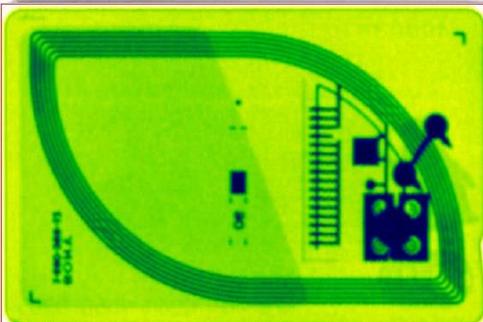
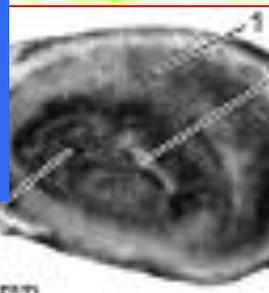
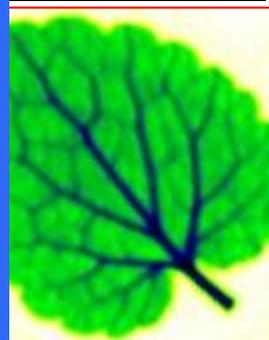
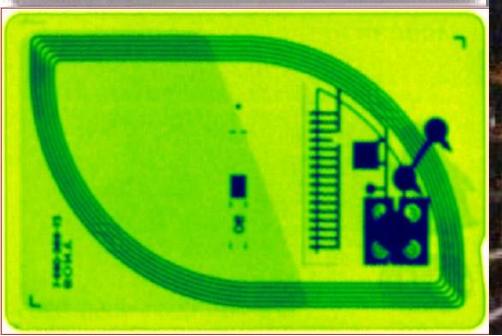
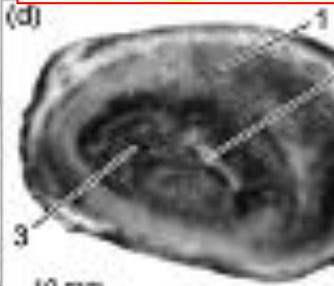
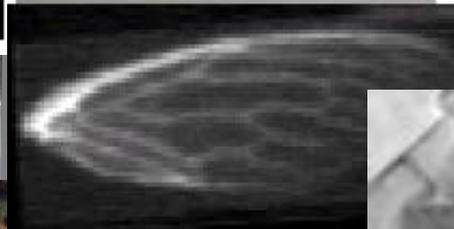
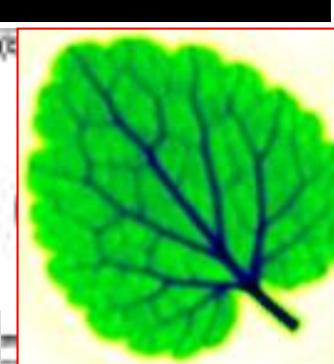
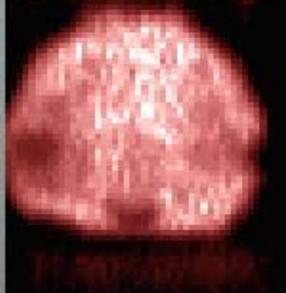
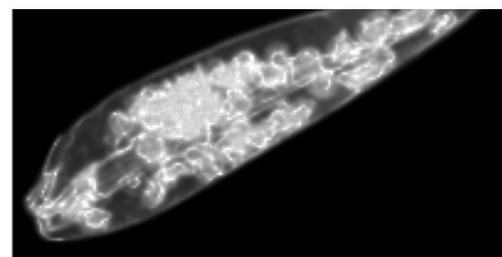
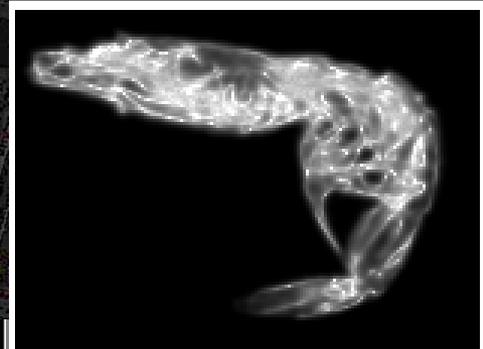
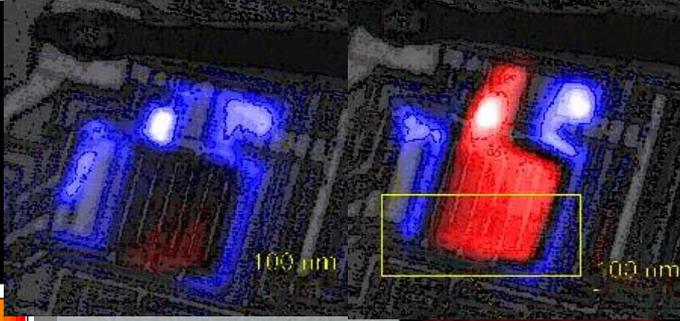
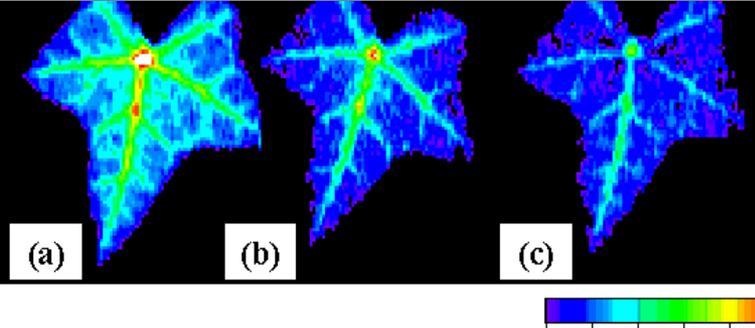


テラヘルツ光源の開発と  
非破壊検査応用

川瀬晃道

工学研究科 電子工学専攻





# THz-wave

電波の透過性を有する最短波長域

透過性  
取り回し易さ  
空間分解能  
被曝なし

光波の扱い易さを有する最長波長域



- 半導体・プラスチック・セラミックス・紙・ビニル・木材・繊維  
・乾燥食品・氷・粉体・試薬・錠剤・歯・骨・脂肪などを透過
- 多くの試薬類にテラヘルツ帯指紋スペクトル

欠陥製品  
検査

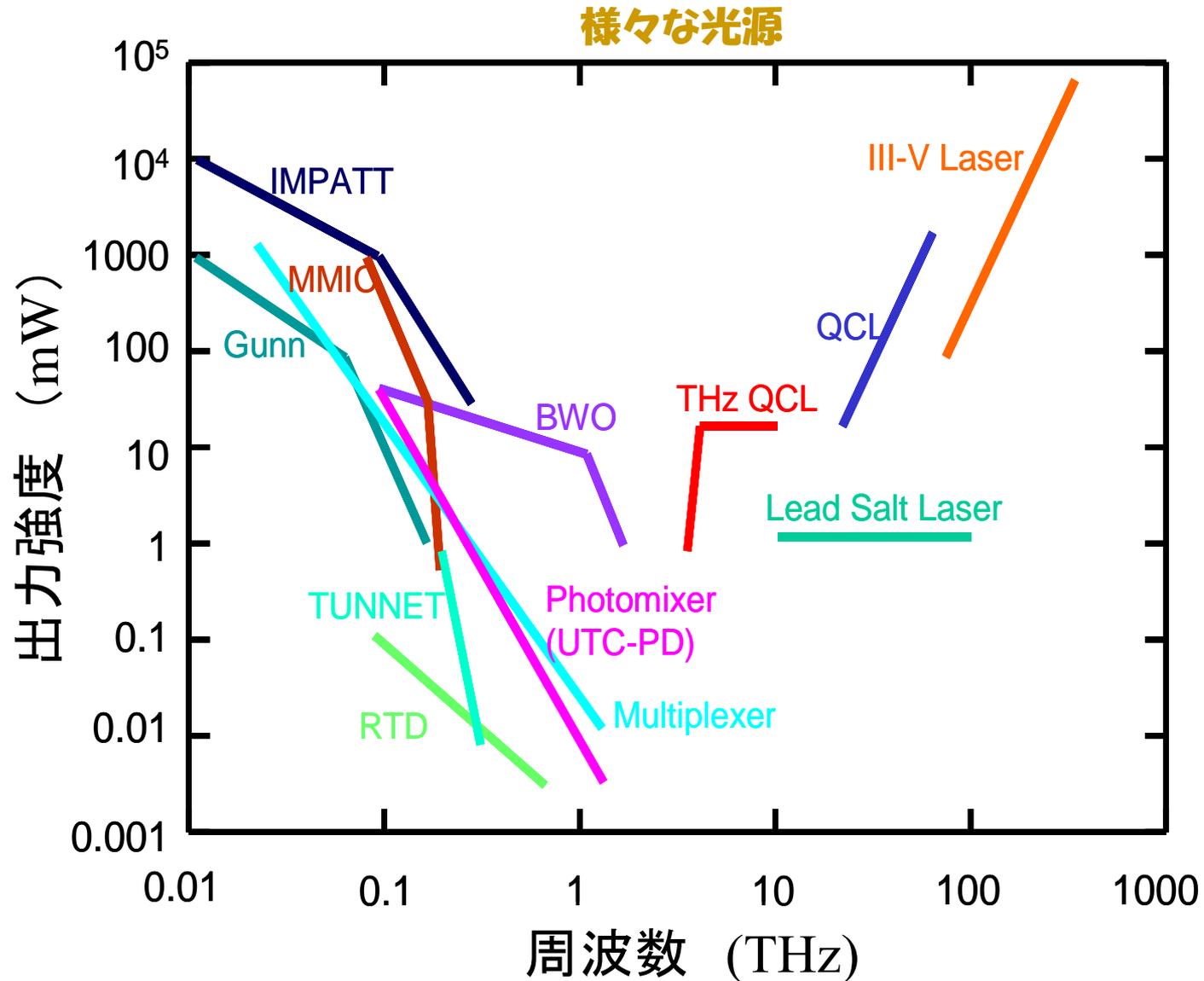
麻薬・爆薬  
摘発

医薬品  
検査

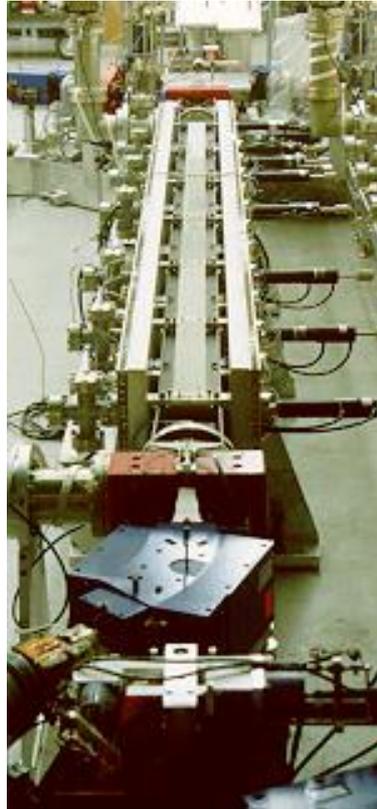
フィルター  
検査

・物質を透過するのは3THz以下 ・周波数1THzは波長300 $\mu$ m ・テラヘルツ波は水と金属を透過しない

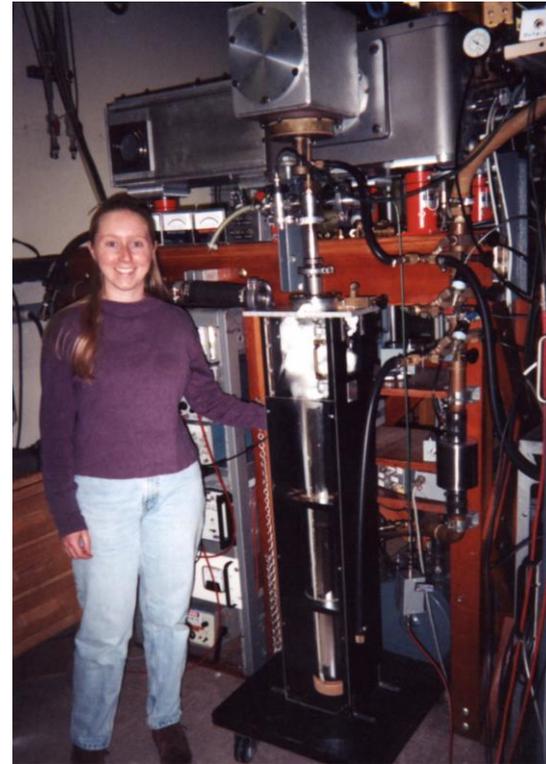
# テラヘルツで最も有用と期待される1-3THz に実用的光源が乏しい ⇒ THz Gap



# 1-3THz域をカバーする 既存の広帯域波長可変THz波光源

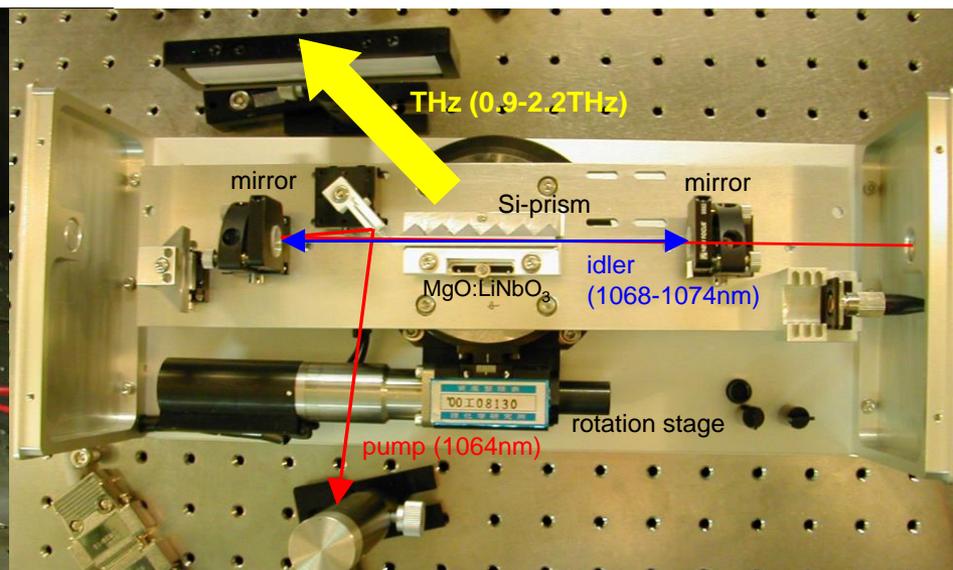
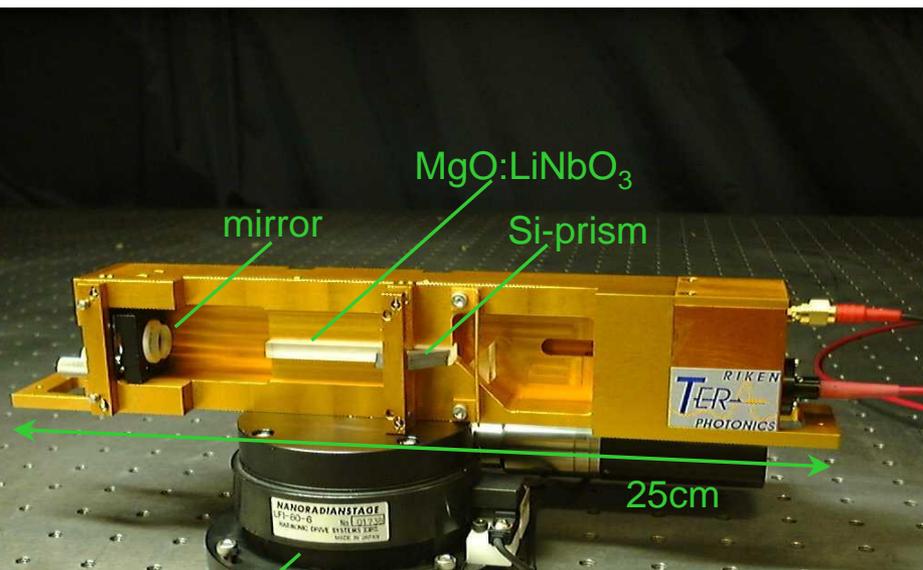


自由電子レーザー  
波長可変域: 70~330 $\mu\text{m}$   
ピーク出力: 約 1kW  
パルス幅: 約10 $\mu\text{s}$   
繰返し: 7Hz

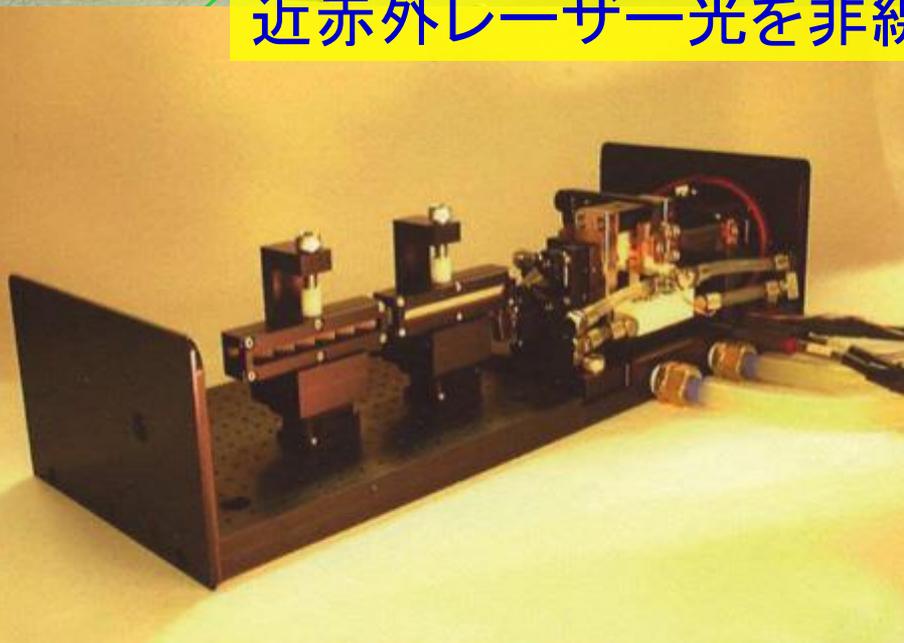


p型Geレーザー  
波長可変域: 80~300  $\mu\text{m}$   
ピーク出力: 約1 W  
パルス幅: 約10  $\mu\text{s}$   
繰返し: 7 Hz

# 開発した卓上型テラヘルツ波パラメトリック光源



近赤外レーザー光を非線形光学結晶で波長変換



# 光注入型テラヘルツ波パラメトリック発振器 is-TPG

550(L) × 350(W) × 150(H) mm<sup>3</sup>

THz wave

MgO:LiNbO<sub>3</sub>

mirror

telescope

grating

half-wave plate

Tunable seeder

YAG laser

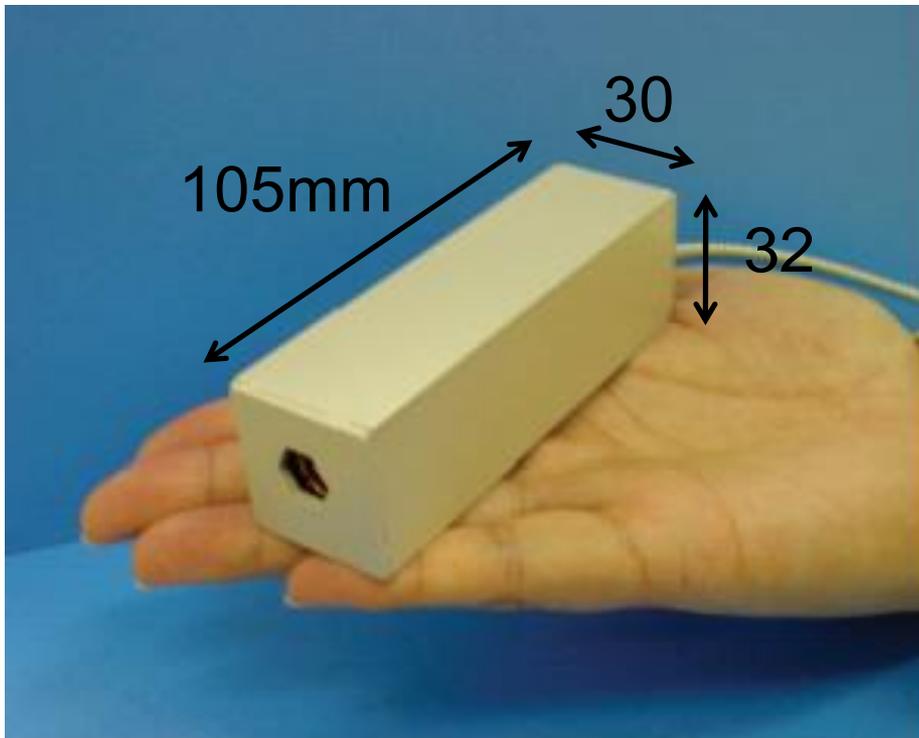
LASER RADIATION  
AVOID EXPOSURE

**DANGER**  
CLASS II & III LASERS  
LASER RADIATION  
AVOID EYE & SKIN EXPOSURE TO  
RADIATION  
WAVELENGTH: 1064nm/1080nm  
MAXIMUM OUTPUT POWER:  
CLASS II LASER PRODUCT

近年、自由電子レーザーを大きく上回る出力100kWを達成

# LD励起受動QスイッチNd:YAGマイクロチップレーザー

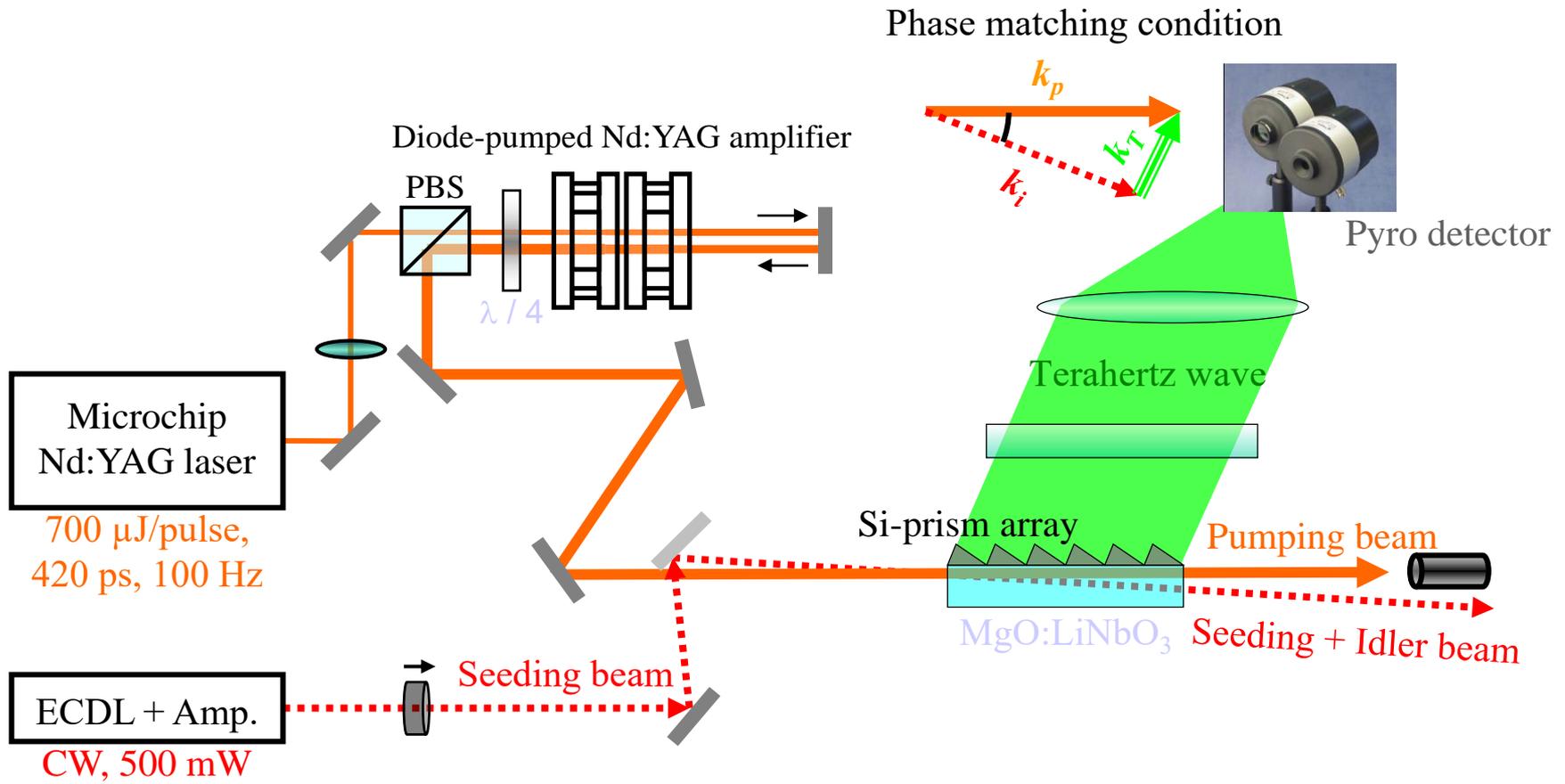
既存の単一縦モードNd:YAGレーザー (typ.1.5m長) に比べはるかに小型



スペクトル幅 :  $< 0.009 \text{ nm}$   
出力 :  $960 \text{ } \mu\text{J/pulse}$   
最大尖頭値 :  $1.7 \text{ MW}$   
パルス幅 :  $480 \text{ ps}$   
横モード特性 :  $M^2 < 1.05$   
繰返し :  $100 \text{ Hz}$

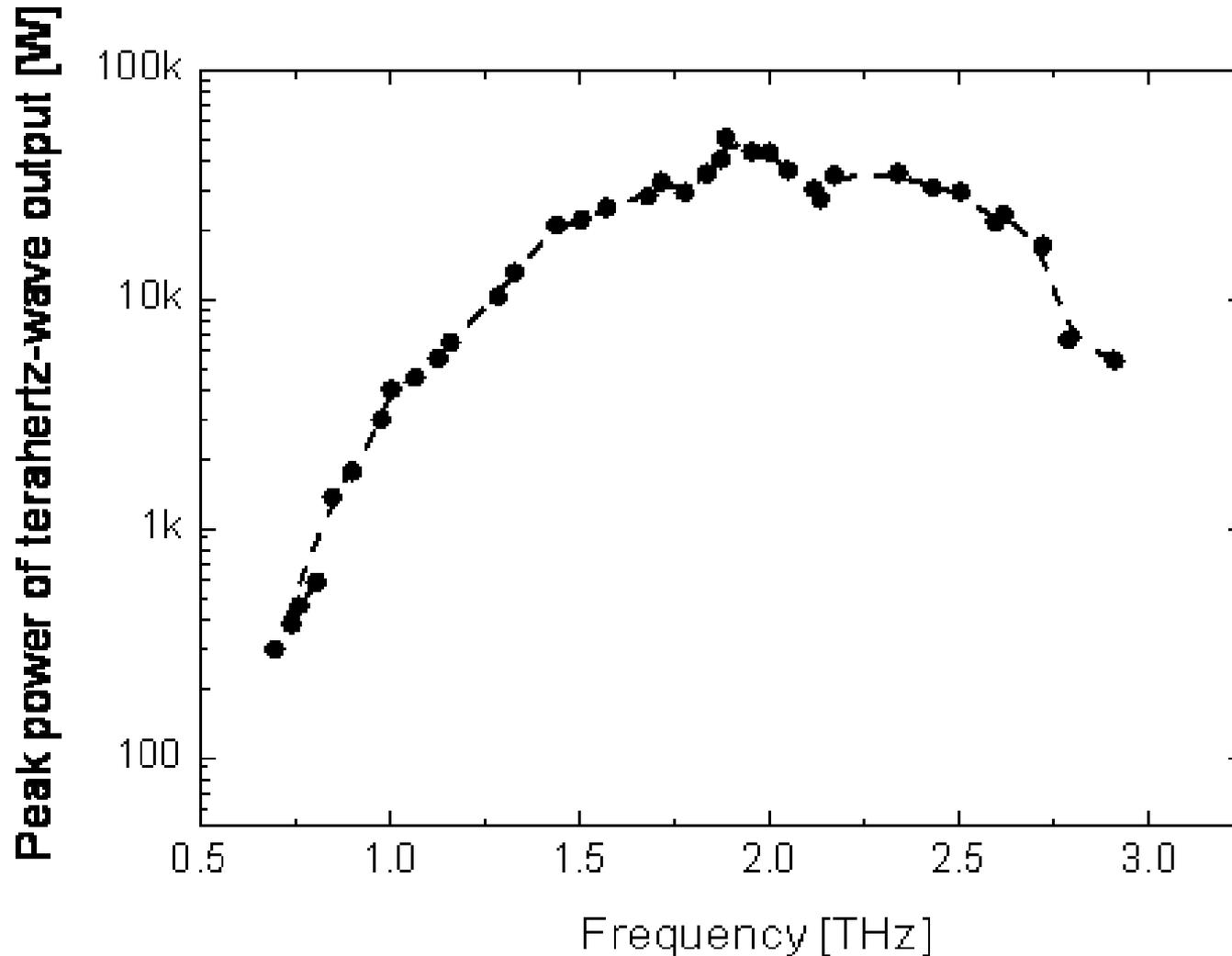
Nd:YAGマイクロチップレーザー  
(分子研平等研、浜松ホトニクス)

# 増幅器付き $\mu$ -YAG励起 is-TPGによる高出力THz発生



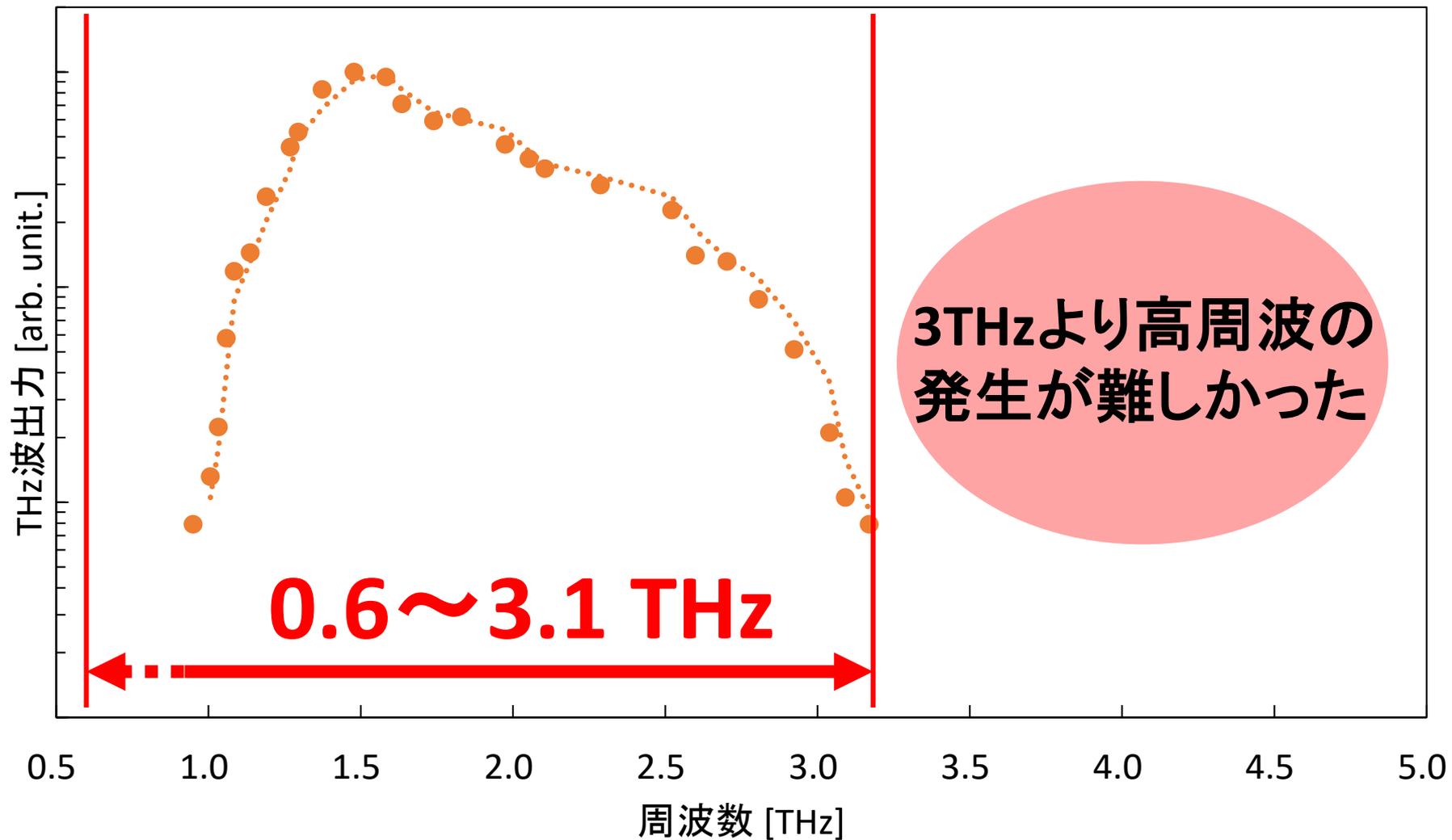
# is-TPGによる50kW発生

S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, K. Kawase, H. Minamide, Scientific Reports 4, 5045 (2014).



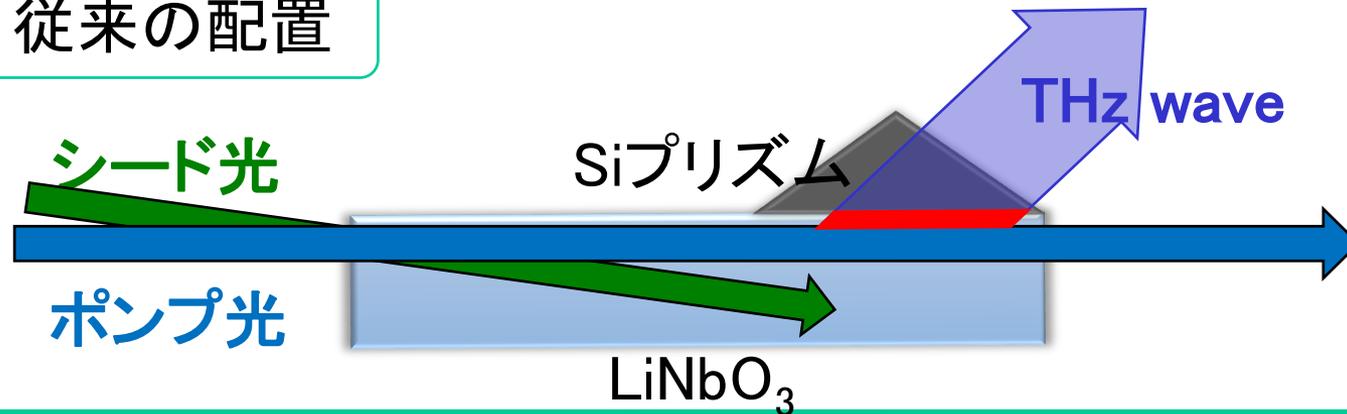
この帯域の波長可変FELの出力は 約1kW@peak  
厚手の対象物のイメージング・分光、テラヘルツ非線形分光、など

# 従来のis-TPGスペクトル

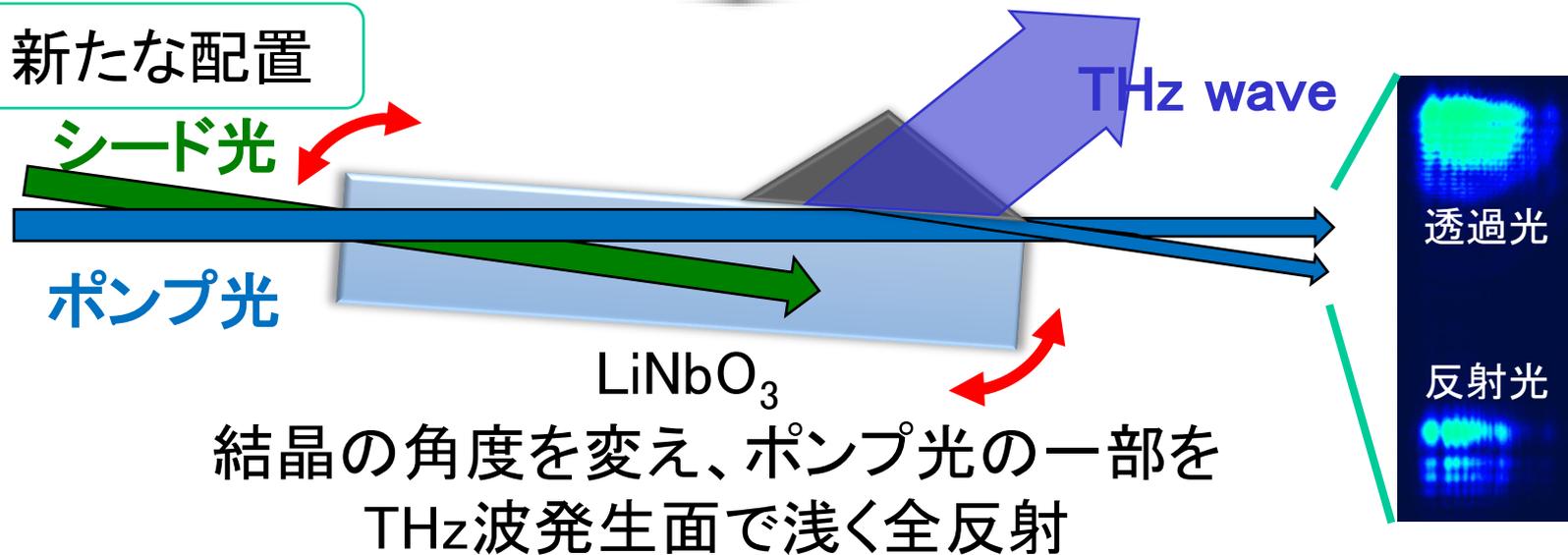


# is-TPGの波長可変域の拡大

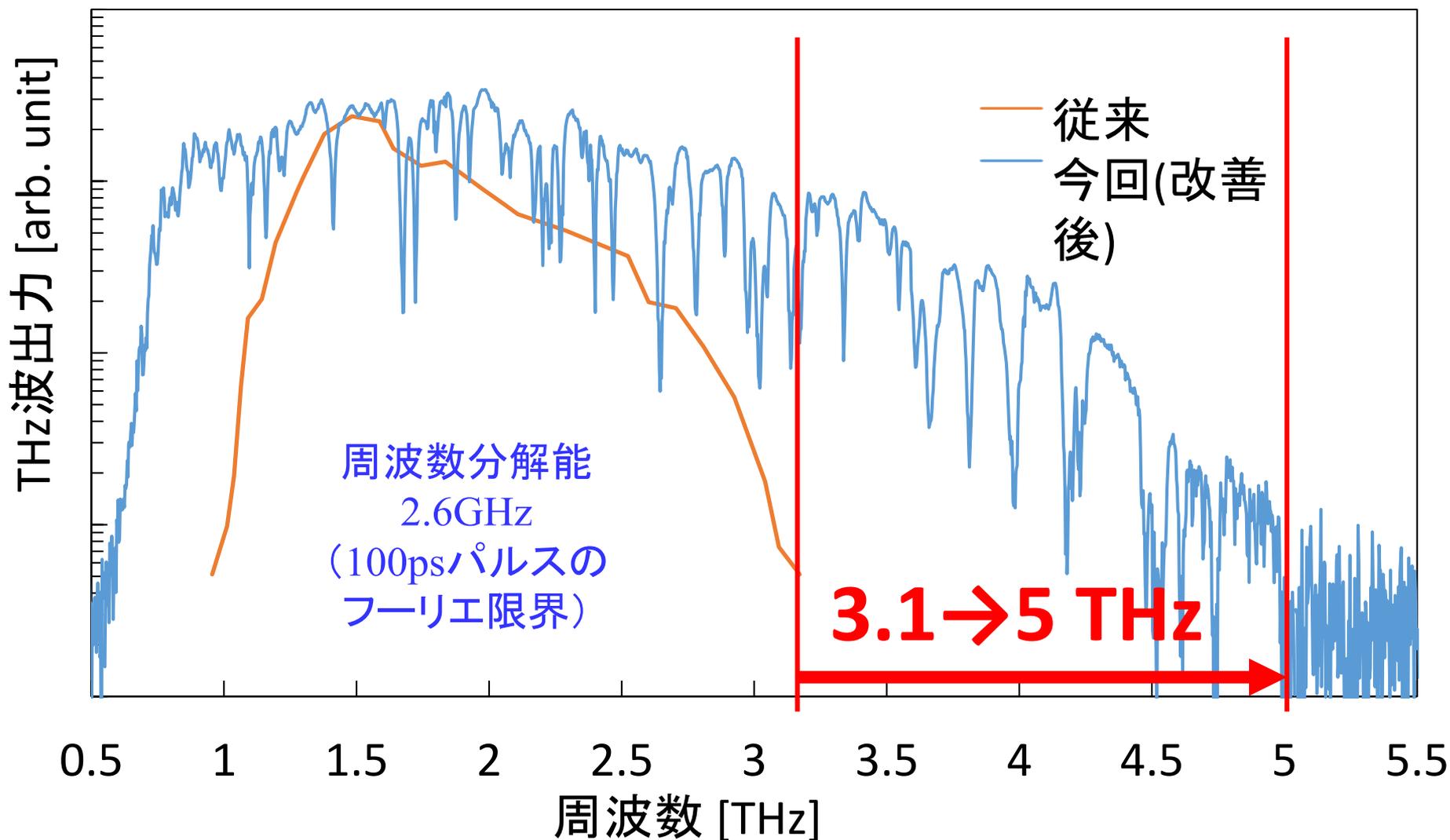
従来の配置



新たな配置

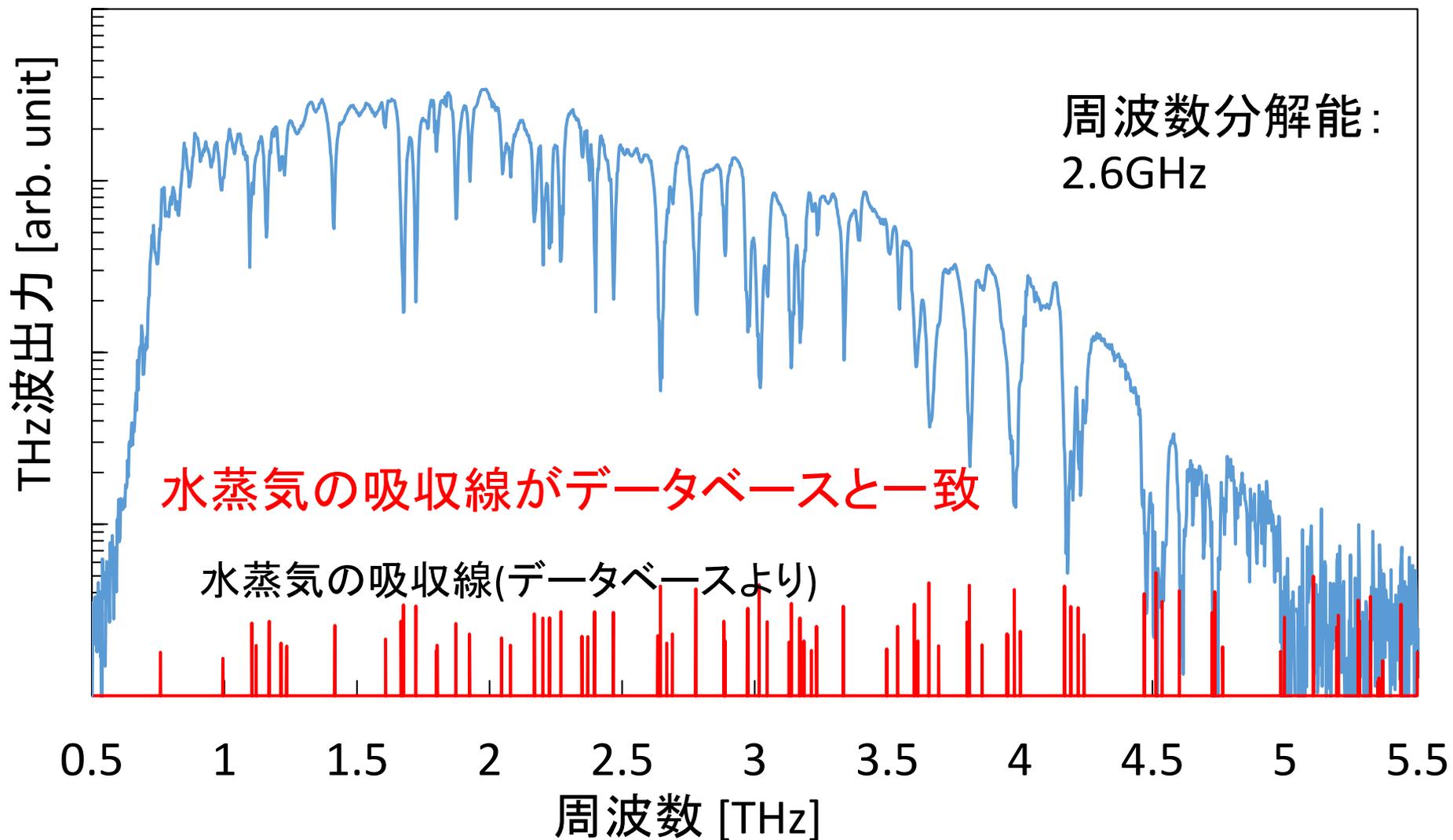


# Is-TPGの波長可変域の拡大

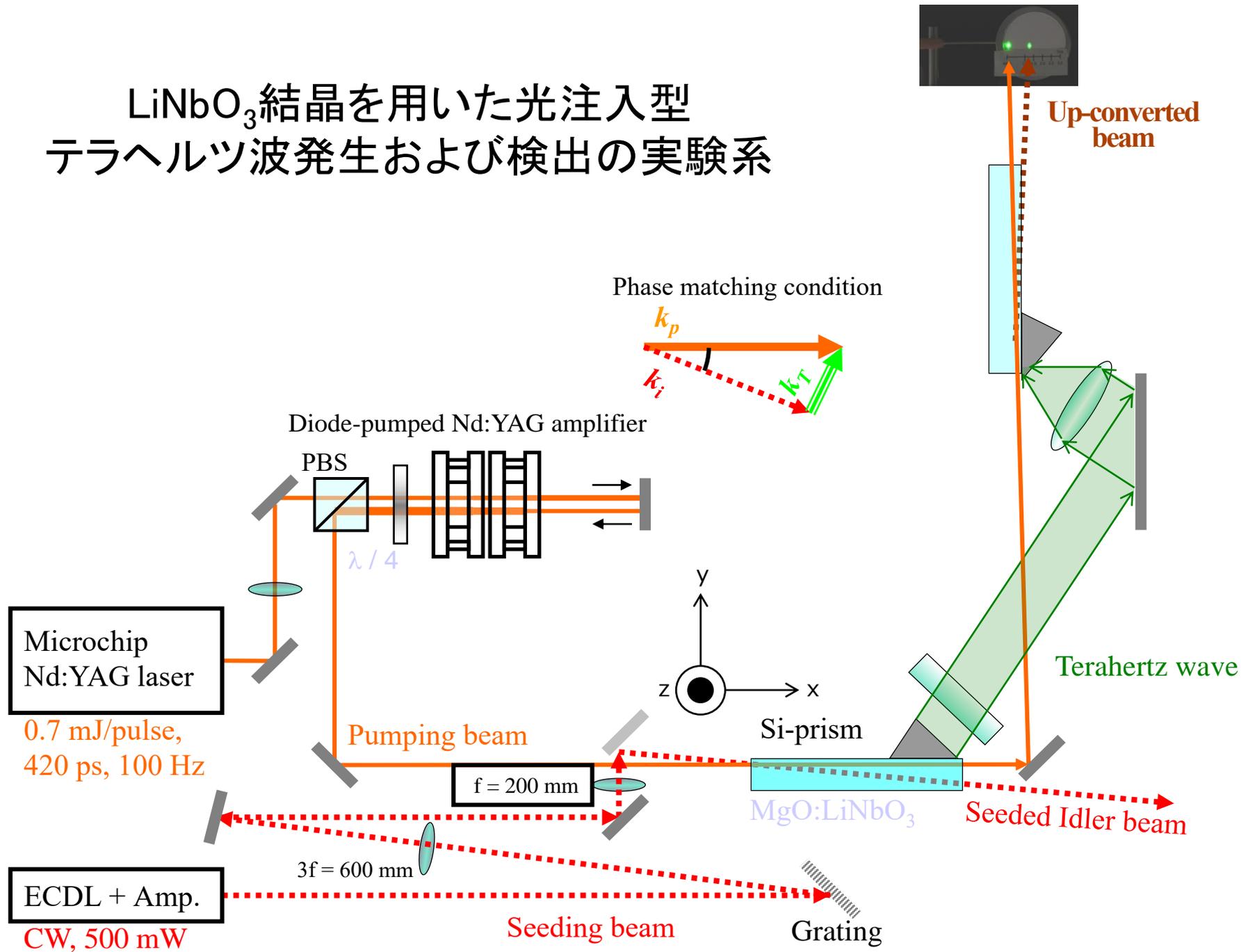


水蒸気吸収線で5THzまでの可変性を確認

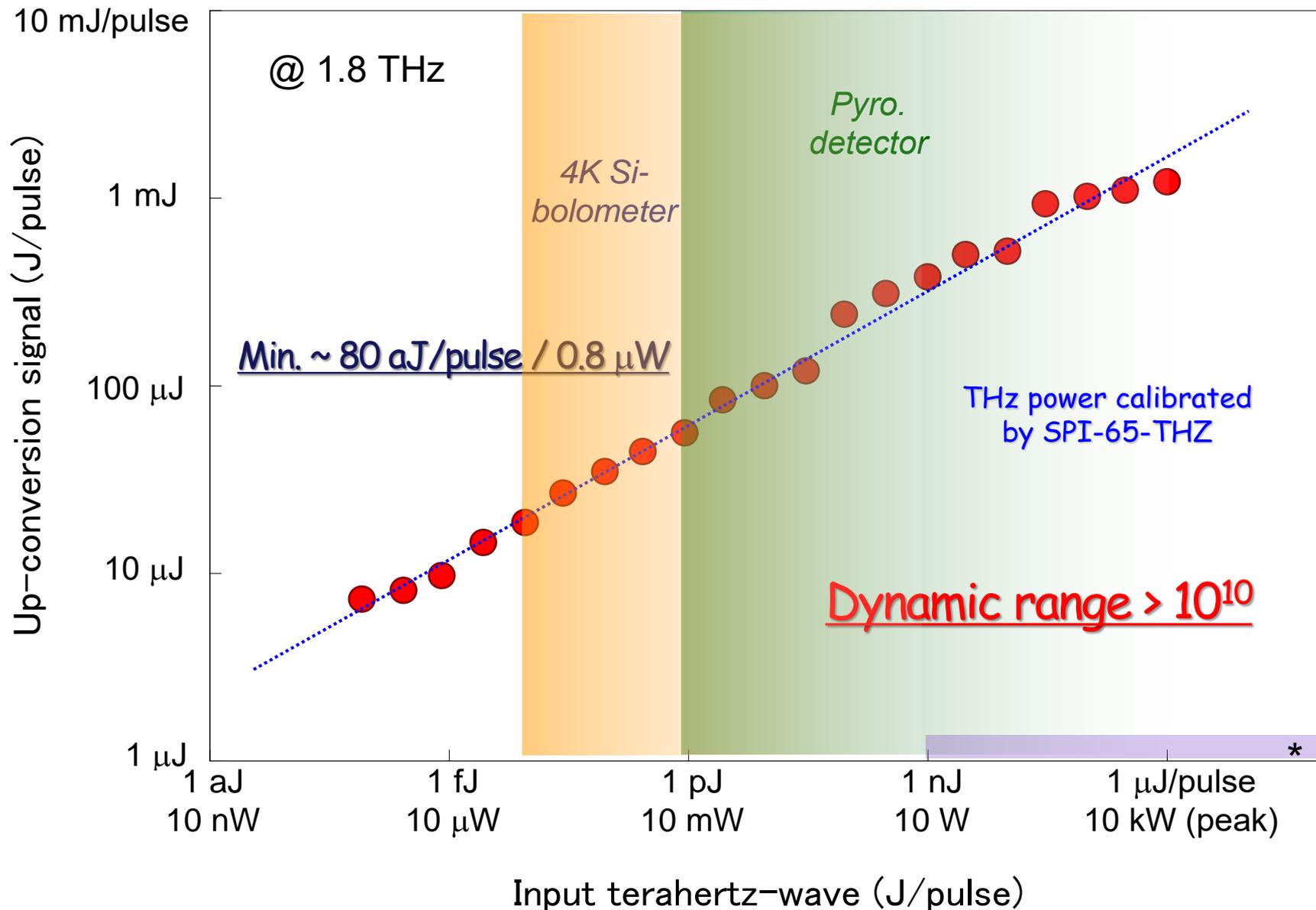
# 水蒸気の吸収線を確認



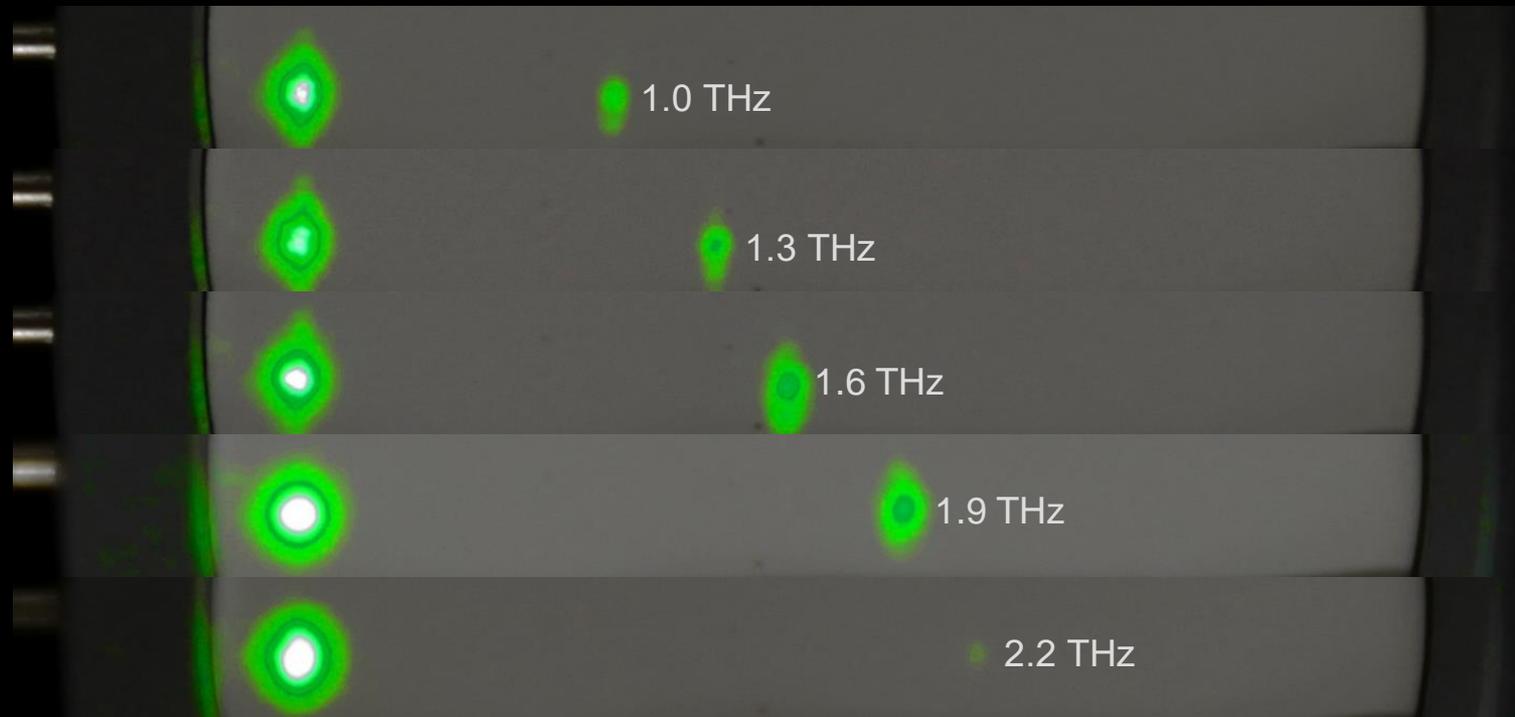
# LiNbO<sub>3</sub>結晶を用いた光注入型 テラヘルツ波発生および検出の実験系



# テラヘルツ波検出における入出力特性



# テラヘルツ波から光波変換された信号光 可視化プレートによる計測

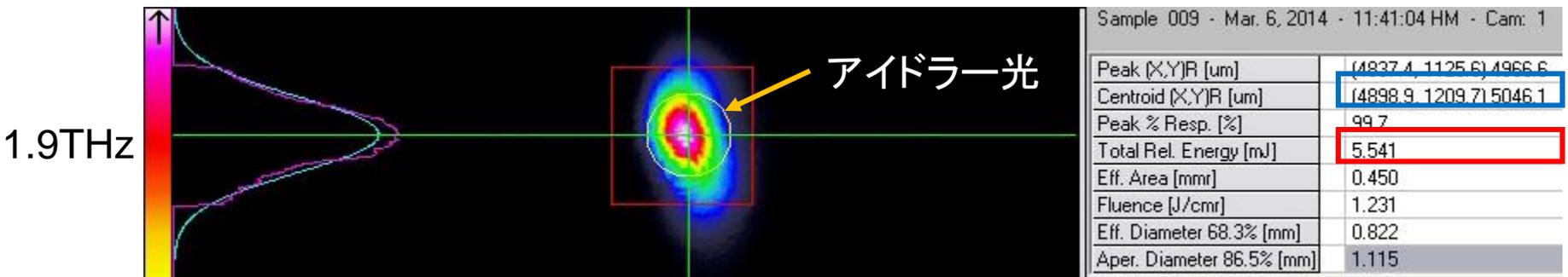
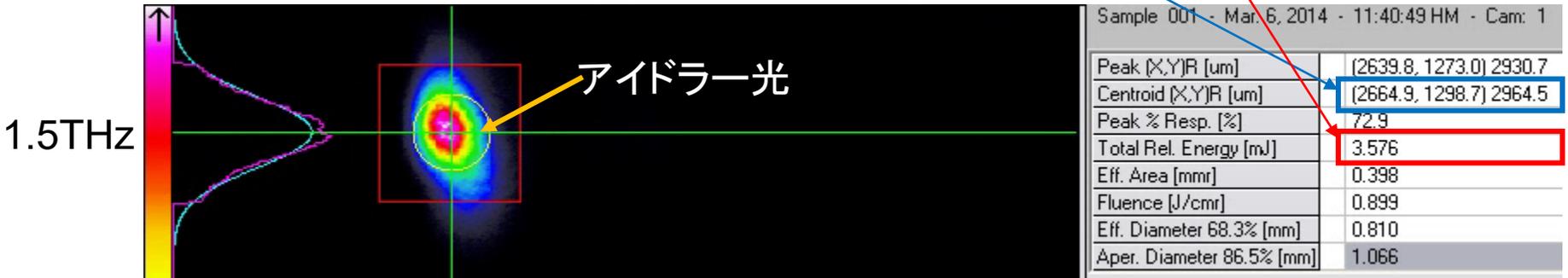


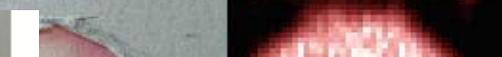
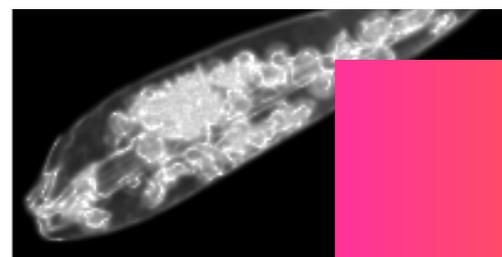
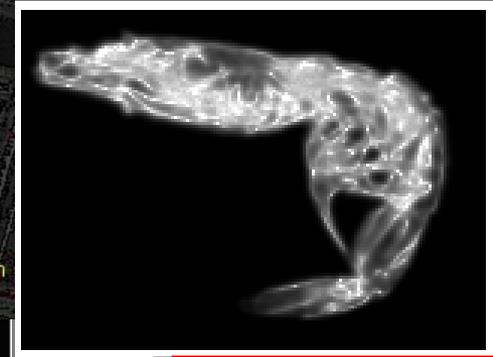
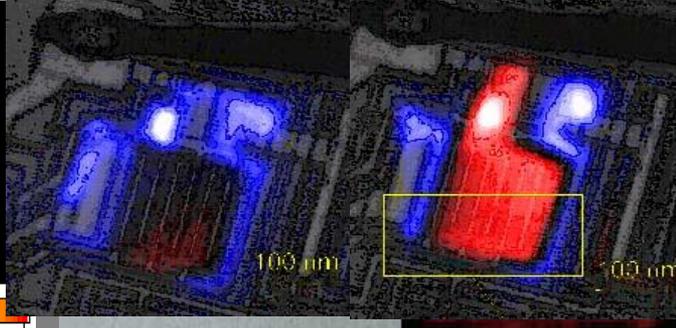
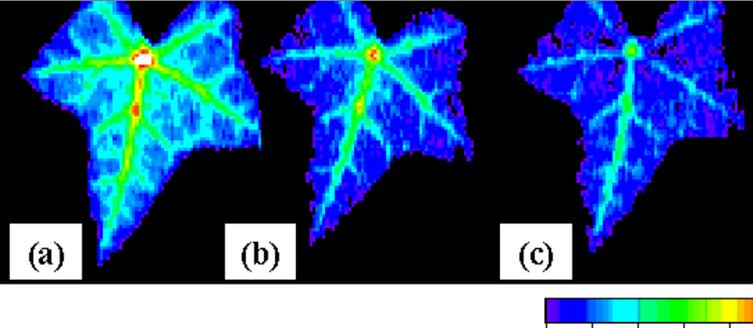
# 日立との共同研究

## CCDによるアイドラービームの座標と強度の検出

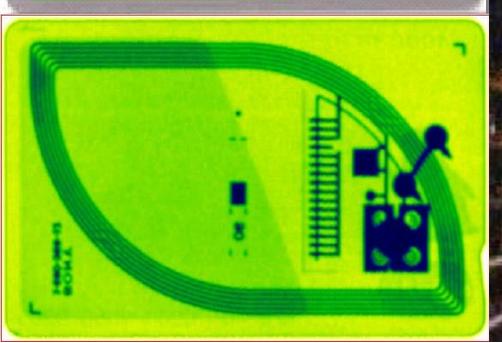
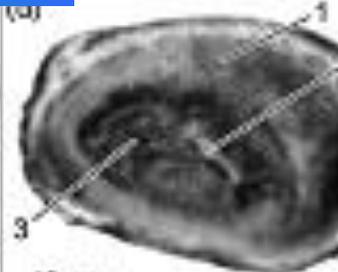
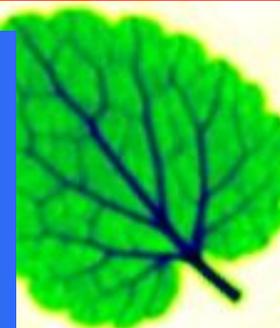
座標

強度

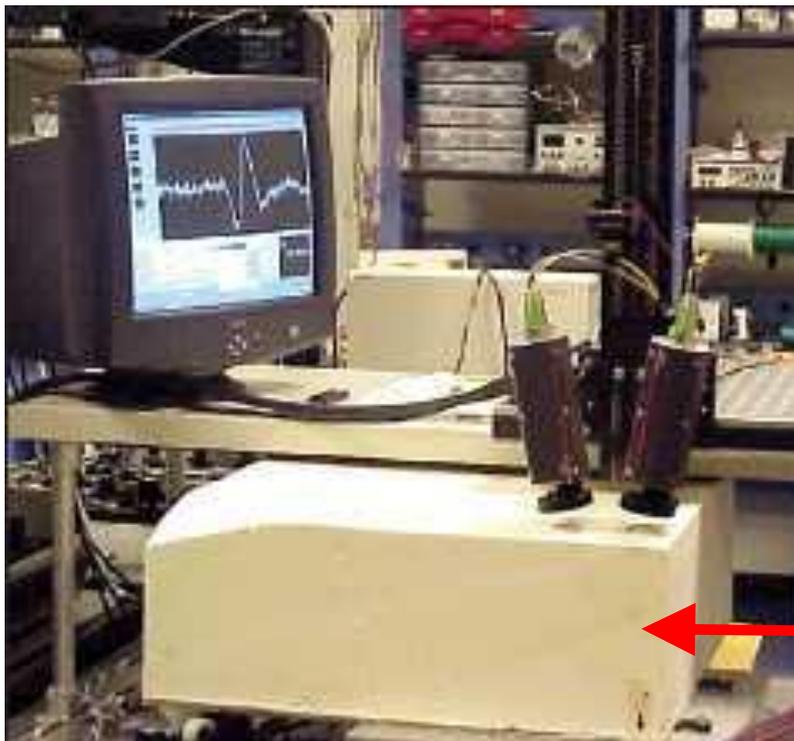




# テラヘルツ光源の 非破壊検査応用



# スペースシャトルの 外壁タイル内部の欠陥検査



著作権等の都合により、  
ここに挿入されていた画像を削除しました

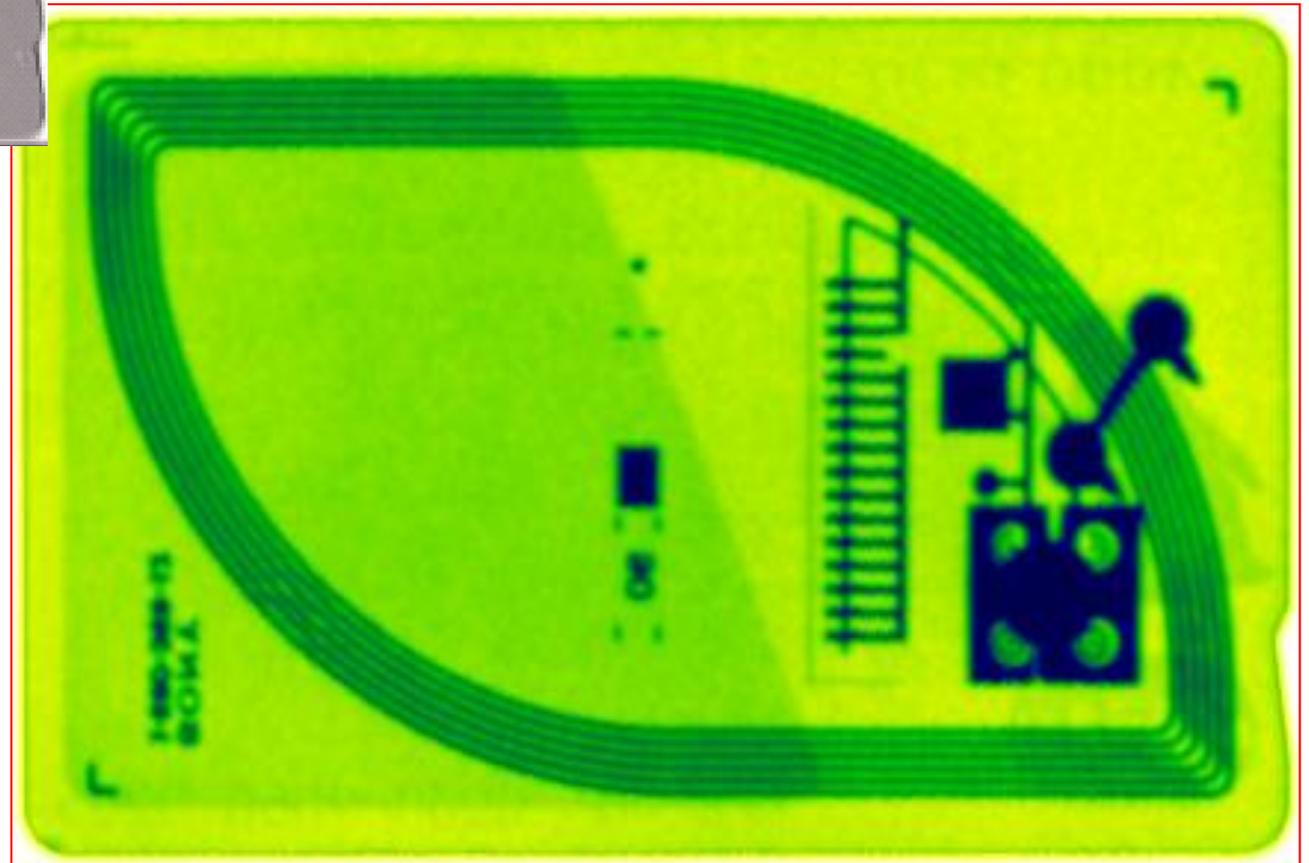
space shuttle Columbiaの画像

テラヘルツ イメージングが一番の成績！

# ICカードのテラヘルツイメージング例

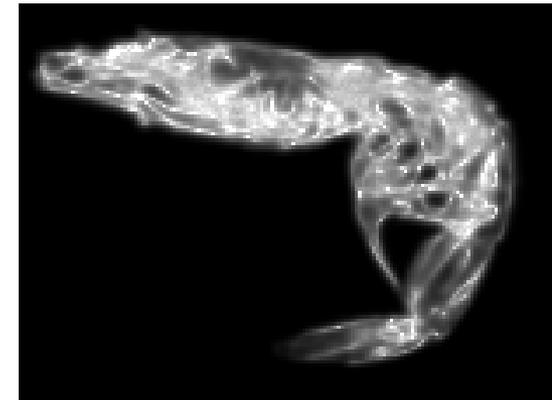
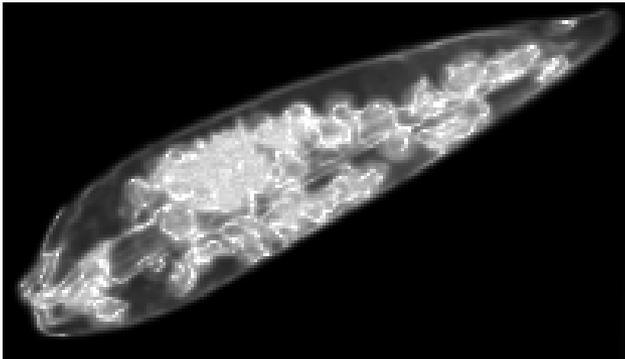


JRのSUICA



これはX線でもできるけど、THzは安全！

# テラヘルツイメージング例

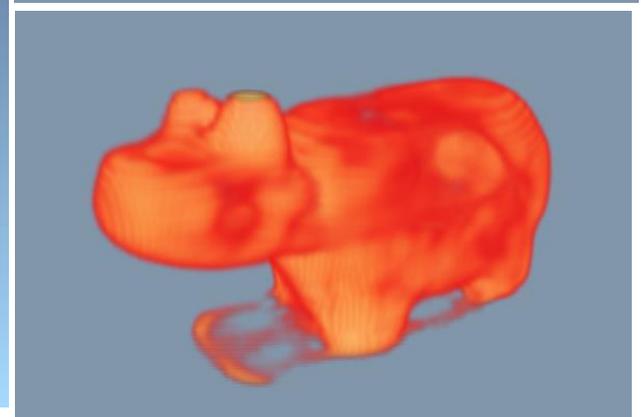
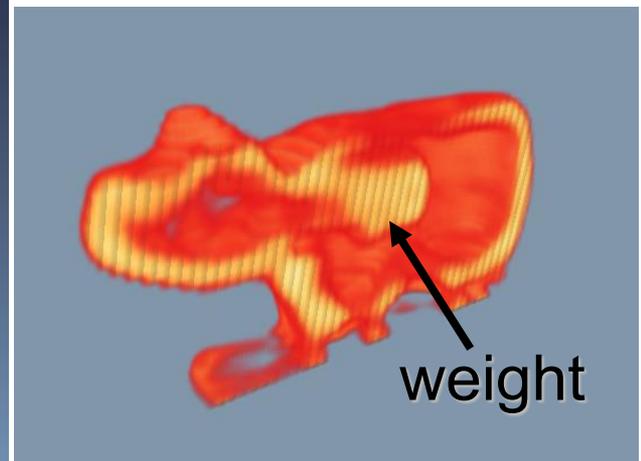
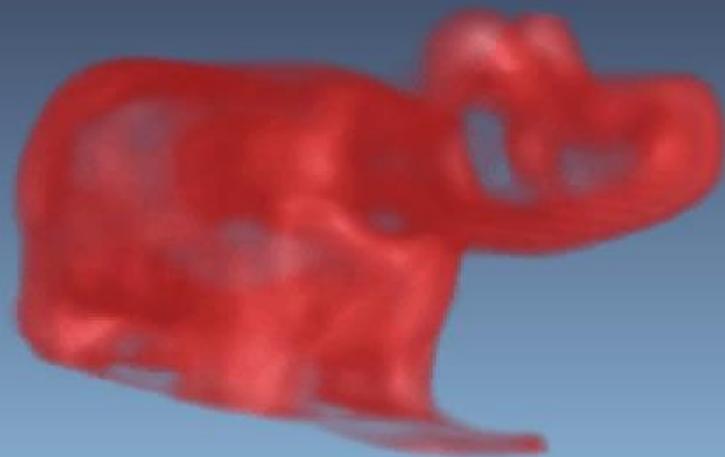


X線ではできない

# テラヘルツイメージング例



Scene



X線ではできない

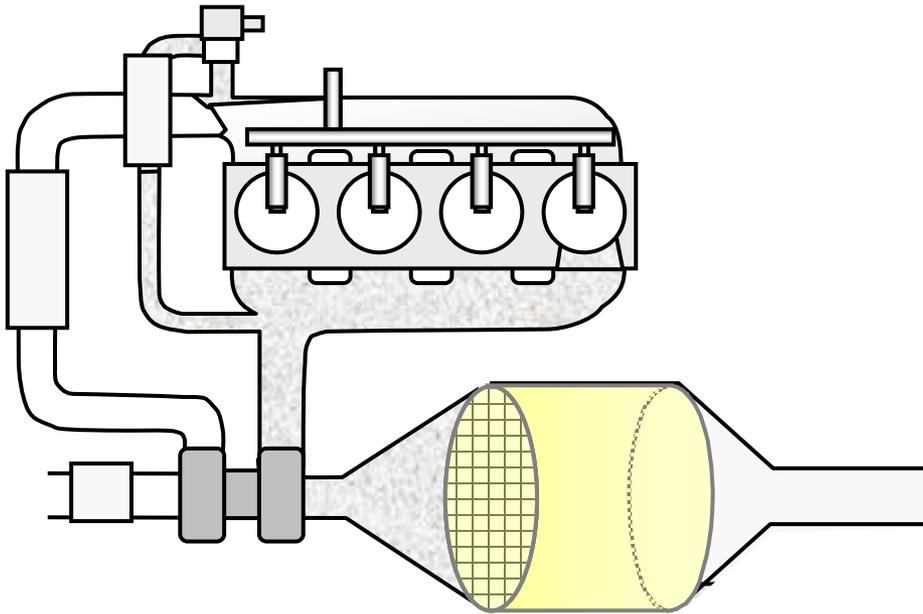
# テラヘルツイメージング例

Scene

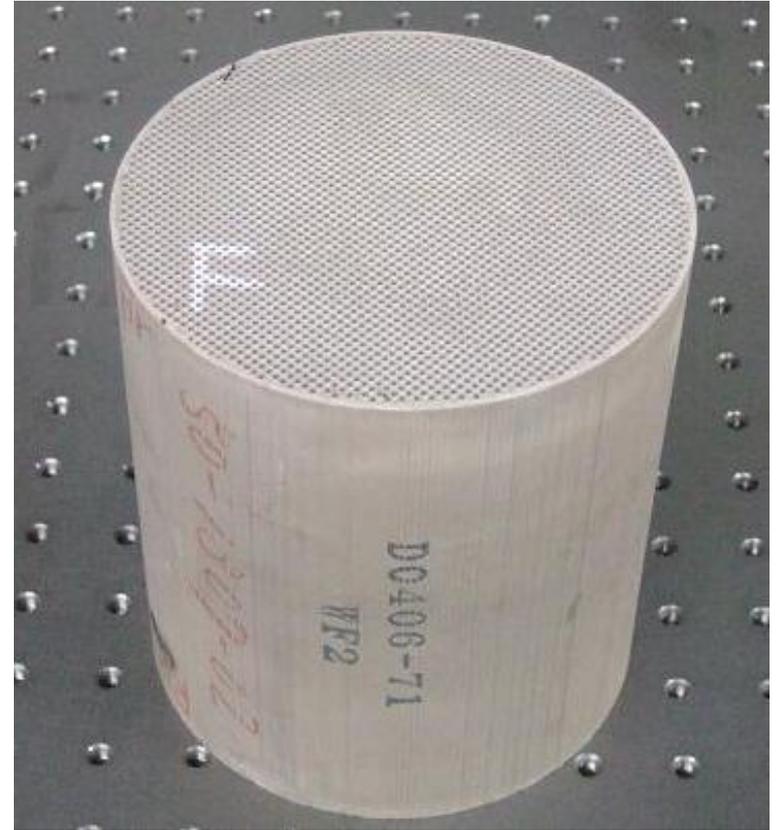


X線ではできない

# 自動車の排ガスフィルター



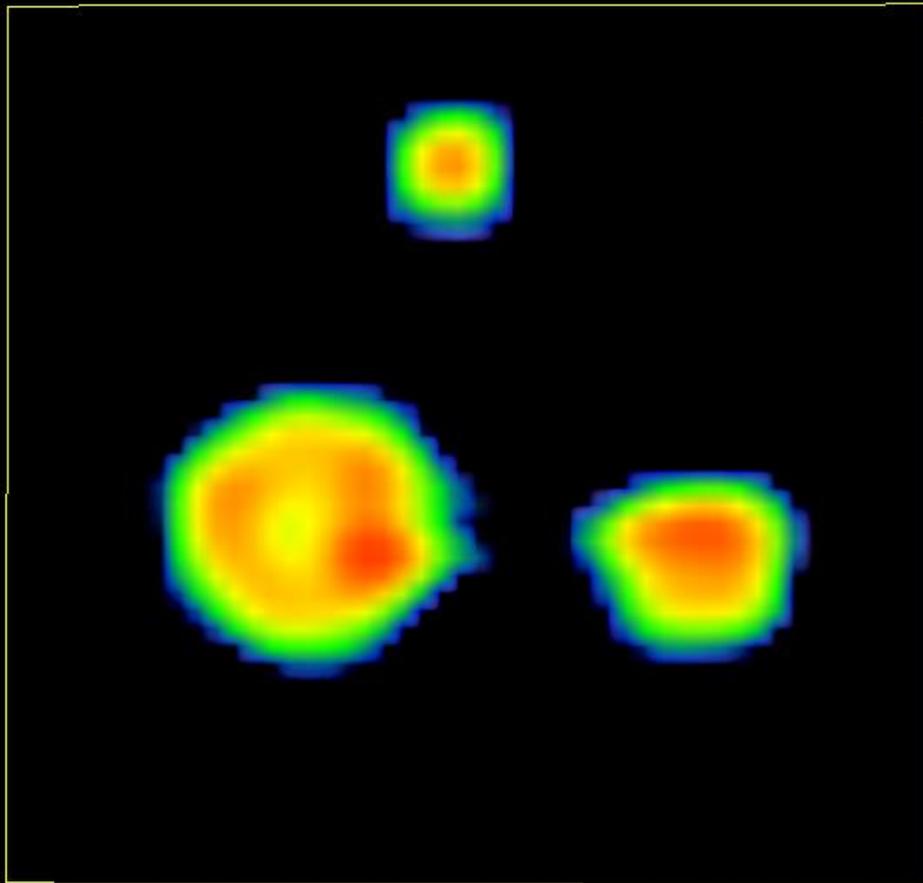
スス除去フィルタ



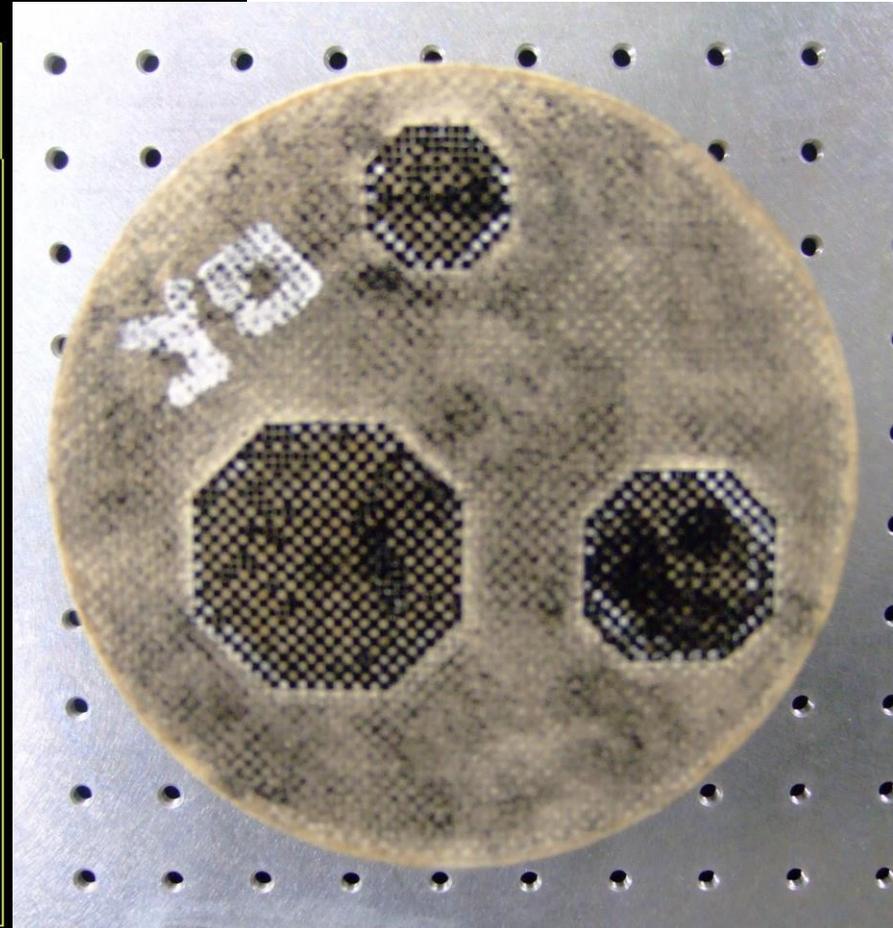
フィルタ

スス：健康を損ねる可能性が指摘されている微粒子

# フィルター内のススのCTイメージング結果

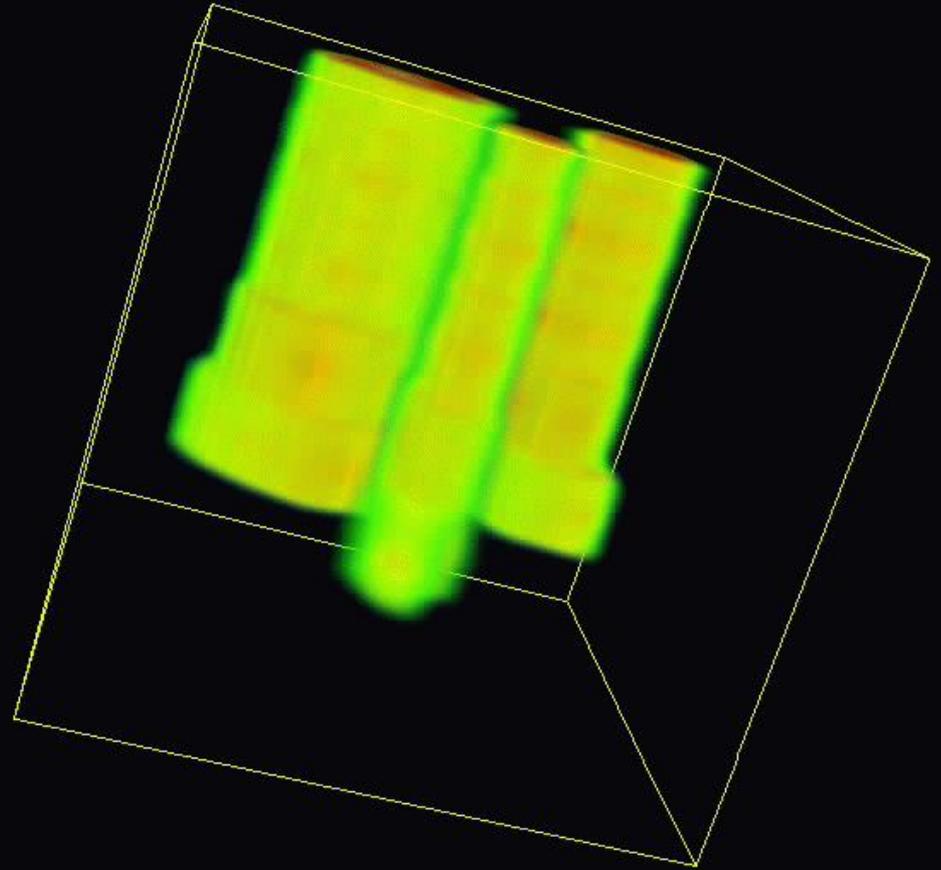
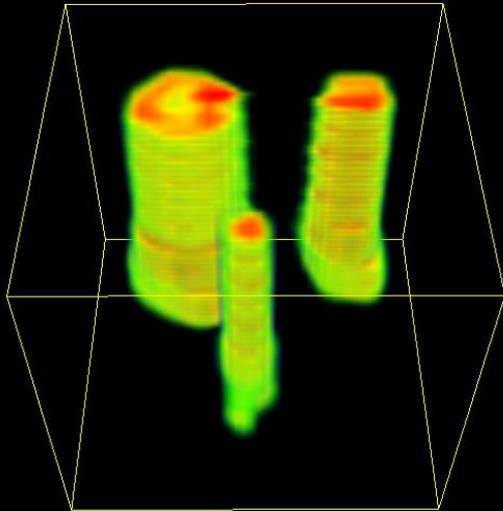
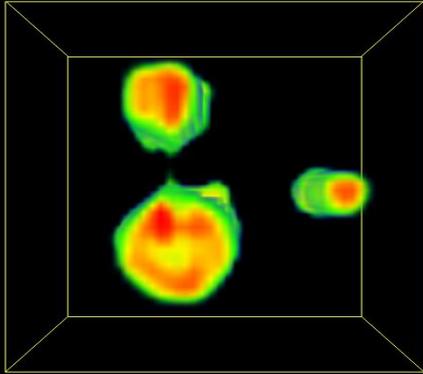


CT image



view of sample

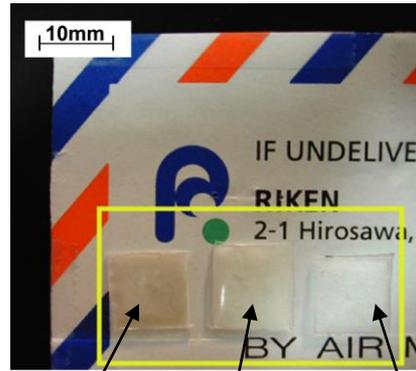
# フィルター内のススのCTイメージング結果



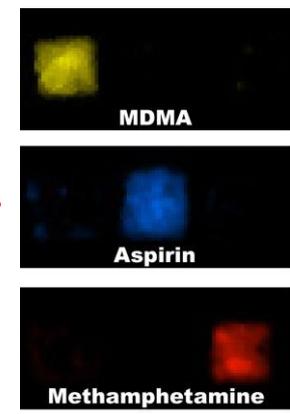
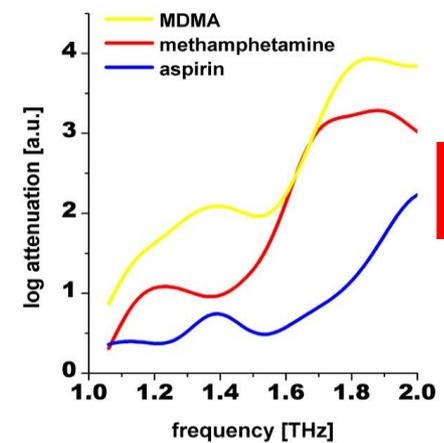
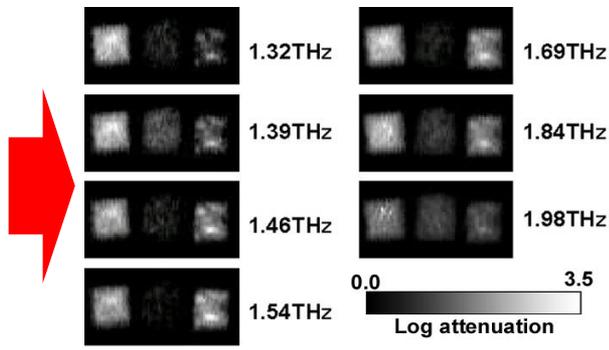
X線ではできない

# 封筒中に隠された禁止薬物の非破壊検出

目標：警察犬に勝つこと！

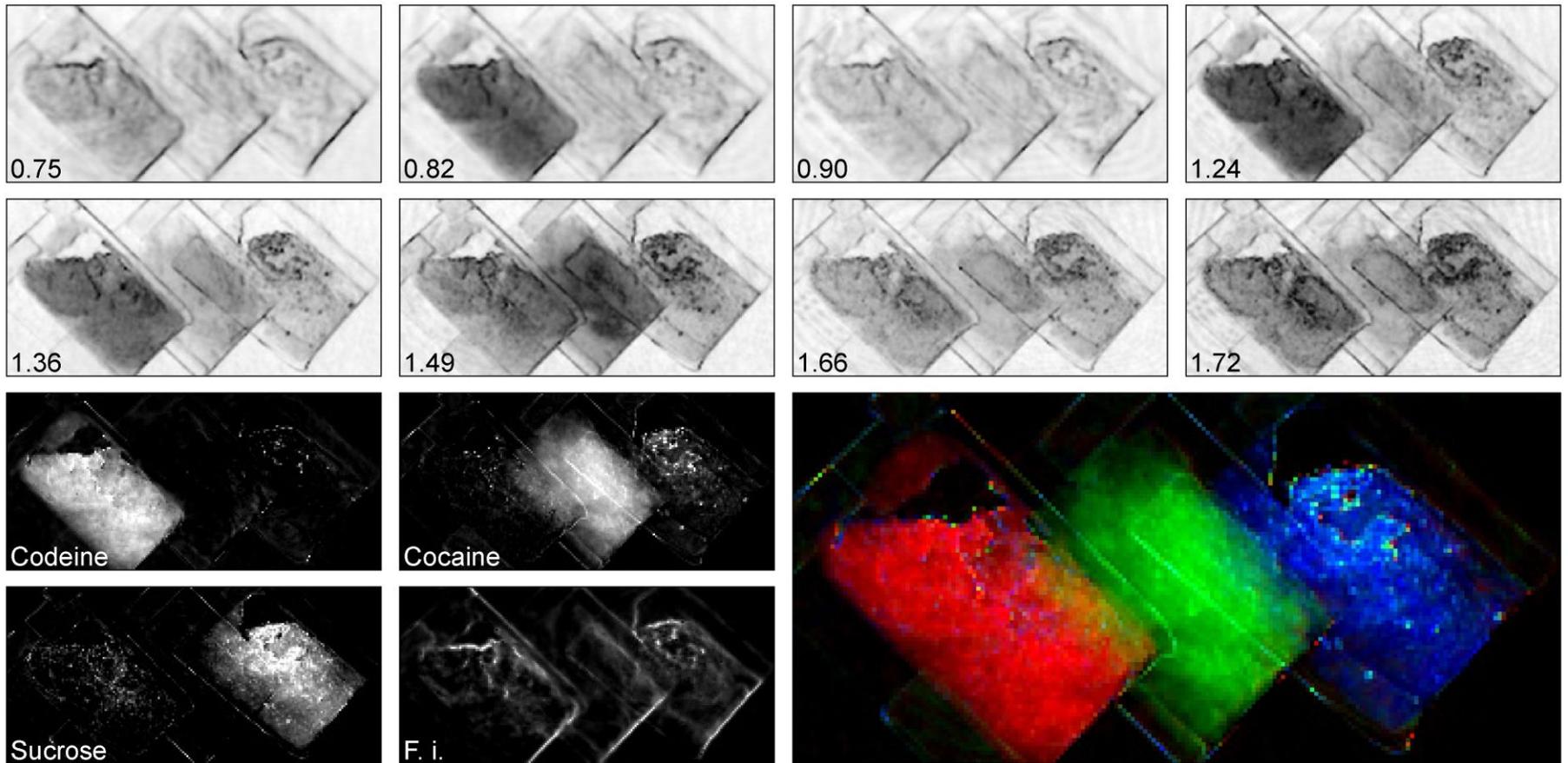


麻薬 アスピリン 覚せい剤  
(試料提供：科学警察研究所)



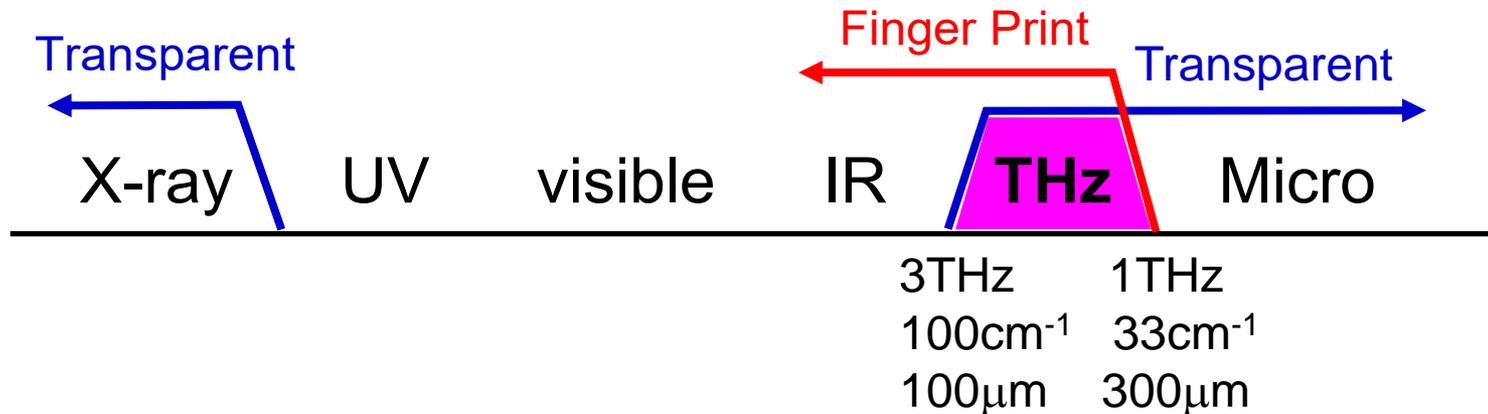
X線ではできない

# 他の麻薬のテラヘルツ分光イメージング例



# 覚せい剤や爆薬の透視には 0.5 – 3 THz が最適

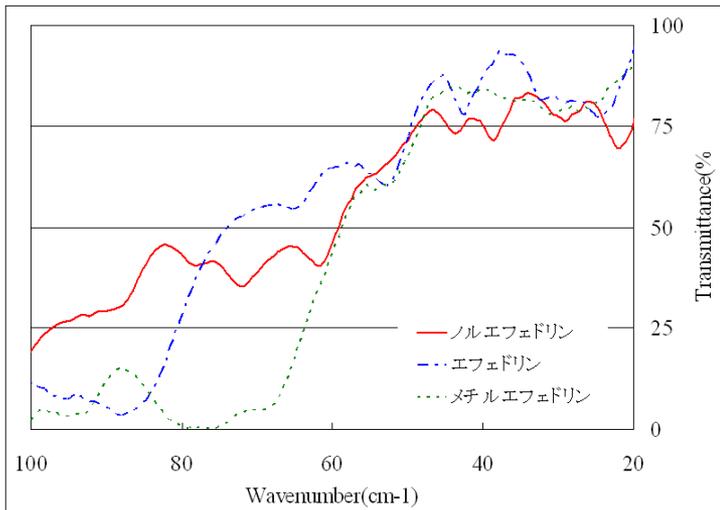
多くの物質が 3THz以下の領域で透明  
殆どの指紋スペクトルが0.5THz以上の領域に存在



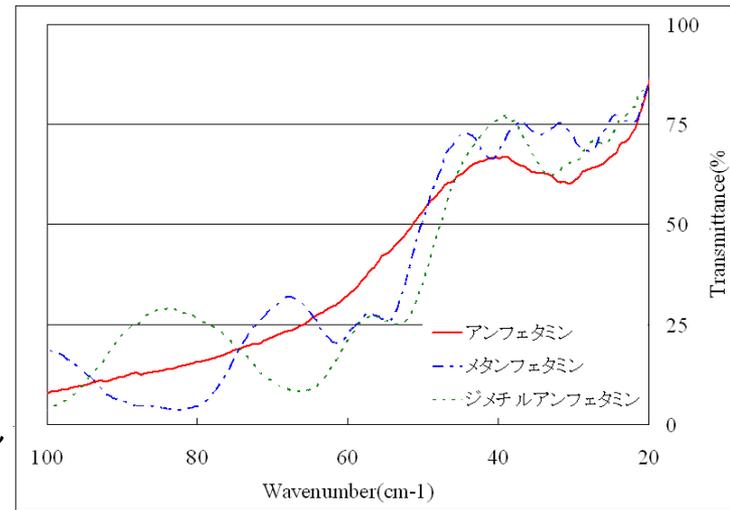
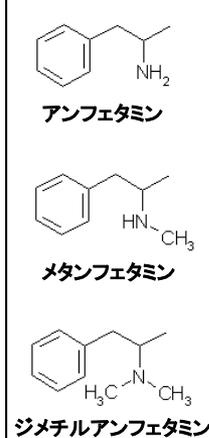
0.5 – 3THz は  
我々のテラヘルツ光源がちょうどカバーしていた

# 代表的な禁止薬物等20種類全てに指紋スペクトル

## 覚せい剤原料

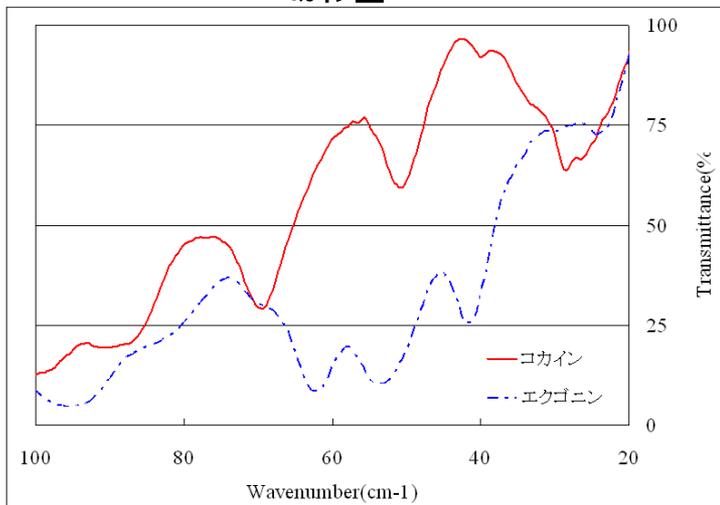
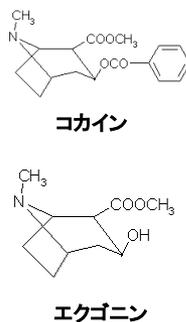


## 覚せい剤

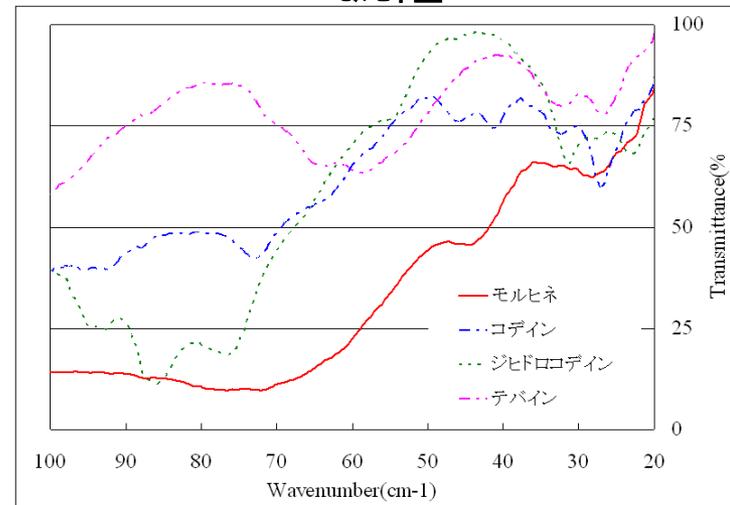
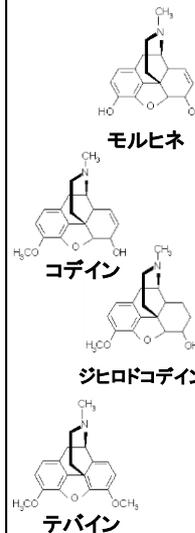


## 科学警察研究所との共同研究

## コカイン型



## モルヒネ型



# 代表的な爆薬指紋スペクトル

Cc1c([N+](=O)[O-])cc([N+](=O)[O-])cc1[N+](=O)[O-]  
TNT

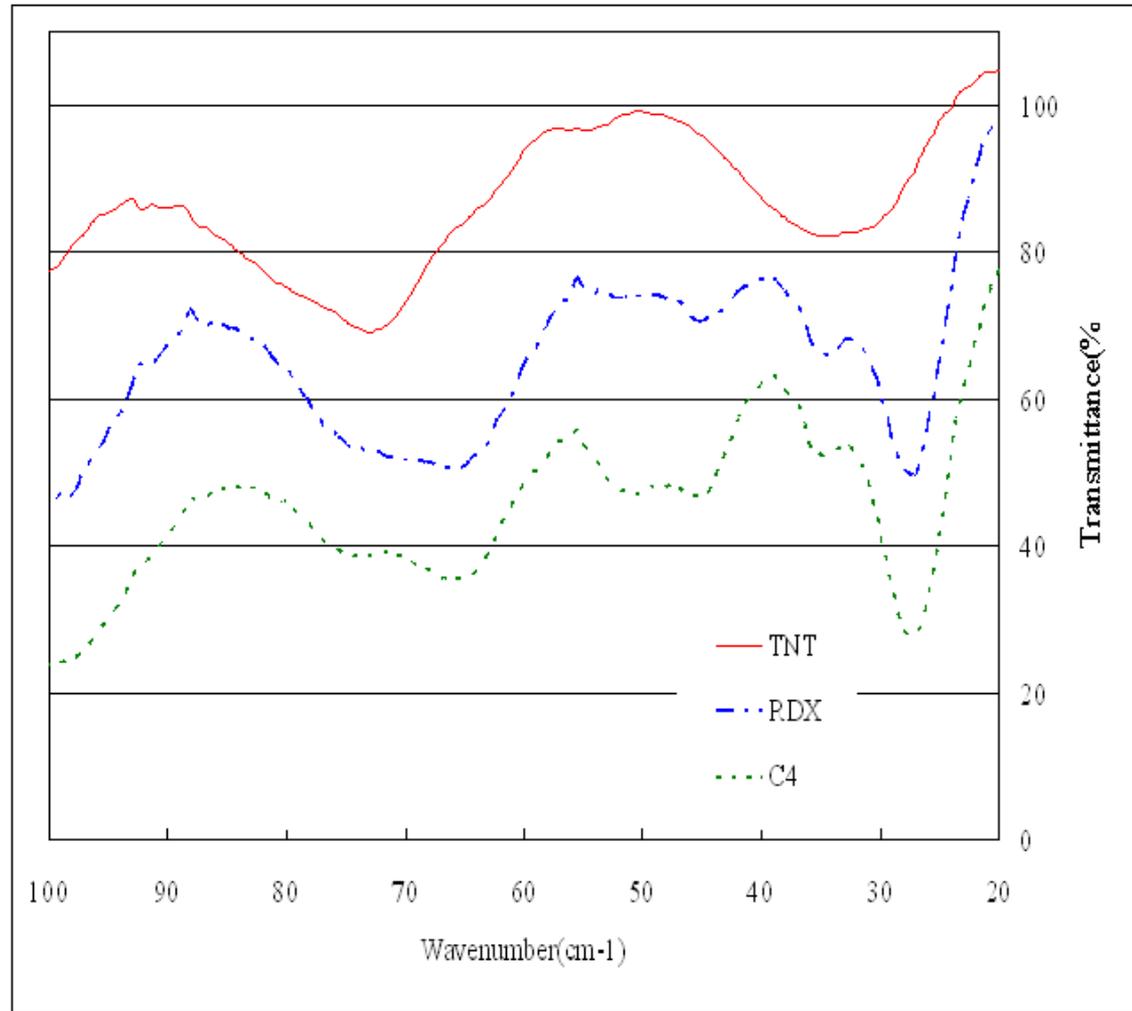
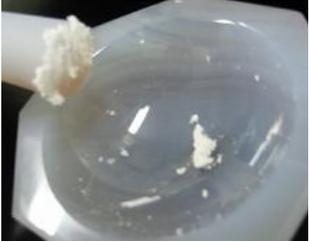


世界各国で使用されている代表的な爆薬

O=[N+]([O-])N1CCN(C1)N([O-])[N+]  
RDX

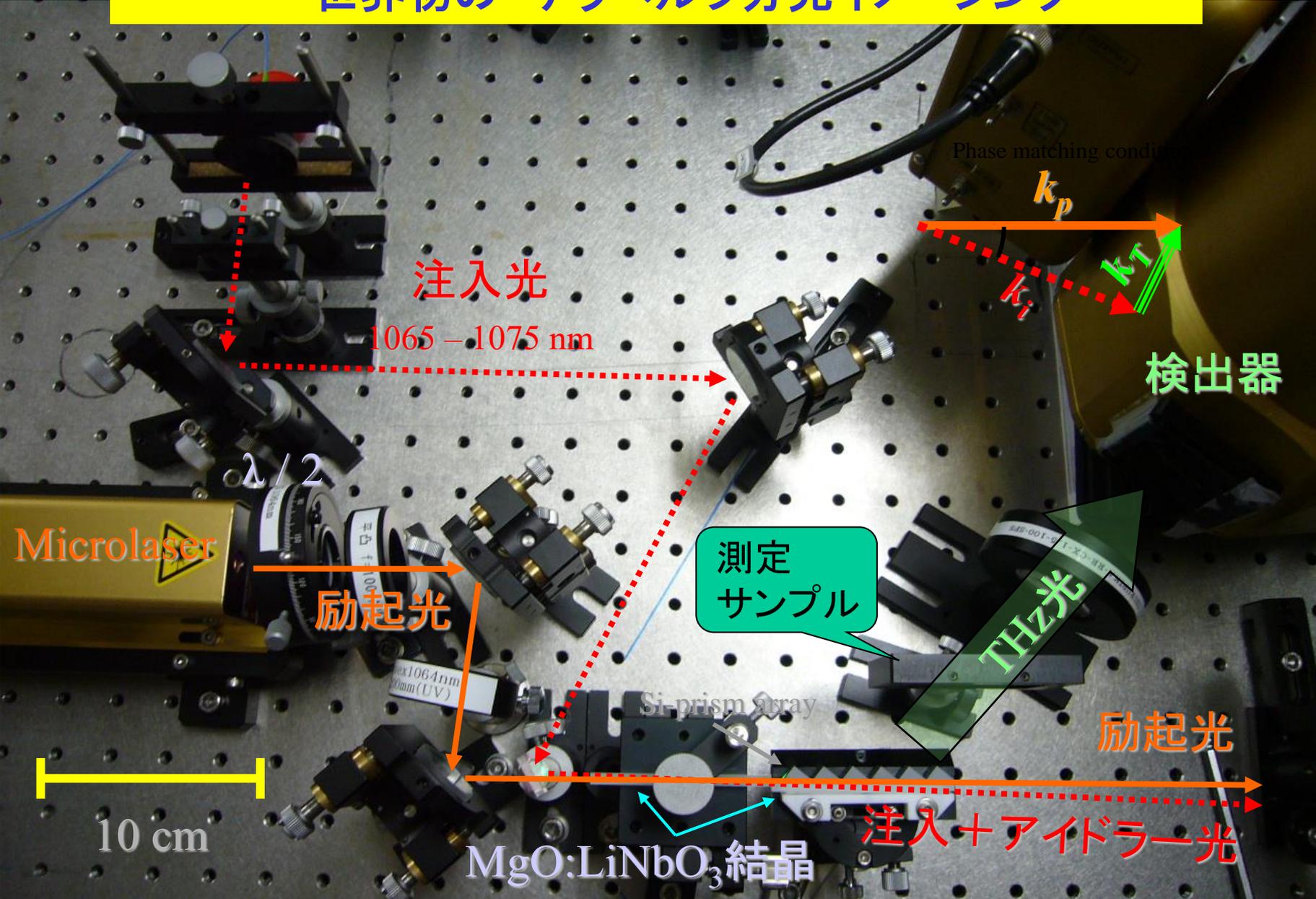
**C4**  
RDXが主成分(約90%)  
結合材(10%)  
・ポリイソブチレン  
・モーターオイル

シート状の爆弾で  
国内では出回らない



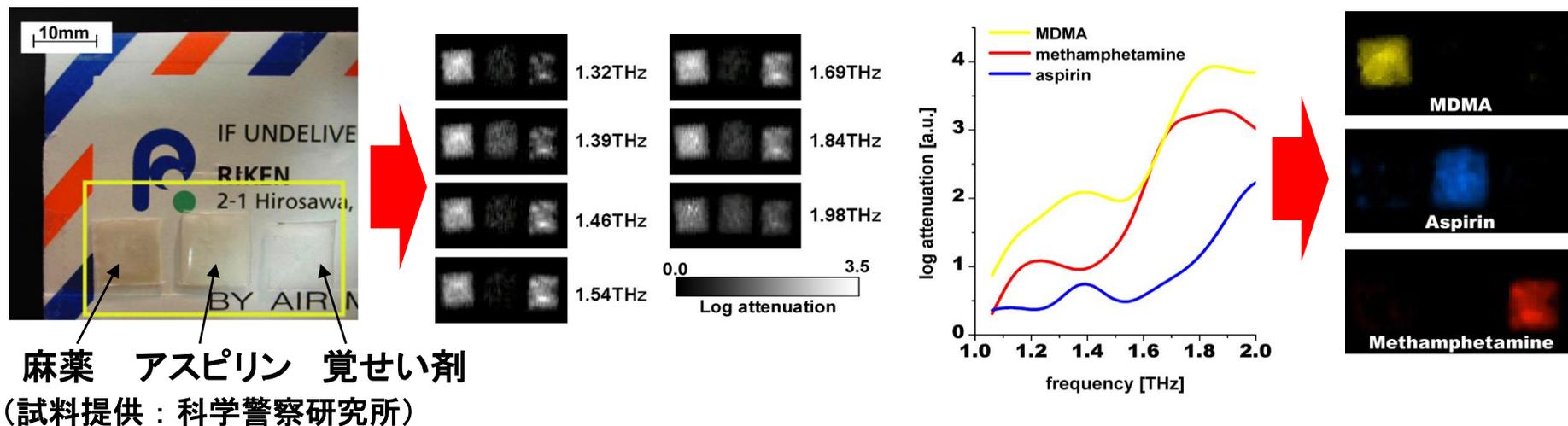
科学警察研究所との共同研究

広帯域波長可変性 + 薬物の指紋スペクトル  
= 世界初の テラヘルツ分光イメージング



# 封筒中に隠された禁止薬物の非破壊検出

現在わが国で最も乱用されている覚せい剤メタンフェタミン（通称ヒロポン）、および世界的に乱用が拡大している合成麻薬MDMA、通称エクスタシー）、および比較対照としてのアスピリンの3種。



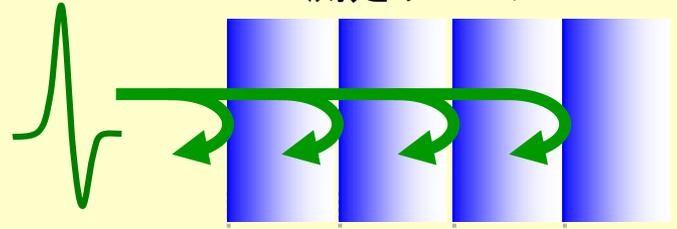
この結果は世界の論文1000本以上に引用

# 反射型テラヘルツモグラフィ

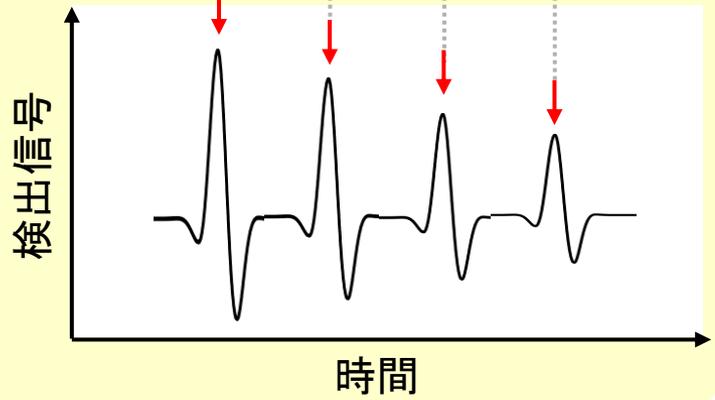
## 超短テラヘルツパルスを利用した 断層画像測定法

超短THz  
パルス

測定サンプル



各層からの反射パルスの  
到達時間を検出



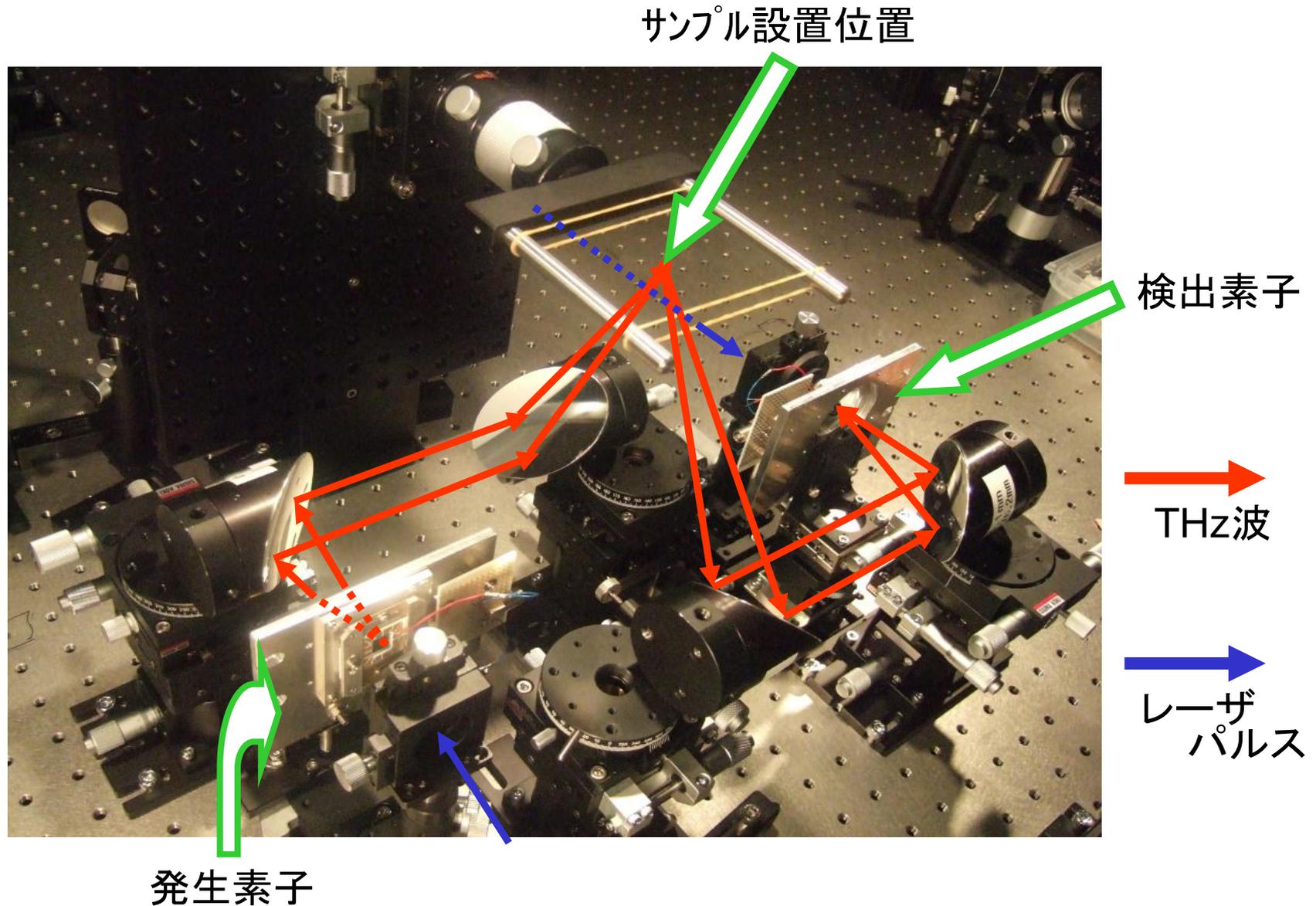
### 特徴

- ・ 高い奥行き分解能
- ・ 非破壊・非接触・低侵襲
- ・ 光が透過しないサンプルの測定

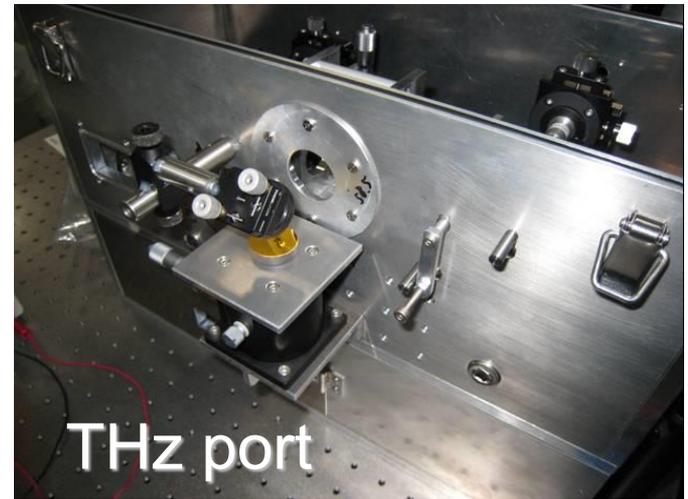
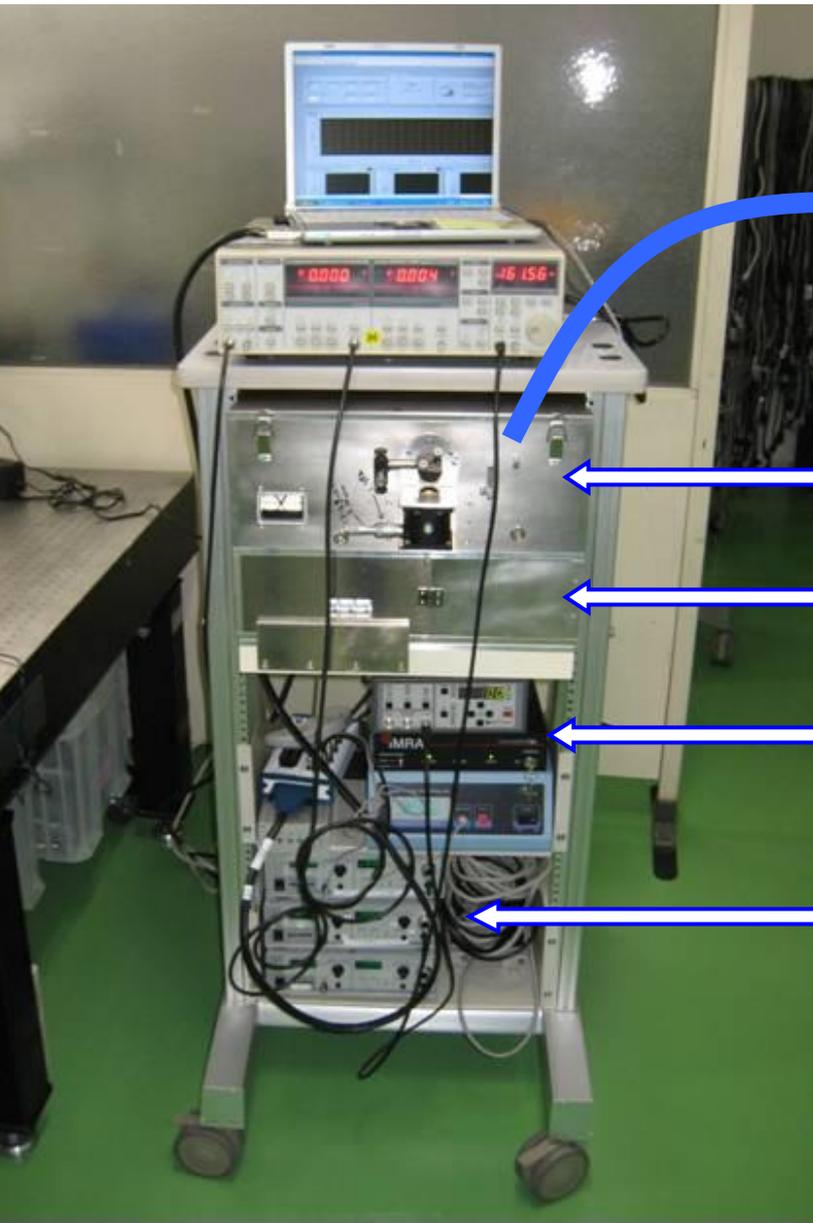
### 応用

- ・ 錠剤コーティングの評価
- ・ 自動車塗装膜の膜厚測定

# テラヘルツモグラフィシステム



# THz トモグラフィシステム



TDS

Fiber laser

Stage controller  
& chopper

Laser driver

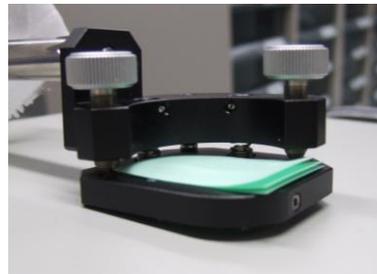
アイシン精機と共同開発

# 3枚のポストイットのイメージング

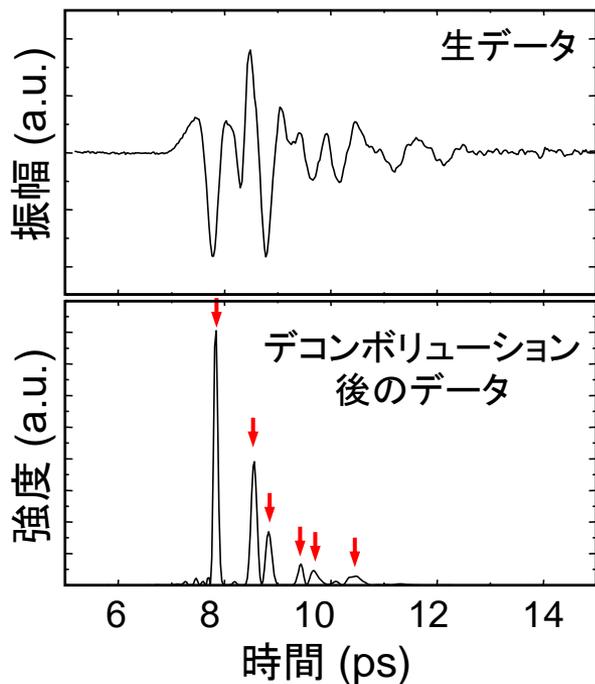
測定サンプル

3枚重ねの紙 (90  $\mu\text{m}$   $\times$  3枚)

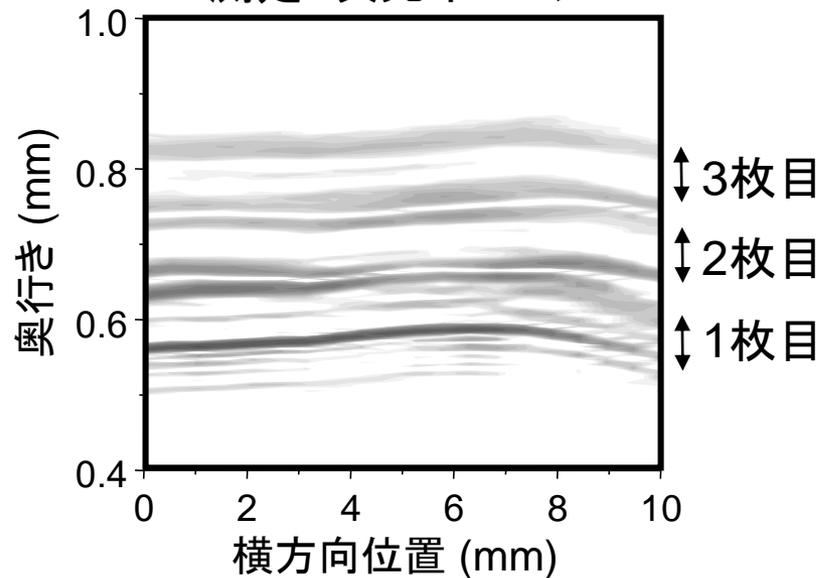
サンプル写真



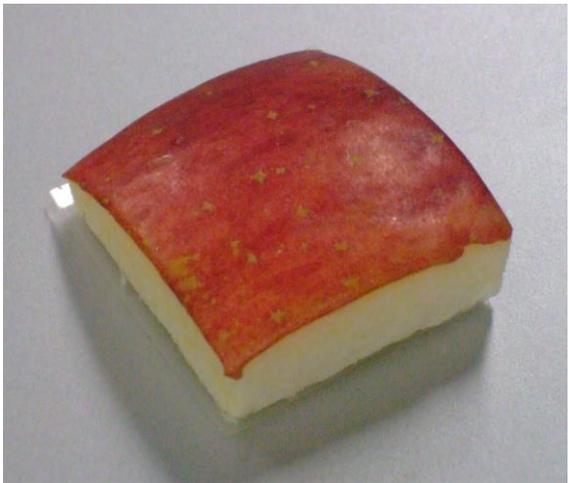
ある1点での測定データ



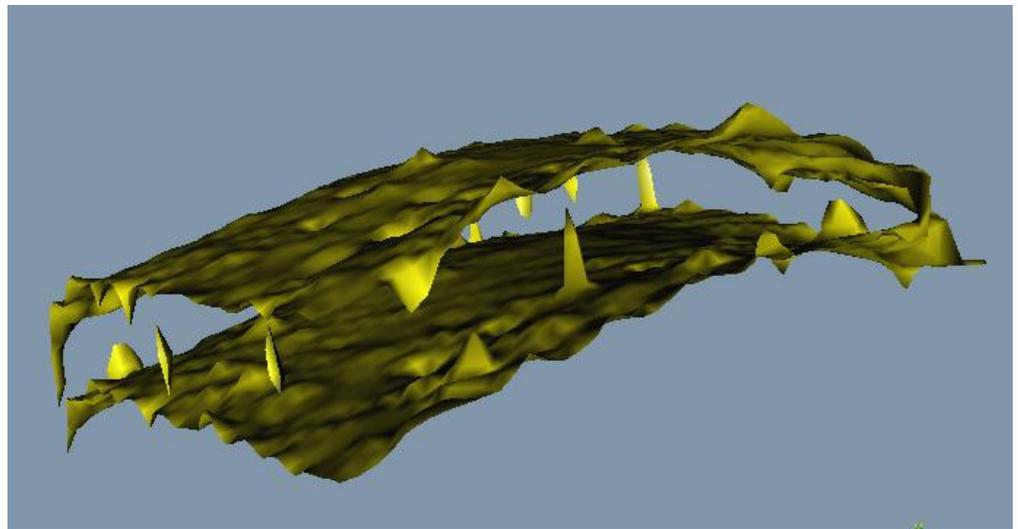
測定2次元イメージ



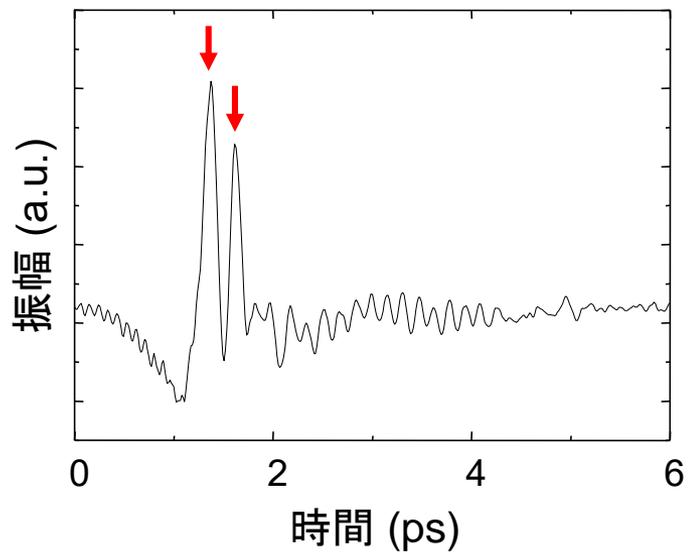
# リンゴの皮



THz tomography

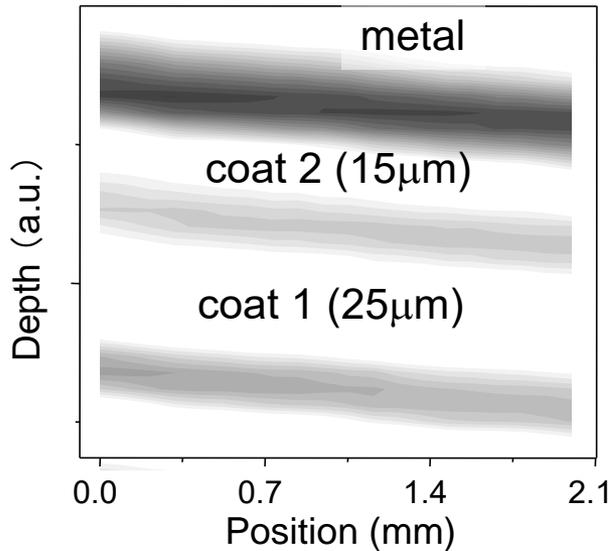
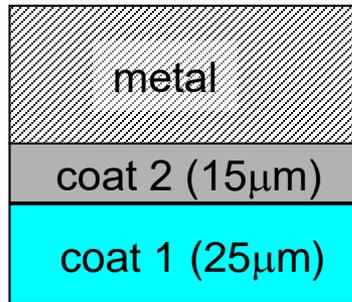


Echo waveform  
(after deconvolution)

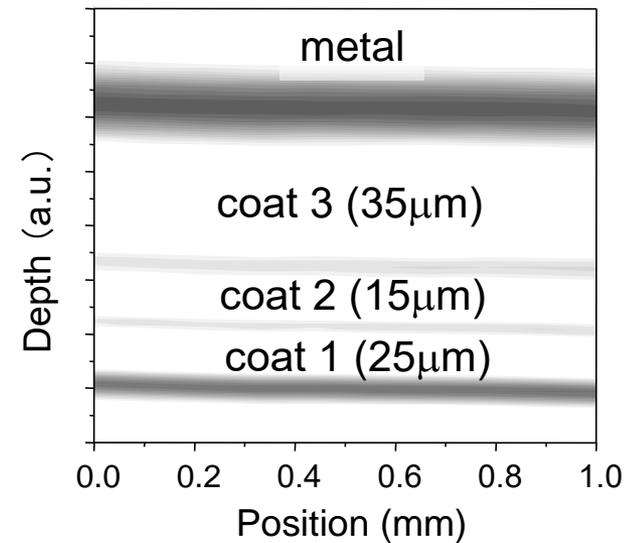


# 車の塗装の断層画像

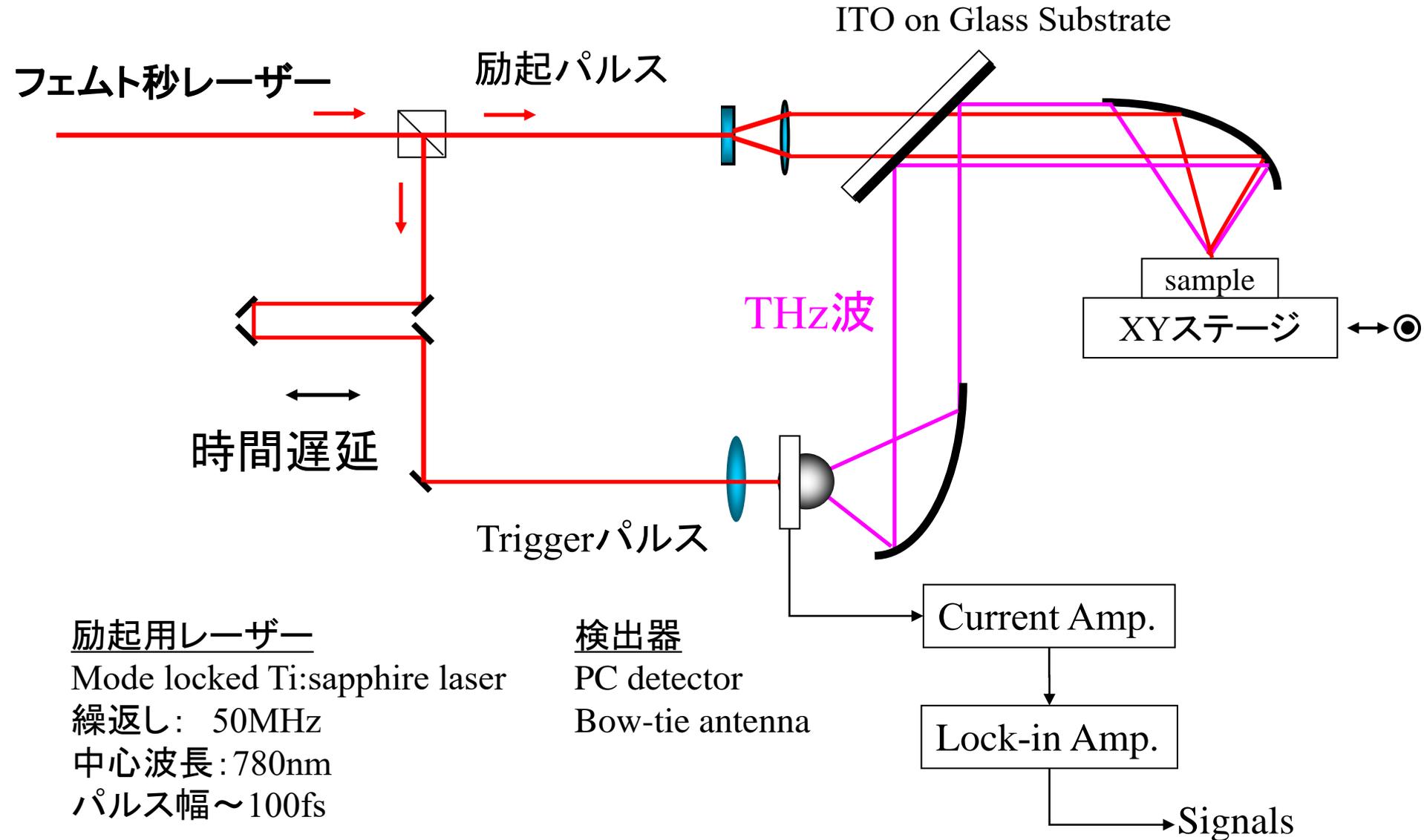
Two layered coating



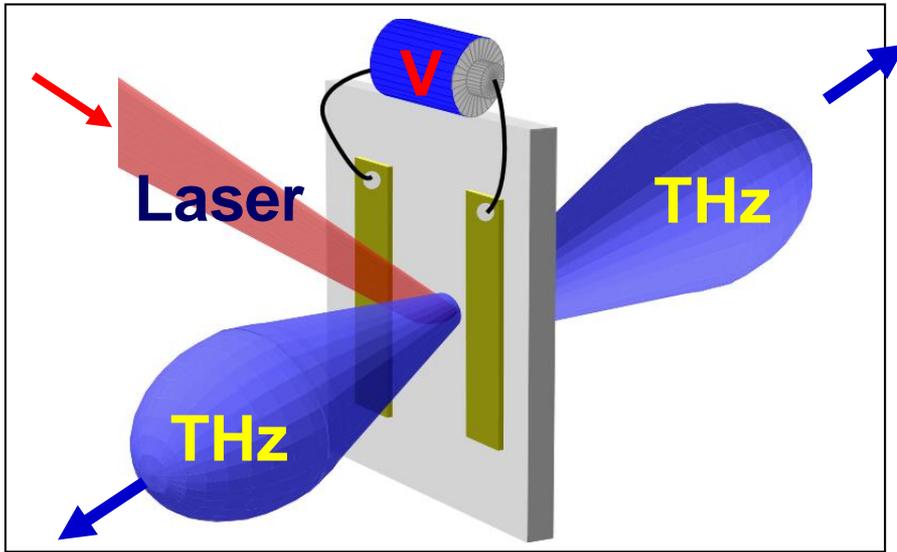
Three layered coating



# レーザーTHz放射顕微鏡 LTEM (Laser THz Emission Microscope)

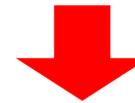


# 半導体からのTHz電磁波放射原理

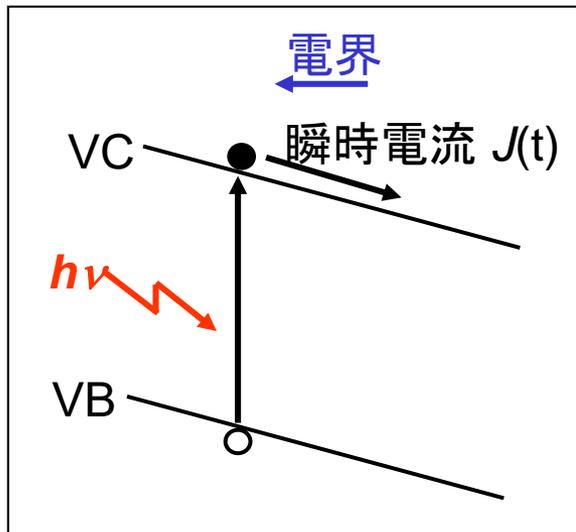


THzの振幅強度はレーザー照射領域の印加電界に比例

半導体表面の電界分布を評価可能



LSIの電氣的欠陥評価可能



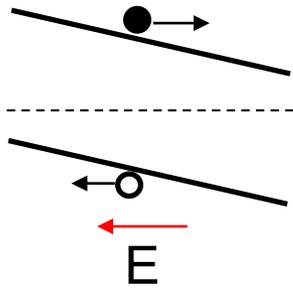
$$E(t) \propto \frac{\partial J}{\partial t} = e \frac{\partial n}{\partial t} v + en \frac{\partial v}{\partial t}$$

↓
↓

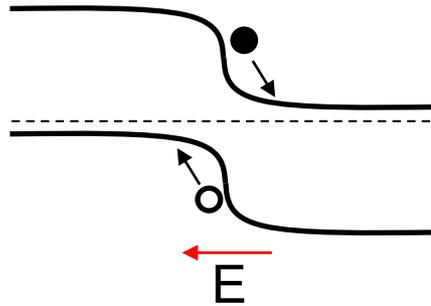
レーザー強度に依存
印加電界に依存

# LSIからのTHz波放射の機序

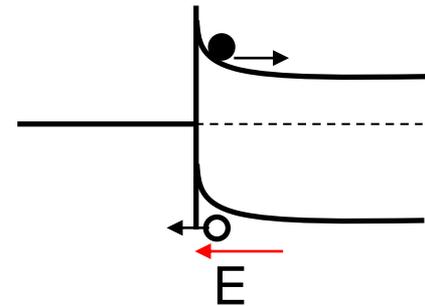
外部印加電圧



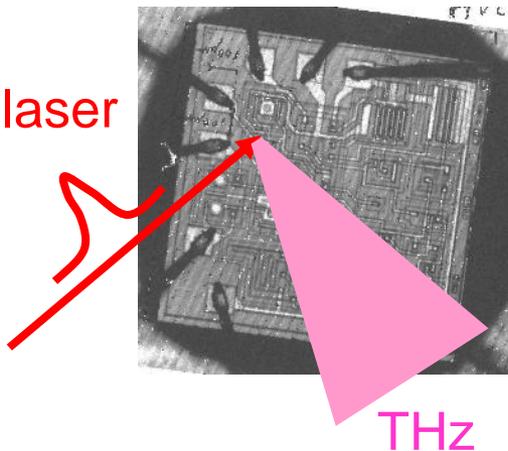
pn接合



ショットキー接合

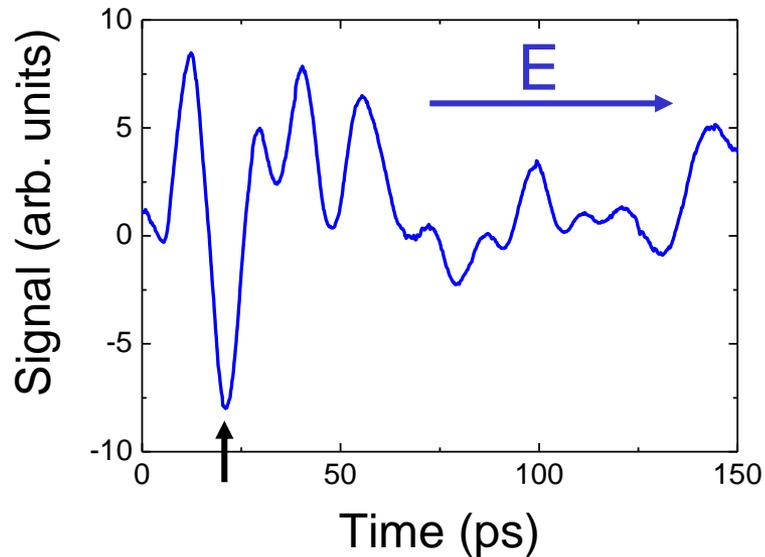
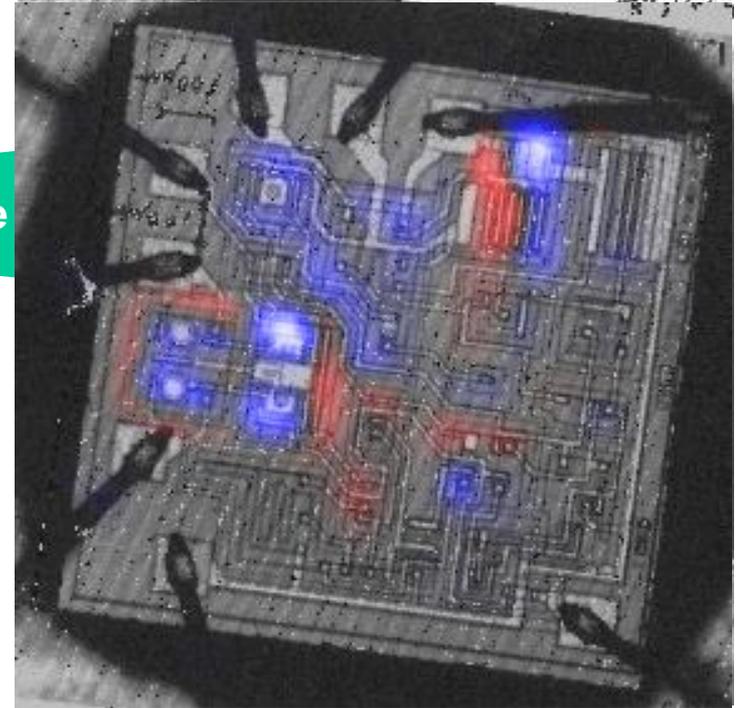
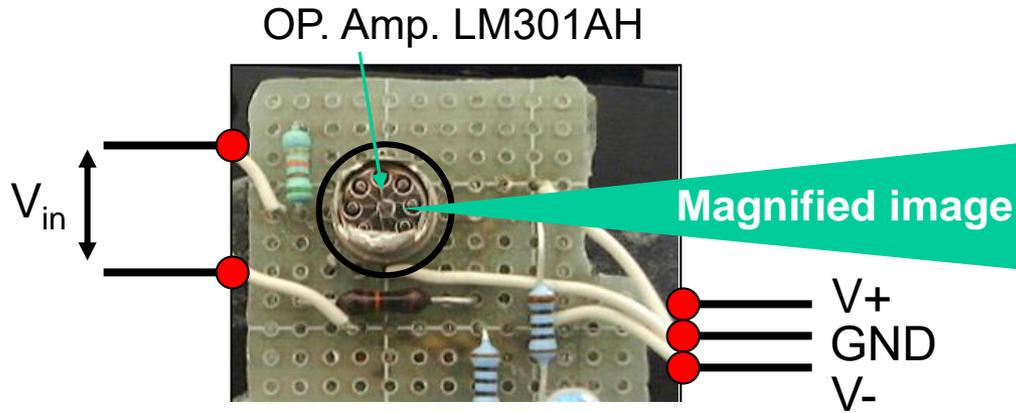


laser



- THz波放射は内部電界が存在する領域から生じる
- THz波放射強度はレーザー照射領域の局所電界に比例する

# オペアンプのLTEM画像

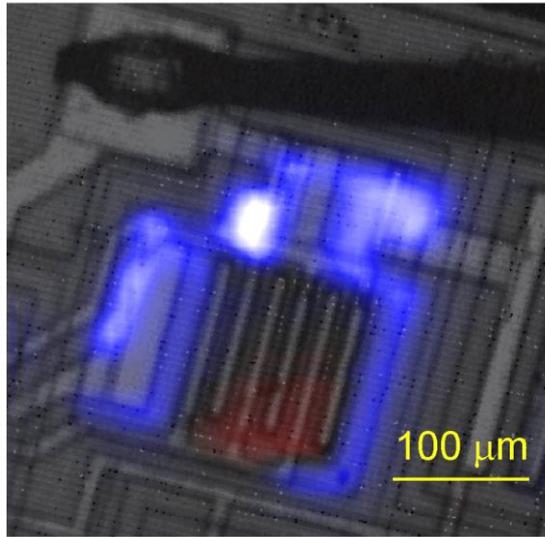


THz放射の時間波形

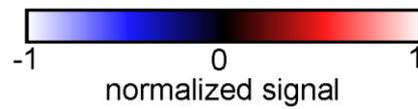
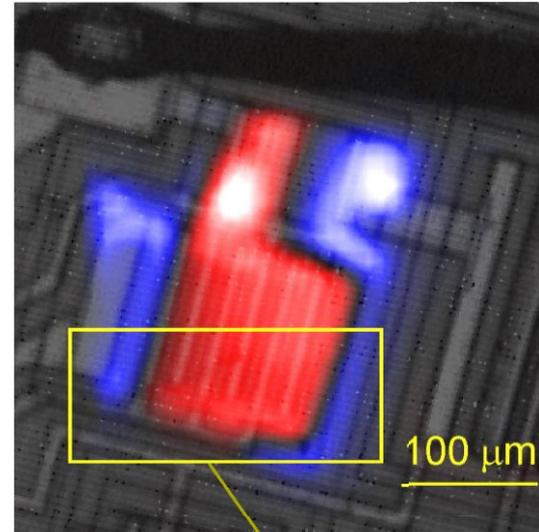
赤/青 ⇒ THz放射振幅の正/負  
⇒ 局所電界方向

# オペアンプの断線評価

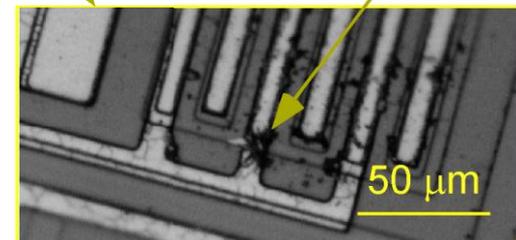
Normal Chip



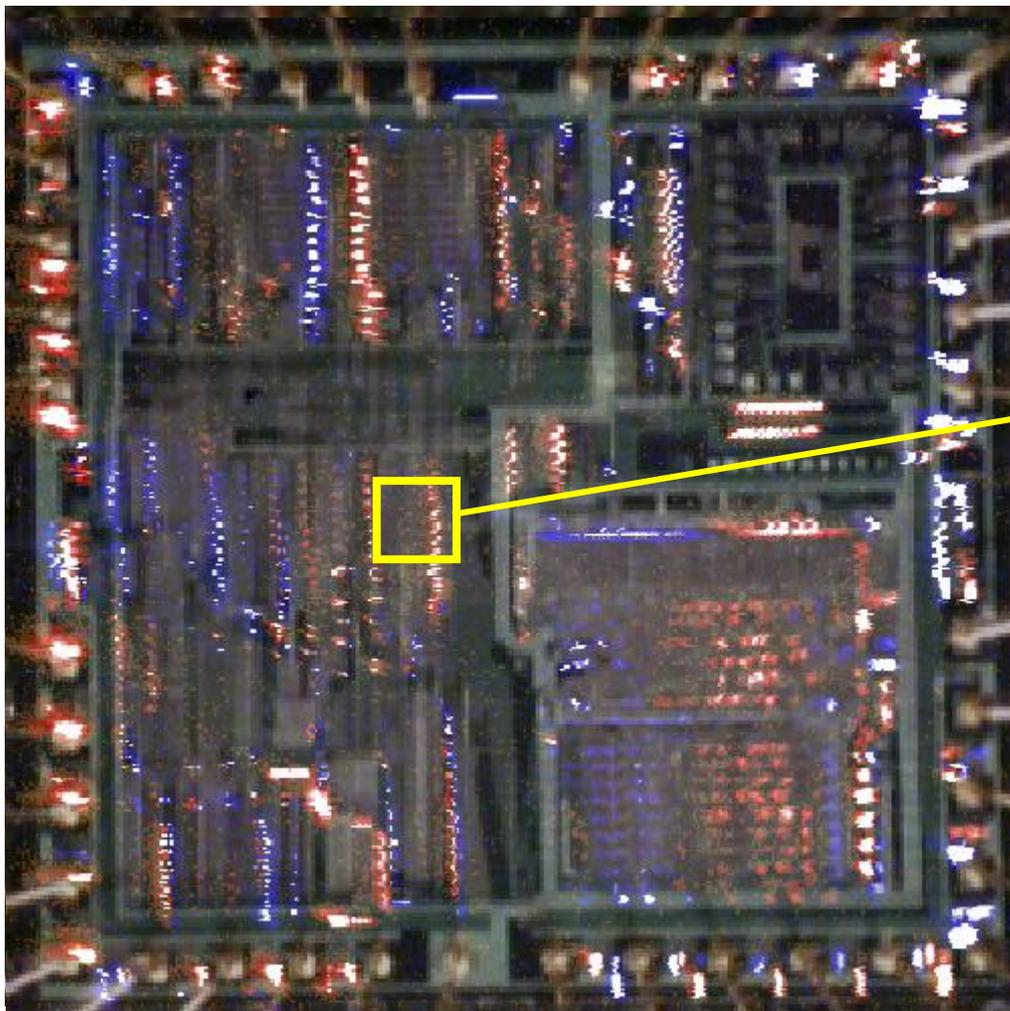
Damaged Chip



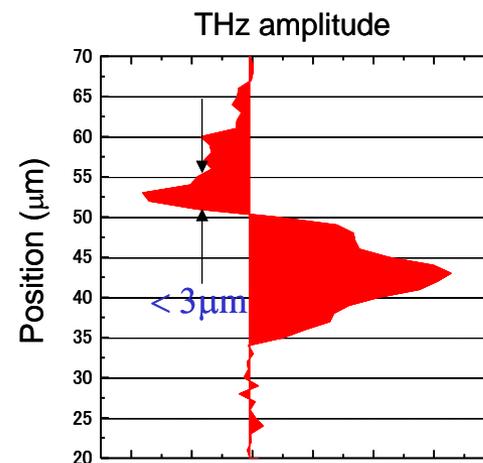
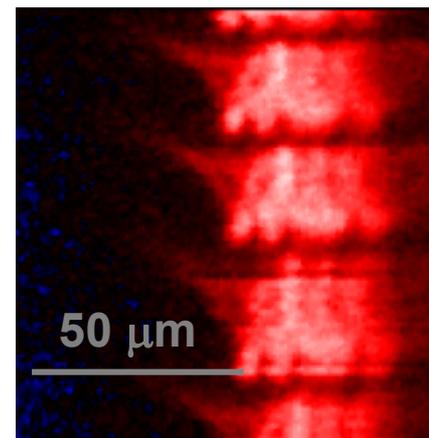
Damaged Line



# 集積回路LSIのLTEMによる観察



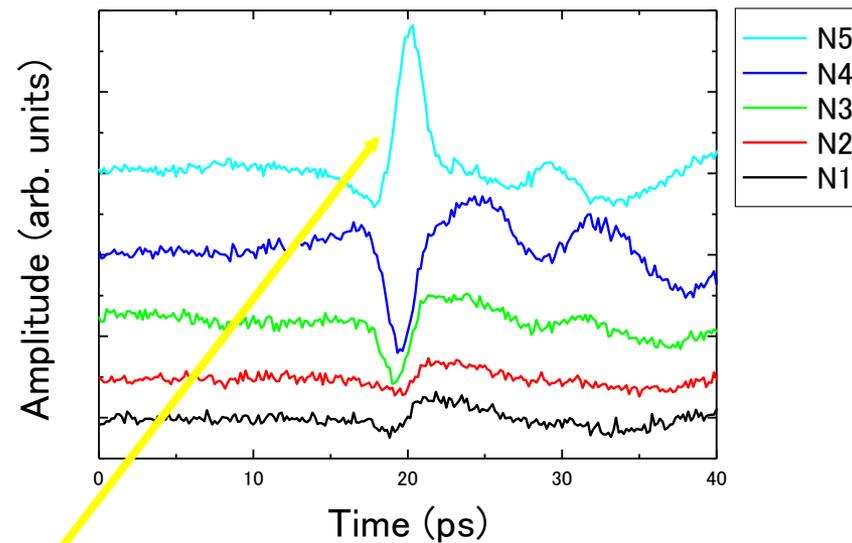
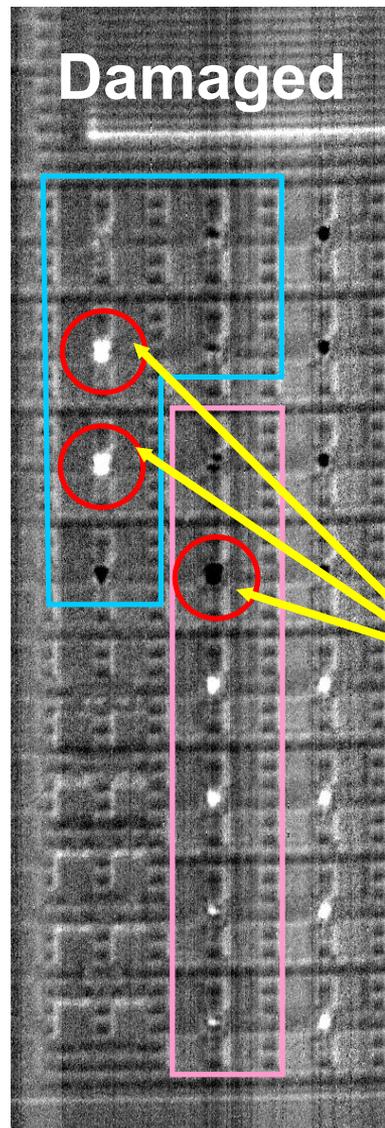
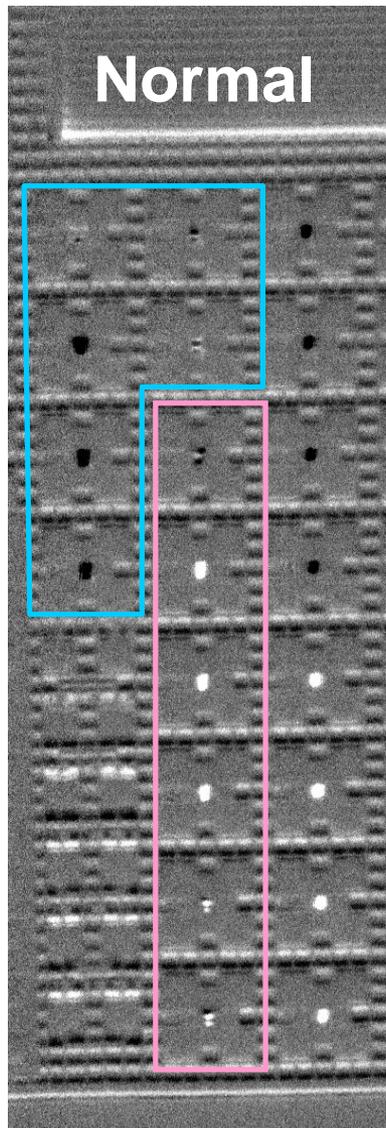
Mos Technology:  
MPU 6502



空間分解能は現在3μm

# 故障したMOSFETのLTEM像

LSI failure can be detected by comparing LTEM images of damaged chip to normal chip.



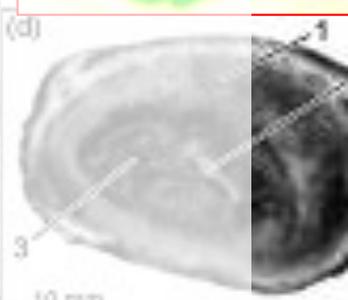
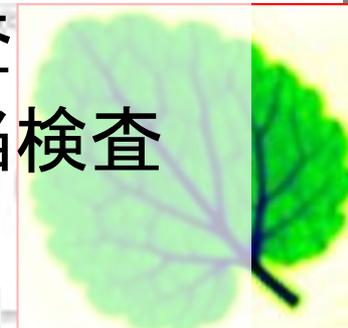
故障したMOSFETからの  
THz放射波形が反転

## テラヘルツ波の応用可能性

(a) (b) (c)

郵便物や小包中の禁止薬物・爆発物などの検査  
空港などでの爆弾・ナイフなどの所持検査  
セラミックやプラスチック製品の内部欠陥検査  
病院で渡される包装薬の誤成分チェック  
薬品工場での異種錠剤混入検査  
医薬錠剤の多層コートなどの品質検査  
LSIチップの断線検査や故障診断  
などなど無数に可能性が！

近未来の検査技術  
いまはまだ装置の値段が高い。。。  
10mm



Hertz が電磁波を発見したとき、生徒の一人が何の役に立つのかと尋ねた。



<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%8F%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%A%A%E3%83%92%E3%83%BB%E3%83%98%E3%83%AB%E3%83%84> 2019/9/9

(Heinrich Rudolph  
Hertz, 1857~1894)  
30歳で電磁波を発  
見し37歳で没

**“It is no use whatsoever,”** he replied.

**“This is just an experiment that proves Maestro Maxell was right, we just have these mysterious electromagnetic waves that we cannot see with the naked eye. But they are there.”**

**“So, what next?”** asked one of his students at the University of Bonn.

Hertz shrugged. He was a modest man, of no pretensions and, little ambition.

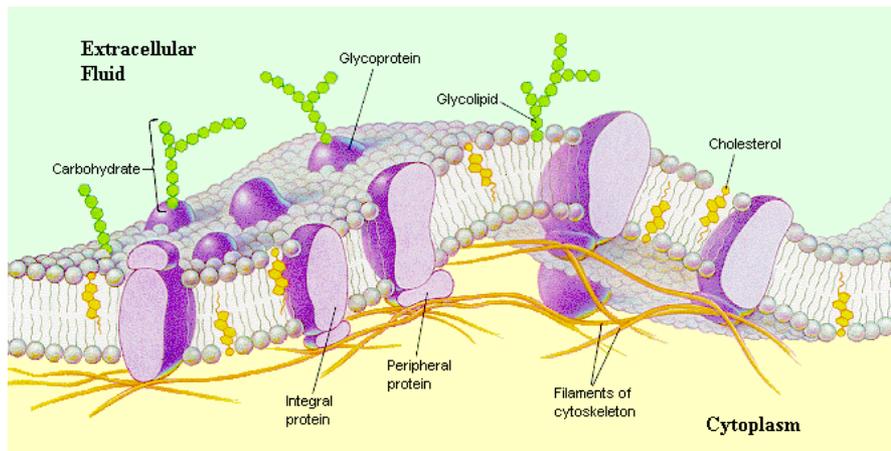
**“Nothing, I guess.”**

# 細胞膜のテラヘルツ帯共鳴振動仮説

## フレリッヒ仮説

「細胞膜にはコヒーレントでエントロピーが最低のサブTHz帯周波数の縦型電気振動が存在し、細胞全体や器官などにわたるレーザー光とよく似たマクロなスケールの位相相関を生じ、その秩序性の自己形成や細胞分裂の誘起、さらには制御の機序、酵素反応の特異性や驚異的な高効率性などを司っている」

しかしながら、検証実験に不可欠とされる広帯域波長可変ミリ波・テラヘルツ波光源は乏しく、適切な検証実験が行なわれることなく今日に至っている



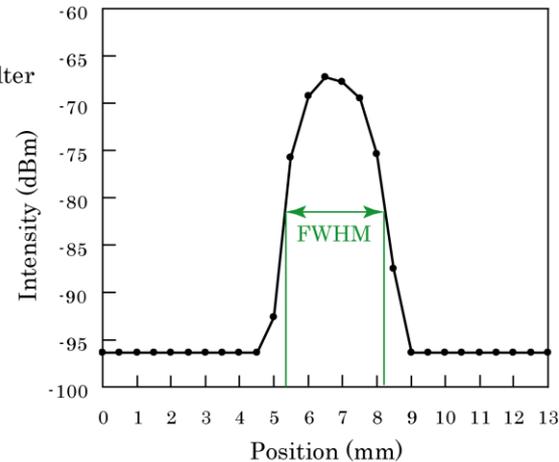
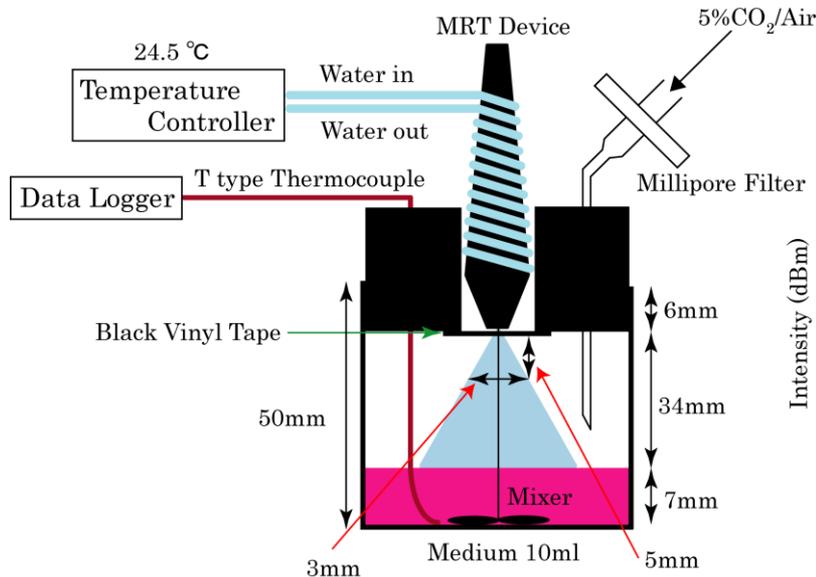
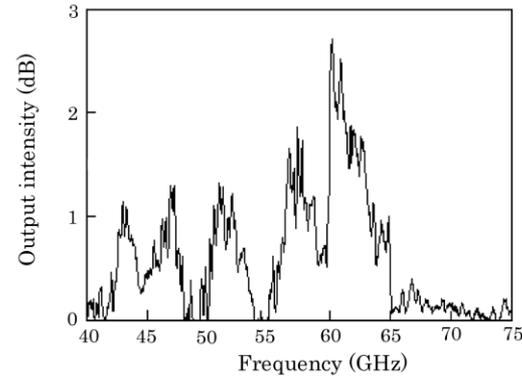
細胞膜中の音速を1500m/s  
と仮定すると共鳴周波数は  
 $1500 / 20 \times 10^9 = 75\text{GHz}$   
付近と長年考えられていた  
(それに基づく製品も多数)

## フレリッヒ仮説に関する過去の研究

出典等	照射周波数	実験内容	結果
Webb, 1969, サスカチュワン大, (加).	64-75GHz	大腸菌の吸収スペクトル	周波数に依存して変化
ソ連科学協議会	30-50GHz	イースト菌の分裂速度, カンジダの分裂速度, 大腸菌のコリシン合成速度など	周波数に依存して変化(強度に依存せず)
Grundler, Frohlich, 1977, Max Plank研, (独)	41.4-41.8GHz	イースト菌の増殖速度	周波数に依存して変化
Gandhi, 1980, デリー大, (印)	26.5-90GHz	大腸菌, イースト菌, カンジダ等の吸収スペクトル	周波数依存性なし
Furia, Gandhi, 1986, ユタ大, (米)	41.4-41.8GHz	イースト菌の増殖速度	周波数に依存せず
Grundler, 1988, Max Plank研, (独)	41.4-41.8GHz	イースト菌の増殖速度	確かに周波数に依存する
V.R. Makar, M.C. Ziskin, 2005, テンプル大, (米)	42.2GHz	NK活性(CD69)	活性化

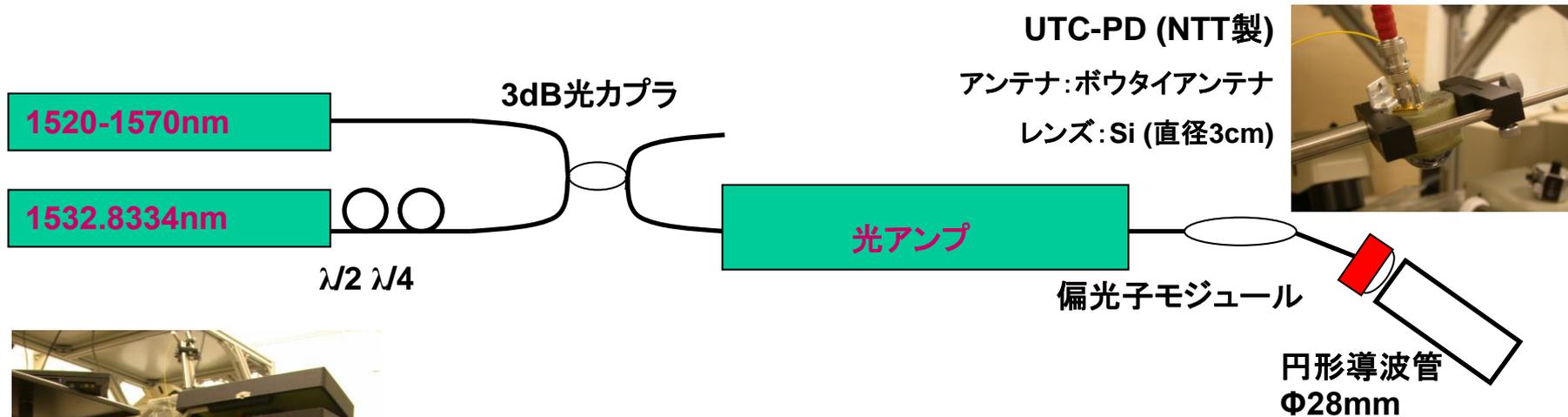
# フレイリッヒ仮説に基づく治療器 (50-75GHz)

## MRT (Microwave Resonance Therapy)



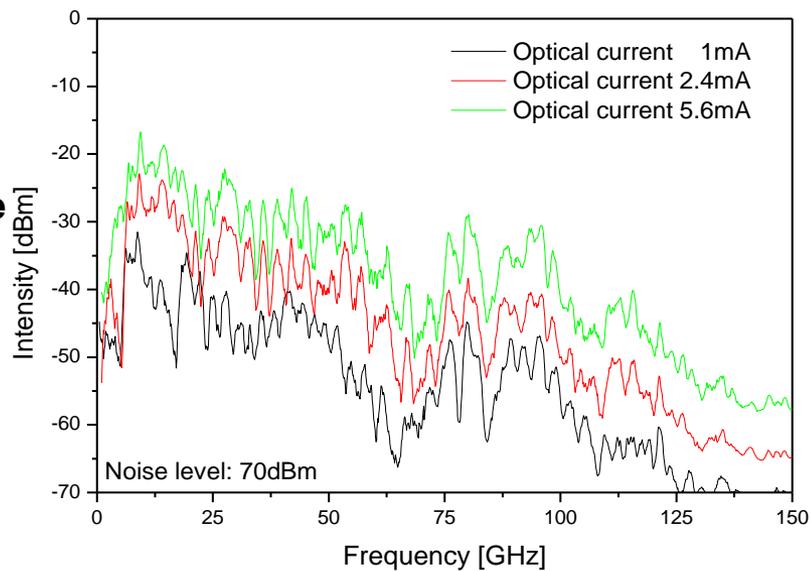
◆ 照射強度  
5.07 [nW/cm<sup>2</sup>]  
(培地表面)

# 広帯域周波数可変ミリ波光源 単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)



〈レーザー〉  
Wavelength References  
WR-LL DWDM Reference  
Laser  
(1532.83nm Acetylene lock)  
Output: ~-3dBm, PM

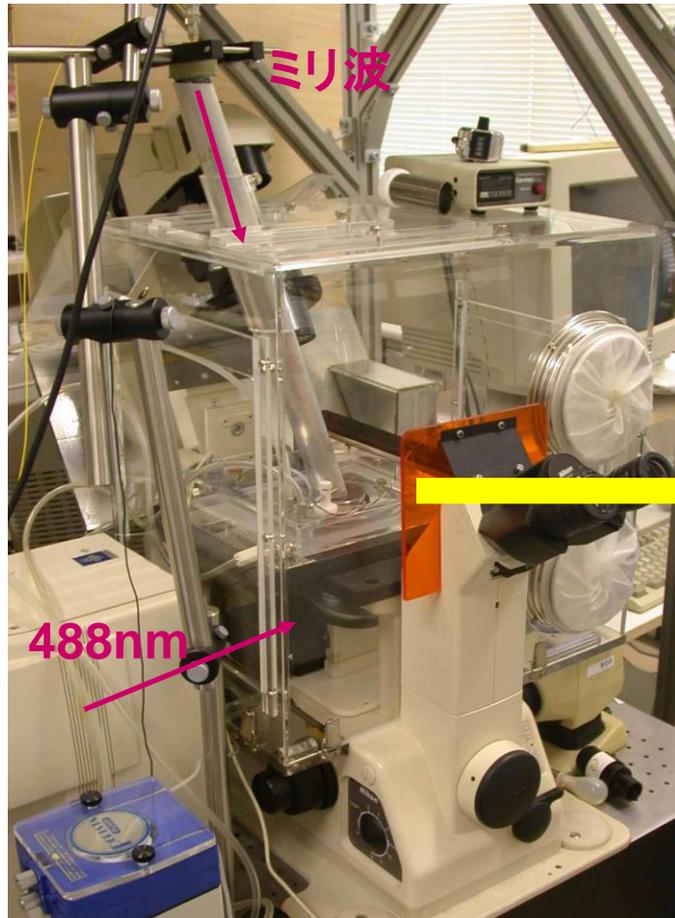
NEW FOCUS Video-Swept  
(1520-1570nm)  
Output: ~6dBm



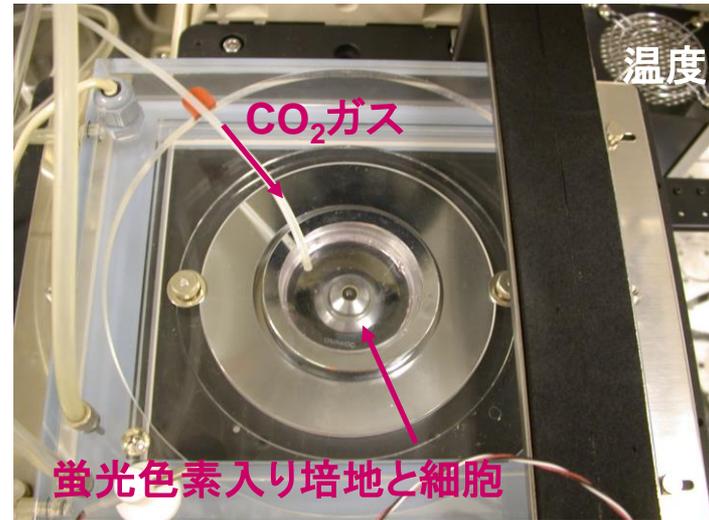
## 特徴

- 広帯域性 (1-100GHz以上)
- モジュールが小型

# 蛍光色素法による膜電位変化の検出



共焦点レーザー顕微鏡システム



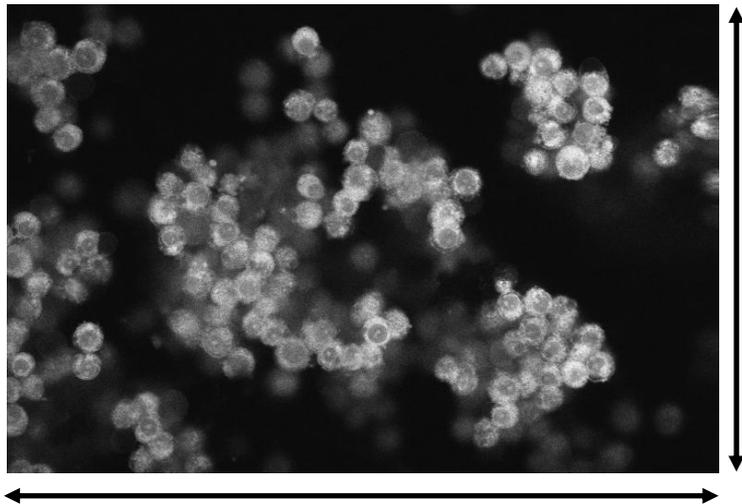
CO<sub>2</sub> 約5%, 温度37°C

ミリ波を照射したときの静止膜電位変化等を  
蛍光色素の蛍光強度によって  
リアルタイムで観察

# 照射実験結果 ～周波数依存性～

倍率 × 400

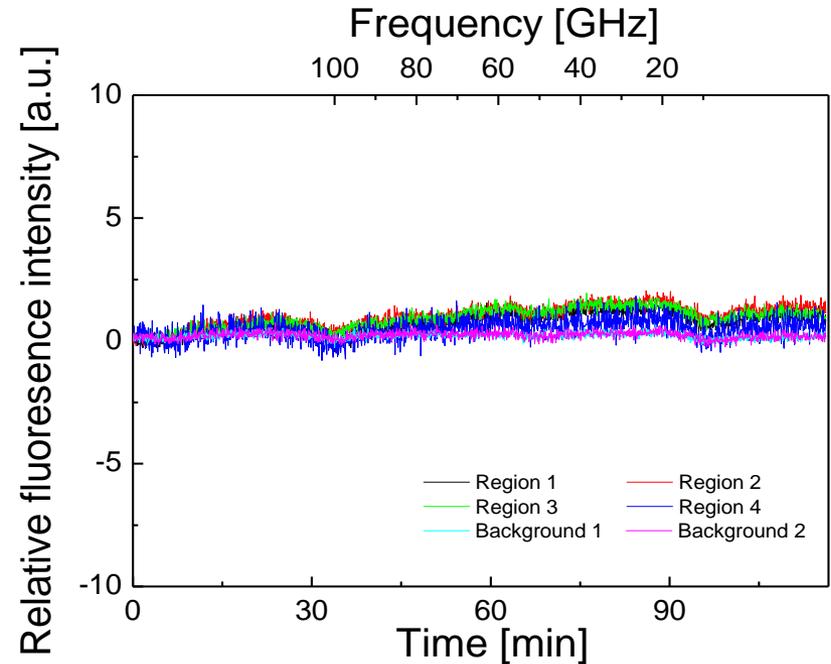
211 $\mu$ m



316 $\mu$ m

PC12細胞 DiBAC<sub>4</sub>(3)蛍光画像

768 × 512pixels(Pixel Size: 1.650 $\mu$ m)



現在のところ、100-10GHzを-0.1GHz/10secで(計150分)PC12に照射しても温度による揺らぎと区別できるほど顕著な静止膜電位の変化は見られなかった。

但し、癌細胞では、細胞膜の変形や接触阻止性がないことから期待薄

# 人体計測用高感度ミリ波帯分光器



# フレイリツヒ仮説の検証実験系

培養細胞(ファイibroブラスト)を用いて光照射を行い、経過観察を行い細胞に与える影響を確認する。

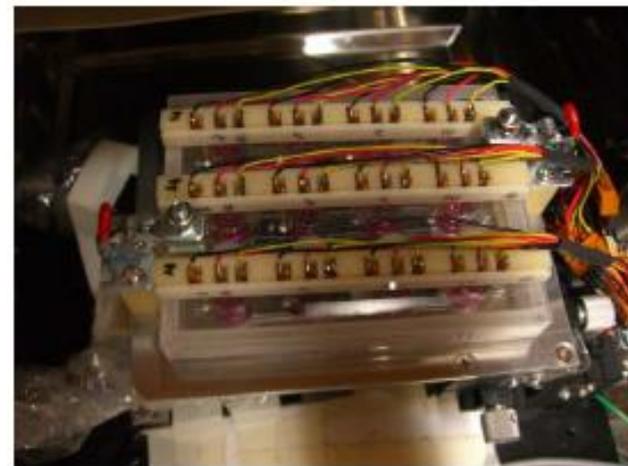
## 照射条件

- ・THz光源、
- ・THz光源(長時間連続照射用)
- ・コントロール

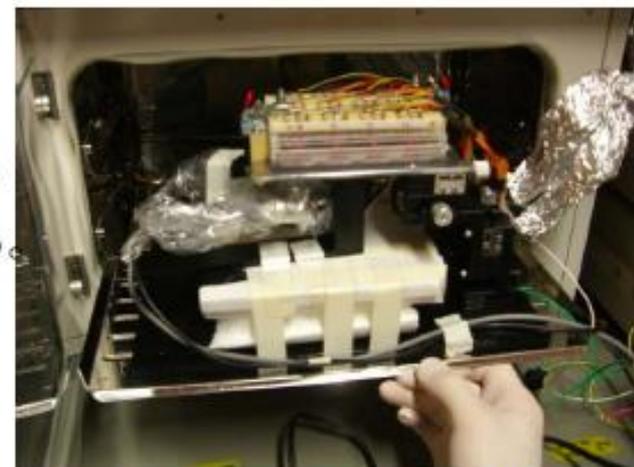
1. ファイibroブラスト細胞を3万個ずつ3×4の培地に浸し、2日間放置し培地底面に細胞が全て接着した状態にする。
2. CO2インキュベータ内に1の培地+細胞、照射器を入れる。
3. 照射を行う。

90分程放置後、照射開始。

最初の6時間程は1時間毎に照射のON、OFFを行い、6時間後はCのみ15時間以上の連続照射を行った



3×4の細胞を観測



細胞の下に照射器を設置し、インキュベータに入れた。

- 研究は上手くいくとは限らない
- 苦勞の末のブレークスルーは  
大きな成果を産む
- テラヘルツ光源はD4秋にようやく成功
- 過去20年フレーリッヒ仮説では苦戦中