

# **PEM**

---

---

## **光応用電磁界計測に関する チュートリアルワークショップ**

2021年 6月10日(木)

於：オンライン開催

主 催：電子情報通信学会  
光応用電磁界計測特別研究専門委員会

協 賛：株式会社精工技研  
7G aa株式会社  
株式会社レスターコミュニケーションズ  
シンクランド株式会社

# 光電磁界計測に関するチュートリアルワークショップ

## プログラム

2021年6月10日(木) 13:00～17:00

- 13:00～13:05 開会の挨拶  
大西 輝夫 (情報通信研究機構)
- 13:05～14:35 5G無線・ミリ波レーダーのための光応用電磁界計測技術  
～アンテナ・センサとフォトニクス基礎～  
村田 博司 (三重大学)
- 14:35～16:05 テラヘルツ帯における材料評価技術の基礎と B5G/6G に向けた応用例  
水野 麻弥 (情報通信研究機構)
- 16:20～17:00 企業展示コーナー  
1) 株式会社精工技研  
2) 7G aa 株式会社  
3) 株式会社レスターコミュニケーションズ  
4) シンクランド株式会社
- 17:00～17:30 個別ブレイクルーム

会場：オンライン開催

主催：電子情報通信学会

光応用電磁界計測特別研究専門委員会



光応用電磁界計測に関するチュートリアルワークショップ

2021年 6月 10日

# 5G無線・ミリ波レーダーのための 光応用電磁界計測技術 ～アンテナ・センサとフォトニクス基礎～

三重大学 大学院工学研究科 電気電子工学専攻

村田 博司



# 講演内容

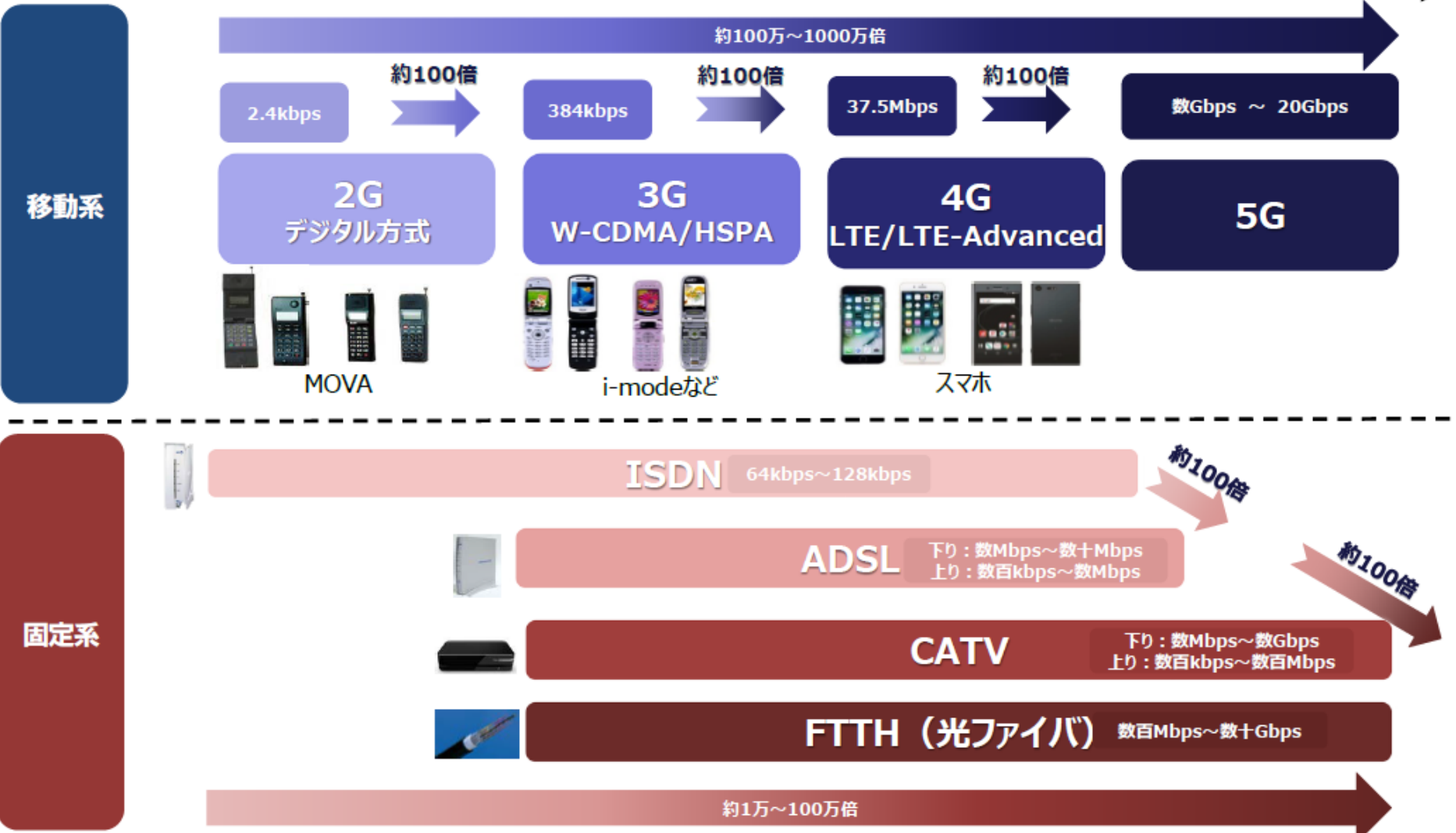
1. はじめに
  - 5G無線・ミリ波レーダー
  - 光応用電磁界計測の重要性
2. 光電界センサ
  - 基本構成と特長
3. 電気光学(EO)効果
  - 屈折率変化、屈折率楕円体
4. 光電界センサにおける光回路
  - 光ビームと光導波路
  - マツハ・ツェンダー型光導波路
5. 高周波電界計測
  - 走行時間効果、光スペクトル
  - 最近の光応用計測
6. まとめ

1. はじめに

1. はじめに

# 通信システムの進化

1990s                      2000s                      2010s                      2020s



# スマートフォン・携帯電話

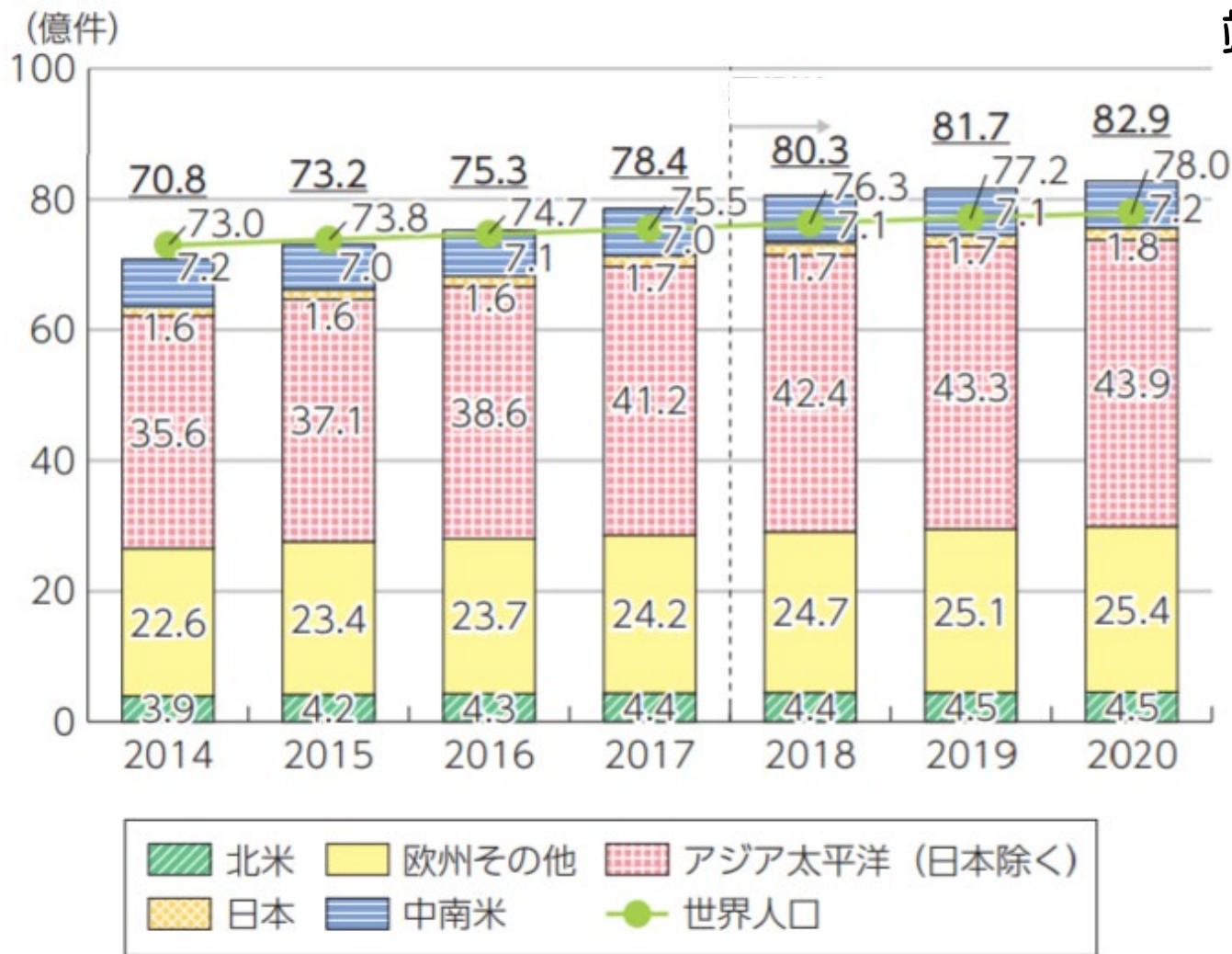
国内の登録台数(2021年3月)

(TCA 電気通信事業者協会ホームページより)

1. NTTドコモ	82,632,100台
2. AU	60,398,300台
3. ソフトバンク	45,621,600台
合計	188,652,000台

# 世界の移動体端末数

端末数 > 総人口



(出典) UN World Population Prospects 2017  
IHS Technology

# 5GからBeyond5G/6Gへ

## Beyond 5G

### 超高速・大容量

- アクセス通信速度は**5Gの10倍**
- コア通信速度は**現在の100倍**

### 超低遅延

- 5Gの**1/10の低遅延**
- CPSの高精度な同期の実現
- 補完ネットワークとの高度同期

### 超多数同時接続

- 多数同時接続数は**5Gの10倍**

### 超低消費電力

- 現在の**1/100の電力消費**
- 対策を講じなければ現在のIT関連消費電力が約36倍に（現在の総消費電力の1.5倍）

### 5Gの特徴的機能の更なる高度化

高速・大容量

低遅延

多数同時接続

5G

持続可能で新たな価値の創造に資する機能の付加

### 超安全・信頼性

- セキュリティの常時確保
- 災害や障害からの瞬時復旧

### 自律性

- ゼロタッチで機器が自律的に連携
- 有線・無線を超えた最適なネットワークの構築

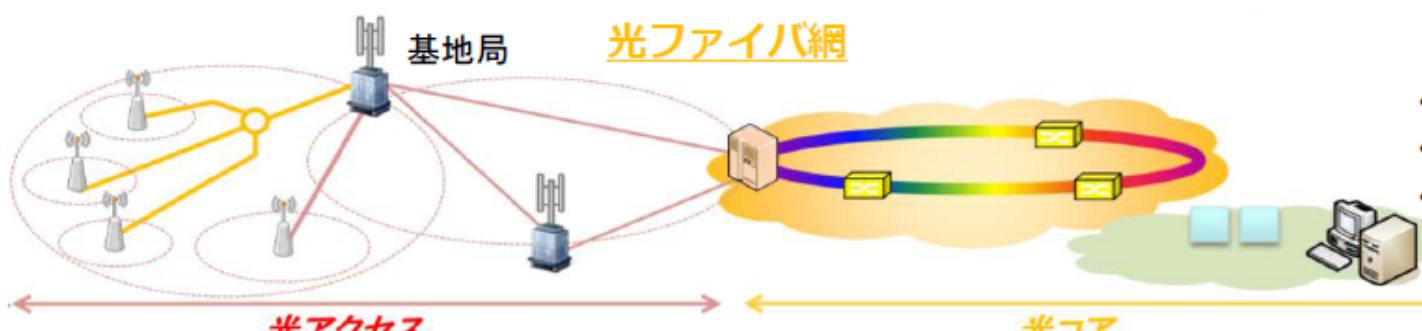
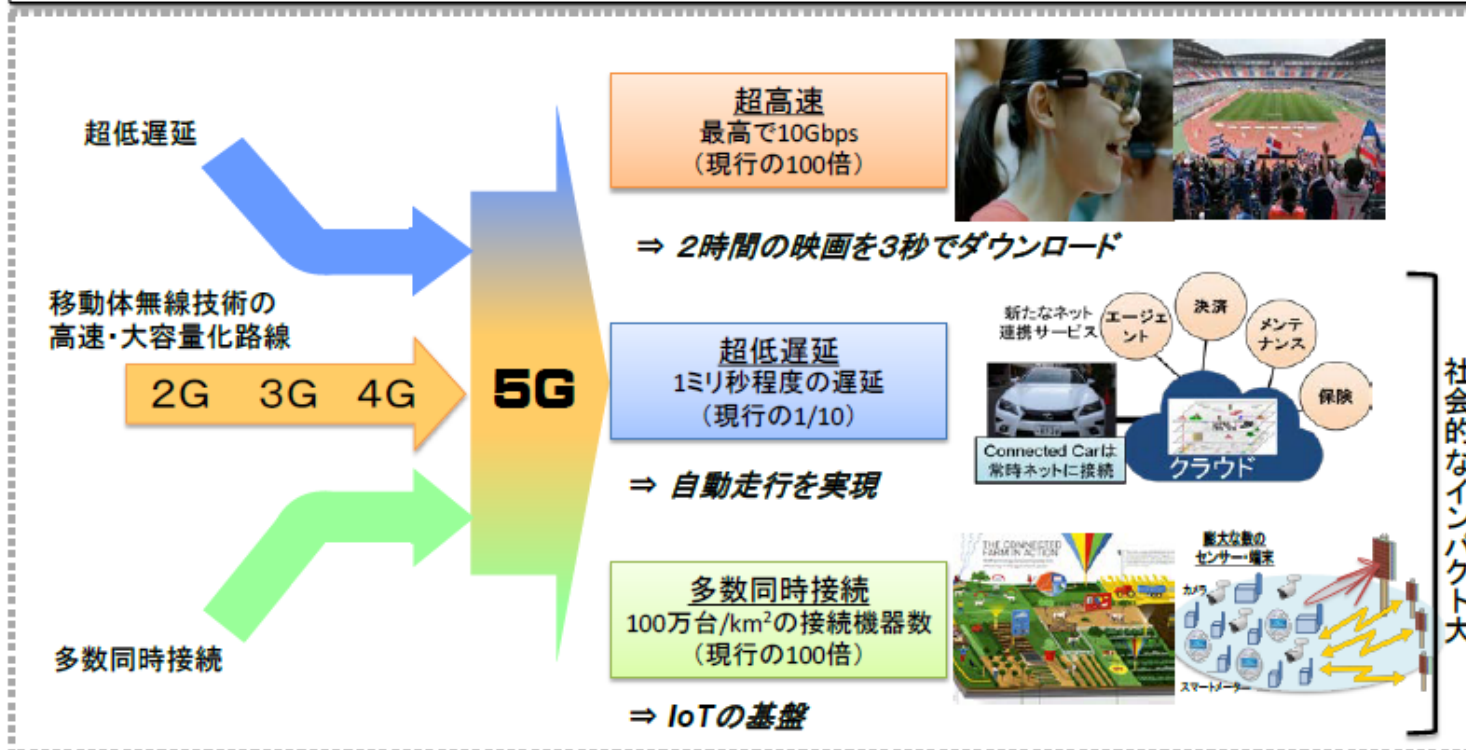
### 拡張性

- 衛星やHAPSとのシームレスな接続（宇宙・海洋を含む）
- 端末や窓など様々なものを基地局化
- 機器の相互連携によるあらゆる場所での通信

# 5G無線と光ネットワーク

<5Gの主要性能>

<b>超高速</b>	⇒	最高伝送速度 10Gbps (現行LTEの100倍)
<b>多数同時接続</b>		100万台/km <sup>2</sup> の接続機器数 (現行LTEの100倍)
<b>超低遅延</b> (リアルタイム)		1ミリ秒程度の遅延 (現行LTEの1/10)



- <光ファイバの特徴>
- 双方向大容量伝送
  - 高安定性
  - 5Gの前提

(出典)総務省「『将来のネットワークインフラに関する研究会』報告書概要」

# 5G無線の周波数割当

## 【3.7GHz帯】



## 【4.5GHz帯】



## 【28GHz帯】

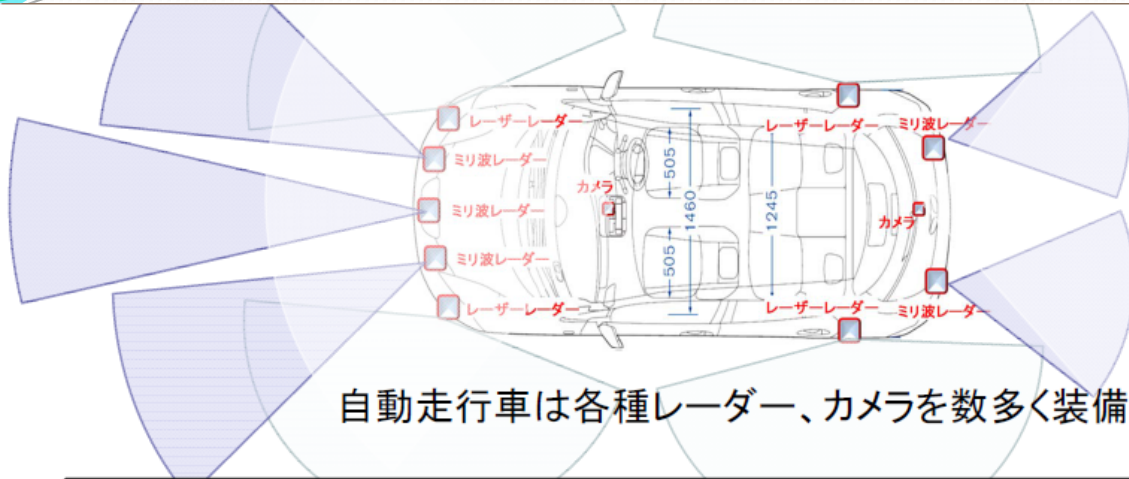


# 高速鉄道向けミリ波無線システム

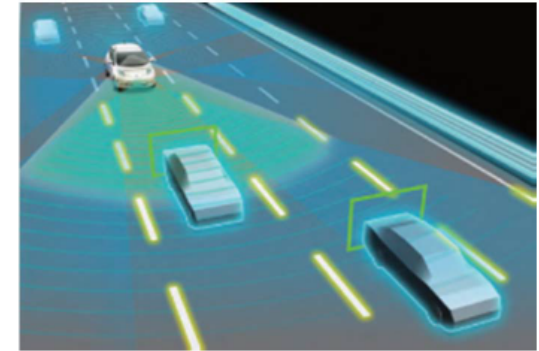


高速鉄道向け通信システムのイメージ図

# 自動車用レーダーシステム

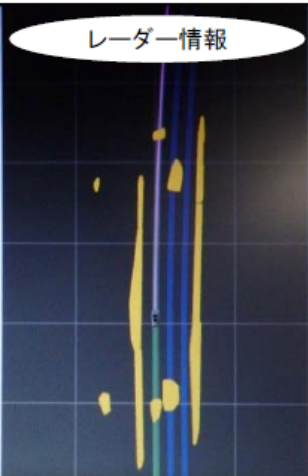


自動走行車は各種レーダー、カメラを数多く装備



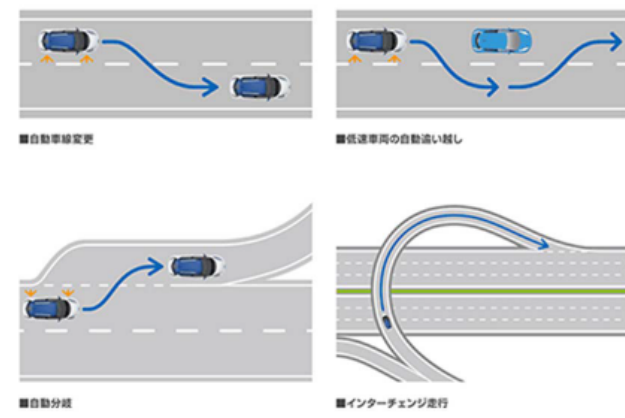
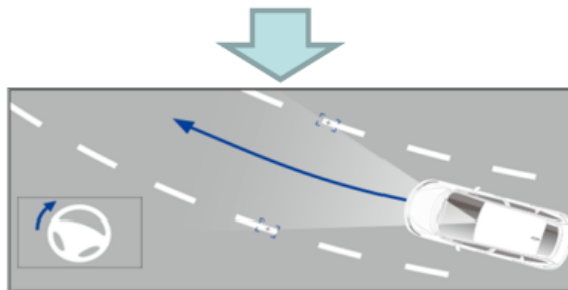
周囲の状況を適切に把握

今回のITU決定により、ミリ波レーダーに使用できる周波数が拡大  
【現在の20cm程度の大きさのものを把握できるレーダーをから7.5cm程度まで把握できるよう高性能化】  
高精度化により人を検知しやすくなり街中での自動走行等の実現を加速化



カメラ・レーダー情報

自動走行車は、地図情報と周囲の情報を突き合わせて走行方法を判断、操作



様々な状況に対応出来るよう研究開発が進められている

# 電波の多様化・高度化・高周波化

- 無線機器数の増加
  - 干渉、輻輳
- 無線機器の小型化・集積化
  - 誘導、結合



- 電波の正確な計測技術・評価技術
  - アンテナ、プローブ
    - △誘導・結合
    - △ケーブルの影響
  - 光電界センサ
    - ◎低侵襲・低誘導
    - 高感度化

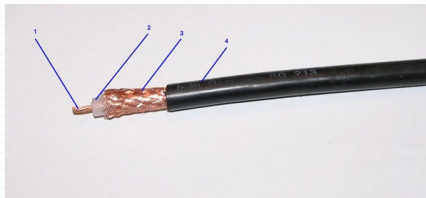
# 5Gと光応用電磁界計測

## ✓ 4G

$$f_c \sim 1.5 \text{ GHz} \Leftrightarrow \lambda \sim 20 \text{ cm}$$

Loss in coax cable @ 1.5 GHz

$$\mathbf{5D2V} \quad \alpha \sim -0.4 \text{ dB/m}$$



## ✓ A/D Conversion Technique

Sampling frequency

$$f_s \sim 26 \text{ GHz (HMCAD5831)}$$

## ✓ 5G

$$f_c \sim 30 \text{ GHz} \Leftrightarrow \lambda \sim 1 \text{ cm}$$

Loss in coax cable @ 30 GHz

$$\mathbf{CM06} \quad \alpha \sim -2.5 \text{ dB/m}$$



## ✓ New EO sensor/wireless receiver

Antenna-coupled resonant electrode

EO modulator

$$f_r \sim 30 \text{ GHz} \Rightarrow \text{field enhance} \sim 8000$$

$$f_r \sim 80 \text{ GHz}, 90 \text{ GHz}$$

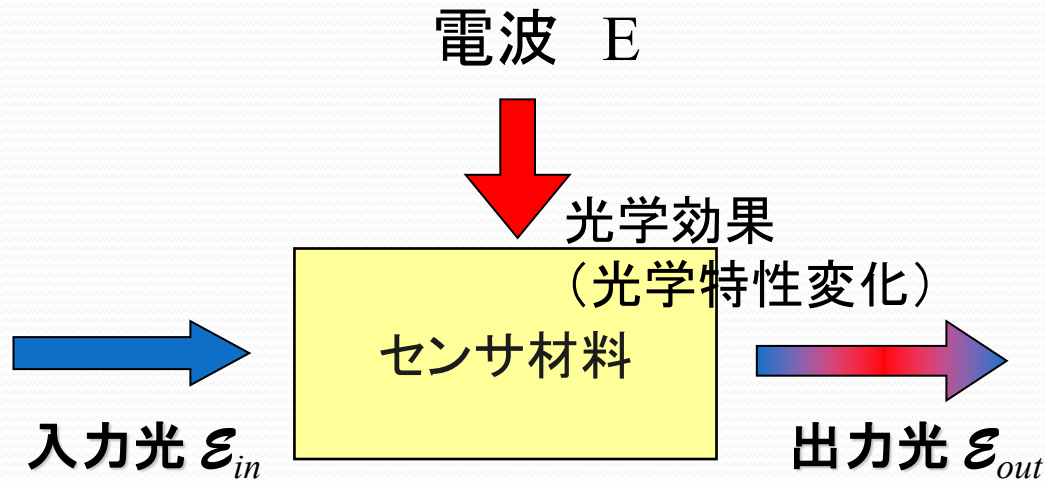
Optical phase modulator (no-opt bias)

Optical IF conversion technique

# 2. 光電界センサ

基本構成と特長

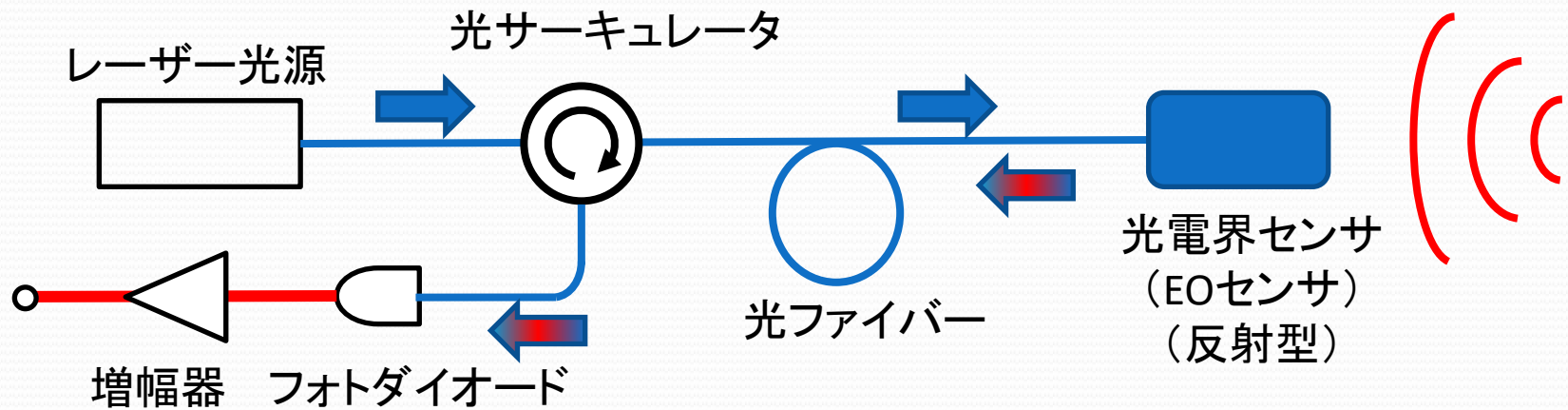
# 光電界センサの基本構成



$$\text{出力光電界 } \varepsilon_{out} = \varepsilon_0 \exp\{j(2\pi\nu t - ky + \phi)\}$$

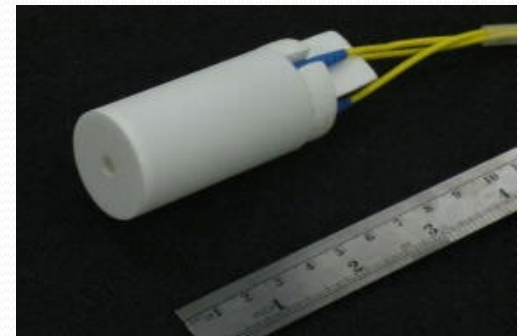
- ・ 振幅変調 *Amplitude Modulation* : AM  
(強度変調 *Intensity Modulation* : IM)
- ・ 周波数変調 *Frequency Modulation* : FM
- ・ **位相変調 *Phase Modulation* : PM**
- ・ 偏光変調 *Polarization Modulation* : Pol. M

# 光電界センサを用いた電界計測



# 光電界センサの特長

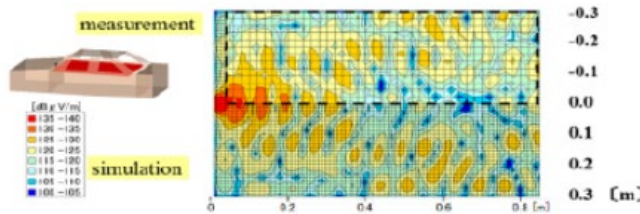
- 低侵襲、低誘導
- 電界振幅・位相・方向
- 線形性
- 小型・軽量 数mm～cm
- 高速・広帯域 DC～THz
- 安定性
- 光ファイバーとの親和性



# 市販の光電界センサ

精工技研社HPより

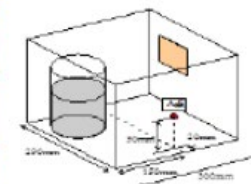
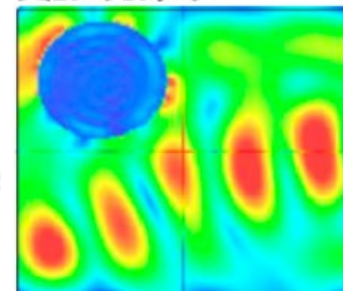
## 自動車室内の電界分布計測



HORIUCHI et al., : COMPARISONS OF SIMULATED AND MEASURED ELECTRIC FIELD DISTRIBUTIONS : ICICE TRANS.COMMUN., VOL.E90-B, NO.9 SEPTEMBER 2007

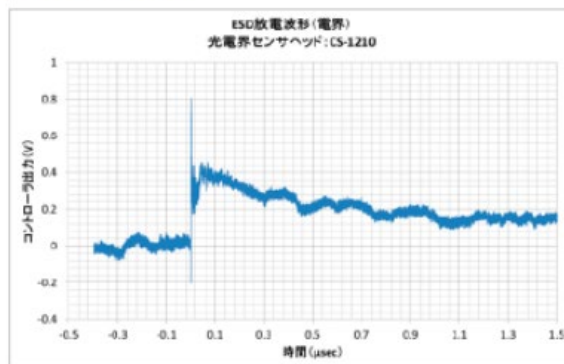
## 電子レンジ内電界分布計測

シミュレーションデータ

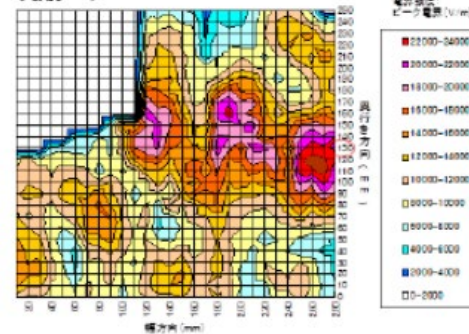


2010年JEMEAシンポジウム  
電子レンジ内の電磁界解析と  
電界分布強度測定 福島

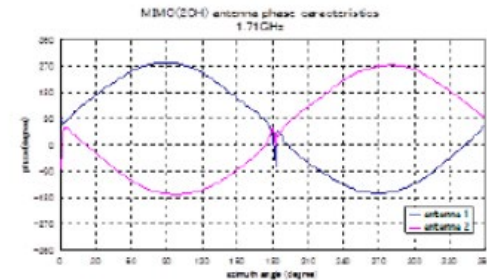
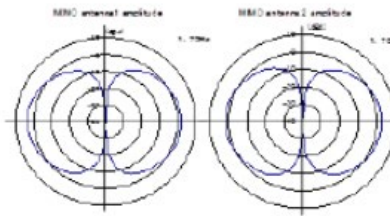
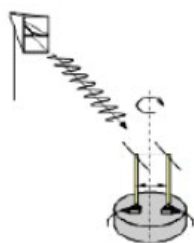
## ESD放電波形計測



実測データ



## MIMO受信パターン測定データ



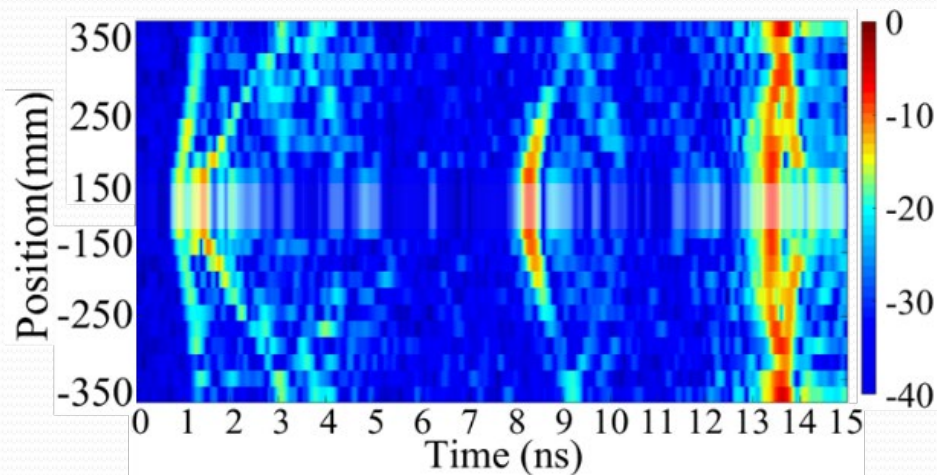
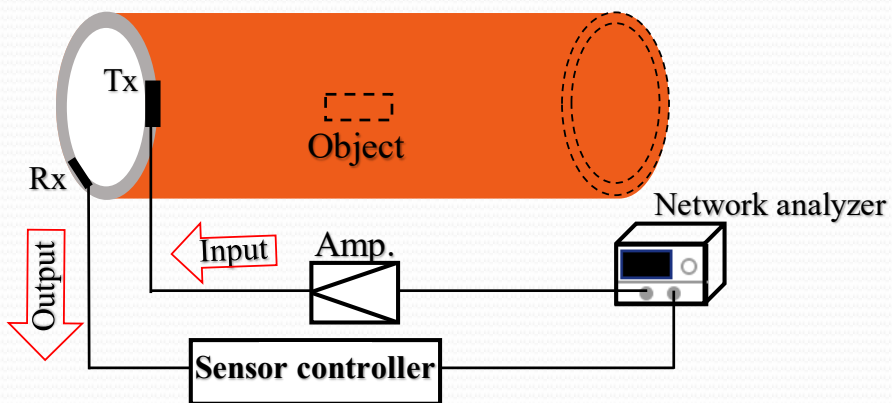
コントローラ



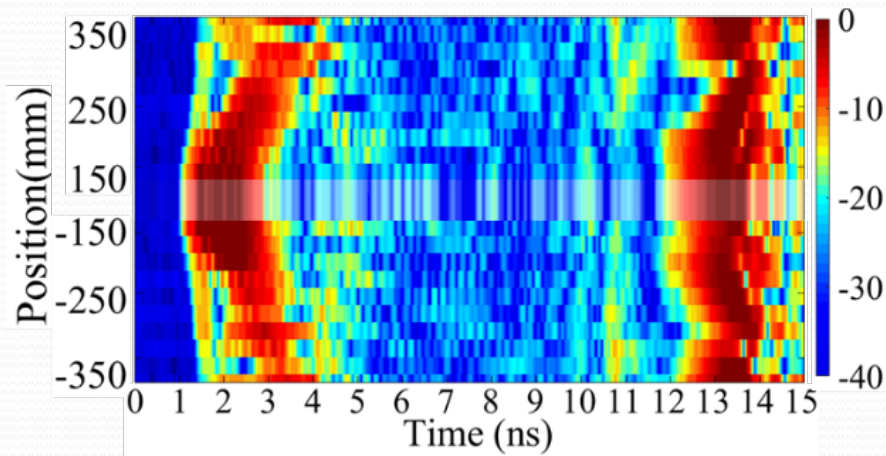
# 光電界センサを用いた マイクロ波イメージング（非破壊診断）

✓ 光電界センサを用いた場合

FRPM管に沿って伝搬する  
マイクロ波モード



✓ ダイポールアンテナを用いた場合



# 高性能フォトニクス技術

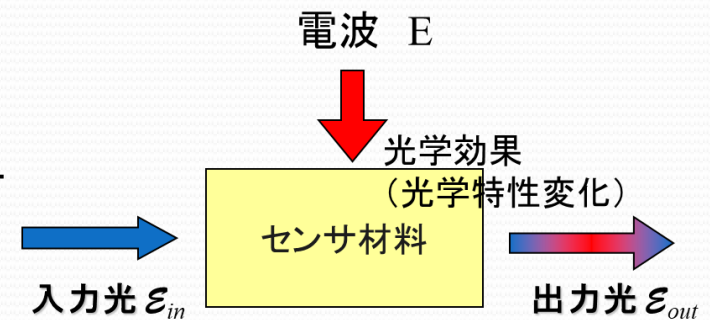
## — 光ファイバー通信システムを支える技術 —

- 超低損失石英光ファイバー      伝搬損:  $\sim 0.2\text{dB/km}$
- 高安定DFBレーザー光源      線幅:  $\sim 10\text{MHz}$
- 超高速フォトダイオード      帯域:  $\sim 1\text{THz}$
- 光サーキュレーター・カップラ      分離比:  $\sim 50\text{dB}$
- 光増幅器 (EDFA, SOA)      利得:  $\sim 20\text{dB}$
- 光変調器      帯域: DC $\sim$ 30 GHz、駆動電圧:  $\sim$ 数V
- 光フィルター

DC $\sim$ THz帯の電磁界計測が可能

# 光電界センサ材料への要求性能

- 光に対して透明
- 電波に対しても透明
- 電波によって光学特性が変化
  - 電気光学 (EO) 効果  
電波の振幅・位相・方向  
広帯域
- 安定性 (金属封止は不可)



- ✓ 光学結晶 (無機、有機)
- ✓ EOポリマー

# 3. 電気光学 (EO) 効果

## 3. 電気光学 (EO) 効果

屈折率変化、屈折率楕円体

# 電気光学(EO)効果 (広義の非線形光学効果の1つ)

- 1次電気光学(EO)効果(ポッケルス効果)

$$\Delta n \propto E$$

- ✓ 中心対称性のない光学材料(異方性材料)のみ

異方性結晶(LiNbO<sub>3</sub>等)、化合物半導体、ポリマー等

- ✓ 2次の非線形光学効果 → 3光波混合(2光波+1電気)

$$\mathbf{P}^{(2)} = \varepsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E} \mathcal{E}$$

- 2次電気光学(EO)効果(カー効果)

$$\Delta n \propto |E|^2$$

- ✓ すべての光学材料

- ✓ 3次の非線形光学効果 → 4光波混合(2光波+2電気)

$$\mathbf{P}^{(3)} = \varepsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E} \mathbf{E} \mathcal{E}$$

# Maxwell 方程式

$\epsilon$  : 誘電率  
 $\mu$  : 透磁率  
 $\sigma$  : 導電率

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

## ✓ 構成方程式

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{P}_m$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E} \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E} + \dots$$

$\epsilon, \mu, \sigma, \chi$  は物質固有の量  
(一般にテンソル量)  
物質の電磁氣的応答を表す



James Clerk Maxwell (英)

## ✓ 光学結晶 (透明誘電体)

$\sigma=0$  (導電性無)

$\mu=\mu_0, \mathbf{P}_m = \mathbf{0}$  (非磁性)

# 高階テンソル(電気光学効果 / 非線形光学効果)

## 電束密度と誘電分極

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

誘電率テンソル  $\varepsilon$  = 
$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix}$$
  
(2階テンソル)

## 非線形光学効果が生じる場合

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}\mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots$$

$\chi^{(1)}$  : 2階テンソル

$\chi^{(2)}$  : 3階テンソル

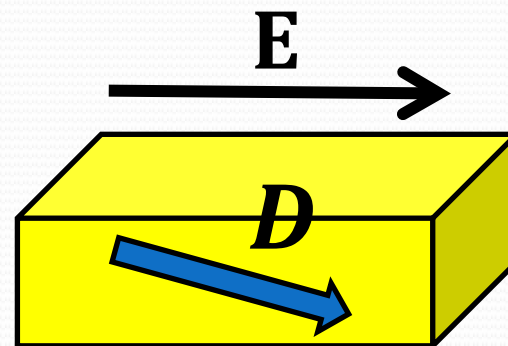
$\chi^{(3)}$  : 4階テンソル

# 誘電率テンソルと光学結晶

誘電率テンソル

(2階テンソル)

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix}$$



$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} \\ &= \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \end{aligned}$$

等方性結晶 (誘電率テンソルはスカラーと同じ)

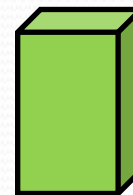
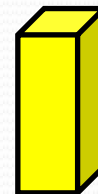
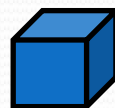
$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z$$

一軸性結晶

$$\epsilon_x = \epsilon_y \neq \epsilon_z$$

二軸性結晶

$$\epsilon_x \neq \epsilon_y \neq \epsilon_z$$



<2階テンソル>  
結晶の方向  
電界の方向

# 1次EO(電気光学)効果 ポッケルス(Pockels)効果

$$\Delta n_i = \frac{1}{2} n^3 r_{ij} E_j$$

$n$  : 屈折率

$r_{ij}$  : ポッケルス係数

$E_j$  : 印加電界

- 電気信号に比例する屈折率変化
- 純粋な光位相変調
- 自発分極の向きで極性が反転
- LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, ZnTe, ZnSe, GaAs, EOポリマー
- 高速動作 (>100GHz)
- 広波長帯域 (>C, L, S-band)
- 安定性・信頼性



*Friedrich Carl Alwin Pockels (1865 - 1913)*

## Journal content

- [+ Journal home](#)
- [+ Advance online publication](#)
- [+ Current issue](#)
- [+ Nature News](#)
- [+ Archive](#)
- [+ Supplements](#)
- [+ Web focuses](#)
- [+ Podcasts](#)
- [+ Videos](#)
- [+ News Specials](#)

## Letters to Editor

*Nature* **43**, 437-439 (12 March 1891) | doi:10.1038/043437c0

### Surface Tension





RAYLEIGH

I SHALL be obliged if you can find space for the accompanying translation of an interesting letter which I have received from a German lady, who with very homely appliances has arrived at valuable results respecting the behaviour of contaminated water surfaces. The earlier part of Miss Pockels' letter covers nearly the same ground as some of my own recent work, and in the main harmonizes with it. The later sections seem to me very suggestive, raising, if they do not fully answer, many important questions. I hope soon to find opportunity for repeating some of Miss Pockels' experiments.

[▲ Top](#)

subsc  
na

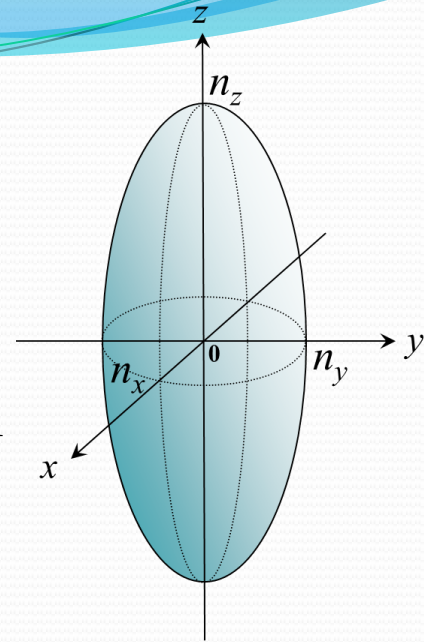
## Full text

- [+ Previous](#)
- [+ Table of c](#)
-  [Download](#)
-  [Send to](#)
-  [Rights](#)
-  [Order](#)

# ポッケルス効果

ポッケルス効果により屈折率楕円体が変化する

$$B_1 x^2 + B_2 y^2 + B_3 z^2 + 2B_4 yz + 2B_5 zx + 2B_6 xy = 1$$



$$\begin{pmatrix} B_1 - \frac{1}{n_x^2} \\ B_2 - \frac{1}{n_y^2} \\ B_3 - \frac{1}{n_z^2} \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

$(r_{ij})$  : 1次電気光学テンソル  
(3階テンソル)

$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$  : 印加電界

<3階テンソル>  
結晶の方向  
電界の方向  
光電界の方向

# 光学結晶の種類

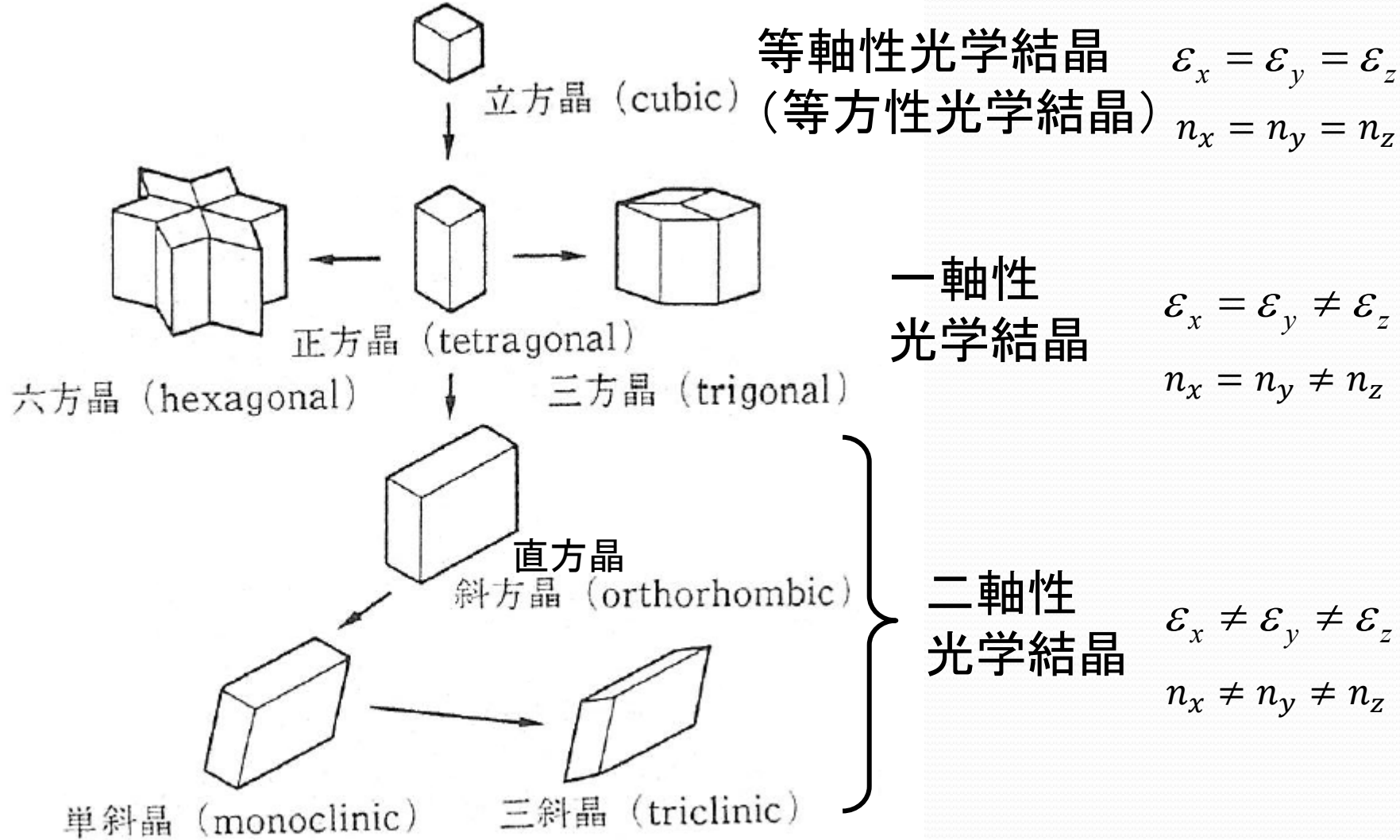
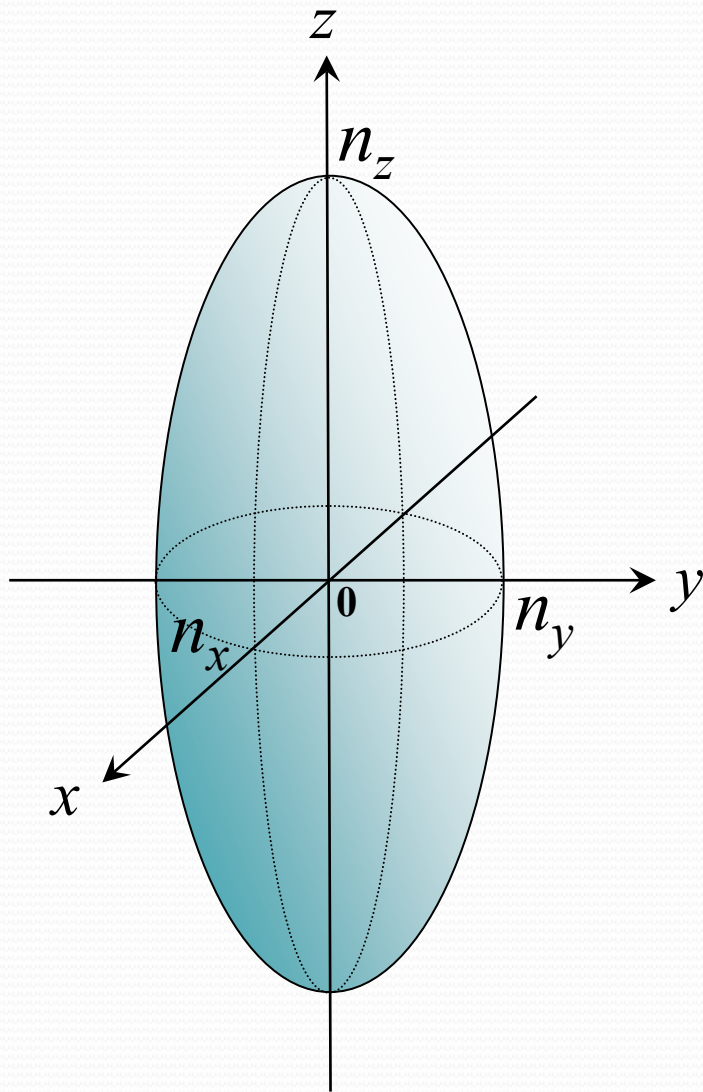


図 2.21 単純立方格子から変形する七つの晶系

# 屈折率橢圓體



$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

$n_x \neq n_y \neq n_z$  : 二軸性光学結晶

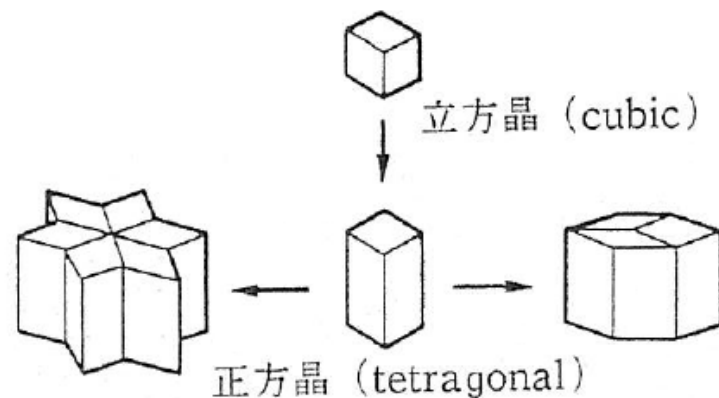
$n_x = n_y \neq n_z$  : 一軸性光学結晶

# 屈折率楕円体とは？

- 空間に蓄えられる電気的エネルギー

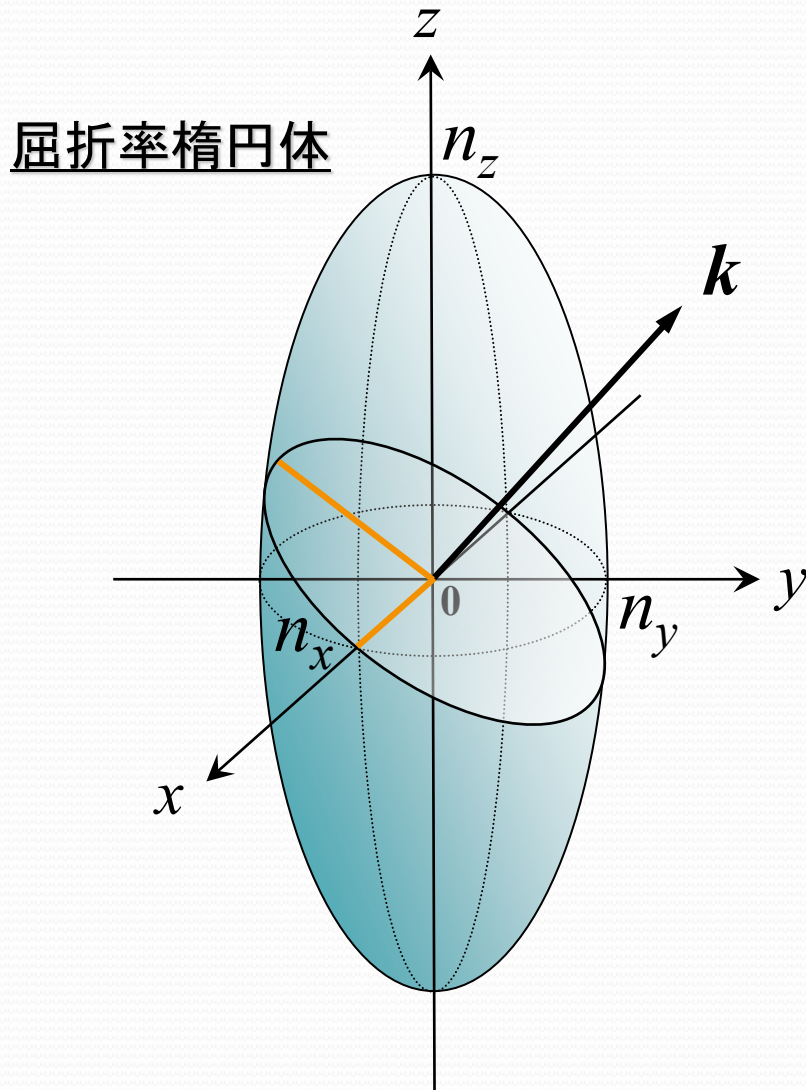
$$\begin{aligned}w_e &= \frac{1}{2} E \cdot D \\&= \frac{1}{2} E \cdot (\varepsilon_{ij}) E \\&= \frac{1}{2} (\varepsilon_{xx} E_x^2 + \varepsilon_{yy} E_y^2 + \varepsilon_{zz} E_z^2)\end{aligned}$$

$$\frac{D_x^2}{\varepsilon_{xx}} + \frac{D_y^2}{\varepsilon_{yy}} + \frac{D_z^2}{\varepsilon_{zz}} = 2w_e$$



$$\therefore \frac{D_x^2}{n_x^2} + \frac{D_y^2}{n_y^2} + \frac{D_z^2}{n_z^2} = 2\varepsilon_0 w_e$$

# 異方性光学結晶中の光波伝搬



$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

$n_x \neq n_y \neq n_z$  : 二軸性光学結晶

$n_x = n_y \neq n_z$  : 一軸性光学結晶

# なぜ屈折率楕円体なのか？

- 異方性結晶を扱う

⇒ 本来はテンソルだが屈折率楕円体の方がはるかに簡便

- 光学結晶は低侵襲・低誘導（電界を乱さない）

⇒ 電界との相互作用は弱い

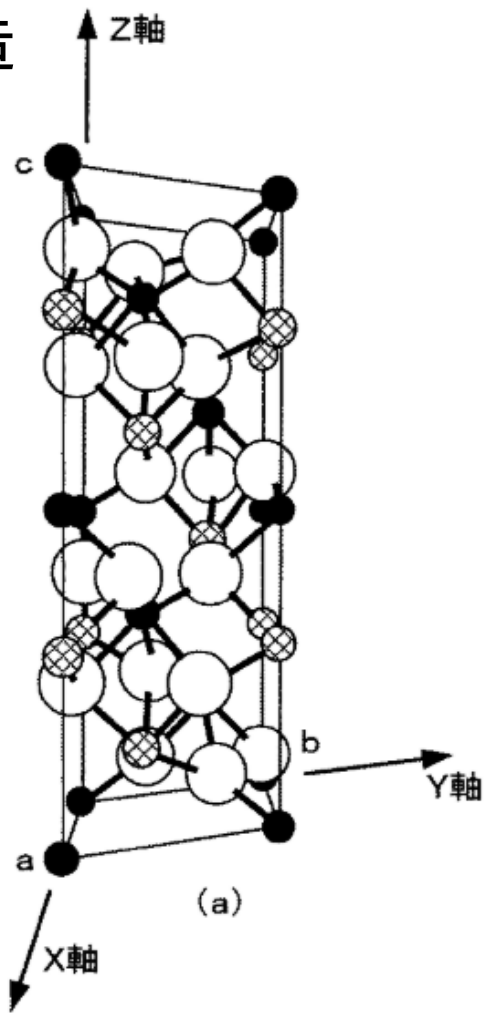
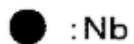
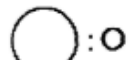
EO効果により屈折率楕円体がわずかに変化

屈折率変化量： $\Delta n < 10^{-4}$

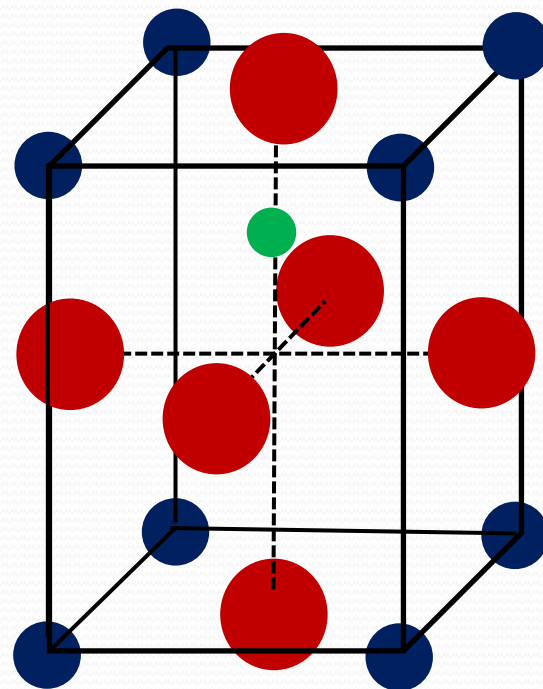
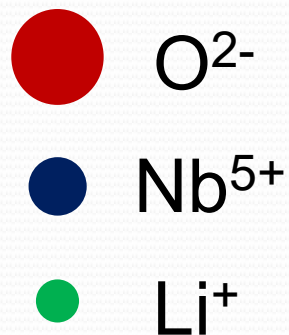
$$\Delta n_i = \frac{1}{2} n^3 r_{ij} E_j$$

# 例: $\text{LiNbO}_3$ の単位結晶構造

3m構造



模式図



# LiNbO<sub>3</sub>(ニオブ酸リチウム)の特性

LiNbO<sub>3</sub> (congruent組成)

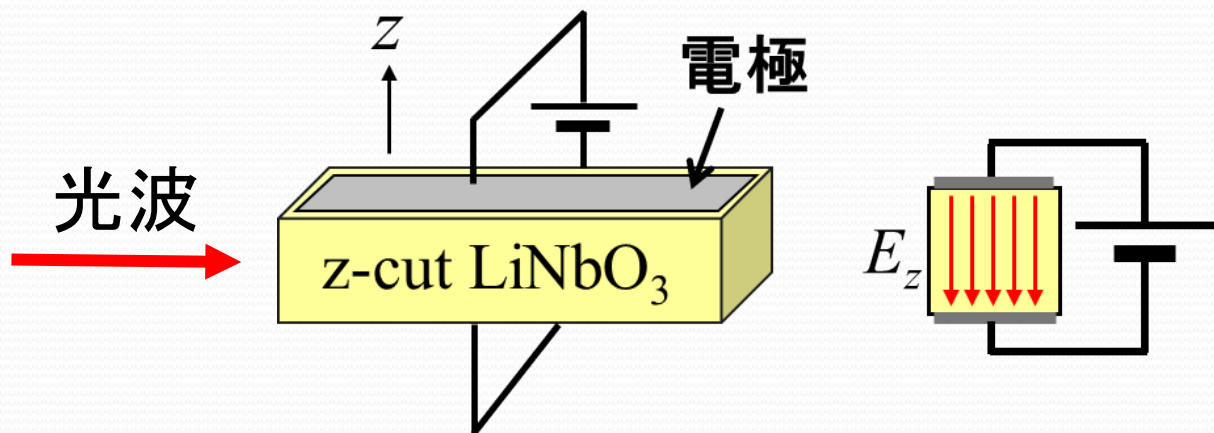
点群	3m
屈折率	$n_o = 2.2868$ (633nm) $n_e = 2.2028$ (633nm)
電気光学係数	$r_{13} = 8.6$ pm/V $r_{33} = 30$ pm/V $r_{22} = 3.4$ pm/V $r_{51} = 28$ pm/V
比誘電率	$\epsilon_{11}^{ST} = 48$ $\epsilon_{33}^{ST} = 28$
誘電損失	$\tan\delta = 1.3 \times 10^{-3}$
キュリー温度	~1480 °C
分極反転抗電界	~21kV/mm
自発分極	75 $\mu$ C/cm <sup>2</sup>

$$(r_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

## 【特長】

- 大きな電気光学定数  
 $r_{33} = 30$  pm/V
- 高速応答  
>100GHz
- 低損失光導波路(Ti拡散)  
伝搬損失  $\leq 0.1$  dB/cm

# 例: LiNbO<sub>3</sub>の場合 (z方向電界印加)



$$\begin{pmatrix} a_{11} - \frac{1}{n_x^2} \\ a_{22} - \frac{1}{n_y^2} \\ a_{33} - \frac{1}{n_z^2} \\ a_{23} \\ a_{31} \\ a_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_z \end{pmatrix}$$

$$a_{11} = \frac{1}{n_x^2} + r_{13} E_z$$

$$a_{22} = \frac{1}{n_y^2} + r_{13} E_z$$

$$a_{33} = \frac{1}{n_z^2} + r_{33} E_z$$

$$a_{23} = a_{31} = a_{12} = 0$$

# 例: $\text{LiNbO}_3$ の場合 (z方向電界印加)

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13}E_z\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13}E_z\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E_z\right)z^2 = 1$$

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

# 例: $\text{LiNbO}_3$ の場合 (z方向電界印加)

$$\begin{aligned} n_o' &= \left( \frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z \right)^{-1/2} \\ &= n_o (1 + n_o^2 r_{13} E_z)^{-1/2} \\ &\cong n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_e' &= \left( \frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z \right)^{-1/2} \\ &= n_e (1 + n_e^2 r_{33} E_z)^{-1/2} \\ &\cong n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z \end{aligned}$$

$$\Delta n_o = -\frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z \quad \Delta n_e = -\frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z$$

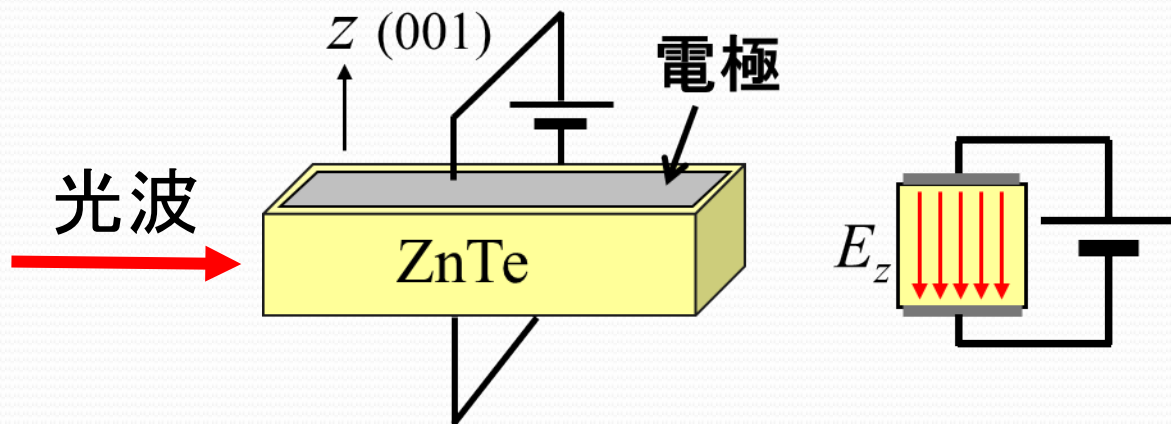
屈折率楕円体: 長軸・短軸が伸び縮みする

# ZnTe の特性

晶系/点群	立方晶 $\bar{4}3m$ / (等軸性光学結晶)
屈折率	$n = 2.984$ ( $\lambda = 633\text{nm}$ )
電気光学係数	$r_{41} = 4.3\text{pm/V}$
比誘電率	$\epsilon_r = 10.1$

$$(r_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix}$$

# 例：ZnTeの場合



$$\begin{pmatrix} a_{11} - \frac{1}{n_x^2} \\ a_{22} - \frac{1}{n_y^2} \\ a_{33} - \frac{1}{n_z^2} \\ a_{23} \\ a_{31} \\ a_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_z \end{pmatrix}$$

$$a_{11} = a_{22} = a_{33} = a_{23} = a_{31} = 0$$

$$a_{12} = r_{41} E_z$$

# 例：ZnTeの場合

$$\left(\frac{1}{n^2} + r_{41}E_z\right)x'^2 + \left(\frac{1}{n^2} - r_{41}E_z\right)y'^2 + \frac{z'^2}{n^2} = 1$$

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

# 例：ZnTeの場合

$$n_{x'} = \left(\frac{1}{n^2} + r_{41}E_z\right)^{-1/2} \quad n_{y'} = \left(\frac{1}{n^2} - r_{41}E_z\right)^{-1/2} \quad n_{z'} = n$$

$$= n (1 + n^3 r_{41} E_z)^{-1/2} \quad = n (1 - n^3 r_{41} E_z)^{-1/2}$$

$$\cong n - \frac{1}{2} n^3 r_{41} E_z \quad \cong n + \frac{1}{2} n^3 r_{41} E_z$$

$$\Delta n_{x'} = -\frac{1}{2} n^3 r_{41} E_z \quad \Delta n_{y'} = +\frac{1}{2} n^3 r_{41} E_z \quad \Delta n_{z'} = 0$$

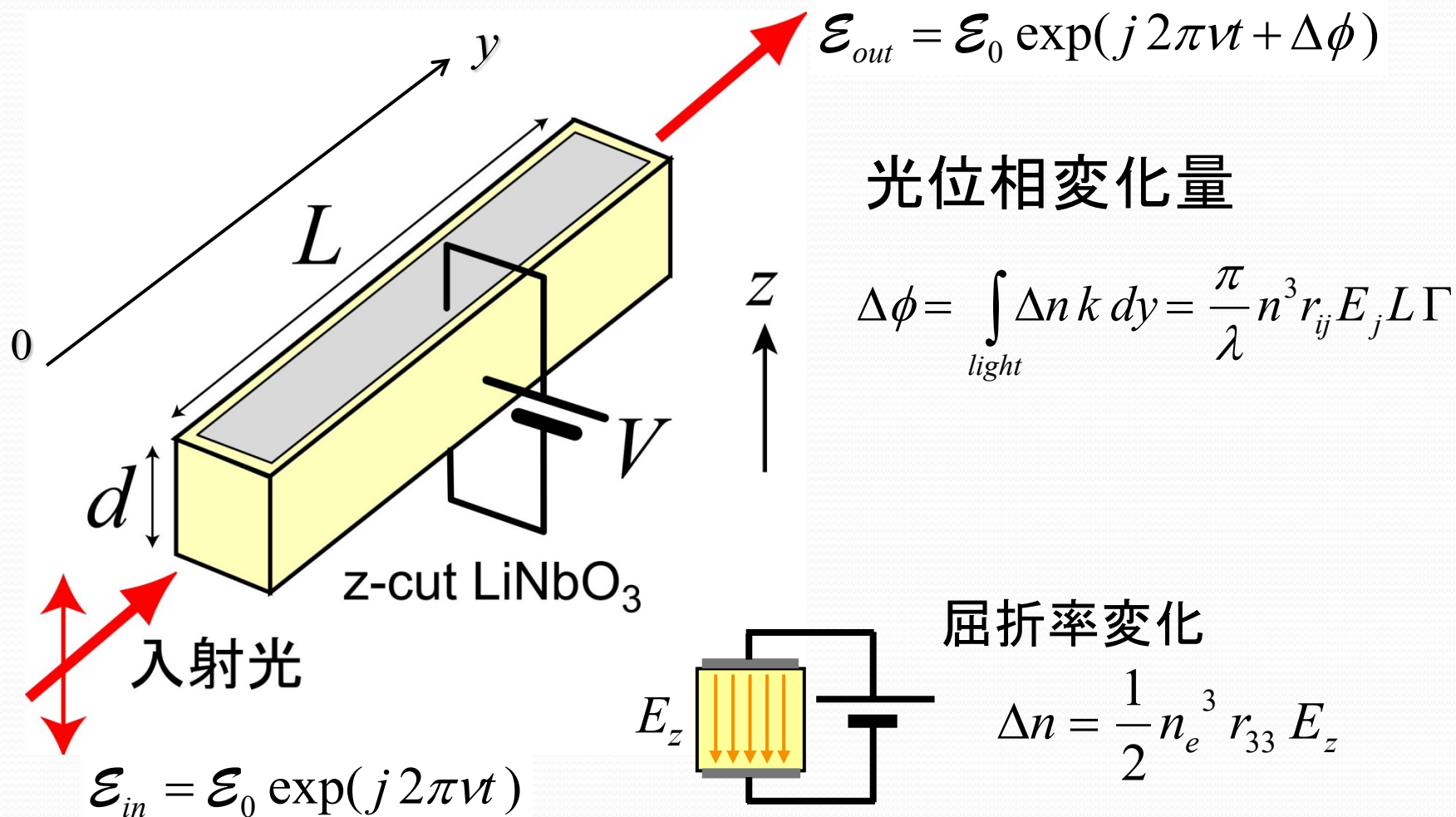
屈折率楕円体：球  $\Rightarrow$  回転楕円体

# 4. 光電界センサにおける光回路

バルク型と導波路型

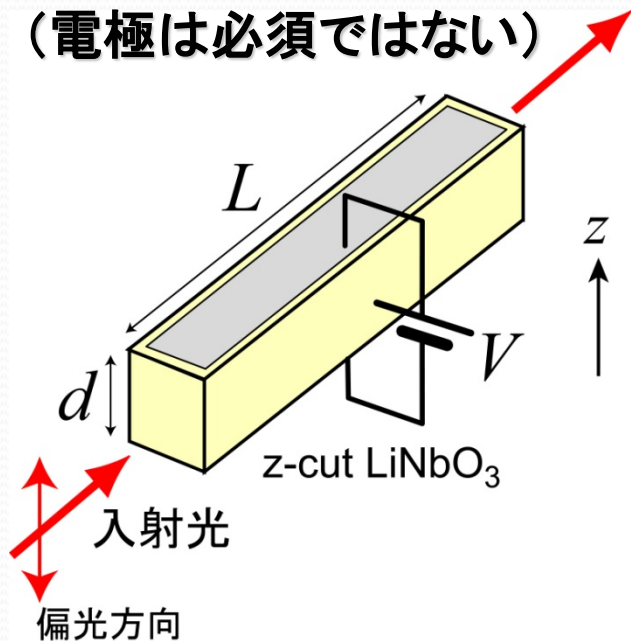
マツハ・ツェンダー型光導波路

# 光電界センサにおける光位相変化



# バルク(光ビーム)型と導波路型

バルク型光電界センサ  
(電極は必須ではない)



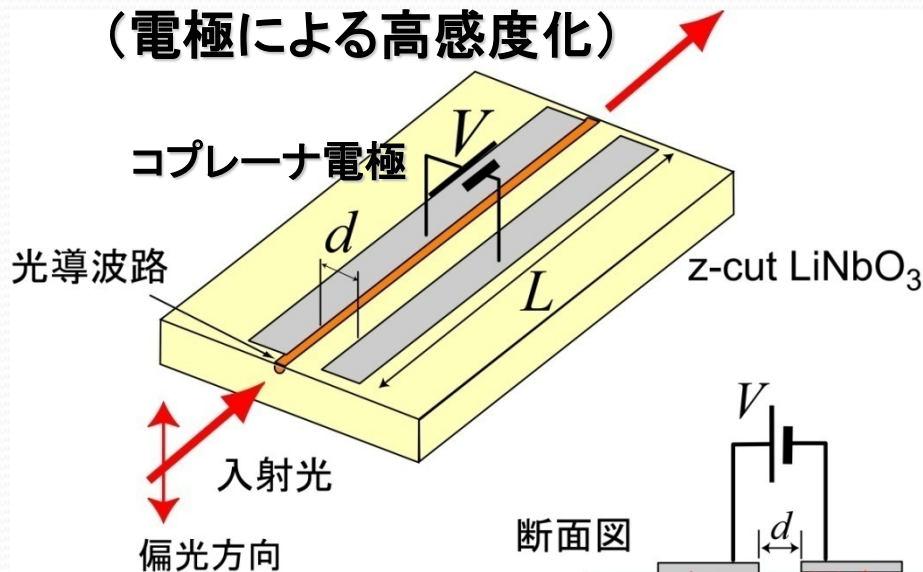
回折による  $L/d$  の制限

$$d \sim 2\text{mm}$$

$$L \sim 2\text{cm}$$

$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{n_e^3 r_{33} L} \sim 470\text{V}$$

導波路型光電界センサ  
(電極による高感度化)



回折制限無し

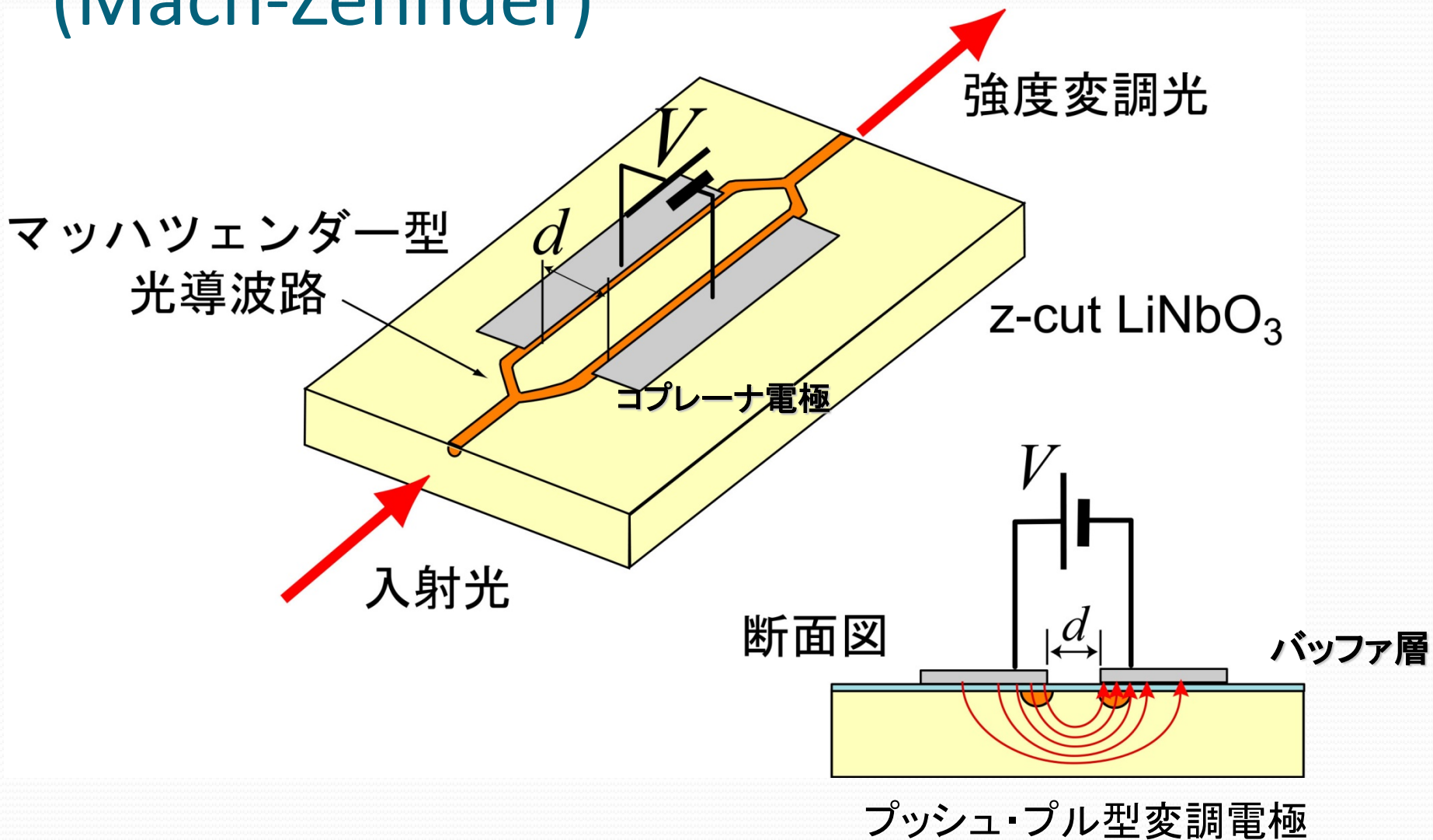
$$d \sim 20\mu\text{m}$$

$$L \sim 2\text{cm}$$

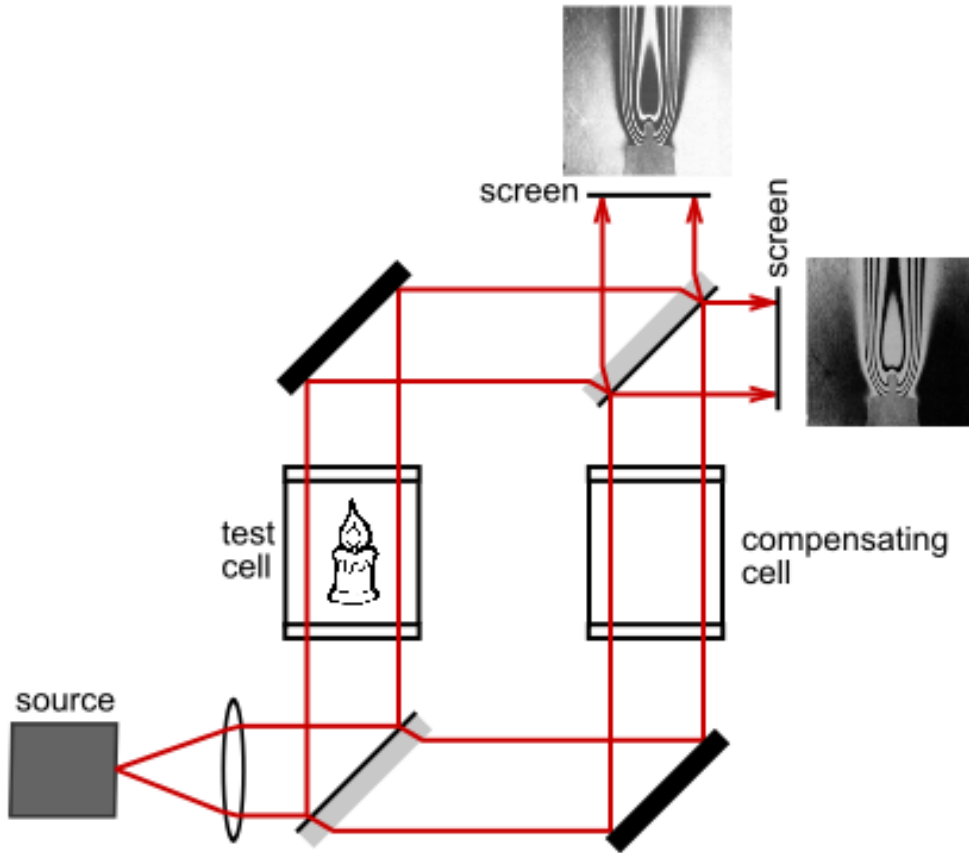
$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{n_e^3 r_{33} L \Gamma} \sim 5\text{V}$$

$\Gamma$ : 印加電界低減係数  
(光波と変調電界の重なり積分)

# マツハ・ツェンダー型光導波路構成 (Mach-Zehnder)

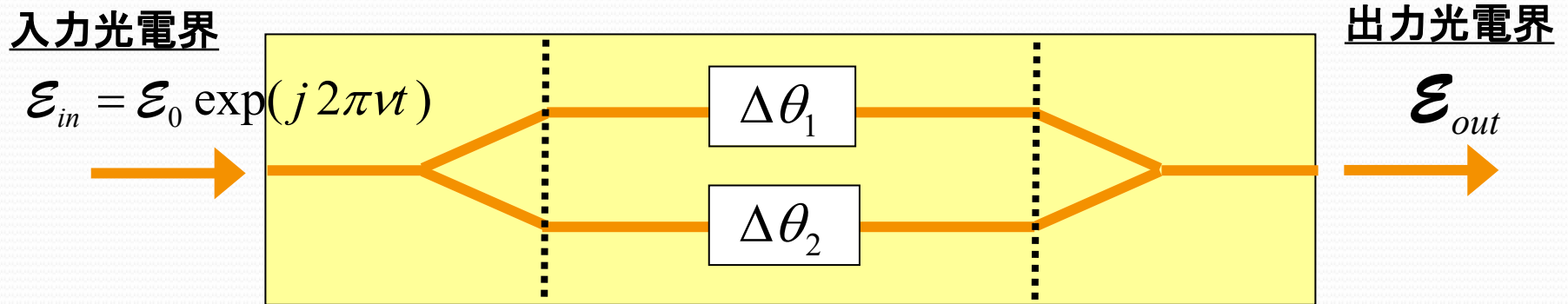


# Mach-Zehnder 干涉計



1891年 Ludwig Zehnder, 1892年 Ludwig Mach

# マツハ・ツェンダー型導波路の出力



$$\varepsilon_{out} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{pmatrix}}_{\text{出力側 Y分岐}} \underbrace{\begin{pmatrix} \exp(j\Delta\theta_1) & 0 \\ 0 & \exp(j\Delta\theta_2) \end{pmatrix}}_{\text{直線導波路}} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \\ 1 \\ \sqrt{2} \end{pmatrix}}_{\text{入力側 Y分岐}} \varepsilon_0 \exp(j2\pi\nu t)$$

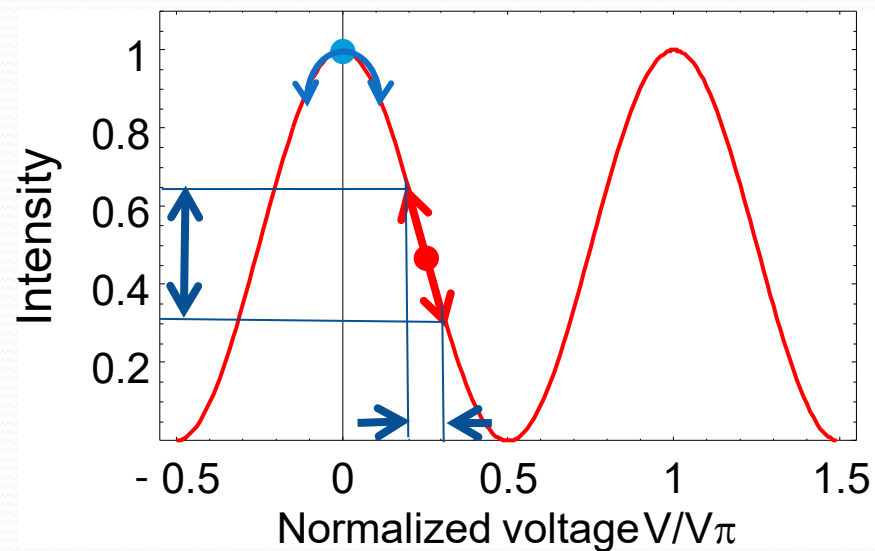
出力側 Y分岐                  直線導波路                  入力側 Y分岐                  入力光

$$\therefore \varepsilon_{out} = \frac{1}{2} \{ \exp(j\Delta\theta_1) + \exp(-j\Delta\theta_2) \} \varepsilon_0 \exp(j2\pi\nu t)$$

# 伝達関数

## プッシュ・プル動作の場合

$$\begin{aligned}\Delta\theta_1 &= -\Delta\theta_2 = \Delta\theta = \pi \frac{V}{V_\pi} \\ \mathcal{E}_{out} &= \frac{1}{2} \{ \exp(j\Delta\theta) + \exp(-j\Delta\theta) \} \\ &\quad \times \mathcal{E}_0 \exp(j2\pi\nu t) \\ &= \mathcal{E}_{in} \cos\left(\pi \frac{V}{V_\pi}\right)\end{aligned}$$



# 5. 高周波電界計測におけるポイント

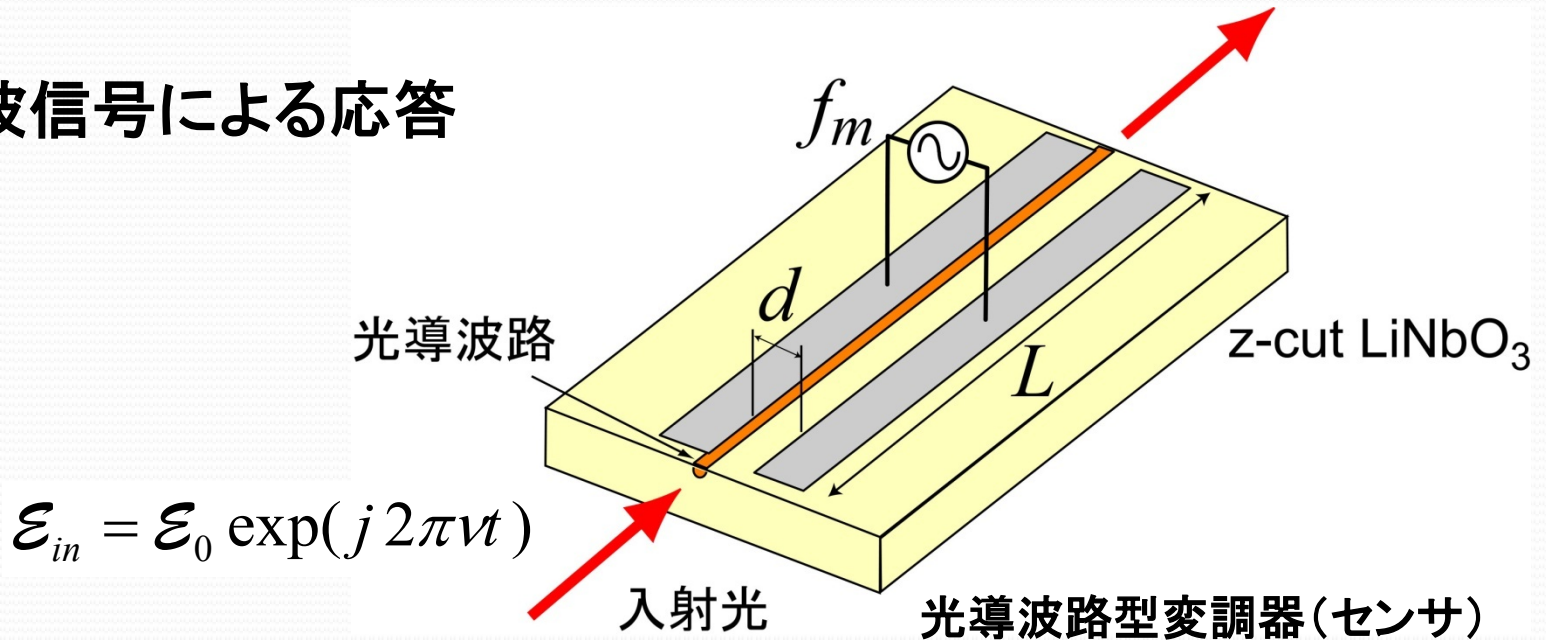
走行時間効果と光スペクトル

最近の光応用計測

# 高周波動作

$$\mathcal{E}_{out} = \mathcal{E}_0 \exp(j 2\pi\nu t + \Delta\phi)$$

## ▶ 高周波信号による応答



**位相変化量**  $\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V}{d} L \Gamma$

**高周波信号**  $V = V_0 \sin(2\pi f_m t)$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta\phi &= \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V_0}{d} L \Gamma \sin(2\pi f_m t) \\ &= \Delta\phi_0 \sin(2\pi f_m t) \end{aligned}$$

$$(\Delta\phi_0 = \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V_0}{d} L \Gamma = \pi \frac{V_0}{V_\pi})$$

# 出力光スペクトル

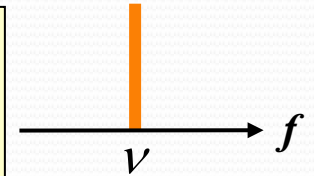
入力光電界

$$\mathcal{E}_{in} = \mathcal{E}_0 \exp(j 2\pi \nu t)$$

出力光電界

$$\mathcal{E}_{out} = \mathcal{E}_0 \exp[ j \{ 2\pi \nu t + \Delta\phi_0 \sin(2\pi f_m t) \} ]$$

$$\Delta\phi_0 = \pi \frac{V_0}{V_\pi} : \text{位相変調指数}$$

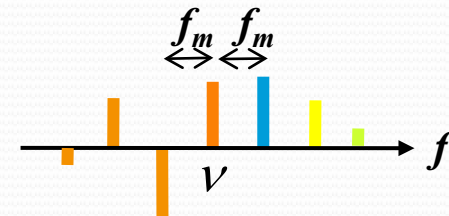


数学公式  $\exp(j \Delta\phi_0 \sin \phi)$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Delta\phi_0) \exp(j n \phi)$$

$J_n(\Delta\phi_0)$  :  $n$  次のベッセル関数

$$\therefore \mathcal{E}_{out} = \mathcal{E}_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\Delta\phi_0) \exp\{ j 2\pi(\nu + n f_m) t \}$$



主要スペクトル成分 :  $-\lceil \Delta\theta_0 \rceil$  次  $\sim$   $+\lceil \Delta\theta_0 \rceil$  次 (  $\lceil x \rceil$ : ガウス記号 )

# 光波走行時間効果

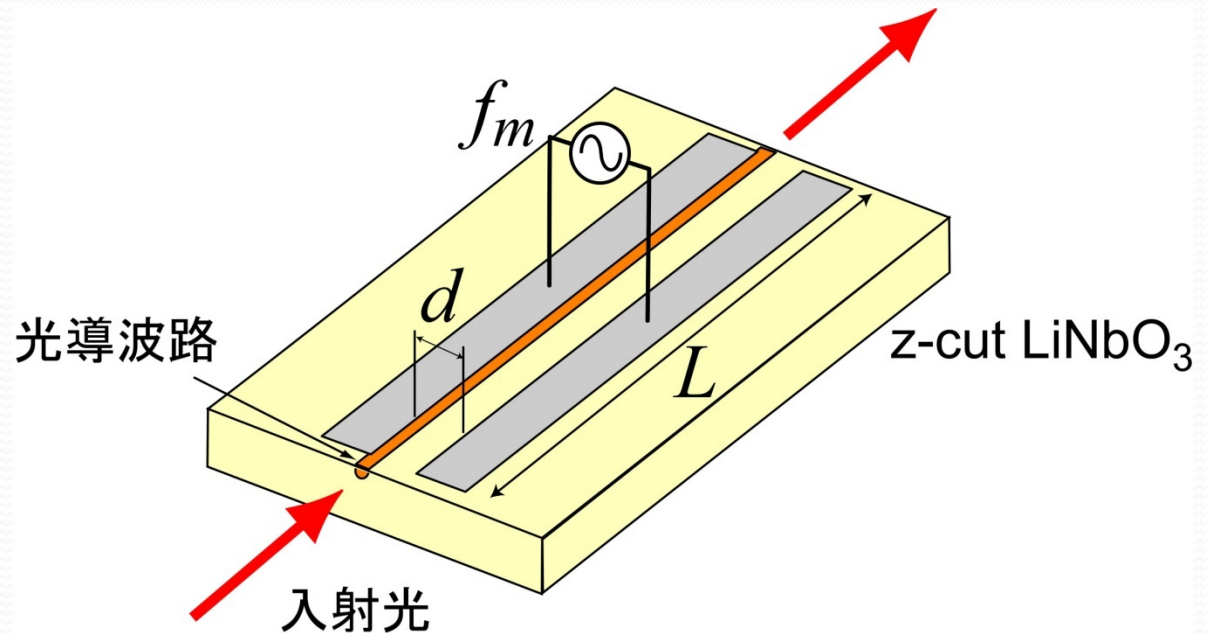
▶ 光波走行時間 :  $\tau$

$$\tau = L / v_g$$

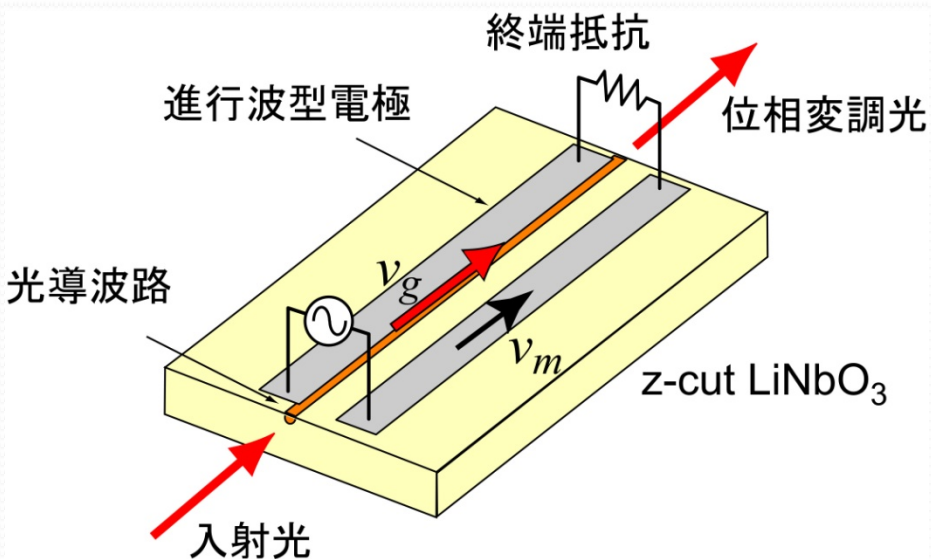
LiNbO<sub>3</sub> センサ

$L=15\text{mm}$

$\tau \sim 100\text{ps}$



# 進行波型電極を用いたEOセンサ



静止座標系  $(x, y, z)$   
 光波と共に進む座標系  $(x, y', z)$   
 $y' = y - v_g t$

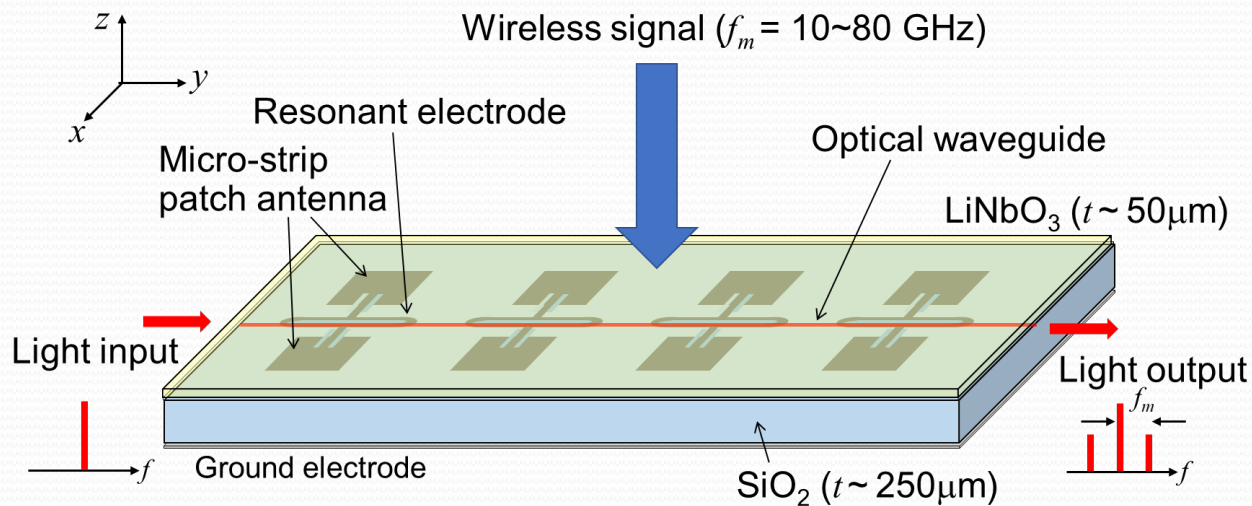
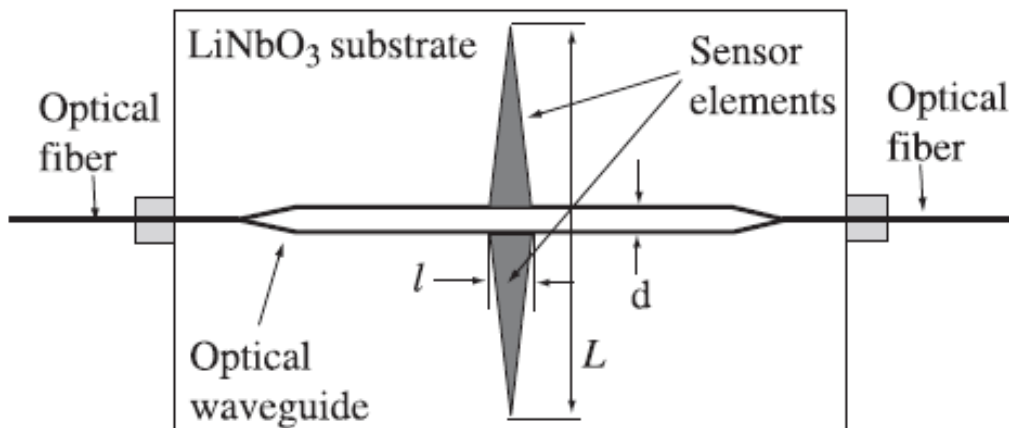
$$t = \frac{y - y'}{v_g} \quad y' = \frac{v_g}{4f_m}$$

$$\Delta\phi_0 = \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V_0}{d} L \Gamma \quad \text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \int_0^L \Delta n k dy \\ &= \int_0^L \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \frac{V_0 \sin(2\pi f_m t - y/v_m)}{d} \Gamma dy \\ &= \Delta\phi_0 \frac{1}{L} \int_0^L \sin(2\pi f_m t - y/v_m) dy \\ &= \Delta\phi_0 \frac{1}{L} \int_0^L \sin(2\pi f_m \frac{y - y'}{v_g} - y/v_m) dy \\ &= \Delta\phi_0 \frac{1}{L} \int_0^L \cos(2\pi f_m (\frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_g}) y) dy \\ &= \Delta\phi_0 \text{sinc} \left\{ 2\pi f_m \left( \frac{1}{v_m} - \frac{1}{v_g} \right) L \right\} \end{aligned}$$

$v_m = v_g$  : 速度整合  $\Rightarrow$  高感度化

# アンテナによる高感度化



# Electro-Optic Modulator Using an Antenna-Coupled-Electrode Array and a Polarization-Reversed Structure for a Radar Tracking System

Naohiro Kohmu, Hiroshi Murata, and Yasuyuki Okamura

Graduate School of Engineering Science  
Osaka University  
Osaka, Japan

E-mail: naohiro.kohmu@gmail.com; murata@ee.es.osaka-u.ac.jp

This is one of the invited Finalist papers from the AP-RASC 2013 Student Paper Competition.

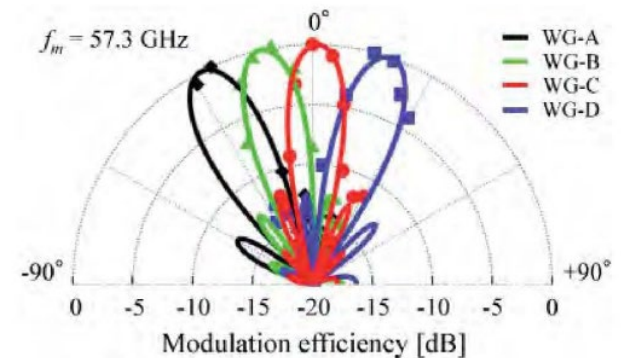
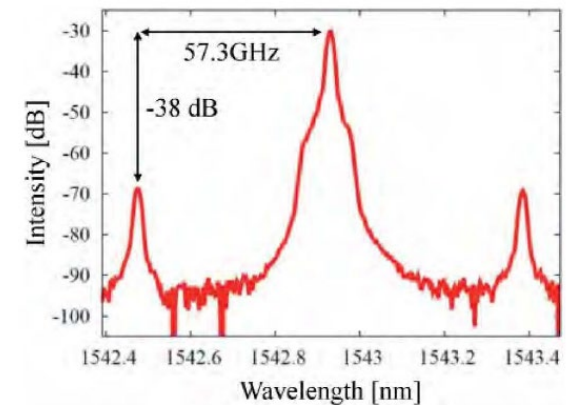
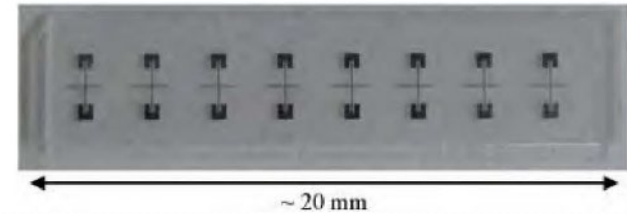
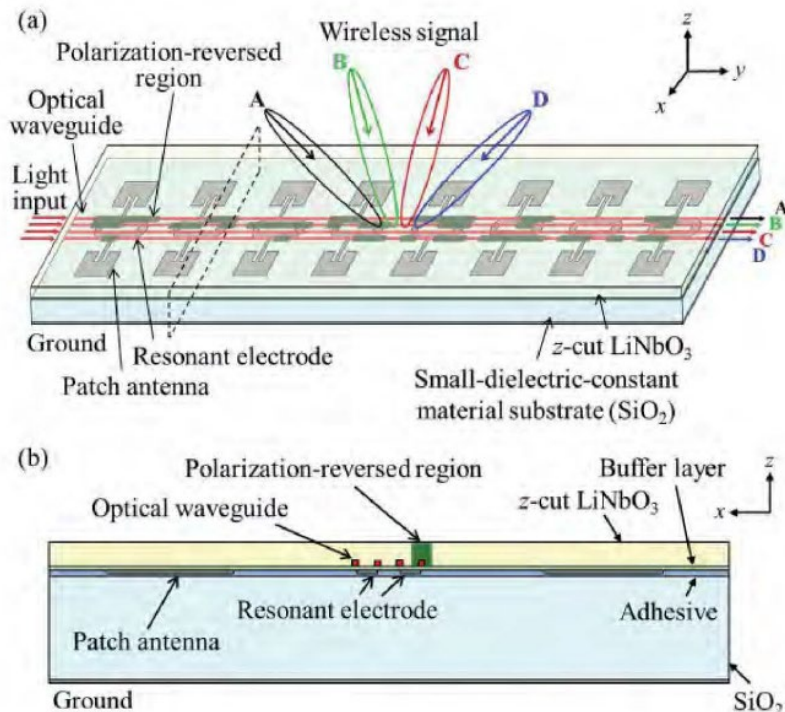


Figure 10. The measured and calculated directivities in the four-channel optical waveguide.

# Integrated Photonic Electromagnetic Field Sensor Based on Broadband Bowtie Antenna Coupled Silicon Organic Hybrid Modulator

Xingyu Zhang, *Student Member, IEEE*, Amir Hosseini, Harish Subbaraman, Shiyi Wang, Qiwen Zhan, Jingdong Luo, Alex K.-Y. Jen, and Ray T. Chen

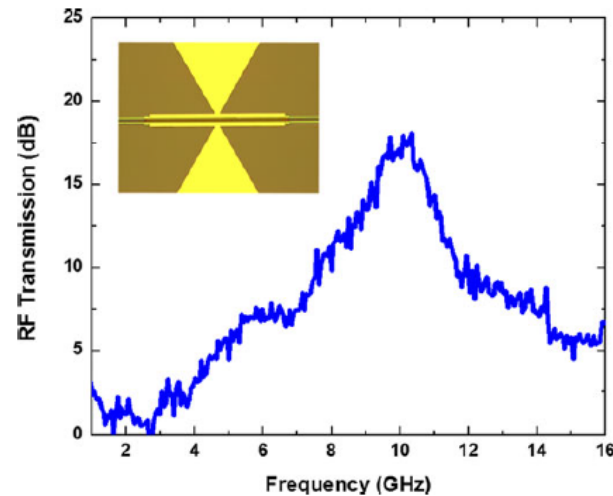
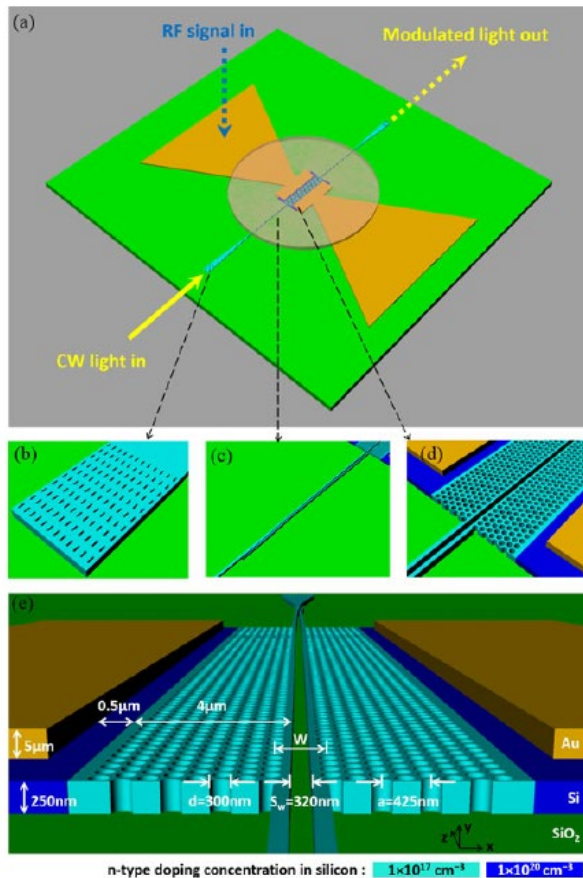


Fig. 7. Measured transmission signal of the broadband bowtie antenna. The inset shows a top-view microscope image of the fabricated device.

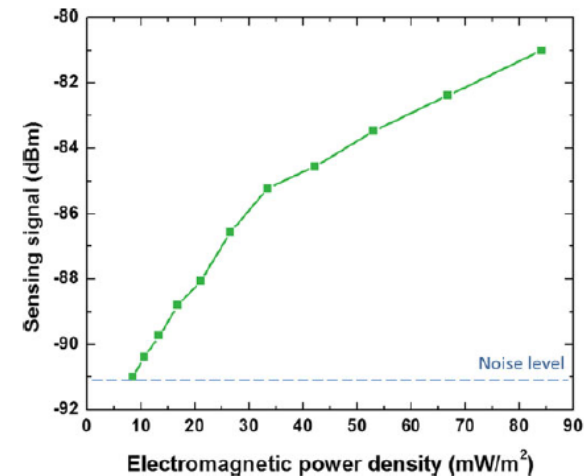


Fig. 12. The measured sensing signal at 8.4 GHz as a function of the electromagnetic power density at the position of sensor device.

## 電気光学効果を利用した電磁界計測技術の動向

永妻 忠夫<sup>†a)</sup>久武信太郎<sup>†</sup>

電子情報通信学会論文誌 B Vol. J97-B No. 3 pp. 243-252

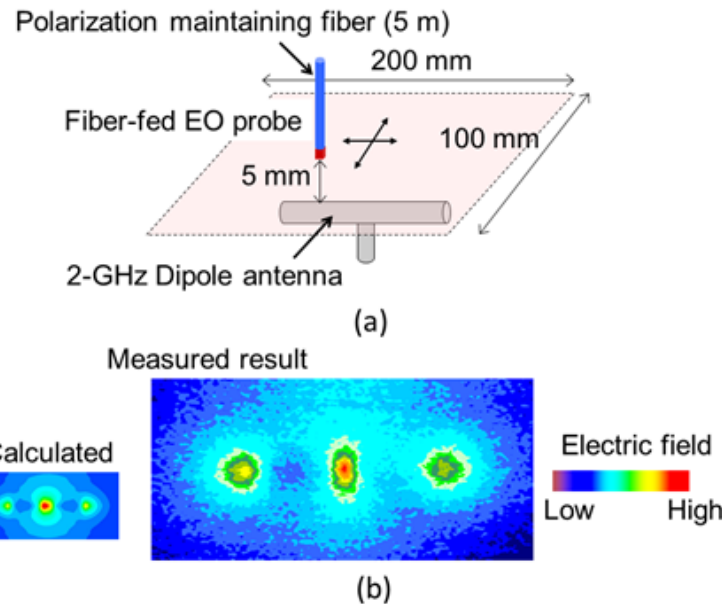


図5. ファイバ型EO電界センサを用いてダイポールアンテナを測定した例[24]. (a) 測定の様子. (b) 電界分布の測定例と計算結果.

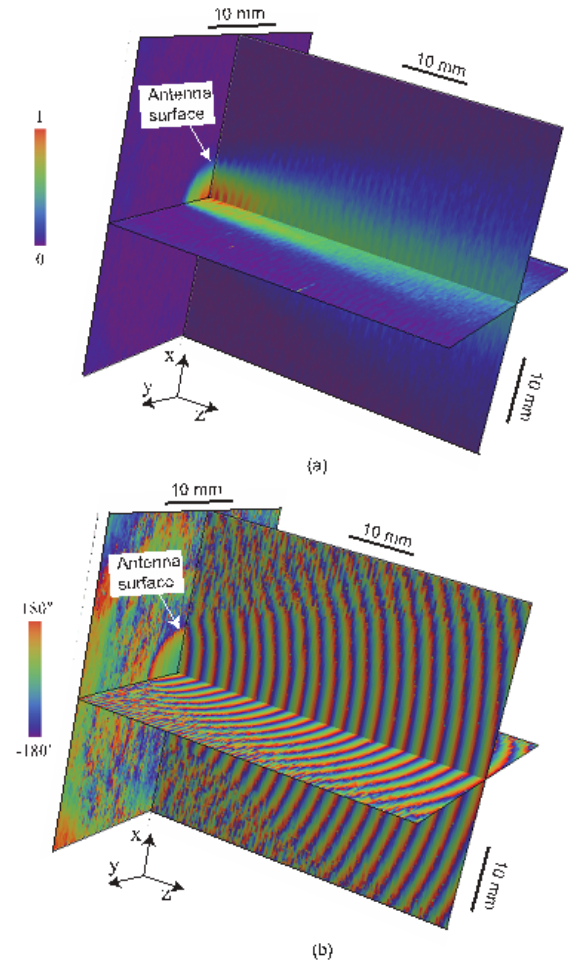


図10. ホーンアンテナからの放射パターン測定例(125 GHz) [46].

# Electrooptic Millimeter-Wave–Lightwave Signal Converters Suspended to Gap-Embedded Patch Antennas on Low- $k$ Dielectric Materials

Yusuf Nur Wijayanto, *Student Member, IEEE*, Hiroshi Murata, *Member, IEEE*,  
and Yasuyuki Okamura, *Member, IEEE*

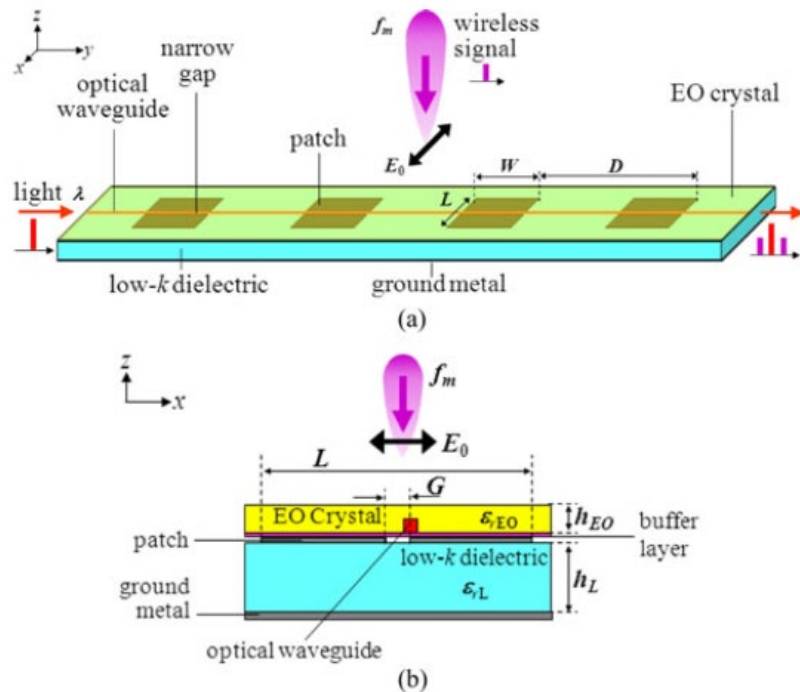


Fig. 1. Structure of the MMW-LW signal converter using an EO crystal suspended to an array of gap-embedded patch antennas on a low- $k$  dielectric material substrate. (a) Whole view and (b) cross-sectional view.

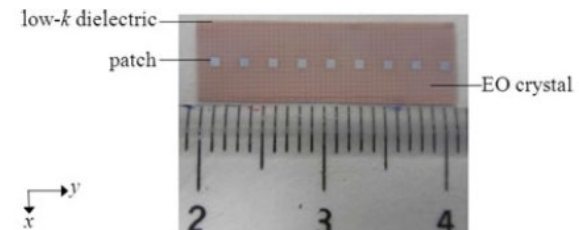


Fig. 7. A photograph of the fabricated MMW-LW signal converter with an array of gap-embedded patch antennas ( $N = 9$  elements).

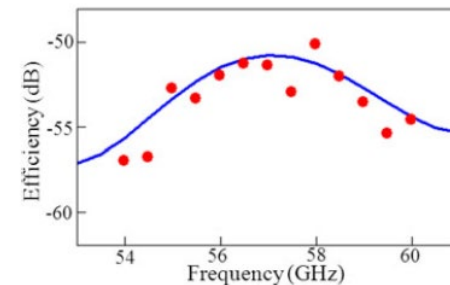


Fig. 10. Measured conversion efficiency as a function of the operational frequency  $f_m$  of the MMW signals.

# High-Speed Data Transmission Using 28-GHz Antenna-Coupled Electro-Optic Modulators for 5G Mobile Systems

Hiroto Yokohashi  
*Graduate School of Engineering,  
 Mie University*  
 1577 Kurima-Machiya-Cho, Tsu-City,  
 Mie, 514-8507 Japan  
 email : 419m240@m.mie-u.ac.jp

Masatoshi Onizawa  
*SEIKO GIKEN Co. Ltd.*  
 296-1 Matsuhidai, Matsudo, Chiba,  
 270-2214 Japan

Sayaka Matsukawa  
*AIST*  
 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki,  
 305-8563 Japan

Satoru Kurokawa  
*AIST*  
 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki,  
 305-8563 Japan

Masahiro Sato  
*SEIKO GIKEN Co. Ltd.*  
 296-1 Matsuhidai, Matsudo, Chiba,  
 270-2214 Japan

Hiroshi Murata  
*Graduate School of Engineering,  
 Mie University*  
 1577 Kurima-machiya-Cho, Tsu-City,  
 Mie, 514-8507 Japan

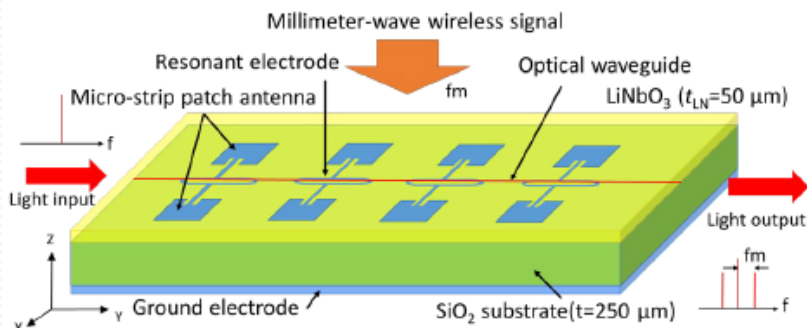


Fig. 1. Basic structure of the proposed antenna-coupled electrode electro-optic modulator (4-Elements).

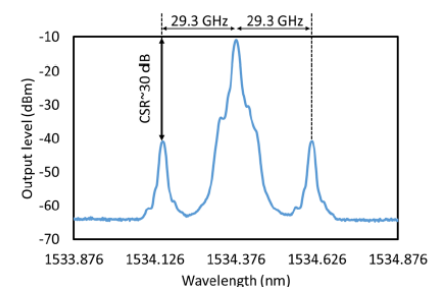
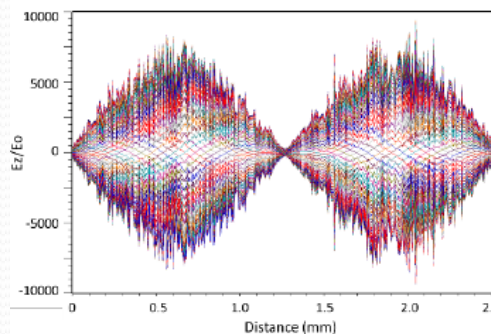


Fig. 5. Measured optical spectrum.

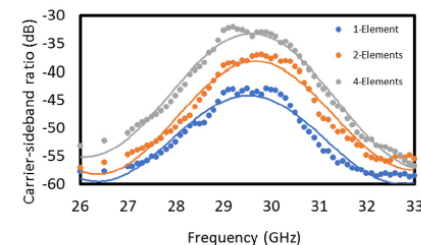


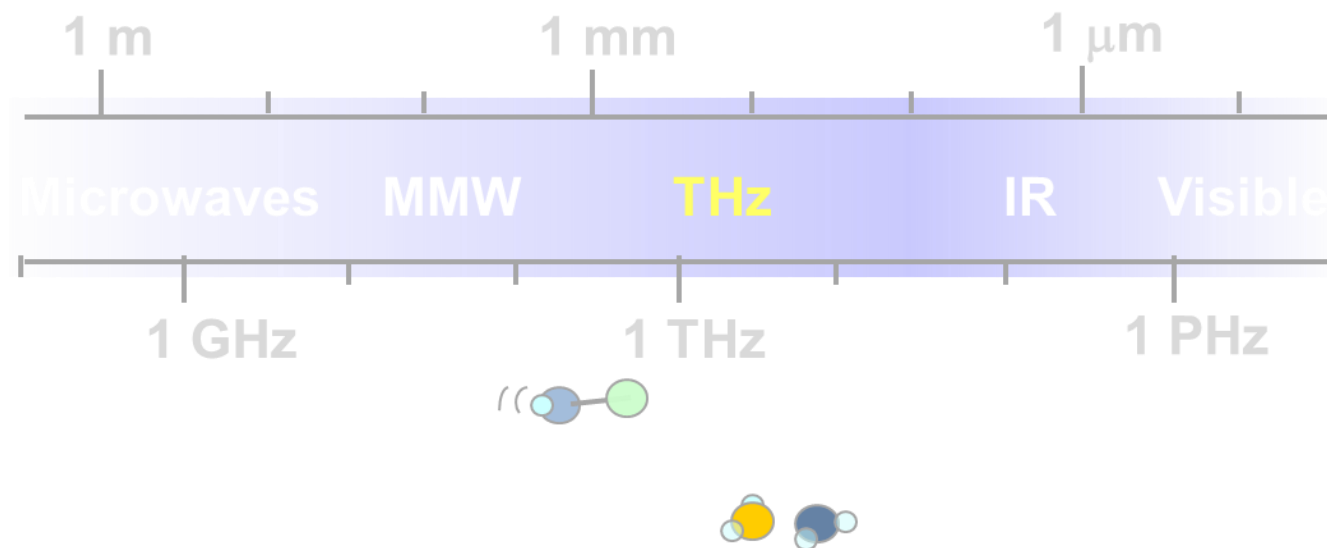
Fig. 6. Measured frequency dependence.

# まとめ

- 光電界センサ
  - 特長
    - 広帯域、低擾乱
    - 光ファイバによる伝送・処理
  - 電気光学(EO)効果
    - 透明誘電体(光学結晶)が外部電界により僅かに変化
    - 屈折率楕円体による記述
  - センサの構成
    - 光回路・光導波路
    - 高周波動作
    - アンテナ接続・集積化(アレイ化)
  - 今後の展望
    - 高周波化(ミリ波、THz波)⇒光学材料
    - 高感度化・高機能化(アンテナ、共振器、光増幅、・・・)



# テラヘルツ帯における材料評価技術の 基礎とB5G/6Gに向けた応用例



国立研究開発法人情報通信研究機構  
電磁波研究所 電磁波標準研究センター  
電磁環境研究室 水野麻弥

# テラヘルツ帯における材料評価の必要性



超高速無線通信に向けて  
テラヘルツ波の利用を検討



テラヘルツ帯における様々な材料等の特性調査が必要に

- ・機器材料(基板, レンズ)
- ・建築材料(壁, 窓)
- ・生体組織(皮膚, 眼)

# 本日の内容

---

14:35～16:05

- ①テラヘルツ帯材料評価技術の基礎
- ②光を応用したテラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) 測定ノウハウ
- ③THz-TDSの応用例

①

# テラヘルツ帯材料評価技術の基礎

# テラヘルツ

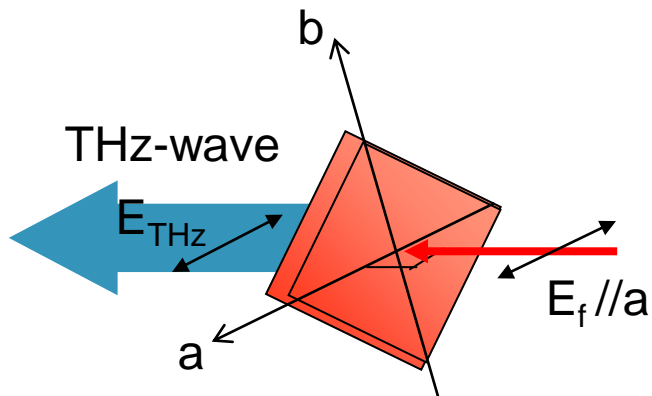
---

1950年前後	電波と光の間の領域において研究開発がはじまる
1950～1960年代	遠赤外と呼ばれる
1970年代前後から	サブミリと呼ばれる
1990年代頃から	<b>テラヘルツ</b> と呼ばれる

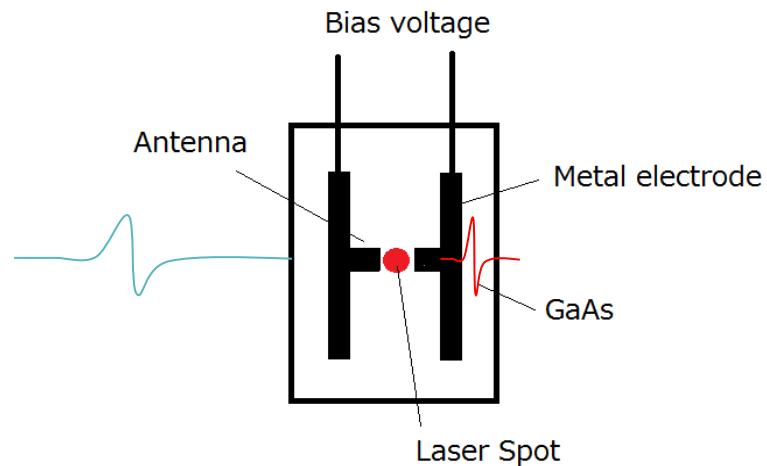
# テラヘルツ波発生器の開発

1990年代頃

光を応用したテラヘルツ発生器の開発が活発化



非線形光学結晶



光伝導アンテナ

# テラヘルツ発生・検出器の検討

## 発生側

- ・熱光源
- ・光伝導アンテナ  
ダイポール, ボウタイ型など
- ・非線形光学結晶  
有機結晶DAST, LiNbO<sub>3</sub>など

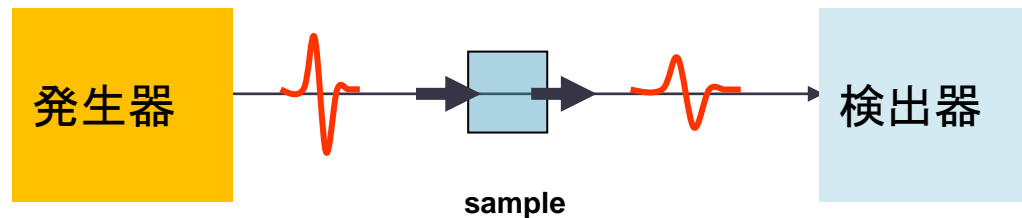
## 検出側

- ・ボロメータ
- ・焦電素子
- ・光伝導アンテナ
- ・電気光学結晶

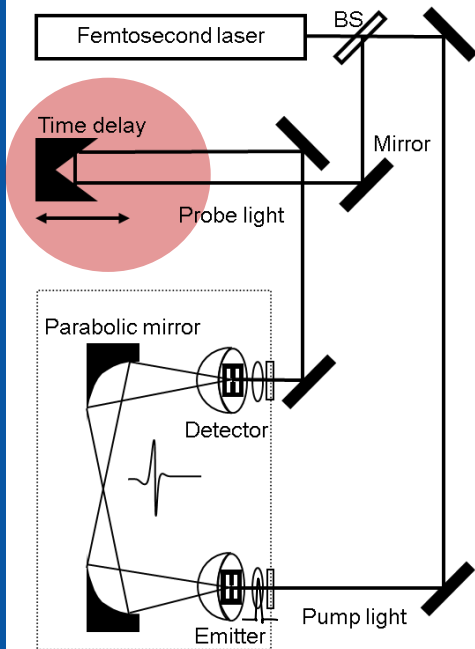


# 分光法の検討

- ・フーリエ変換型遠赤外分光(FT-FIR)  
熱光源, 焦電素子 振幅
- ・波長可変テラヘルツ光源を用いた分光  
非線形光学結晶, 焦電素子 振幅
- ・テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS)  
光伝導アンテナ, 光伝導アンテナ 振幅+位相

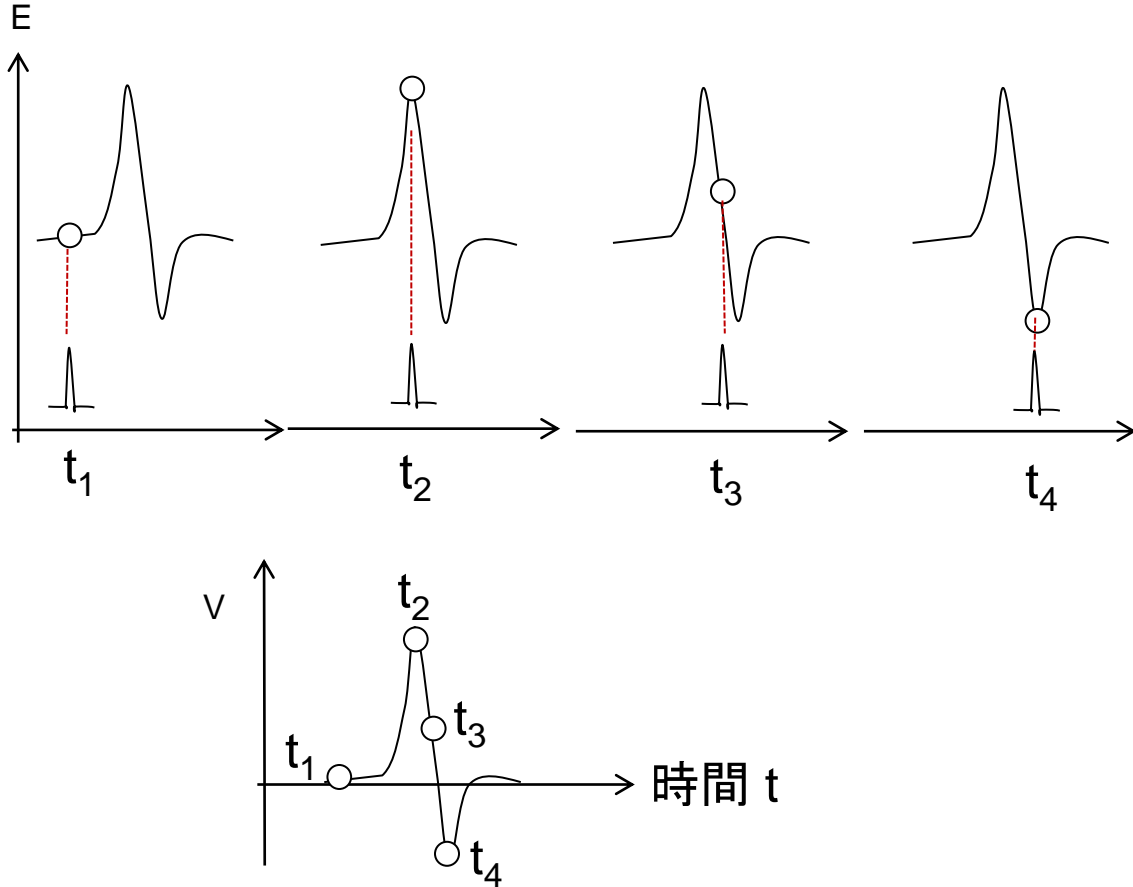


# THz-TDS (透過型、時間波形取得方法の例)



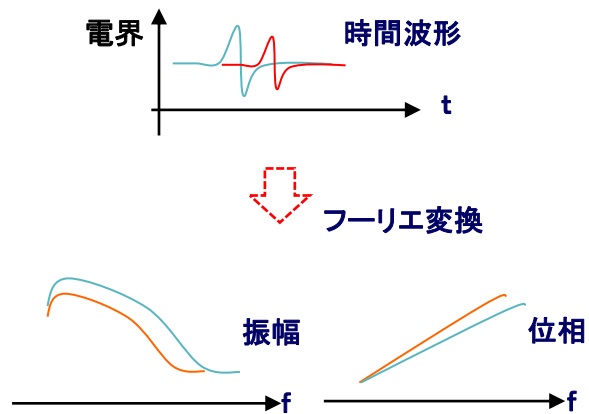
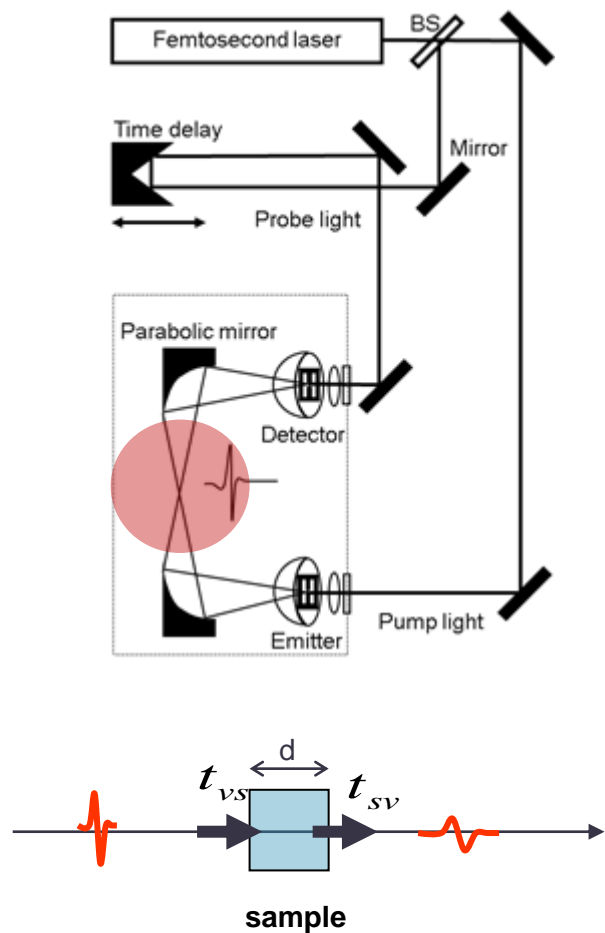
光とTHz波の  
繰り返し周波数は同じ

プローブ光が入射された瞬間のTHz信号を検出



遅延時間を変更し、時間波形を得る

# THz-TDS (透過型、複素屈折率算出方法)



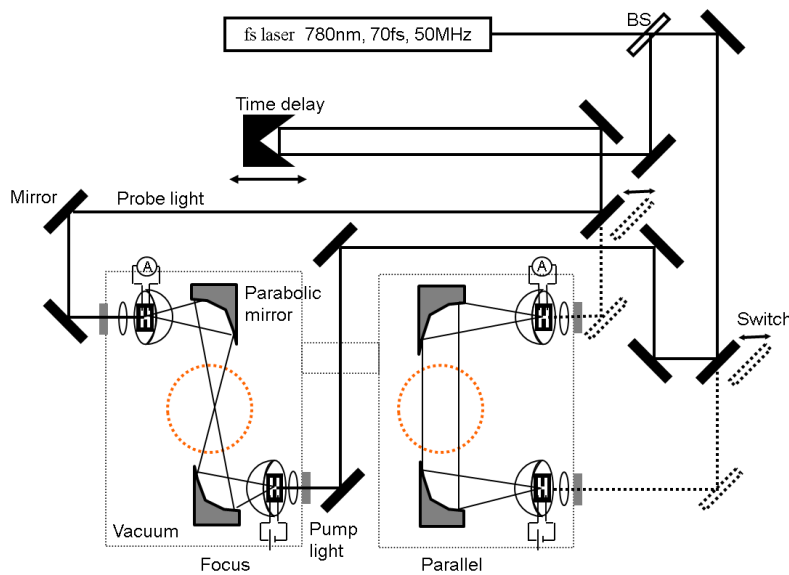
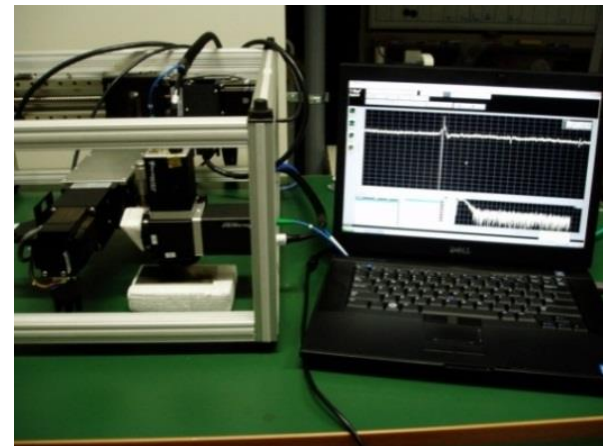
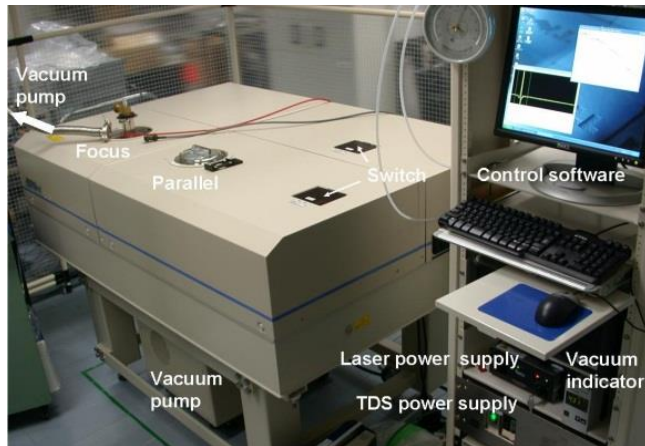
モデル式との比較により  $\tilde{n}$  が求まる

$$\tilde{t}(\omega) = \sqrt{T(\omega)} e^{-i\Delta\phi(\omega)}$$

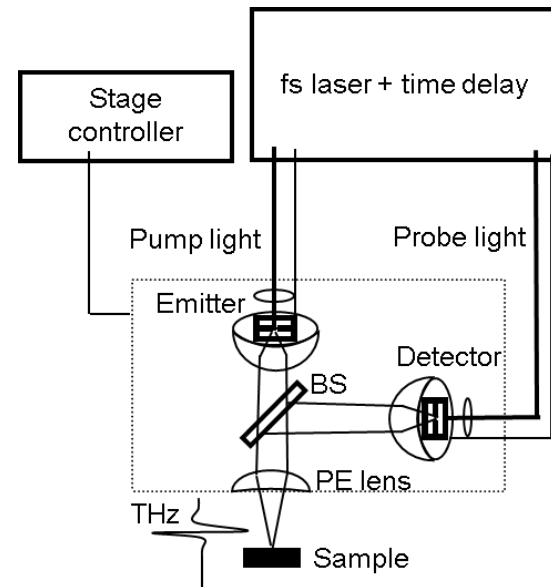
$$\tilde{t}(\omega) = t_{vs} t_{sv} e^{-i \frac{(\tilde{n}(\omega)-1)d\omega}{c}}$$

$$t_{vs} = \frac{2}{(\tilde{n}+1)} \quad t_{sv} = \frac{2\tilde{n}}{(\tilde{n}+1)}$$

# THz-TDS装置の選択

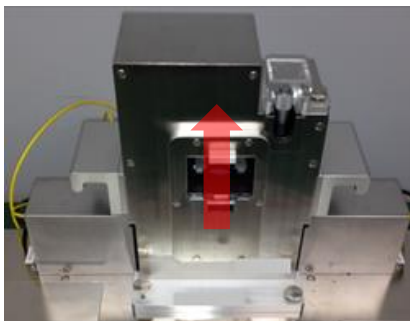


透過型分光装置 (集光・平行光学系)



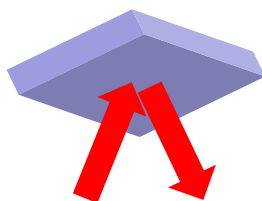
反射型分光・イメージング装置

# 計測アタッチメントの選択



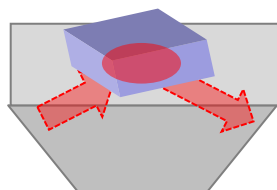
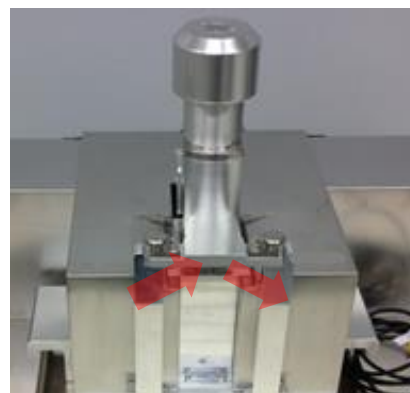
透過型  
Transmission

例: 成形可能, 適度な吸収を持つ試料



反射型  
Reflection

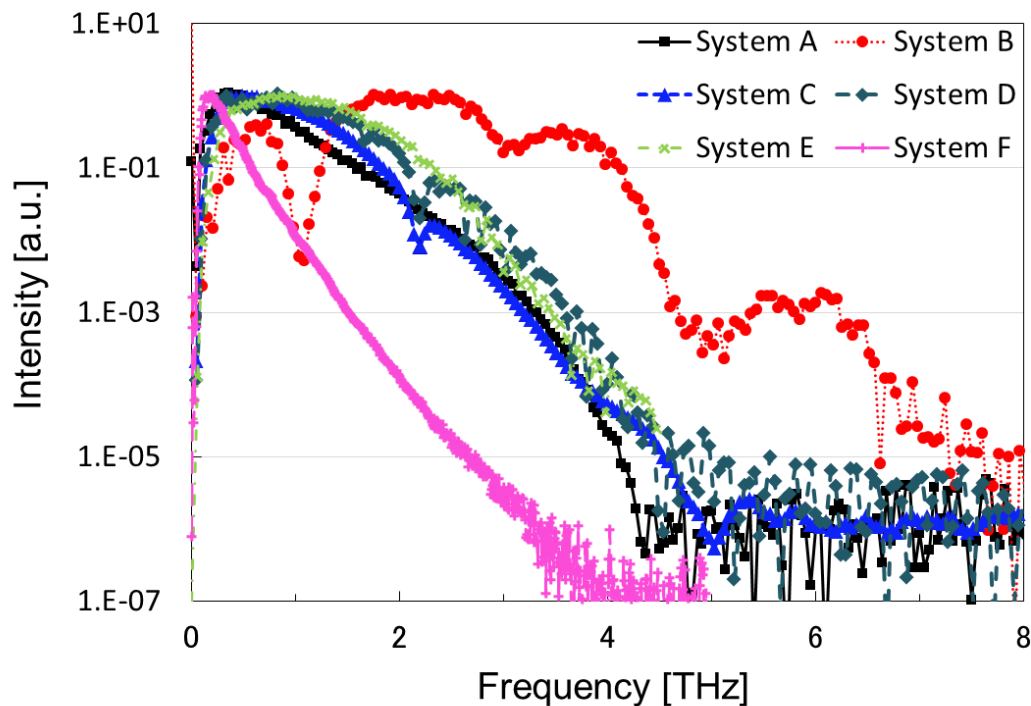
例: 表面加工可能, 適度な反射を持つ試料



全反射型  
ATR: Attenuated Total Reflection

例: 他の方法では容器等が必要,  
吸収が非常に大きい試料

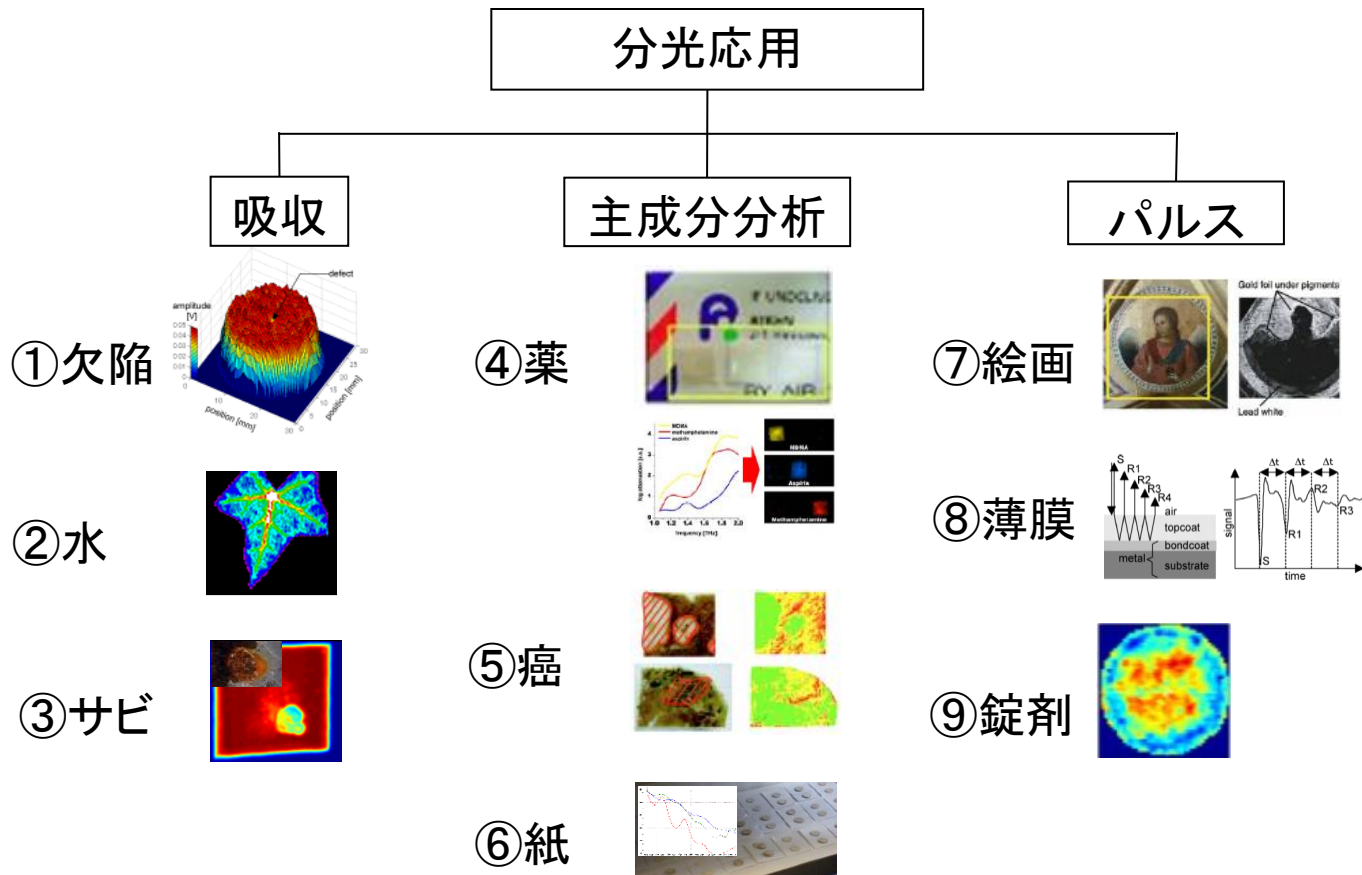
# 発生器や周辺材料の選択



透過型  
THz-TDS

- A 光伝導アンテナ(ダイポール型)
- B 光学結晶(DAST)
- C 光伝導アンテナ(ダイポール型)、ホワイトポリエチレン窓、集光
- D 光伝導アンテナ(ダイポール型)、ホワイトポリエチレン窓、平行
- E 光伝導アンテナ(ダイポール型)
- F 光伝導アンテナ(ボウタイ型)

# テラヘルツ分光の応用例



①IEEJ Trans. FM, 132, p.864 (2012)

③IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2, p.242 (2012)

⑤Appl. Phys. Lett. 90, 041102 (2007)

⑦Appl. Phys. A, 100, p.591 (2010)

⑨J. Pharm. Innov. 7, p. 87 (2012)

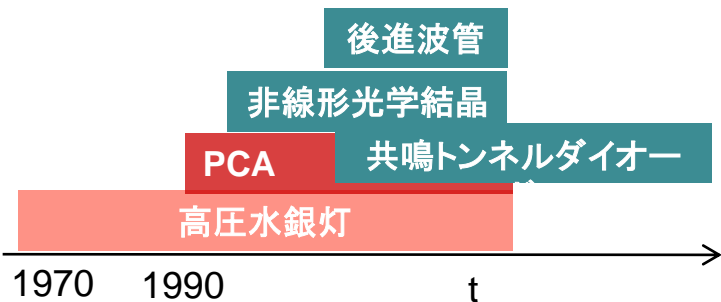
②IEEJ Trans. EIS, 124, p. 1672 (2004)

④Optics and Photonics News, 15, p.34 (2004)

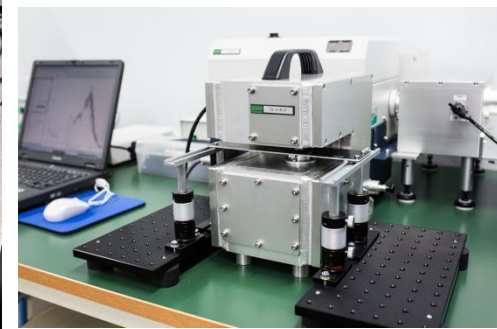
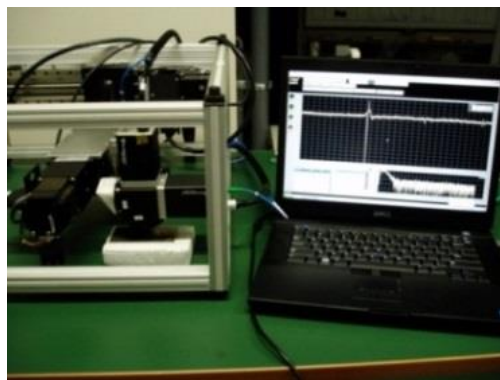
⑥Appl. Phys. A, 111, p.83 (2013)

⑧Electrical Engineering in Japan, 183, No. 4, p.1 (2013)

# テラヘルツ帯の機器の例

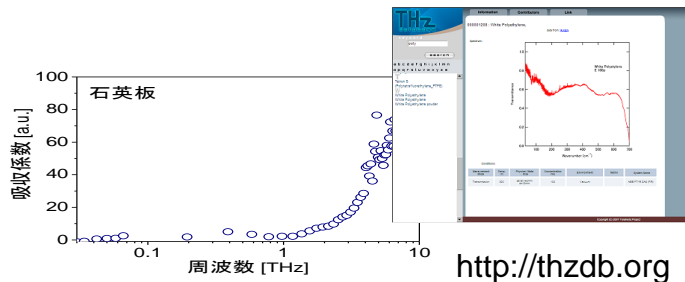


⇒小型化, 高速化

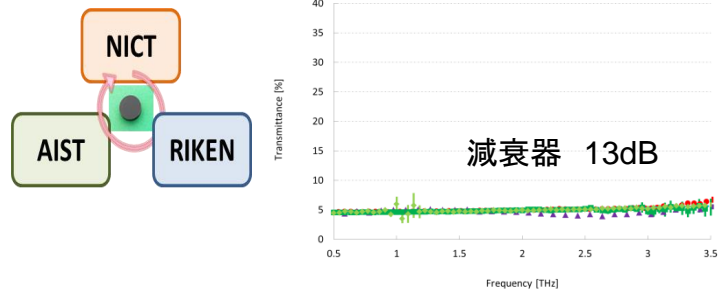


# これまでのテラヘルツ分光に関する取り組みの例

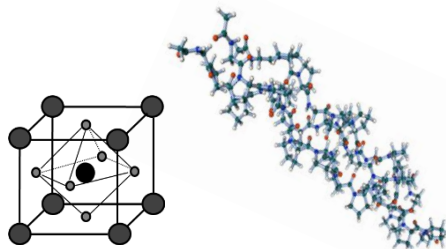
データベースの構築  
物質の指紋スペクトルの取得



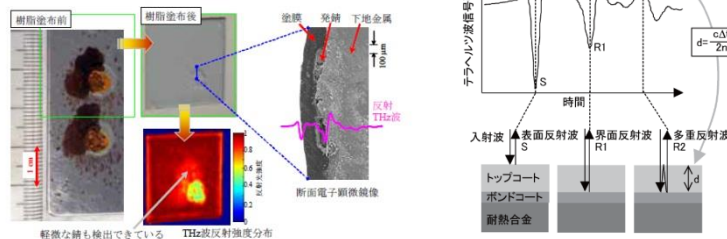
システム間の比較  
安心して、正しく測るために



THz帯 分子挙動解析  
何がわかるか明らかにするために



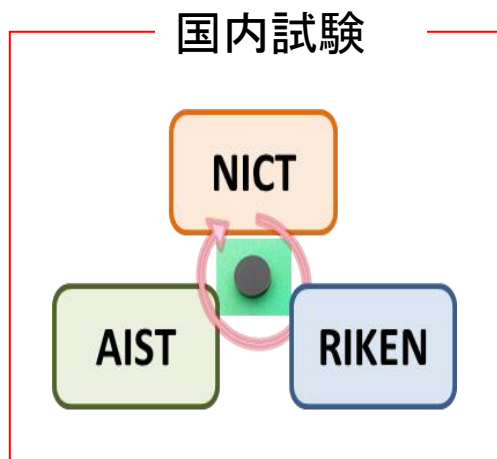
アプリケーションの検討  
どう使うか示すために



ユーザーのための テラヘルツ分光プラクティスガイド作成  
高信頼性誘電率測定システムの開発

# 国内外での比較試験

- ・光学系が異なっても測定値は一致する？
- ・どのような試料を測定すると値が一致しなくなる？
- ・値が一致しない理由は？



## 国際試験

- ・National Measurement Institutes (3)  
NPL, UK (Organizer)  
NIST, USA  
NICT, Japan
- ・System manufacturers  
USA (1), Germany (3)
- ・Users (11機関, 9か国)

計18機関

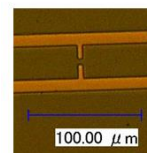
測定・解析プロトコルを作成  
参加機関の所有する透過型THz-TDS装置を用いてデータ取得

# 国内比較試験等で用いられたシステムの例

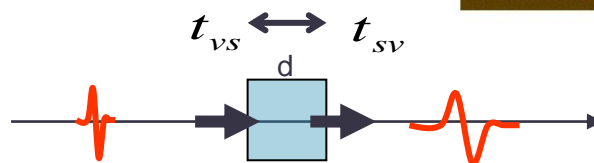
TDS system	Generation device	Detection device	Optical system	Purging
A	PCA (dipole)	PCA (dipole)	Focusing	Dry air
B	DAST	PCA (dipole)	Focusing	Dry air
C	PCA (dipole)	PCA (dipole)	Focusing	Vacuum
D	PCA (dipole)	PCA (dipole)	Parallel	-
E	PCA (dipole)	PCA (dipole)	Focusing	-
F	PCA (bowtie)	PCA (dipole)	Focusing	Dry air

検出方法

・光伝導アンテナ (ダイポール型)



タイプ  
・透過型



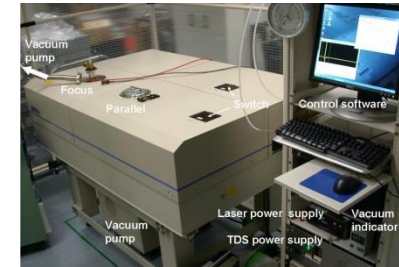
sample

# テラヘルツ帯の分光法



自由空間法

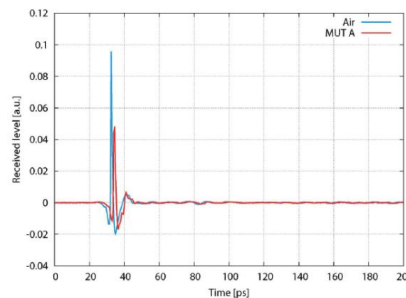
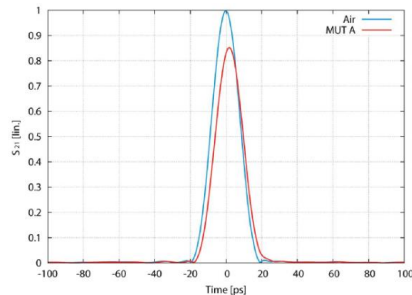
THz-TDS



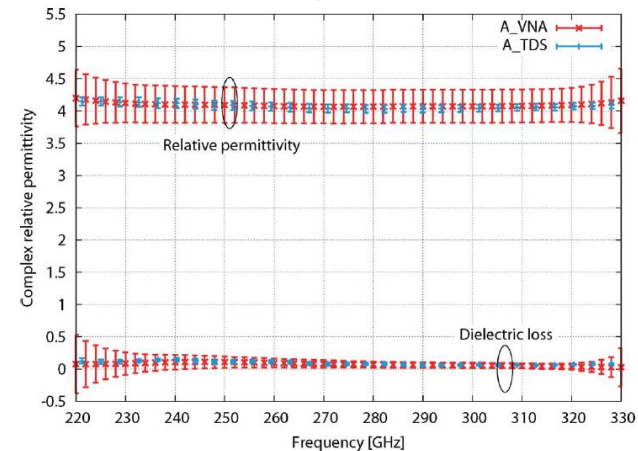
VNAを使った計測

光を使った計測

電波と光領域の計測技術が存在



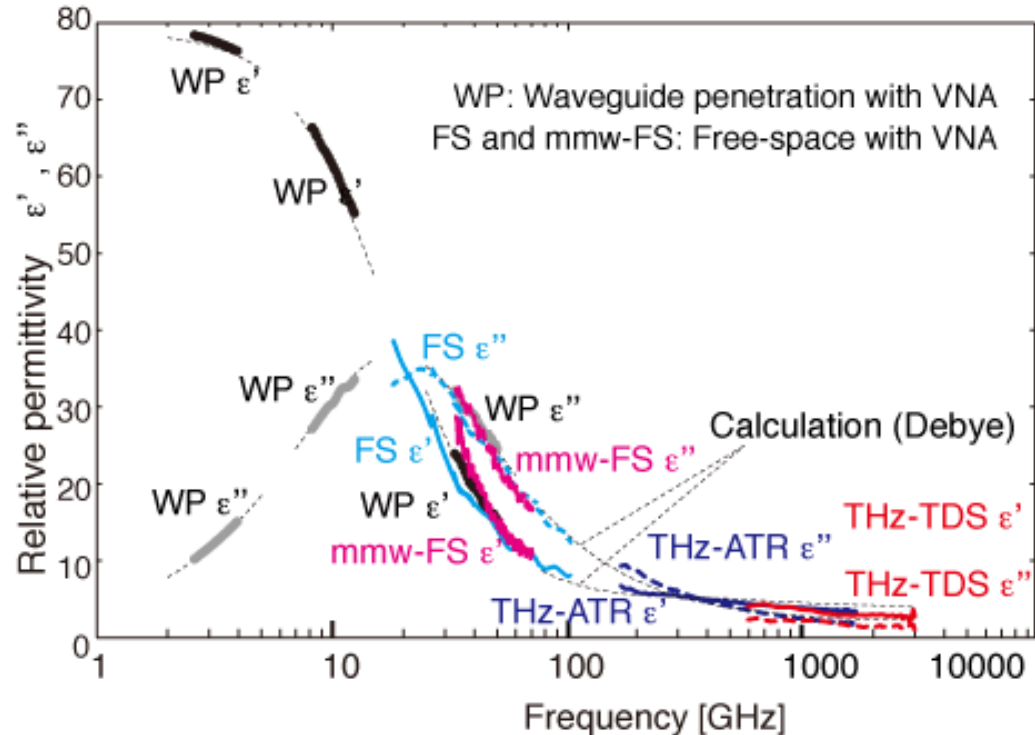
PPE based resin, TLC593



Toshihide Tosaka, et. al., "Development of Complex Relative Permittivity Measurement System Based on Free-Space in 220–330-GHz Range," IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 5, 102 (2015).

2種類の技術を活用することで広帯域測定が可能

# 広帯域分光測定の実例（水）



Kaori Fukunaga, et. al., "Dielectric measurement of liquids in terahertz frequency band"  
Proceedings of IEEE International Conference on Liquid Dielectrics (2014)

②

# 光を応用した時間領域分光(TDS)測定 ノウハウ

# THz-TDSを用いた測定ノウハウ

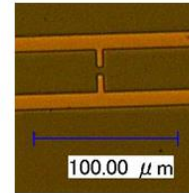
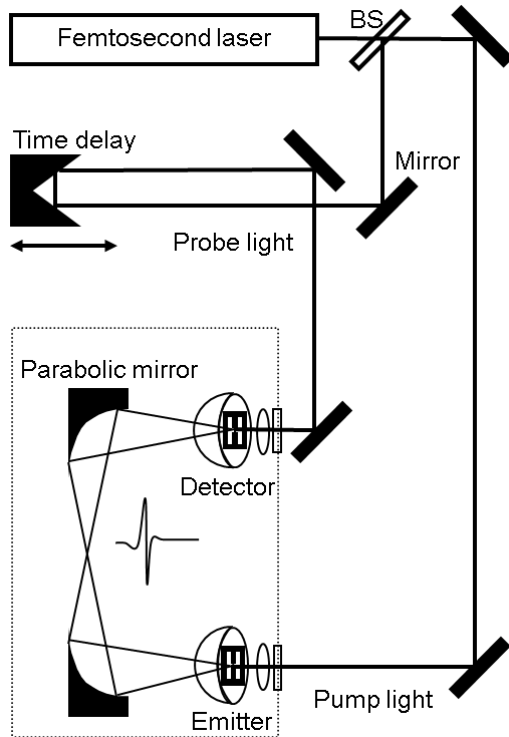
---

サンプル1 フィルム状

サンプル2 粉末状

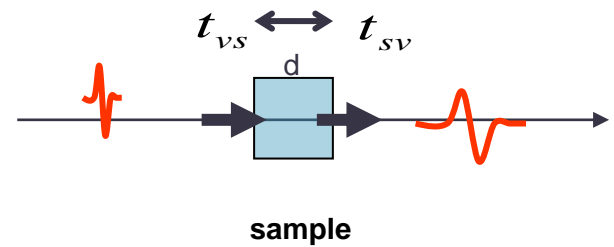
サンプル3 厚い板状

# 透過型THz-TDS

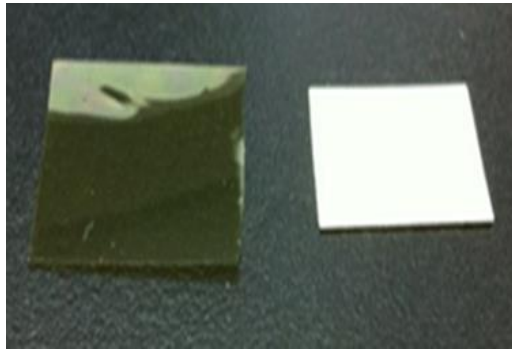


検出方法  
光伝導アンテナ (ダイポール型)

モデル



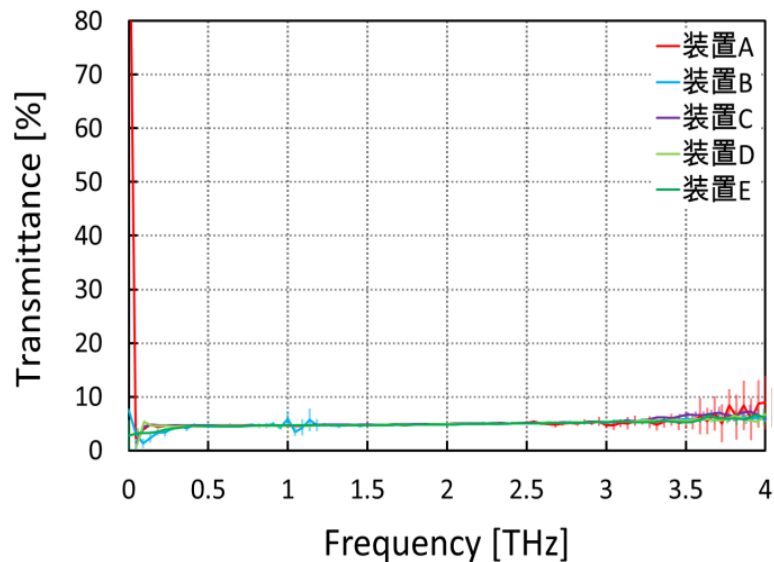
# サンプル1 フィルム状



高分子フィルムなど

誘電率 $\epsilon'$  2~3.5

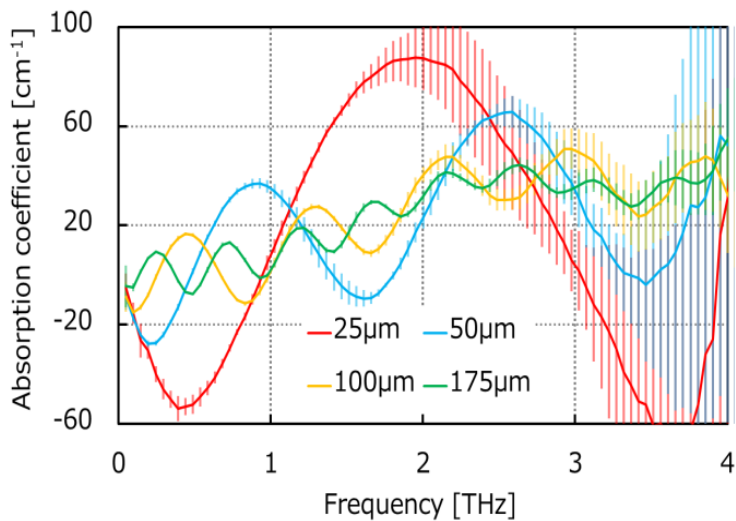
# 測定データ例（金属膜/PET）



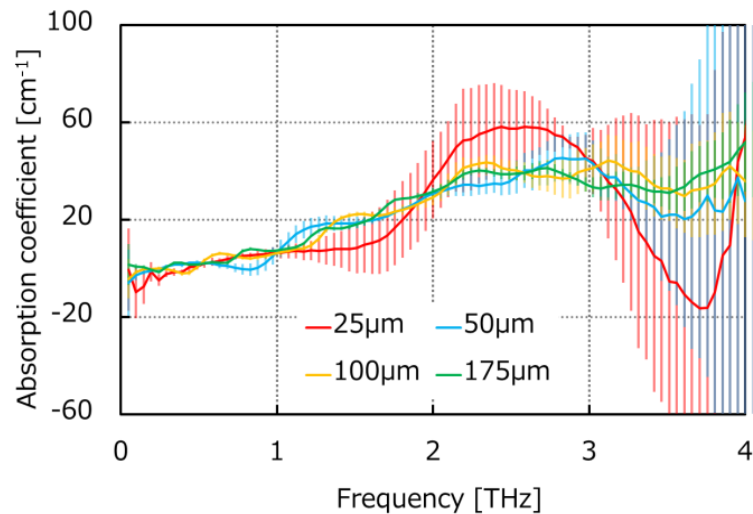
異なる装置でデータを取得しても、等しい結果が得られやすい

Maya Mizuno, et. al., "Classification of Terahertz Spectrometer for Transmittance Measurements of Refractive Materials," IEICE Electronics Express, vol. 13, No. 18, 20160532, pp. 1—12 (2016).

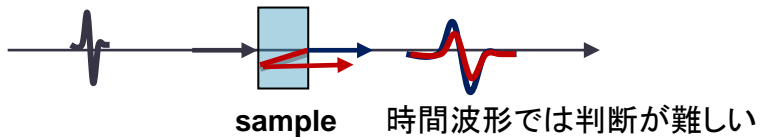
# 留意点 (干渉)



干渉あり

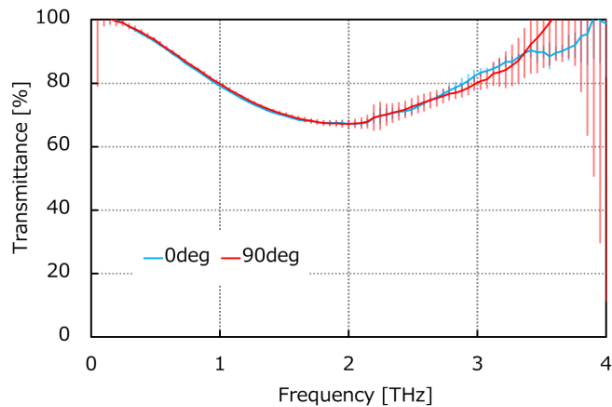
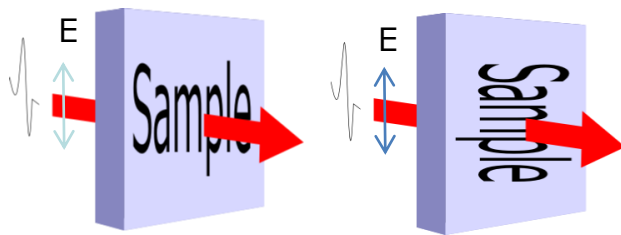


データ処理後

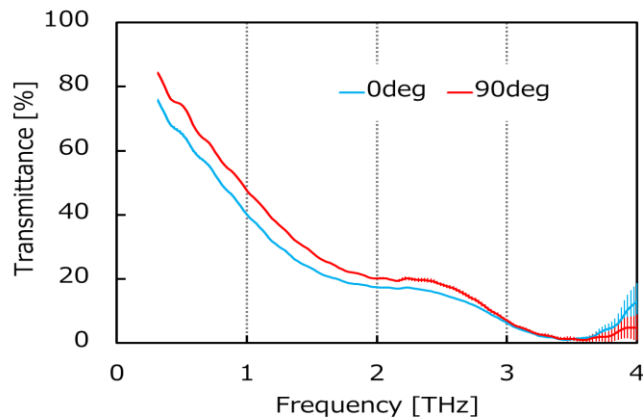


注: モデル式と実測の値が一致せず  
干渉を除くことができないこともある

# 留意点 (異方性)



異方性なし  
(液晶ポリマー, 25  $\mu\text{m}$ )



異方性あり  
(PEEK, 0.5 mm)

# フィルム状サンプルを測るときのポイント

---

周期的なスペクトルが得られたときは...

- ・いくつかの厚みで測定を行い、定数が異なるか確認する
- ・ソフトウェア上で干渉の除去を試みる

再現性がとれないときは...

- ・試料の設置方向を固定する
- ・異方性を確認する

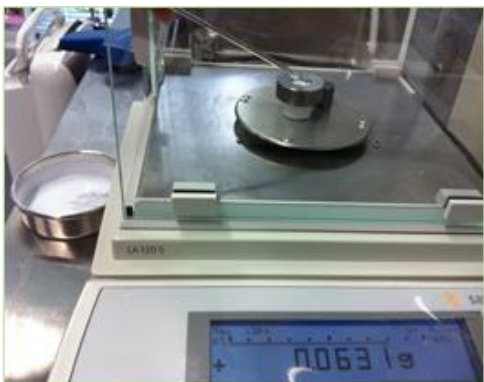
# サンプル2 粉末状



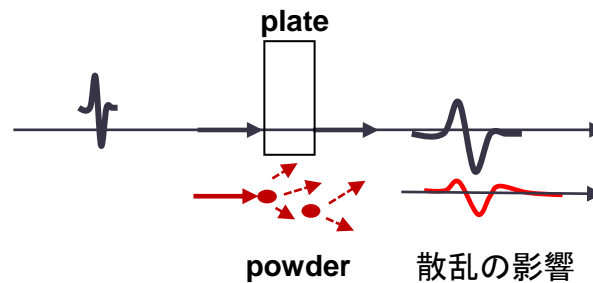
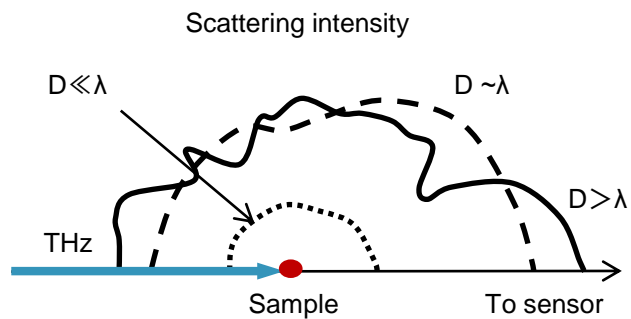
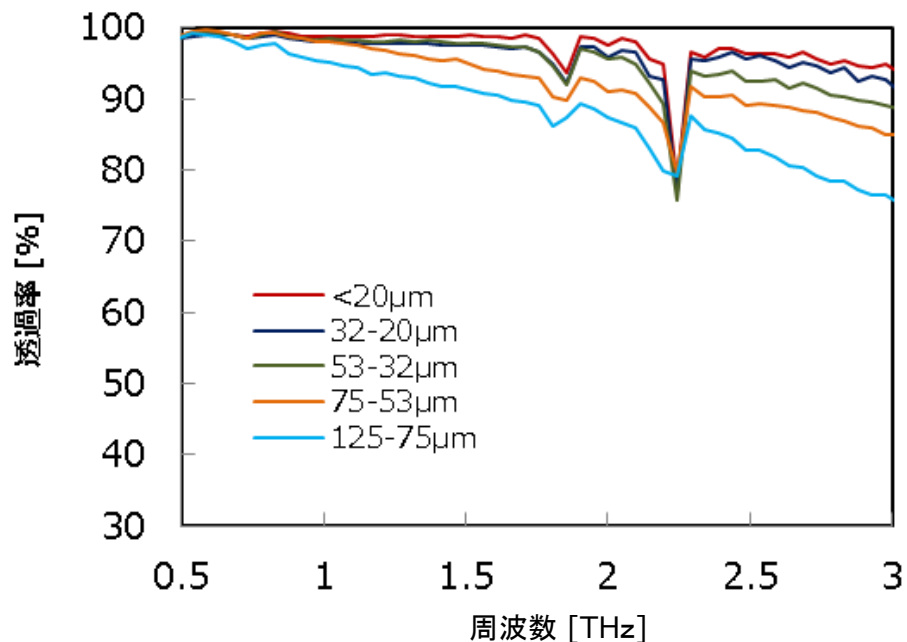
高密度ポリエチレン（HDPE）粉末で  
希釈しペレット状に成型した試料

例: Azurite ( $2\text{CuCO}_3(\text{OH})_2$ , 藍銅鉱) ペレット  
リファレンス・・・ HDPEペレット  
混合比 (質量比)・・・ Azurite/PE=0.02  
粒径・・・ <20  $\mu\text{m}$   
加圧・・・ 15 kN, 10 min

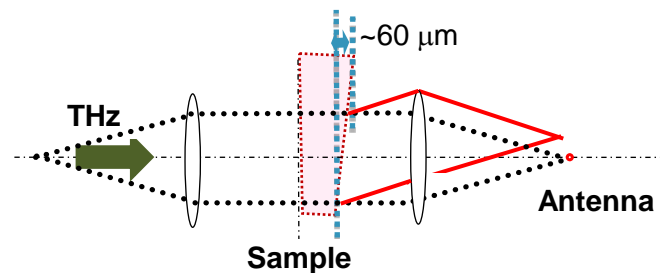
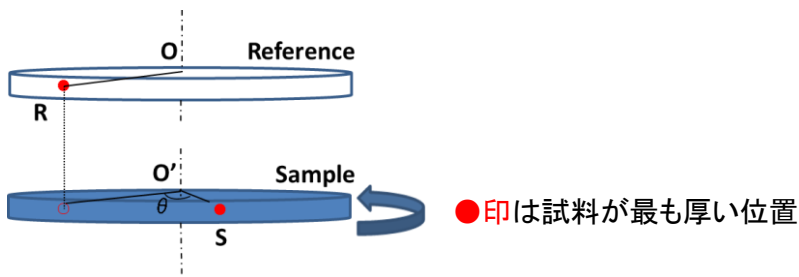
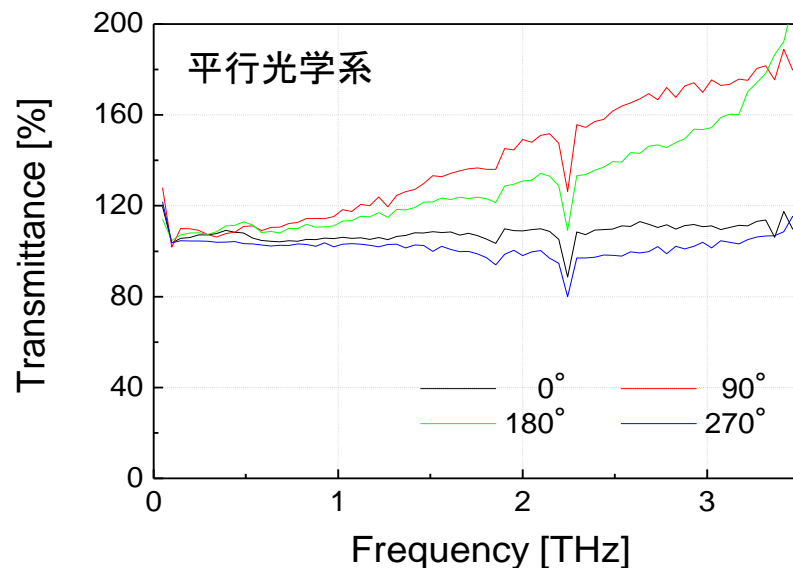
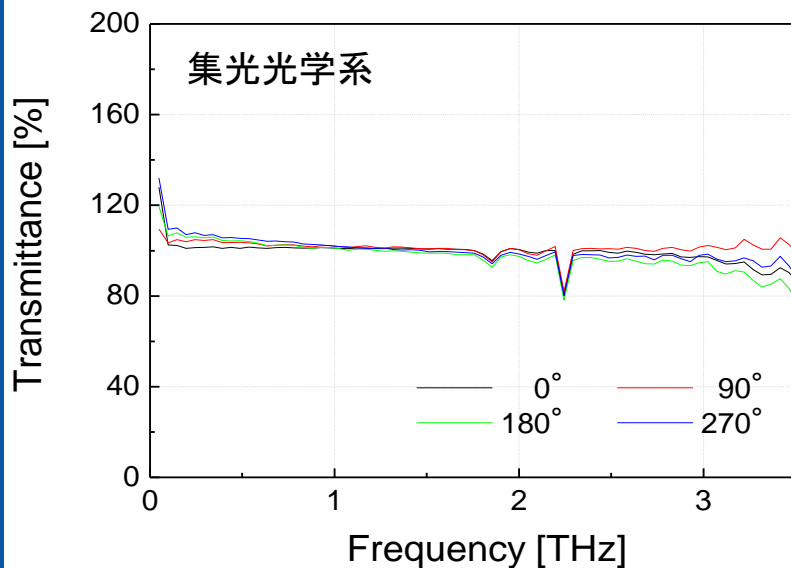
# 参考写真（ペレット成型風景）



# 留意点 (散乱)



# 留意点 (ペレット形状)



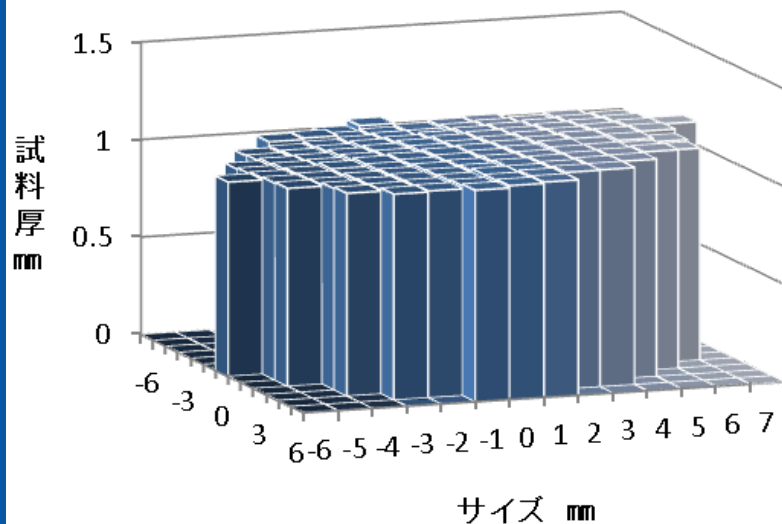
平行光学系では、測定結果が試料形状の影響を受けやすい

# 平行度の異なるペレット



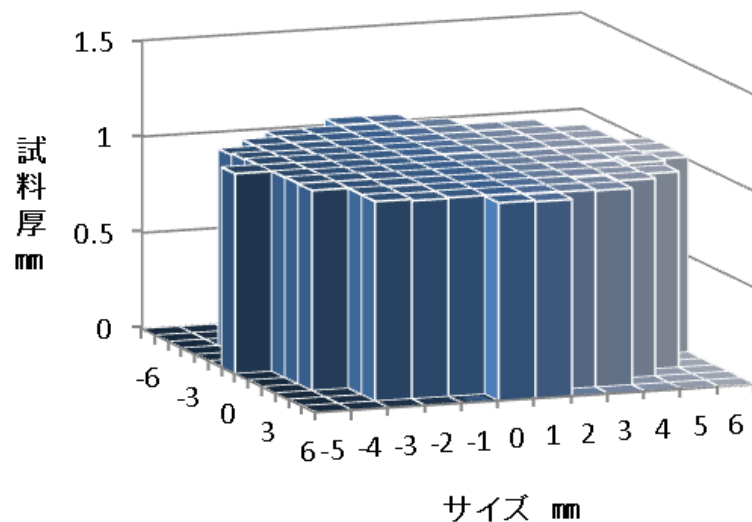
ポリエチレン(100%)ペレット

a



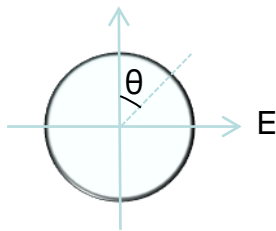
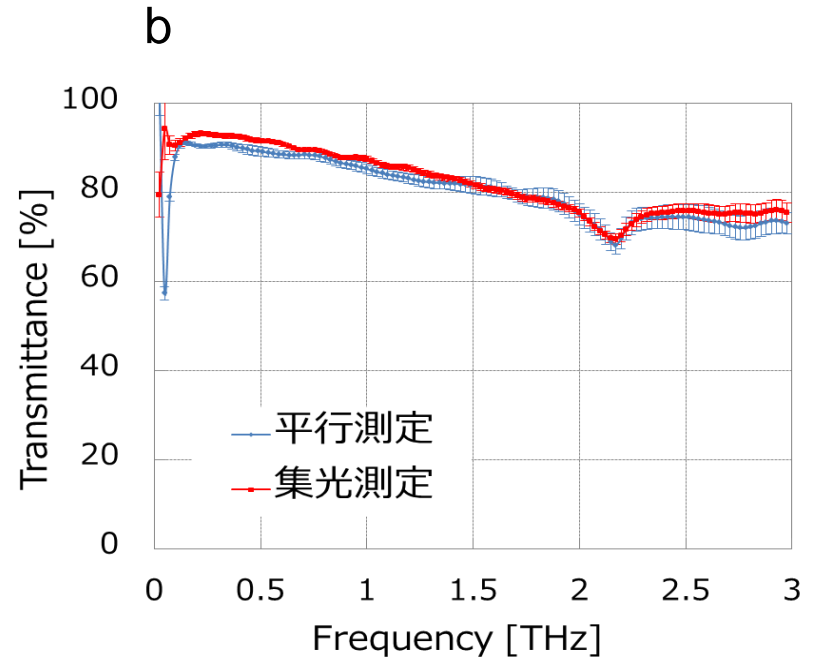
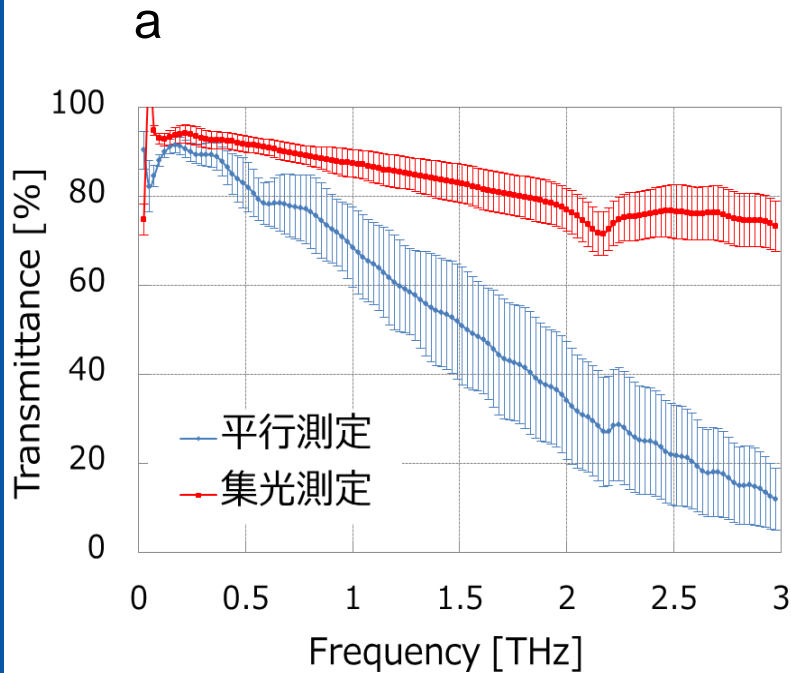
試料厚	
Max=1.123 [mm]	Min=0.984 [mm]
	Difference=0.139 [mm]

b



試料厚	
Max=1.043 [mm]	Min=1.013 [mm]
	Difference=0.03 [mm]

# 測定データ例（平行度の異なるペレット）

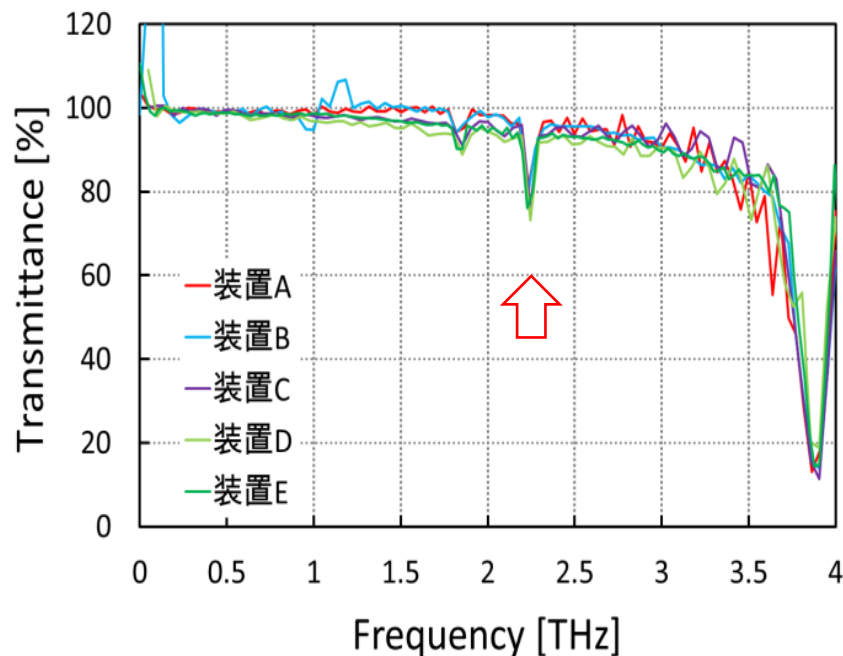


$\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  で測定

約 $\pm 15\mu\text{m}$ の平行度では、平行と集光光学系の透過率はほぼ一致

注: 集光では空気をref.としたとき、ピークがブロードになる(散乱で歪む)ことがある

# 測定データ例（透過率スペクトル）



試料5個の透過率の平均値

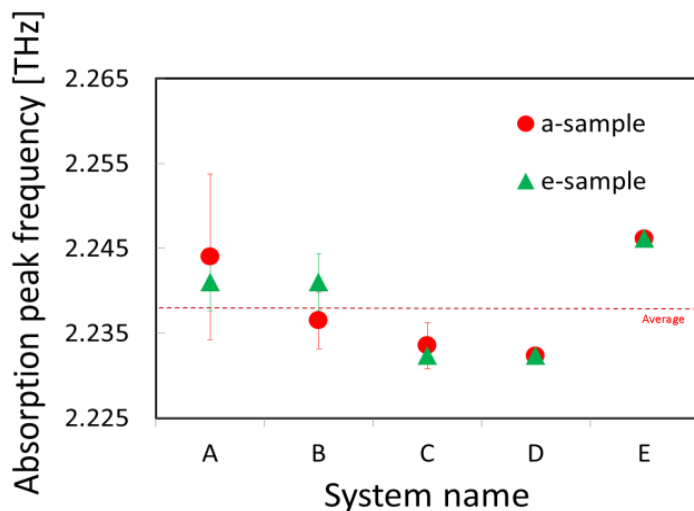
散乱やペレットの平行度に注意することで  
異なる装置を利用しても同等のデータが得られる

# 測定データ例（吸収ピーク周波数）

System	resolution [THz]	Absorption peak frequency [THz]					Mean value [THz]	1 $\sigma$ [THz]
		1	2	3	4	5		
A	0.0075	2.2350	2.2350	2.2425	2.2500	2.2575	2.2440	0.0098
B	0.0075	2.2350	2.2350	2.2350	2.2350	2.2425	2.2365	0.0034
C	0.0061	2.2323	2.2323	2.2323	2.2384	2.2323	2.2335	0.0027
D	0.0061	2.2323	2.2323	2.2323	2.2323	2.2323	2.2323	0.0000
E	0.0244	2.2461	2.2461	2.2461	2.2461	2.2461	2.2461	0.0000

A-E mean 2.2385

5個の装置で測定した透過率の平均値



再現性がよくても  
他の装置で得られる値と異なる  
場合もある

# 粉末状サンプルを測るときのポイント

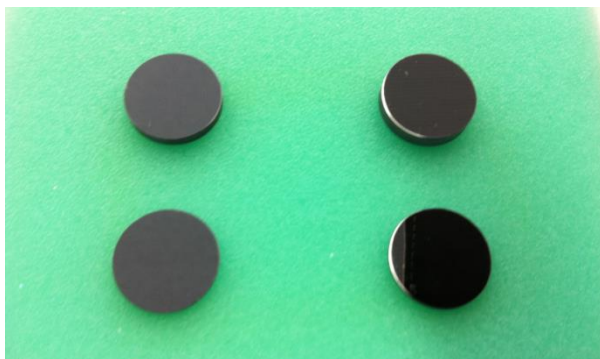
同じ物質なのにスペクトルが異なるときは...

- ・粉末のサイズを確認  
    <20  $\mu\text{m}$

同じペレットを測定しているのに再現性がとれないときは...

- ・ペレットの平行度を確認
- ・光学系を確認  
    (ペレットを回転させて、複数回測定)

# サンプル3 厚い板状

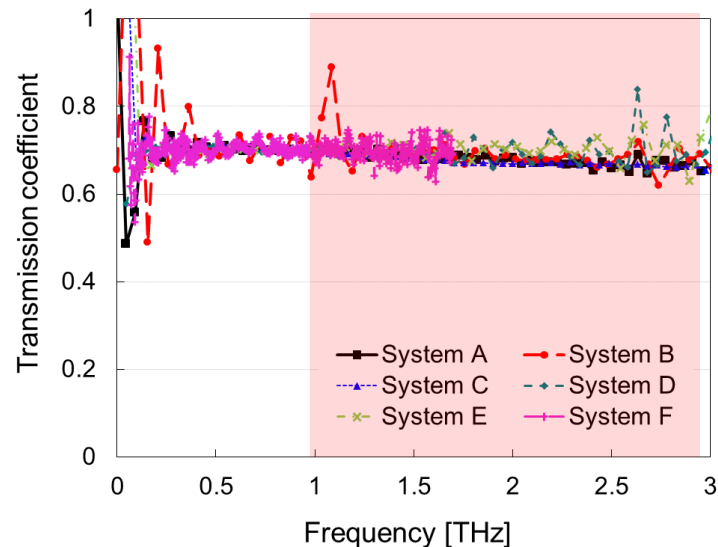
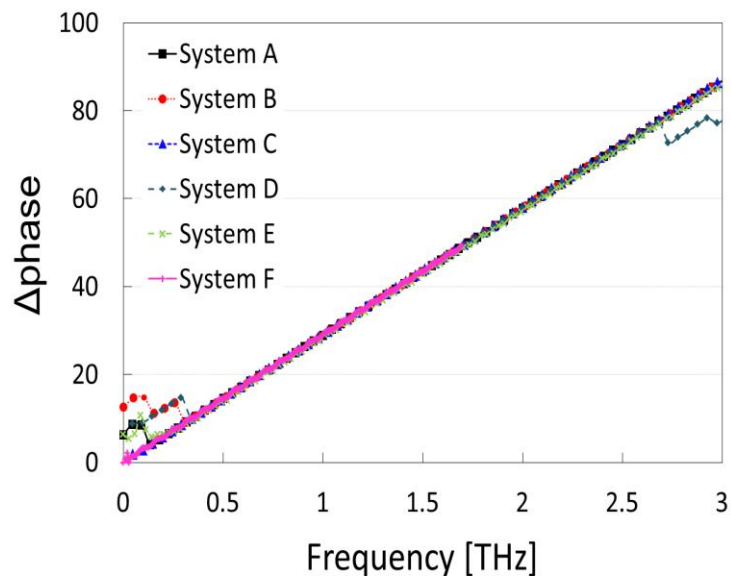


例: 高抵抗シリコン板  
抵抗率...  $>10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$   
屈折率...  $n \sim 3.4$   
成長方法... Floating Zone

結晶など

高誘電率・低損失, 試料内の厚さが  
均一な工業製品  
環境による物理定数の変化が少ない.

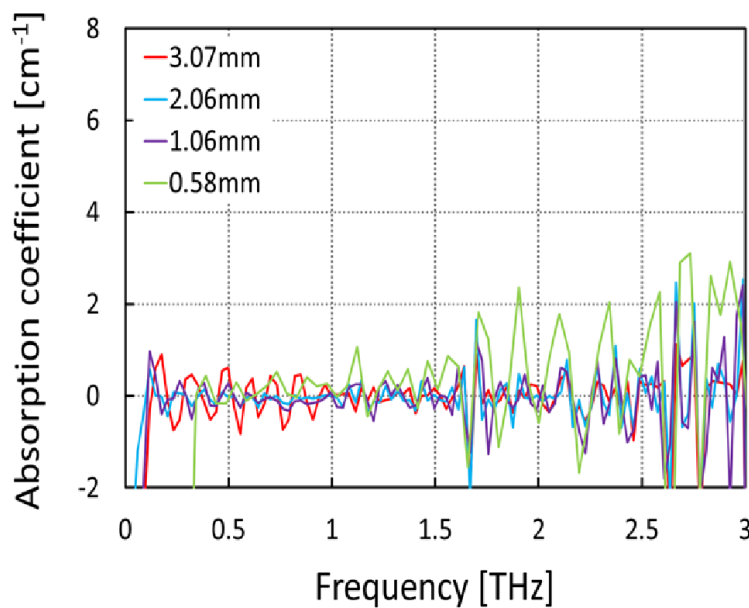
# 測定データ例 (0.5 mm厚シリコン)



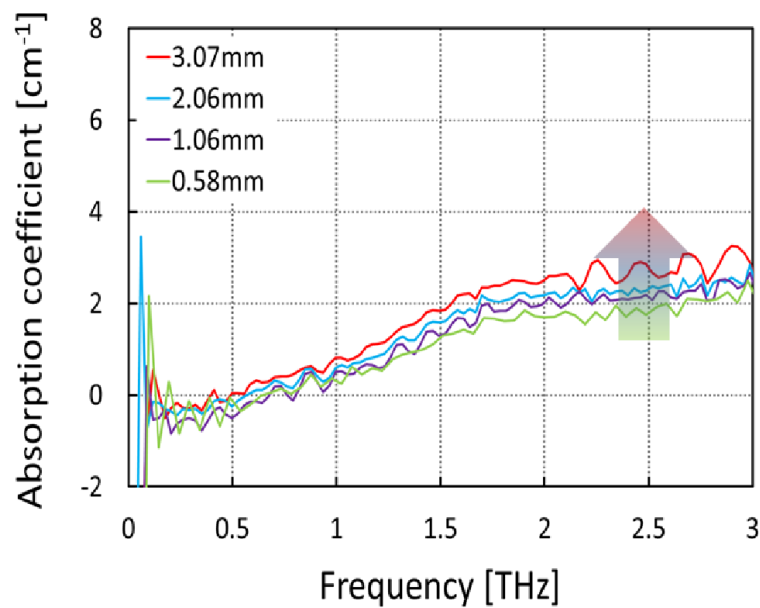
高周波側で振幅データに違いが生じる可能性がある

# 測定データ例 (シリコン、厚み依存性)

平行光学系

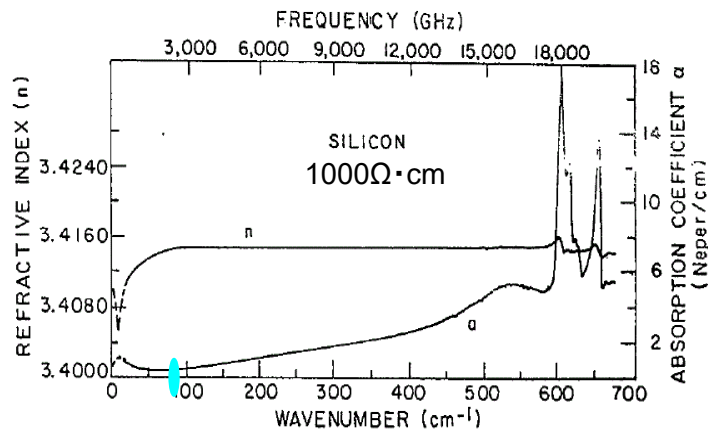
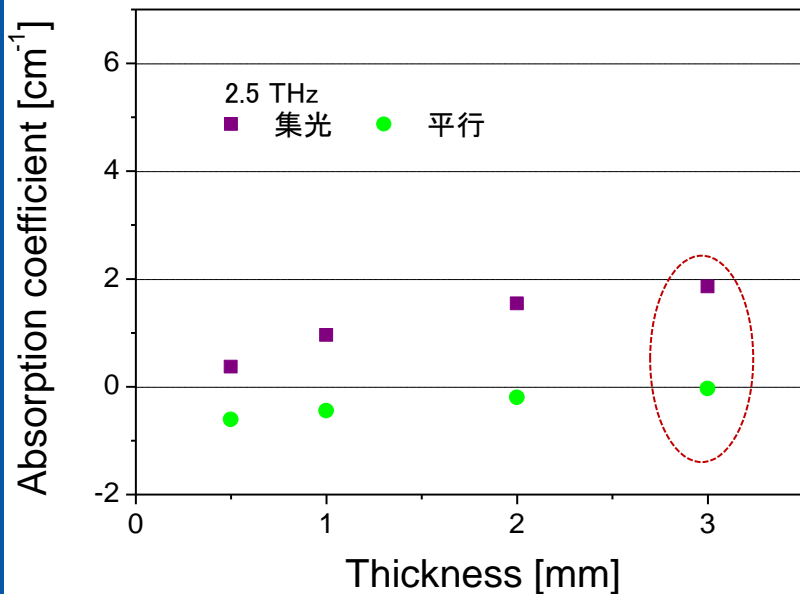


集光光学系

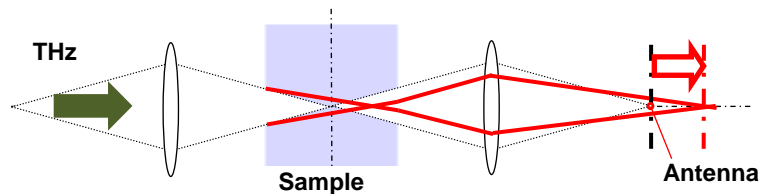


集光光学系では、シリコンの材料定数とは異なる周波数特性が観測されるケースがある

# 留意点 (試料厚)



Mohamed Nurul Afsar, and Hua Chi,  
International Journal of Infrared and Millimeter Waves,  
Vol. 15, pp. 1181-1188 (1994).

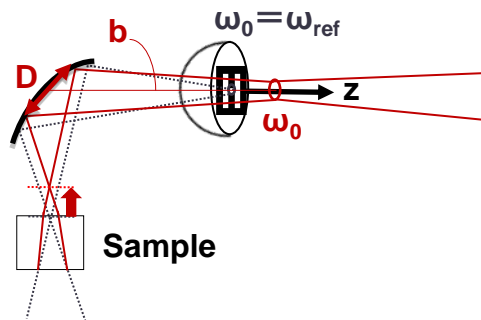


屈折率が高く、厚い試料を測るときに注意が必要

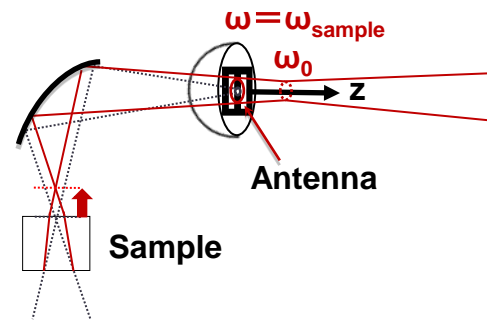
# 測定値が異なる要因

$$\text{受信電力: } P = AW = \frac{AI}{\pi\omega^2}$$

A: アンテナ実行面積(一定), W: 電力密度, I: テラヘルツ強度(一定)



(i)



(ii)

$$\omega_0 \sim 2\alpha\lambda b/\pi D$$

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 [1 + (\alpha\lambda z/(\pi\omega_0^2))^2]$$

屈折率が高く、厚い試料を設置したときの焦点位置のずれにより、受信アンテナに照射されるテラヘルツ波のビーム径が大きくなり、受信電力が小さくなる  
→ 見かけ上吸収が大きくなる

# 厚い板状サンプルを測るときのポイント

---

材料定数が文献値と大きく異なるときは...

- 平行光学系を利用
- できるだけ薄い試料を選択
- 複数の厚みで測定し、材料定数の算出を試みる

# THz-TDS測定のポイント

注意する点

## フィルム状

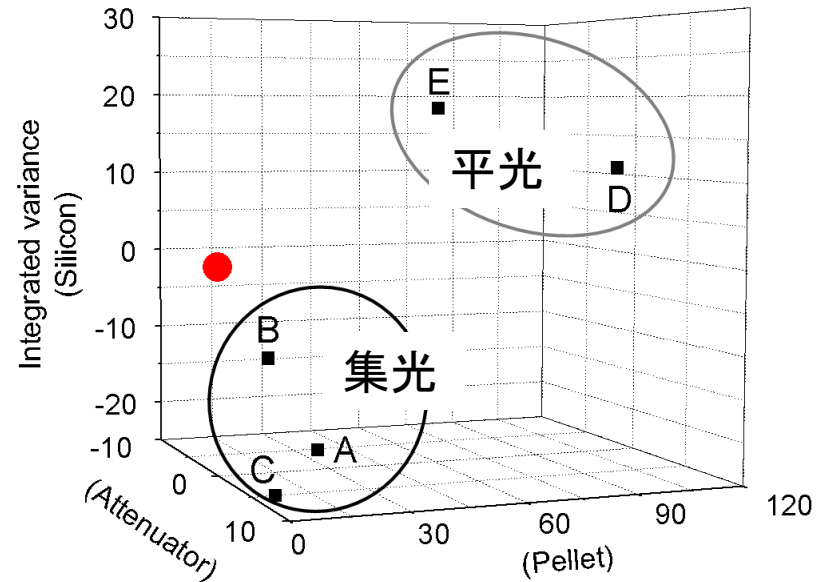
- ・多重反射成分
- ・試料の異方性

## 粉末状(ペレット)

- ・粉末の大きさ
- ・ペレットの平行度

## 厚い板状

- ・見かけ上の材料定数の変化

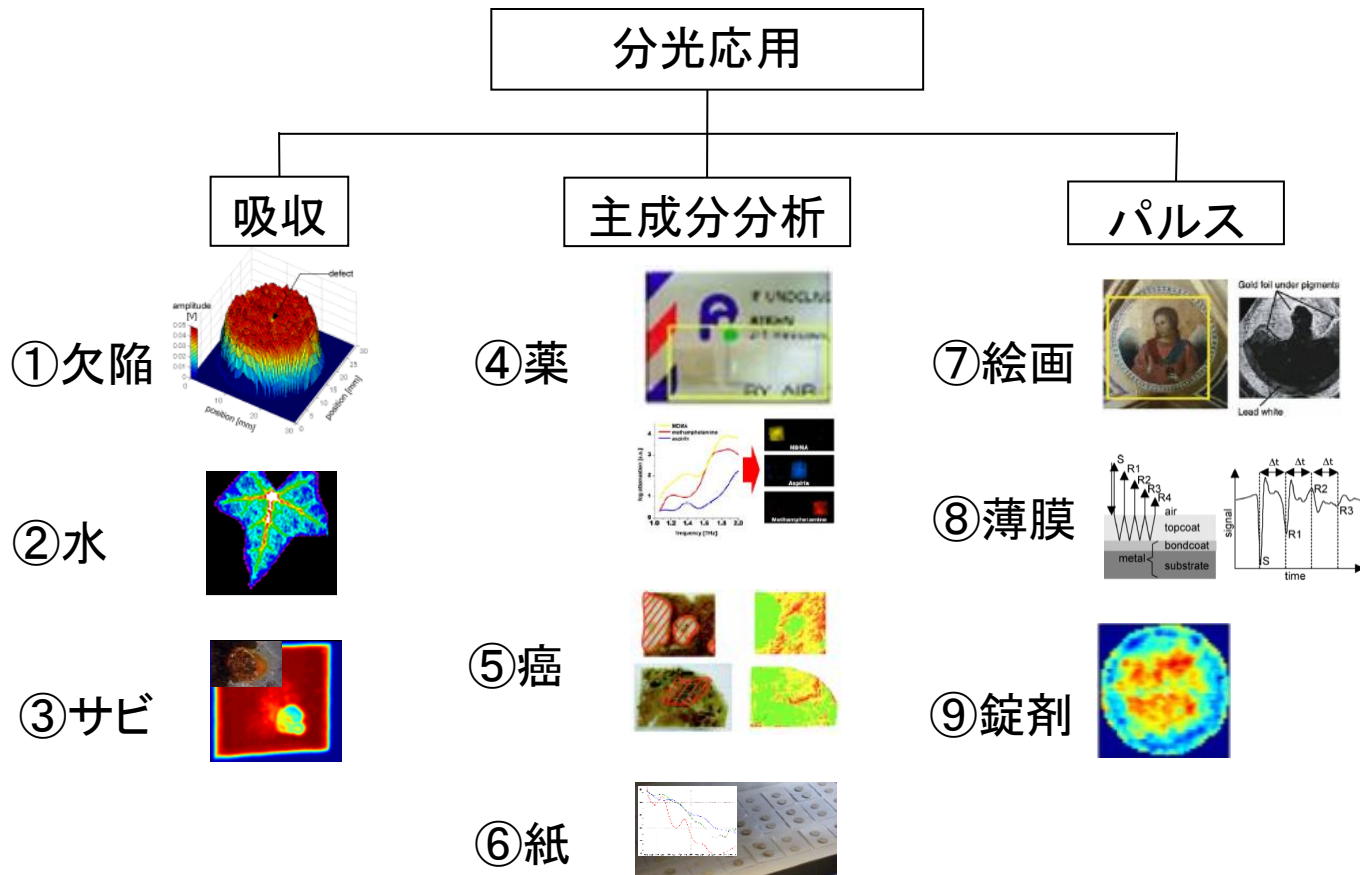


異なるシステムで測定したデータと比較  
測定に適した試料を作製

③

## THz-TDSを用いた応用例

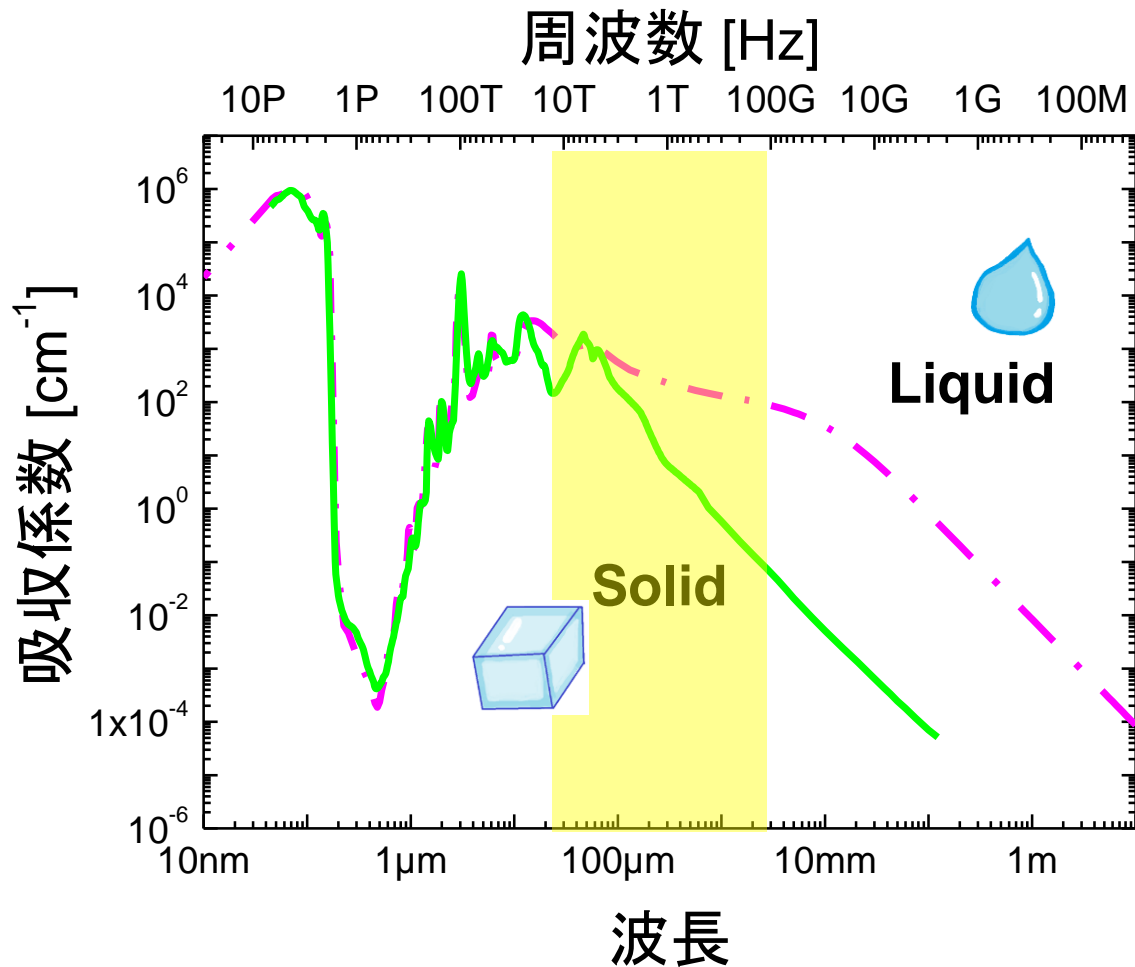
# テラヘルツ分光を活用した測定例



①IEEJ Trans. FM, 132, p.864 (2012)  
 ③IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2, p.242 (2012)  
 ⑤Appl. Phys. Let. 90, 041102 (2007)  
 ⑦Appl. Phys. A, 100, p.591 (2010)  
 ⑨J. Pharm. Innov. 7, p. 87 (2012)

②IEEJ Trans. EIS, 124, p. 1672 (2004)  
 ④Optics and Photonics News, 15, p.34 (2004)  
 ⑥Appl. Phys. A, 111, p.83 (2013)  
 ⑧Electrical Engineering in Japan, 183, No. 4, p.1 (2013)

# 水の吸収特性



[1] C. Zhang et al. APPL. PHYS. LETT., 79, 491 (2001).

[2] S. G. Warren et al. APPL. OPT., 23, 1206 (1984).

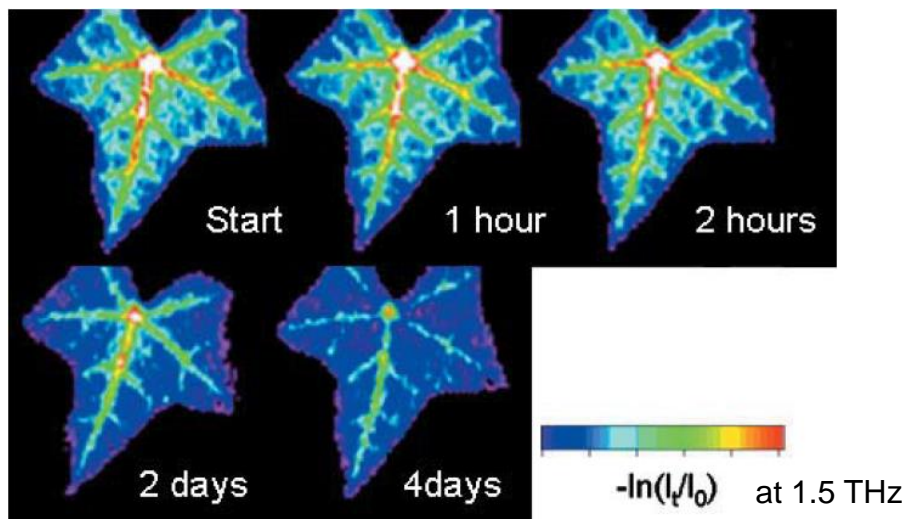
[3] M. R. QUERRY et al. HANDBOOK OF OPTICAL CONSTANTS OF SOLIDS II, 1059

# 植物モニタリング



## 植物の葉の水分測定

- 植物工場での給水時期の調査
- 植物の光合成による蒸散の観測



# 絶縁材料の評価 (PE)

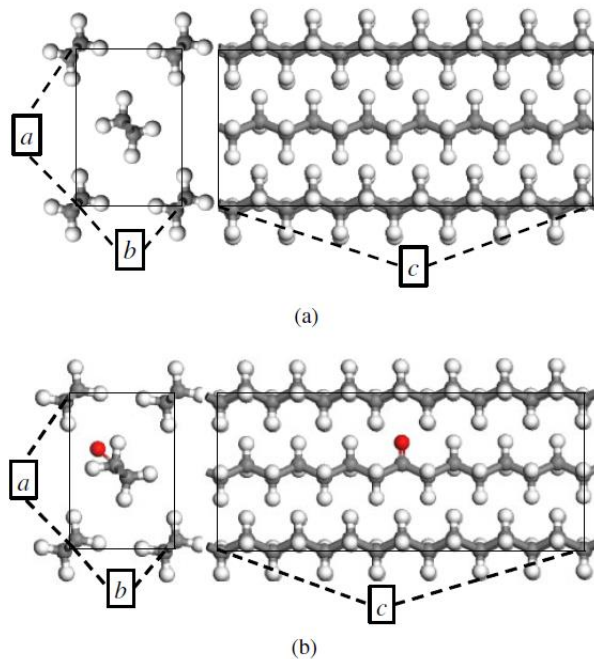


Fig. 10. (Color online) Views of the model structures of  $C_{28}H_{56}$  (a) and  $C_{28}H_{54}O$  (b) with lengths  $a = 0.740$ ,  $b = 0.493$ , and  $c = 1.78$  nm. Gray/light gray balls: C, white balls: H, red/dark gray balls: O.

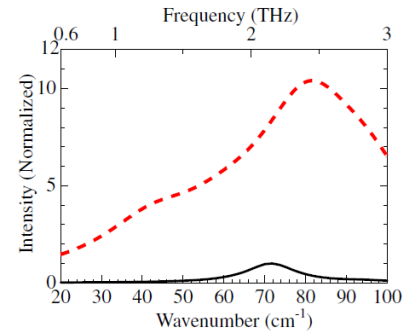


Fig. 13.

計算

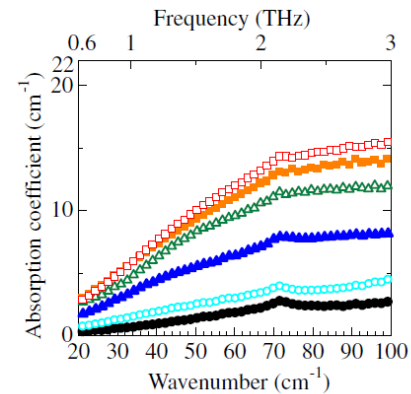
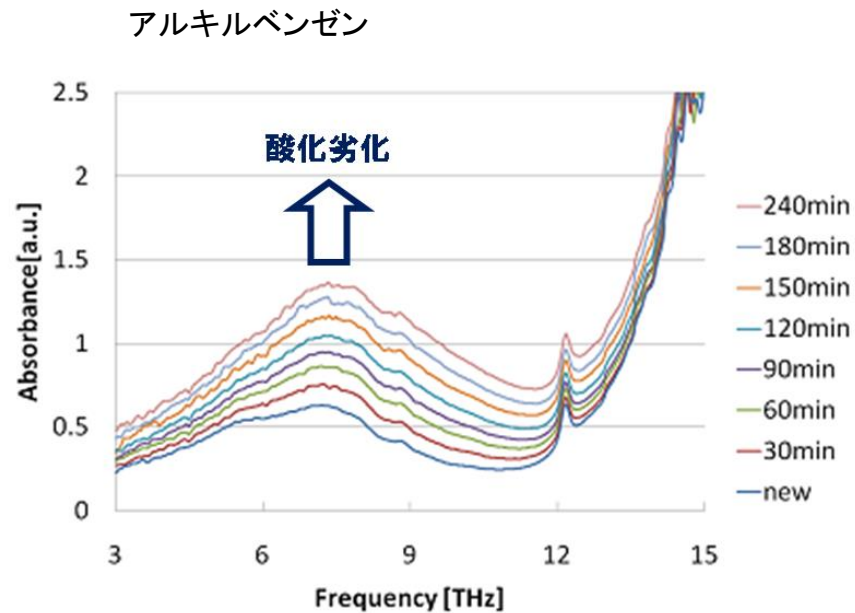
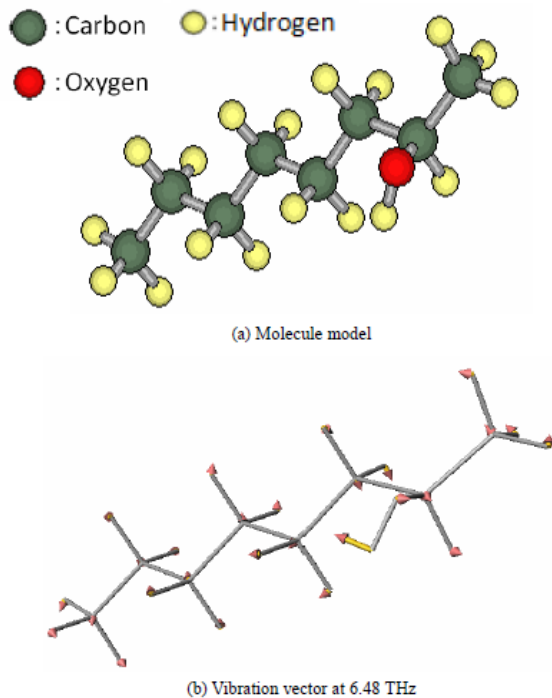


Fig. 2.

実測

## ポリエチレンの酸化の判別

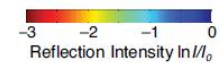
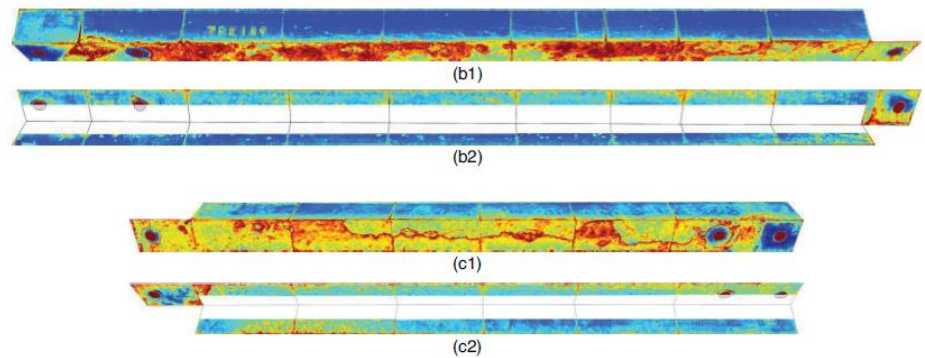
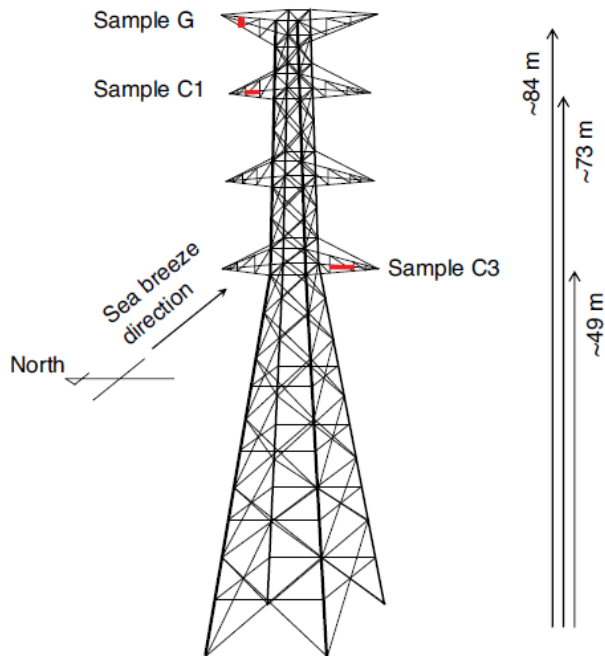
# 絶縁油の劣化調査



## 絶縁油の酸化劣化の判別

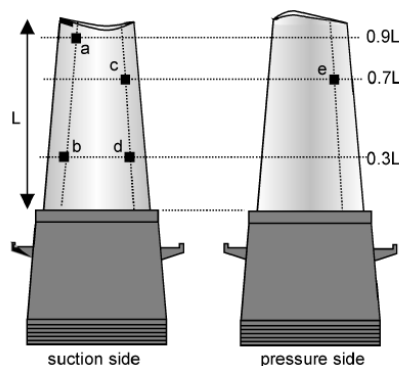
# 電力設備の非破壊検査

## 金属の錆の検出



# 電力設備の非破壊検査2

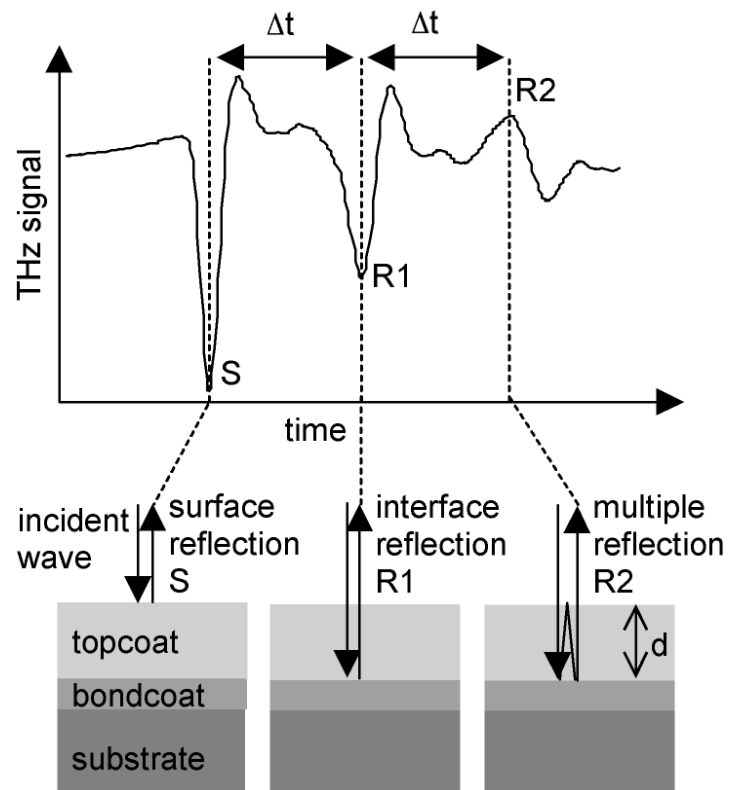
## ガスタービン翼遮熱コーティングのトップコート膜厚測定



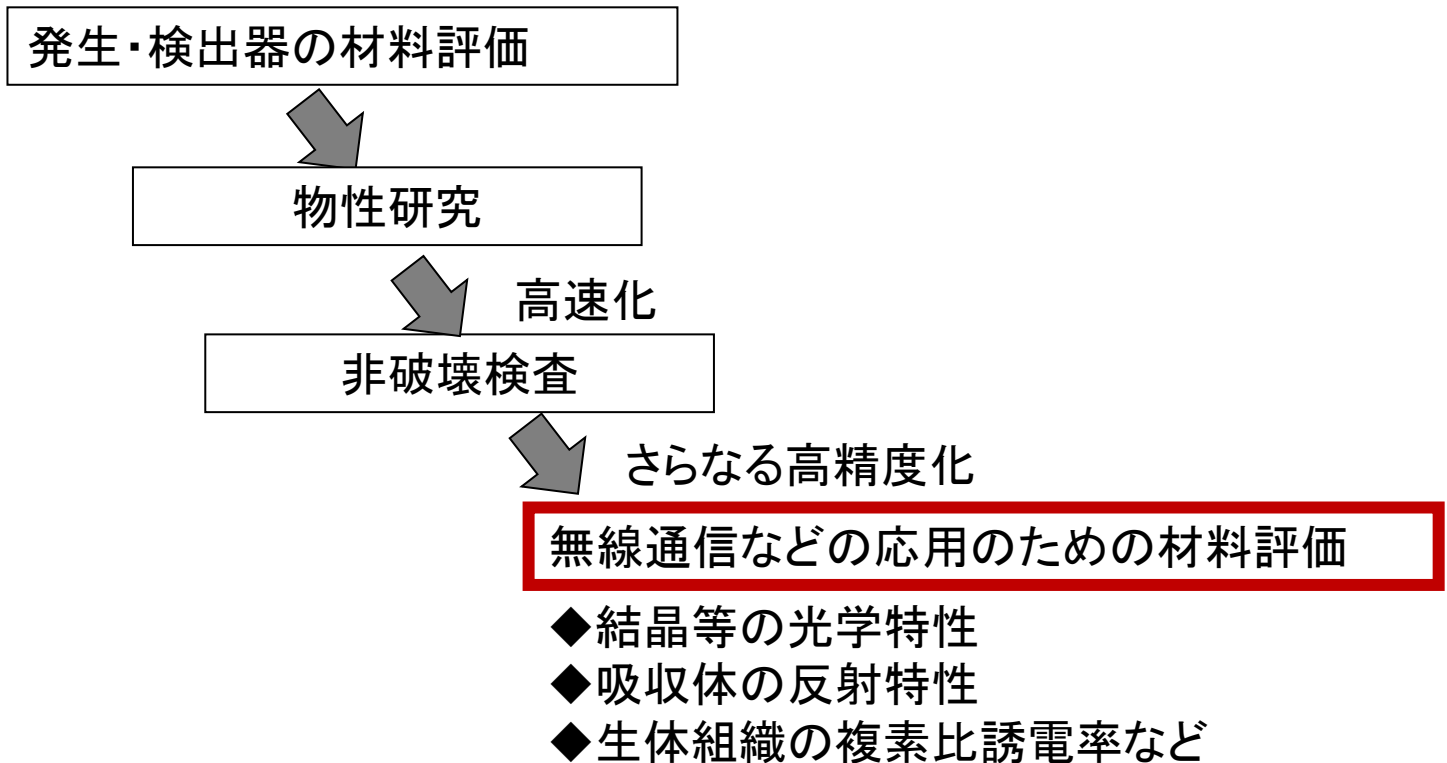
Measurement location	Terahertz measurement $d_T [\mu\text{m}]^{*1}$	Microscopic observation $d_M [\mu\text{m}]^{*2}$	Relative difference $(d_T - d_M)/d_M$
a	$177 \pm 4$	$173 \pm 13$	2.3%
b	$204 \pm 5$	$195 \pm 6$	4.6%
c	$266 \pm 6$	$260 \pm 10$	2.3%
d	$254 \pm 6$	$243 \pm 10$	4.5%
e	$200 \pm 5$	$189 \pm 11$	5.8%

\*1  $\pm$  value is the measurement error based on error analysis.

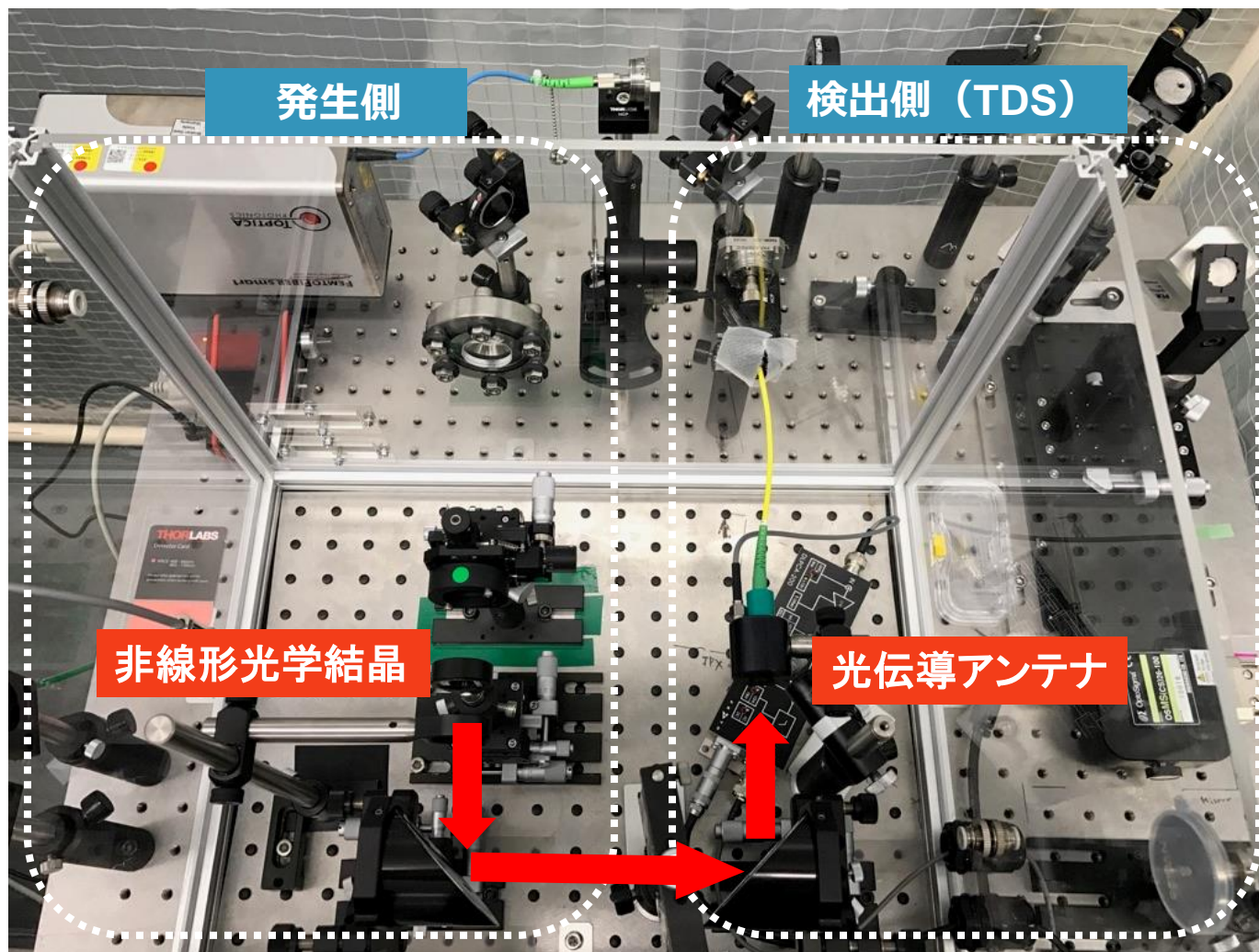
\*2  $\pm$  value is the standard deviation resulting from surface roughness.



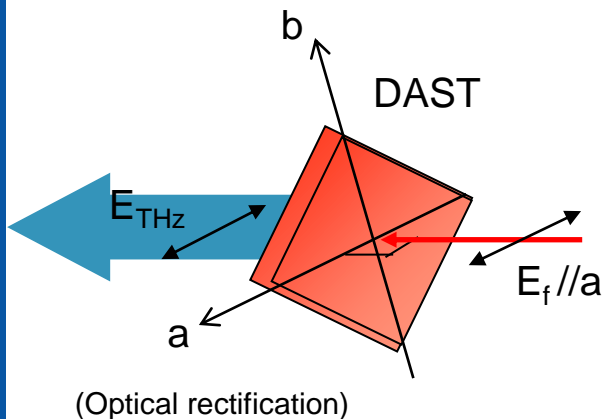
# テラヘルツ分光技術の応用先



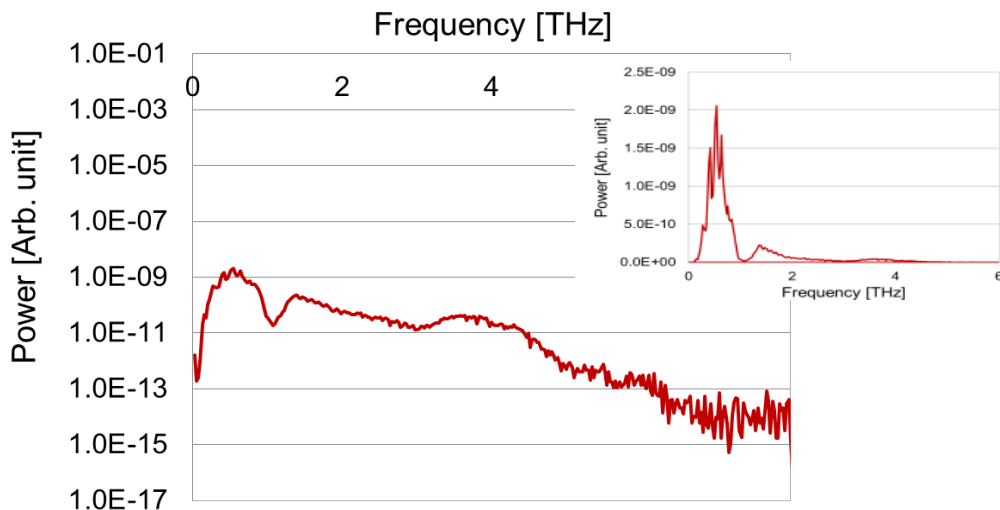
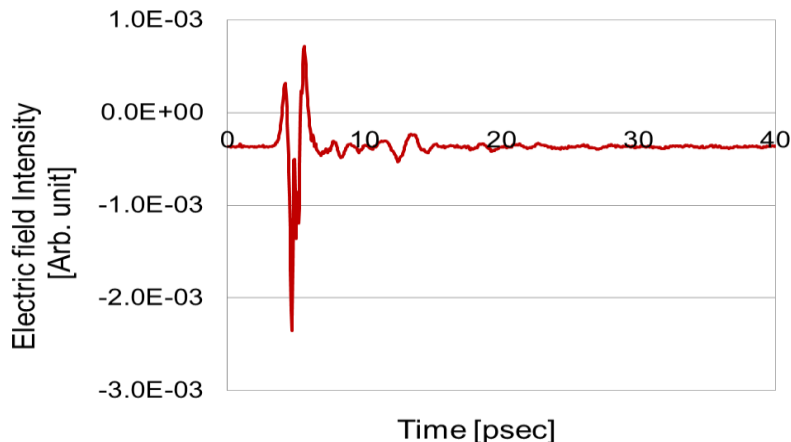
# 光学結晶等の評価システム



# 測定データ例 (THz発生用DAST結晶)



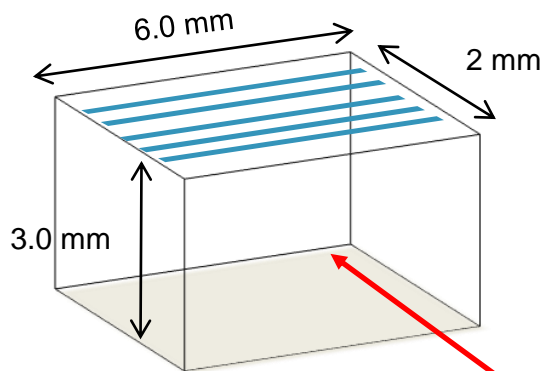
4-N,N-Dimethylamino-4'-N'-methylstilbazolium tosylate



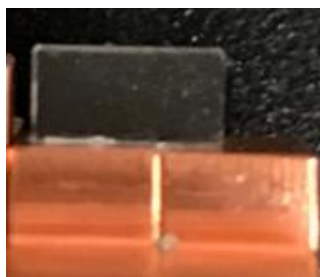
広帯域で発生

# 測定データ例 (THz発生用PPLT結晶)

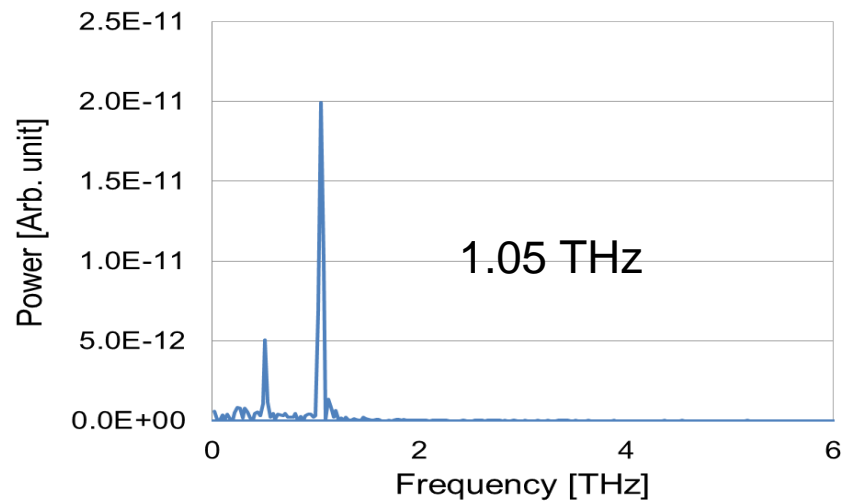
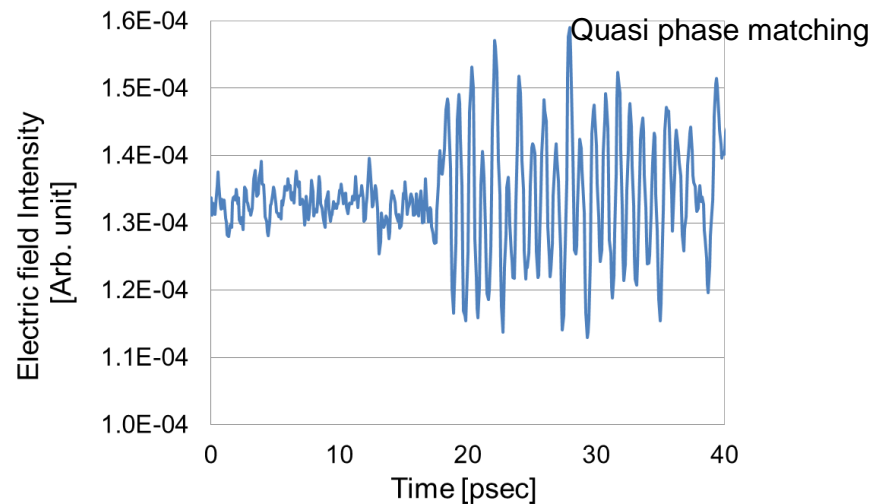
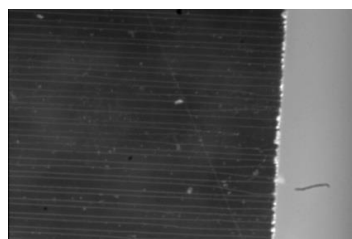
Periodically poled lithium tantalate



(Optical rectification)

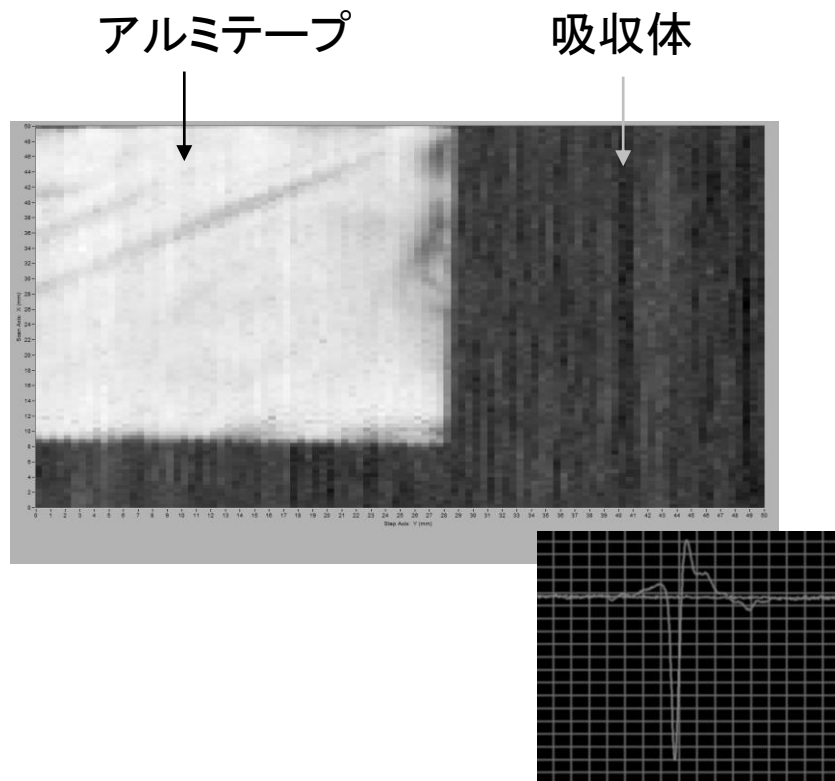
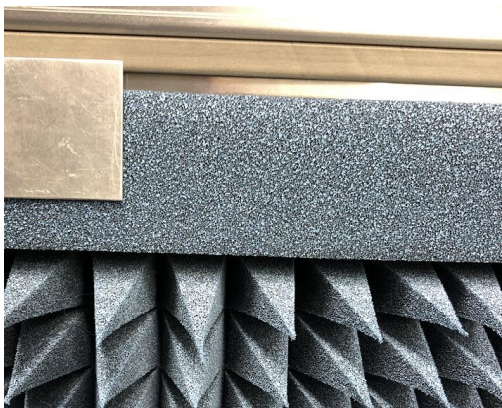
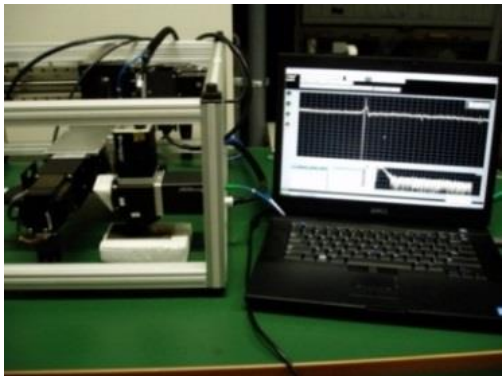


Interval: 70 $\mu$ m



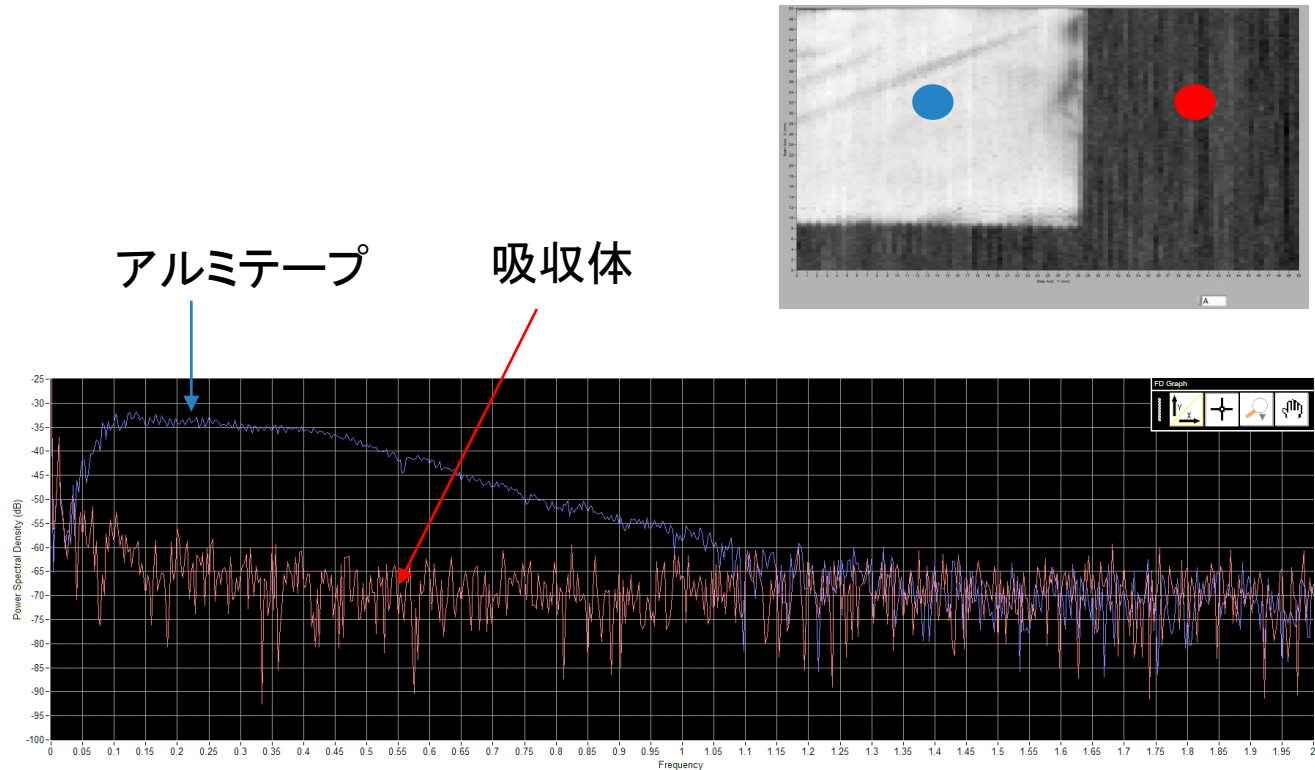
周波数固定

# 電波吸収体の反射特性測定の実例（イメージ）



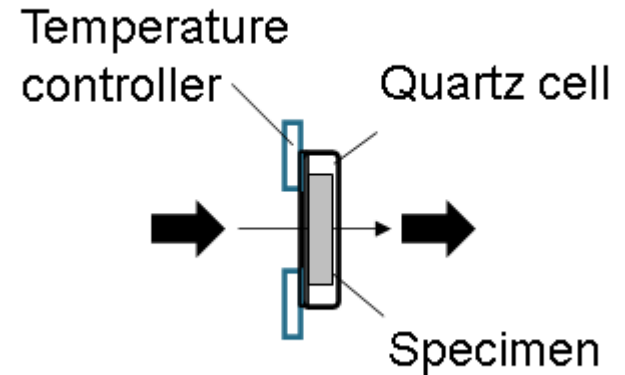
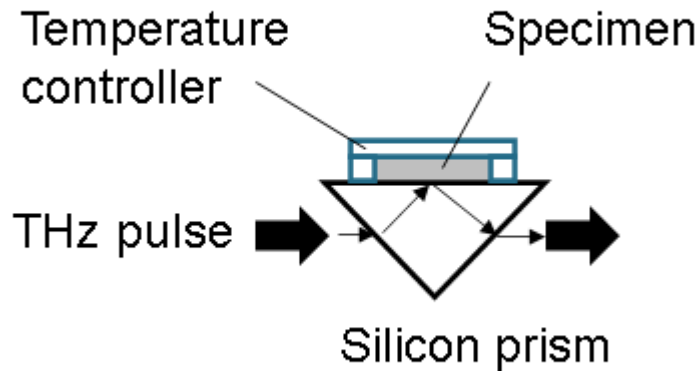
テラヘルツ波の反射強度を画像化

# 電波吸収体の反射特性測定の例（スペクトル）

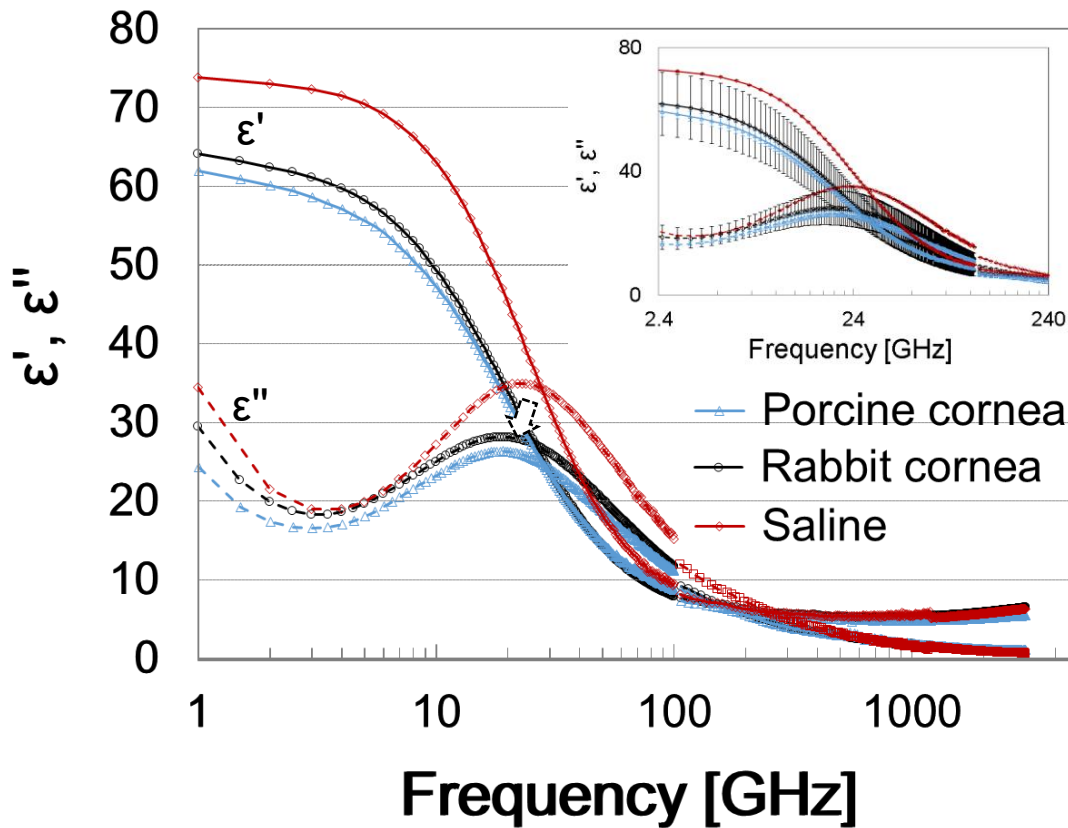


イメージデータ上で指定した位置における反射特性

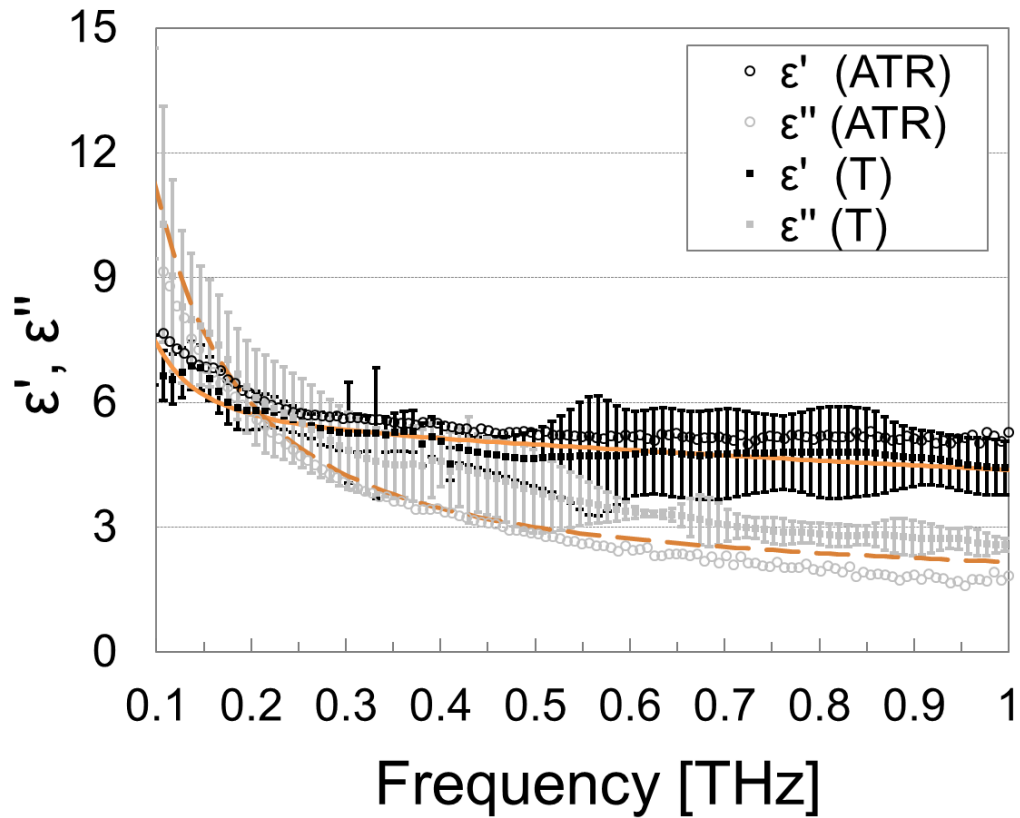
# 角膜の複素比誘電率測定のための分光法



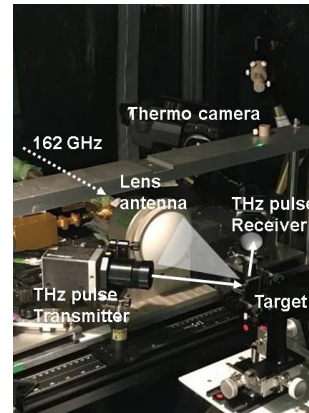
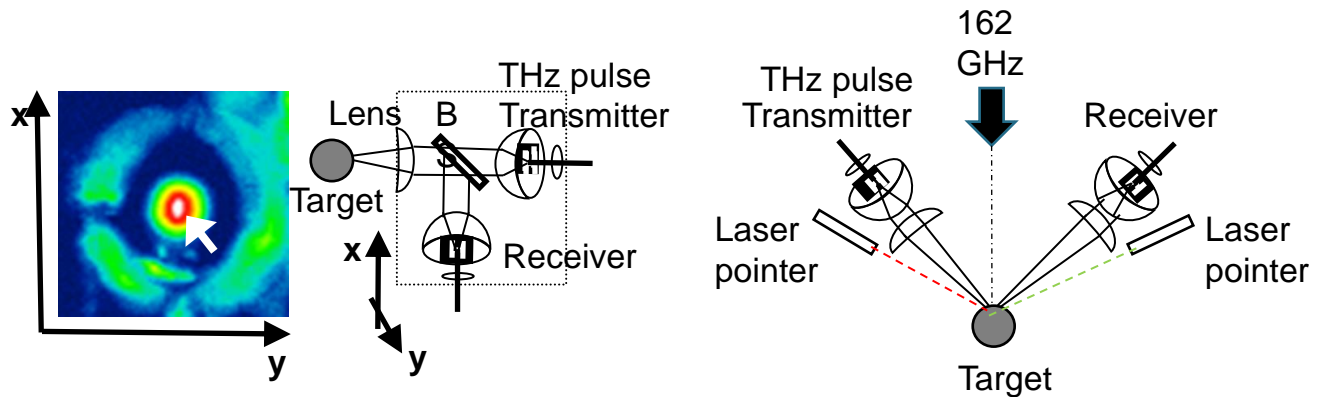
# 角膜の複素比誘電率測定例1



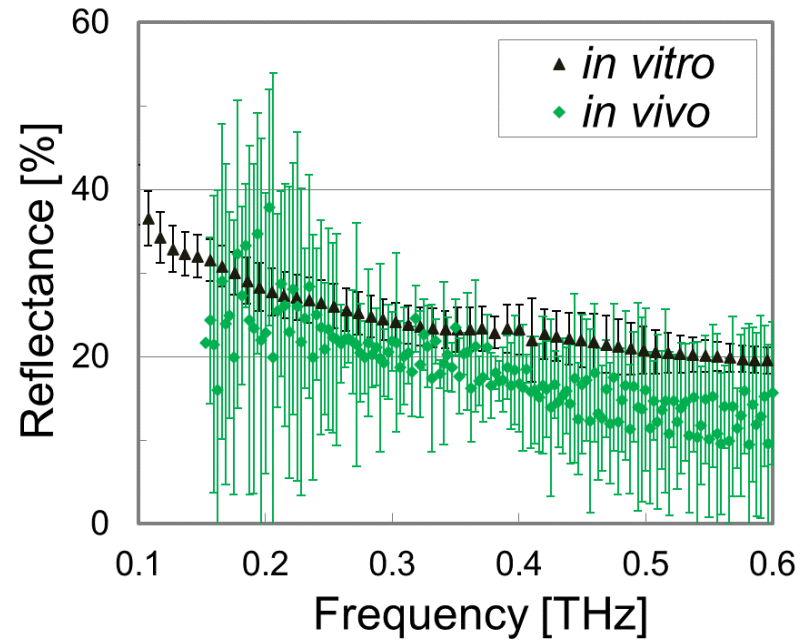
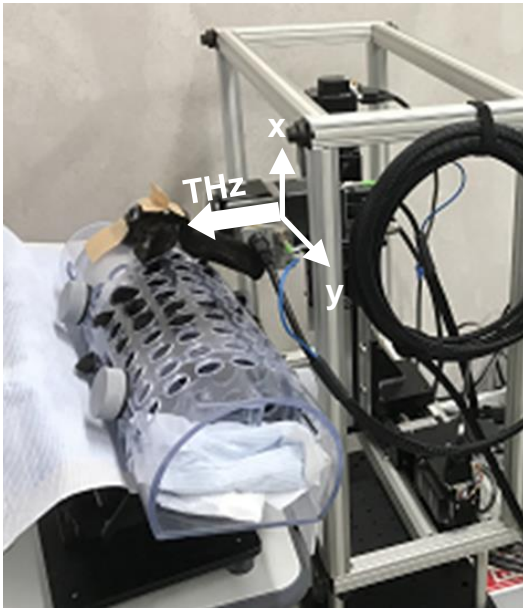
# 角膜の複素比誘電率測定例2



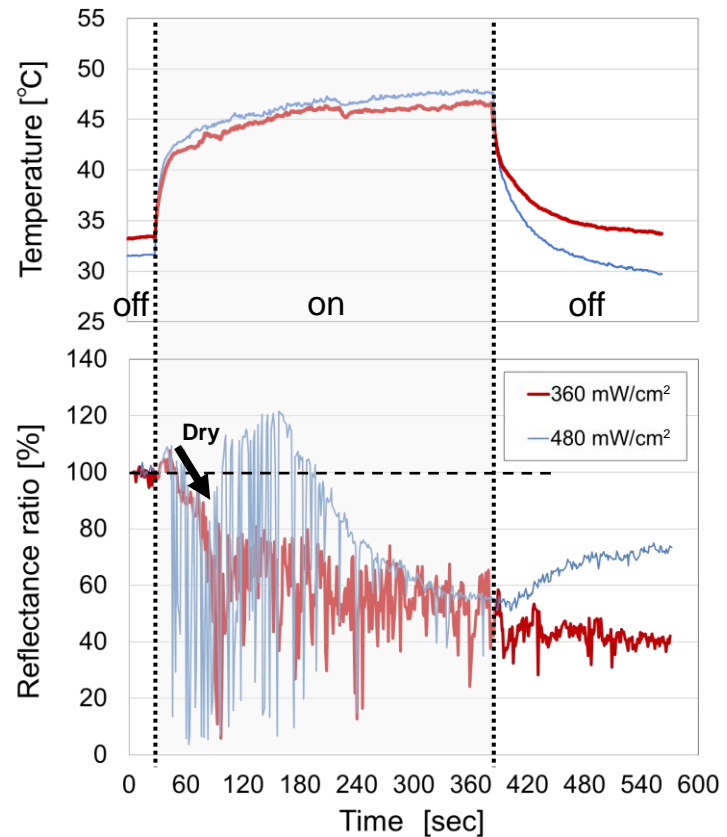
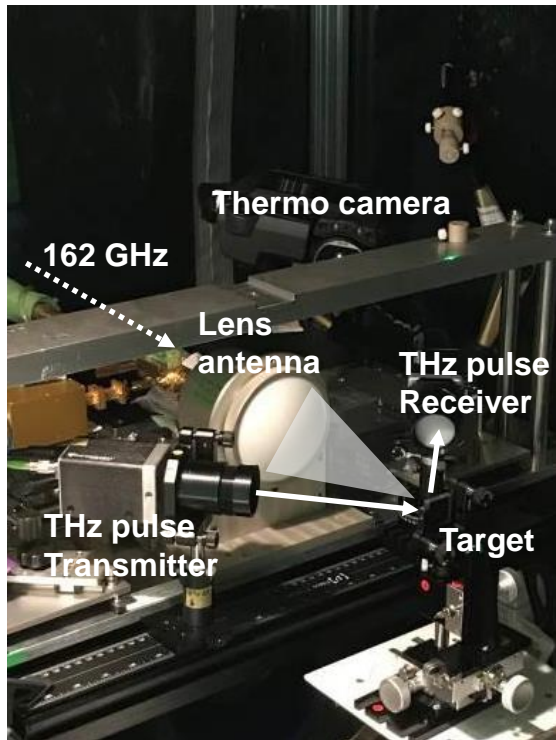
# 眼部組織の反射率の測定法



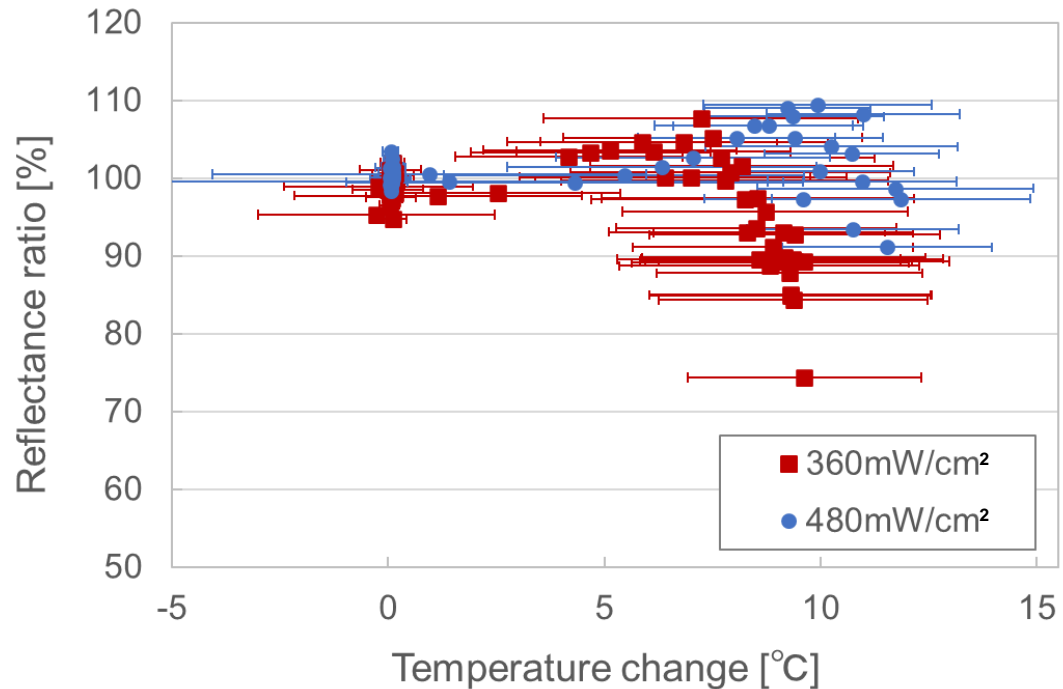
# 眼部組織の反射率測定例



# 眼部組織の反射率測定例(ばく露中)

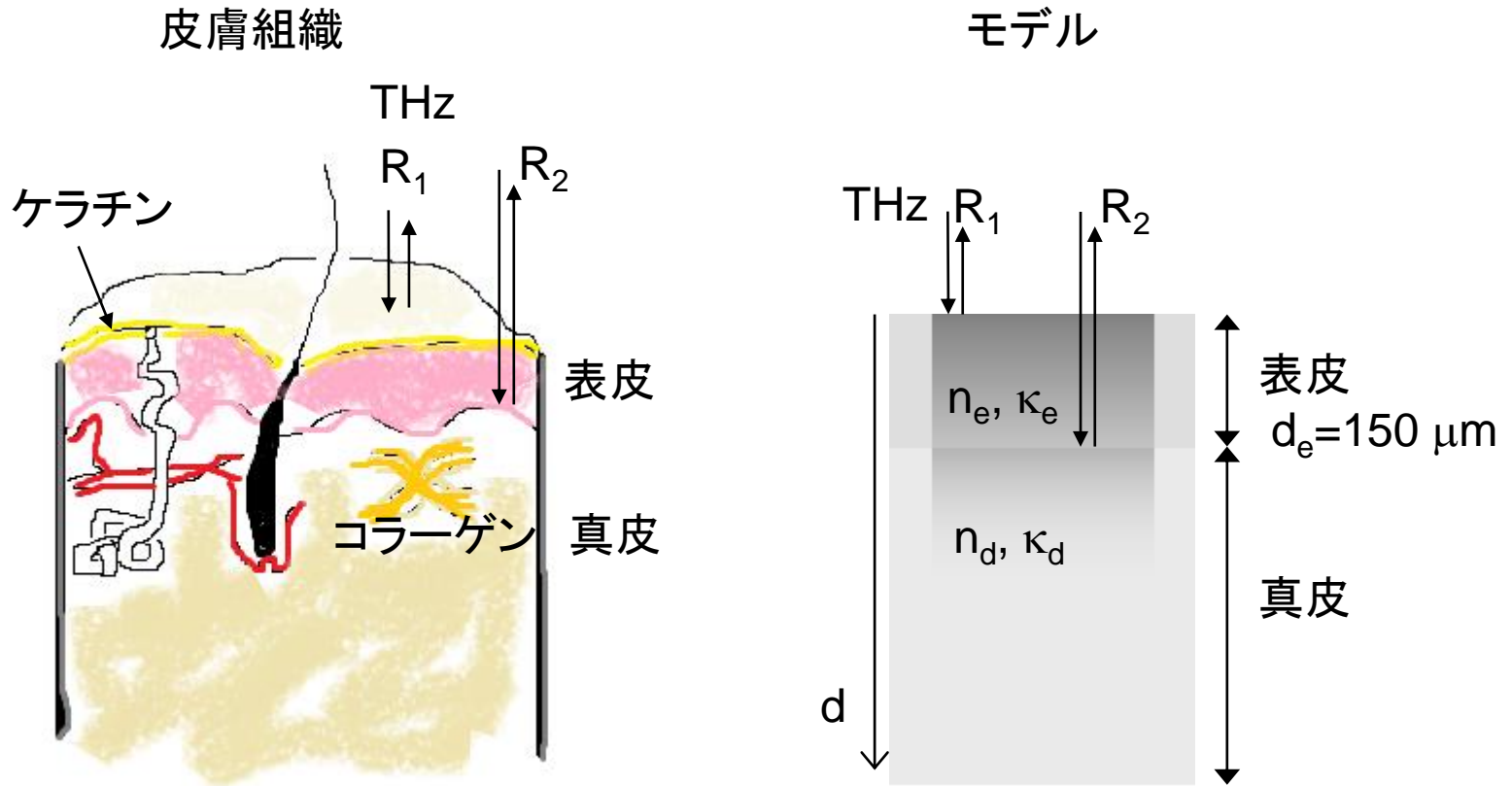


# 眼部組織の反射率測定例(ばく露による変化)



涙層や角膜の乾燥が反射率に影響することが示された

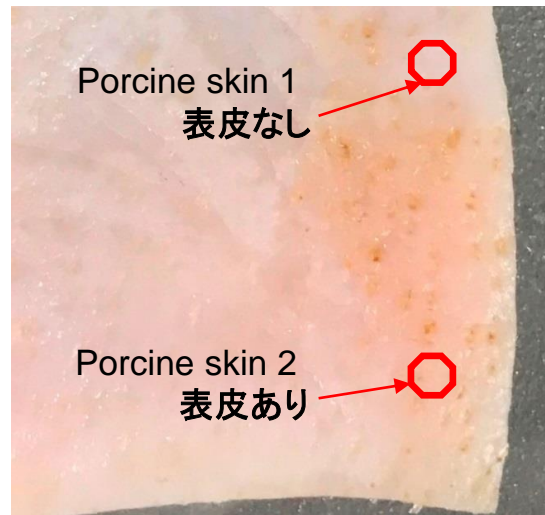
# 皮膚に関する予備的検討



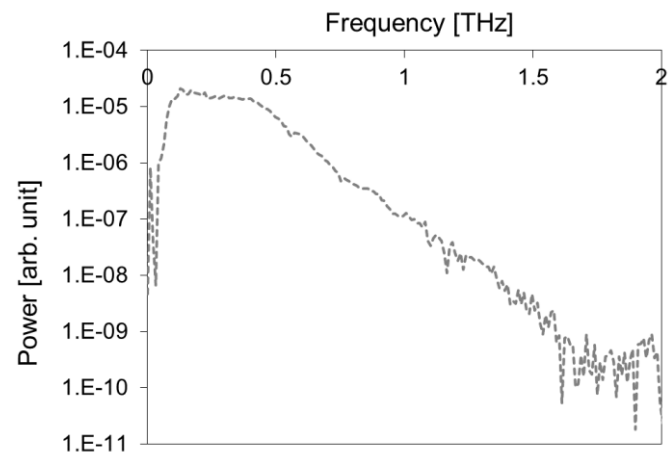
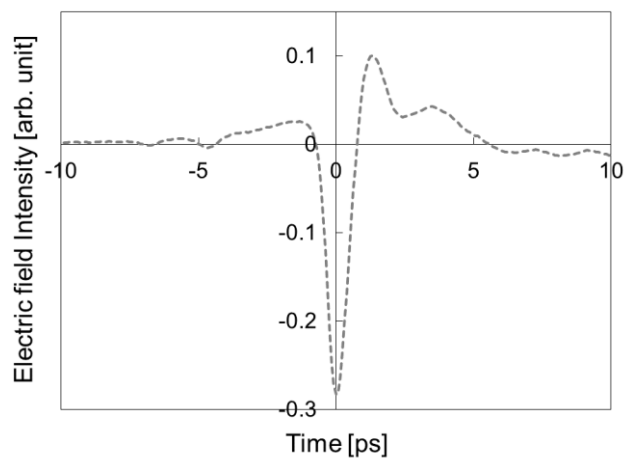
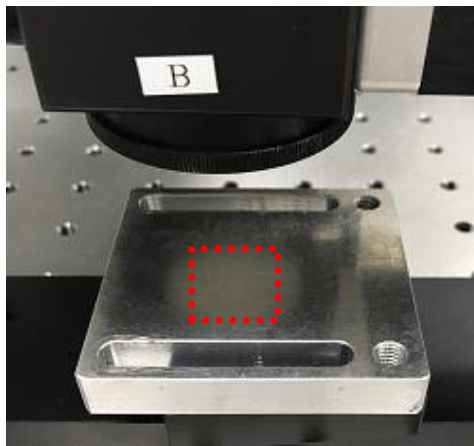
テラヘルツ波の反射率について  
実測値と計算値を比較することにより  
皮膚モデルの今後の課題を抽出

# テラヘルツ帯反射率測定用サンプル

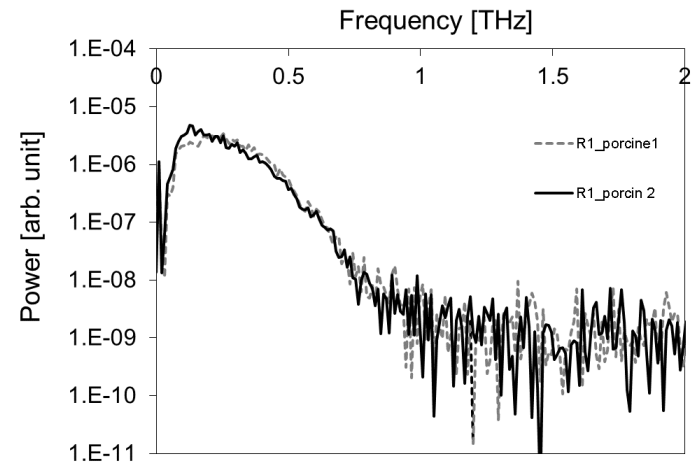
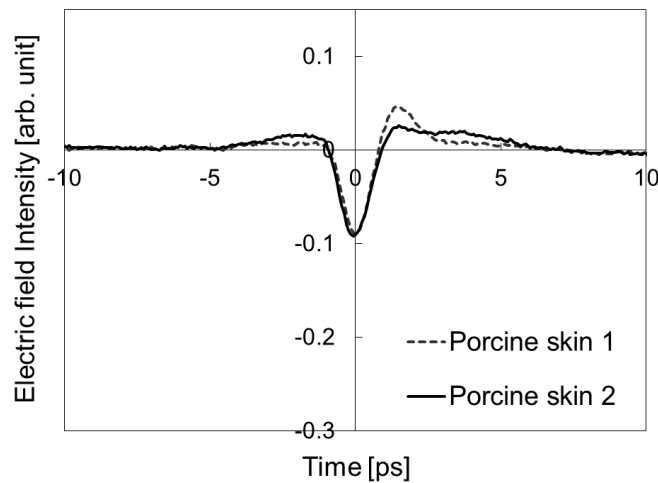
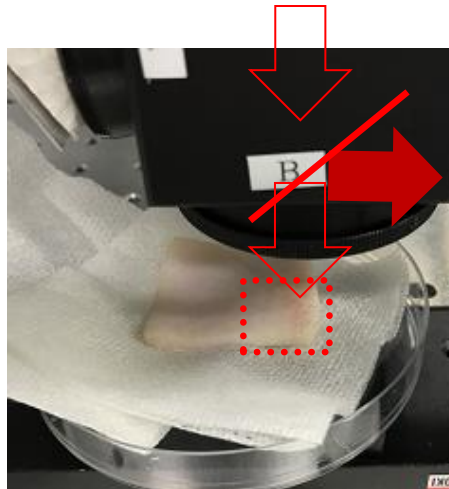
## 皮膚組織(ブタ)



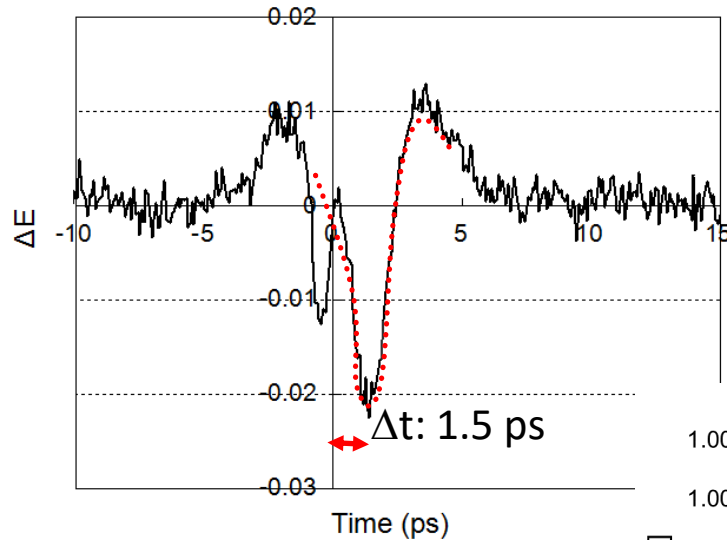
# テラヘルツ波の反射信号（金属板）



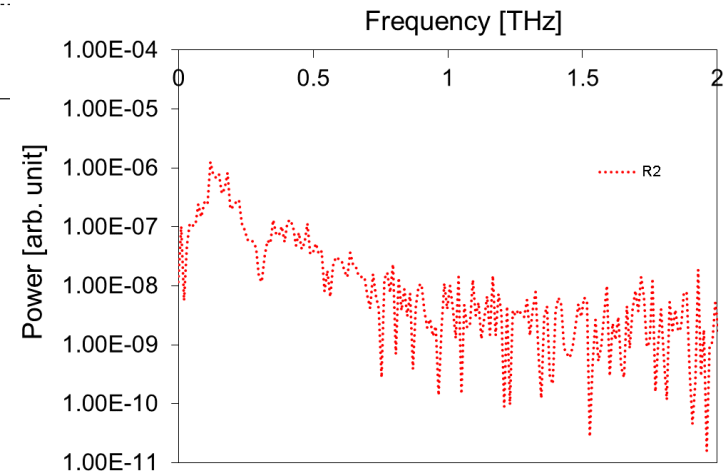
# テラヘルツ波の反射信号（皮膚サンプル）



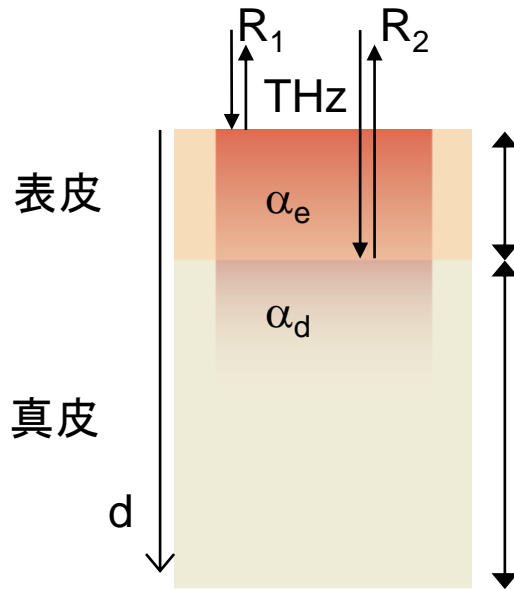
# 差分信号の例（皮膚2-皮膚1）



空気/表皮の界面以外から  
反射があることを確認



# 皮膚の反射率測定と計算の例 (0.2 THz)



$$d_e = c\Delta t / 2n_e$$

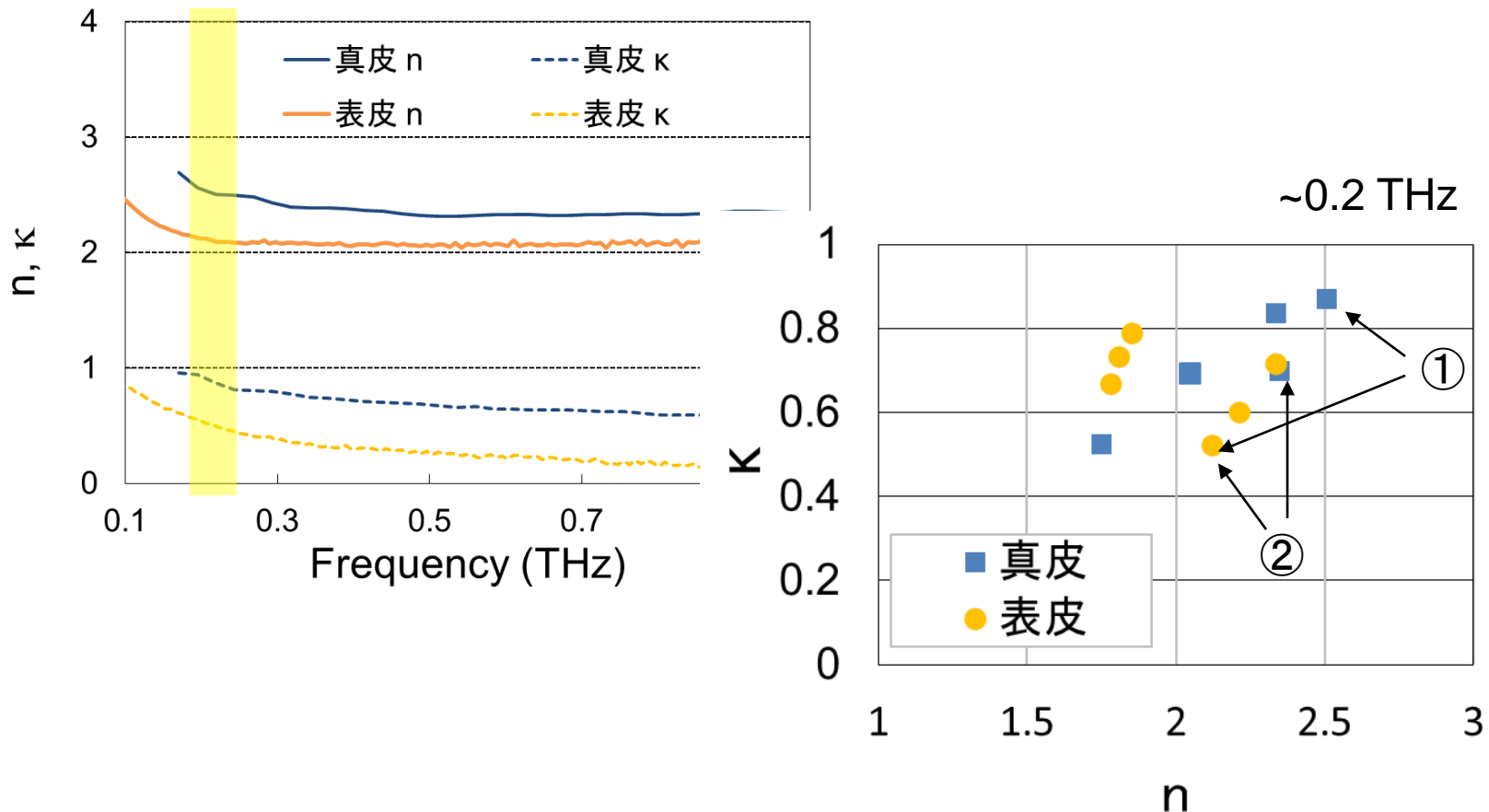
$$R_1 = |(1 - n_e + i\kappa_e) / (1 + n_e - i\kappa_e)|^2$$

$$R_2 = (1 - R_1)^2 \times \exp(-\alpha_e \times 2d_e) \times |(n_e - i\kappa_e - n_d + i\kappa_d) / (n_e - i\kappa_e + n_d - i\kappa_d)|^2$$

	$R_1(\%)$	$\alpha_e(\text{cm}^{-1})$	$R_2(\%)$	$d_e(\text{cm})$
Skin	16.5	-	0.63	0.01~0.02
Model	15.3	45.2	① 0.21 ② 0.07	0.015 (supposition)



# 計算用の皮膚の複素屈折率



- ・表皮と真皮サンプルについて、個体差があることを確認
- ・シミュレーションモデルに使用する複素屈折率の組み合わせが反射特性に影響することが示された

蓄積してきたテラヘルツ帯の材料評価技術と  
測定/解析ノウハウを活用することで  
Beyond5G/6Gに向けて必要となる材料情報を  
効率的に、高精度に取得可能に

### <本日の話>

- ①テラヘルツ帯材料評価技術の背景
- ②THz-TDS測定のコツ
- ③THz-TDSの応用



～ 出展企業紹介 ～

EX-1 株式会社精工技研 機器事業部 藤浪 圭

**[出展品] 28GHz 帯光電界センサ, 双方向伝送ユニット**

[コメント] 弊社既存光電界センサのメリットをそのままに28GHz帯を計測可能なモデルを開発いたしました。28GHz帯のアンテナ評価用途や測定用チャンバーの電界分布確認用途等、デモ機貸出可能ですので是非ご評価ください。(三重大学×産総研×精工技研共同開発品)

EX-2 7G aa 株式会社 技術顧問 黒川 悟 (産総研)

**[出展品] 産業用ロボットと光ファイバリンクを用いたアンテナ測定装置**

[コメント] 垂直多関節ロボット、双腕ロボットと光ファイバリンクを用いたアンテナ測定装置。40 GHzまで計測可能な光ファイバリンクと組み合わせた装置のため、ミリ波5G周波数帯用アンテナの他、各種デバイスの特性の測定が可能。アンテナ近傍界測定をコンパクトな空間での測定低コストで実現します。

EX-3 株式会社レスターコミュニケーションズ 第四営業部門 計測営業部 染野 薫

**[出展品] SIM4LIFE/SEMCAD, MAGpy, TDS, DAK-TL2, 他**

[コメント] レスターコミュニケーションズは、映像/音響、ICT、計測技術等を通じて、付加価値を創造し最適化されたソリューションをご提供いたします。今回は計測機器の製品から電磁界に関係する物をピックアップしてご紹介いたします。その他、弊社で取り扱う製品にご興味ございましたらご相談ください。

【計測取扱製品】環境計測：ガスモニタ等、光学測定：光膜厚測定等、  
EMC：電波暗室、電子機器計測等、その他非接触対応検温システム

EX-4 シンクランド株式会社 営業部 佐藤 潤

**[出展品] 電波可視化事業**

[コメント] シンクランドでは電界の振幅と位相の空間分布を可視化する計測技術を用いて受託計測を行っています。すでにミリ波帯対応のレドームや電波吸収体、塗装などの評価ラインナップを展開しています。レーダーやアンテナなどの計測、その他、設計や評価における困り事についてもぜひご相談ください!

# 28GHz帯光電界センサ

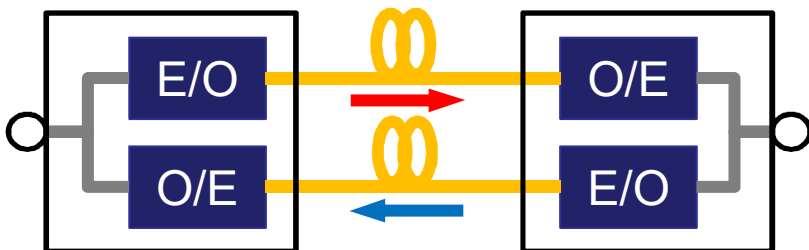
## 非金属製×パッシブ×光



項目	概略仕様
周波数範囲	27~29.5GHz
最小測定電界強度	0.03V/m以下@28GHz (RBW : 10Hz)
センサヘッドサイズ	84×122×17mm (コネクタ部除く)

### 【エンジニアリングサンプル】

## 小型×双方向 RF光伝送ユニット



項目	概略仕様
周波数範囲	50MHz~3GHz (目標 : 6GHz)
ダイナミックレンジ	目標 : 80dB
サイズ	99×55×40mm (コネクタ部除く)



# 7Gaa 産業用ロボットと光ファイバリンクを用いたアンテナ測定装置

7Gaa株式会社 (セブンジーツーエー)

連絡先：代表取締役 廣瀬雅信 [masa-hirose@7gaa.jp](mailto:masa-hirose@7gaa.jp)、mobile: 070-8409-2886, TEL & Fax: 029-819-2174

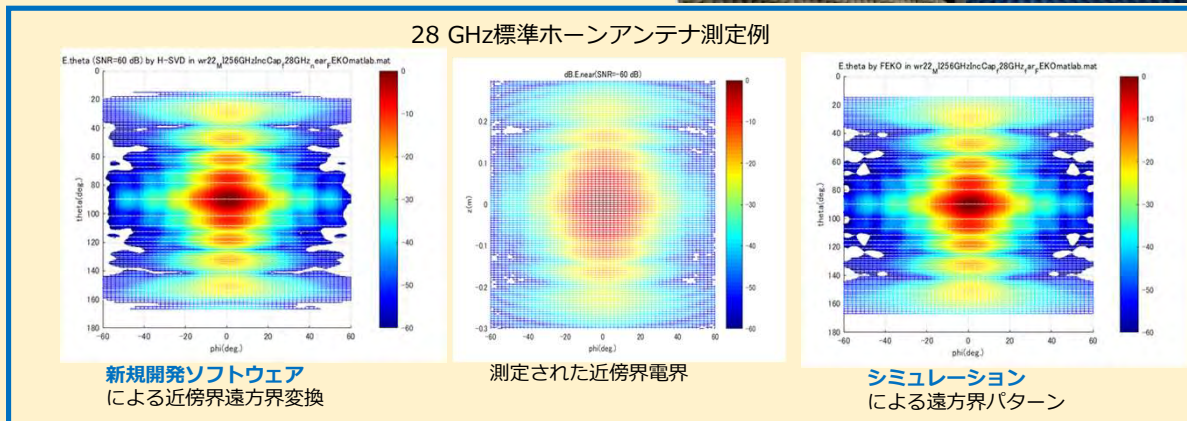
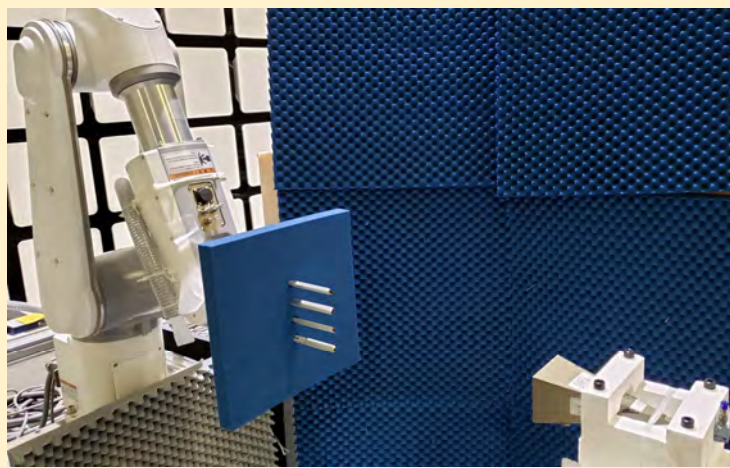
## アンテナ近傍界測定装置

アンテナ遠方界パターンを超高速に測定可能

40 GHz対応光ファイバリンクと組み合わせて、ミリ波5G用アンテナの測定を実現

### 機能

- 被測定アンテナの遠方界3D放射パターン測定  
平面走査、円筒走査、球面走査アンテナ近傍界遠方界変換測定ソフトウェア実装  
(IEEE 1720 2012 IEEE Recommended Practice for Near Field Antenna Measurements.)
- 数分でアンテナ遠方界パターン (カット面) 算出可能  
少ない近傍界カット面測定によるアンテナ遠方界推定アルゴリズム実装
- マルチプローブ実装アンテナ近傍界測定  
ロボット先端に複数のプローブアンテナを取り付けることで、マルチプローブによる高速測定が可能



## アンテナ測定に関するコンサルティング

アンテナ測定に関する総合的な相談に対応します。測定法、測定装置の導入等のコンサルティングを行います。

## 光ファイバリンク (IEC TR 63099-1:2017を実用化)

- 光反射型EA変調器 (E/O) : 40 GHzまでの測定に用いることが可能  
デバイスに電源不要、温度制御不要
- PD-TIA(アンプ内蔵のO/Eデバイス) : 30 GHz対応 (35 GHz程度まで利用可能)
- VCSELを用いたE/Oデバイス : 25 GHz (30 GHz程度まで利用可能、850 nm)

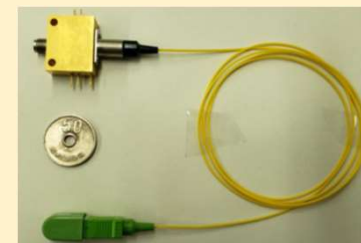


光反射型EA変調器

## VNA用光ファイバリンクポートエクステンダー

(IEC TR 63099-1:2017)

VNAのポートを光ファイバで延長して、距離が離れた場所でもフル2ポート校正実施後の測定が可能



VCSELとPDTIA (同一形状)

# 誘電体測定/人体暴露(SAR)/電磁界測定製品のご紹介

## MAGPy -SPEAG-

(Magnetic Amplitude and Gradient Probe System)

主にワイヤレス給電 (Wireless Power Transfer) をターゲットとした3kHzから10MHzの電界・磁界・勾配磁場 (Gradient) の測定が可能な信頼性が高いオールインワン端末です。各種規格 (IEC 63184 PAS for WPT 等) に準拠。ばく露測定においてTier3での測定により過大評価を防ぎ、より自由度の高い設計を実現します。



## DAK-TL2 -SPEAG-

(Dielectric Assessment Kit Product Line)

DAK-TL2 は、薄層用誘電体評価装置(DAK-TL)の最新バージョンです。薄い材料層 (厚さ範囲 100 μm ~ 10 mm) および少量の液体 (10 ~ 50 mL) の誘電特性を高精度で測定可能です。

<ラインナップ>

DAK12-TL2: 4 – 600 MHz

DAK-3.5-TL2: 200 MHz – 20 GHz

DAK-1.2E-TL2: 5 – 67 GHz



## Sim4Life/SEMCAD-ZMT/SPEAG-

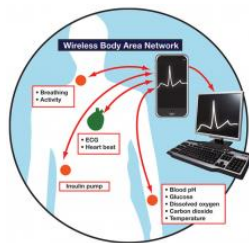
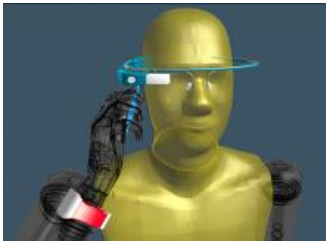
FDTD法/FEM法を利用可能な3次元電磁界シミュレーションソフトウェアです。

CAD作成からシミュレーション、結果出力まで、一貫したソフトウェア処理が可能です。

また、FDTD法の計算においては、GPUを使用した高速計算にも対応。FEMは、フルマルチコアに対応し、高速に計算処理を行う事が可能です。

同社製、人体モデル、動物モデルを適用することで、仮想現実空間での評価を行う事も可能です。

デモライセンス、学生向け無償Lightライセンスもご用意しております。



## ExpoM -Field at work-

(Magnetometer and Data Logger)

小型磁界測定器・データロガー

<ラインナップ>

ExpoM – ELF (3軸: DC – 100 kHz)

- ・低周波磁界の個人ばく露を追跡
- ・自宅および職場での長期モニタリング
- ・固定設備近くでの磁界測定と監視
- ・磁界強度の測定による安全コンプライアンスの確認

ExpoM - RF - J (87.5 MHz ~ 5.875 GHz)

- ・RF電界強度の測定による安全コンプライアンスの確認
- ・指定されたルート (屋内および屋外) に沿ったRF電界強度の追跡
- ・固定設備近くでのRF電界強度の測定と監視

ExpoM - RF 4 (50MHz ~ 6 GHz)

- ・RF電界強度の測定による安全コンプライアンスの確認
- ・指定されたルート (屋内および屋外) に沿ったRF電界強度の追跡
- ・固定設備近くでのRF電界強度の測定と監視



<お問い合わせ>

株式会社レスターコミュニケーションズ

第四営業部門 計測営業部 営業一課

〒140-0001 東京都品川区北品川5-9-11 大崎MTビル

TEL: 03-3445-2091 / FAX: 03-5424-6281 URL: <https://www.restarcc.com/>

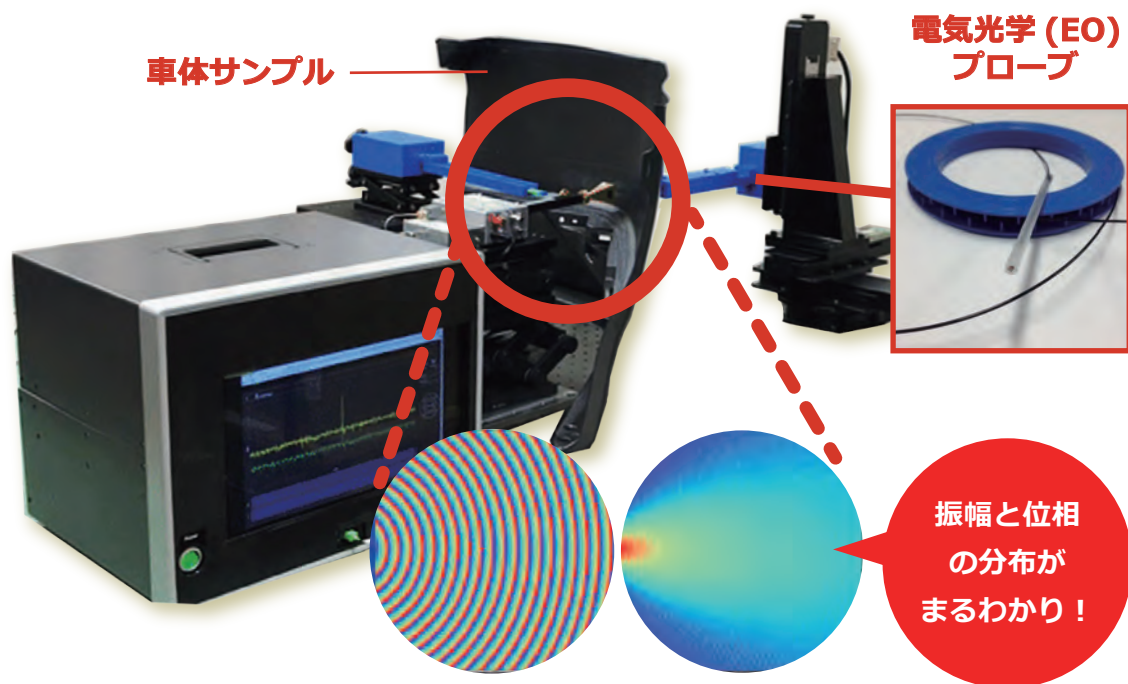
見えない電波を可視化します！

<https://think-lands.co.jp/>

# 電界センシング事業



シンクランドでは電界の振幅と位相の空間分布を可視化する計測技術を用いて受託計測を行っています。すでにミリ波帯対応のレドームや電波吸収体、塗装などの評価ラインナップを展開しています。レーダーやアンテナなどの計測、その他、設計や評価における困り事についてもぜひご相談ください！



※本技術は岐阜大学准教授久武信太郎先生との共同研究成果であり、実施許諾により実現しております。

## 技術の適用例

本受託計測事業の適応範囲は広範に渡りますが、例えば以下のようなお客様の依頼に応じていきます。

- ミリ波・テラヘルツ帯における新規素材や電磁波制御材及びレドームの、反射・吸収・透過・散乱などの電波特性への影響や効果性を検証するための測定評価。
- 車載ミリ波レーダ設置場所における周辺金属及び樹脂パーツによるマルチパスの評価や、マルチパス空間における電波吸収体の実際の効果を検証。
- 高周波用アンテナにおいて、集積化されたオンチップデバイスなど参照端子の取出しが困難なデバイスの計測。
- 電磁界解析シミュレーションの正しさ確認、及び解析精度向上のための突合せとして、解析モデルと同環境の電磁界計測。
- 車両に搭載され実際に運用される状況でのミリ波レーダの近傍界分布計測と放射パターン推定
  - ・ バンパーの配置や塗料、凹みや傷などが近傍界分布と放射パターンへ与える影響の計測
  - ・ 近傍界計測によるミリ波レーダのエイミング
- 波源に信号を入力できないデバイスの近傍界分布計測と放射パターン推定
  - ・ アンテナと回路が集積化されたオンチップアンテナデバイスの評価
  - ・ アンテナ端子を持たない 5G 基地局からの放射パターン計測 etc.

シンクランド株式会社

THINK LANDS

メール : [eigyou@think-lands.com](mailto:eigyou@think-lands.com) 電話 : 045-633-4082 (受付時間 : 平日 9:00 ~ 17:00)

〒230-0046 神奈川県横浜市鶴見区小野町 75-1 リーディングベンチャープラザ 1 号館 502 号室



## Call for Papers

4th International Workshop on Photonics applied  
to Electromagnetic Measurements in Sapporo

# PEM2021 in Sapporo

**Date:** November 29–30, 2021

**Venue:** Hokkaido University, Sapporo, Japan

**Style:** Hybrid of on site and web

**Paper Submission Deadline: August 6, 2021**

[https://www.ieice.org/~pem/link/5\\_pem2021/pem2021.html](https://www.ieice.org/~pem/link/5_pem2021/pem2021.html)

**Topics include** (but are not limited to):

1. Basic theory/techniques related to PEM
2. Systems for PEM
3. Applications of PEM  
Antenna measurements, EMC measurements,  
Remote sensing, Imaging, Spectroscopy, ... etc.
4. Competitive/complementary technologies to PEM

**Workshop Committee:**

**Workshop chair**

Teruo Onishi (NICT, Japan)

**Local steering committee chair**

Takashi Hikage (Hokkaido Univ., Japan)

**Finance committee chair**

Akihisa Tsuchiya (KISTEC, Japan)

**Technical program committee chair**

Ai-ichiro Sasaki (Kindai Univ., Japan)

**Secretaries**

Jun Katsuyama (Yokogawa Electric, Japan)

Yuto Shimizu (NICT, Japan)



## PEM 研 研究会過去の資料代

### ※ 研究会資料

- \* 冊子版は手持ちがなくなり次第終了

- \* 講演数 3 件以下の研究会 1 回につき 1,500 円、4 件以上 2,000 円

### ※ 技術報告書（第 4 期版）

- \* PDF 版 3,000 円

### ※ 第 4 期までの全ての資料

- \* 第 3 期、4 期 WS スライドに加え、1~4 期研究会+技術報告書+国際 WS 資料を USB にて提供

- \* USB メモリ（800MB 程度）にて提供：一般 15,000 円、学生 7,500 円

問い合わせ先

幹事団アドレス: pem-info@mail.ieice.org

資料保管状況	日にち	場所	開催形態	テーマ	通常講演	ショートプレゼン
○電子	第1期 第1回 2012年8月23日～24日	東北大	単独	光応用電磁界計測技術の現状と今後の展開	特別講演 「LINBO3一般講演 「光応用電磁界計測技術を用いた歴史と今後の課題」 桑原伸夫 (九州工大)	(1) 郡甲浩芳 (NTT) 「ユニバーサル電界センサに向けた取り組み」 (2) 日高富美 (神奈川産技センター) 「LPDA型光電界センサの構造と特性」 (3) 鳥羽良和 (精工技研) 「無バياسLN光変調器を用いた電界計測」 (4) 田島昌博 (NTT) 「通信EMC評価用Mach-Zehnder光変調器を用いた電界センサの開発」 (5) 深沢 徹 (三菱電機) 「光ファイバーを利用した小形アンテナの測定とその課題」
○電子	第2回 2013年11月11日	長崎大	EMCJ	光応用電磁界計測と環境電磁工学	特別講演 「光電界センサを利用したイメージングレーダ」佐藤源之 (東北大)	
○電子	第3回 2013年3月21日	岐阜大	総合大会	光応用電磁界計測技術の新展開	特別講演 「電界計測技術の動向と将来展望」(60分) 永妻忠夫、久武信太郎 (阪大)	
○電子	第4回 2013年6月25日	北大	電気学会	光電界センサの基礎と最新の技術動向	特別講演 「電界計測技術の動向と将来展望」(60分) 永妻忠夫、久武信太郎 (阪大)	
○電子	第5回 2013年8月7日	阪大	単独	光応用電磁界計測最新線 ー真夏の大阪で光応用電磁界計測を熱く語るー	特別講演 「電界計測技術の動向と将来展望」(60分) 永妻忠夫、久武信太郎 (阪大)	光応用電磁界計測ショートプレゼン Part-II (各10～15分) 「光変調技術による高精度EO/OE計測装置技術の研究開発」 菅野政夫 (NICT) 「60GHz帯向けアレイアンテナ電機光変調器の試作 (仮題)」 高武直弘、村田博司、岡村康行 (阪大) 「メタマテリアルを用いたTHz帯光電界センサの検討」
○電子	第6回 2013年10月3～4日	金沢大	AP	光応用電磁界計測とアンテナ技術	特別講演 「電界計測技術の動向と将来展望」(60分) 永妻忠夫、久武信太郎 (阪大)	
×	第7回 2013年12月20日	石垣島	AP AMT	「非道路上障害物検知用光ファイバー検知器」河村鏡子・岡田国雄・森岡和行・ニッ森俊一・米本成人 (電子航法研)	特別講演 「電界計測技術の動向と将来展望」(60分) 永妻忠夫、久武信太郎 (阪大)	
×	第8回 2014年3月19日	新潟大	総合大会(MWPP)	「微小なギャップを用いた電界計測装置」村田博司・Yusuf Nur Wijayanto・岡村康行 (阪大)	特別講演 「電界計測技術の動向と将来展望」(60分) 永妻忠夫、久武信太郎 (阪大)	



○ICE管理		第7回 2018年3月21日	東京電機大	総大	テラヘルツ技術とそのシステム応用に関する動向と進展				
	第4期 第1回	2018年5月24日	首都大	単独	光応用電磁界計測におけるシミュレーションの活用と応用展開 ・ 一般	招待講演「表面プラズマ一般講演「ミリ波・一般講演「非同期電気一般講演「環境測定を			
○電子+冊子28						モニター利用 THz波ばく露環境下に一般講演「非同期電気一般講演「環境測定を			
	第2回	2018年7月26日	機械振興会館	MCJ/EMD/電気学	光を用いた電界・磁界センシング技術とその雑音計測への応用	一般講演「アルカリ金属を用いた光学式磁界センサ/光電圧プローブによるESD評価」	一般講演「光電圧センサ/光電圧プローブによるESD評価」	招待講演「光プローブを用いた光学式磁界センサ/光電圧プローブによるESD評価」	高周波磁界計測における定調方式に関する検討
○電子+冊子33						分布の投影	大沢隆二(精工技研社)		
	第3回	2018年11月19日	機械振興会館	WPT	RoF 技術の EMC、アンテナ計測への応用 ・ 一般	一般講演「環境磁界測定を目的とした光学素子一体型一軸磁気光学プローブの試作」	一般講演「短絡モノポールアンテナを用いた標準電界法による光電圧プローブ校正の検討」	依頼講演「樹脂筐体光プローブヘッドの開発と小型アンテナ測定」	招待講演「光給電RoFシステムを用いた低周波ノイズ測定」
△冊子18のみ						加藤 佳仁(鉄道総研)・和氣 加奈子	チャカロタイジェド	嶋原 亮・四方 勝(アルプス電気)	土屋 明久・菅間 秀晃(KISTEC)・柳澤 幸樹(多摩川電子)
○電子+冊子12						特別講演「宮崎県の工業振興について」	招待講演「周波数シフトテラヘルツ波の発生と非破壊検査への応用」	依頼講演「光応用計測に向けた実用可能な有機非線形光学結晶の技術開発」	一般講演「時間領域イメージングによる第5世代携帯用光ファイバ通信回線構築」
	第4回	2019年2月28日～3月1日	富崎	電気学会	テラヘルツ波等光応用計測技術とその応用 ・ 一般	水澤 光司・栗原 貴大(千葉工業大学)・坂	内田 裕久(アーケレイ株式会社)	内田 裕久(アーケレイ株式会社)	一般講演「時間領域イメージングによる第5世代携帯用光ファイバ通信回線構築」
○電子						村田 博司(三重大学)	陳 強(東北大学)	佐々木 愛一郎(近畿大学)	一般講演「VCSSELを用いた第5世代携帯用光ファイバ通信回線構築」
	第5回	2019年6月21日	NICT	単独	光電磁界計測に関するチュートリアルワークショップ	光電磁界計測に求められるフォトニクス基礎	光電磁界計測におけるアンテナの基礎と設計法	光電磁界計測システムの構築に必要なノウハウ	一般講演「VCSSELを用いた第5世代携帯用光ファイバ通信回線構築」
○電子+冊子19						招待講演「広帯域電界センサを用いた球電界センサによる過渡電界の測定」	依頼講演「光変調散乱技術を用いた高周波電界センサの開発とEMC試験への応用」	一般講演「シース付ダミーポールアンテナによる波中光電圧プローブの検証」	招待講演「近傍界計測を用いたテラヘルツ帯におけるアンテナ特性評価」
	2019年11月18日～19日	伊勢	単独	3rd PEM International Workshop in Ise (PEM2019)		茂樹(東北学院大)、	星澤 孝裕(秋田県産学センター)、	野村 隆士(NICT)、	招待講演「近傍界計測を用いたテラヘルツ帯におけるアンテナ特性評価」
△冊子22のみ						Atsushi Kanno	久武信太郎(岐阜大)	久武信太郎(岐阜大)	招待講演「近傍界計測を用いたテラヘルツ帯におけるアンテナ特性評価」
	第7回	2020年1月30日～31日	同志社大	VP/PN/EMT/電気学	3rd PEM International Workshop in Ise(PEM2019)受賞記念講演 ・ 一般	招待講演「Short-Focus Lens Design for Terahertz Ray」	一般講演「磁気光学プローブの三軸化に関する検討」	久武信太郎(岐阜大)	招待講演「近傍界計測を用いたテラヘルツ帯におけるアンテナ特性評価」
○電子						Keita Miyazawa (Waseda Univ.)	加藤佳仁(鉄道総研)・鈴木敬久(首都大)	久武信太郎(岐阜大)	招待講演「近傍界計測を用いたテラヘルツ帯におけるアンテナ特性評価」
○電子						Atsushi Kanno	久武信太郎(岐阜大)	久武信太郎(岐阜大)	招待講演「近傍界計測を用いたテラヘルツ帯におけるアンテナ特性評価」
○電子						5G無線・ミリ波レーダーのための光応用電磁界計測技術	ノイズ計測への光電磁界計測技術の利用	ミリ波・テラヘルツ帯の可視化技術の産業応用	有線融合ネットワークの将来と光ファイバ伝送の役割
	第5期 第1回	2020年3月17日	広島大	総大 (OFT)	BI-7. 次世代産業に向けた光ファイバ応用計測技術の進展	村田 博司(三重大)	加藤佳仁(鉄道総研)・鈴木敬久(首都大)	久武信太郎(岐阜大)	招待講演「近傍界計測を用いたテラヘルツ帯におけるアンテナ特性評価」
	第2回	2020年7月20日	リモート	単独		アルカリ金属を用いた光学式磁界センサによる交流磁界分布測定	85kHz帯におけるシース付きダイポールアンテナによる液状中光電圧プローブ校正法の検証	人体通信系の信号経路識別における光電圧センサと機械学習の有効性について	マイクロ波導波モードの時間・空間制御を利用したFRPM管の非破壊検査法
	第3回	2020年10月22日	リモート	//EST/EMCI/電気学会		オ田中 拓充・田上 周路斗・チャカロタイジェ(高知工科大)・豊田 啓孝(岡山山)	ドヴィスノブ・和氣 加奈子(NICT)・有馬 卓司・宇野 亨(東京農工大)	久武信太郎(岐阜大)	招待講演「近傍界計測を用いたテラヘルツ帯におけるアンテナ特性評価」
○電子						磁界を利用した媒位位置推定における機械学習の有効性について	ジョーンズベクトルを用いたEOセンサシステムの偏波雑音解析	RF-WPT周波数帯における構込み型心臓ペースメーカーEMI推定を目的とした干渉起電圧測定	マルチタスク光ファイバ接続型ミリ波レーダの構築
	第3回	2021年1月21日	リモート	電気学会		○佐々木 愛一郎、太田 琢也(近畿大)	○富永麻衣、岡崎めい、品川 満(法政大)、藤山 純、松本 憲典(横河電機)	○大塚 敦生、日景 隆(北海道大)	○ニッポン電子(電子航法研)