

# テラヘルツ・カラーズキャナーの 再構成と強度補正によるスペクトル 歪み補正の検討

**安井研究室**

**M2 北口貴之**

# カラースキヤナー

可視光を用いた  
分光イメージング装置



可視光の物体浸達度により表面近傍の情報しか得られない。

物質透過性の良好な電磁波

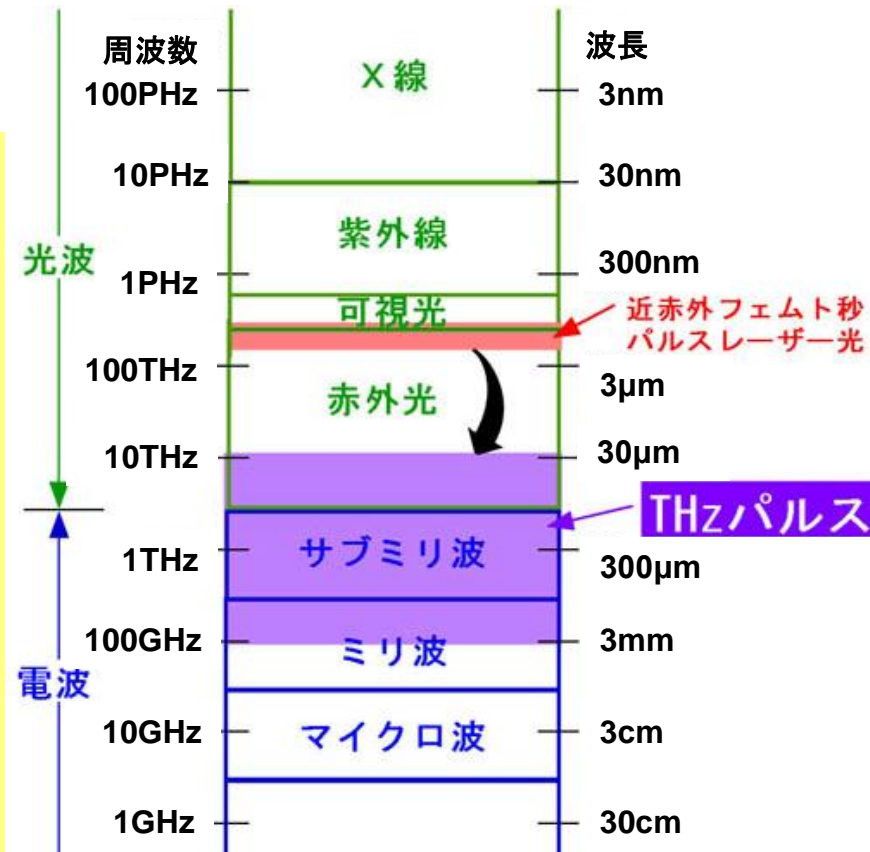
物質内部を読み取る  
カラースキヤナー

用途：  
文書や写真の読み取り

# テラヘルツ波 (THz波)

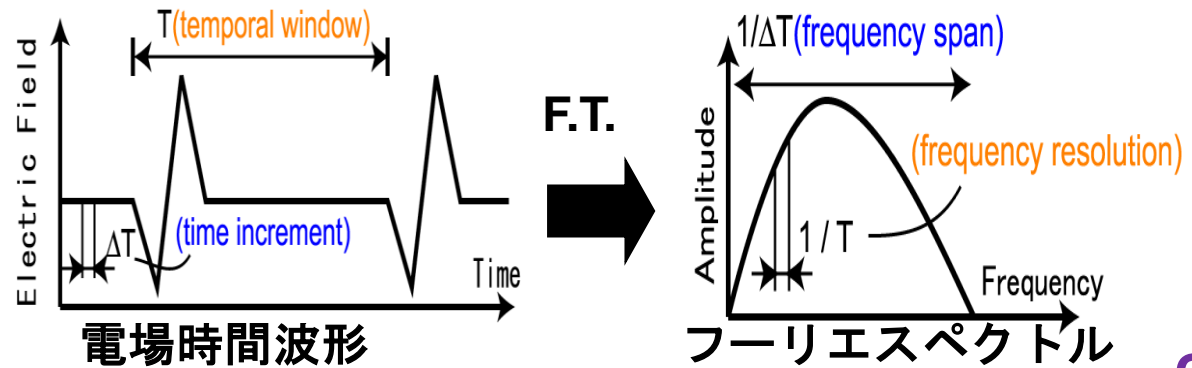
## THz波の特徴

- ・ 非金属材料に対する適度な物質透過特性
  - ・ 低侵襲性
  - ・ イメージング計測が可能
  - ・ 分光計測が可能
  - ・ 各種物質が特徴的な吸収スペクトルを示す (指紋スペクトル)
- ⇒ 分光学的成分分析が可能



有力な検査ツール

# THz時間領域分光イメージング装置

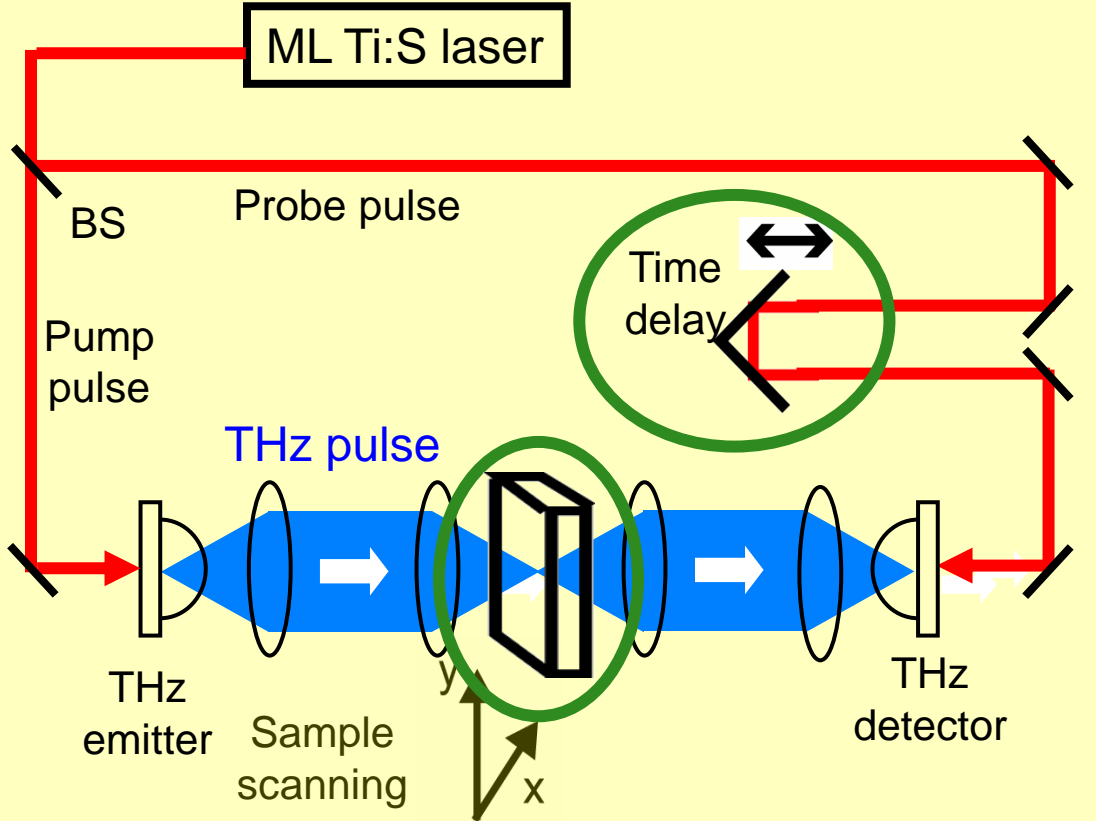


## THz時間領域分光法 (THz-TDS)

### 長い測定時間

数分@THzスペクトル波形

## 2次元THz-TDSイメージ



## 点計測

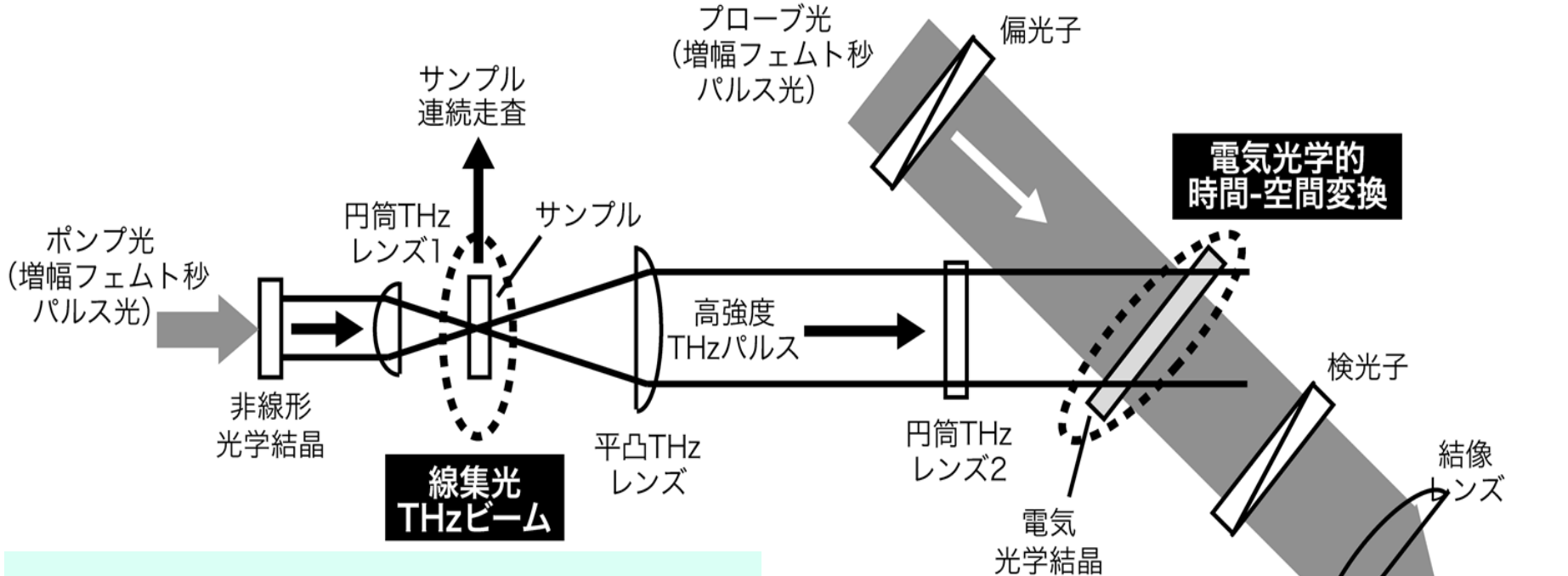
機械的走査機構

- ・ 時間遅延
- ・ サンプル位置

数時間 @2次元イメージ

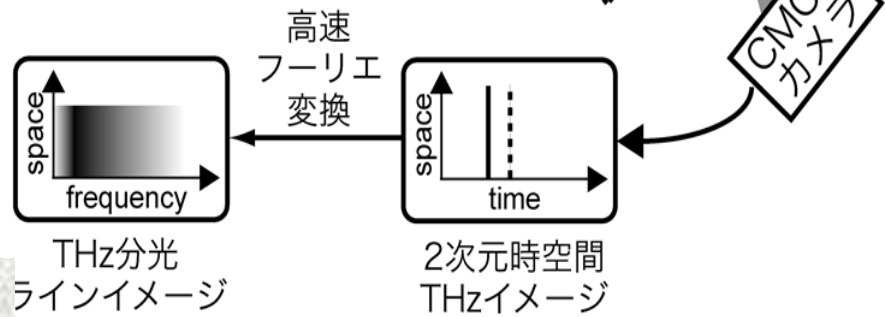
## 測定対象は 静止物体のみ

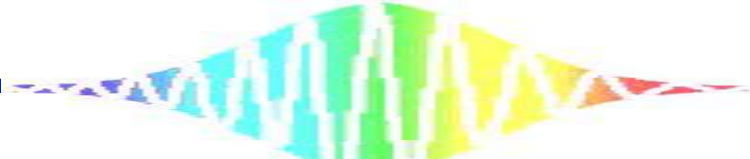
# THzカラースキヤナー



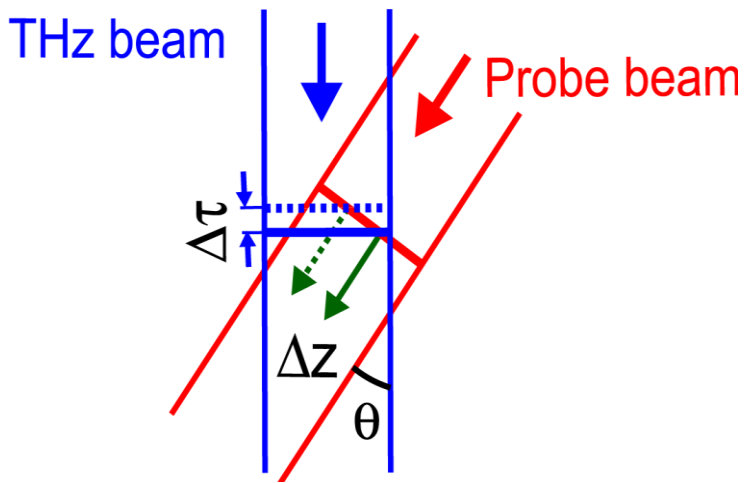
**線集光THzビーム**  
+  
**電気光学的時間-空間変換**

**実時間THzカラーライン**  
**イメージ**



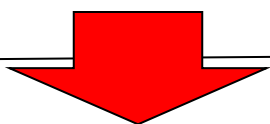


# 電気光学的時間-空間変換 (非共軸2D-FSEOS)



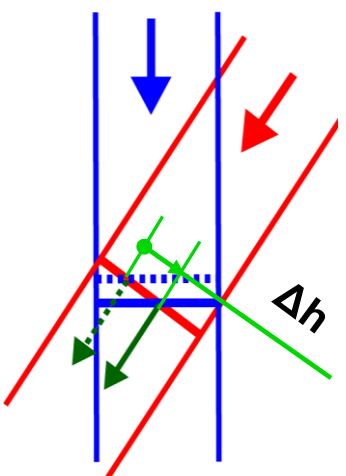
THzビームの時間的に異なる波面が、プローブビーム波面の異なる位置で重なる

$$V_{opt} = V_{THz} \cos \theta$$



位相整合がとれていれば

時間遅延  $\Delta\tau$  が空間分布  $\Delta h$  に変換

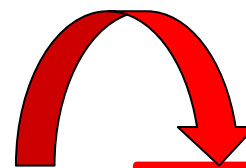


$$\Delta\tau = \frac{\Delta h \tan \theta}{c}$$

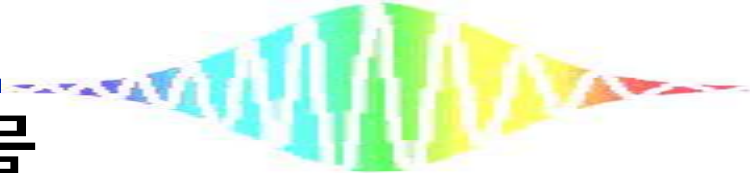
時間情報が空間情報に

# THzカラスキャナーの課題

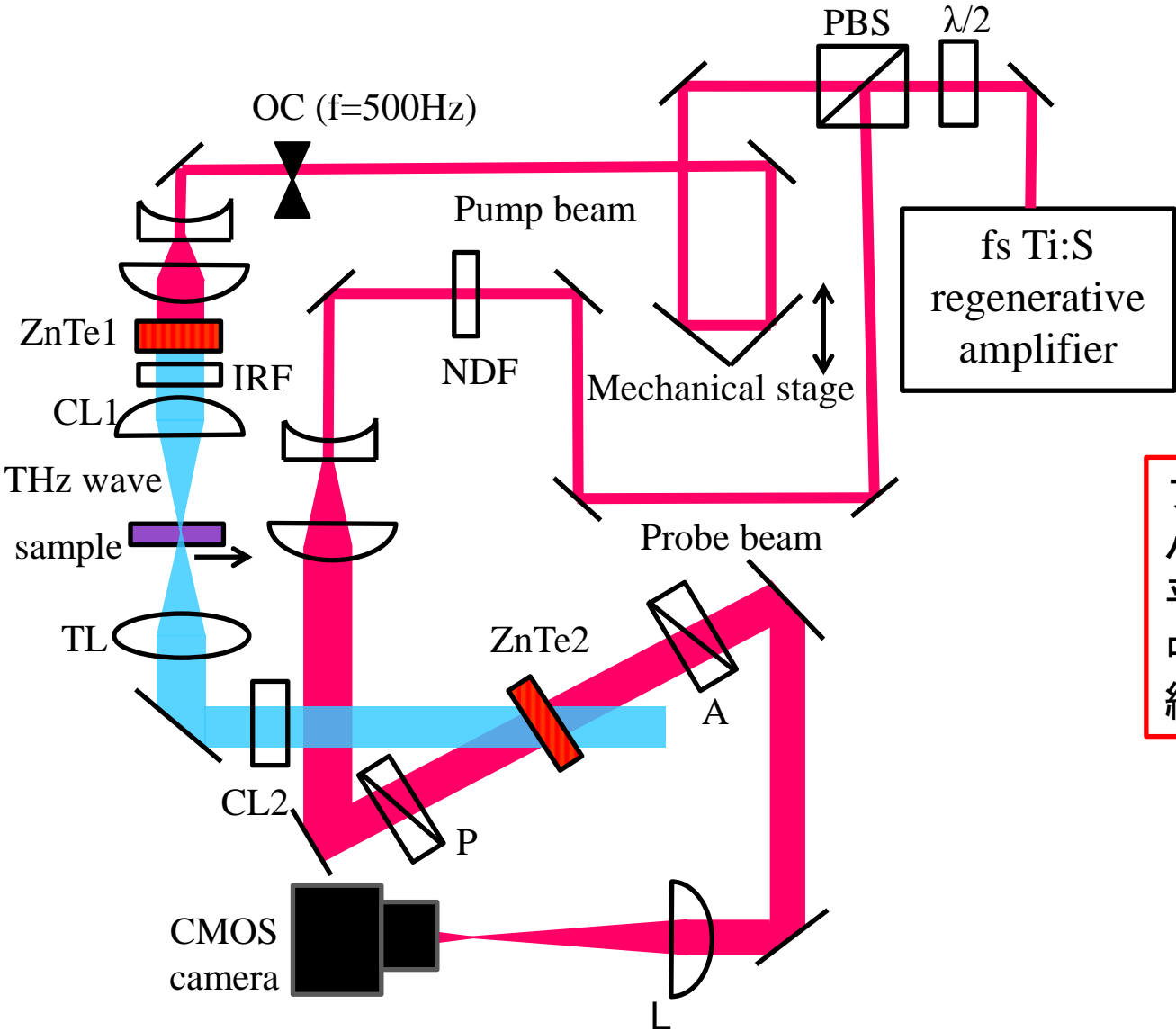
- ・ 時間窓の制限  
交差角・ビーム径の限界
- ・ ビームの強度分布  
不均一な強度分布により不正確
- ・ SN比の不足  
SN比の不足により積算回数が増加する
- ・ THzラインの制限  
1度の走査で取得できる面積の制限



**光学系の改善  
とデータ補正**



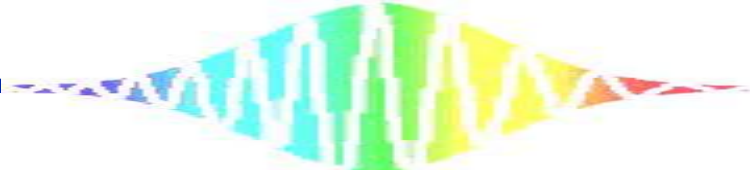
# 実験装置



フェムト秒Ti:S再生増幅器  
 パルス幅：150fs  
 平均出力：800mW  
 中心波長：800nm  
 繰返し周波数：1kHz

THz波の発生・検出  
 にはZnTe結晶を使用





# 時間窓の拡大

## プローブ光とTHz波の交差角を拡大

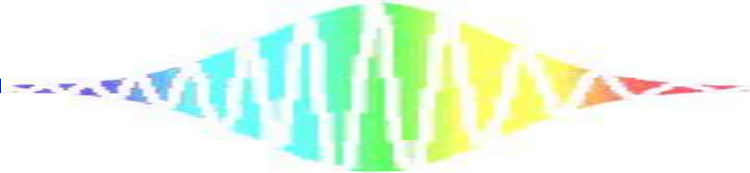
時間窓

$$\Delta T = \frac{d \cdot \tan \theta}{c}$$

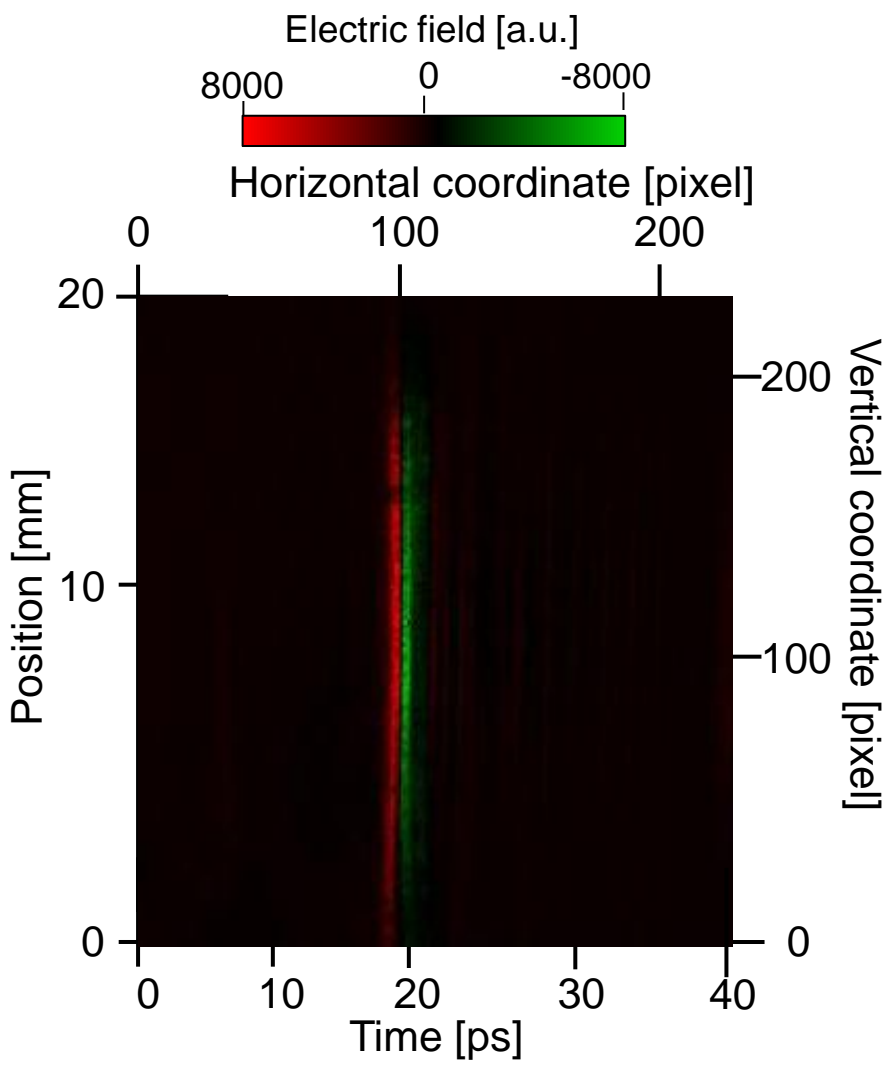
スペクトル分解能

$$\Delta f = \frac{c}{d \cdot \tan \theta}$$

	前 回	今 回
測定時間窓	34ps	41ps
時間分解能	0.148ps	0.178ps
スペクトル分解能	29GHz	24GHz

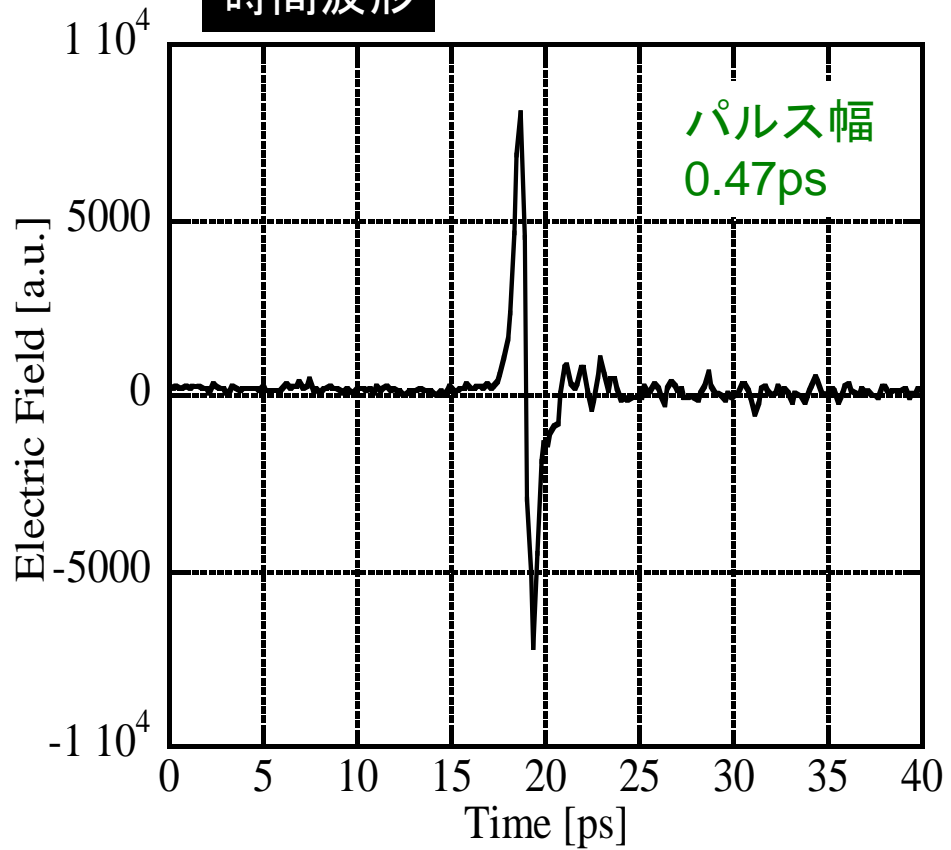


# 時間特性



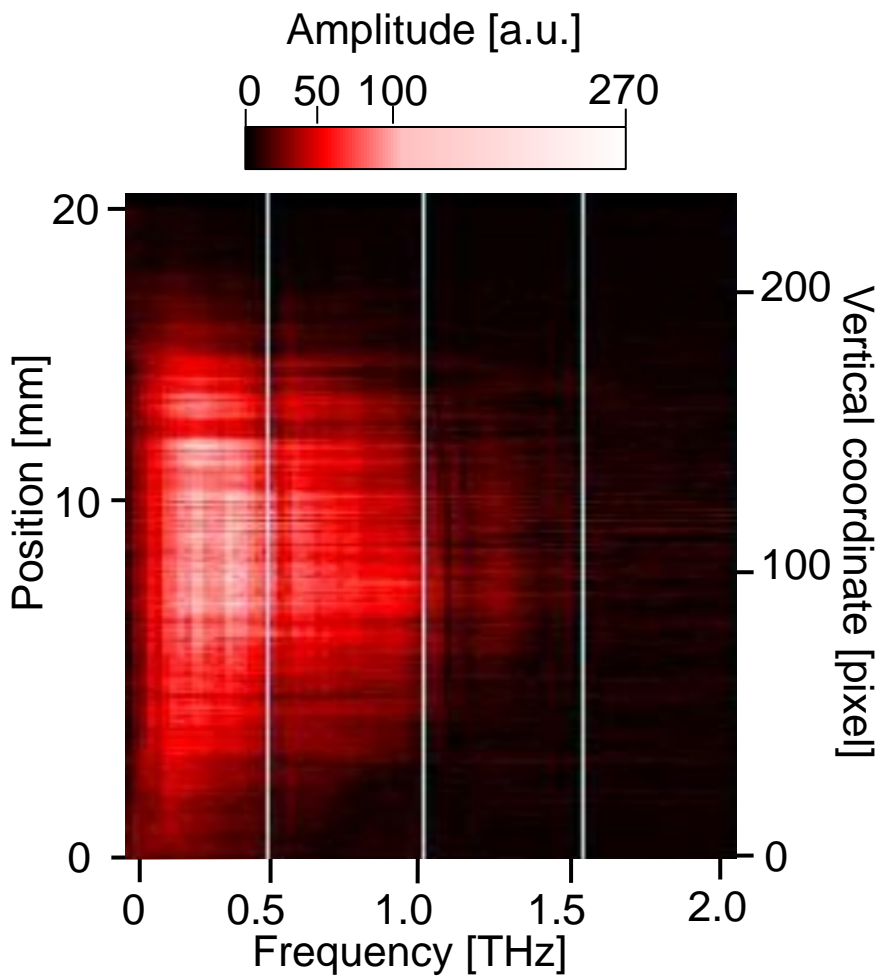
2次元時空間THzイメージ

時間波形

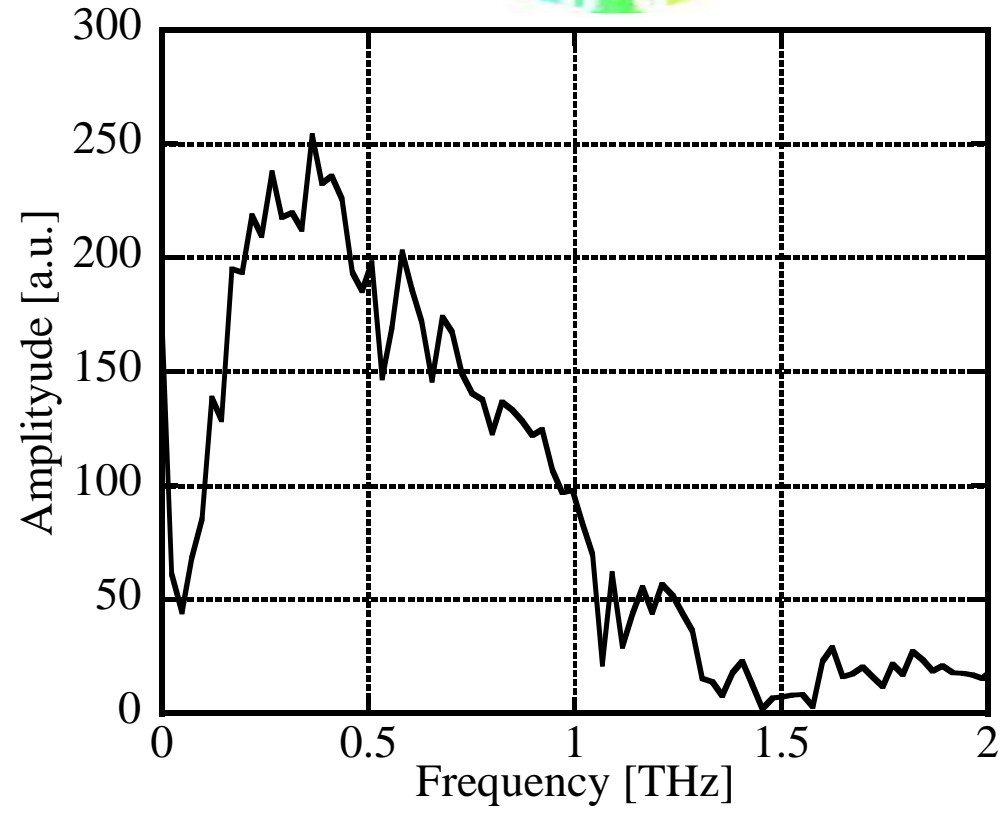


測定時間窓41ps  
時間分解能0.178ps

# 周波数特性

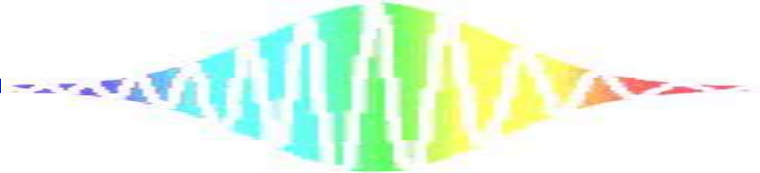


スペクトルイメージ



スペクトル波形

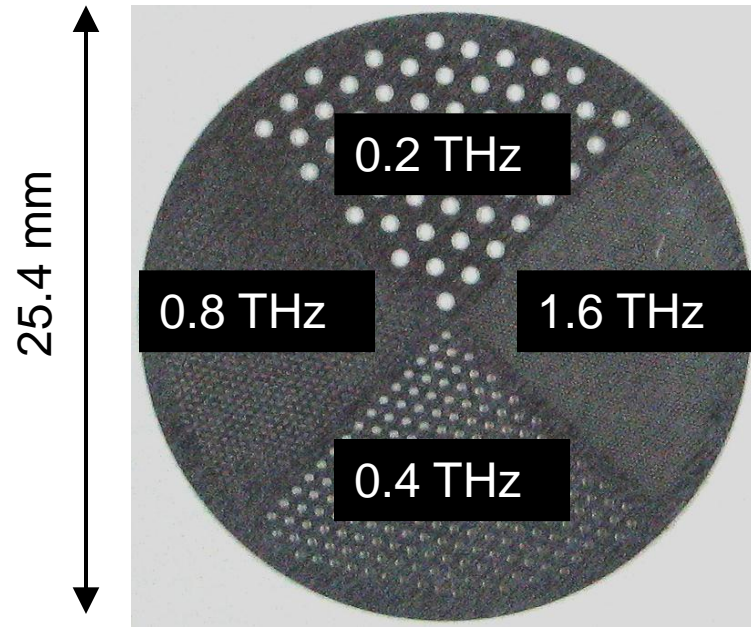
スペクトル分解能0.024THz



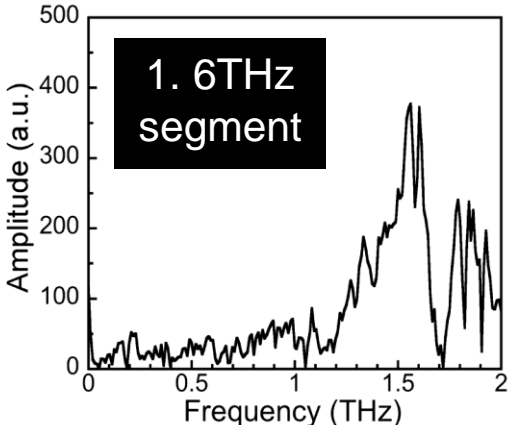
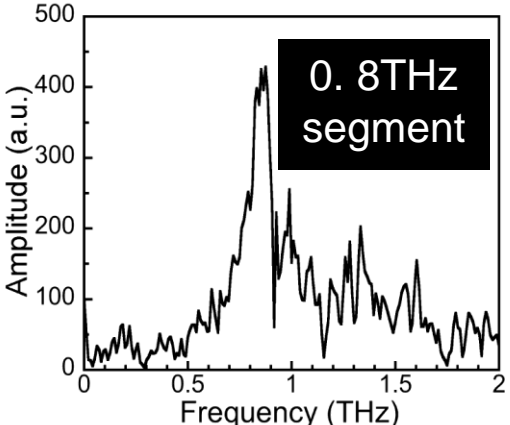
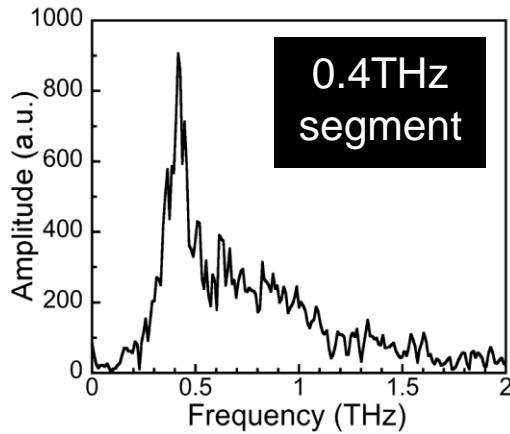
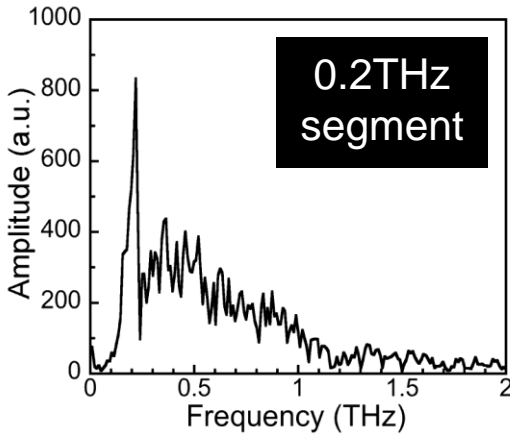


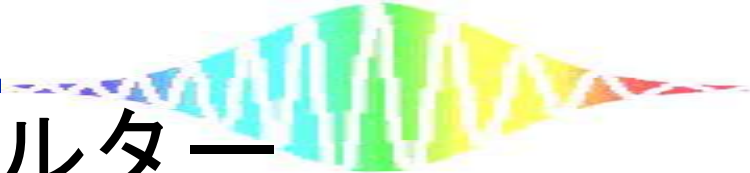
# THz帯バンドパスフィルターの計測

メタルホールアレイ (MHA)  
金属板に周期構造を設けたTHz帯フォトニクス結晶  
⇒THz帯のバンドパスフィルターとして機能



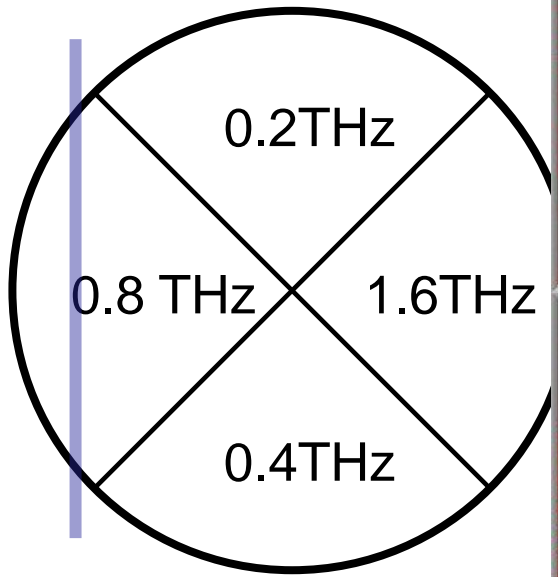
厚さ0.3mm





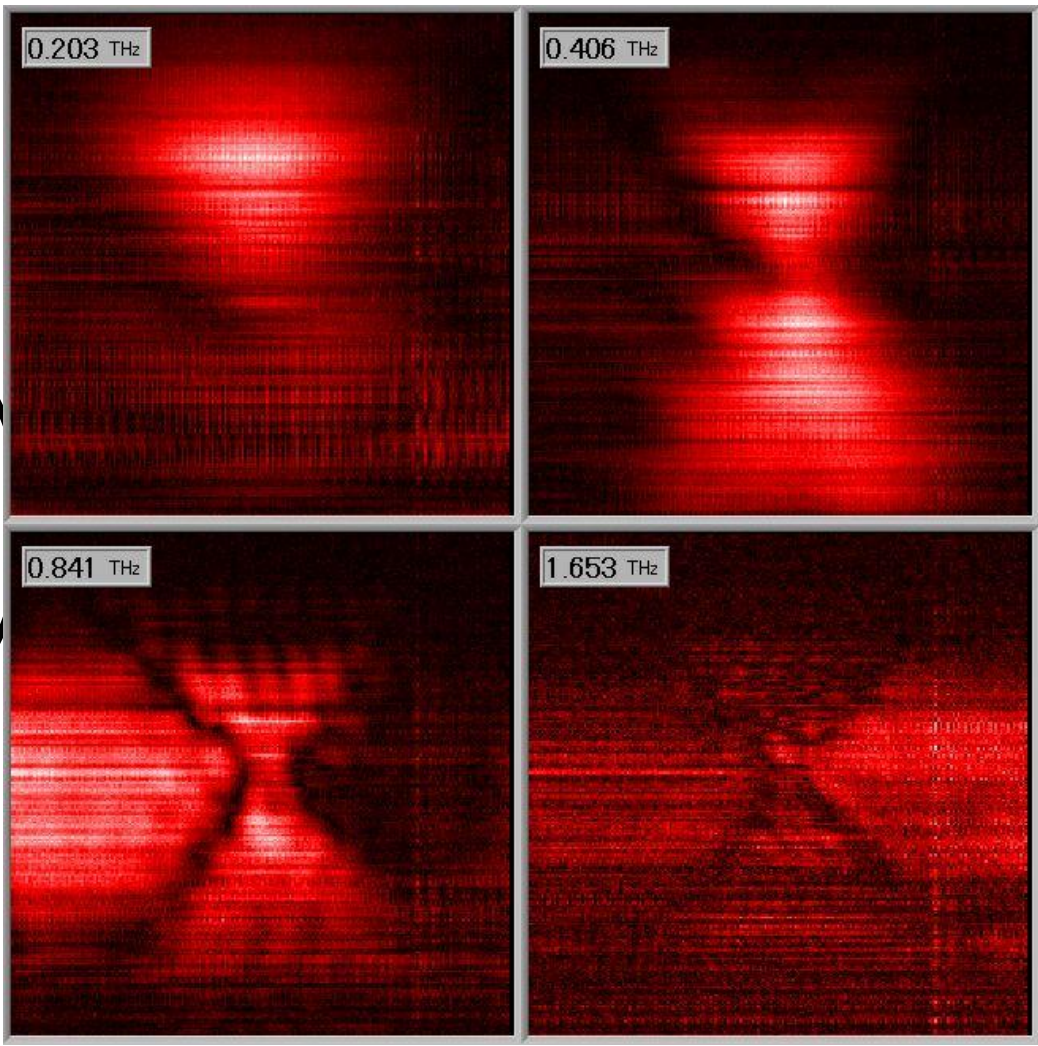
# THz帯バンドパスフィルターの 分光イメージ

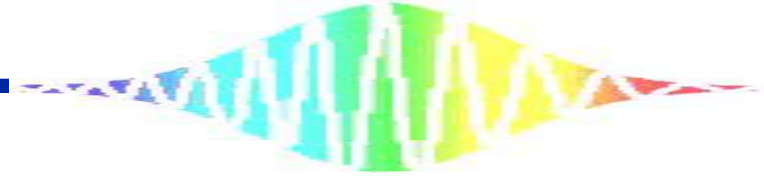
1mm/sで  
20mm走査 ←



THzラインイメージ

**20秒間で200本の  
分光ラインイメージを取得**





# 従来技術との比較

ピクセルレート（総ピクセル数÷計測時間）で比較

## 点走査型THz分光イメージング

40\*40pixel  
@9hours

$$\frac{40\text{pixel} \times 40\text{pixel}}{20\text{sec/pixel} \times 40\text{pixel} \times 40\text{pixel}} = 0.05 \text{ pixel/sec}$$

---

## THzカラスキャナー

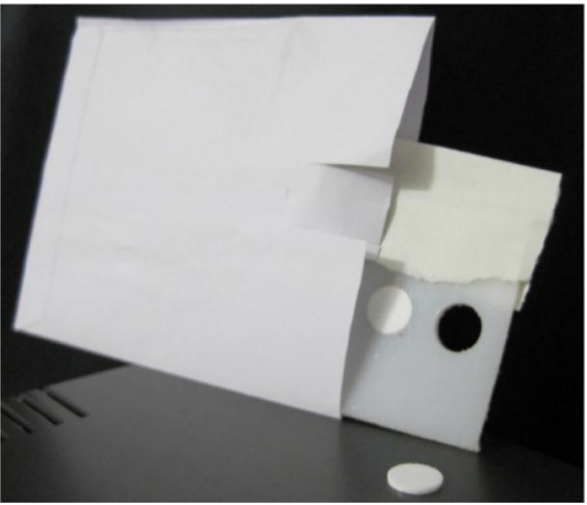
232\*200pixel  
@20sec

$$\frac{232\text{pixel} \times 200\text{pixel}}{20\text{sec}} = 2320 \text{ pixel/sec}$$

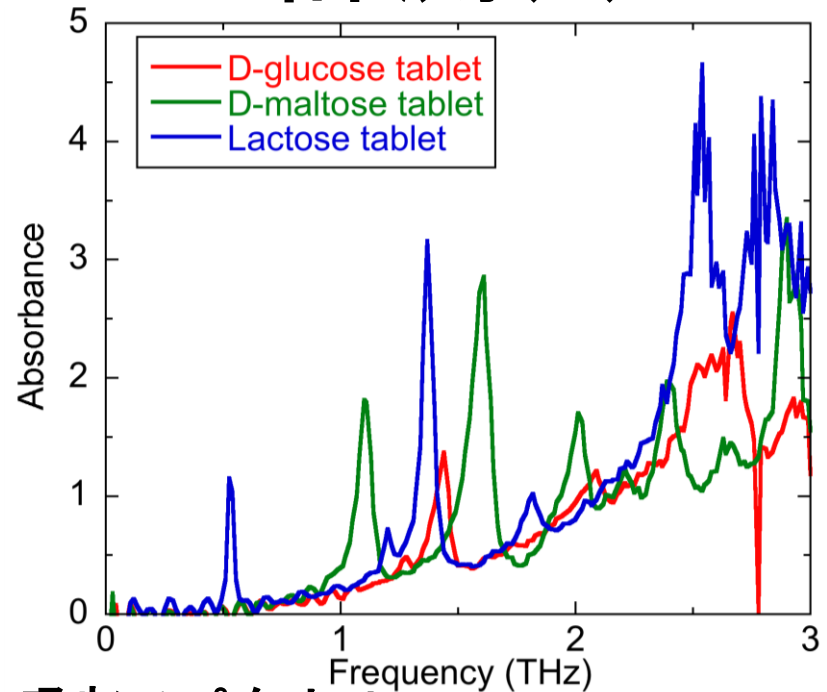


**4万倍以上の高速化を実現**

# 医薬品（糖類）サンプルの計測(1)



糖類錠剤サンプル  
(φ10mm@1mm厚)



THz吸収スペクトル

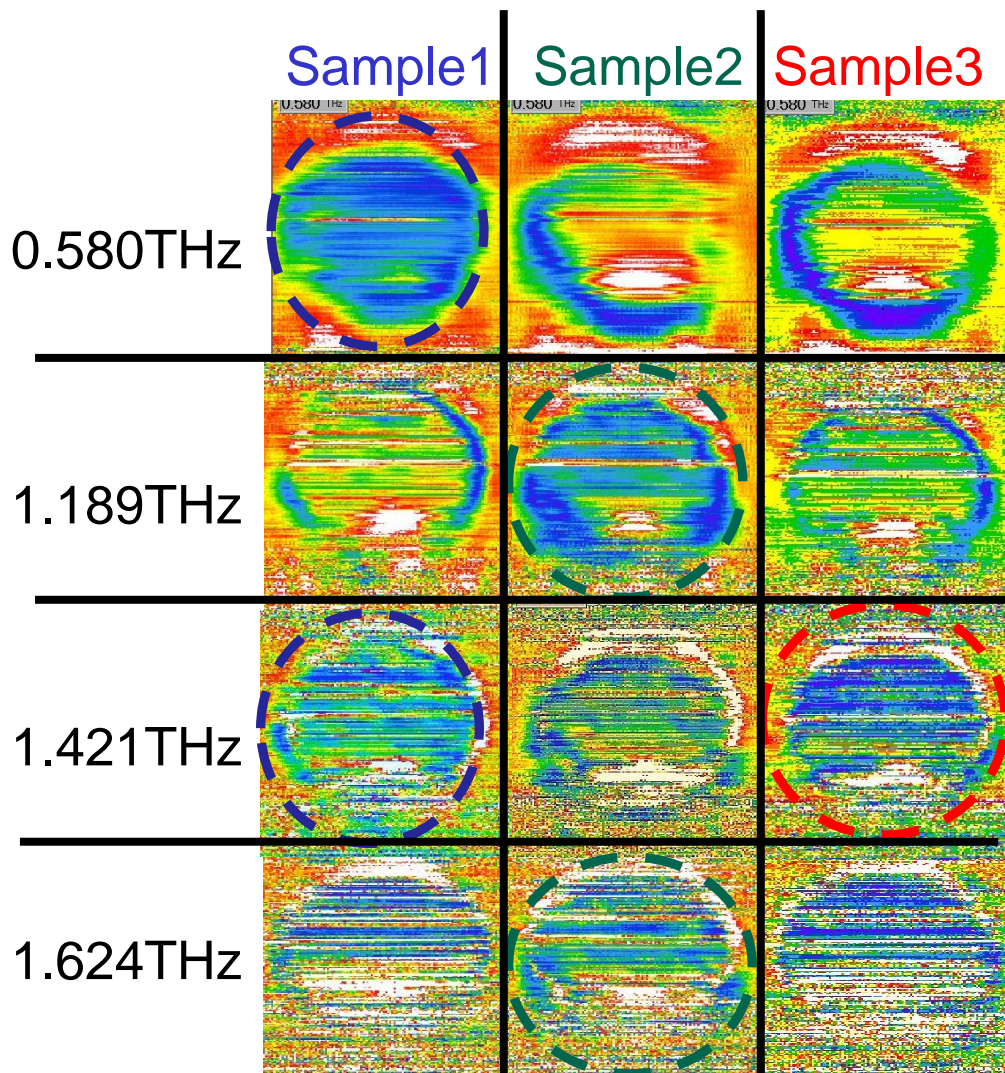
サンプル	Polyethylene (mg)	D-glucose (mg)	D-maltose (mg)	Lactose (mg)	THz 指紋スペクトル (THz)
D-glucose	75	25	0	0	1.44
D-maltose	75	0	25	0	1.10, 1.61
Lactose	50	0	0	50	0.525, 1.37
Reference	75	0	0	0	-

# 医薬品（糖類）サンプルの計測(2)

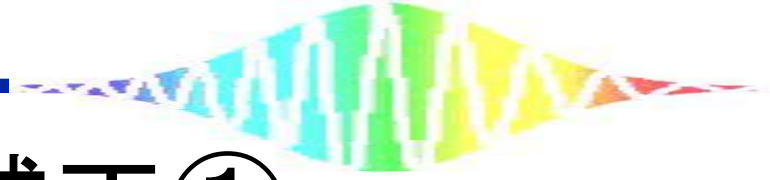
サンプル	THz 指紋スペクトル (THz)
D-glucose	1.44
D-maltose	1.10, 1.61
Lactose	0.525, 1.37
Reference	-

計測時間130秒/個

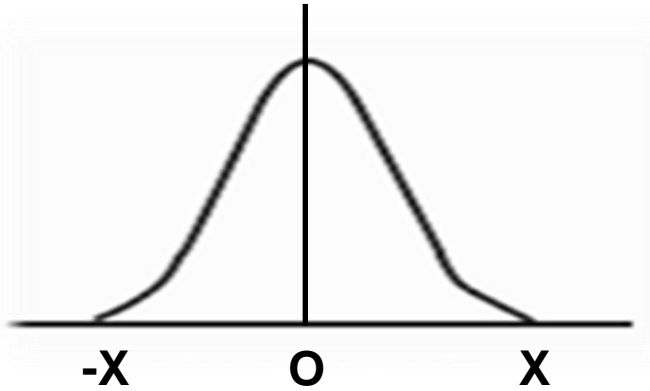
動体サンプル  
の識別に成功





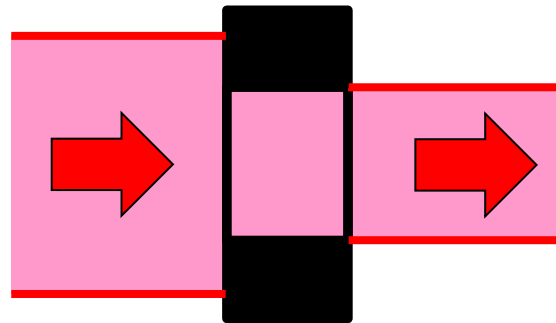


# 強度分布の補正①



プローブ光・THz波ともに強度分布  
⇒ビームの中央と端で大きな差

プローブ光・・・ビーム径を拡大して  
出来るだけ分布の中央付近を使用

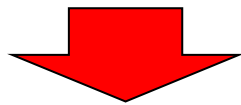


偏光子

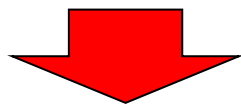
# 強度分布の補正②

THz波・・・強度分布のデータ  
(THzプロファイル)  
を取り、生データを補正

機械式時間遅延ステージを走査し、  
各ピクセルでTHz強度が最大の値を取得

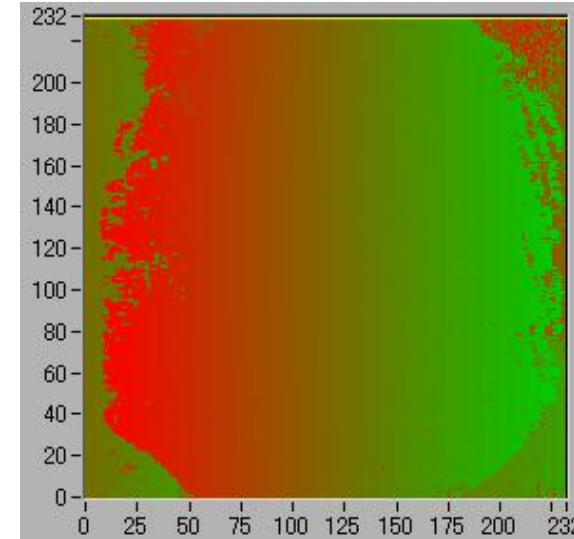


各ピクセルで、  
生データ/THzプロファイル  
の計算を行い強度補正

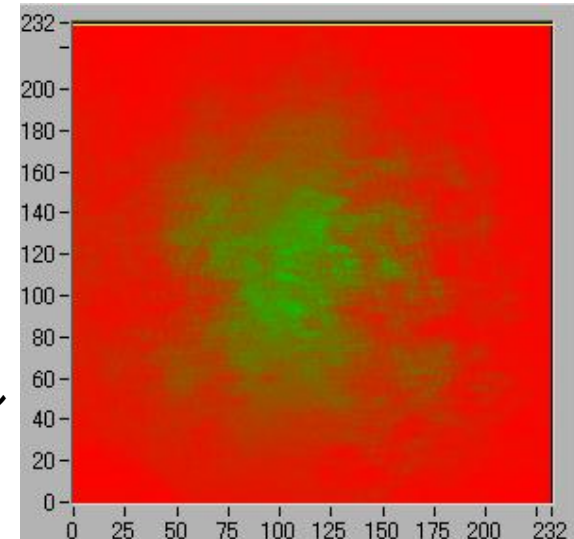


解析・比較

ピーク値  
を示した  
時間を  
可視化



THz強度  
プロファイル

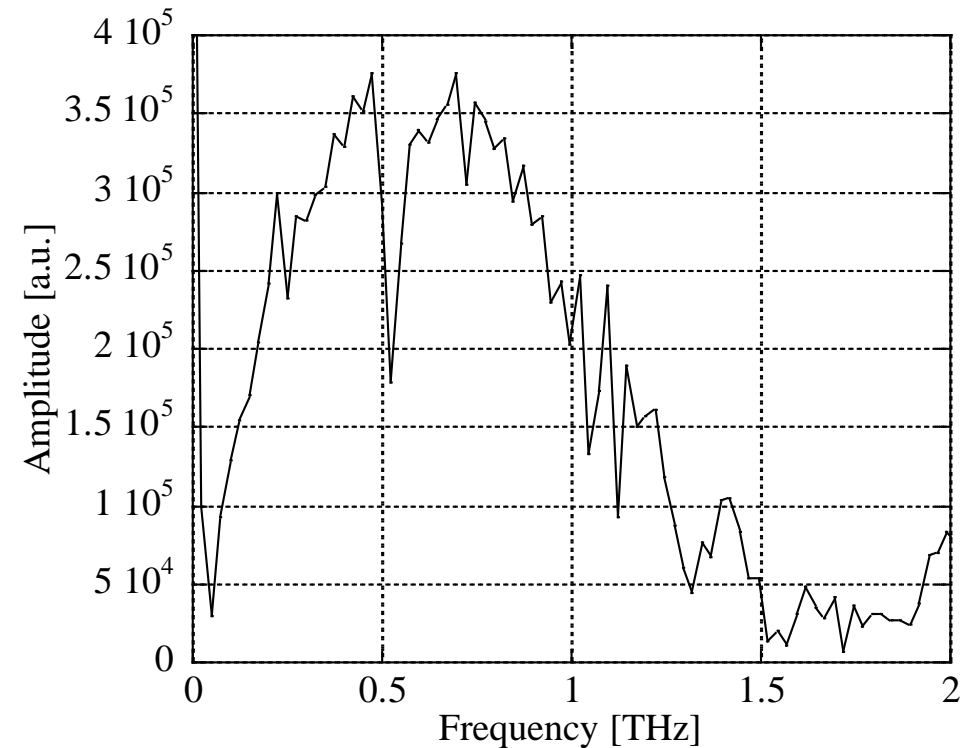


# 強度分布の補正③

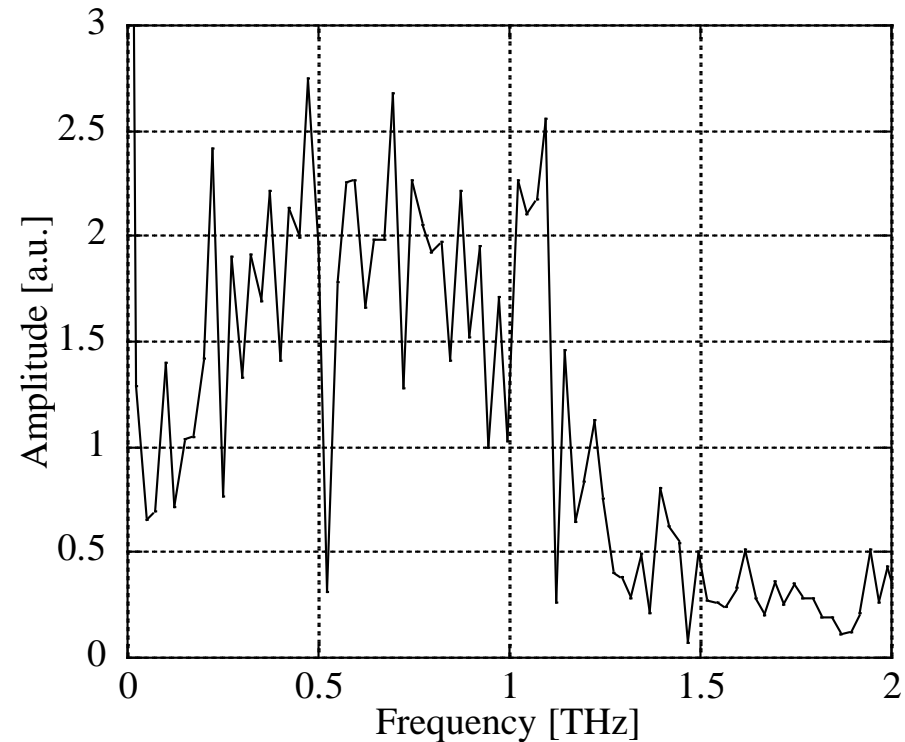
～補正によるスペクトル波形の変化～

Lactose : 指紋スペクトル=0.525,1.37THz

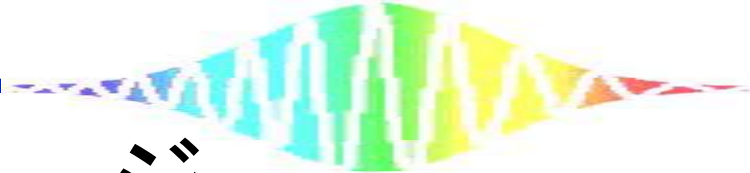
補正前



補正後



**波形が不安定、特徴的な部分は強調される**



# 補正後の分光イメージ

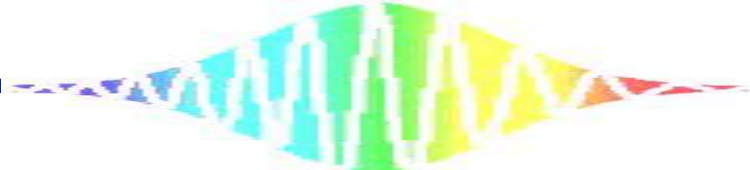
THzパルス及びプローブパルスの強度分布が不均一  
⇒イメージの正確性が損なわれる



ピクセル毎の強度分布を計測し補正

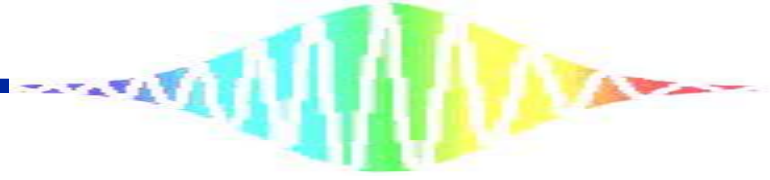
Lactose	0.580THz	1.189THz	1.421THz
補正前			
補正後			

高い周波数でのSN比の悪さも強調されてしまう



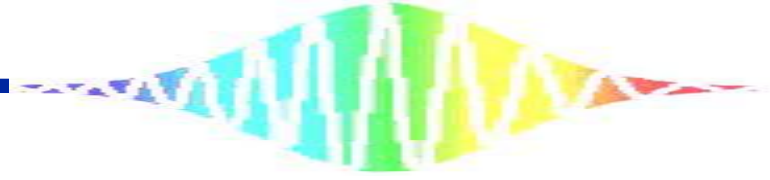
# まとめ

- ・リアルタイムでTHz分光ラインイメージを取得できるTHzカラーレスキャナーを構築した。
- ・本装置を用いることで、点検出を用いた従来法に対して4万倍以上のピクセルレートを達成した。
- ・医薬品サンプルの動体計測においてサンプルの識別に成功した。
- ・本装置の課題解決のため、強度分布を基にしたデータ補正を行ったが、分光イメージング技術の向上には至らなかった。

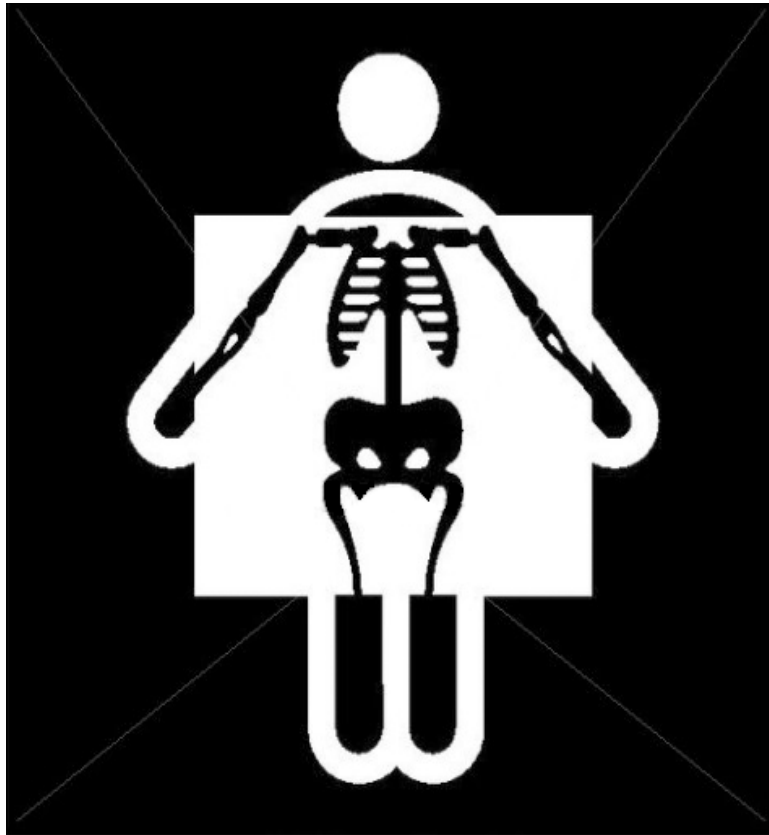


# 今後の予定

- SN比の向上のため、高強度THzパルスの発生を目指す。(発生方法の検討)
- THz分光ラインをより実用的な長さに拡大する。



# X線スキャナー(レントゲン、CT)



用途：  
非破壊検査、医療診断

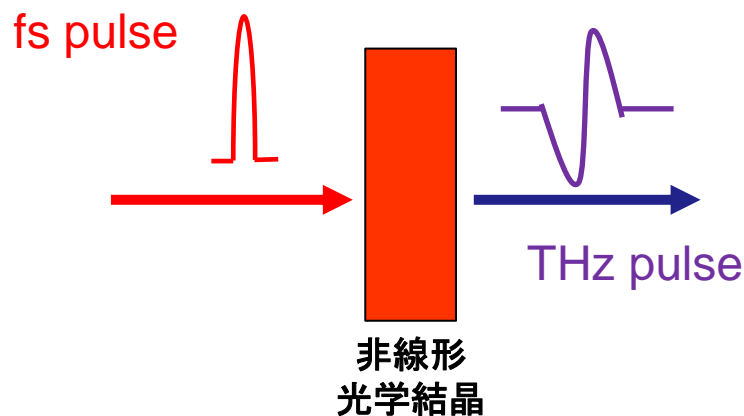
特徴：  
良好な物質透過性

問題点：  
高い侵襲性  
良好過ぎる透過性  
⇒ソフトマテリアルの測定に  
不適

モノクロ(白黒)イメージ  
⇒分光学的成分分析は困難

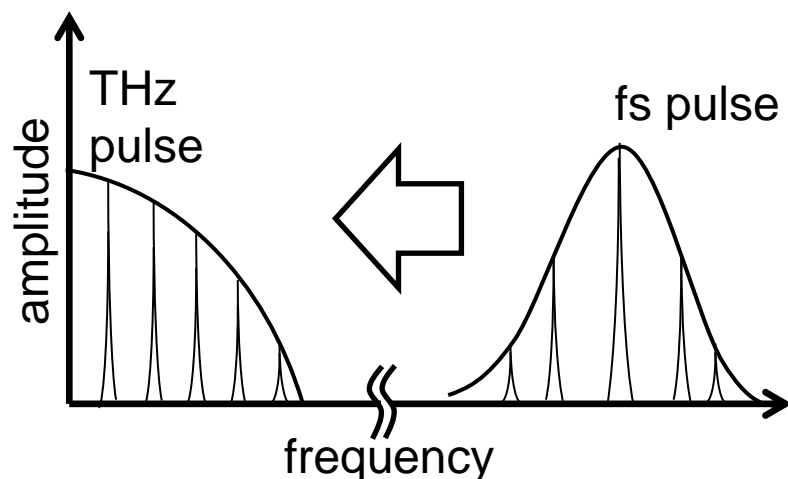


# 非線形光学結晶によるTHzパルスの発生

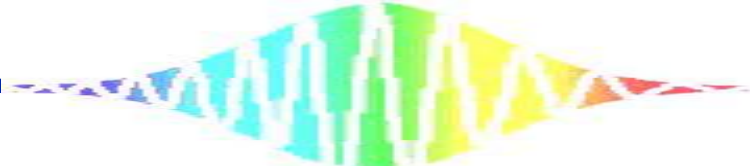


非線形光学結晶(ZnTeなど)にフェムト秒パルスを入射

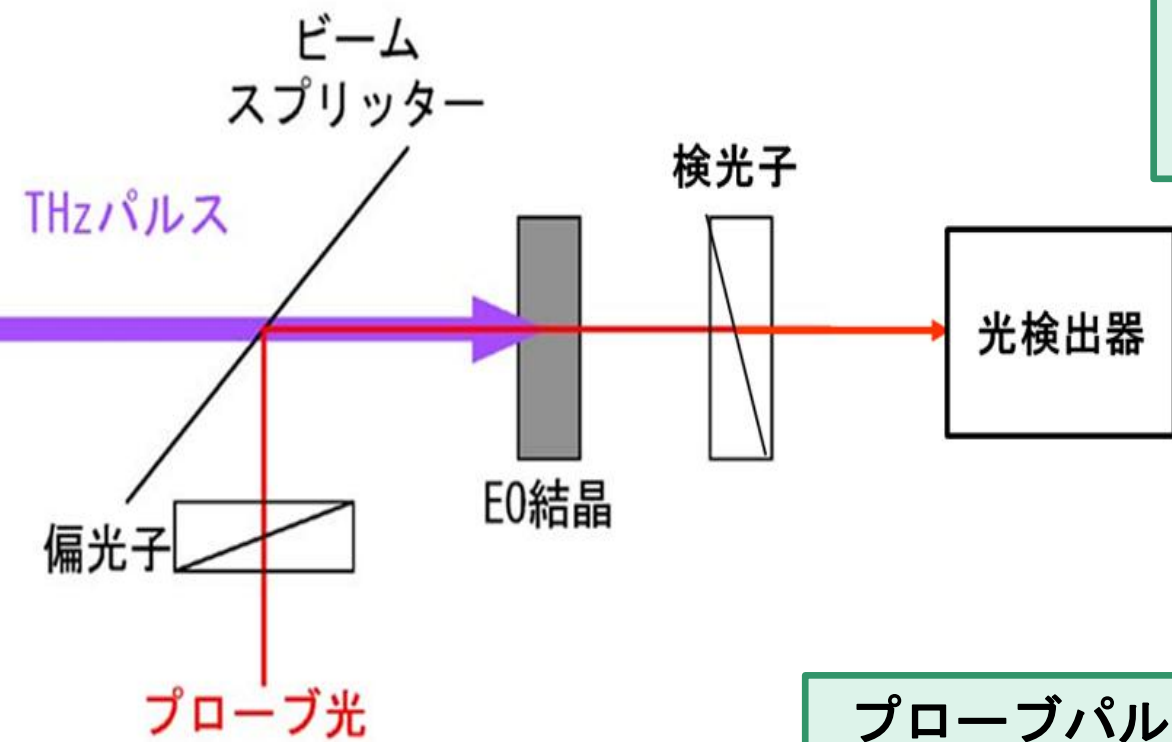
⇒非線形光学効果の一種である光整流によってTHzパルスが発生



フェムト秒パルスの持つ広い周波数帯域の成分が光混合され、その差の周波数成分がTHz帯に現れる



# 電気光学(EO)結晶を用いたTHzパルスの検出 1



偏光子と検光子は互いに直行する配置  
 ⇒プローブ光は検光子を通り抜けない

ZnTeのような電気光学結晶にTHzパルスとプローブパルスが同時に入射

↓

THzパルスが印加電界として作用

↓

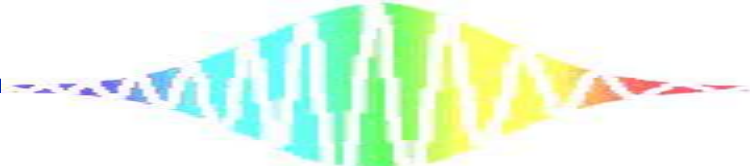
電気光学結晶に複屈折性が誘起

↓

プローブパルスが直線偏光から楕円偏光に変化

←

プローブパルスが検光子を通り抜ける



# 電気光学(EO)結晶を用いたTHzパルスの検出 2

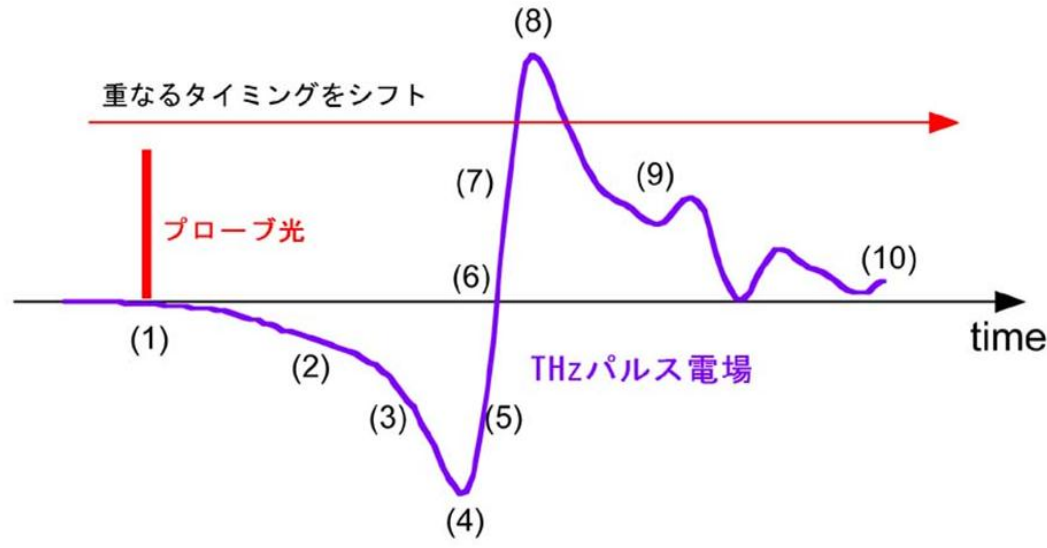
機械式遅延ステージでEO結晶におけるTHzパルスとプローブパルスの時間的な重なりをシフト

⇒THz電場の時間波形

F.T. ↓

振幅と位相のフーリエスペクトル

THz時間領域分光法 (THz-TDS)



(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
↑↓	↻	↻	↻	↻	↑↓	↻	↻	↻	↑↓

# カラースキャナーの測定原理

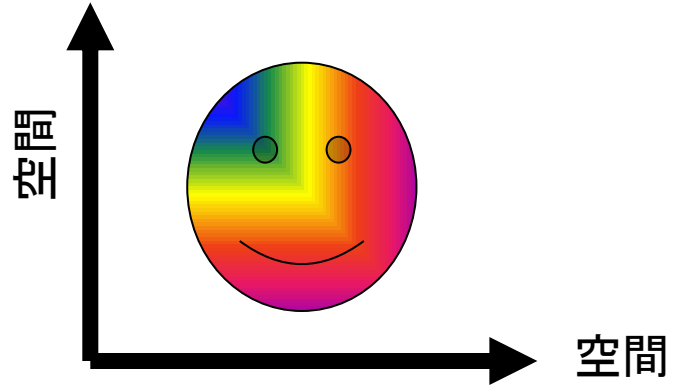
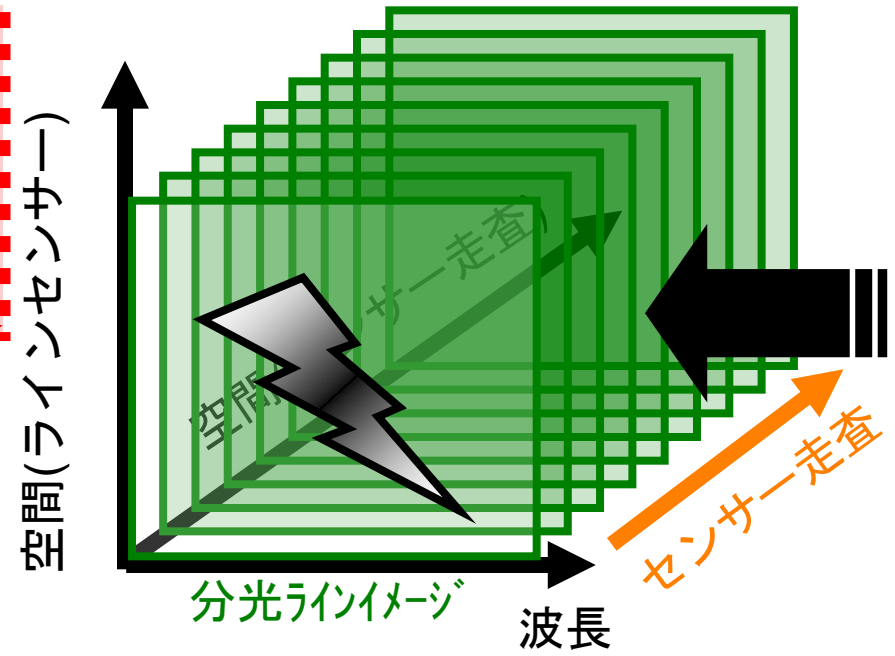
リアルタイム分光  
ライン・イメージング  
(カラー・ラインセンサー)

+ ポイント!

ラインセンサー走査  
(1次元)



2次元カラーイメージ



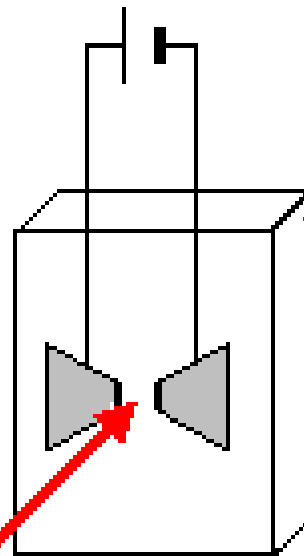
# THzパルスの発生

近赤外光からTHz波の長波長変換

THzパルス

波長 =  $300\mu\text{m}$ , パルス幅  $< 1\text{ps}$

・ 光伝導アンテナ  
(双極子放射)



・ 非線形光学結晶  
(差周波発生)

近赤外フェムト秒パルスレーザー光

波長 =  $800\text{nm}$

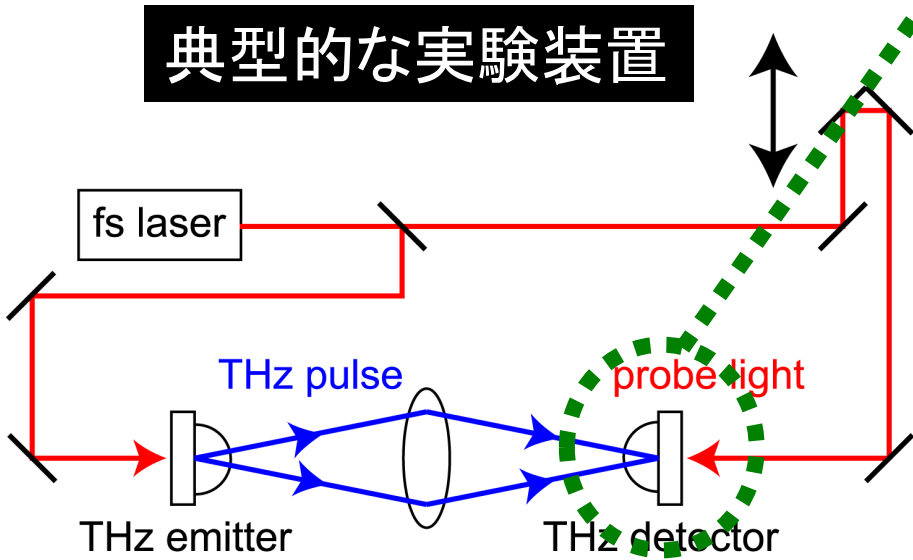
パルス幅  $< 100\text{fs}$

# THzパルス電場の時間波形計測

THzパルス (<1ps) は  
実時間測定できない

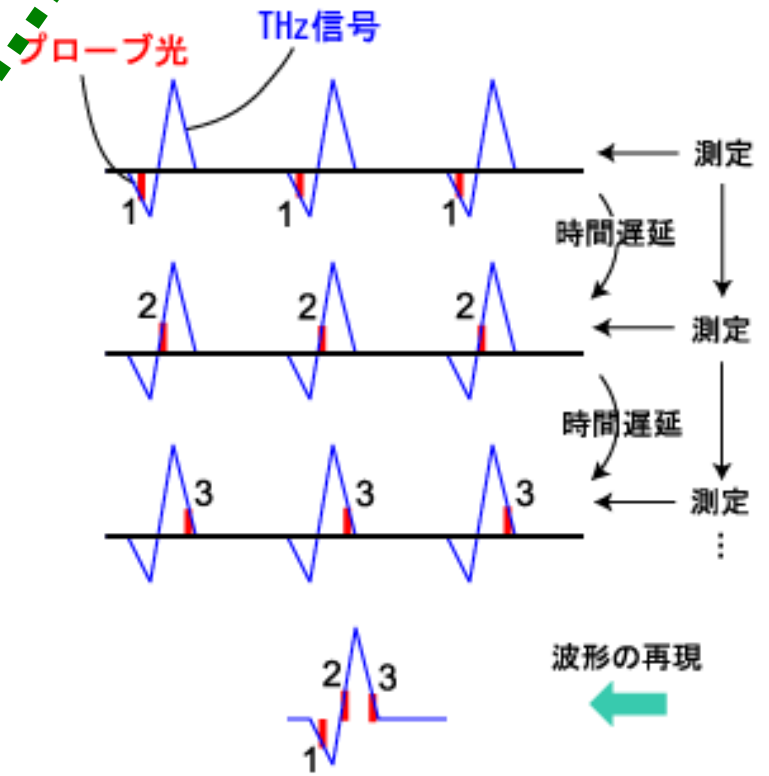
検出エレクトロニクスの帯域不足

典型的な実験装置



機械式時間遅延走査を用いた  
ポンプ・プローブ測定

タイミングチャート



各遅延時間での波形の切り出しの後、時間波形再構成

# 電気光学的時間-空間変換 (非共軸2D-FSEOS)

ref) J. Shan et al, OL, Vol.25, pp. 426(2000)

THzビームとプローブビーム  
の**非共軸配置**



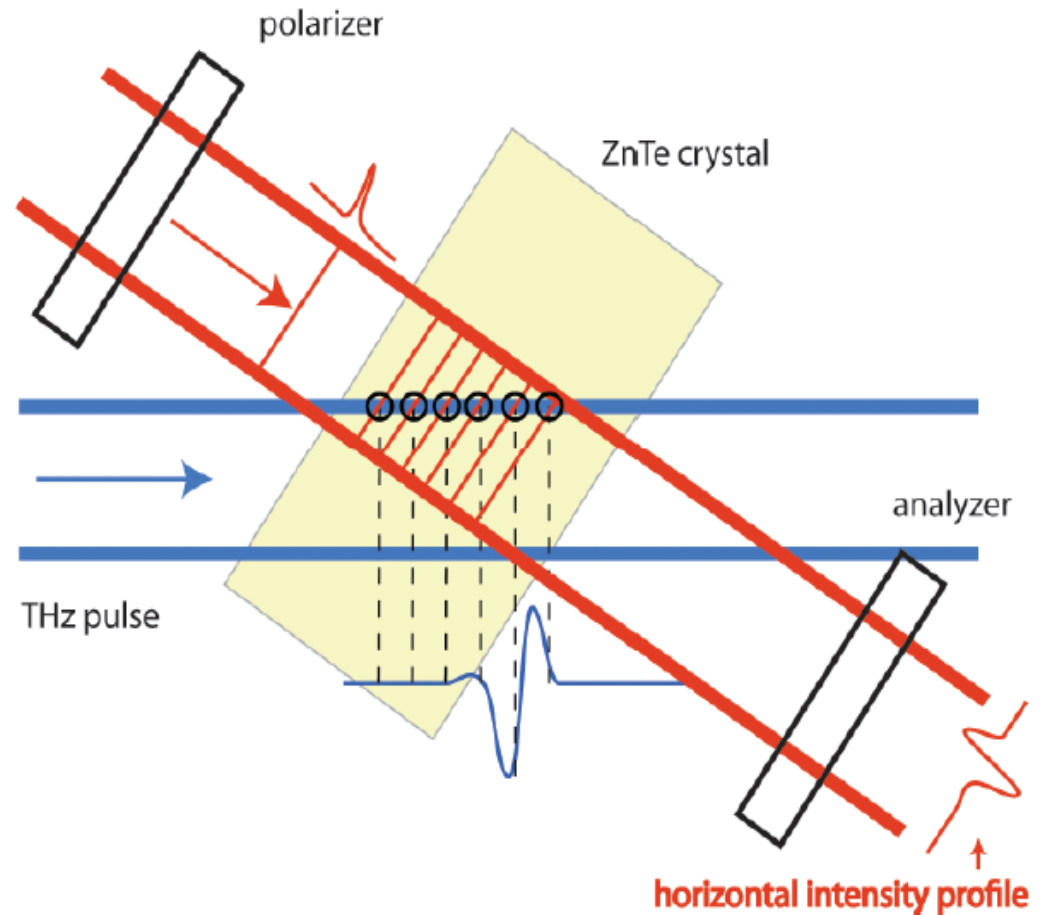
時間的に異なるTHz波面はE0結  
晶中でプローブ波面の異なるビ  
ーム断面位置で重なる



時間遅延  $\Delta\tau$  が空間分布  $\Delta h$  に電  
気光学的時間-空間変換



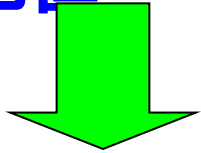
時間波形が位置信号として  
実時間測定可能



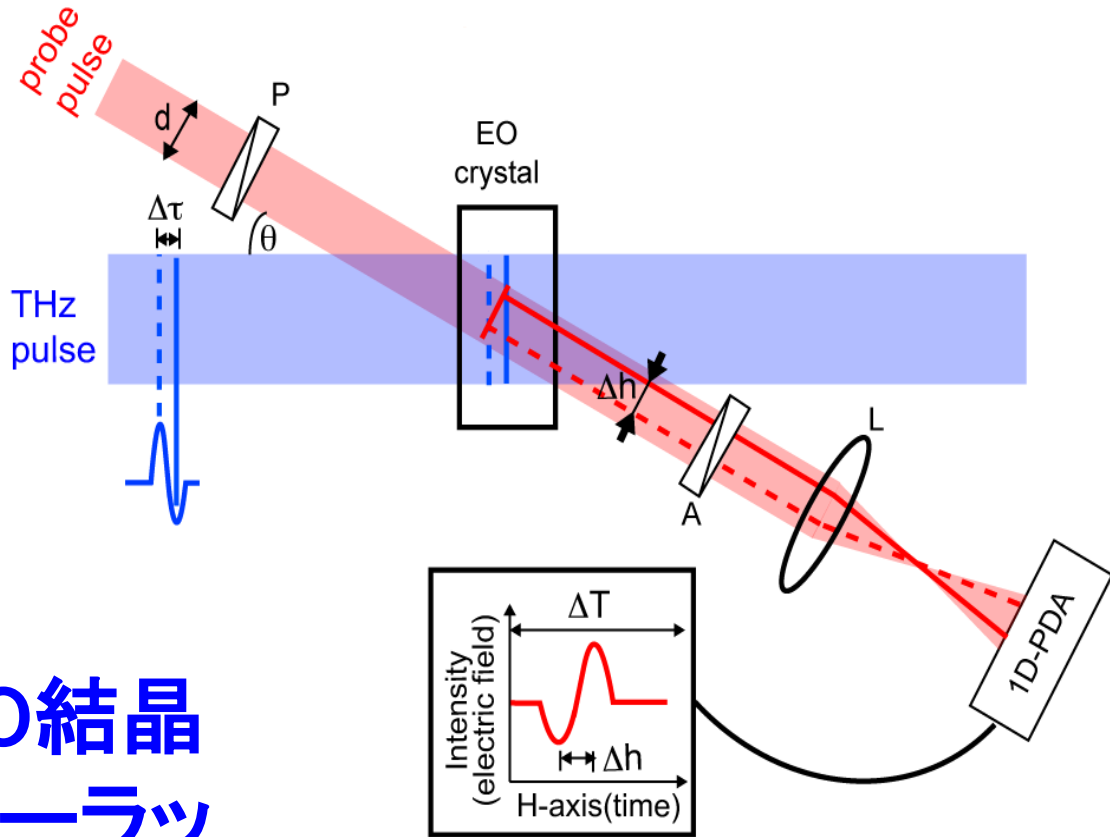
# 電気光学的時間-空変換 (非共軸2D-FSEOS)

ref) J. Shan et al, OL, Vol.25, pp. 426(2000)

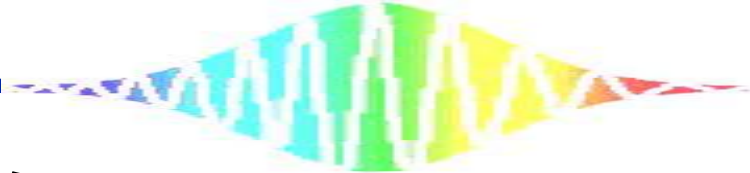
THzビームとプローブビームの**非共軸配置**



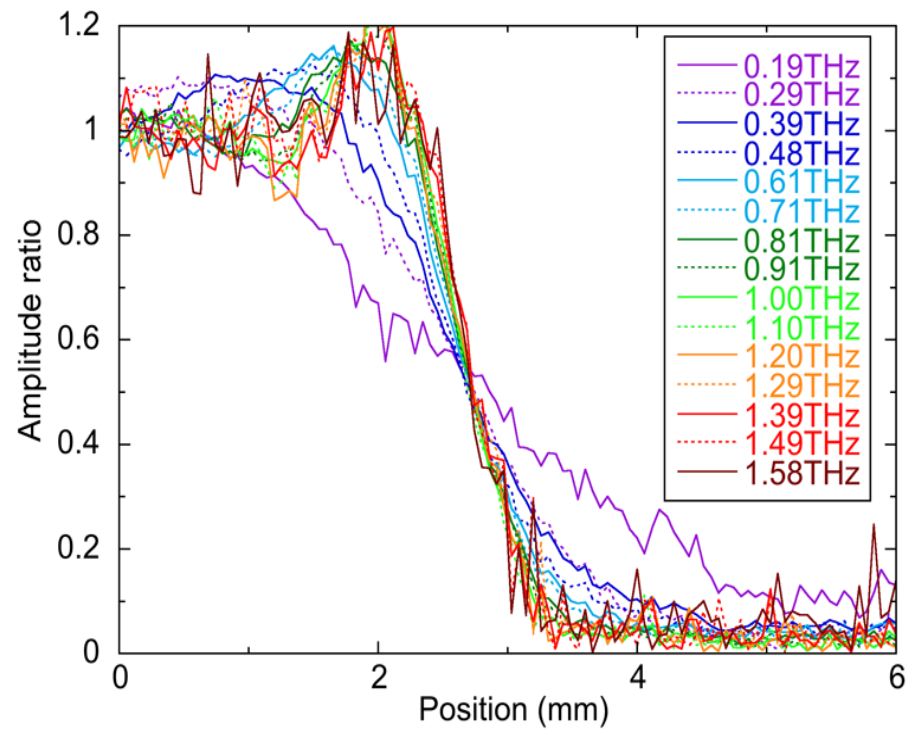
両ビームの波面がEO結晶中で**非共軸にオーバーラップ**



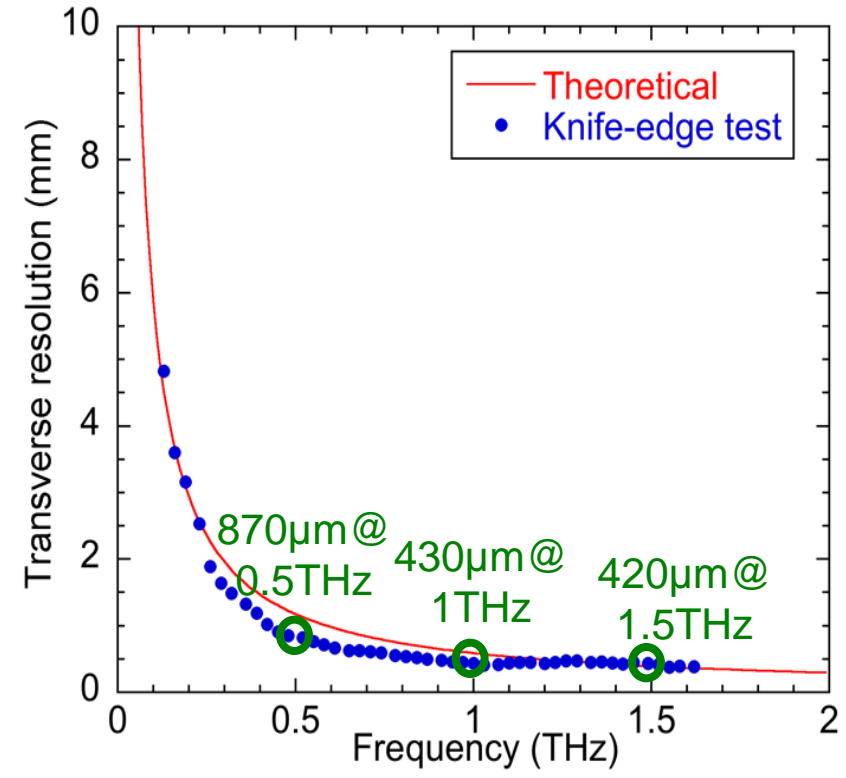




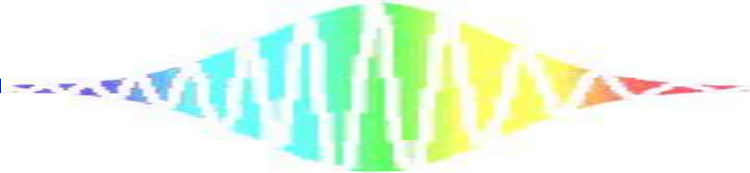
# 空間分解能



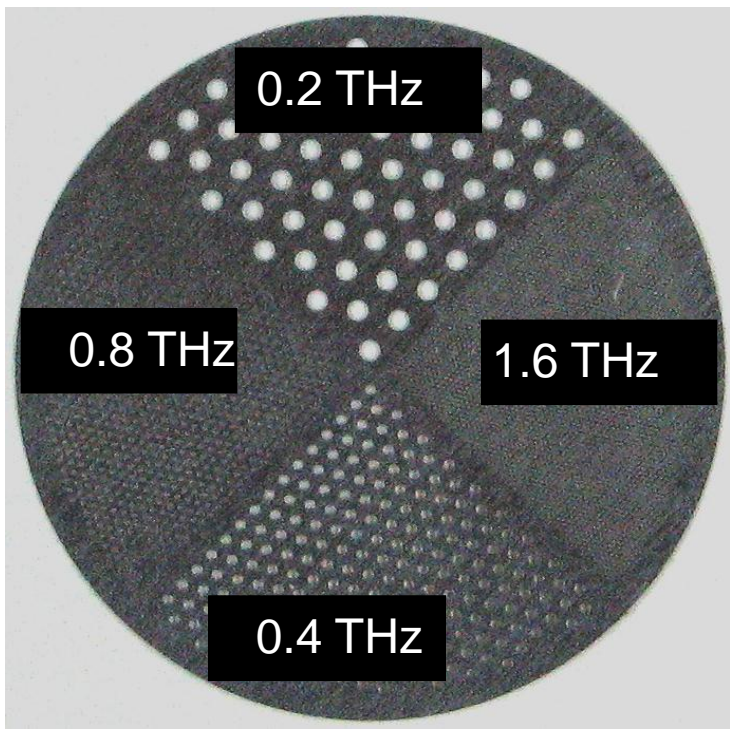
ナイフエッジプロファイル



空間分解能



25.4 mm



厚さ0.3mm

開口直径 : 0.75mm  
開口間隔 : 1.5mm  
透過率ピーク : 0.2THz

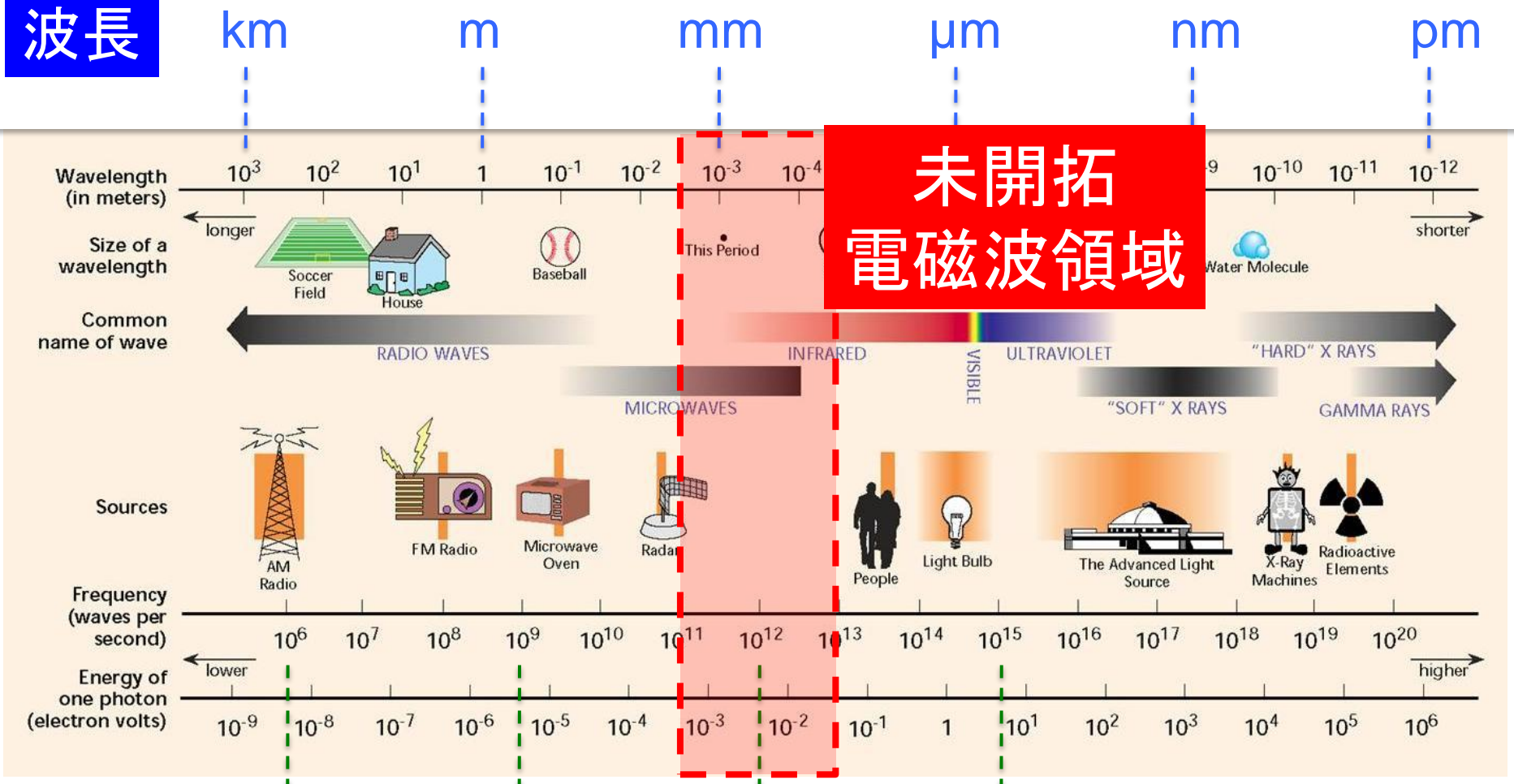
開口直径 : 0.38mm  
開口間隔 : 0.75mm  
透過率ピーク : 0.4THz

開口直径 : 0.19mm  
開口間隔 : 0.1mm  
透過率ピーク : 0.8THz

開口直径 : 0.1mm  
開口間隔 : 0.19mm  
透過率ピーク : 1.5THz

# 電磁波の周波数・波長マップ

波長



周波数

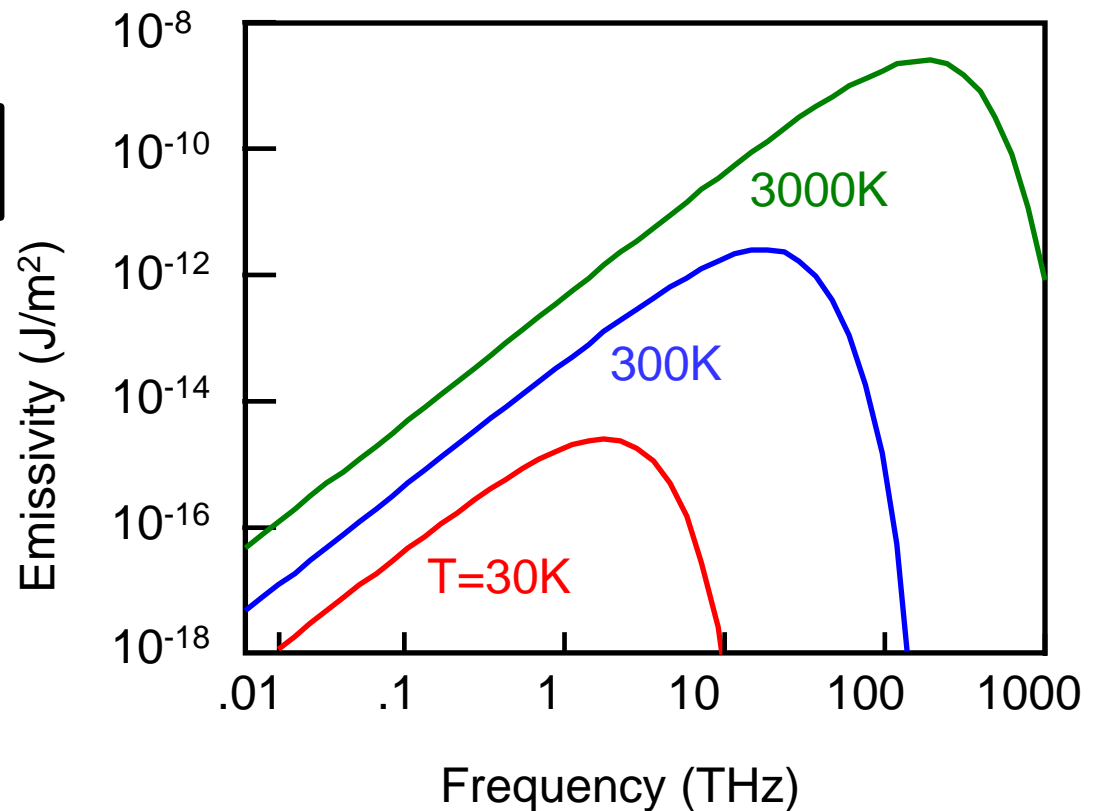
MHz      GHz      THz (10<sup>12</sup>Hz)      PHz

# 自然の光源（太陽、ランプ光源など）はTHz発生効率が極めて低い！

## 黒体放射スペクトル

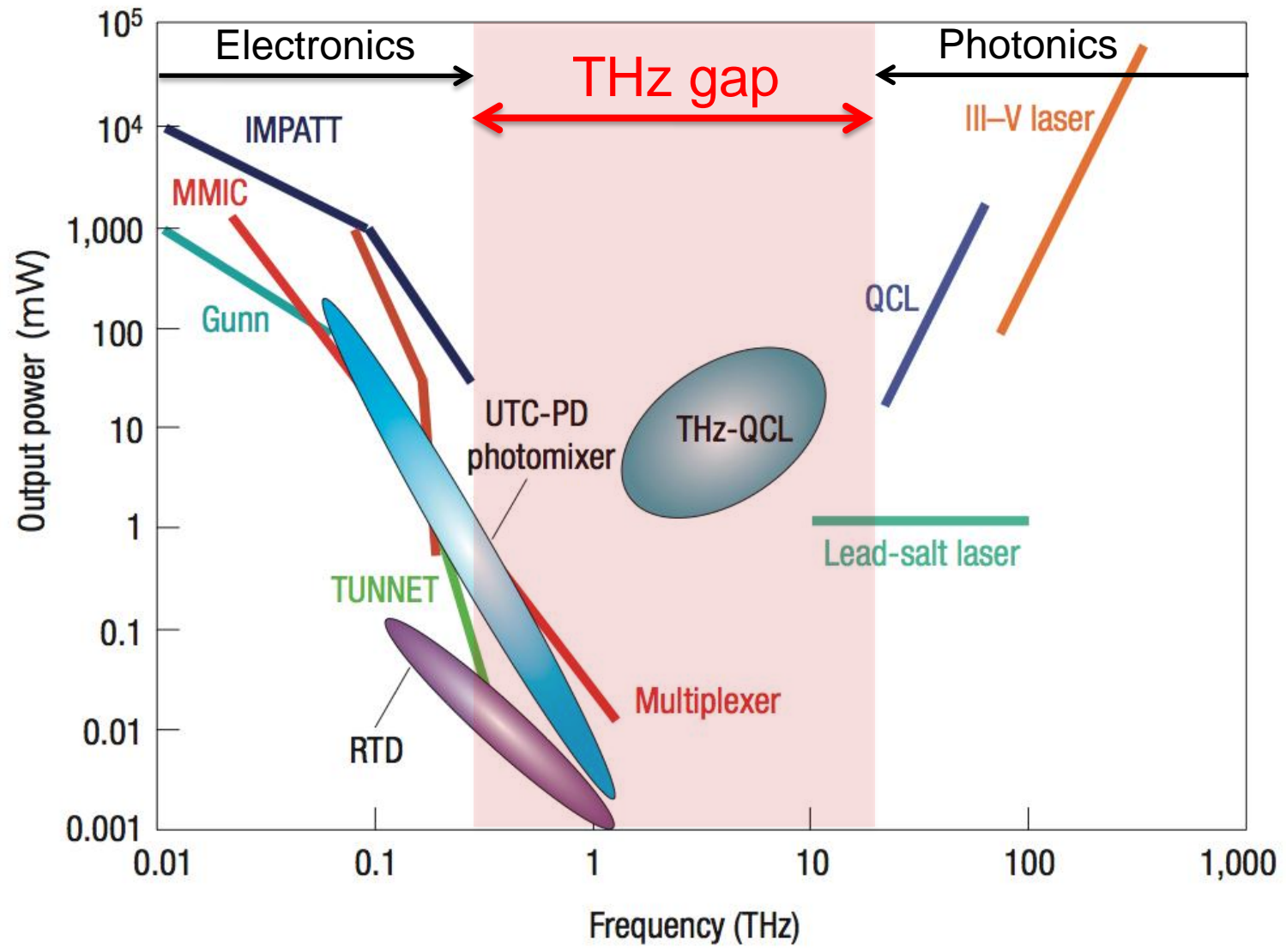
$$B(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

温度に依存

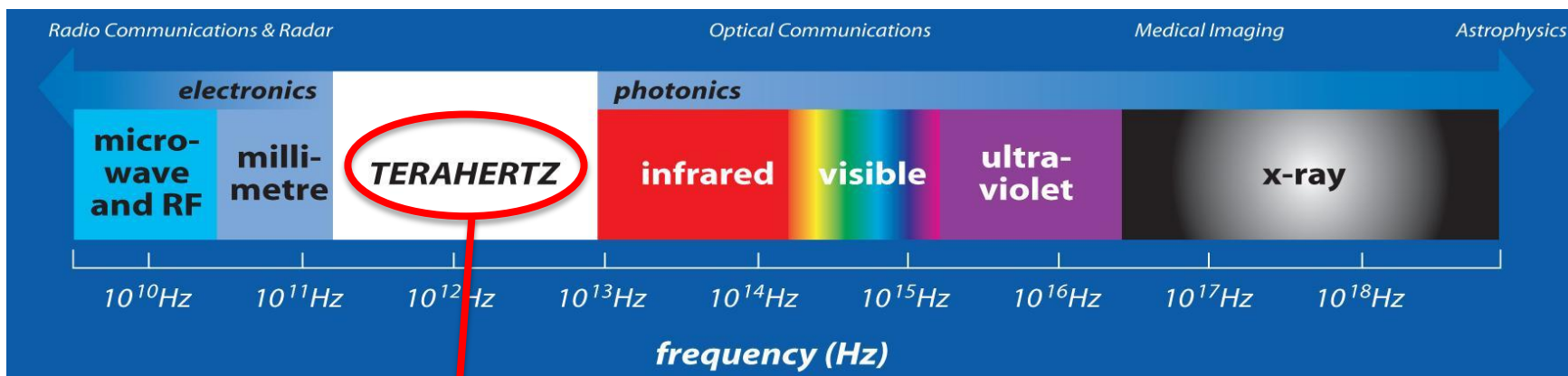


THz領域で急激にロールオフ

# 様々な (人工的) THz光源



# テラヘルツ波（THz波）とは？

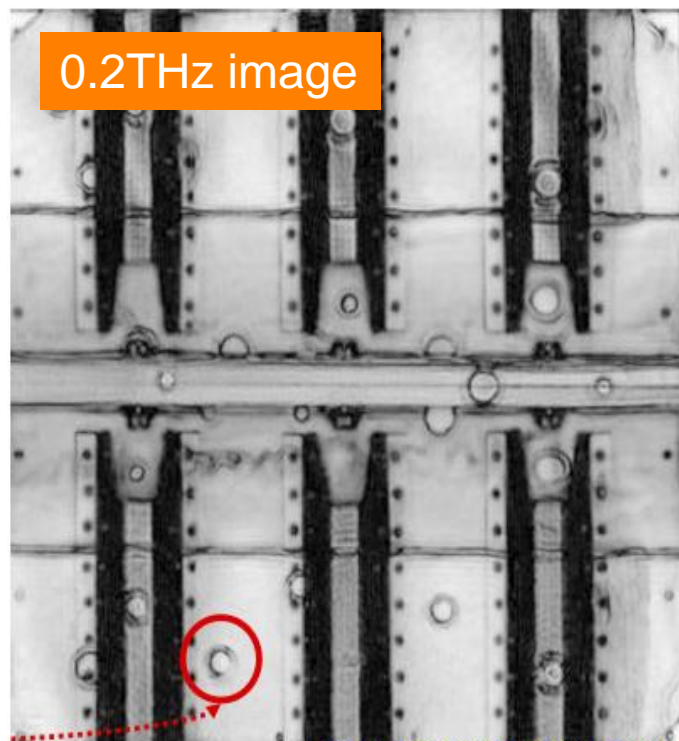
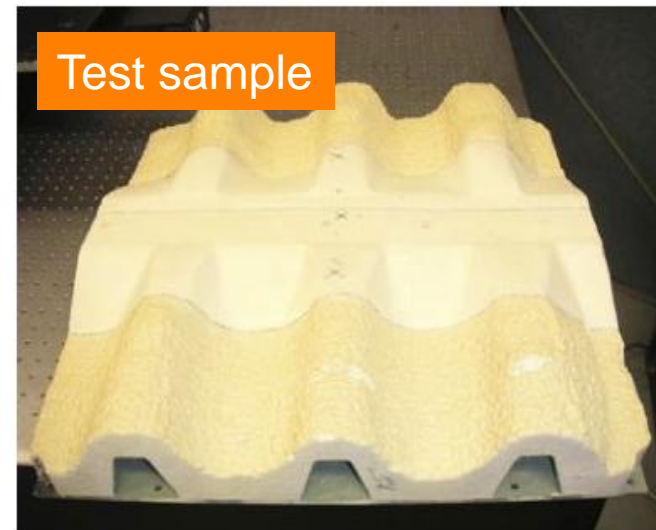


- 光波と電波の両特徴を併せ持つ
- 良好な物質透過性
- 非侵襲、安心安全
- コヒーレントビーム
- 超短パルス、広帯域スペクトル
- イメージング計測や分光計測が可能
- 空間分解能  $< 200 \mu\text{m}$

# THz透過 イメージング

②

欠陥検査  
(スペースシャトル)



ref)

<http://www.rpi.edu/~zhangxc/researchhome.htm>

# THz透過イメージング③

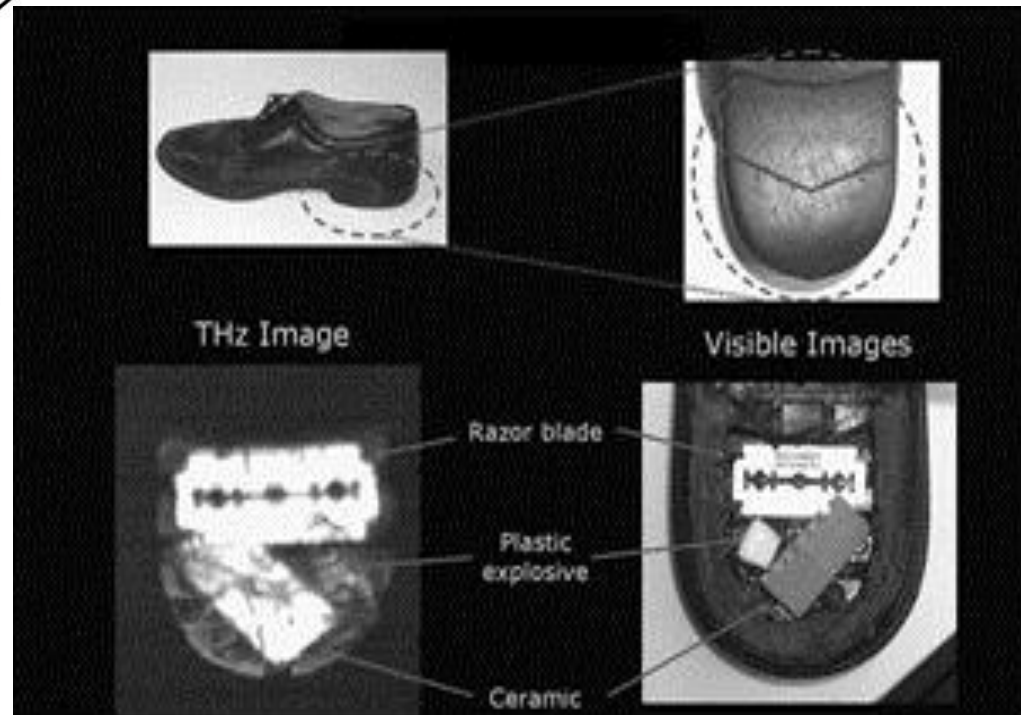
ホームランド  
セキュリティ



ナイフ

ol. 297, 2

拳銃



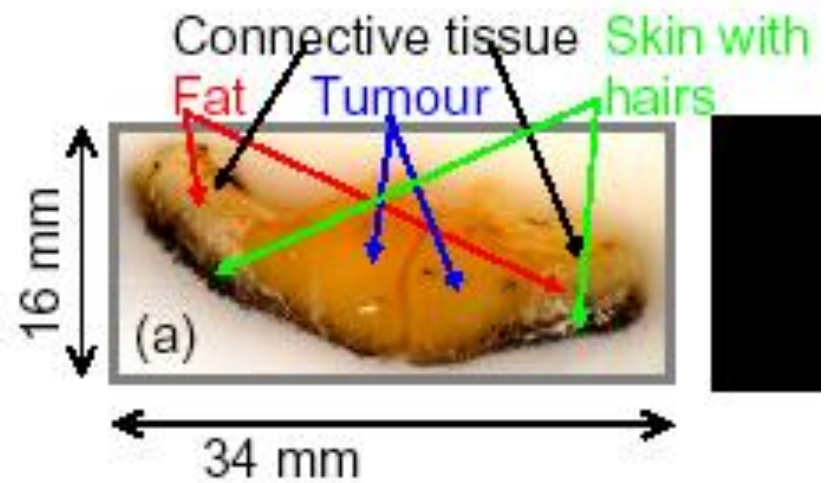


# THz分光イメージング②

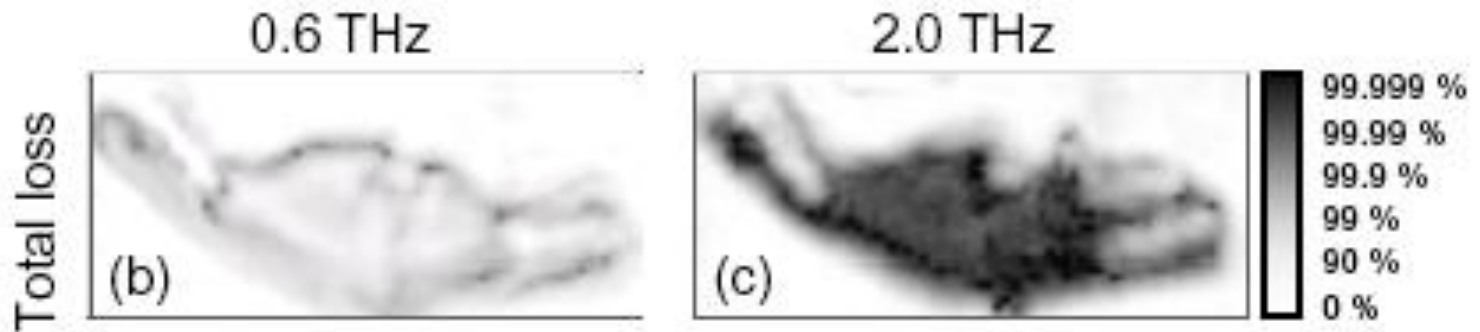
～THz領域のカラー（分光）画像で識別して見る～

～ガン組織の判別～

光学イメージ



THz分光イメージ



～T.Loffler et al, Optics Express, Volume 9, pp. 616-621 (2001).

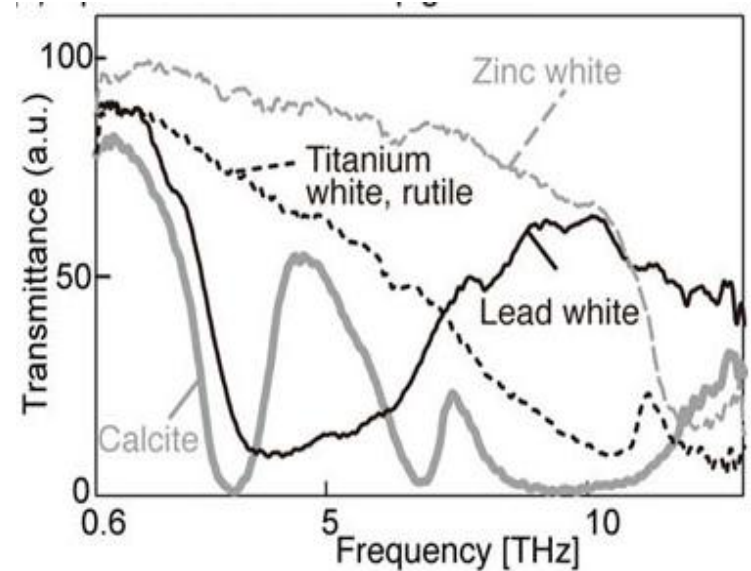
# THz分光イメージング③

文化財保存

異なる白顔料  
のTHzスペクトル

THz疑似カラー  
イメージ

可視イメージ



< White pigments >

Lead white

Litopon

Zinc white

Titanium white

Lime white

ルーブル美術館でも導入済み

ref) IEICE Electron. Express, Vol. 4, No. 8, 258-263 (2007).

# 2次元電気光学サンプリング (2D-FSEOS)

ref) Q. Wu et al, APL 69, pp.1026-1028 (1996).

点計測から2Dイメージ計測へ

## 共軸配置

THzパルスとプローブ光を電気光学結晶内で面として重ねる



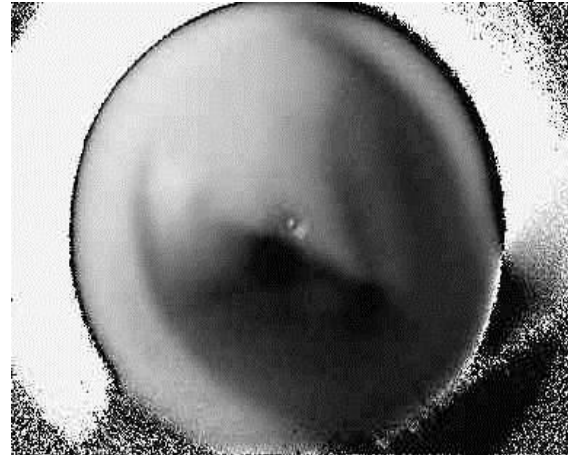
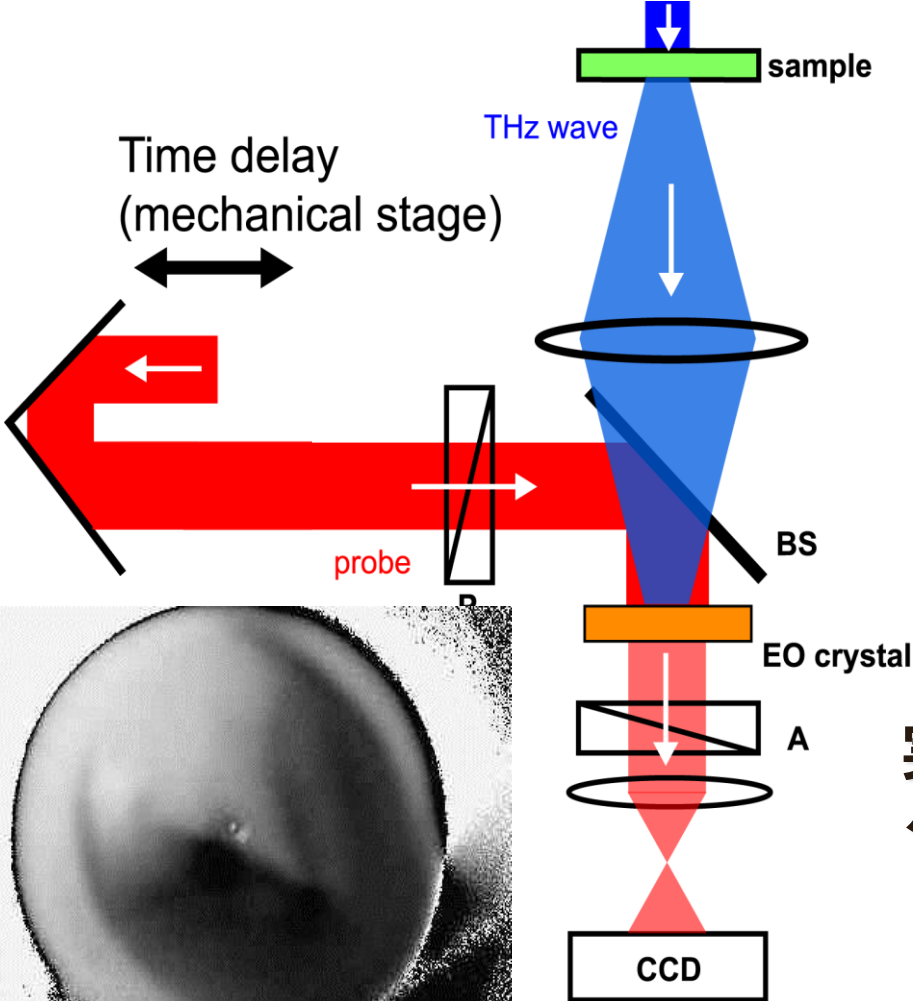
電気光学ポッケルス効果によりTHzイメージ情報をプローブ光に転写



実時間で2次元透過イメージング



分光イメージングのためには時間遅延走査が必要



食中植物のTHzムービー (栃木ニコンHPより)



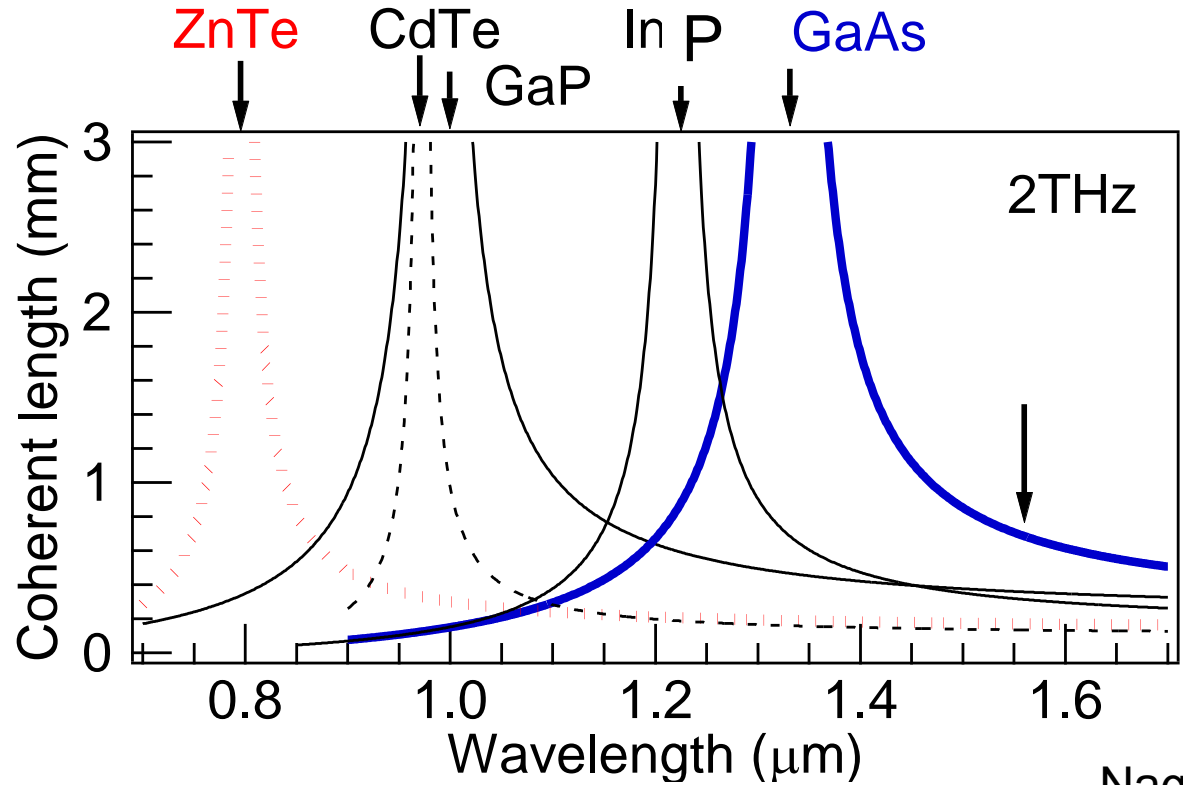
# Phase Matching Condition in optical rectification

$$k(\omega + \Omega) - k(\omega) - k(\Omega) = 0$$

Phase matching is satisfied near the bandgap

optical Index of group velocity = refractive index in THz region

Multi-photon absorption in nonlinear crystal disturbs intense excitation pulse incidence



Coherent length:

$$l_c = \frac{c}{2f |n_{THz} - n_g|}$$