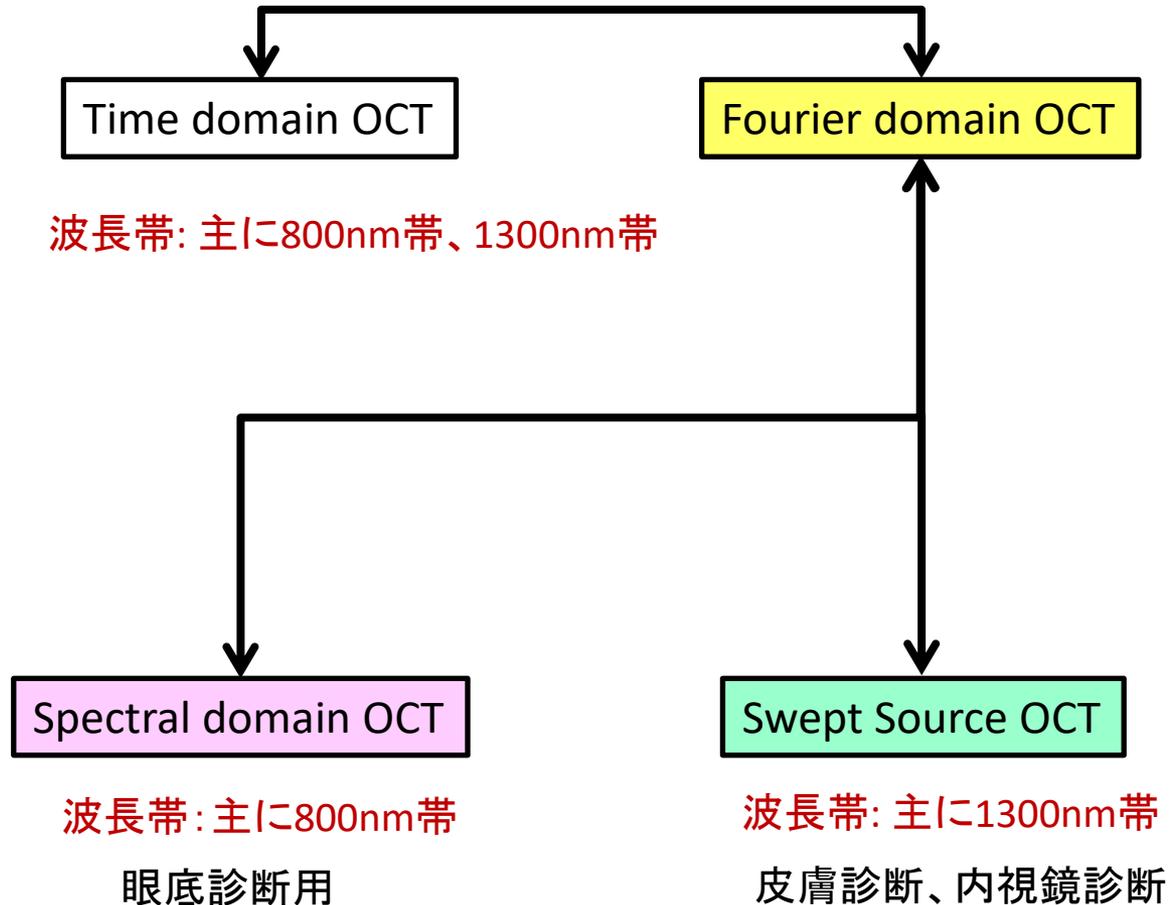
冠動脈用OCT



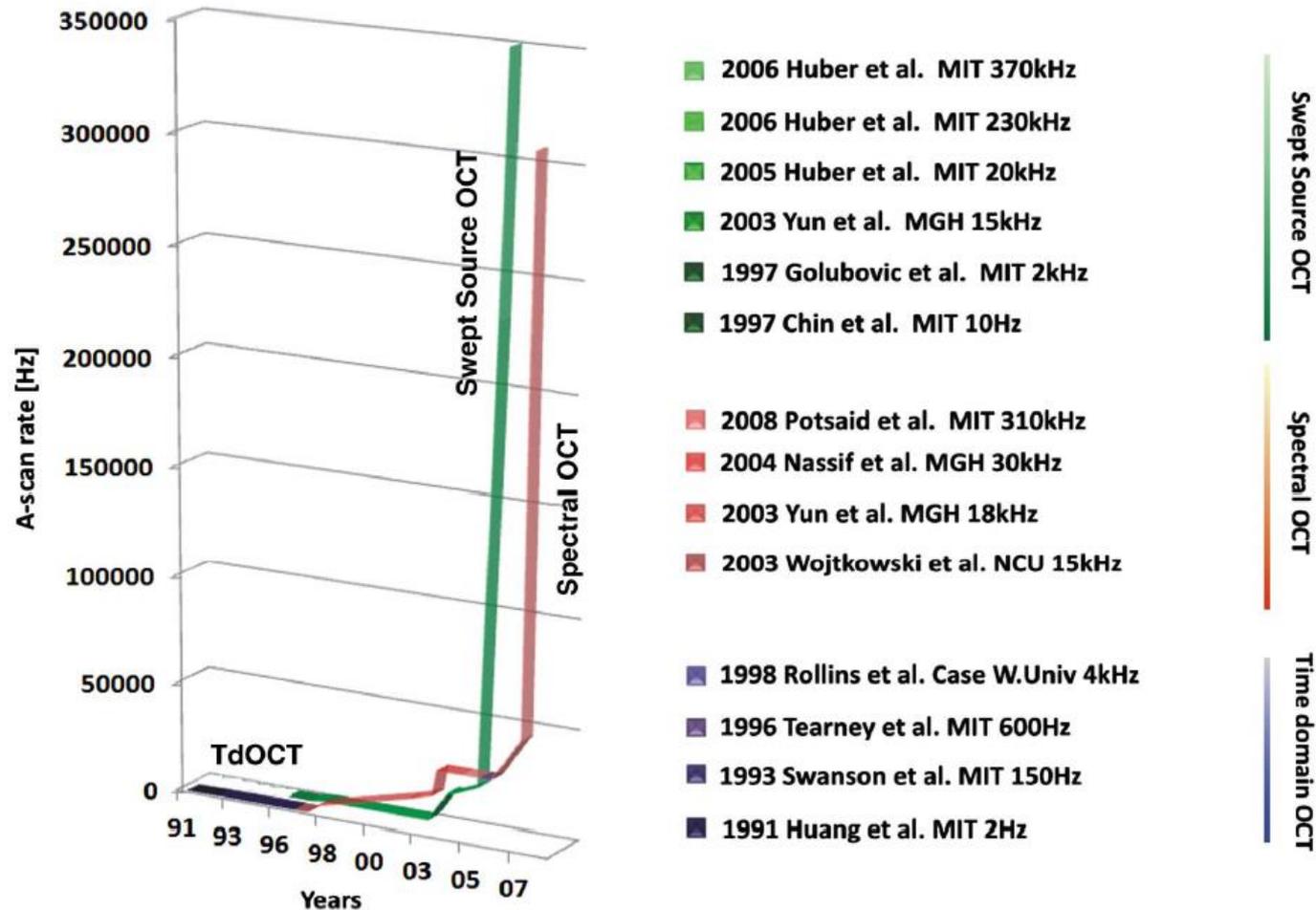
LightLab imaging社



# OCTの種類について

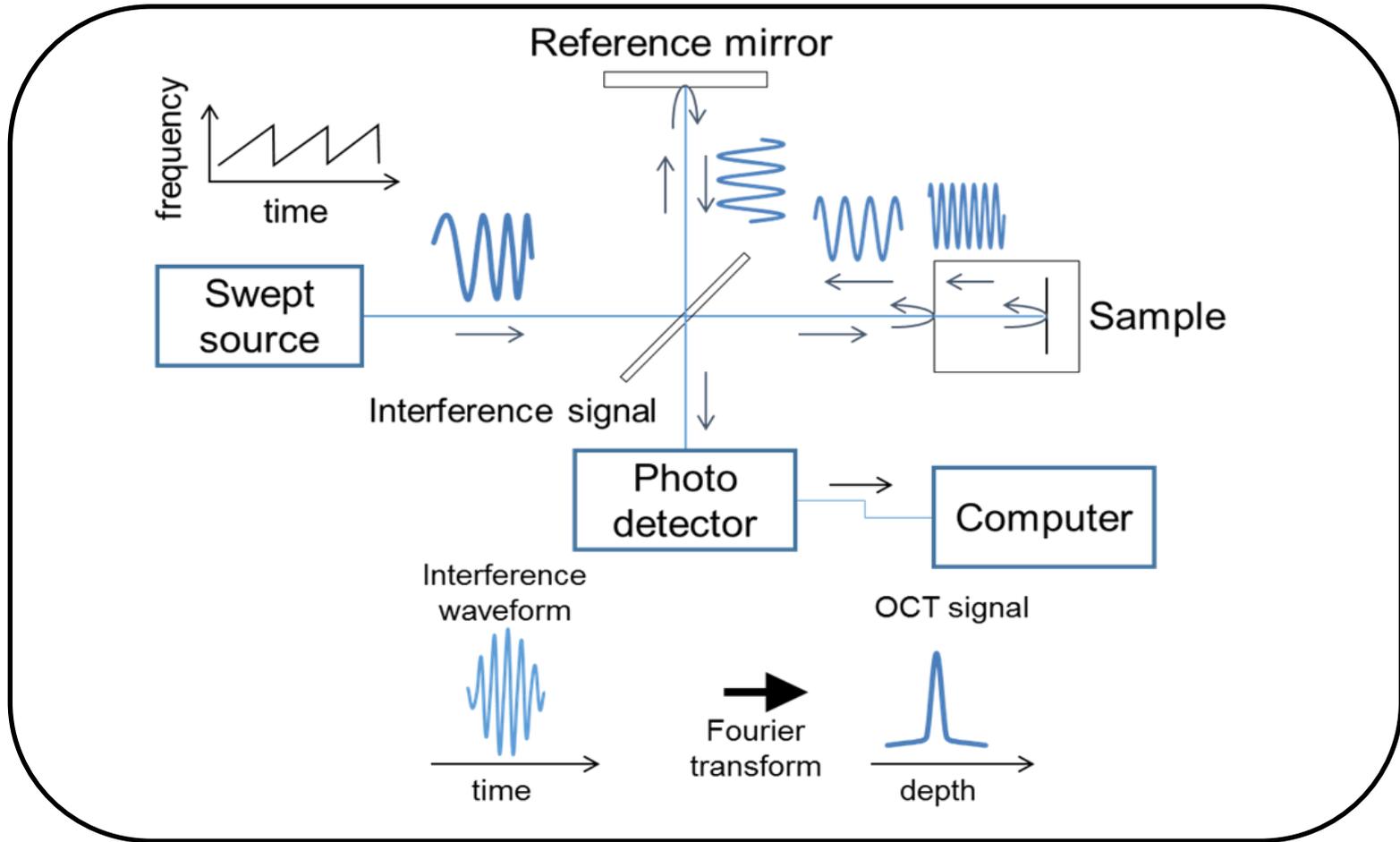


# OCTの高速化の進展



# 波長掃引型OCT (Swept-source (SS) - OCT)とは

■SS-OCT:光源に照射光の波長を掃引できる”波長掃引光源”を用いた干渉法  
高速測定が期待でき、他方式に比べて比較的低ノイズ



- 高速測定
- 高分解能
- 深い場所まで測定

早い波長掃引速度 (10kHz以上)  
広い波長掃引幅 (100nm程度)  
長い可干渉距離 (コヒーレンス長) (5mm以上)

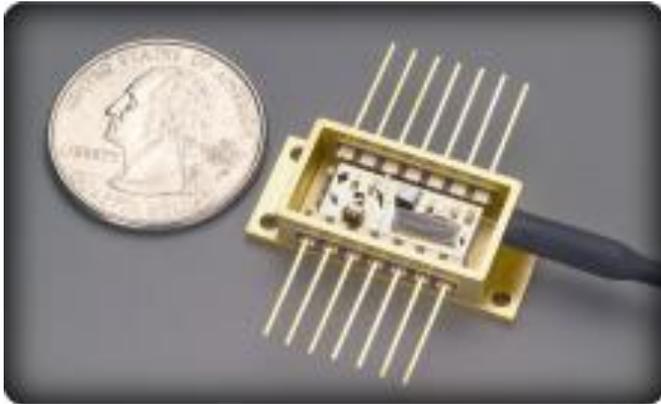
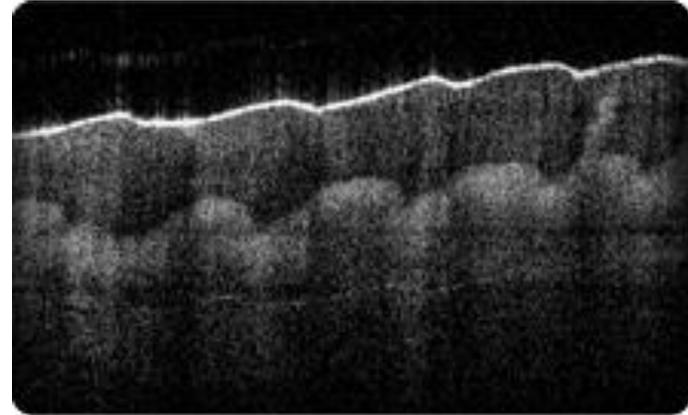
# SS-OCT光源の種類について

## ■研究&製品レベル

	機関	波長掃引速度	中心波長	掃引幅	コヒーレンス長
KTN	NTT	200 kHz	1300 nm	80 nm	7 mm
Polygon mirror	Harvard Medical School	400 kHz	1300 nm	120 nm	12 mm
VCSEL MEMS (※BiOS展示)	Thorlabs, MIT	100 kHz-1MHz	1300 nm	100 nm	100 mm
FDML (※BiOS展示)	Ludwig-Maximilians-Universität	2.6 MHz	1300 nm	100 nm	20 mm

	機関	波長掃引速度	中心波長	掃引幅	コヒーレンス長
MEMS	AXSUN	100 kHz	1300 nm	100 nm	12 mm

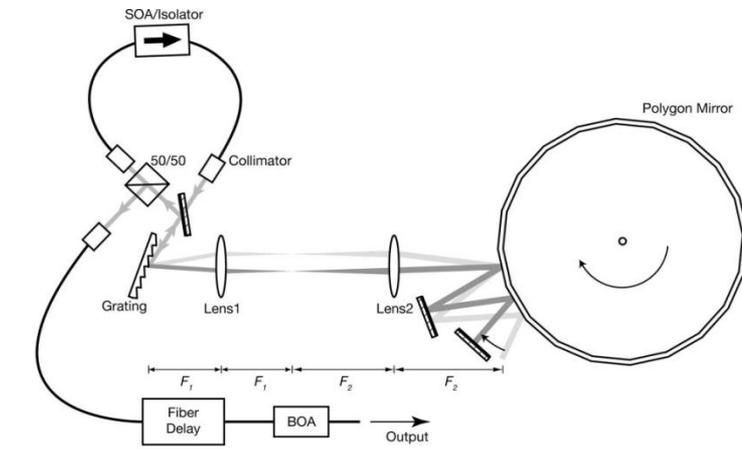
# AXSUN MEMS光源を用いたOCT



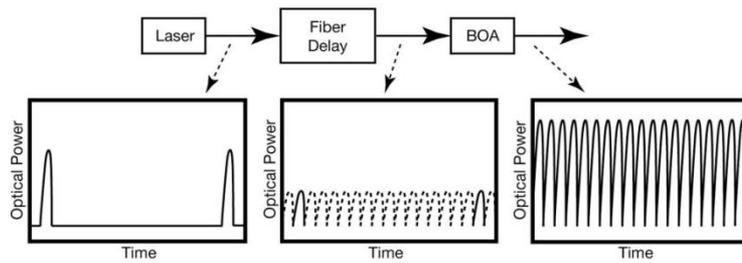
100kHz : MEMS

<http://www.axsun.com/products/oct-swept-lasers.php>

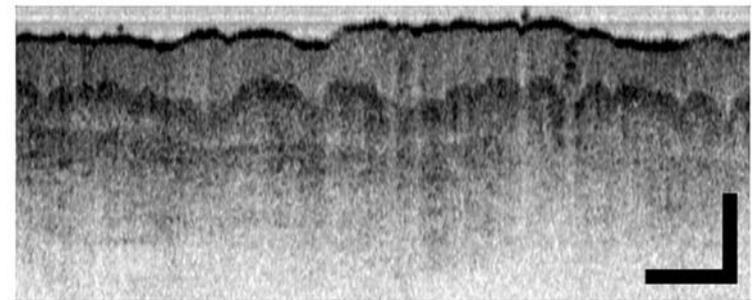
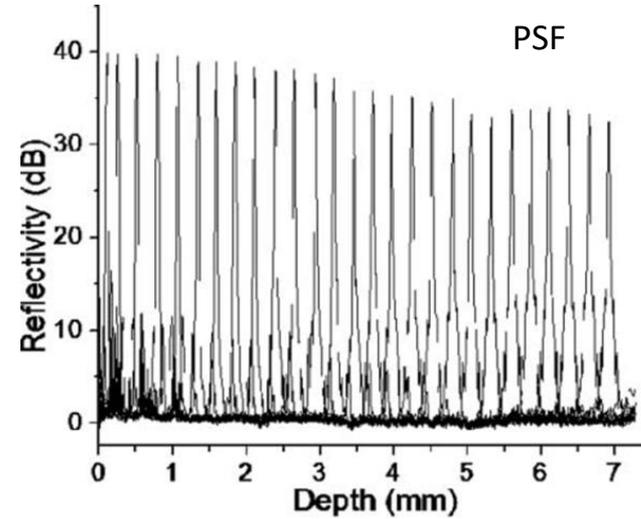
# Polygon mirrorを用いたOCT



(a)



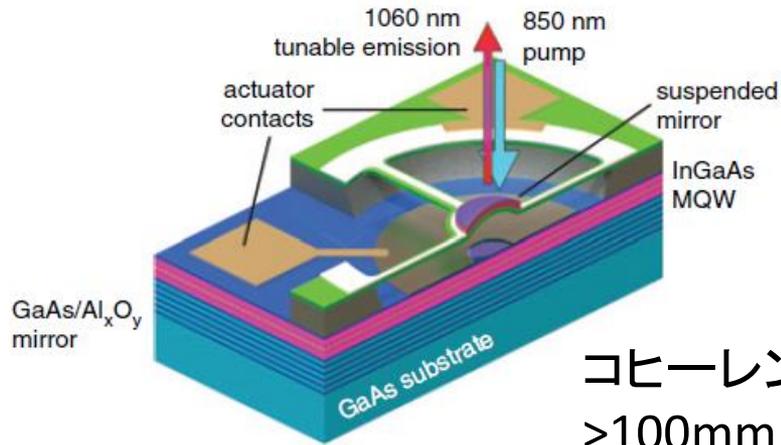
(b)



(c)

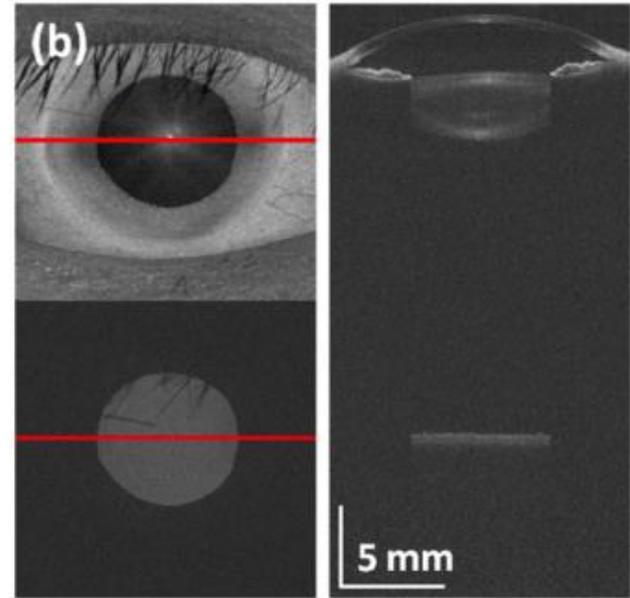
Wang-Yuhl Oh et. al  
Harvard Medical School  
September 1, 2010 / Vol. 35, No. 17 / OPTICS LETTERS

# VCSEL MEMS光源を用いたOCT



コヒーレンス長：  
>100mm

V. Jayaraman, *Electron Lett.* 48, 1331 (2012)  
Thorlabs Inc.

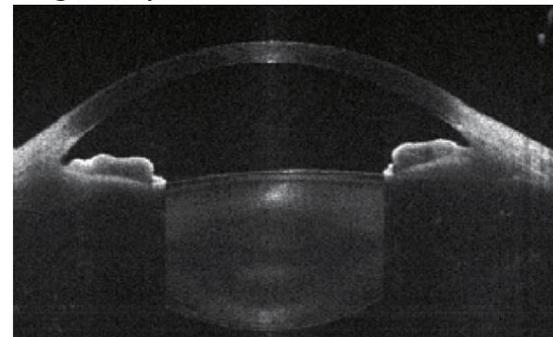


Full eye imaging

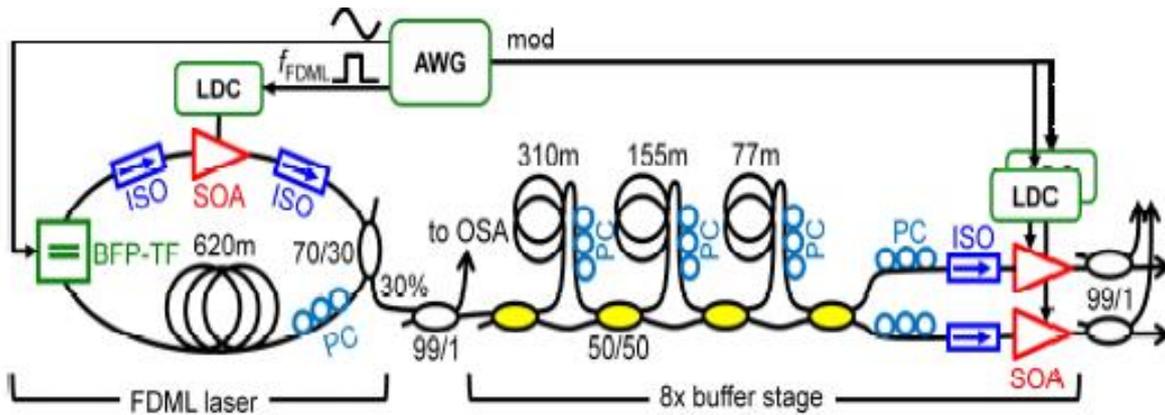


<http://www.santec.com>

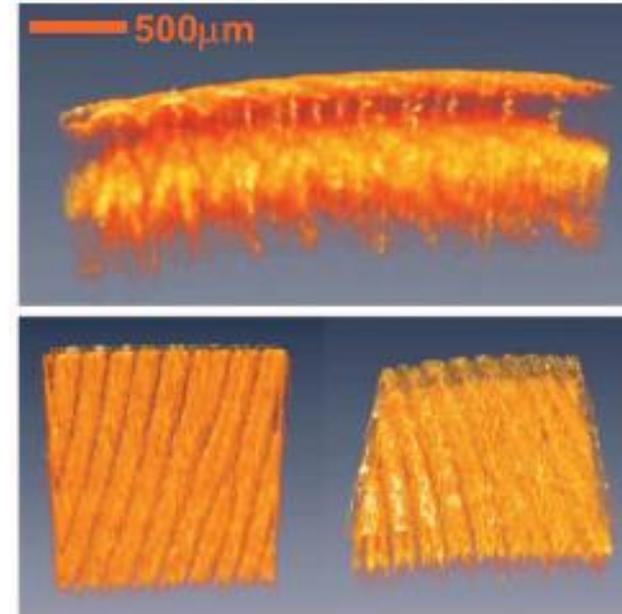
100kHz : MEMS



# FDMLを用いたOCT



ヒト指の3D-OCT



数MHzオーダー

長波長から短波長への高速走査Buffered FDLを使用(～数M lines/s), ~1000 frames/s

Wolfgang Wieser

5 July 2010 / Vol. 18, No. 14 / OPTICS EXPRESS 14685

# KTN結晶とは

タンタル酸ニオブ酸カリウム ( $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ )

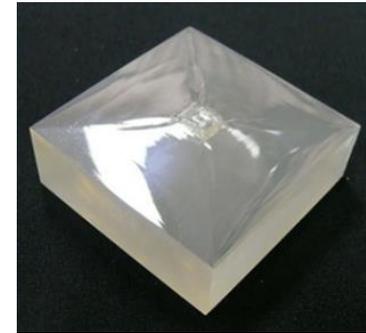
**巨大な電気光学効果 (EO効果) をもつ酸化物**

⇒電気光学効果: 電圧をかけると屈折率が変化

**光がもつ性質をKTNに加える電圧で制御する**

⇒MHz帯域での動作が可能

KTNバルク結晶



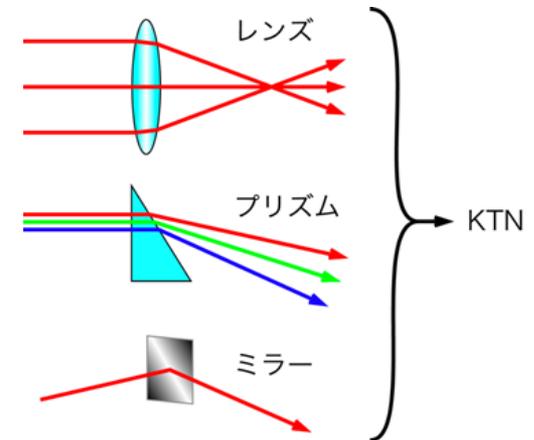
## 光制御と応用先:

進行方向…光偏向器

焦点距離…可変焦点レンズ

強度 …変調器

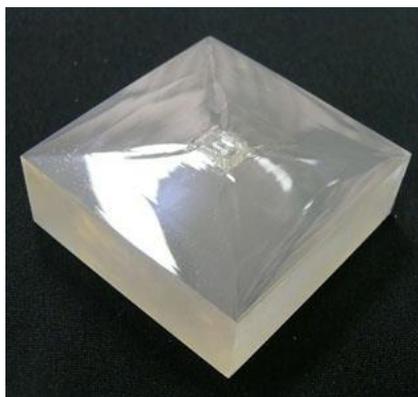
偏光 …可変波長板



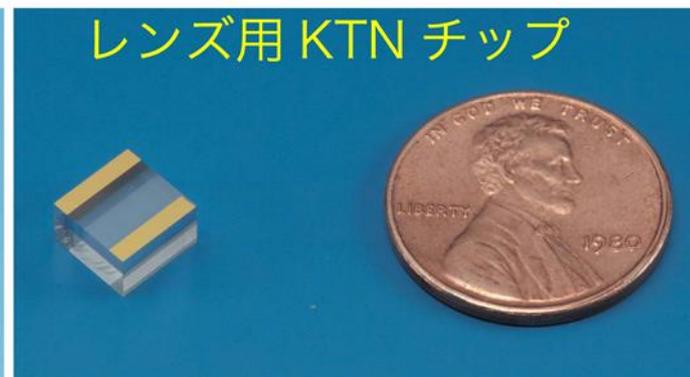
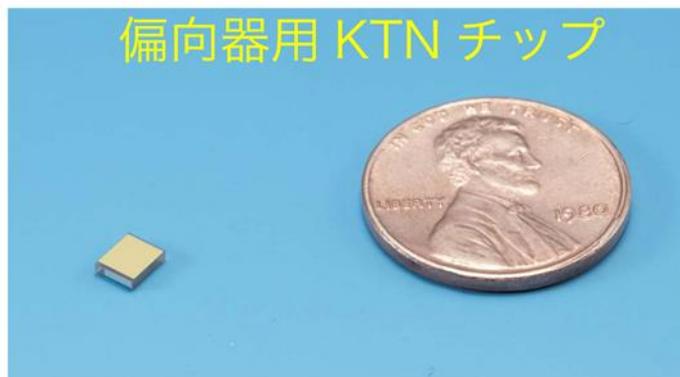
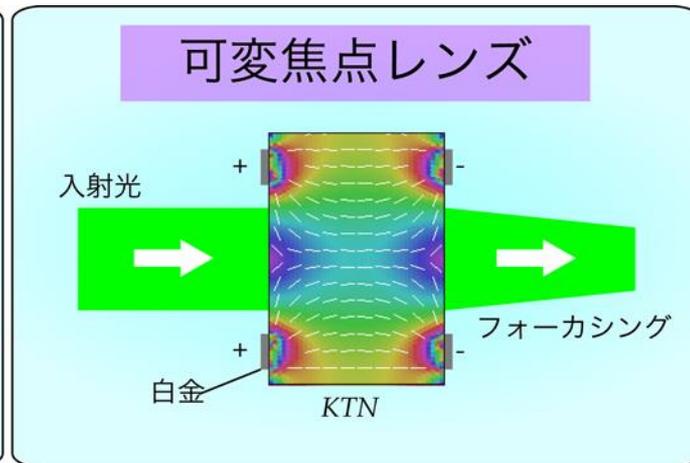
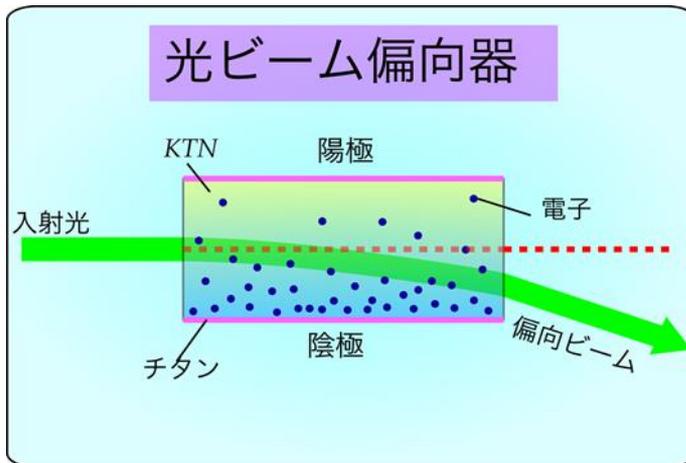
KTNを**光偏向器**として用いて、

”**高速**”動作可能な**波長掃引光源**を提案

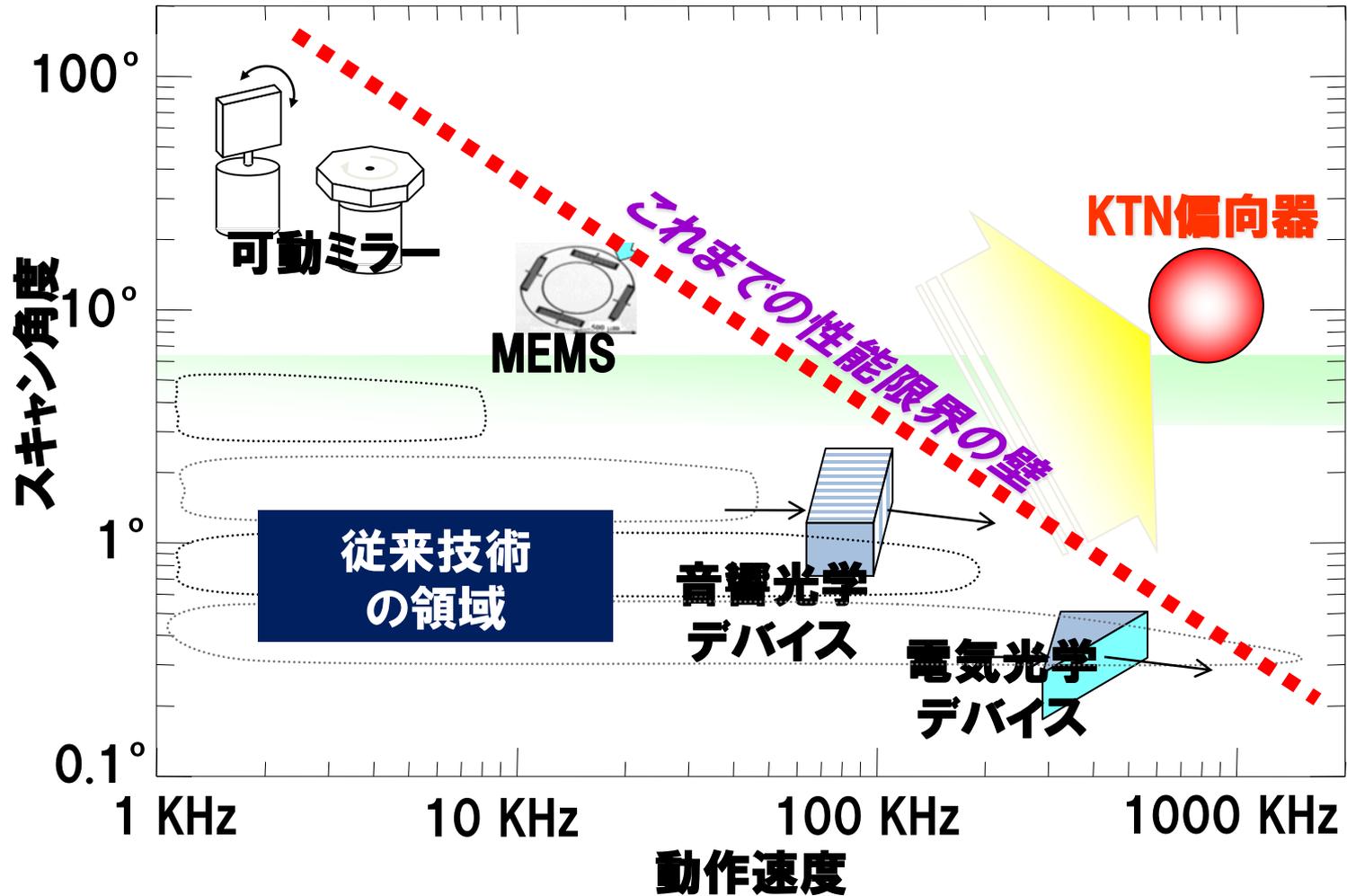
# KTN結晶の光制御



NTTで作製した高品質  
KTN結晶  
(53×53×20mm)



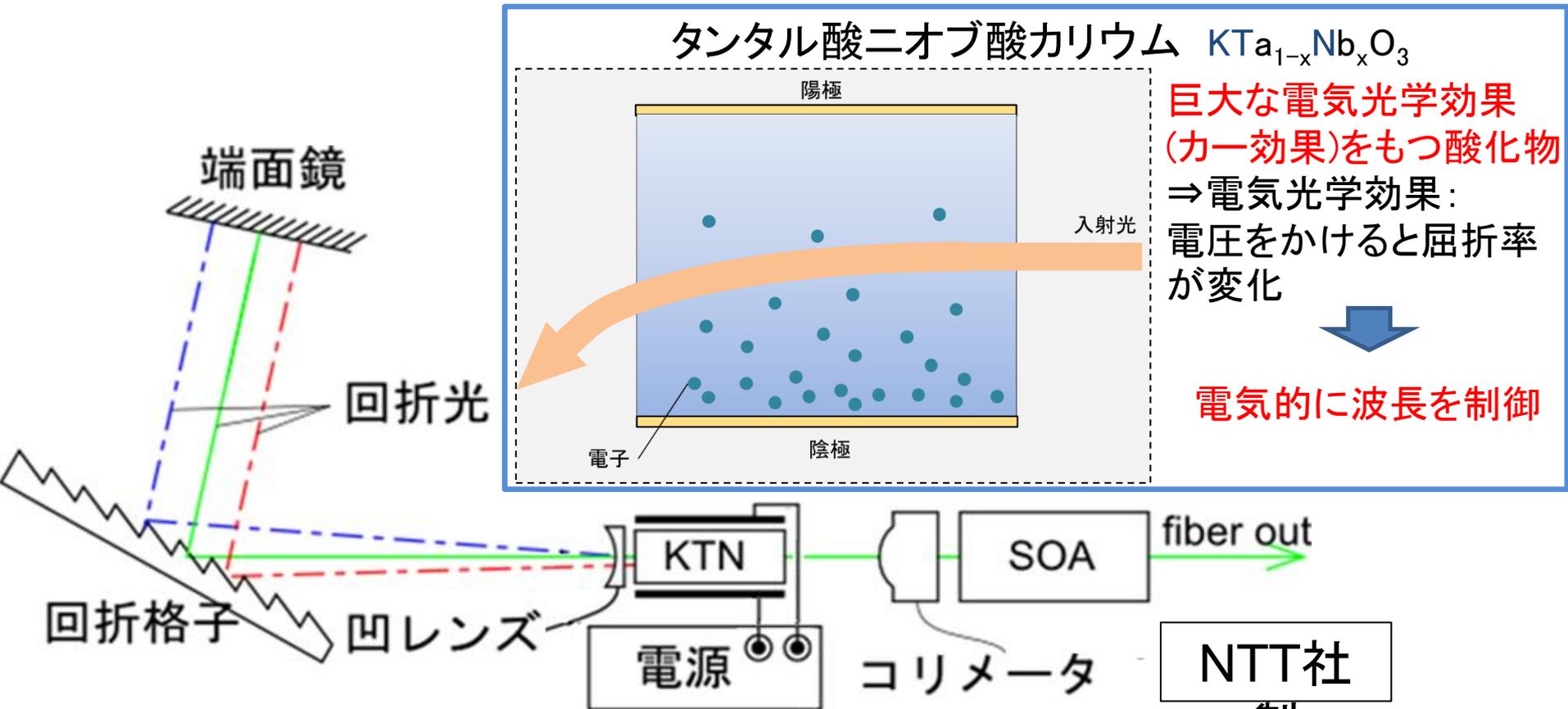
# KTNと各種偏向デバイスとの比較



# **KTN波長掃引光源を用いた 高速SS-OCTシステム**

# KTN波長掃引光源

電気光学結晶であるKTNの光偏向効果を利用

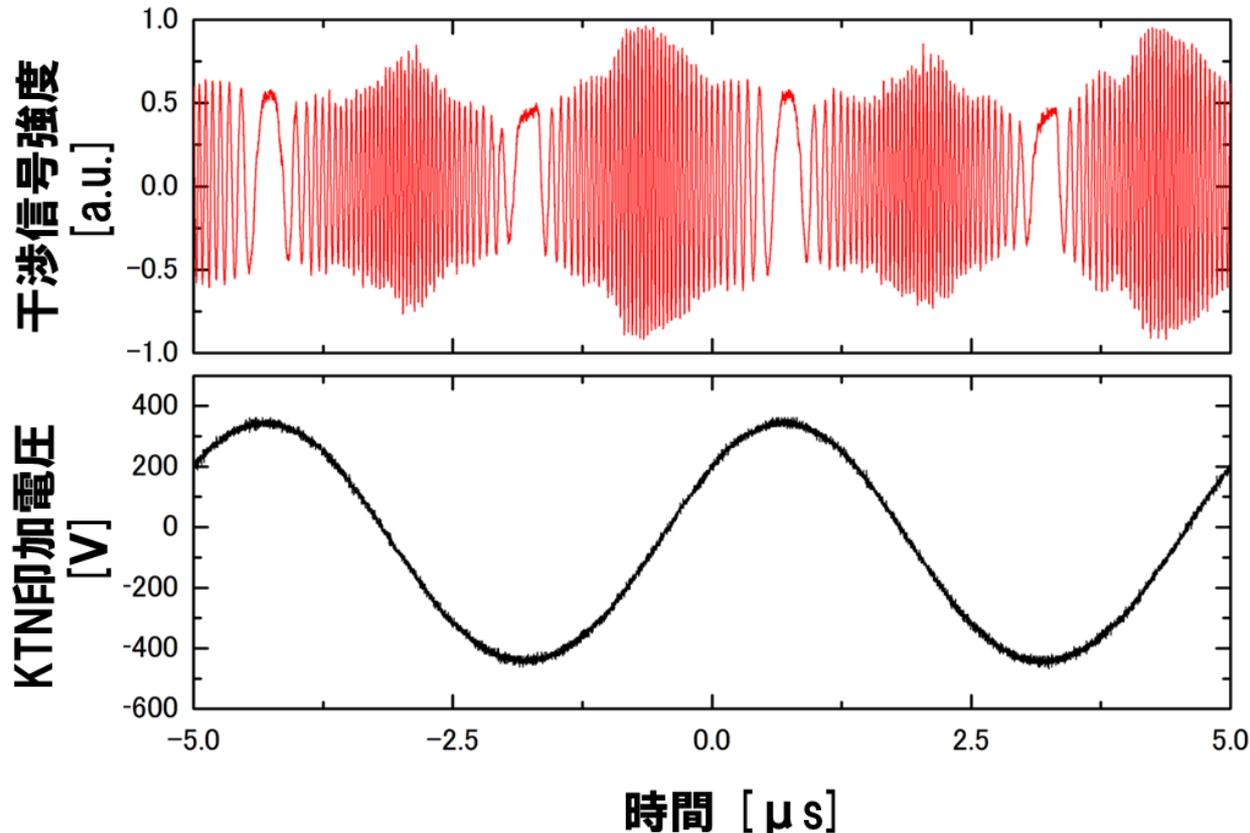


機械的動作により波長を掃引してきた  
従来の波長掃引光源よりも**高速に波長掃引が可能**

# 【KTN光源評価①】

## 高速動作（繰り返し200kHz）を確認

KTNに、200kHz、800VppのAC電圧を印加し、干渉信号を測定



**KTN印加電圧に伴い干渉信号を観測**

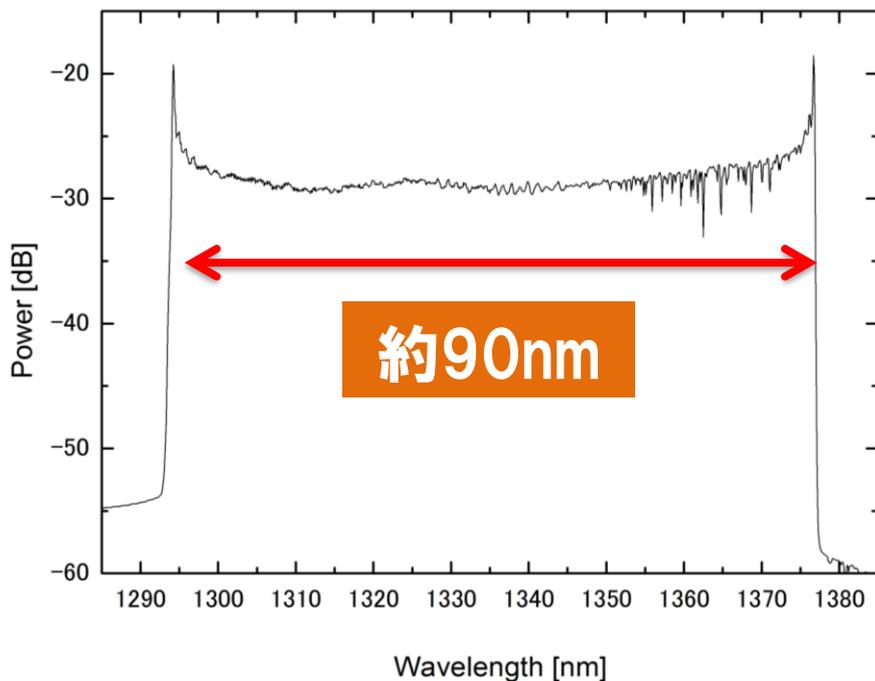
**従来光源（数十kHz程度）の約10倍の動作速度を実現**

# 【KTN光源評価②】

## 波長掃引範囲とコヒーレンス長の

### 波長掃引幅

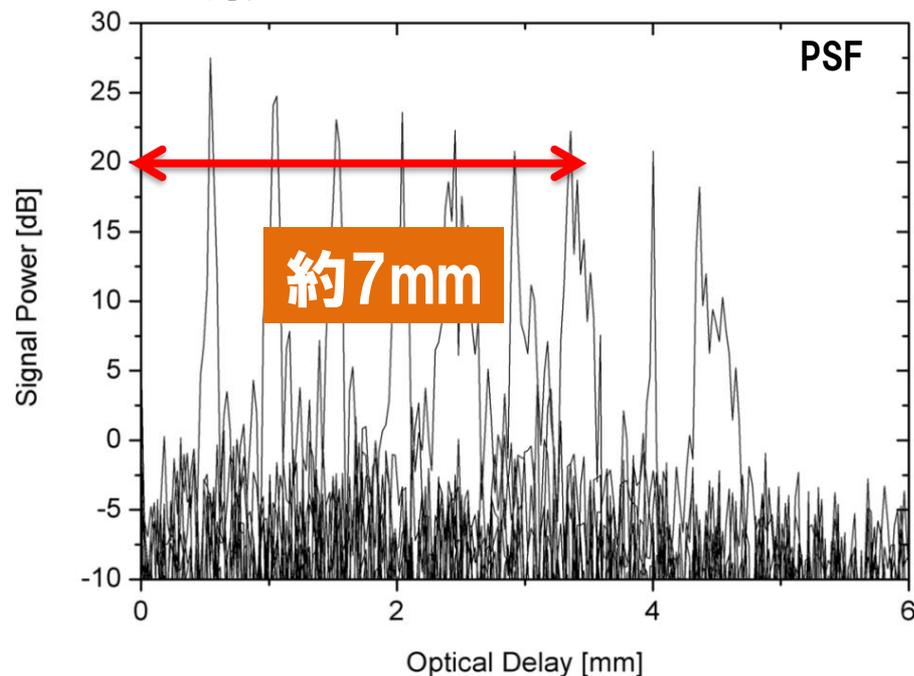
➡ 光スペクトラムアナライザ測定で積算スペクトルを測定



ほぼ要求性能通りの  
波長掃引範囲

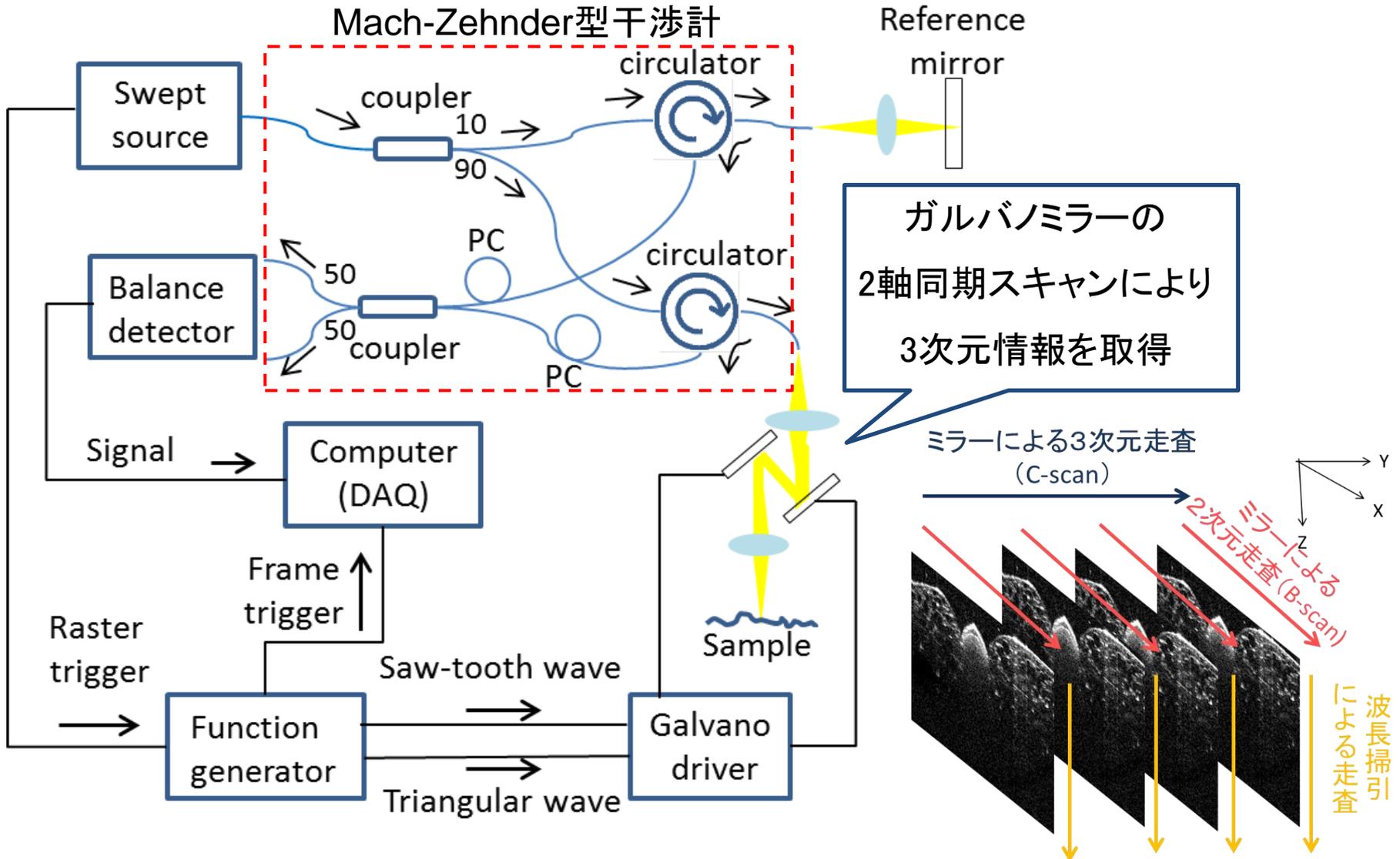
### コヒーレンス長

➡ 遅延線の距離を伸ばしていき、干渉信号強度が半分 (-6dB) になる点を測定



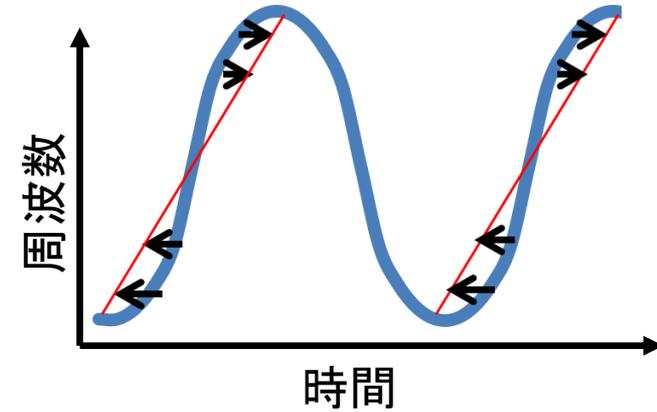
皮膚表面測定に適用可能な  
コヒーレンス長

# KTN波長掃引光源によるSS-OCTシステム



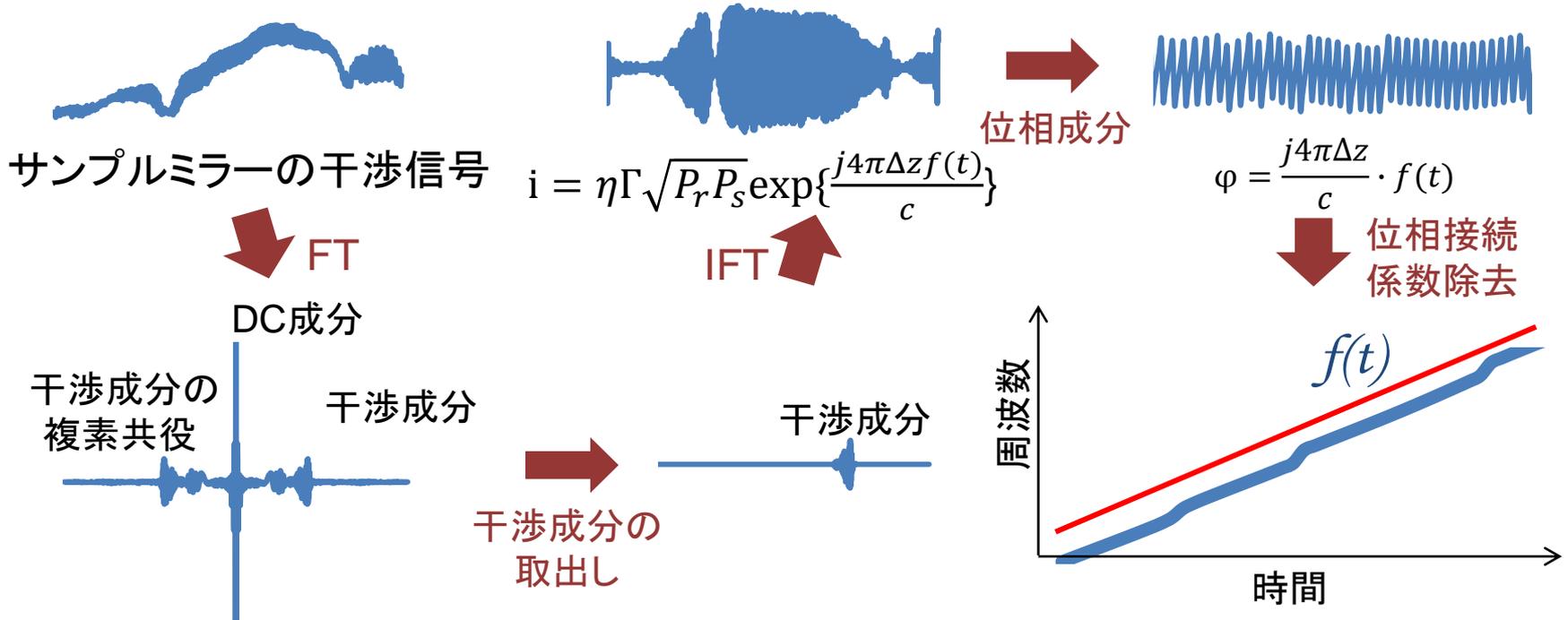
# リサンプリング処理

KTN結晶にサイン波を印加しているため時間に対する線形成が悪い  
 ⇒周波数に等間隔になるようにサンプリング点の処理



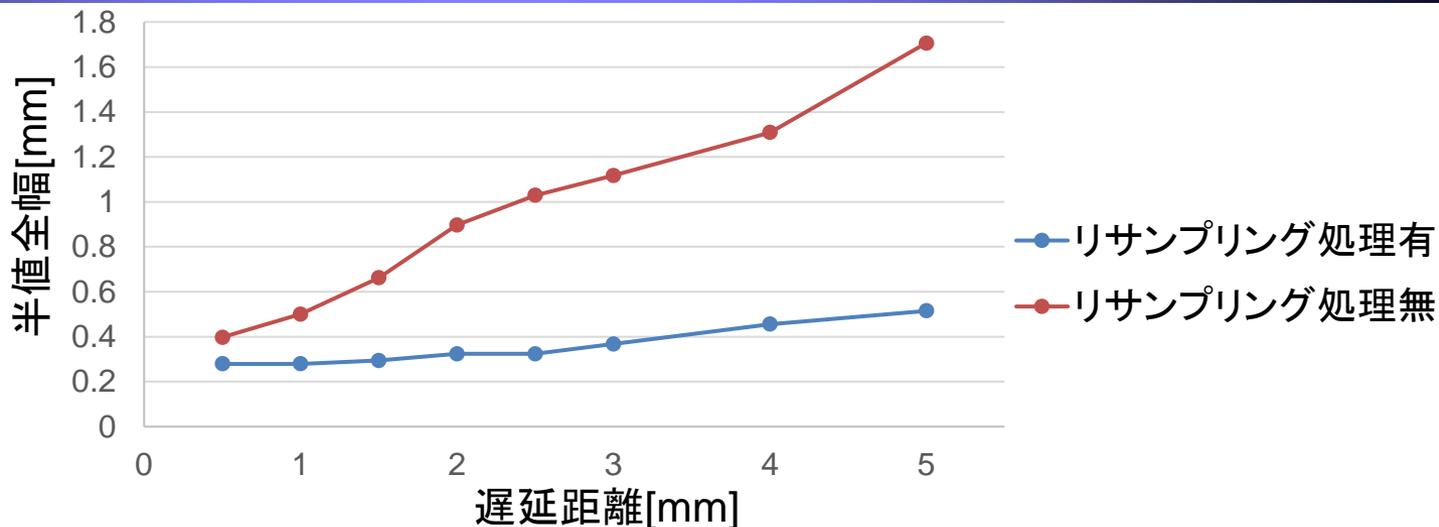
## リサンプリング処理の方法

干渉波形解析により光源の掃引特性を取得

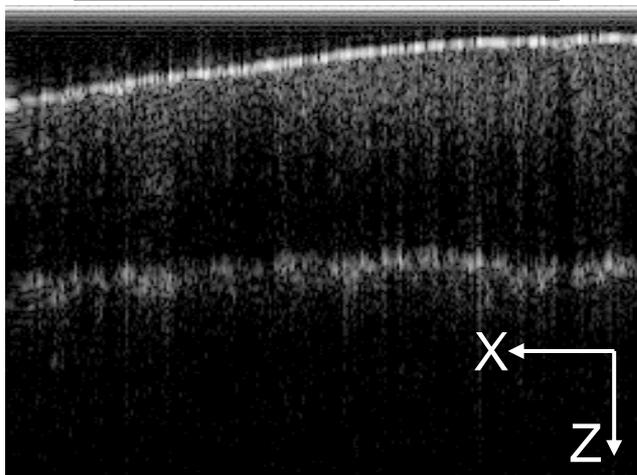


# リサンプリング処理による変化

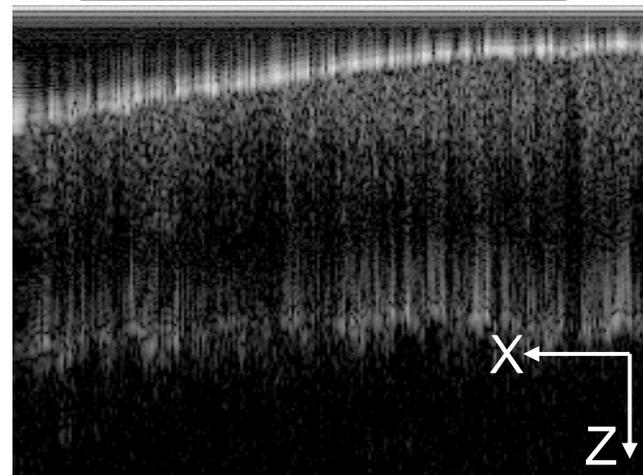
Point spread function (PSF)  
の半値全幅



リサンプリング処理有



リサンプリング処理無

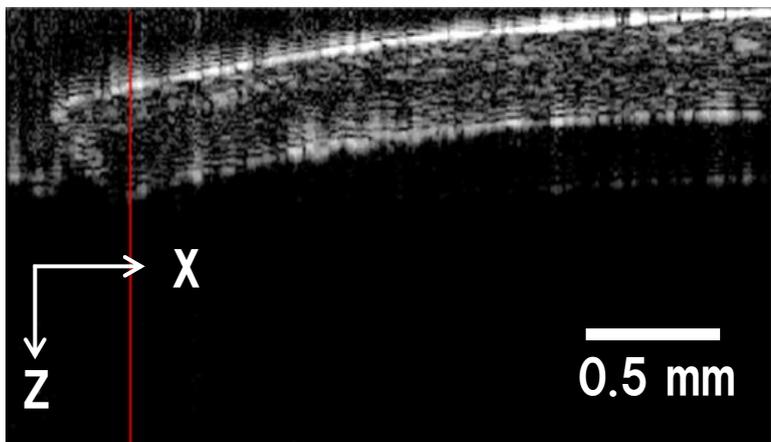


2次元OCT画像  
(ヒトの爪)

リサンプリング処理による波長掃引の校正によって深さ方向の画質が改善

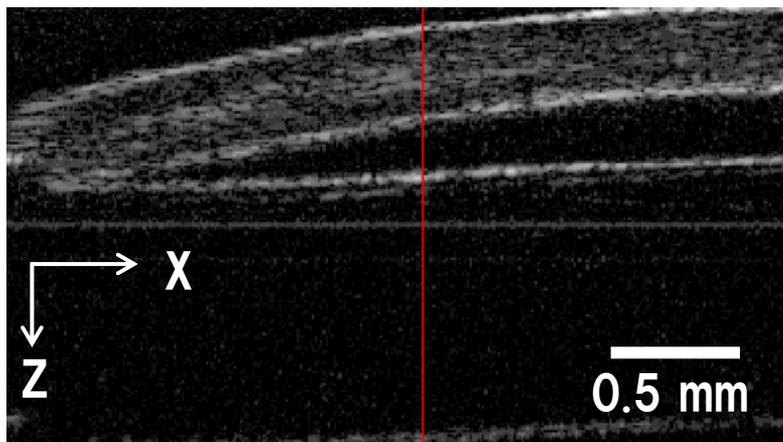
# (1) ヒトの爪の3次元OCT画像

## KTN波長掃引光源

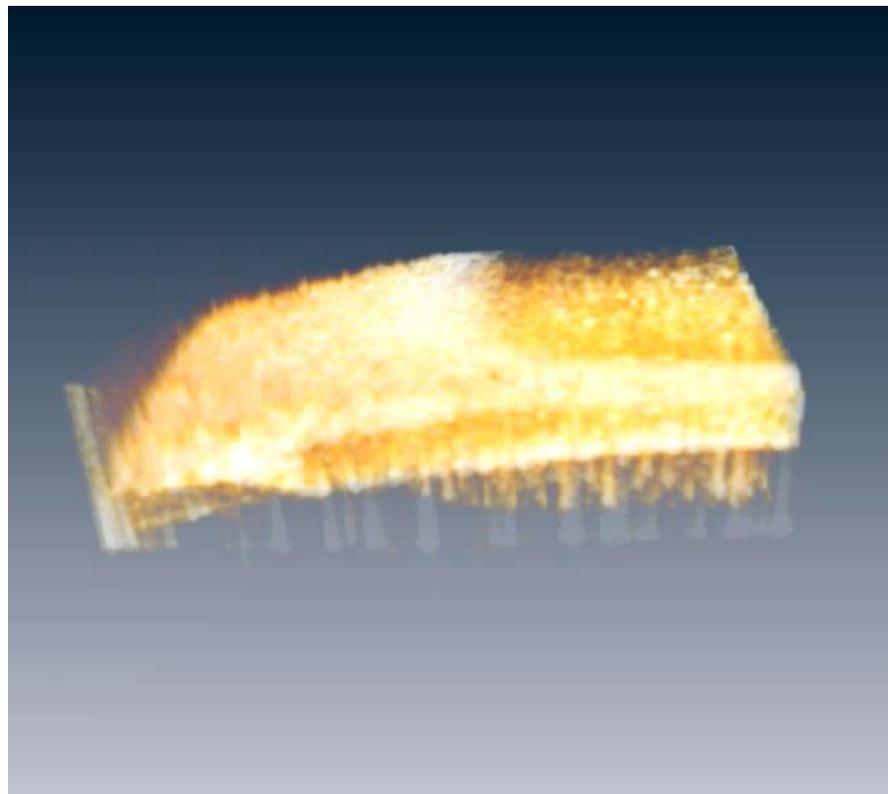


フレームレート: 200 フレーム/秒

## 従来の光源

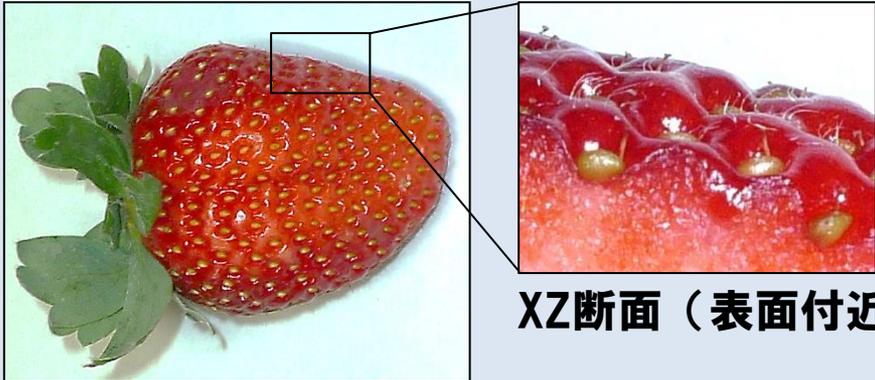


フレームレート: 20 フレーム/秒



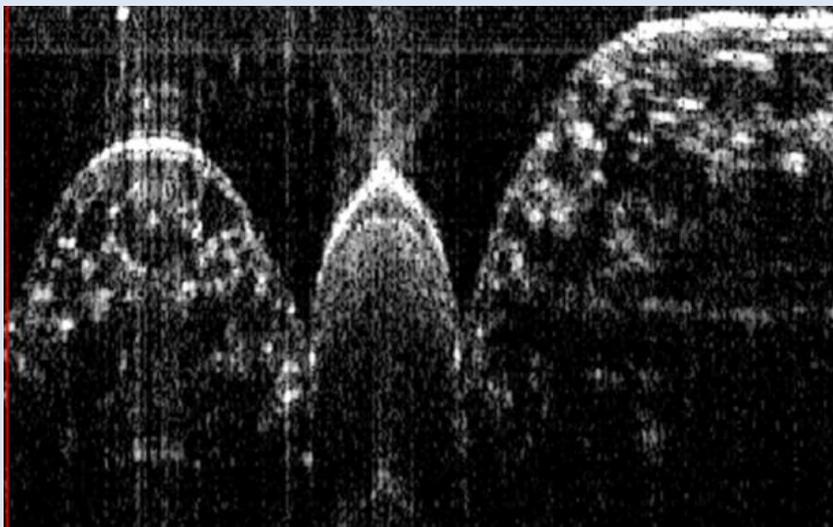
サイズ: 300 pixel (X) × 200 pixel (Y) × 200 pixel (Z)  
3D取得速度: 1 volume/秒

## (2) イチゴOCT像-3Dイメージ-

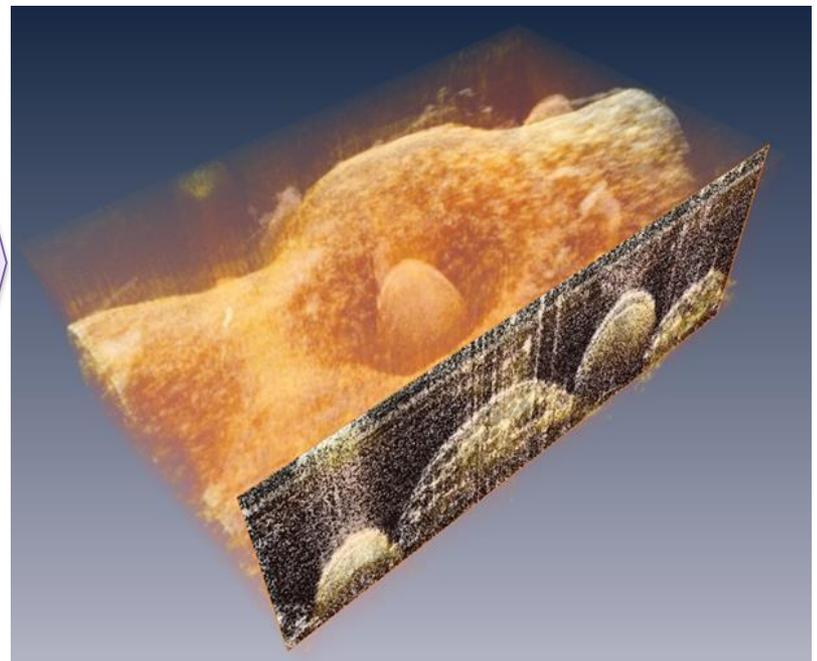


XZ断面（表面付近）

2D-OCTイメージ



3D-OCTイメージ



Y. Okabe, et al, Electron. Lett. Vol. 49, pp. 201-202 (2013).

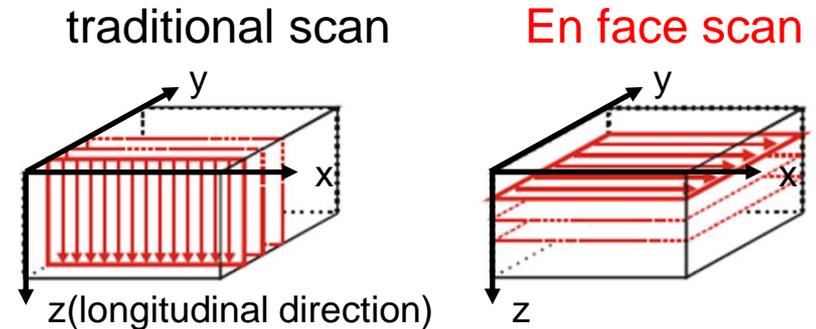
# **KTN光偏向器を用いた 高速En face OCTシステム**

# En face方式を用いたTD-OCT

## ➤ En face方式TD-OCT

TD-OCTはEn face方式を用いて眼科などの分野で応用が試みられている

En face方式とは  
一般的なOCTとは異なり、**光軸に垂直な断面(x-y)**を取得する方式

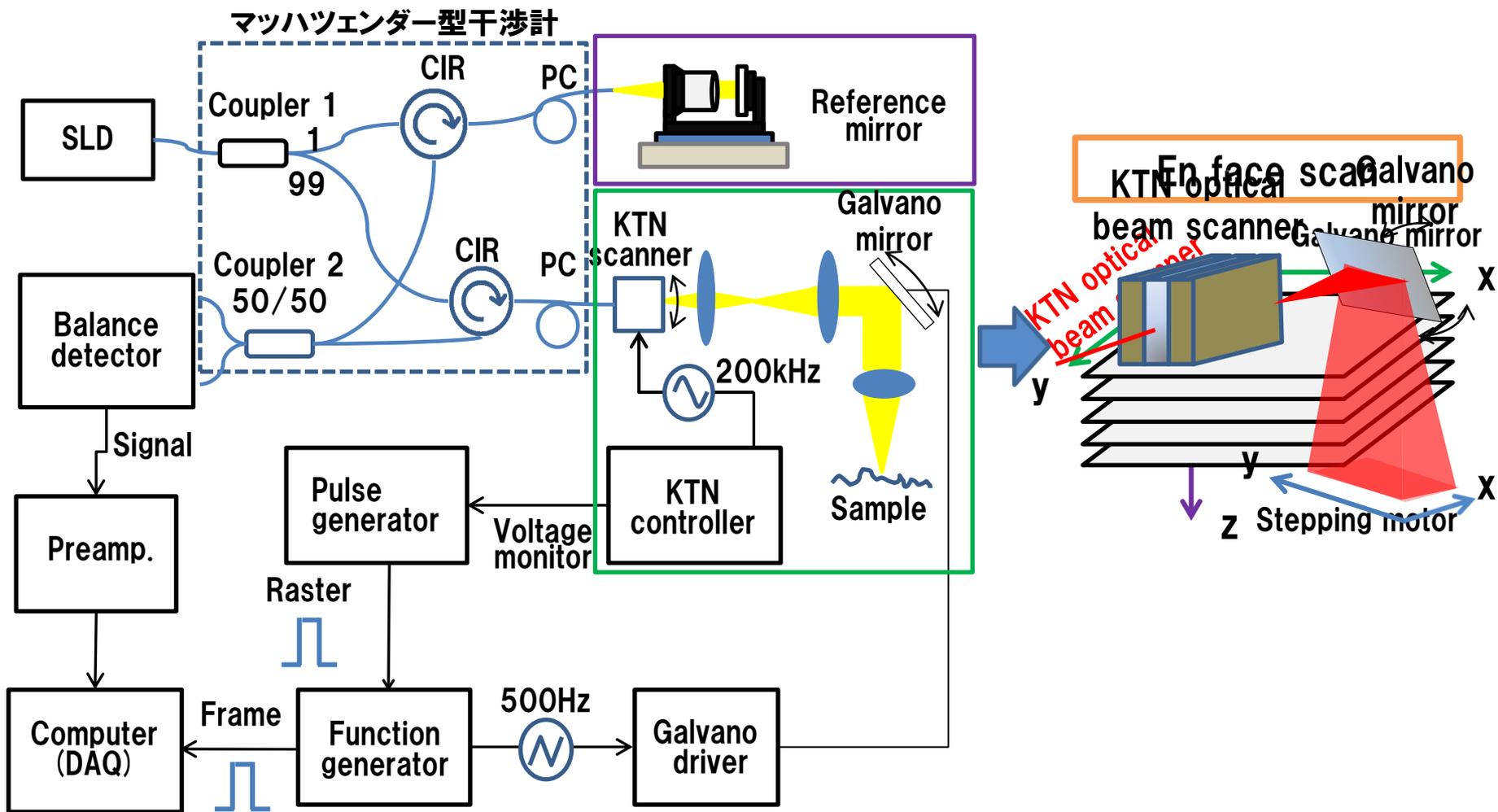


## 従来のEn face方式TD-OCTの高速化に関する問題

- ガルバノミラーによるスキャン → 機械的走査による制限
- CCDカメラを用いた一括収集 → 集光した光を使えず、低感度となる
- 動体の測定に不向き

KTN光偏向器を用いたEn face方式TD-OCTを考案

# 高速En face OCTシステム



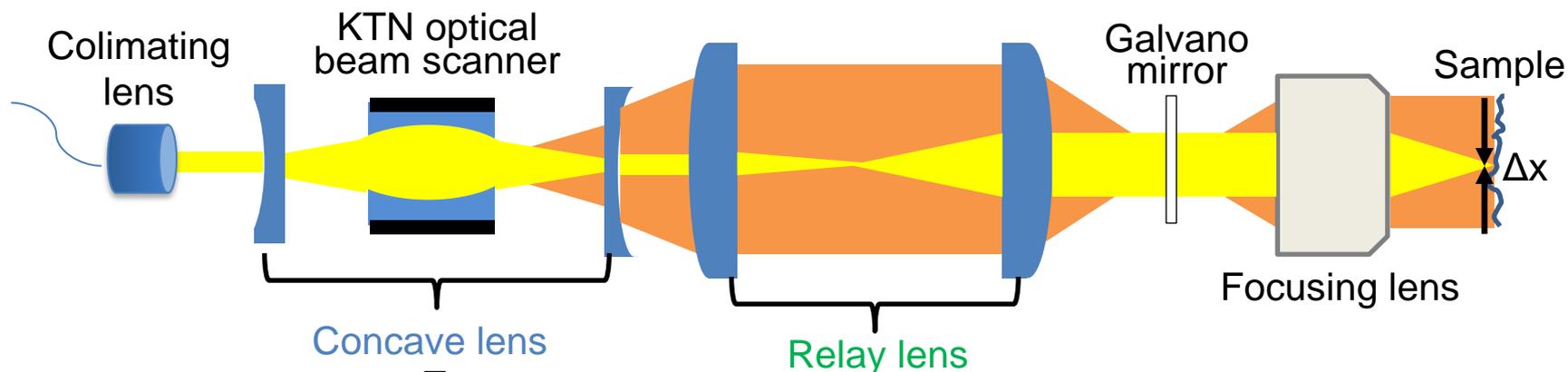
# 集光光学系

分解能 ( $\Delta x$ ) は対物レンズでのビーム径 ( $\omega$ ) に反比例

$$\Delta x = \frac{4\lambda}{\pi} \times \frac{f}{\omega}$$

$\lambda$  : 光源の中心波長

$f$  : 対物レンズの焦点距離



ビーム径を拡大

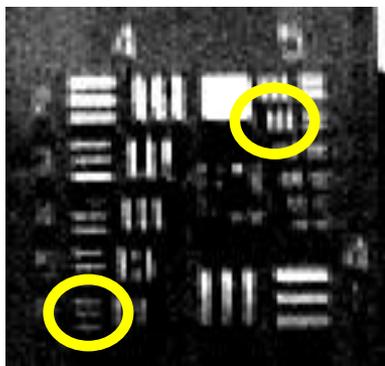
KTNによるレンズ効果の補償  
偏向角の拡大



# 性能評価

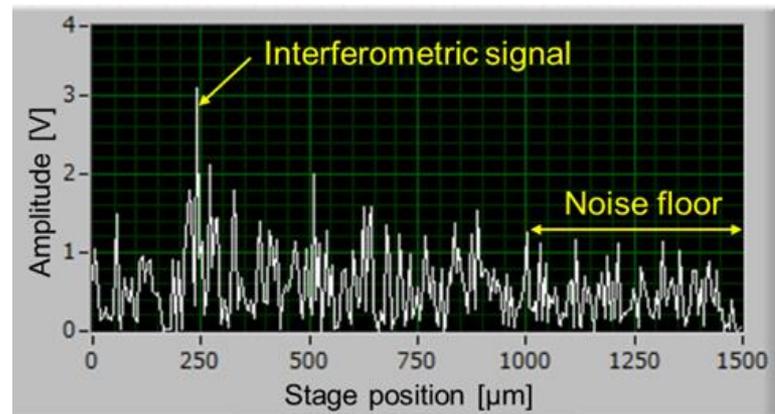
## ◎分解能

- 分解能チャートにより測定



$\Delta x = 13.9 \mu\text{m}$   
 $\Delta y = 17.5 \mu\text{m}$

## ◎システム感度



$$\text{SNR} = 20 \log \left( \frac{\text{干渉信号強度}}{\text{ノイズの標準偏差}} \right) + \text{ND} [\text{dB}]$$

ND: NDフィルタによる減弱分の信号強度[dB]

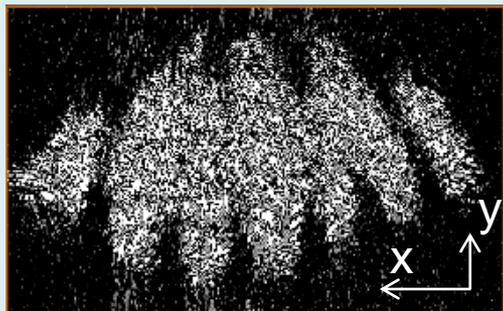
SNR = 74.78 dB

ヒト指先のイメージングに適応可能な分解能と感度

# ヒト指先のOCT画像取得

En face平面

x:3.0mm  
y:2.0mm



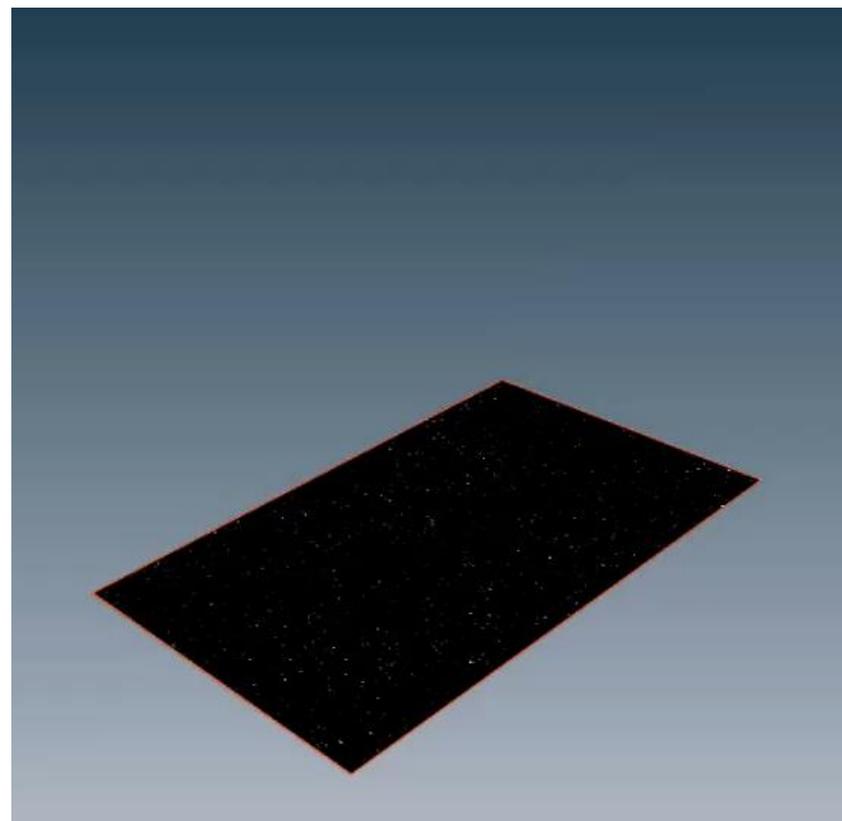
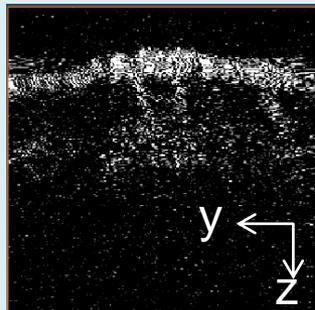
xz平面

x:3.0mm  
z:1.5mm



yz平面

y:2.0mm  
z:1.5mm



400(x) × 250(y) × 250(z) voxels

フレームレート 500 fps  
3次元データ取得時間 0.5 s

# 考察:データ取得時間

実験と同様の400 × 250 × 250voxelを想定

ガルバノミラーによるEn face OCT

スキャン	機構	速度
x軸	ガルバノミラー	1.25 Hz
y軸	ガルバノミラー	500 Hz
z軸	ステップモータ	0.0025 Hz

KTN光偏向器を用いた高速En face OCT

スキャン	機構	速度
x軸	ガルバノミラー	500 Hz
y軸	KTN光スキャナー	200 kHz
z軸	ステップモータ	1 Hz

フレームレート 1.25 fps  
En face像取得時間 0.4 秒  
3Dデータ取得時間 200 秒



フレームレート 500 fps  
En face像取得時間 0.001 秒  
3Dデータ取得時間 0.5 秒

KTN光スキャナーを用いることで取得速度が400倍に

# **KTN光スキャナーを搭載した 硬性内視鏡型OCTシステム**

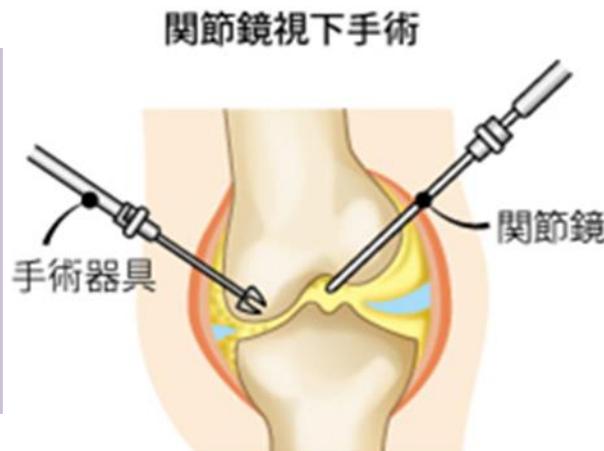
# 背景

## 整形外科の現状

- 整形外科分野において関節炎や軟骨症等の疾患の症例が多い。
- 従来の硬性内視鏡ではCCDカメラ等による形態情報のみに限定されるため、関節手術のための硬性内視鏡OCTプローブが注目されている。

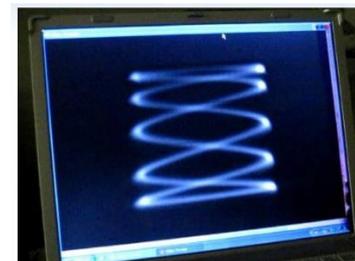
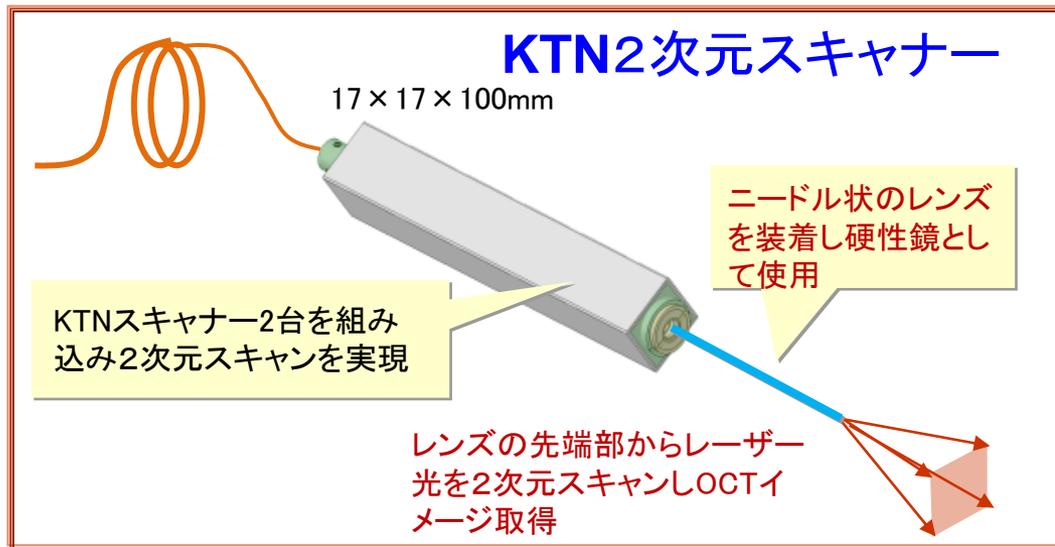
## 整形外科領域における関節手術の手法

- 膝の関節手術には外径4.0mm、30°斜視鏡を用いて、8.0cm程度の穴をあけて関節鏡を差し入れる。
- 実際にOCTプローブを用いる際には関節鏡の代わりに挿入する



# KTN2次元スキャナー

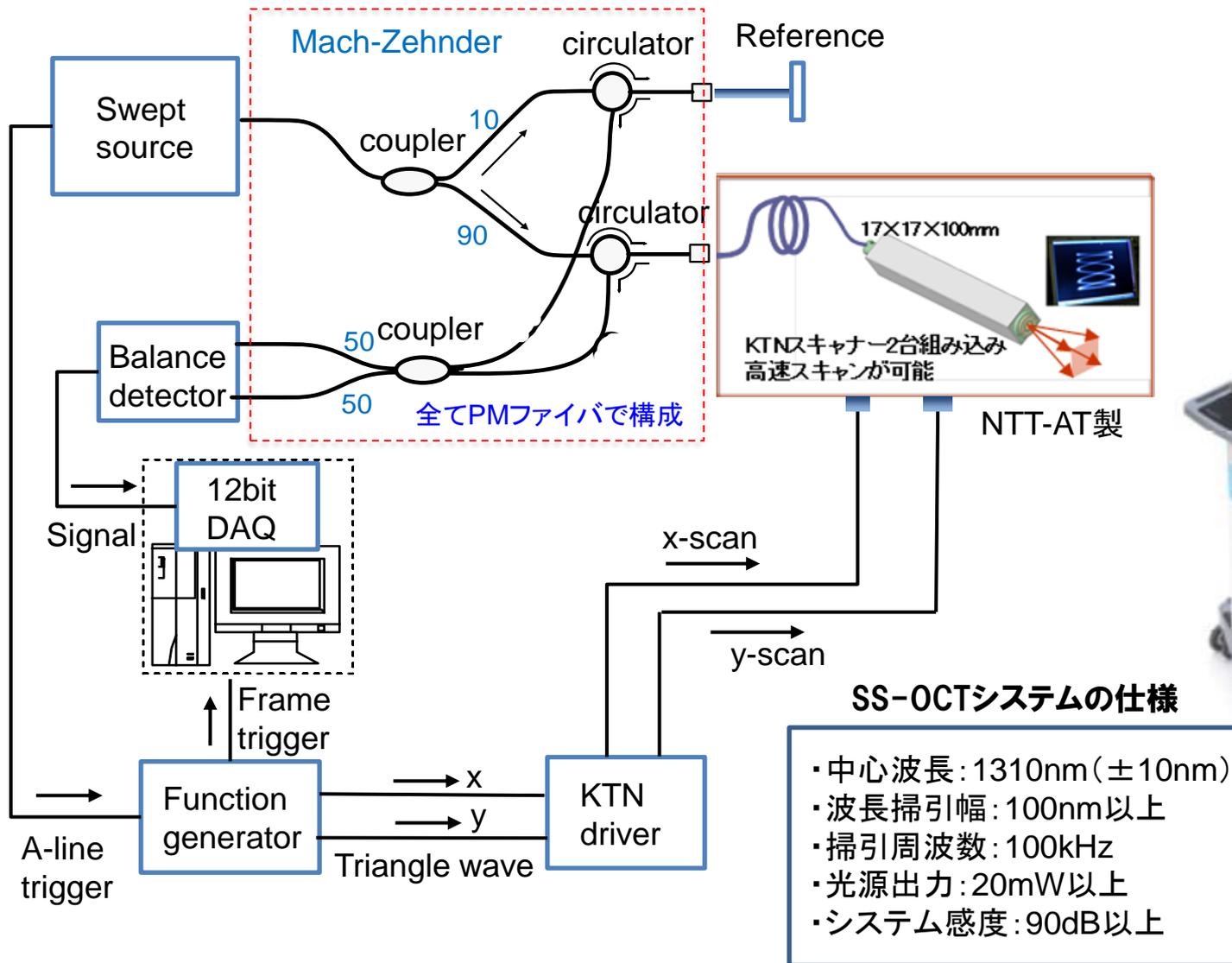
- K T Nスキャ 2台を配置し、リレイレンズにより偏向原点を一致させた構造。ニードル状のレンズに結合可能。
- X軸、Y軸共に高速かつ自在なスキャンが可能



## 世界初の硬性内視鏡による軟骨の2次元OCTイメージ取得を目指す



# KTN内視鏡型SS-OCT装置の構成図



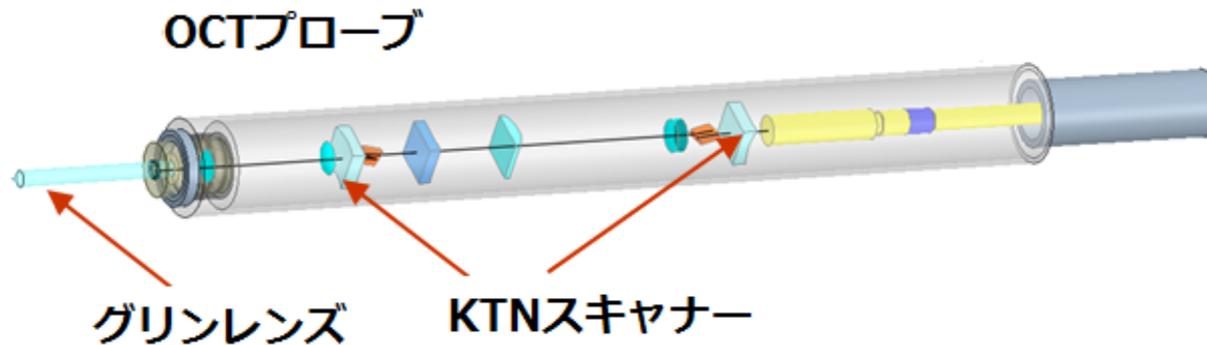
可搬型装置  
のイメージ



## SS-OCTシステムの仕様

- ・中心波長: 1310nm (±10nm)
- ・波長掃引幅: 100nm以上
- ・掃引周波数: 100kHz
- ・光源出力: 20mW以上
- ・システム感度: 90dB以上

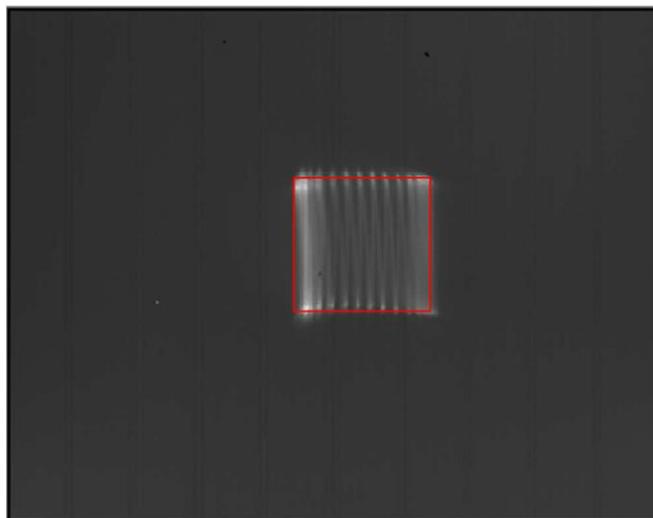
# KTN光プローブの構成



- KTNプローブ: 二次元KTN光スキャナーを搭載した  
テレセントリック系
- KTNプローブのグリーンレンズ:  
生体組織にビームを誘導するため

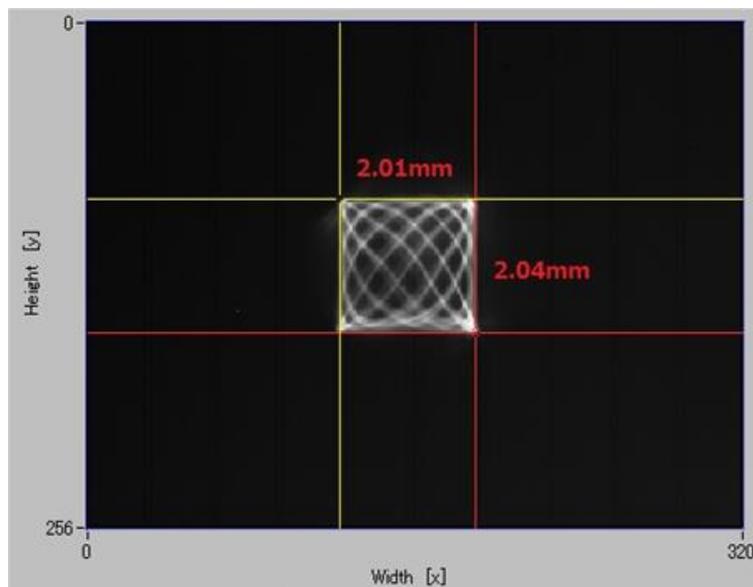
# KTN光スキャナー 2Dスキャン例

ラスタースキャン



2x2mm<sup>2</sup>

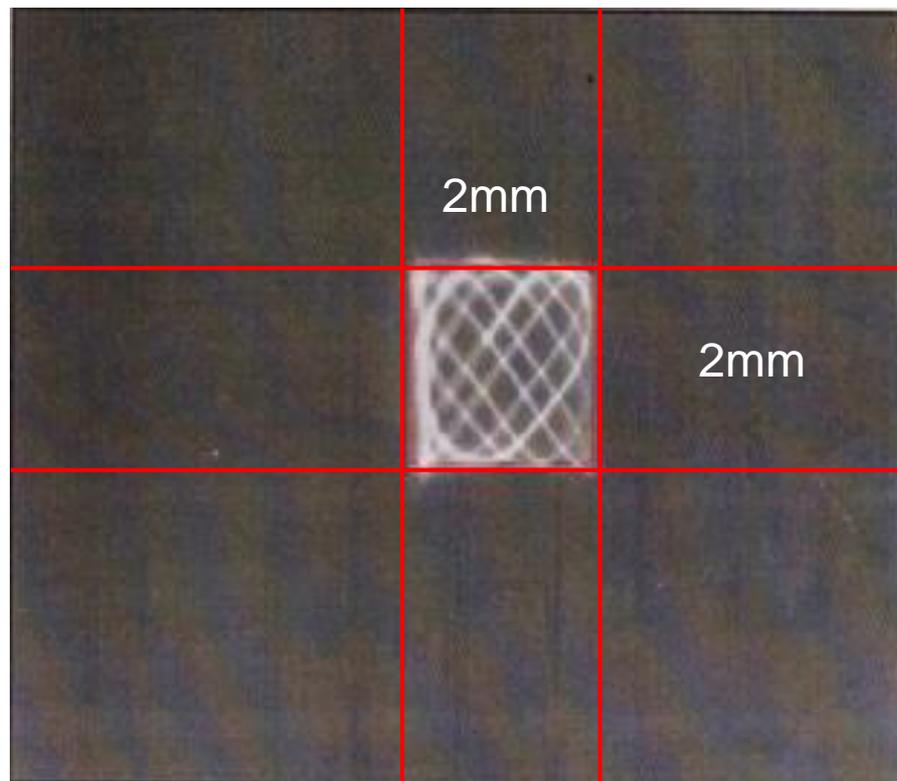
リサーチユースキャン



# リサーチイメージ

## スキャナー動作条件

動作条件	CH1	CH2
プレバイアス① 印加時間3sec	-280V	-280V
プレバイアス② 印加時間10sec	+330V	+380V
AC電圧	800V	770V
AC周波数	400Hz	480Hz
DC電圧	-20V	0V
KTNチップ温度	31.7°C	24.7°C

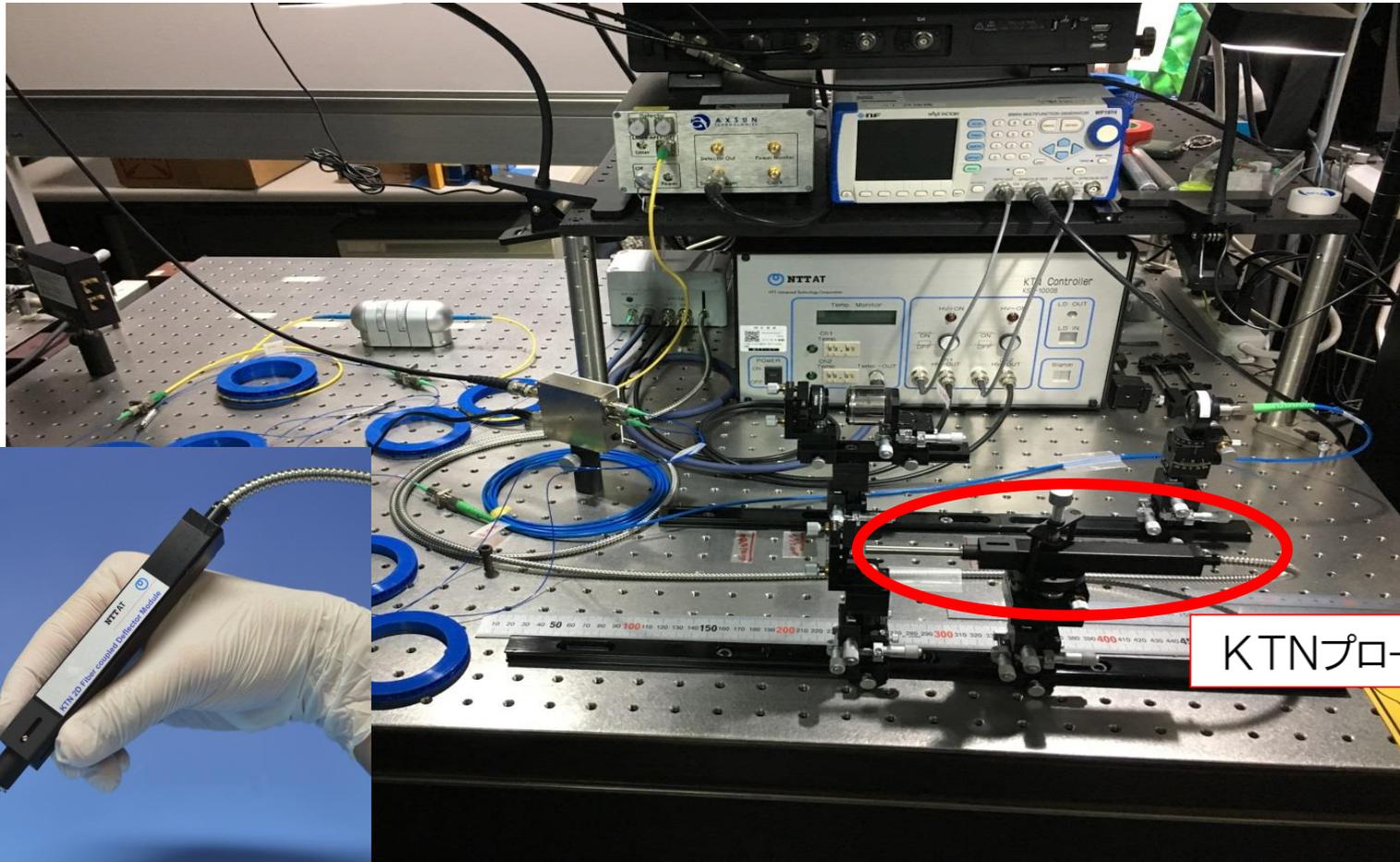


偏向角X	133mrad
偏向角Y	131mrad

## カメラ仕様

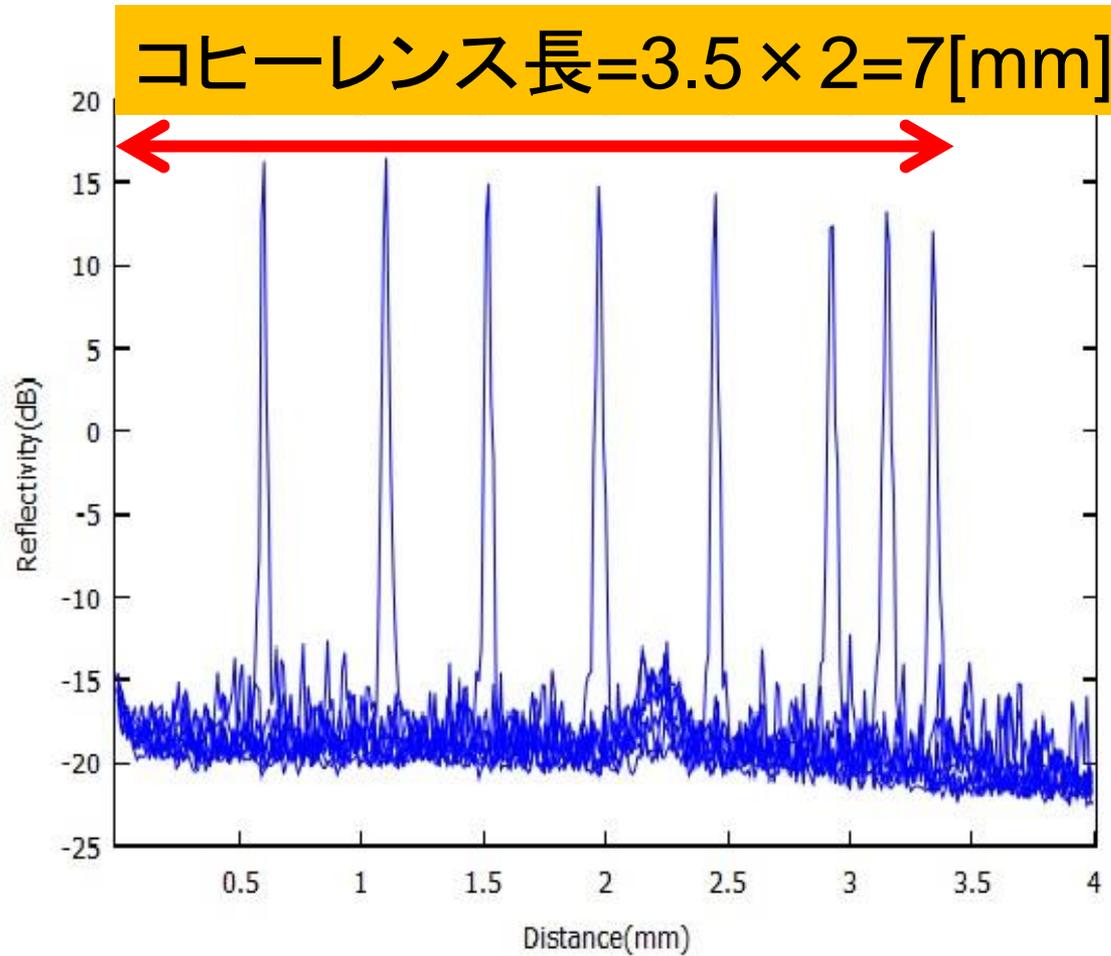
- 有効画素数:320×256
- 画素サイズ:30×30μm
- 有効素子サイズ:7.68×9.60mm

# KTN硬性内視鏡OCTシステムの全体図

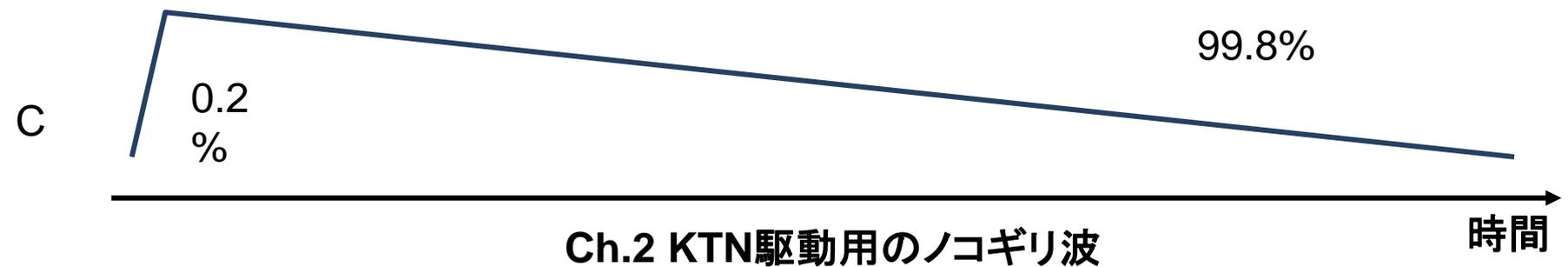
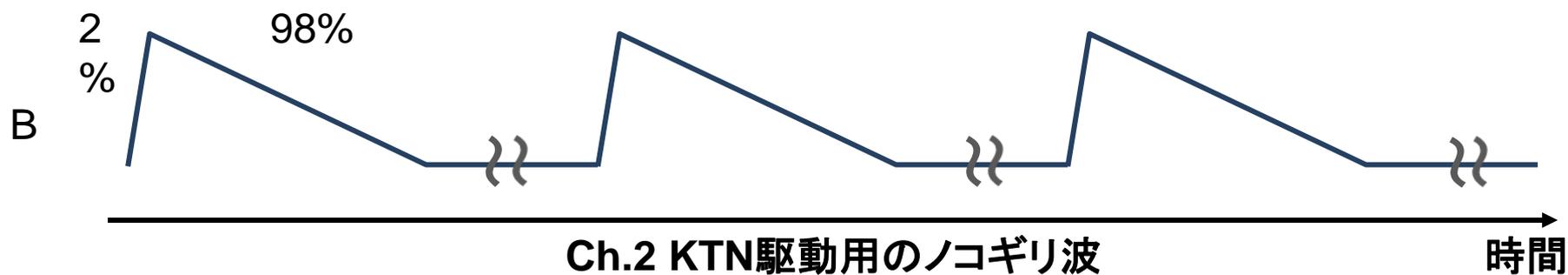
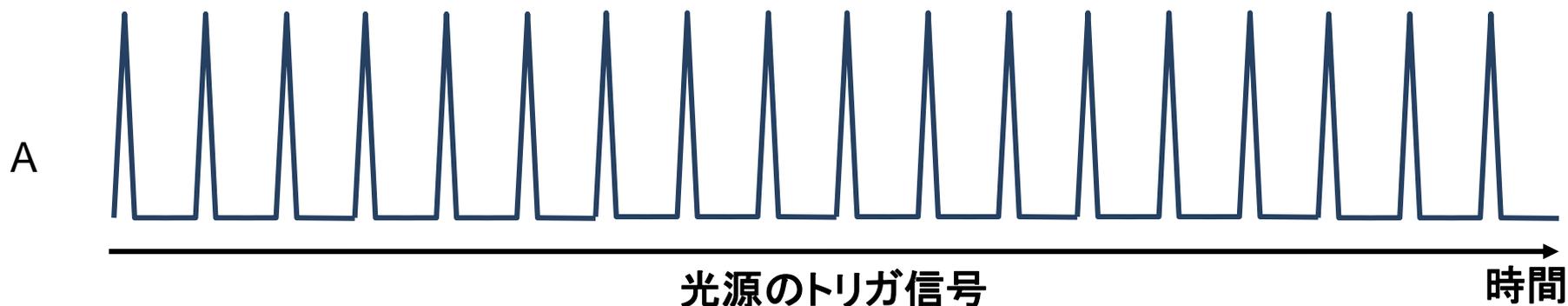


KTNプローブ

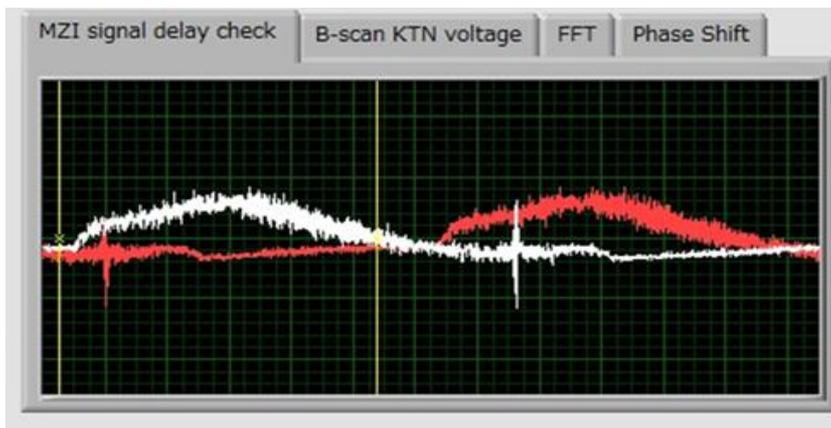
# 波長掃引光源のコヒーレンス長



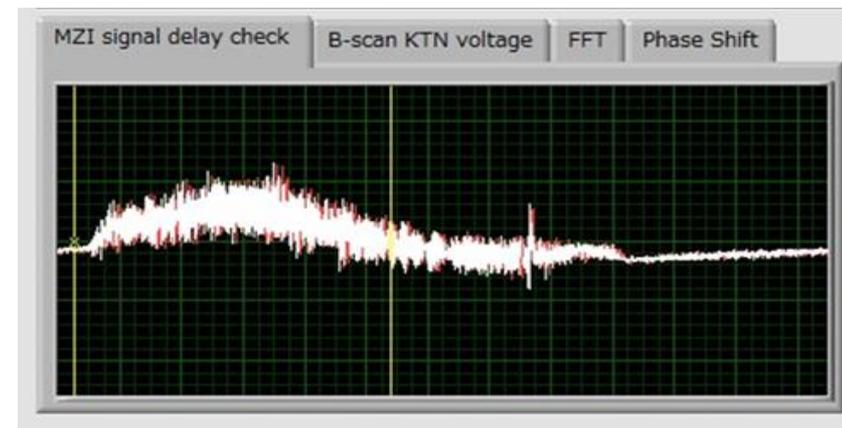
# 同期方法



# OCTデータ取得プログラム



補正前



補正後

# ヒト指先のOCT画像取得

## 撮像条件

KTN driver

Ch.1 480V 1Hz

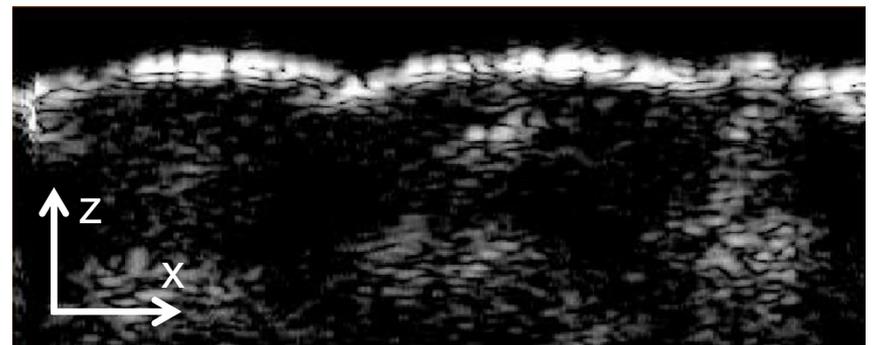
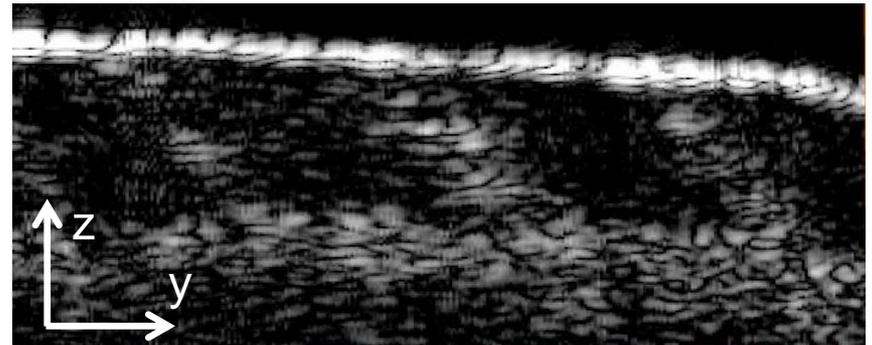
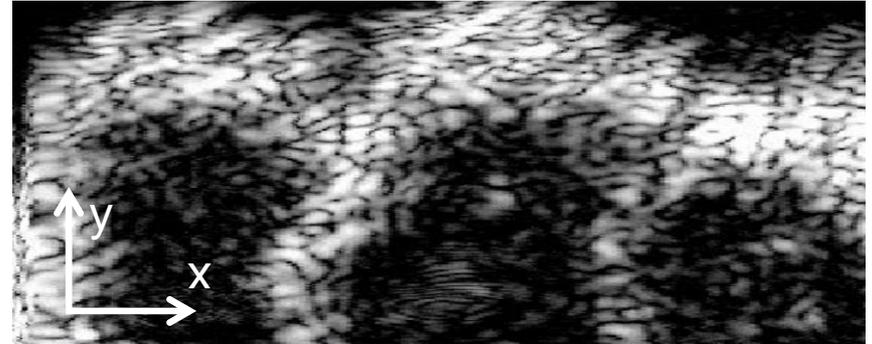
Ch.2 550V 300Hz

Size(voxel):

$320(x) \times 286(y) \times 180(z)$

Size(mm):

$1.42(x) \times 1.91(y) \times 0.64(z)$



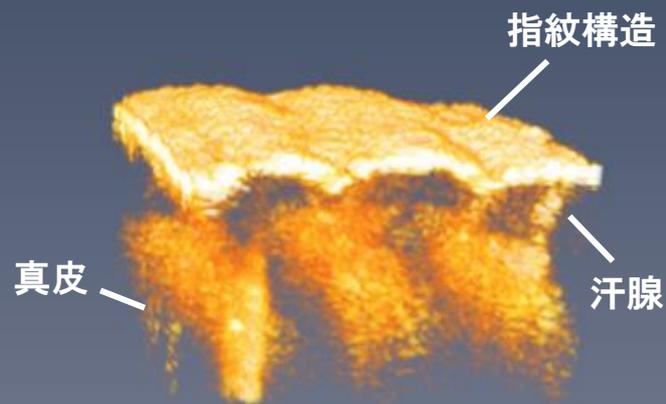
# 3D-OCT画像

撮像条件

KTN driver

Ch.1 480V 1Hz

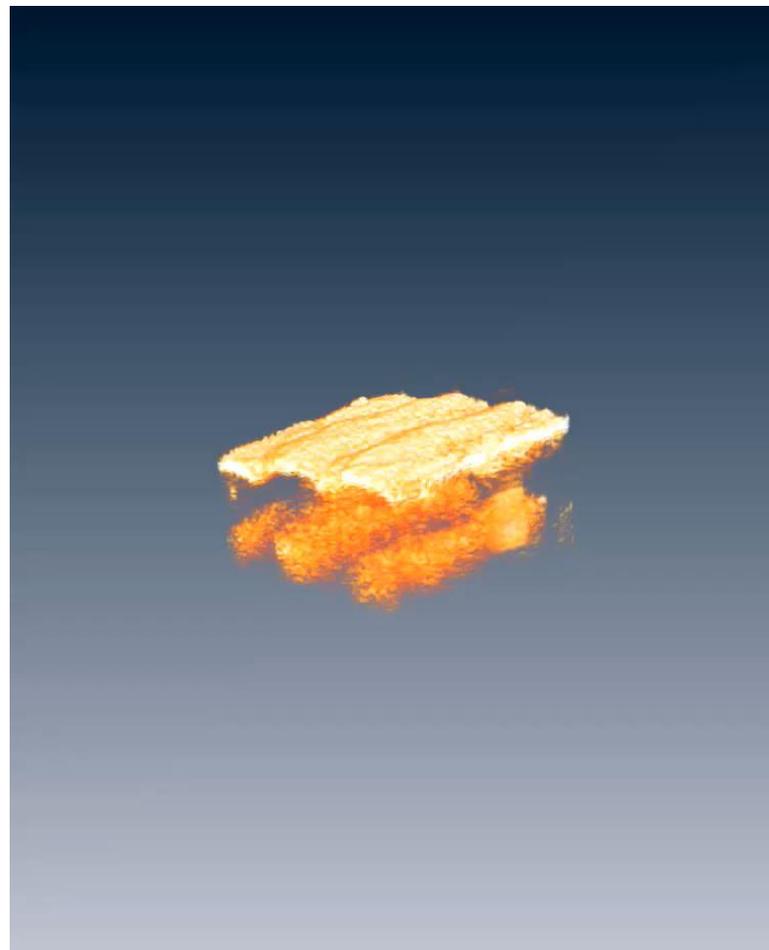
Cg.2 550V 300Hz



320(x) × 286(y) × 180(z)voxels

1.42(x) × 1.91(y) × 0.64(z)mm

ヒト指先の3D OCT画像



# KTN光偏向器によるOCTイメージングへの応用

- KTN波長掃引光源を用いたSS-OCTの開発  
200,000ライン/s の高速SS-OCTを実現した

- KTN光スキャナーを用いたEn face OCTシステムにより  
従来の400倍以上の高速化500fpsを実現した



FD-OCTに匹敵する**最高速のEn face OCT**

- KTN光プローブを用いた**硬性内視鏡型OCT**の開発



**3次元OCTによる構造解析への応用**

# 謝辞

本研究はAMED先端計測分析技術・機器開発プログラム、及びNEDOクリーンデバイス社会実装推進事業の支援を受け行われました。並びにKTN光偏向器を提供頂いたNTTデバイスイノベーションセンタ、NTTアドバンステクノロジーの方々に謝意を表します。