

テラヘルツ波パラメトリック発生検出 システムの進展

川瀬晃道, 村手宏輔

名古屋大学 電子工学専攻

- THzパラメトリック発生/検出/増幅
- 遮蔽物越しの試薬のTHz分光
- 分光イメージング / THz-CT



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
検査

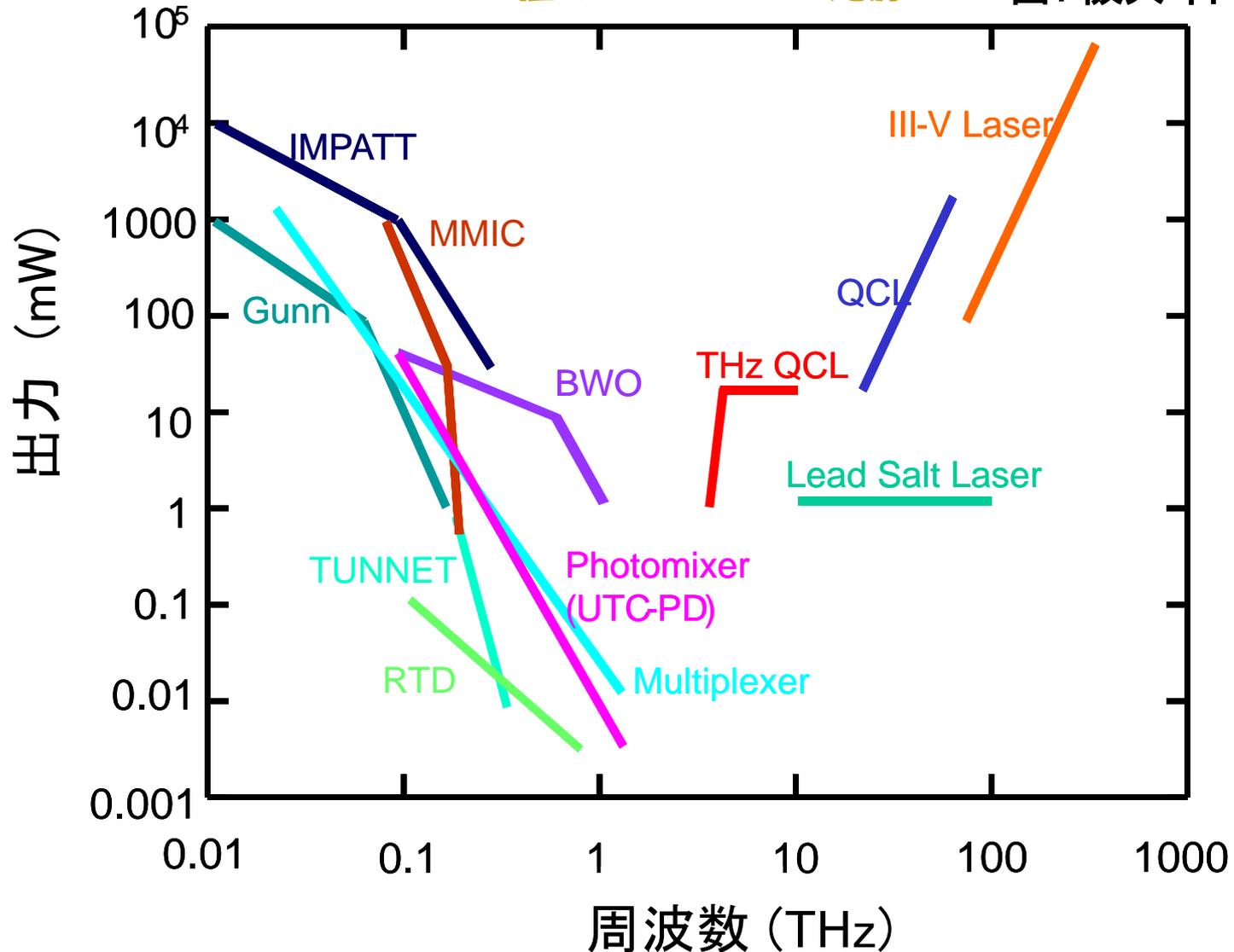
医薬品
検査

膜厚・フィル
ター検査

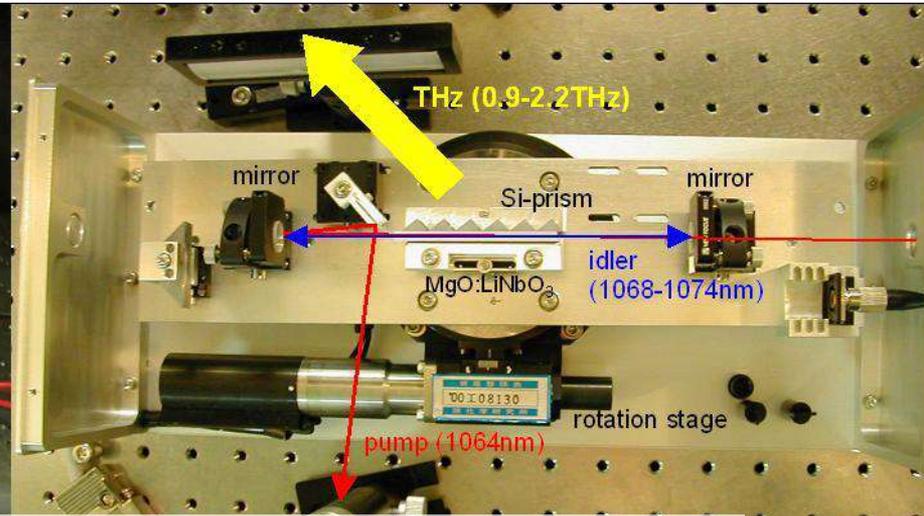
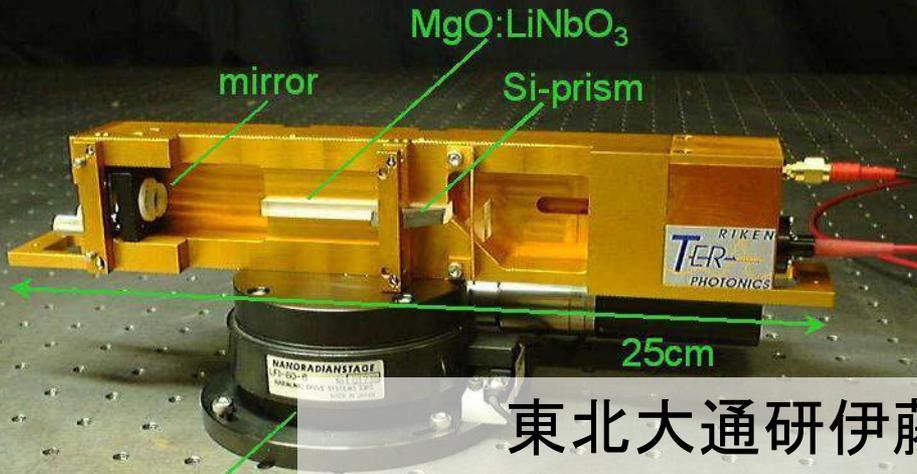
実用化へ向けた光源の課題はTHz-Gap

種々のテラヘルツ光源

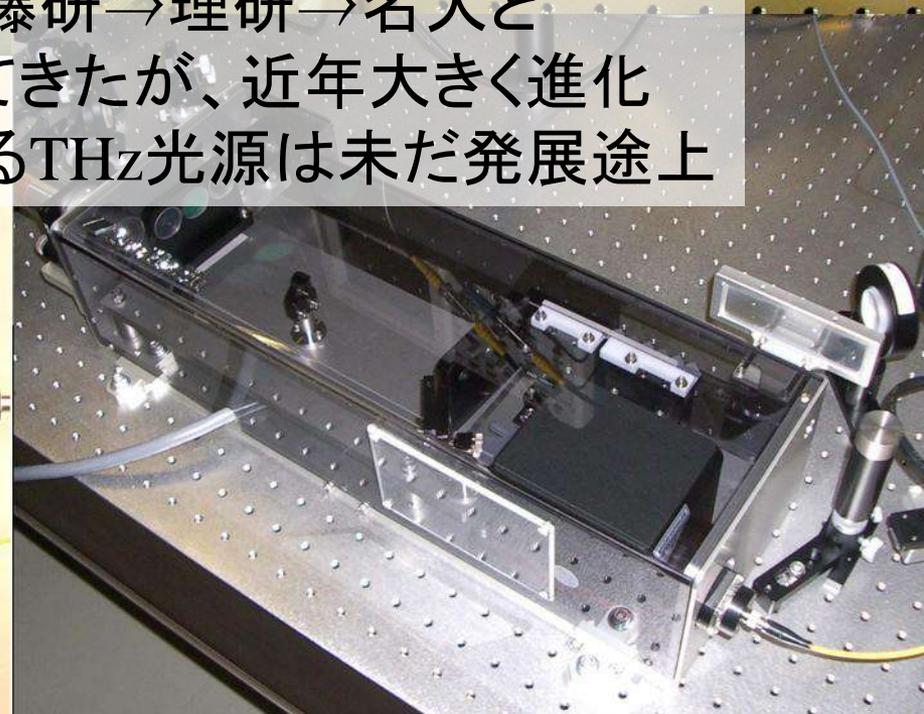
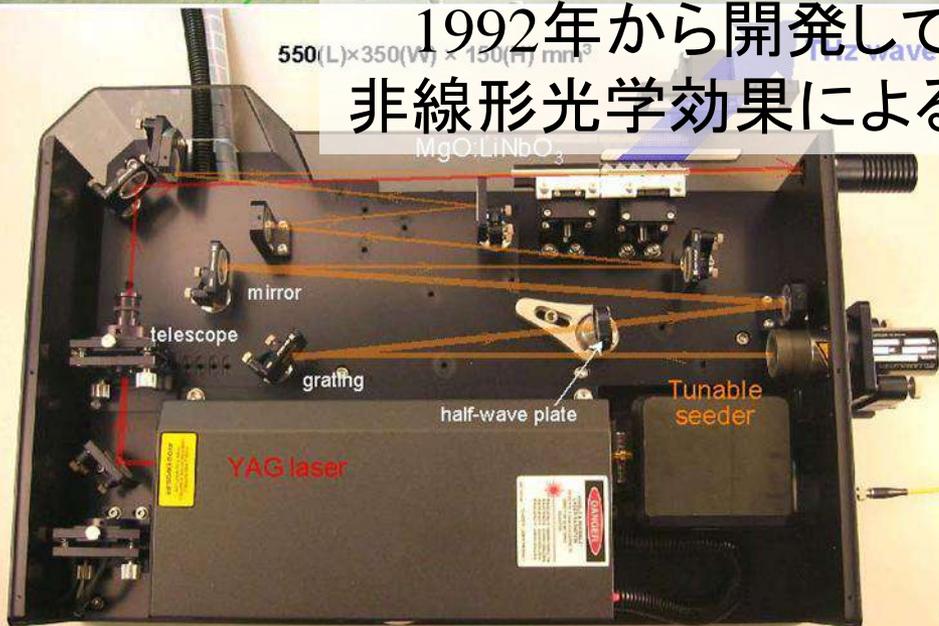
図: 阪大斗内教授提供



広帯域波長可変テラヘルツ波パラメトリック光源

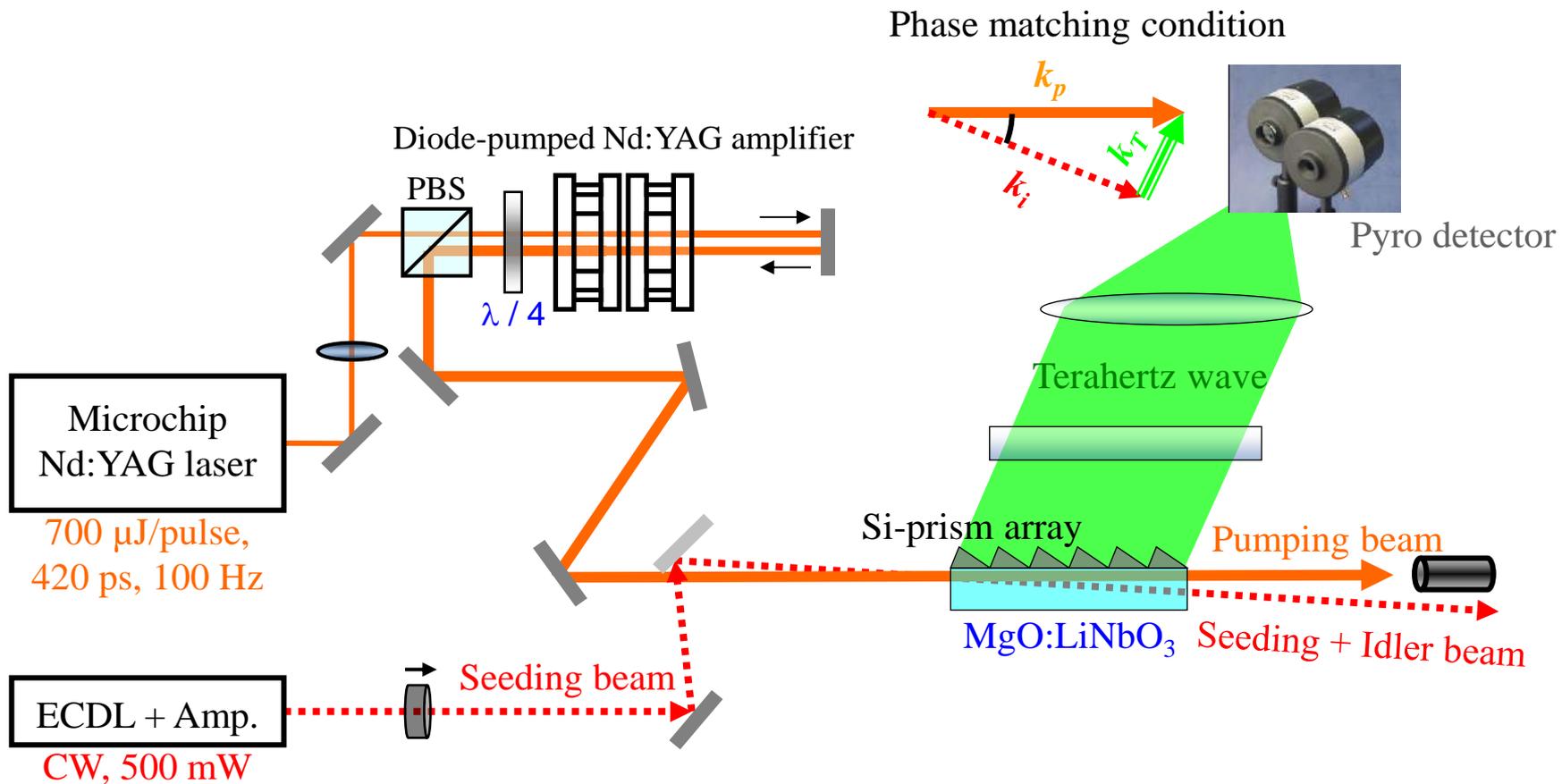


東北大通研伊藤研⇒理研⇒名大と
1992年から開発してきたが、近年大きく進化
非線形光学効果によるTHz光源は未だ発展途上



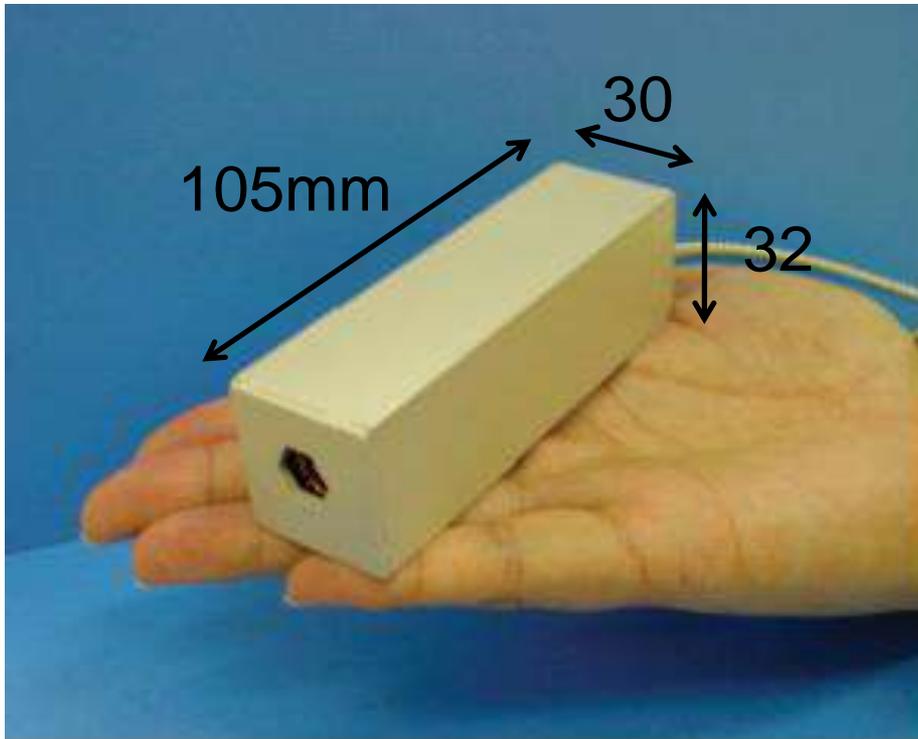
増幅器付き μ -YAG励起 is-TPGによる高出力THz発生

Injection Seeded THz Parametric Generator



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



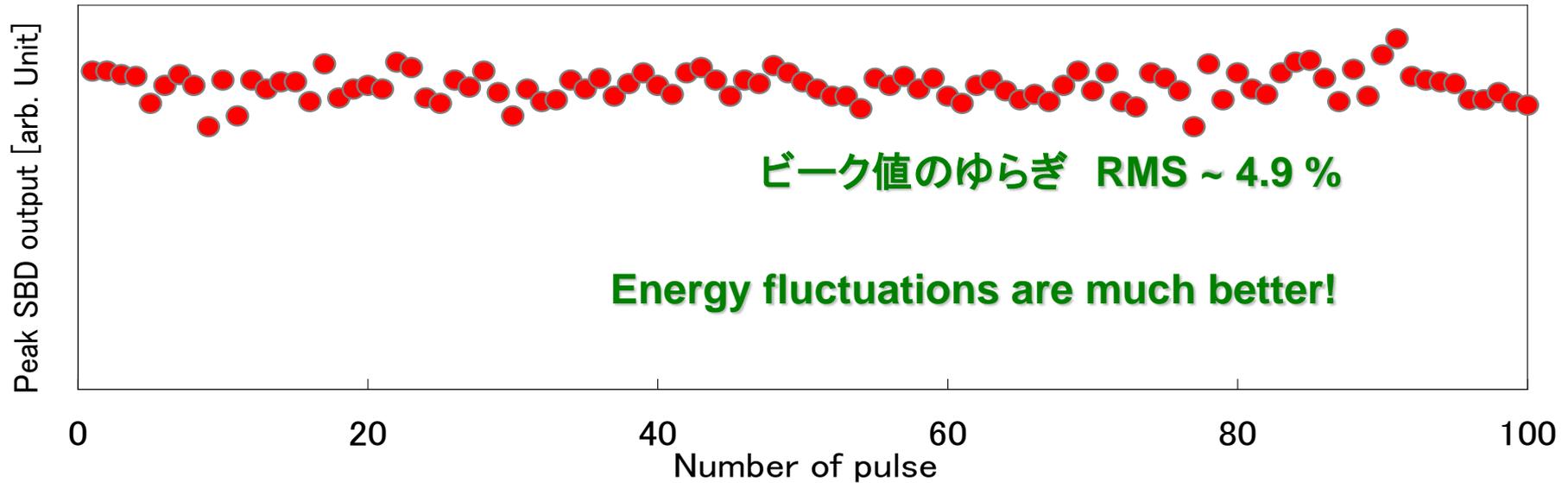
スペクトル幅 : < 0.009 nm
出力 : $960 \mu\text{J/pulse}$
最大尖頭値 : 1.7 MW
パルス幅 : 480 ps
横モード特性 : $M^2 < 1.05$
繰返し : 100 Hz

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)

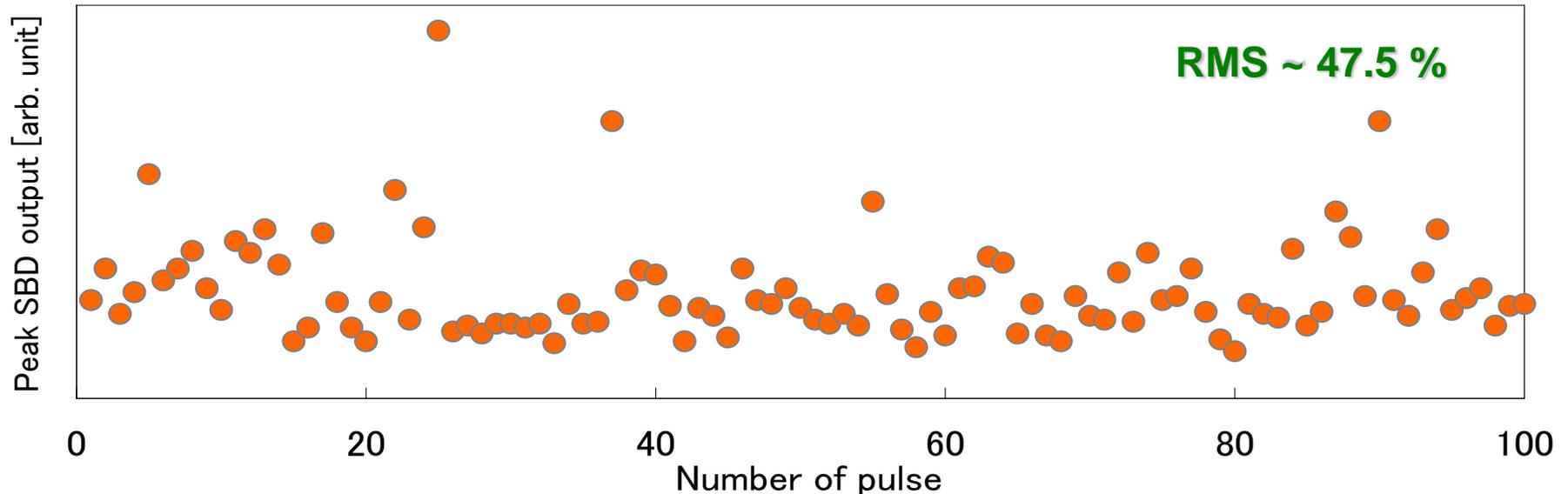
N. Pavel, T. Taira, et al.,
JJAP 40, 1253 (2001)

μチップレーザー励起によるテラヘルツ出力の安定化

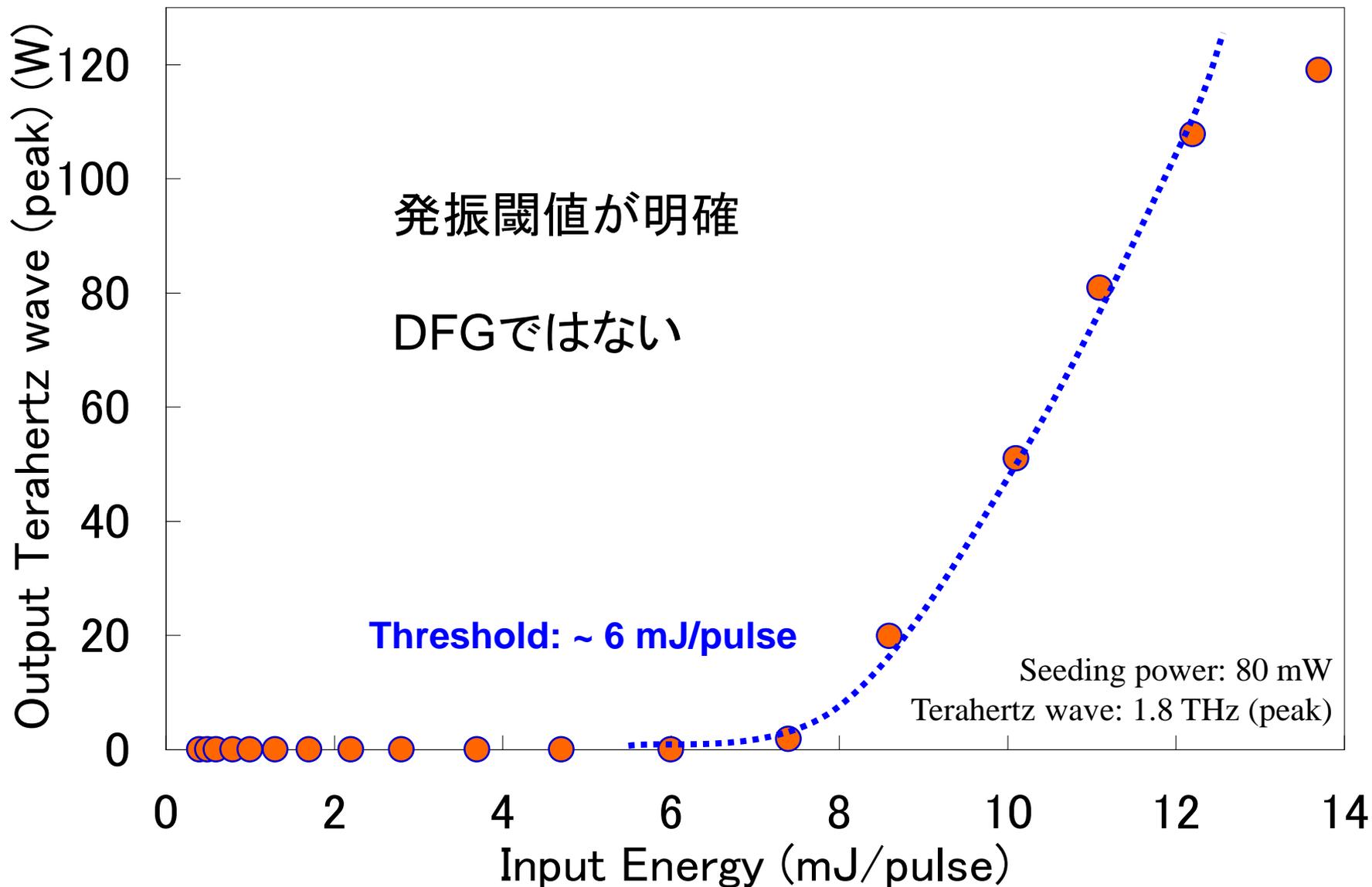
is-TPG pumped by μ-YAG ⇒ Stable



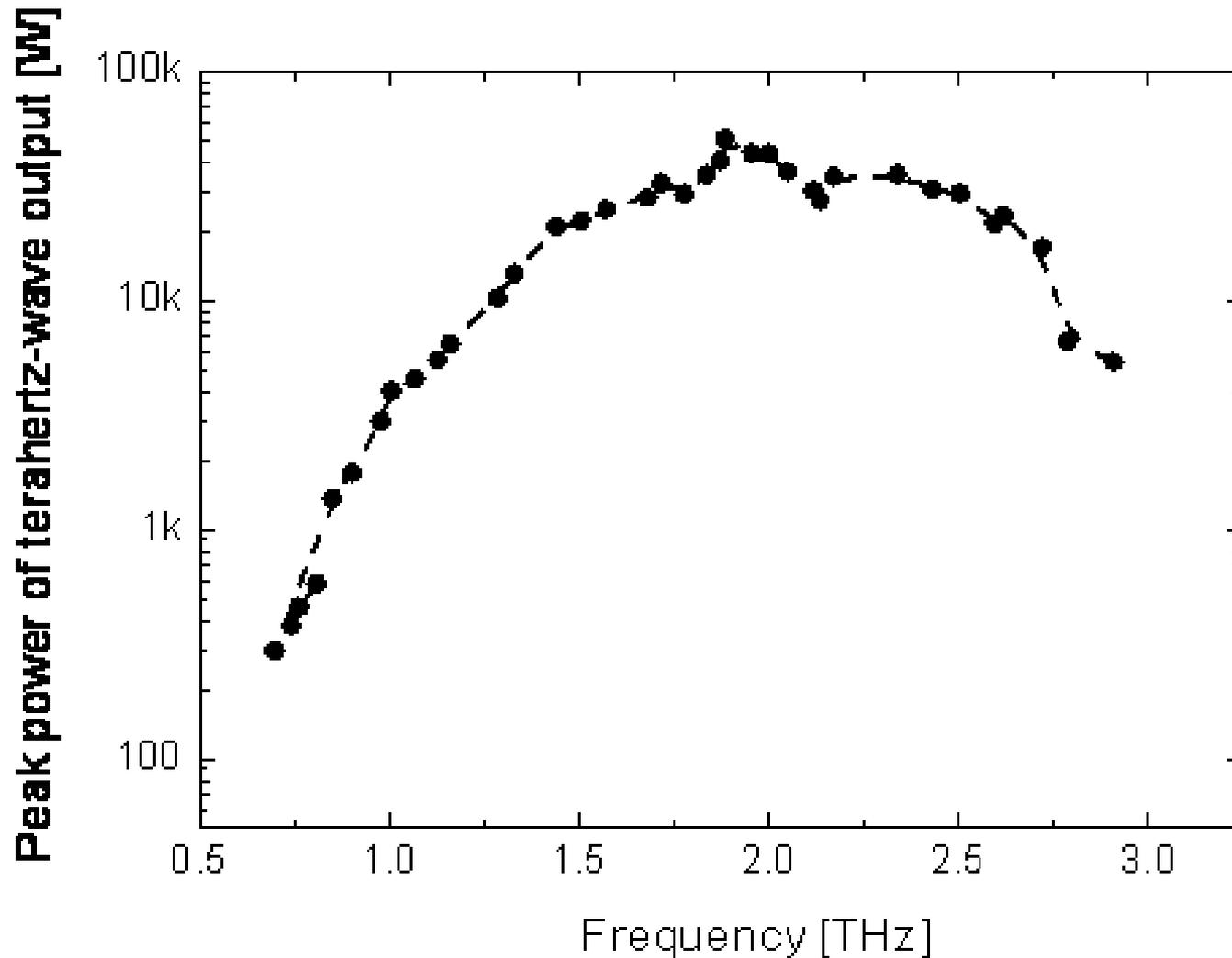
TPO pumped by Q-sw flash lamp YAG ⇒ Unstable



is-TPGの入出力特性

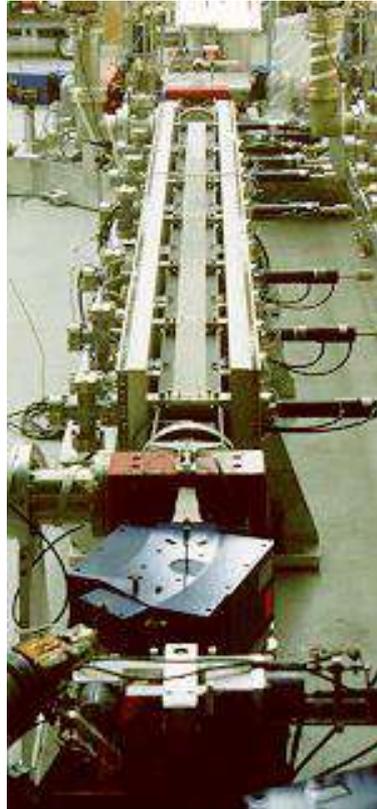


is-TPGによる50kW発生

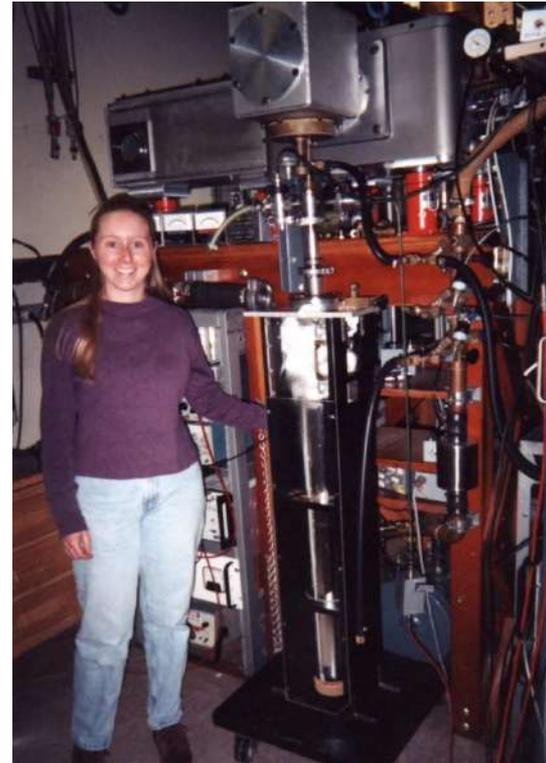


この帯域の波長可変FELの出力は 約1kW@peak
厚手の対象物のイメージング・分光、テラヘルツ非線形分光、など

1-3THz域をカバーする 既存の広帯域波長可変THz波光源

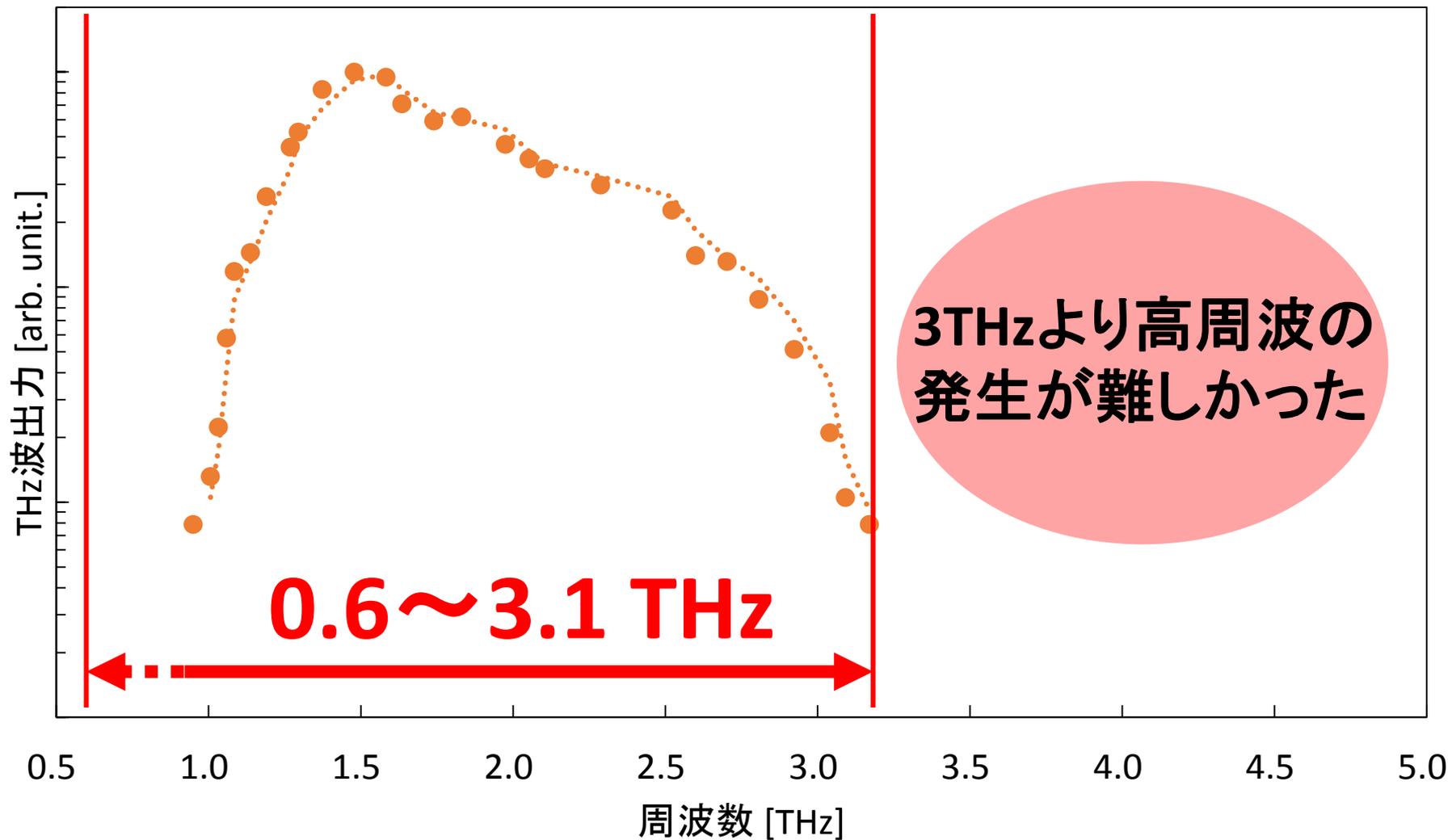


自由電子レーザー
波長可変域: 70~330 μ m
ピーク出力: 約 1kW
パルス幅: 約10 μ s
繰返し: 7Hz



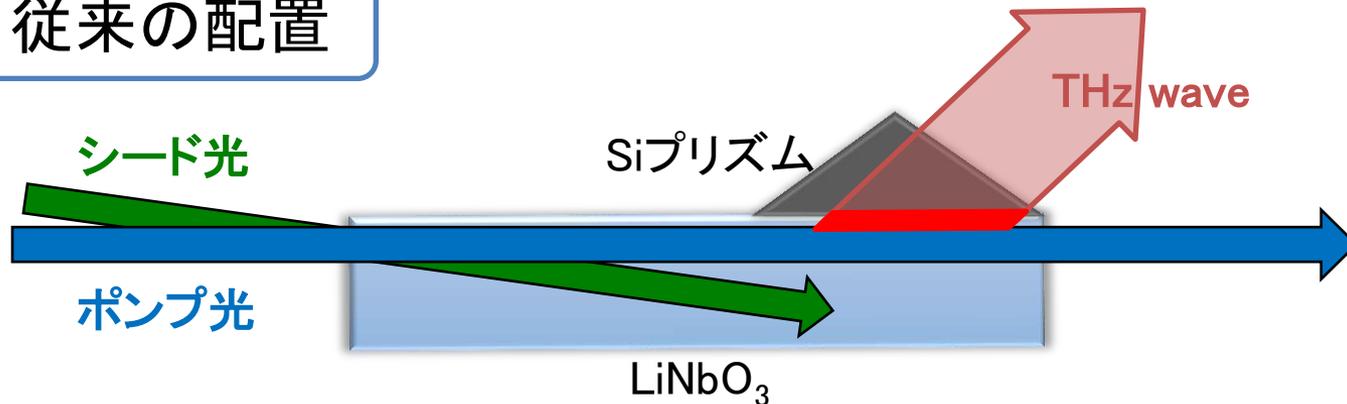
p型Geレーザー
波長可変域: 80~300 μ m
ピーク出力: 約1 W
パルス幅: 約10 μ s
繰返し: 7 Hz

従来のis-TPGスペクトル

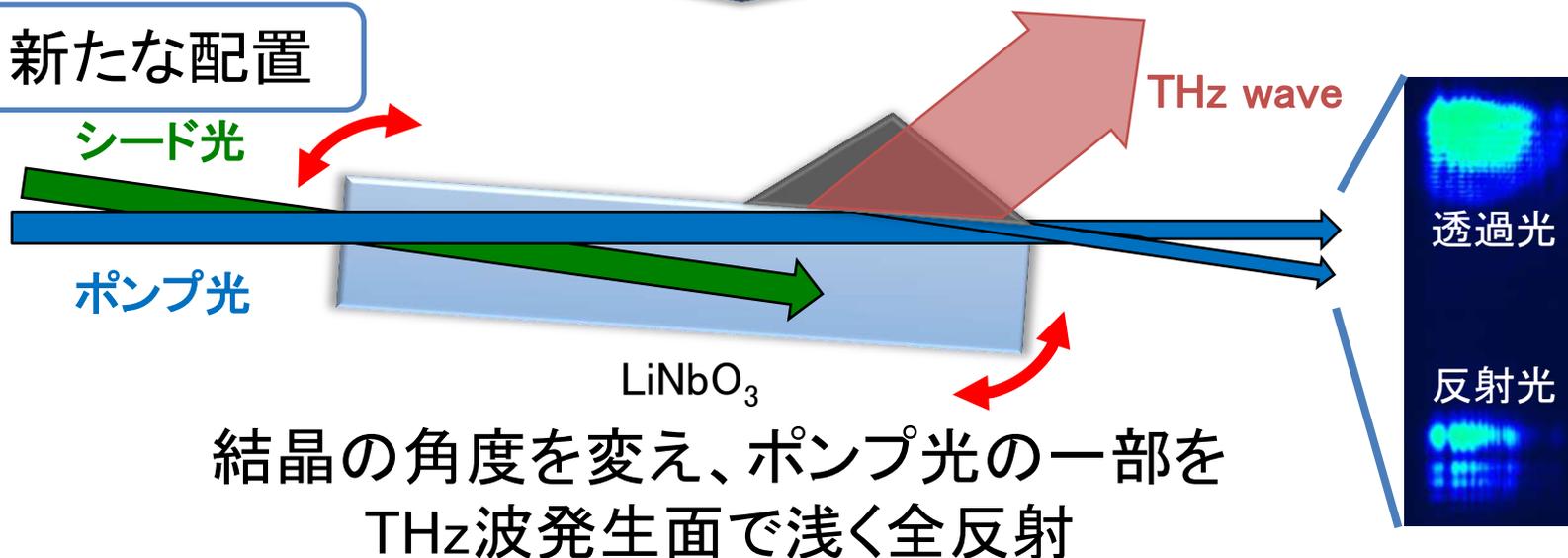


is-TPGの波長可変域の拡大

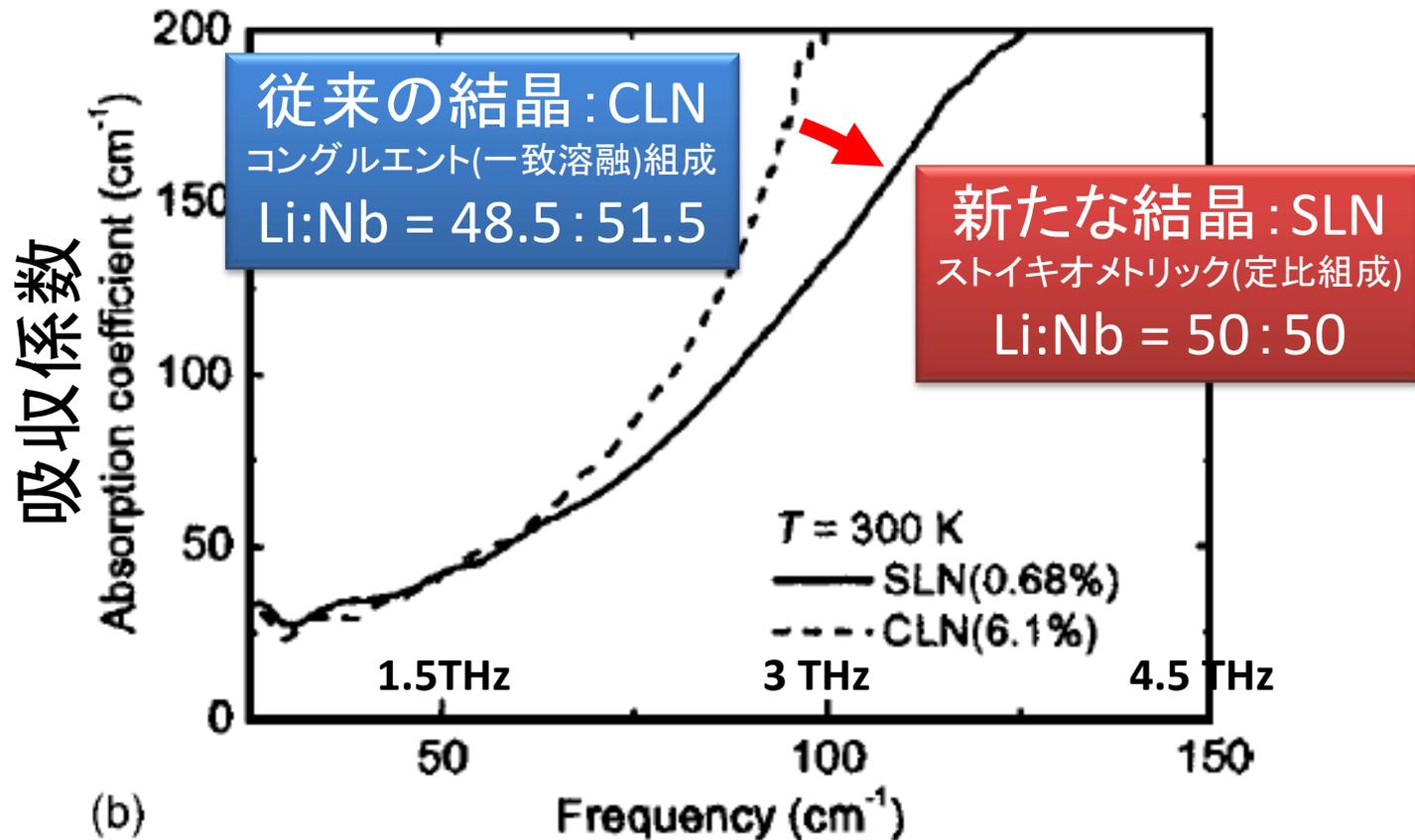
従来の配置



新たな配置



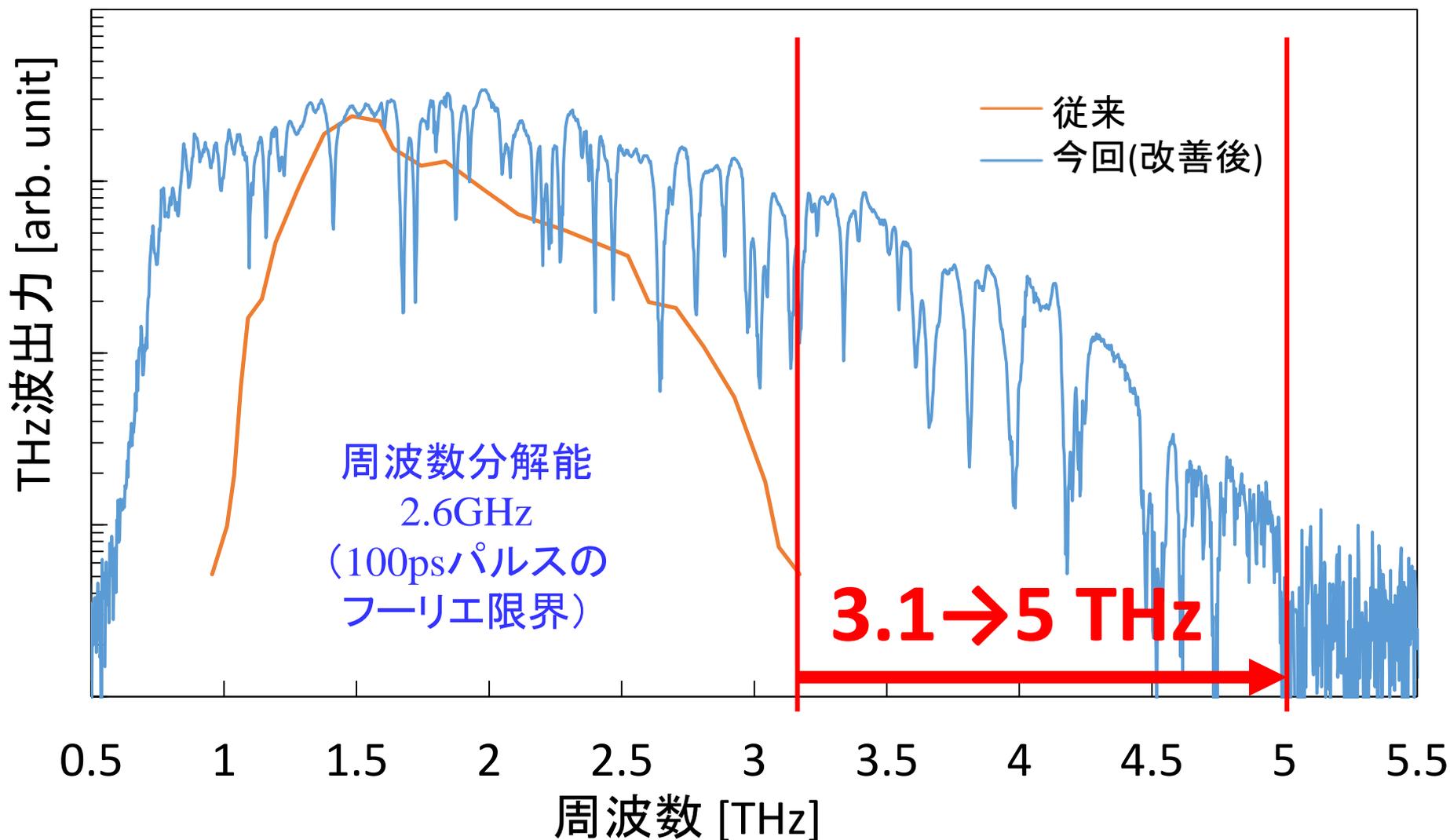
ストイキオメトリックLiNbO₃結晶に変更



高出力化・広帯域化が予想される

L. Pálfalvi et al, *Journal of Applied Physics*, vol. 97, no. 12, p. 123505, 2005.

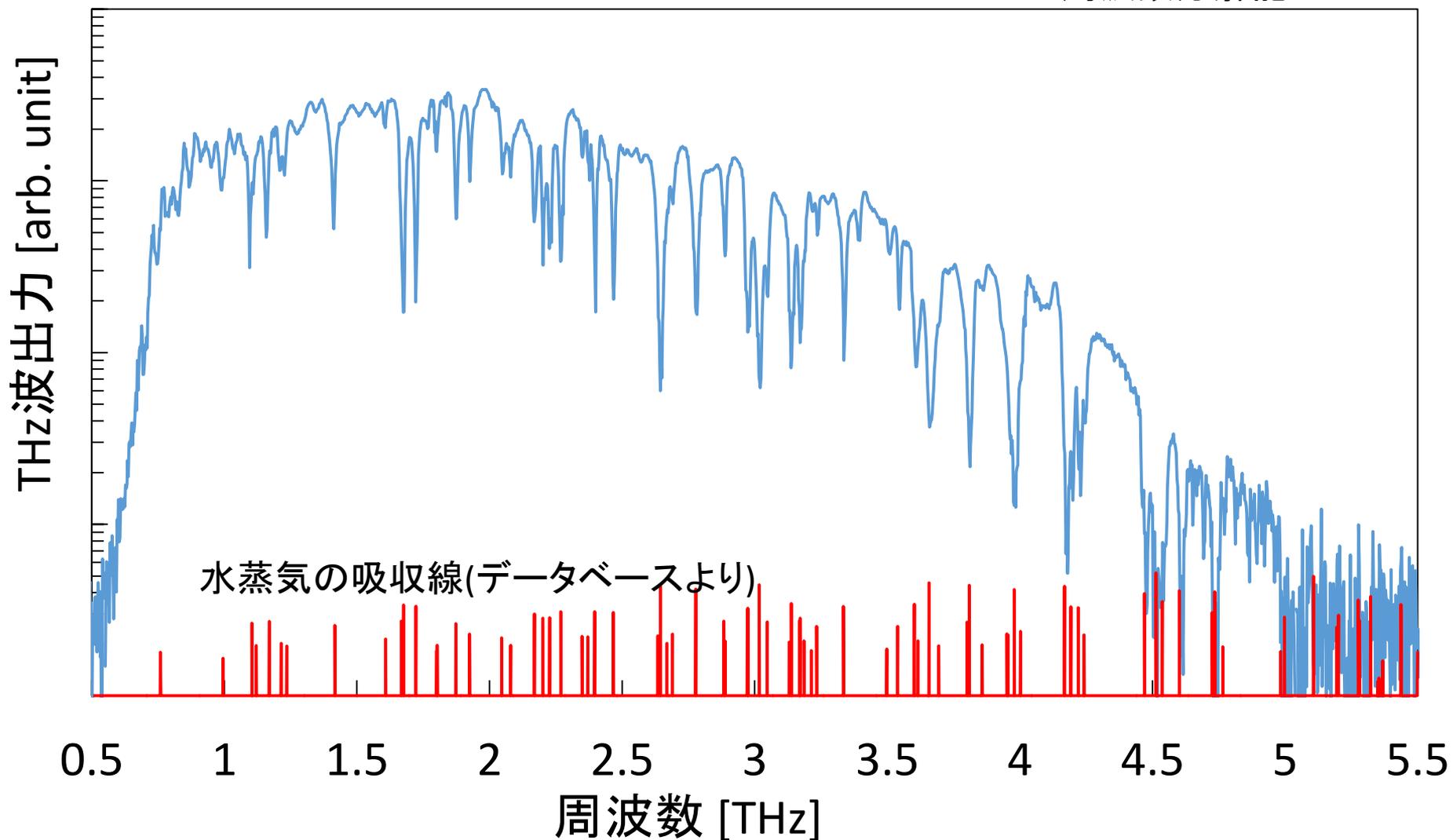
is-TPGの波長可変域の拡大



水蒸気吸収線で5THzまでの可変性を確認

水蒸気の吸収線もデータベースと一致

周波数分解能: 2.6GHz

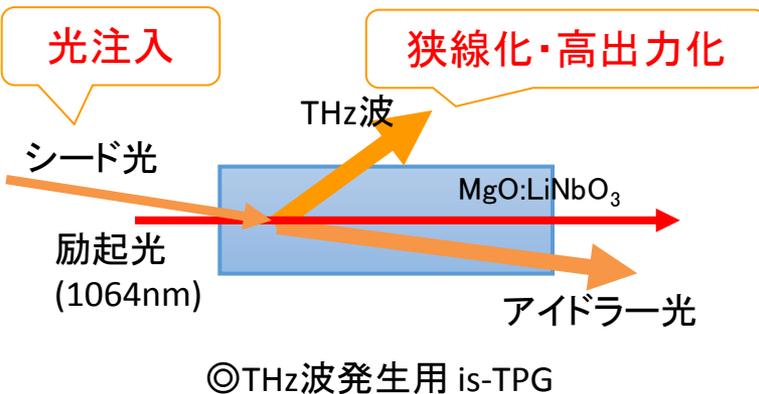


Submillimeter, Millimeter, and Microwave Spectral Line Catalog, accessed from the Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, via the World Wide Web (<http://spec.jpl.nasa.gov>).

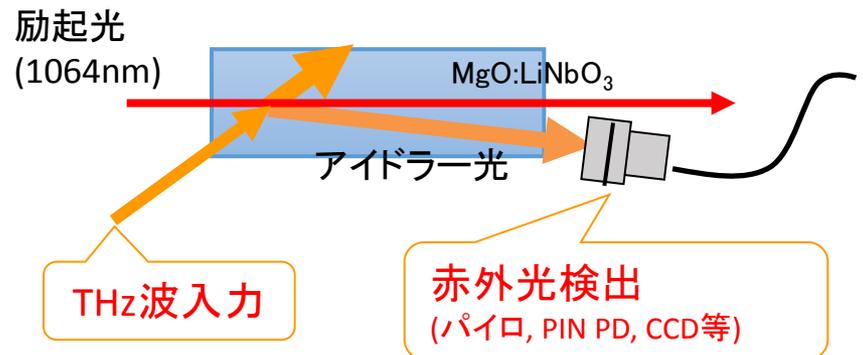
is-TPGによるTHz波検出

THz波のディテクタは
感度が不足

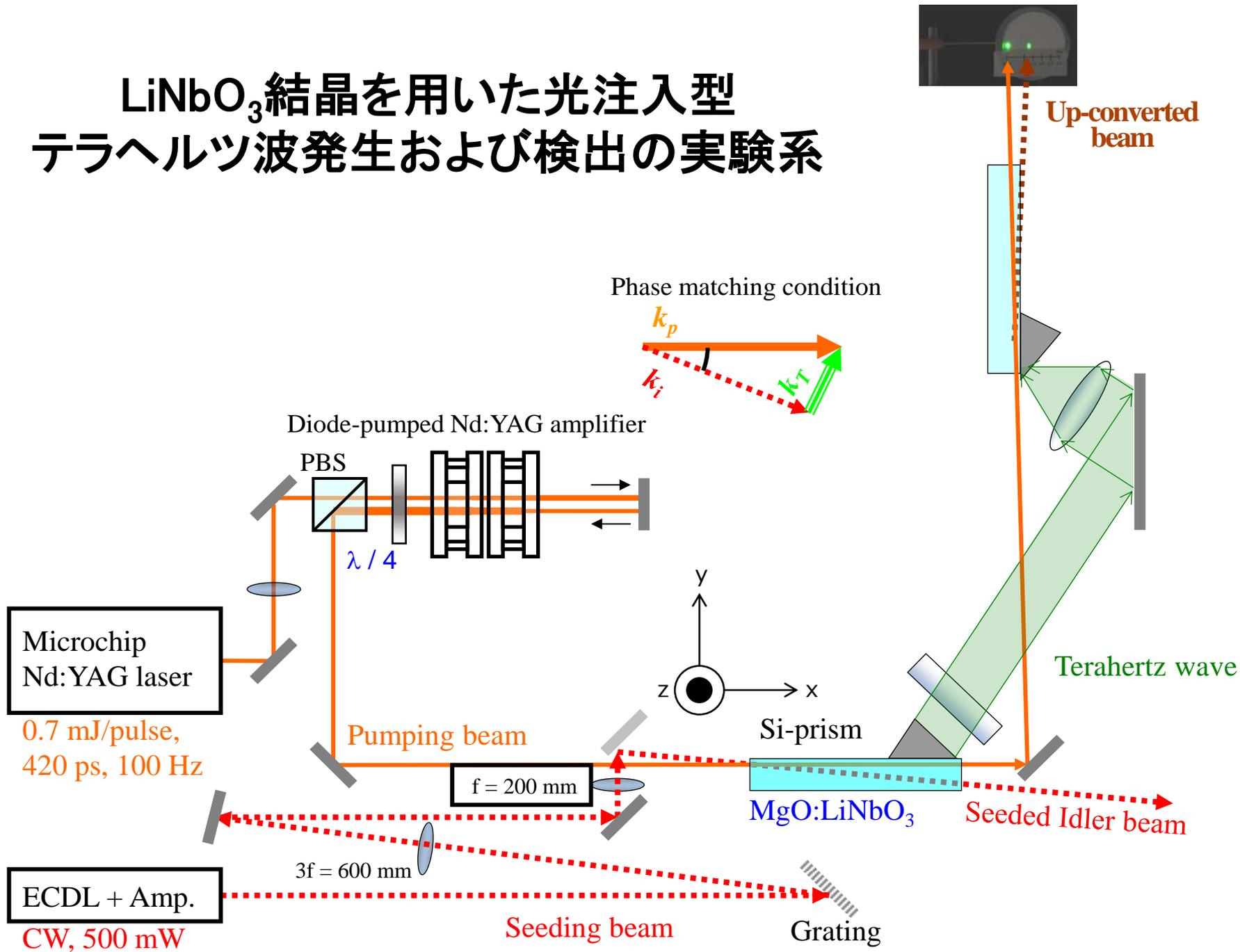
赤外光に変換することで
高感度検出



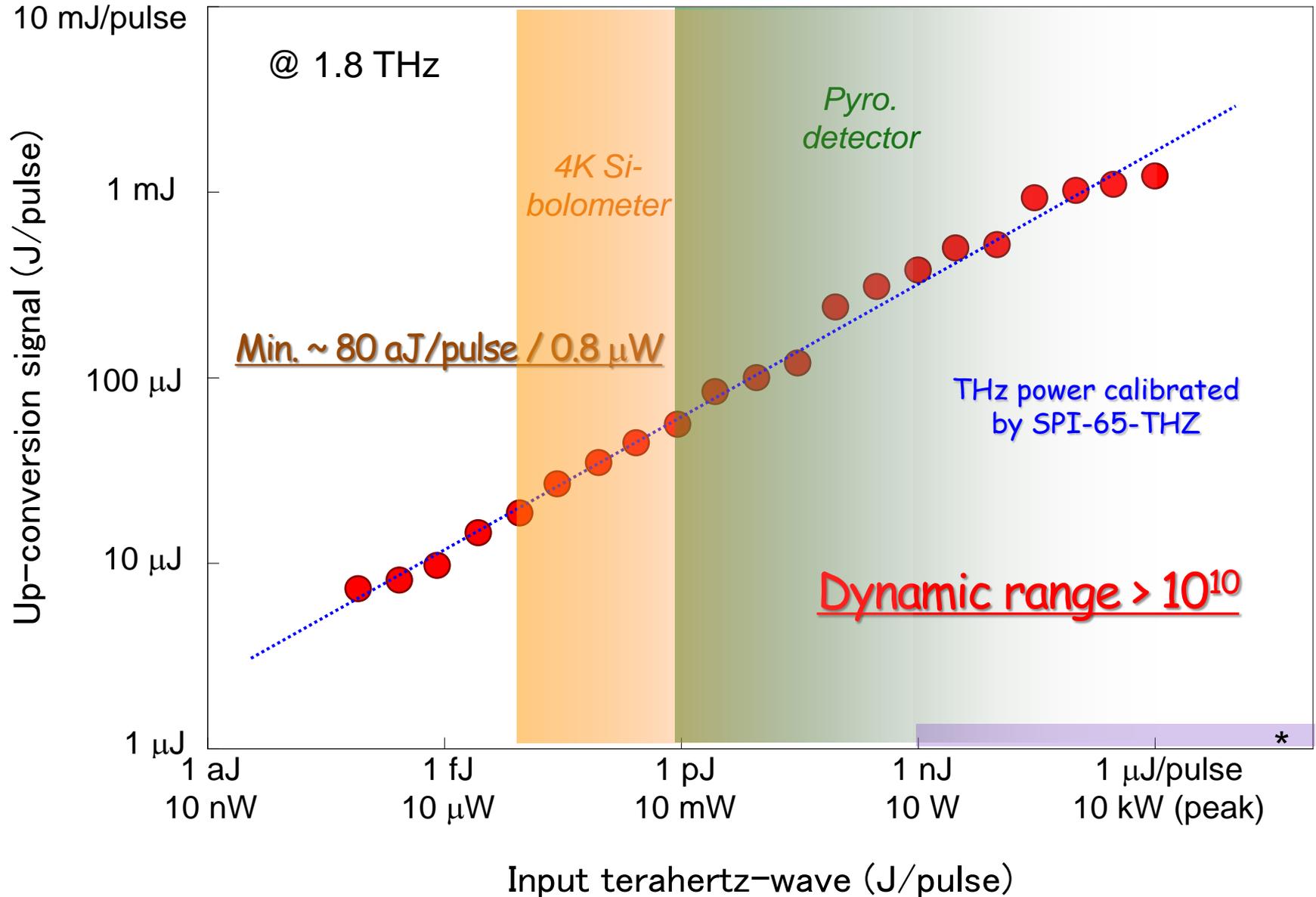
発生とは逆にTHz波を入力しアイドラー光を発生



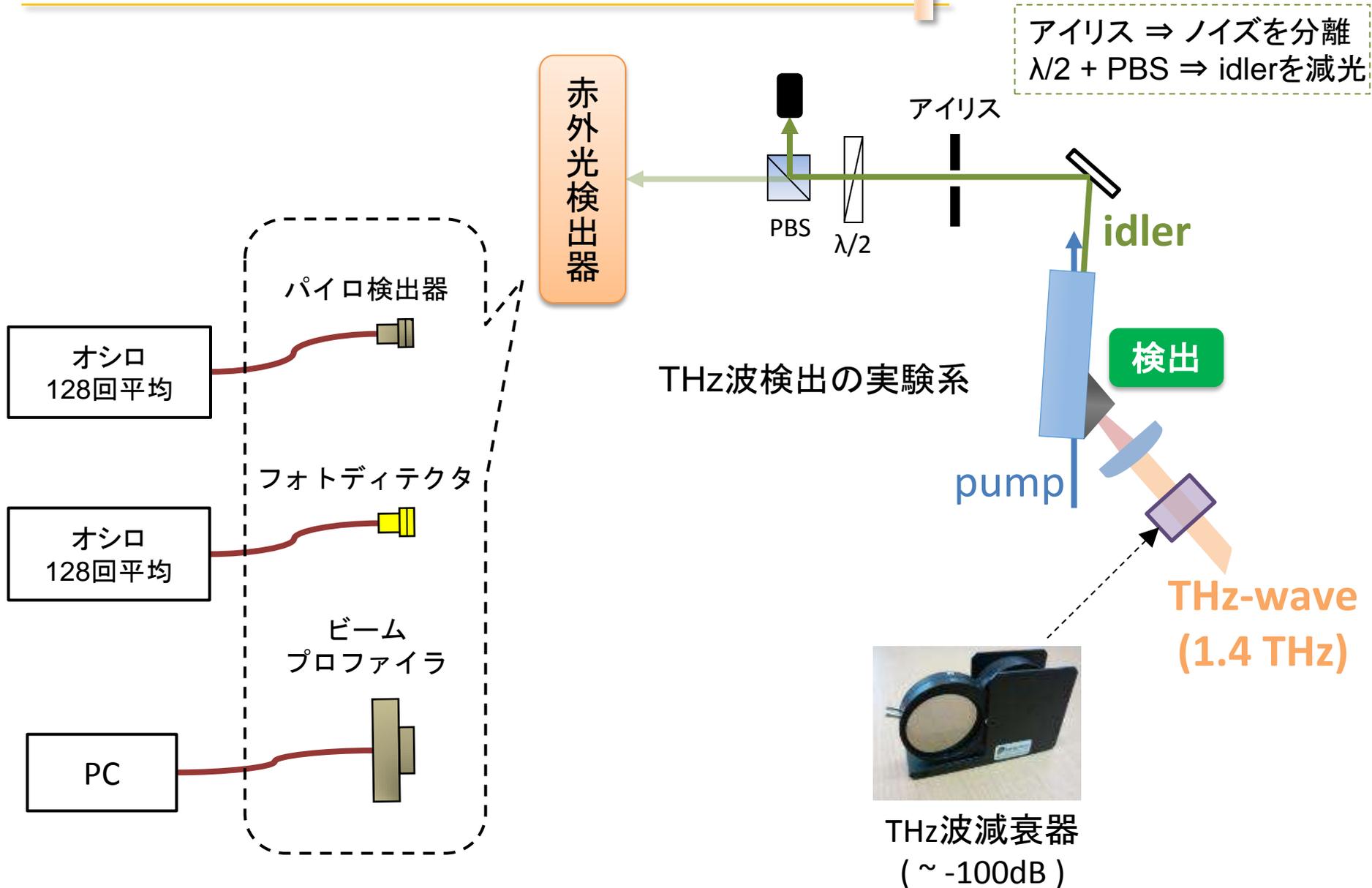
LiNbO₃結晶を用いた光注入型 テラヘルツ波発生および検出の実験系



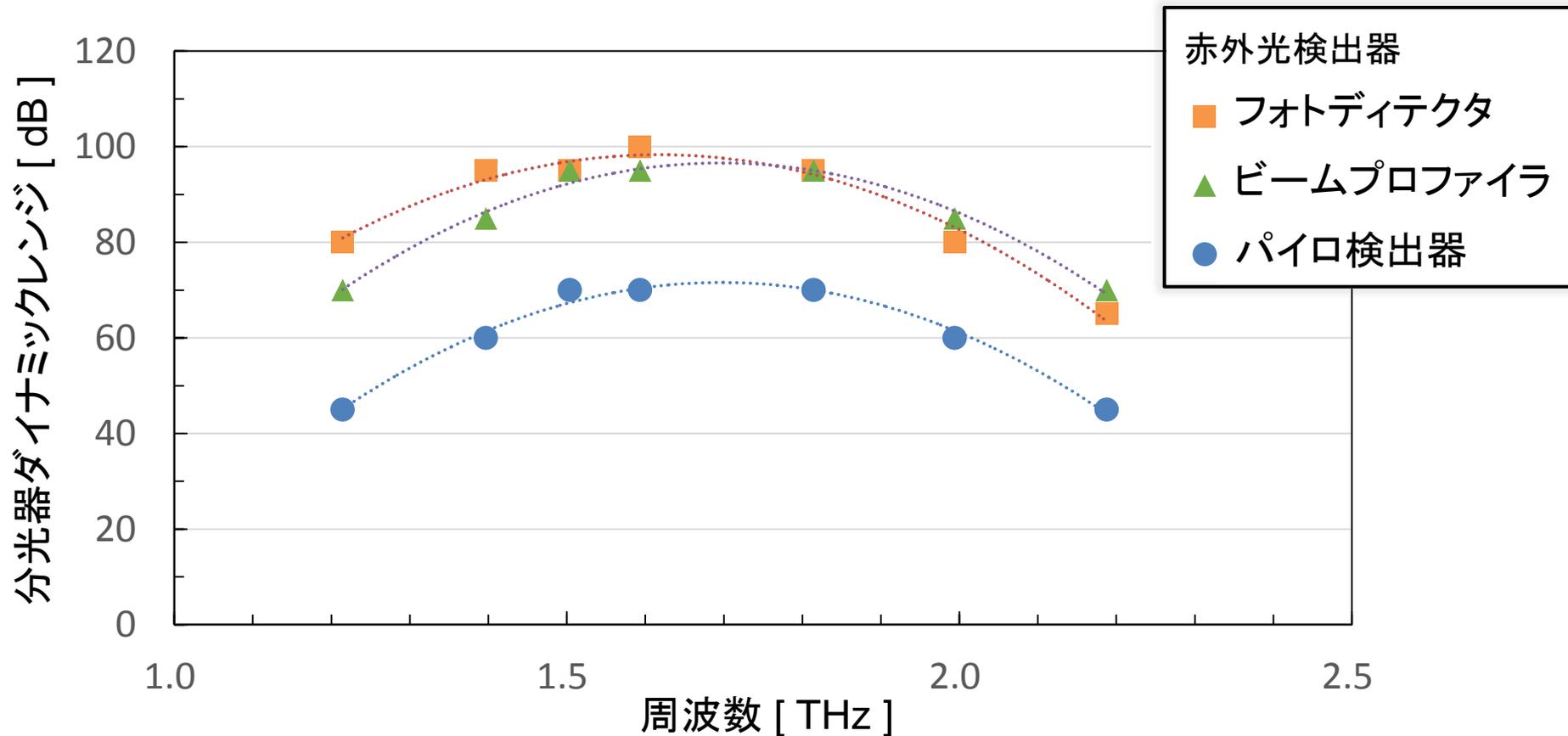
テラヘルツ波検出における入出力特性



赤外光検出器の比較実験



3種類の赤外検出器によるis-TPGのDNR比較

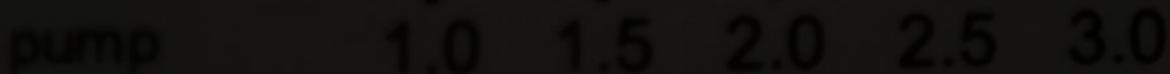


市販のフォトディテクタで100dBが得られる



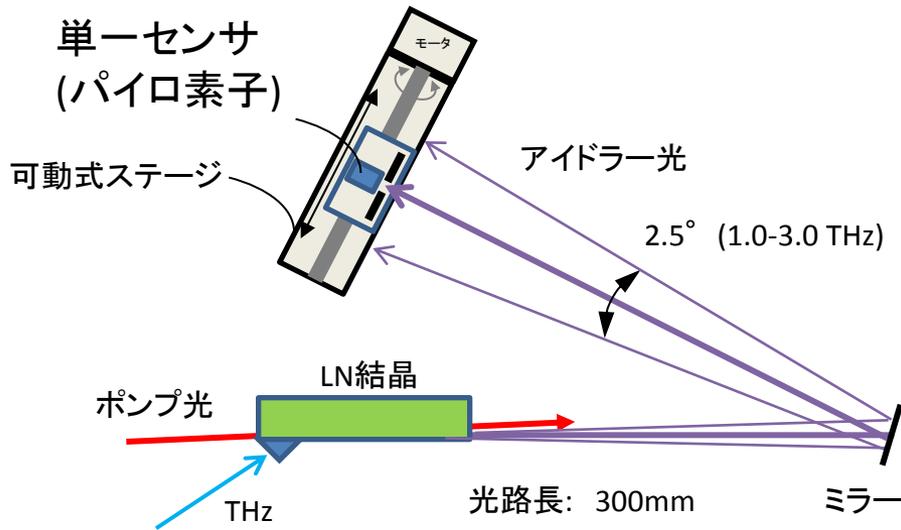
遮蔽物越しの透過分光への応用が期待

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

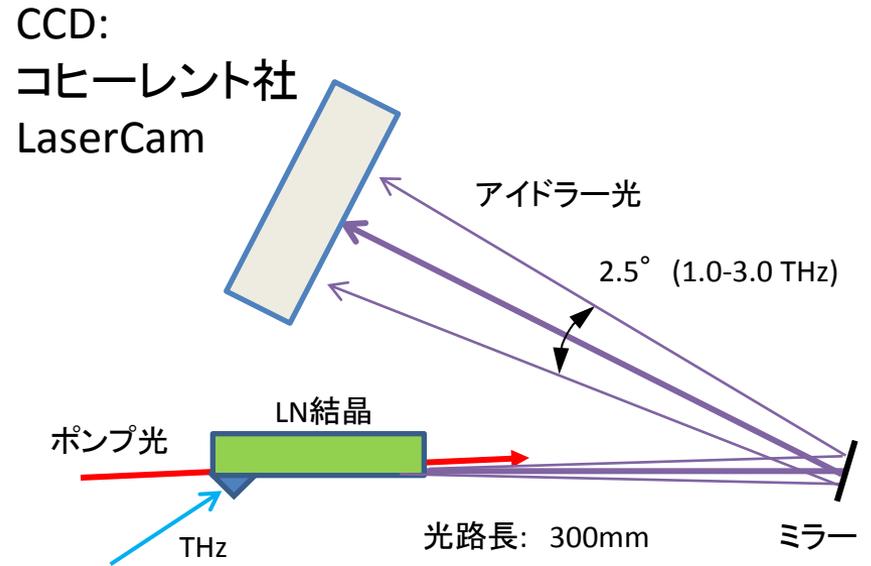


CCDを用いたTHz検出

～ Up-conversion後のアイドラー光計測



従来の単一センサーを用いた
アイドラー光検出方式

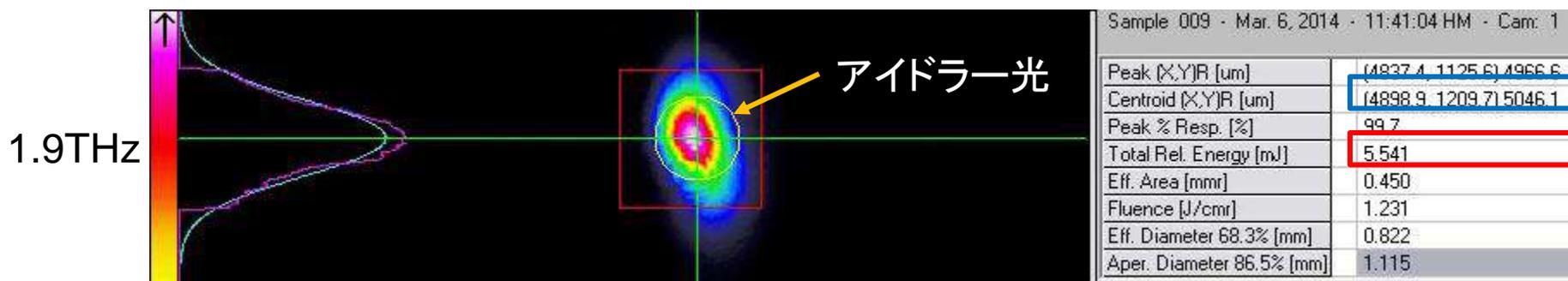
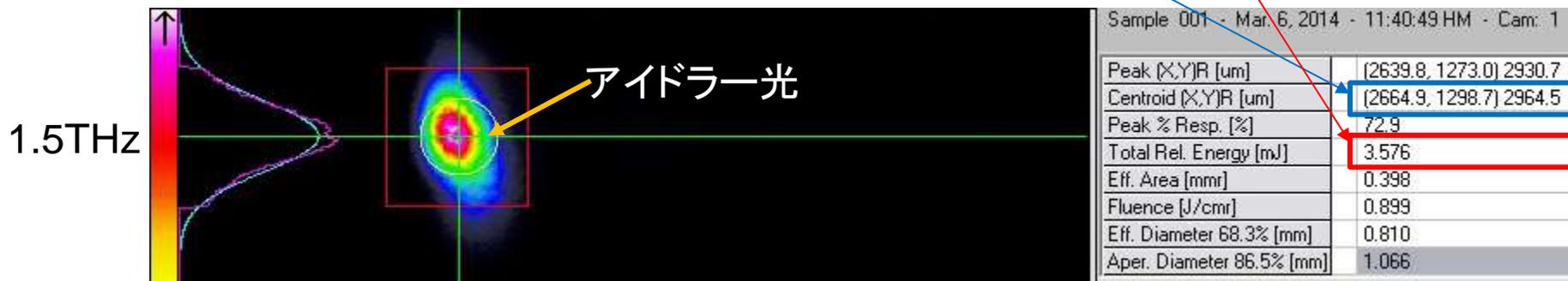


CCDを用いた
アイドラー光検出方式

CCDによるアイドラービームの座標と強度の検出

座標

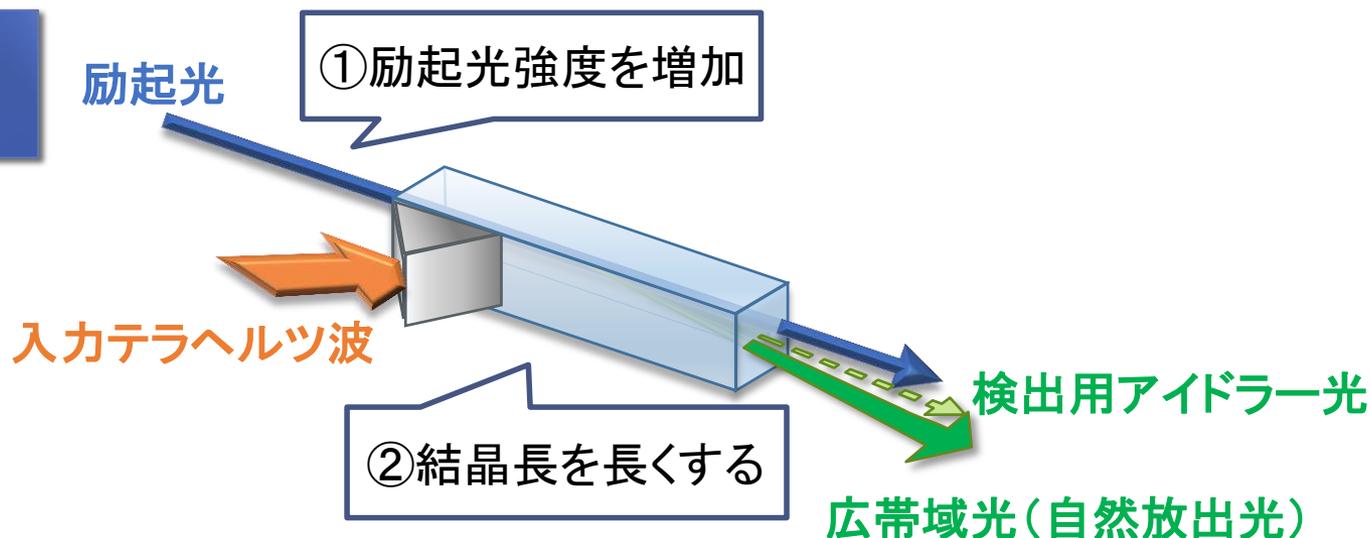
強度



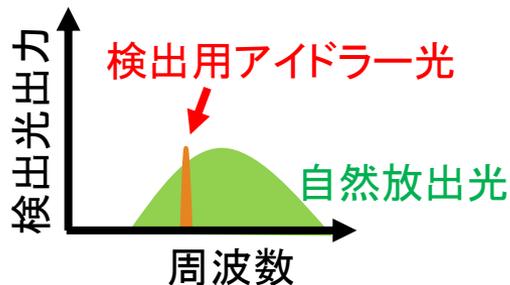
テラヘルツ波パラメトリック検出の さらなる高感度化

1個の結晶を用いたテラヘルツ検出の限界

高感度化のため
ゲイン向上が必要



自然放出光の増加により検出感度の向上が見られなくなる



自然放出光を除去しつつゲインを向上することが必要
➡検出部を多段化＋自然放出光の空間的な除去
により検出感度向上を目指した

自然放出光を抑えた高感度検出の実験系

THzパイロ検出器



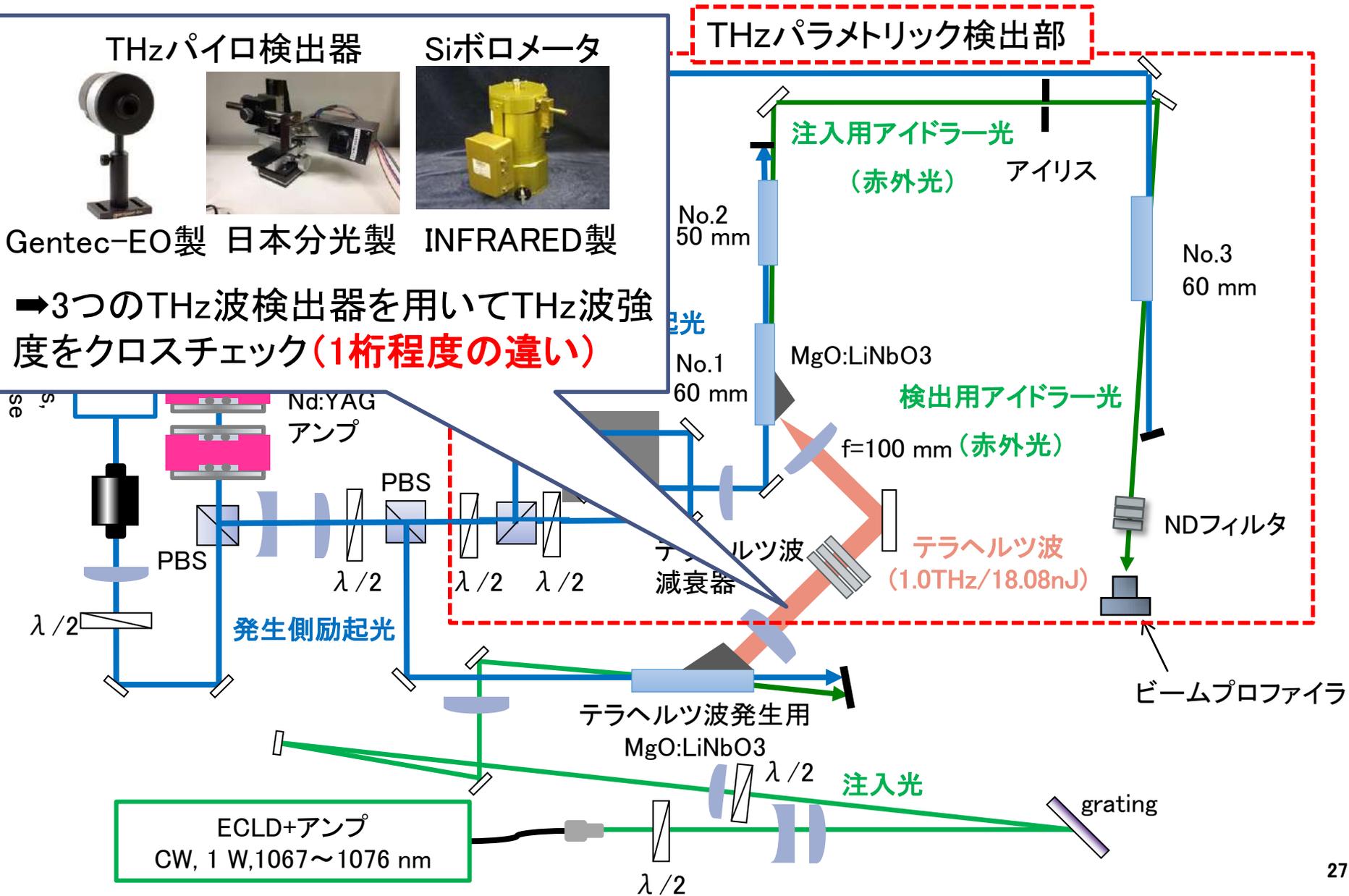
Siボロメータ



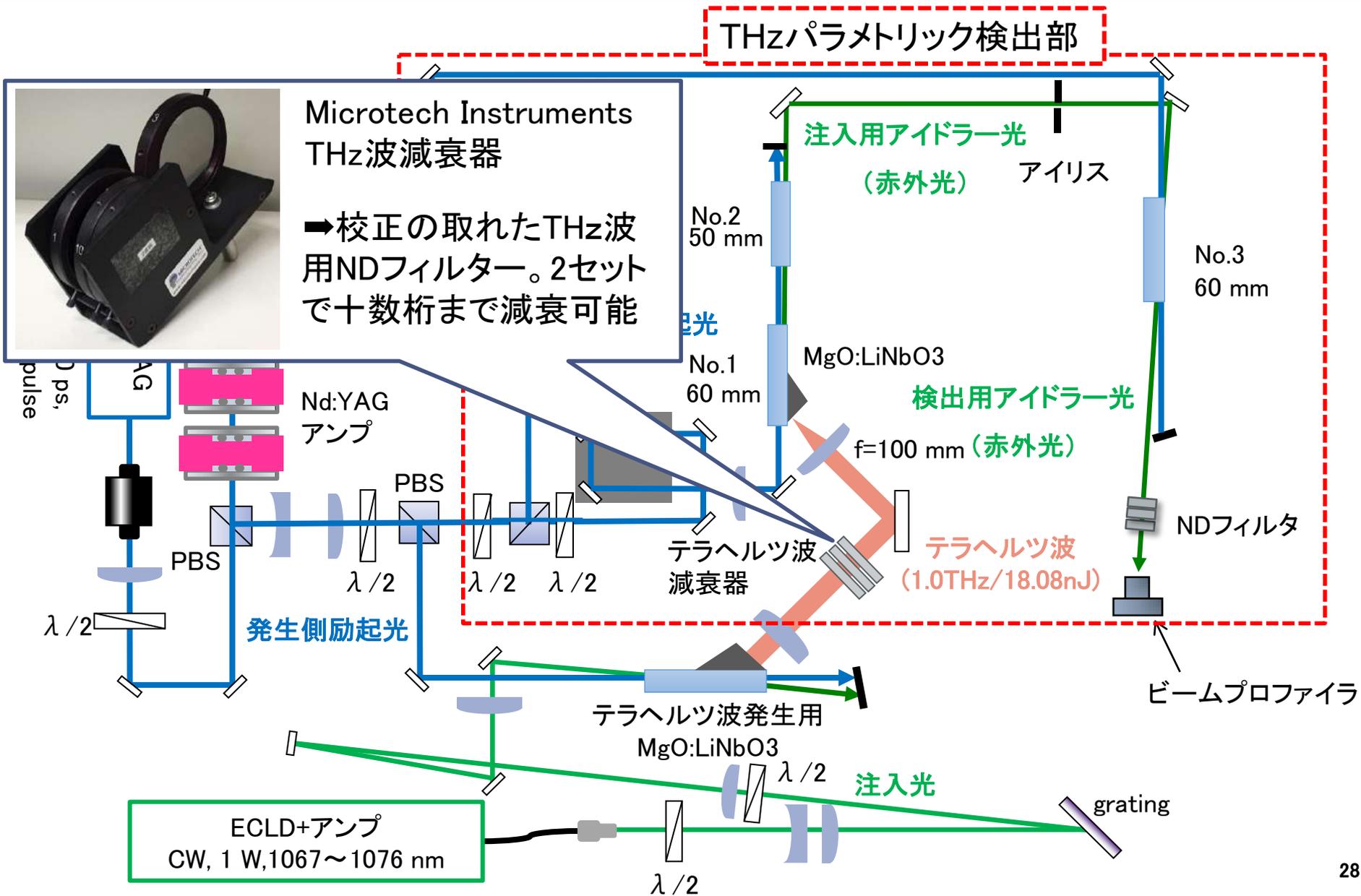
Gentec-EO製 日本分光製 INFRARED製

➡3つのTHz波検出器を用いてTHz波強度をクロスチェック(1桁程度の違い)

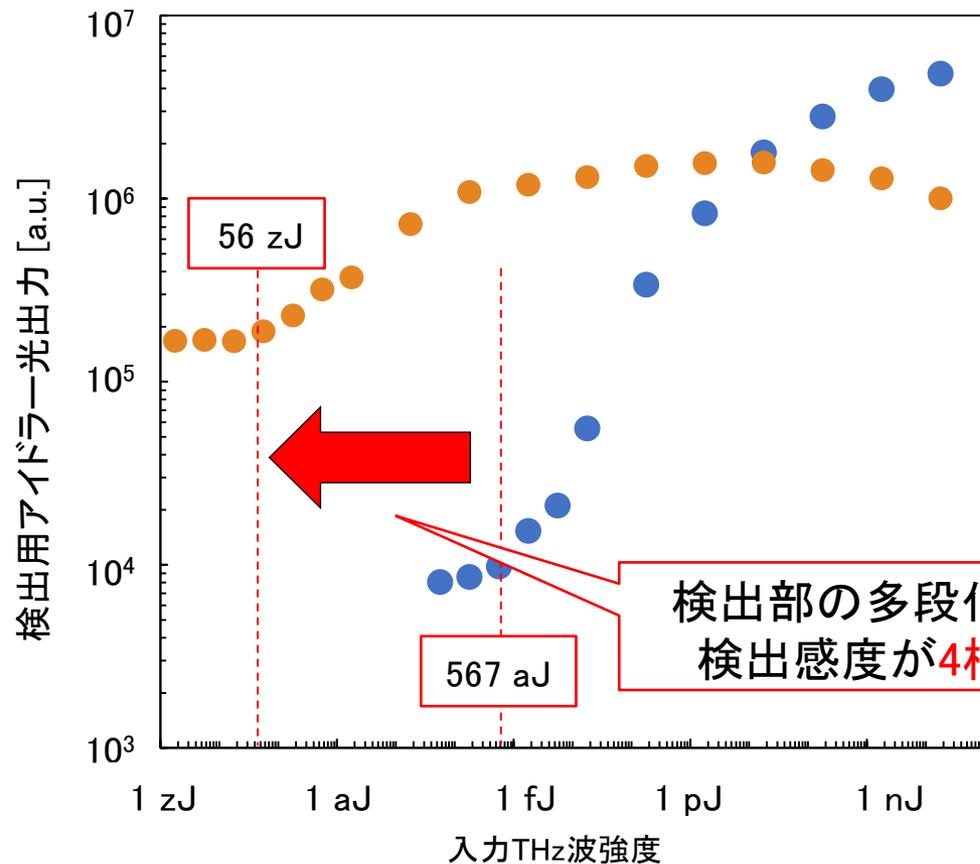
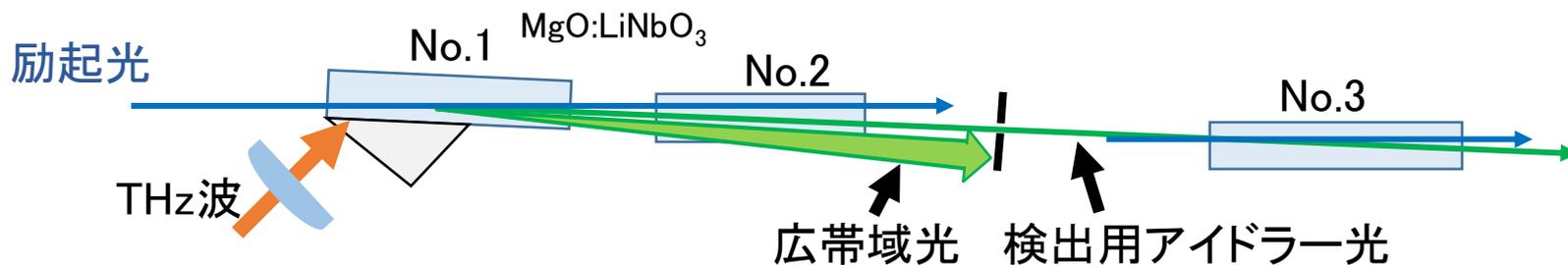
THzパラメトリック検出部



自然放出光を抑えた高感度検出の実験系



自然放出光を抑えた高感度検出の実験結果



No.1の結晶のみの場合
最小検出感度: 567 aJ

No.1~3の結晶を用いた場合
最小検出感度: 56 zJ
 $= 56 \times 10^{-21} \text{ J}$

検出部の多段化により
検出感度が4桁向上

テラヘルツ波パラメトリック検出部の多段化
により検出感度の大幅な向上を実現

検出可能光子数

最小検出感度: 56 zJ

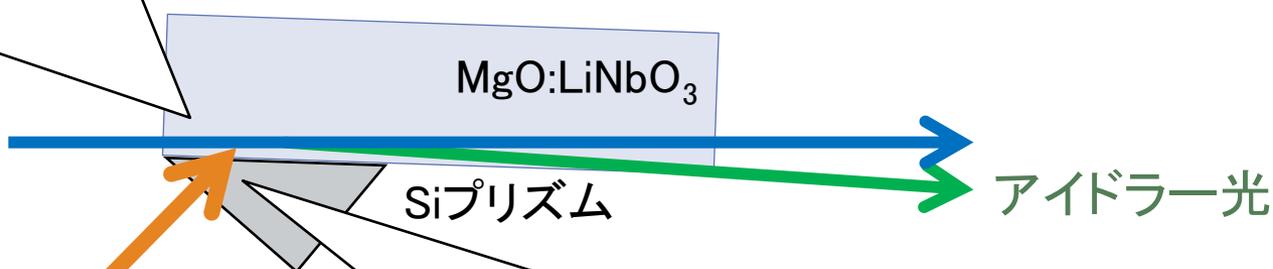
1THzにおける1光子当たりのエネルギー: $E = h\nu = 0.663 \times 10^{-21} \text{ J} = 0.663 \text{ zJ}$

➡ **検出可能な最小光子数: 84 フォトン**

MgO:LiNbO₃によるTHz吸収: $\frac{1}{e^{\alpha t}}$ ($\alpha \doteq 10 \text{ cm}^{-1}$, $t = \text{テラヘルツ伝搬距離}$)

励起光
ビーム径 0.8 mm

THz波



Siプリズム(屈折率: 3.42)入射時のフレネルロス: 29 %
MgO:LiNbO₃入射時のフレネルロス: 5 %

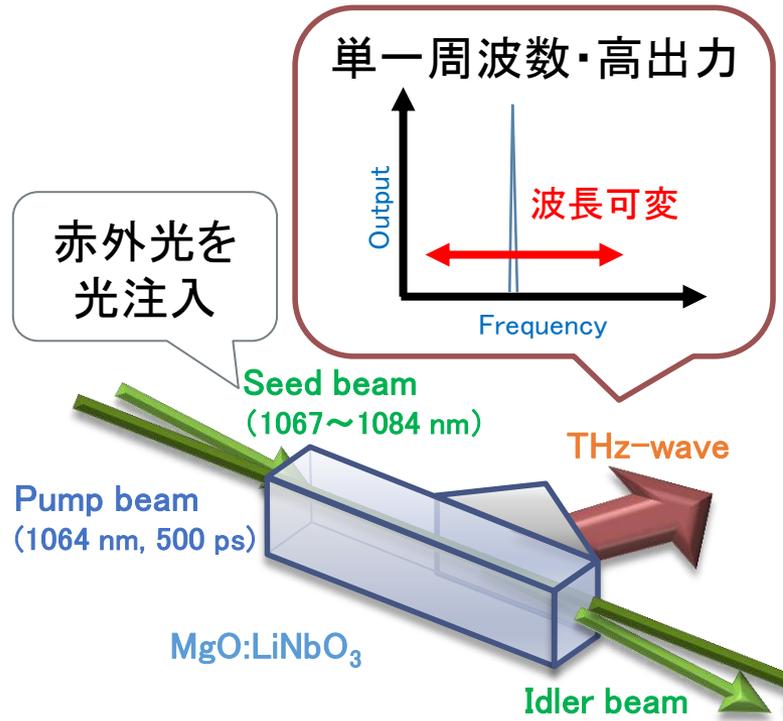
以上の2点を考慮すると、 $84 \times \frac{1}{e^{0.4}} \times 0.71 \times 0.95 \doteq 40$

➡ **検出可能光子数: 約40光子 (～400光子)**

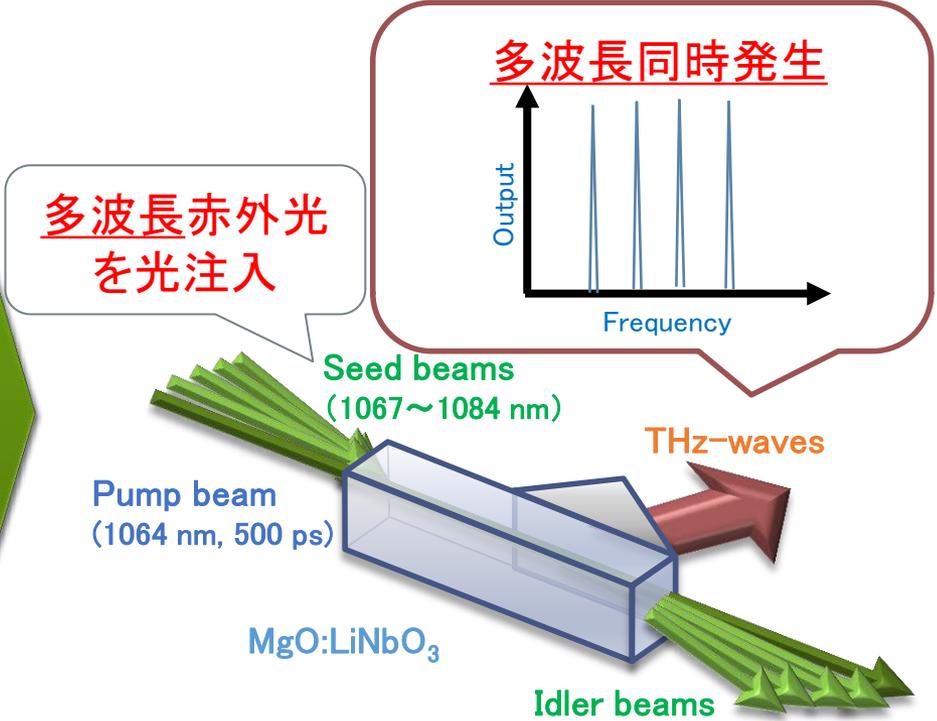
多波長THz波発生方法

◎is-TPG (波長可変光源)

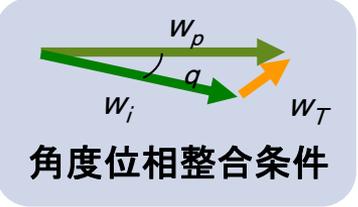
※is-TPG = injection-seeded THz parametric generator
(光注入型テラヘルツパラメトリック発生器)



◎is-TPG (多波長発生)



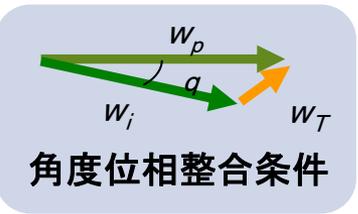
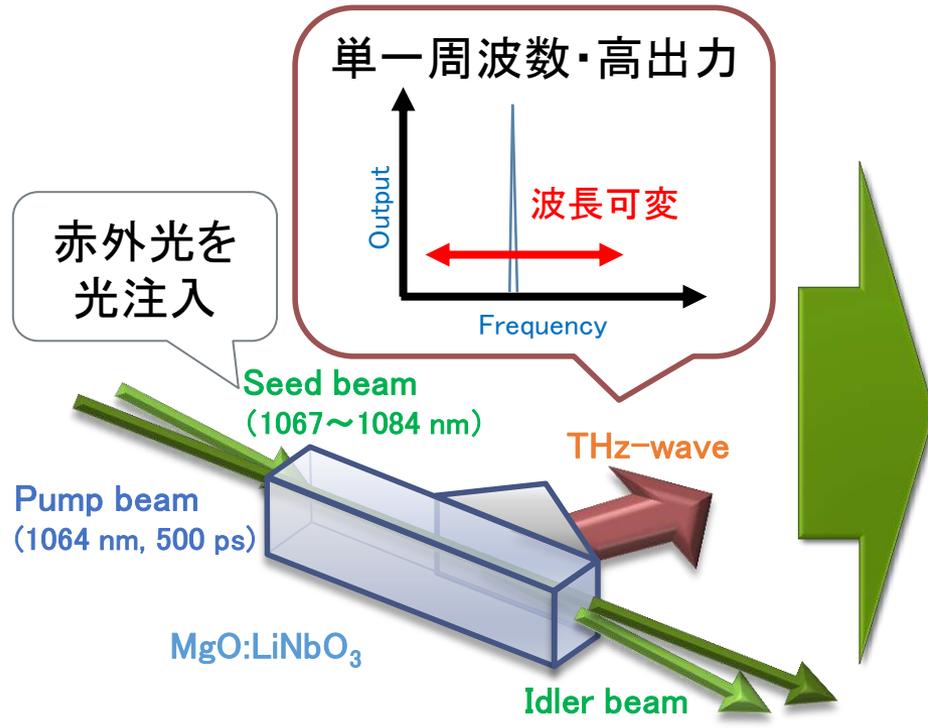
注入光の波長と入射角度を
変化させる事により発生
するTHz波の波長を制御



多波長THz波検出方法

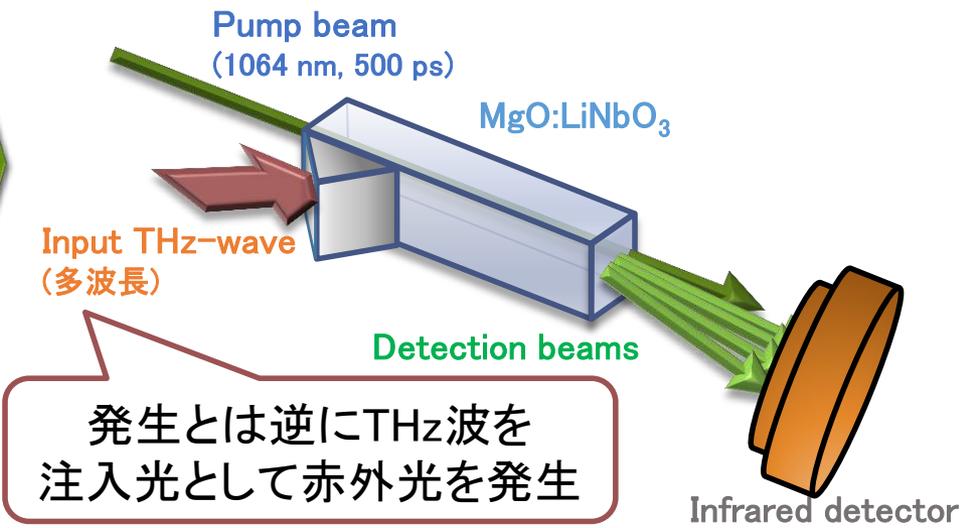
◎is-TPG (波長可変光源)

※is-TPG = injection-seeded THz parametric generator
(光注入型テラヘルツパラメトリック発生器)



◎アップコンバージョンによるTHz波検出

THz波の検出器は感度が悪い ▶ 赤外光に変換することで高感度検出

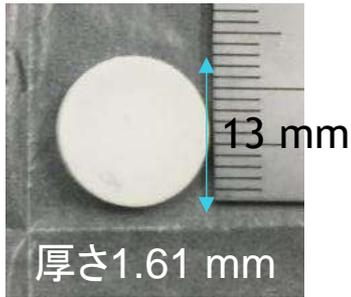


角度位相整合条件により、波長毎に検出光発生角が変わる
→多波長THz波でも、分離して検出可能

多波長同時発生is-TPGによる1パルス分光

5波長発生is-TPGを用いてサンプル測定
⇒ 1ショット・リアルタイム分光の検証

測定試薬・・・2種類の糖
・マルトース } 各40%ペレット状
・ラクトース }



5台のECLDを組み
合わせて5波長発生

ECLD
ECLD
ECLD
ECLD
ECLD

CW, 400mW

Amplifier

シード光

Isolator

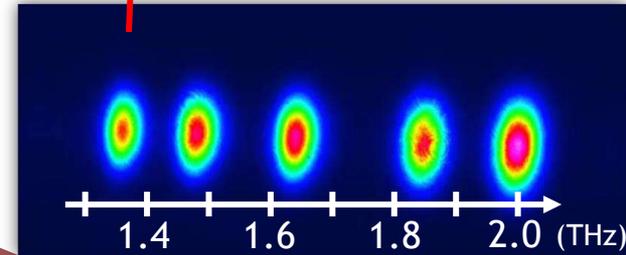
MgO:LiNbO₃
THz波発生用

測定サンプル

THz 波

検出光

ビームプ
ロファイラ

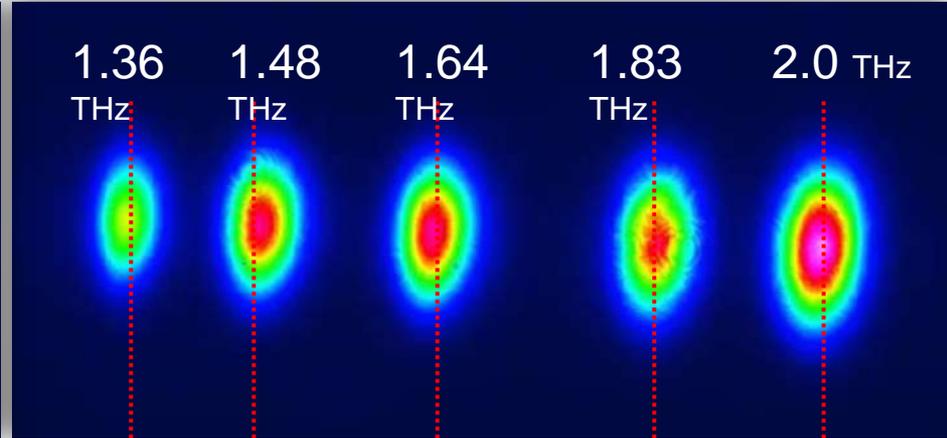
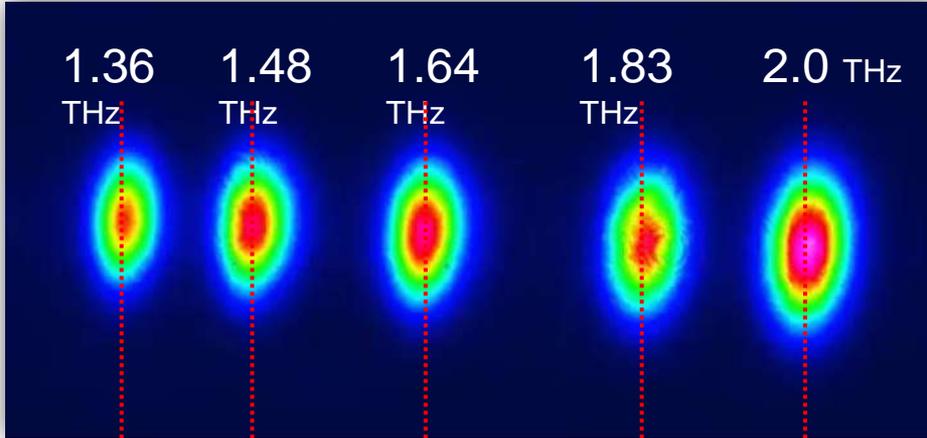


Grating

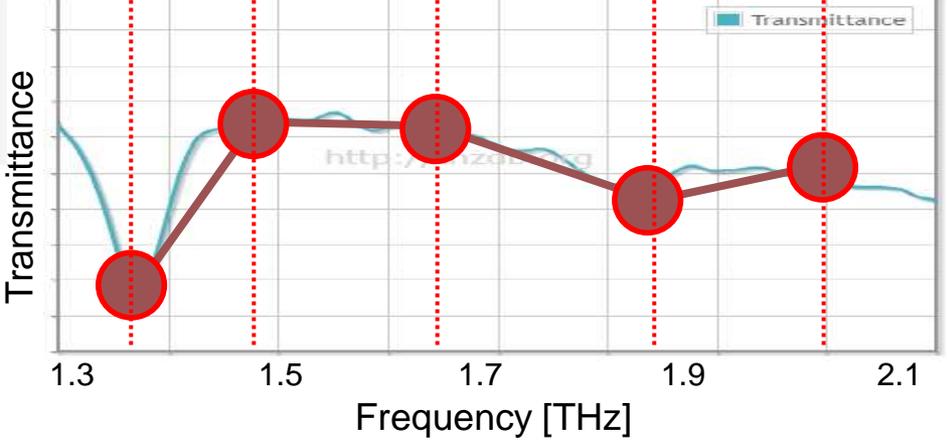
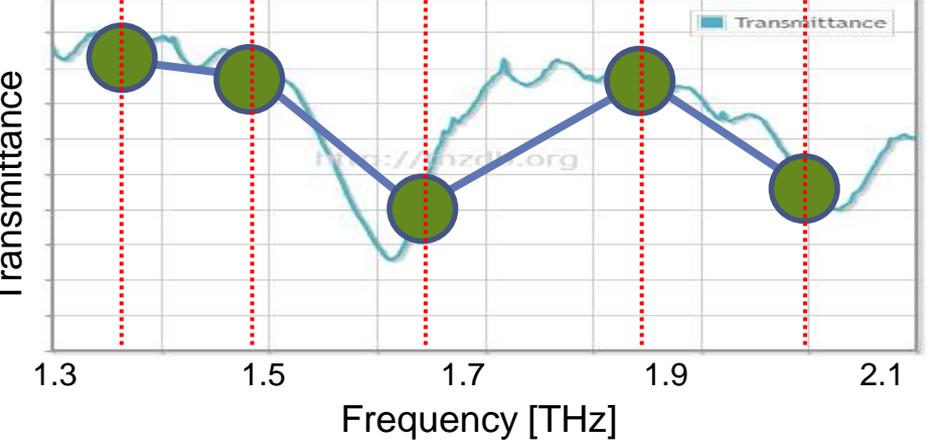
多波長同時発生is-TPGによる1パルス分光

マルトース挿入時

ラクトース挿入時



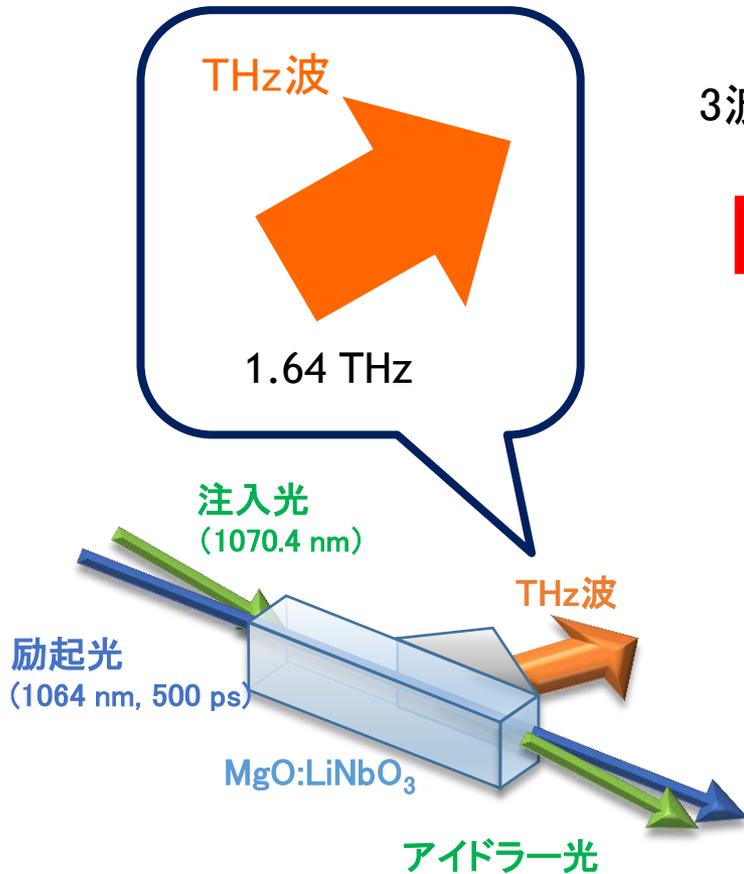
データベース(<http://thzdb.org/>)から参照したスペクトル



サンプル挿入と同時にスペクトルが測定可能
⇒リアルタイムで試薬識別を実現

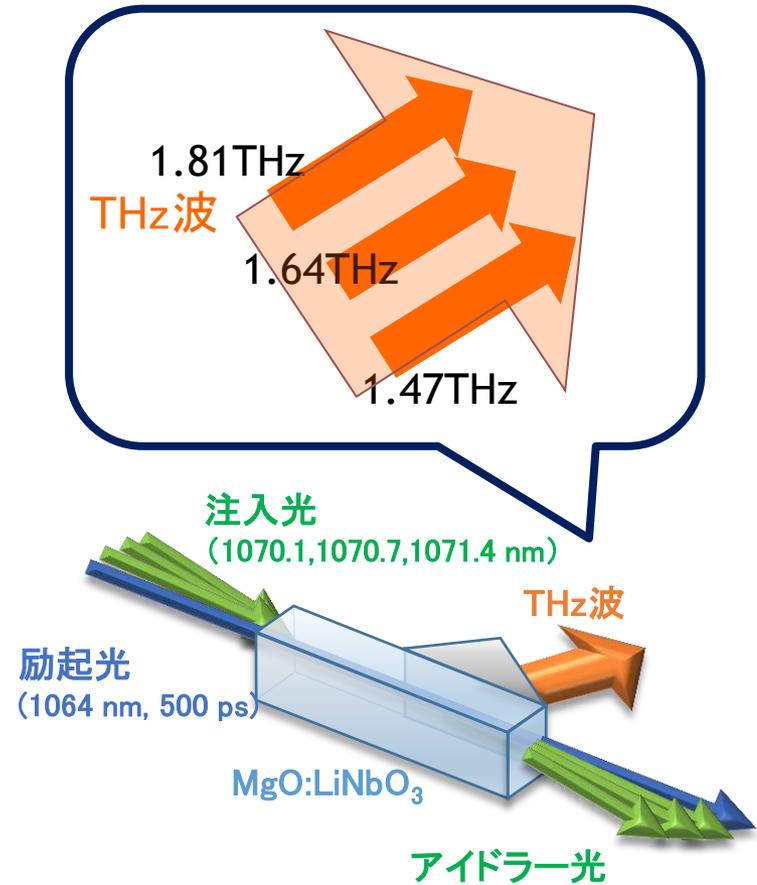
多波長発生における不安定性

単一周波数THz波発生イメージ図



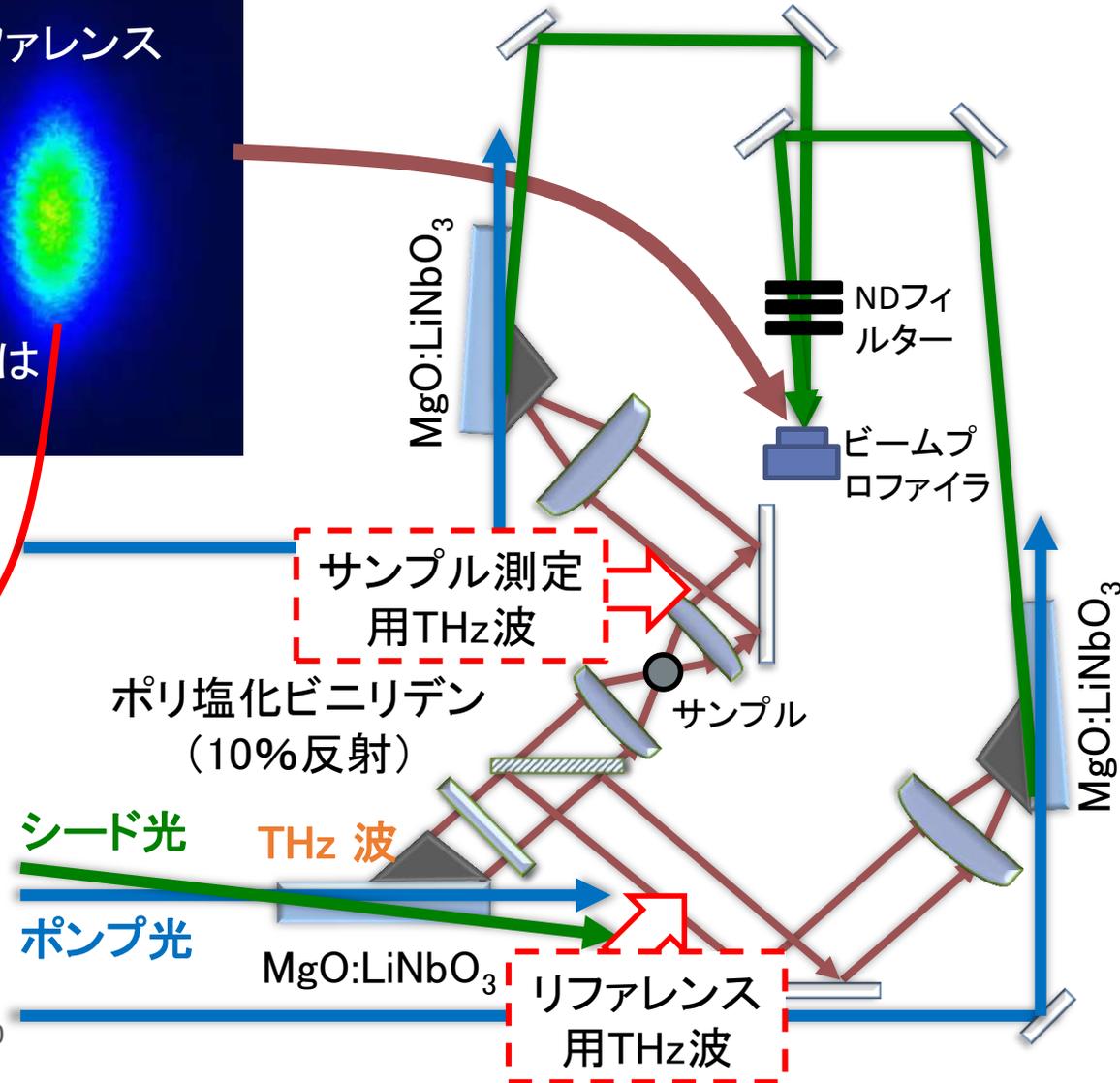
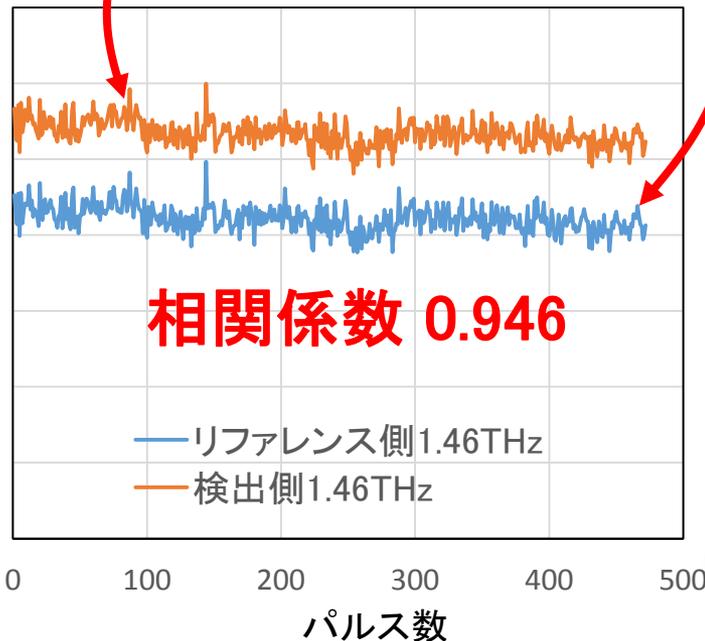
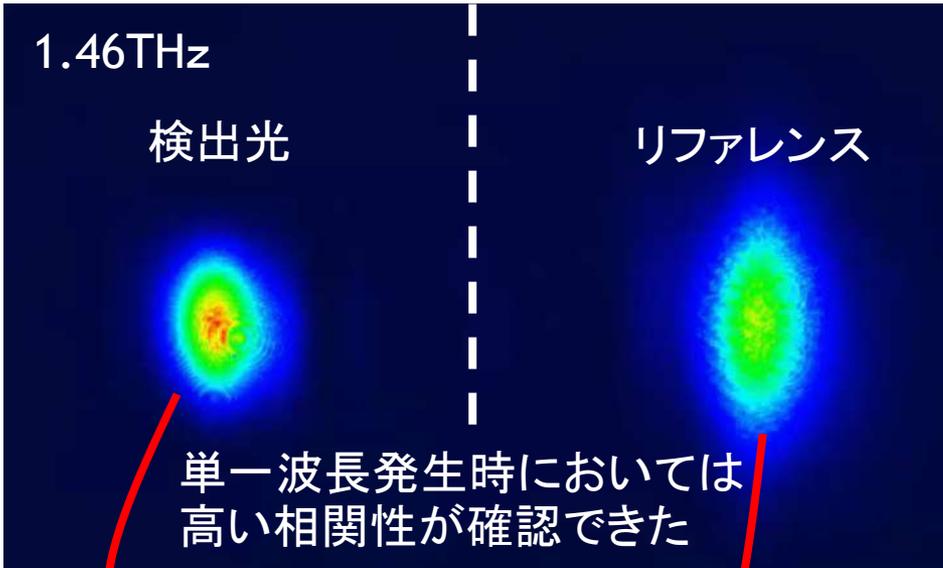
3波長発生化

3周波数THz波発生イメージ図

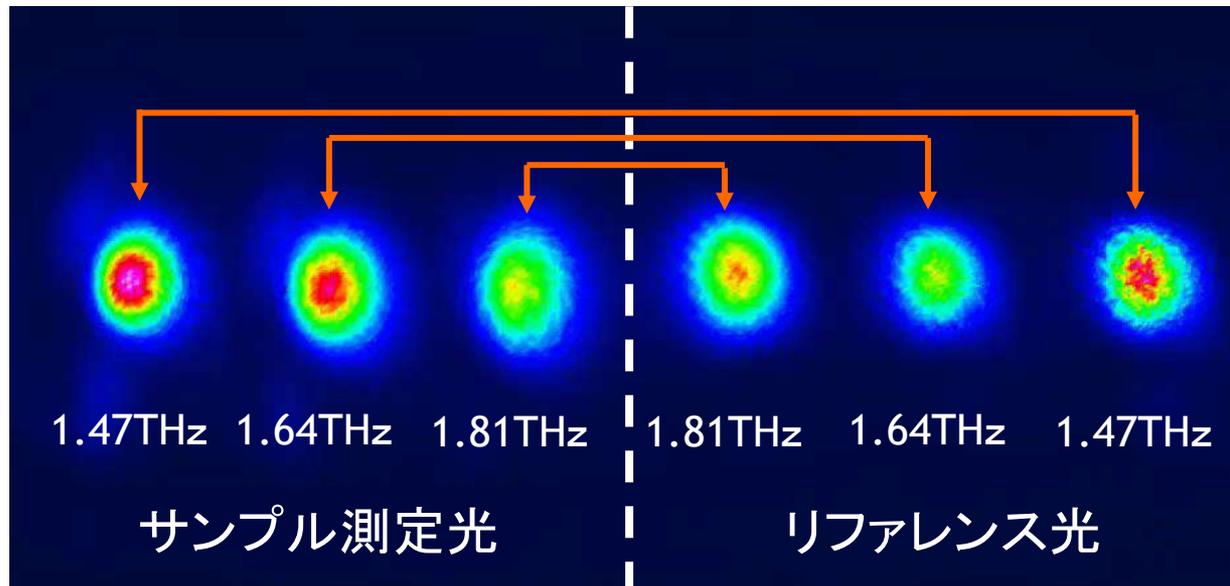
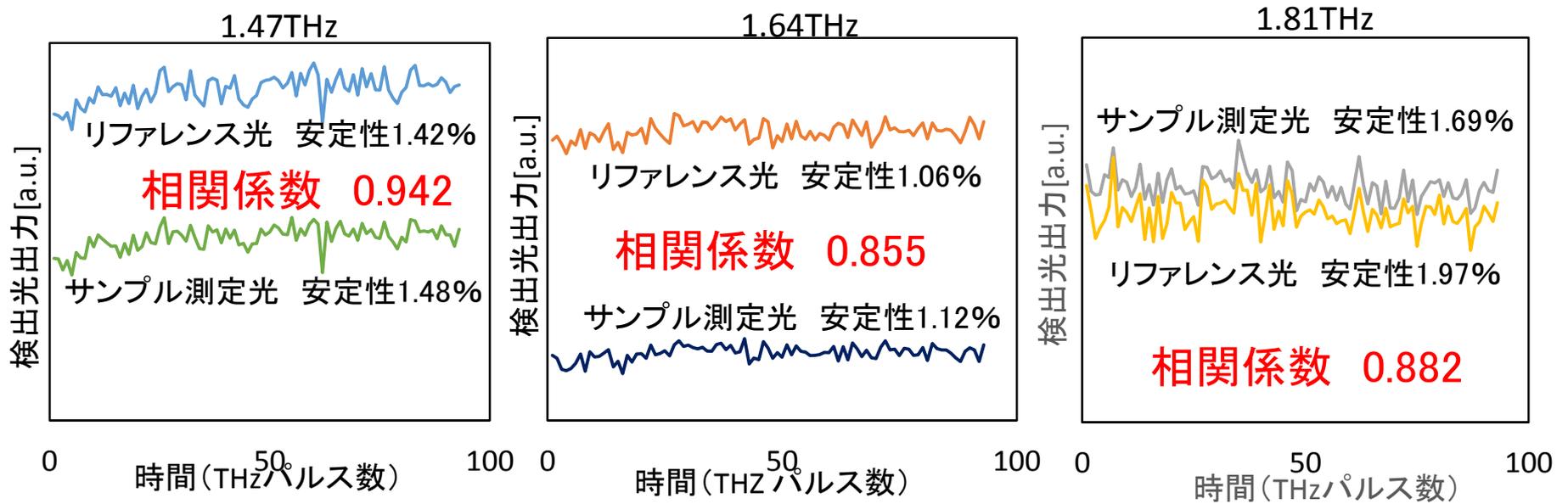


多波長発生になると利得を喰い合うため安定性は悪くなる

常にレファレンスを取得し安定性の向上



3波長発生時の2つの検出光間の相関性



リアルタイム分光の高安定化結果

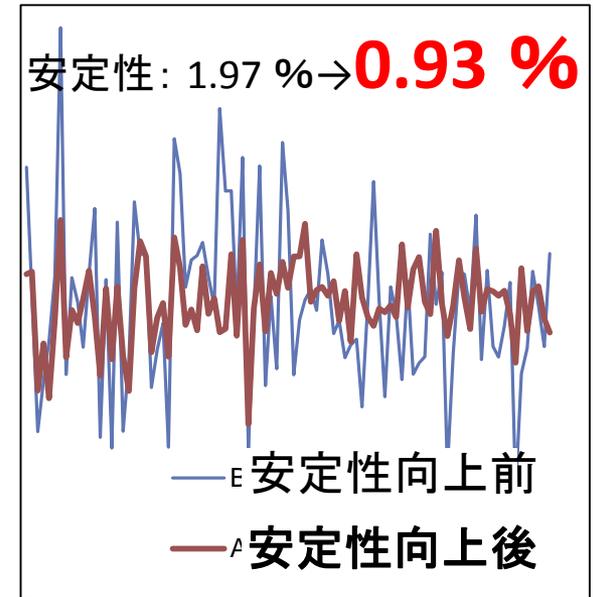
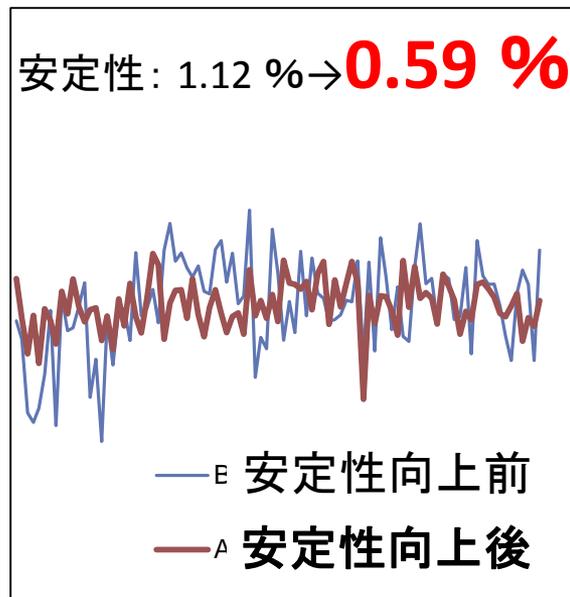
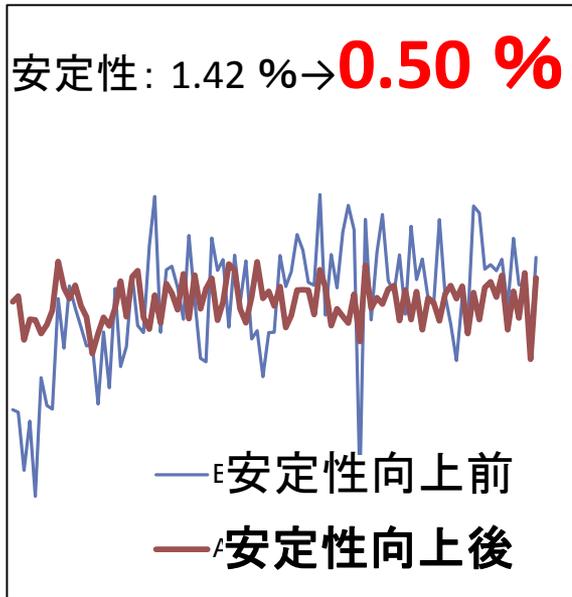
テラヘルツ波出力時間変化の安定化処理前後比較

1.47 THz

1.64 THz

1.81 THz

正規化テラヘルツ波出力 [a.u.]



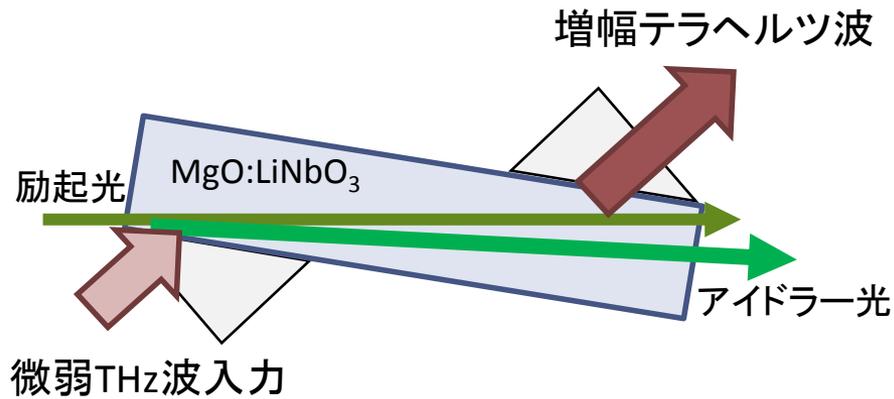
0 50 1000
時間 (THzパルス数)

0 50 1000
時間 (THzパルス数)

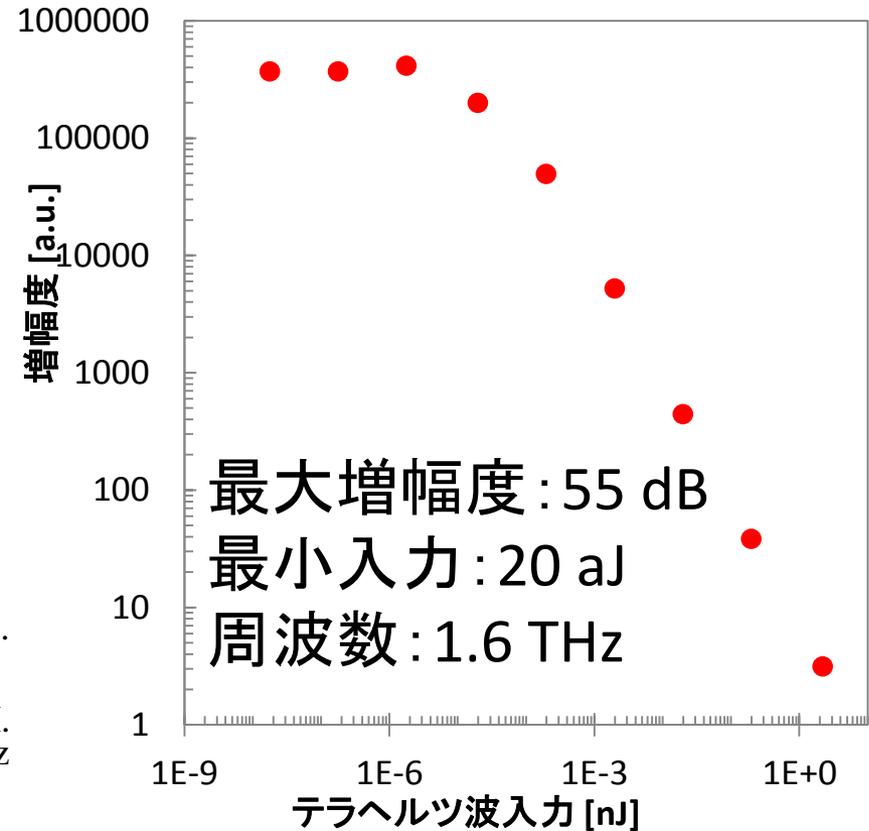
0 50 100
時間 (THzパルス数)

リアルタイム分光において
不安定性を1%以下まで抑制

テラヘルツ波パラメトリック増幅



2014年の増幅結果

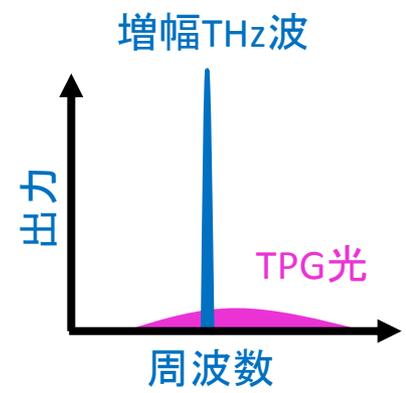
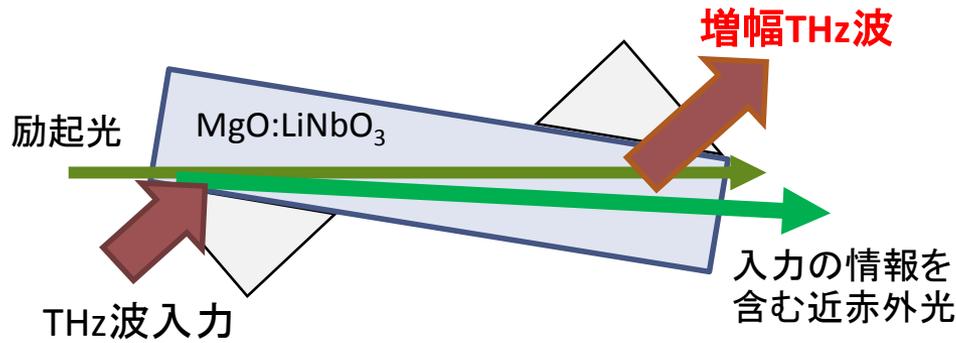


S. R. Tripathi, Y. Taira, S. Hayashi, K. Nawata, K. Murate, H. Minamide, and K. Kawase, *Optics Letters*, vol. 39 (2014)

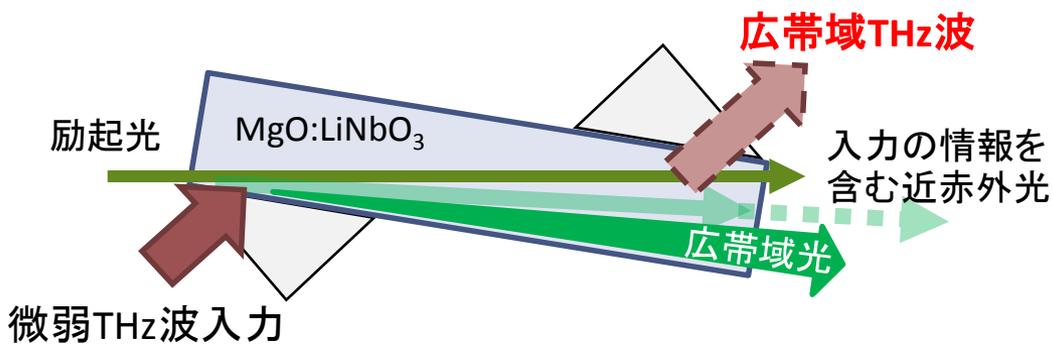
Y. Taira, S. R. Tripathi, K. Murate, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, and K. Kawase, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 4 (2014)

極微弱入力が増幅時の問題

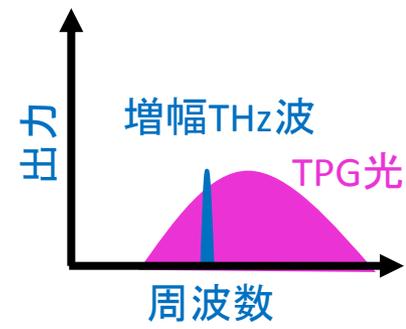
THz波入力が強い時



THz波入力が極微弱時



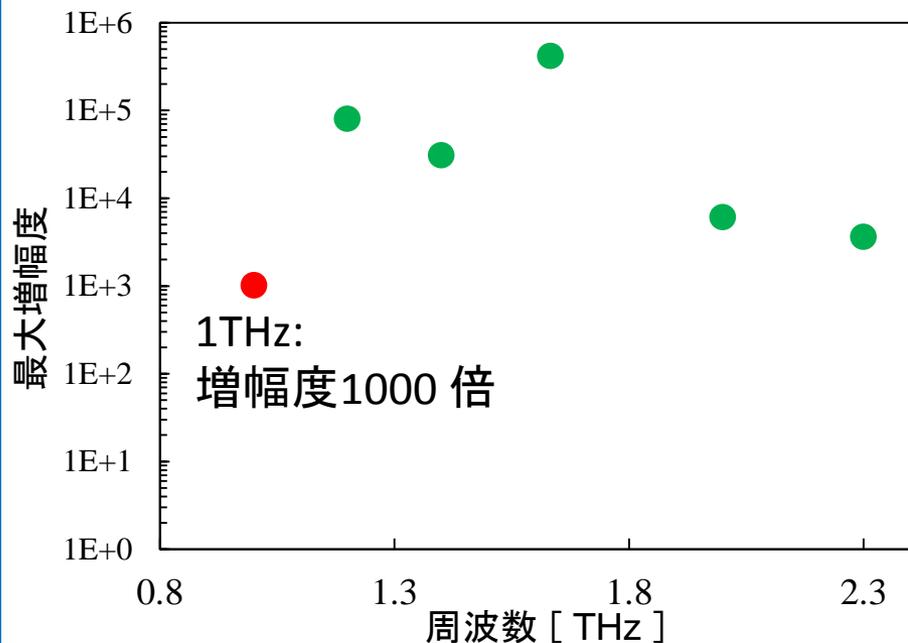
・広帯域成分(TPG光)が強くなってしまふ



広帯域光発生を抑える必要がある

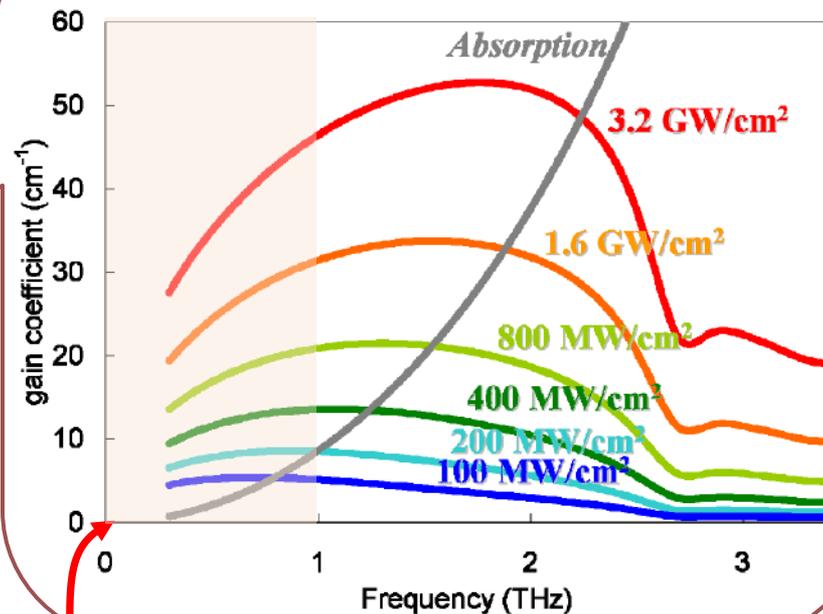
低周波(1THz以下)における利得減少

・低周波のTHz増幅度が小さい



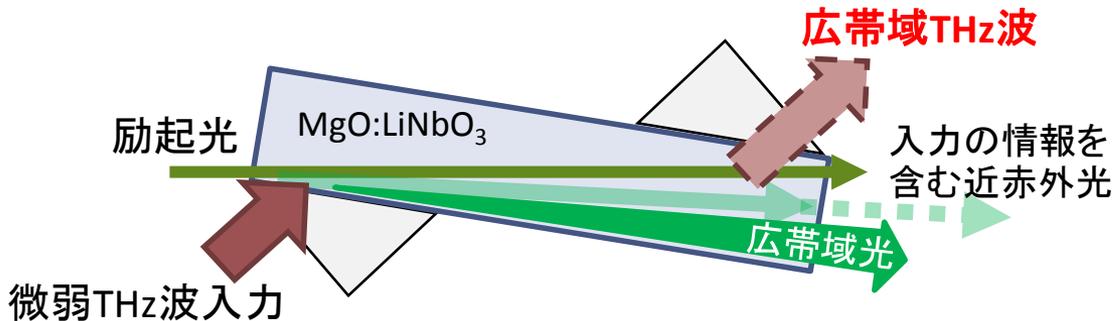
Saroj R. Tripathi, et. al., Optics Letters, Vol. 39, Issue 6, pp. 1649 (2014)

MgO:LiNbO₃のパラメトリック利得
および吸収係数



J. Shikata, et. al., IEEE, Vol. 48, Issue 4, pp. 653 (2000)

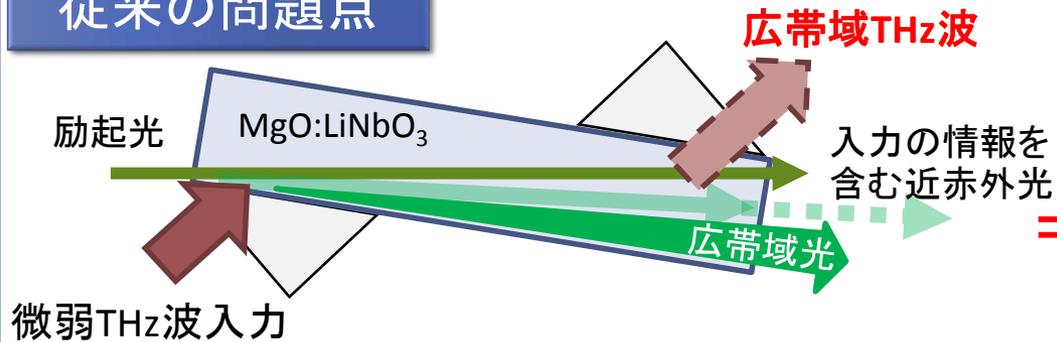
低周波においてパラメトリック利得が小さい



低周波では広帯域発生
の影響がより顕著

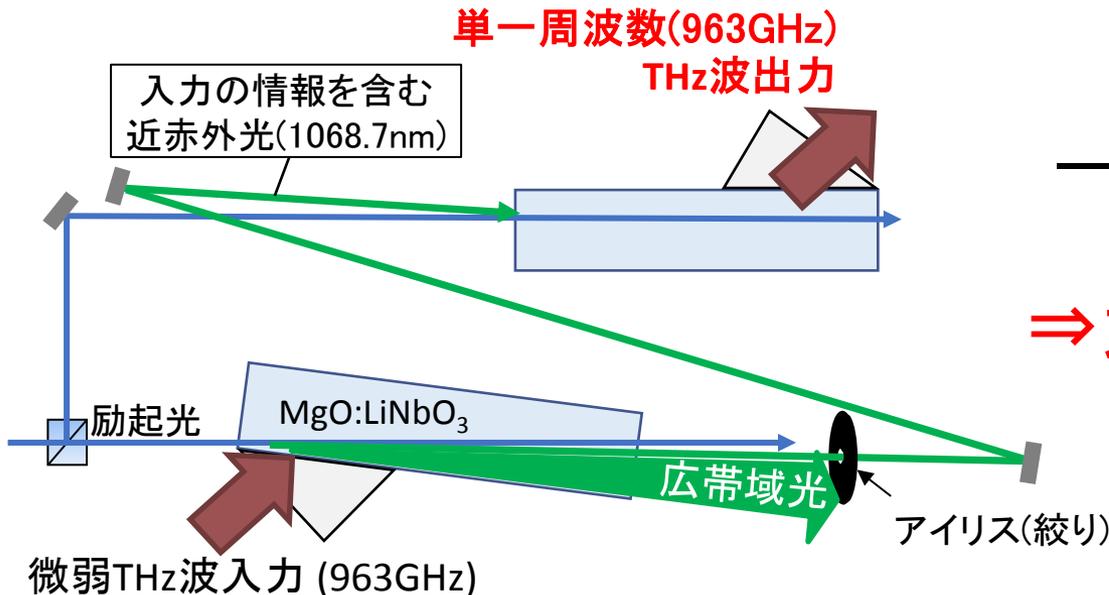
極微弱テラヘルツ波の高利得増幅

従来の問題点



広帯域発生に
エネルギーが流れていた
⇒**極微弱光(特に低周波)**
の増幅に課題

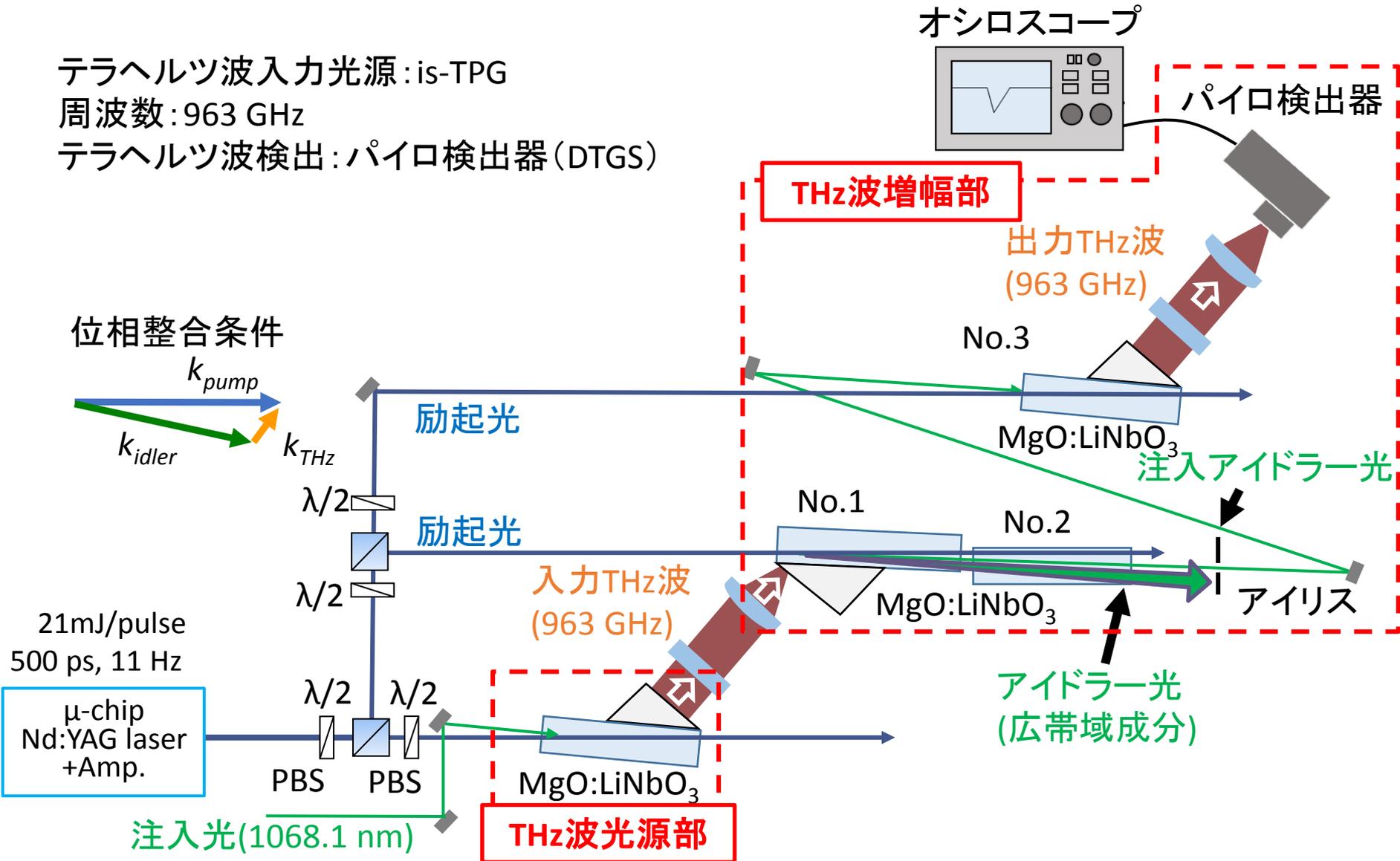
新型増幅器による改善



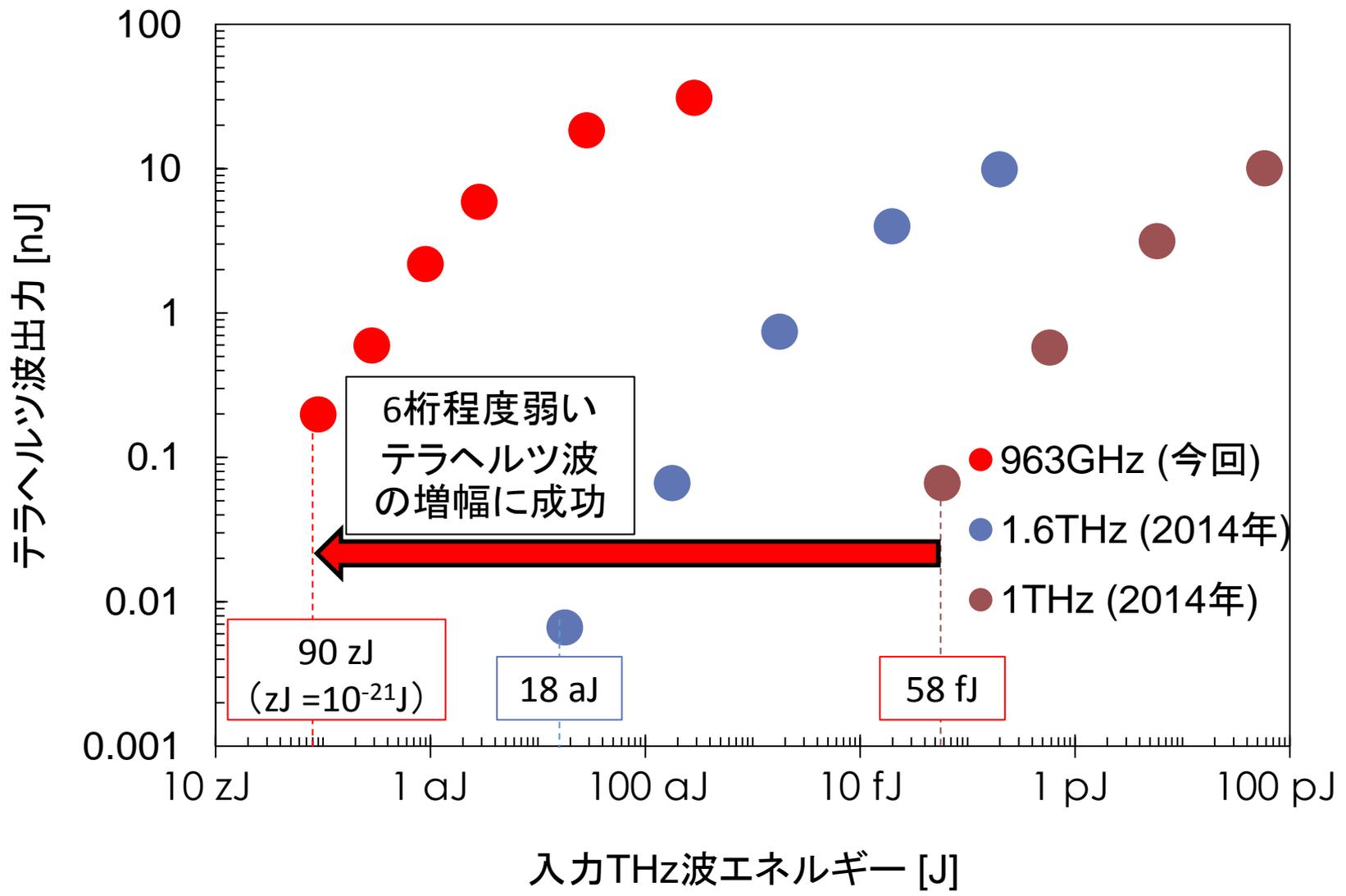
一旦近赤外光に波長変換し
広帯域光を除去
⇒**大幅な利得向上を実現**

新型THz波増幅システム

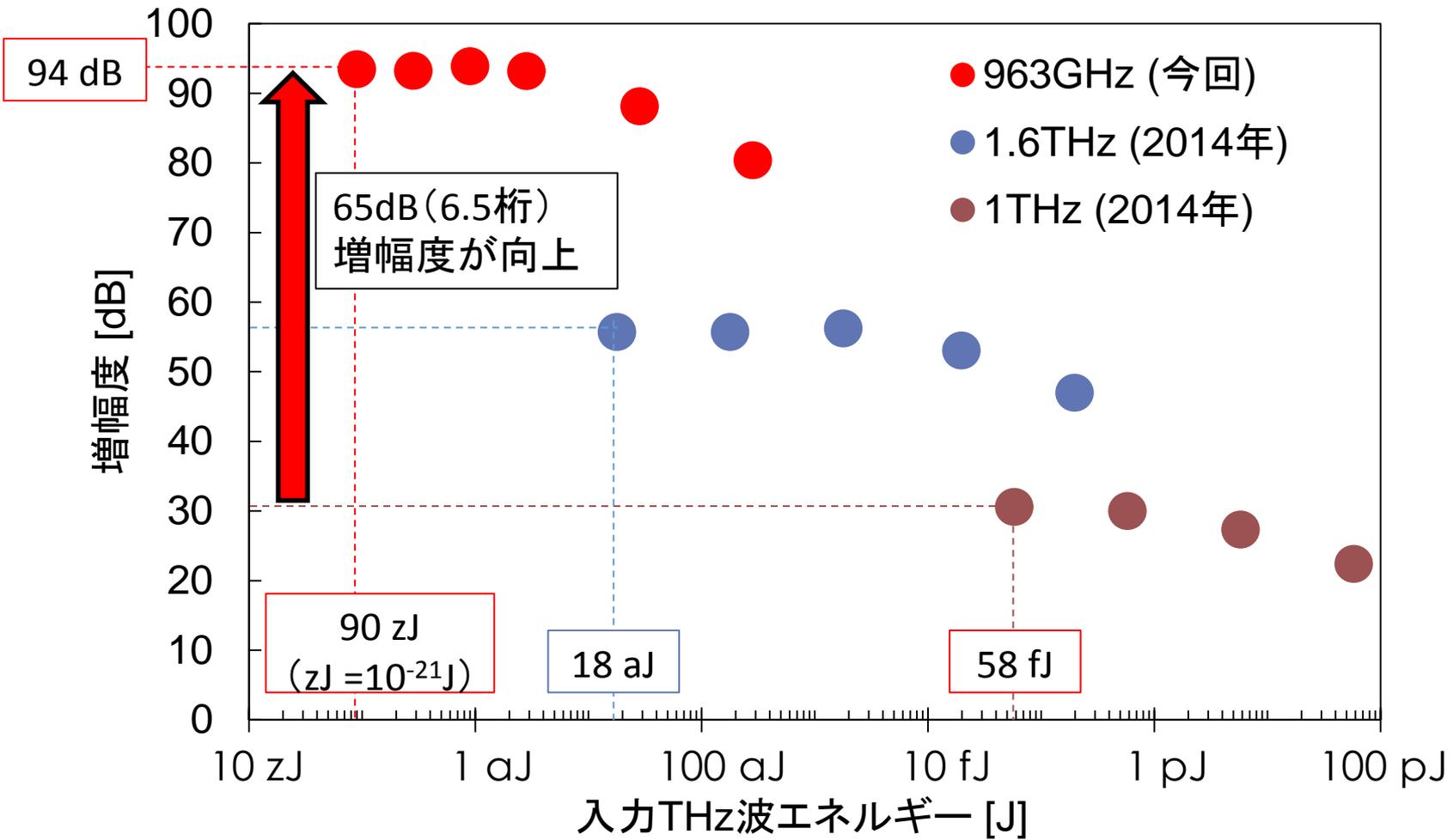
テラヘルツ波入力光源: is-TPG
周波数: 963 GHz
テラヘルツ波検出: パイロ検出器 (DTGS)



増幅器の入出力特性(テラヘルツ波出力の比較)



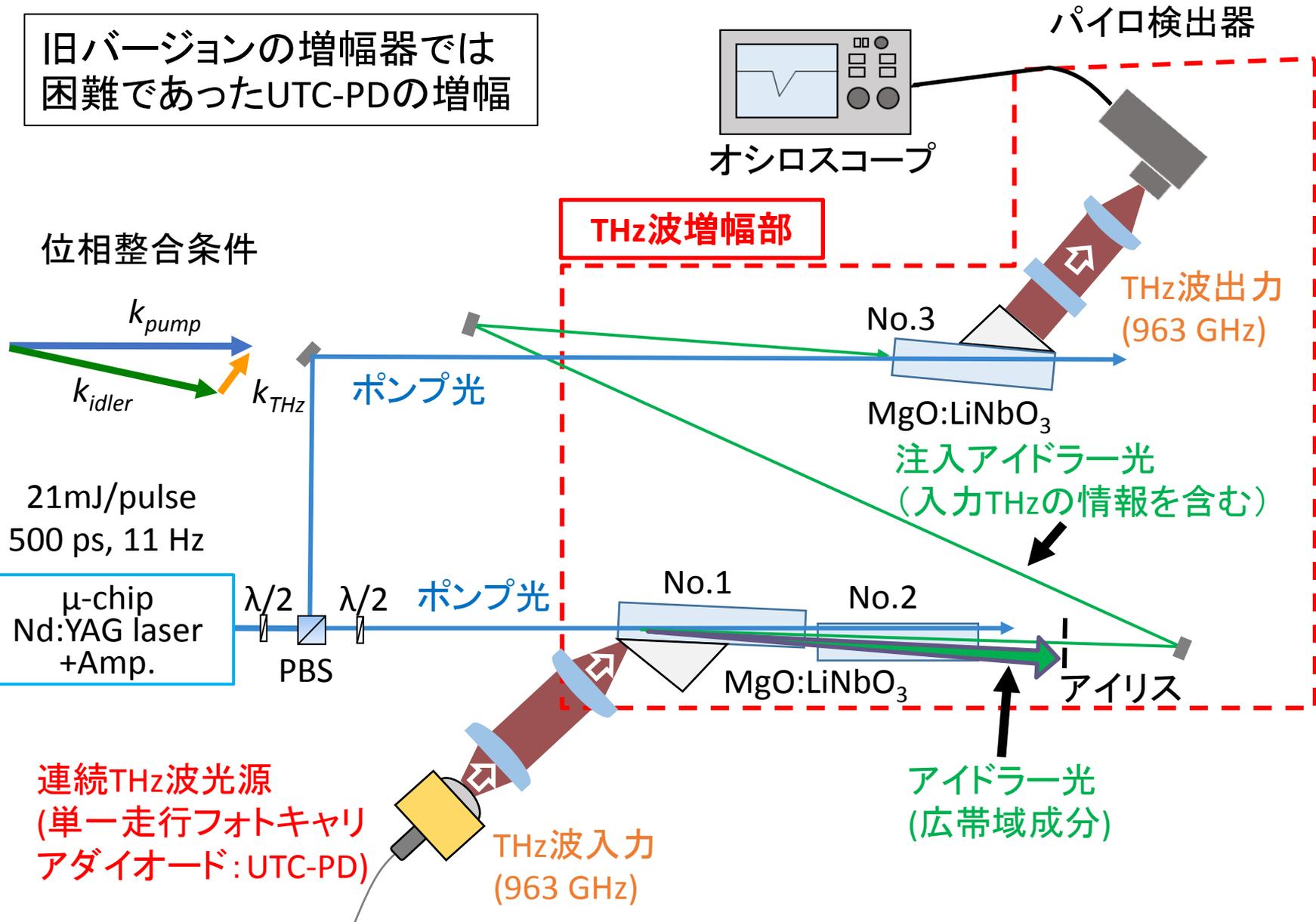
増幅度の比較



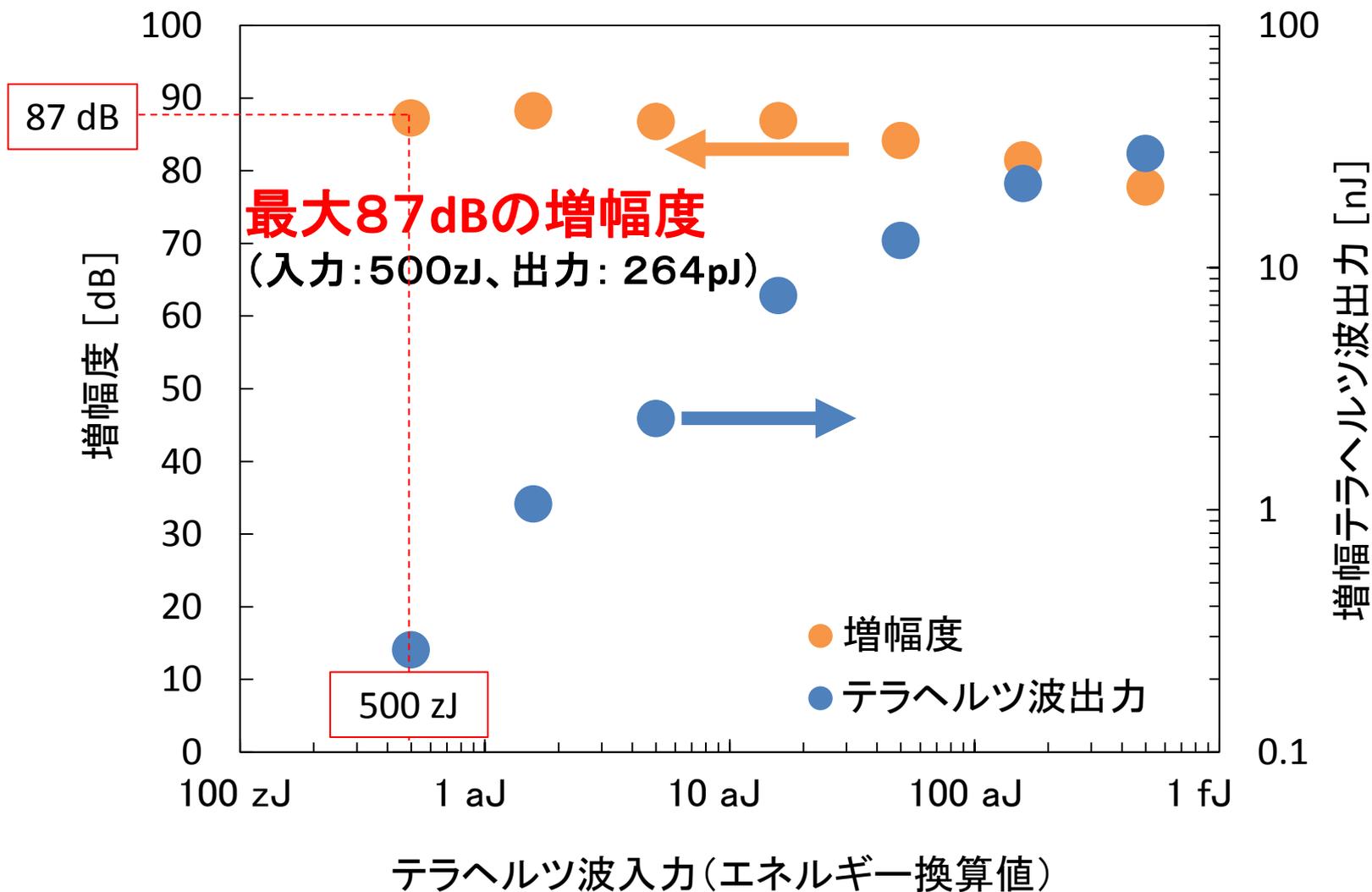
100 zJ (=10⁻¹⁹J) 以下のテラヘルツ波を
20億倍 (90 dB) 以上も増幅

連続波THz波光源のパルス増幅

旧バージョンの増幅器では
困難であったUTC-PDの増幅



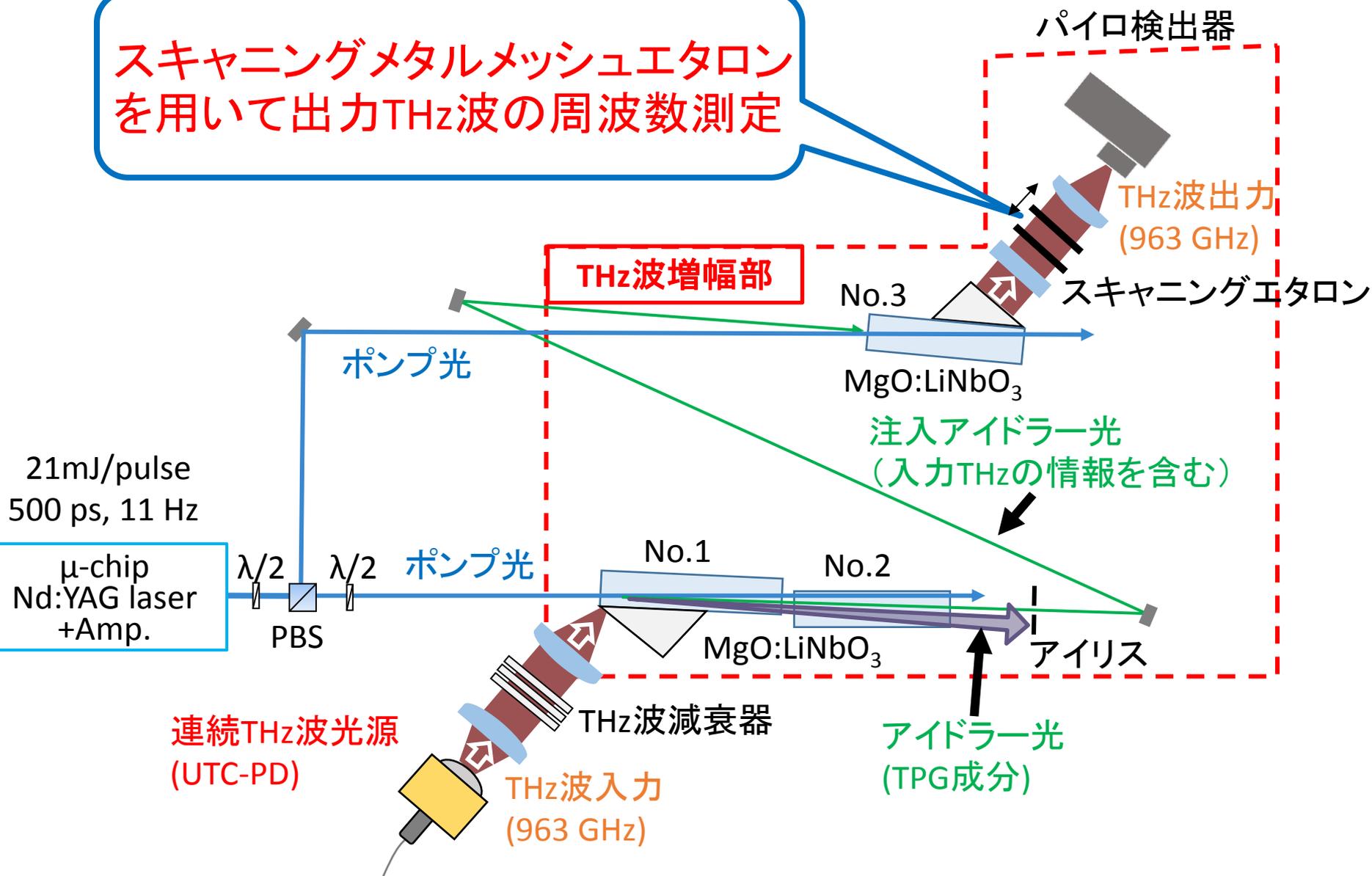
THz波光源(CW)のパルス増幅結果



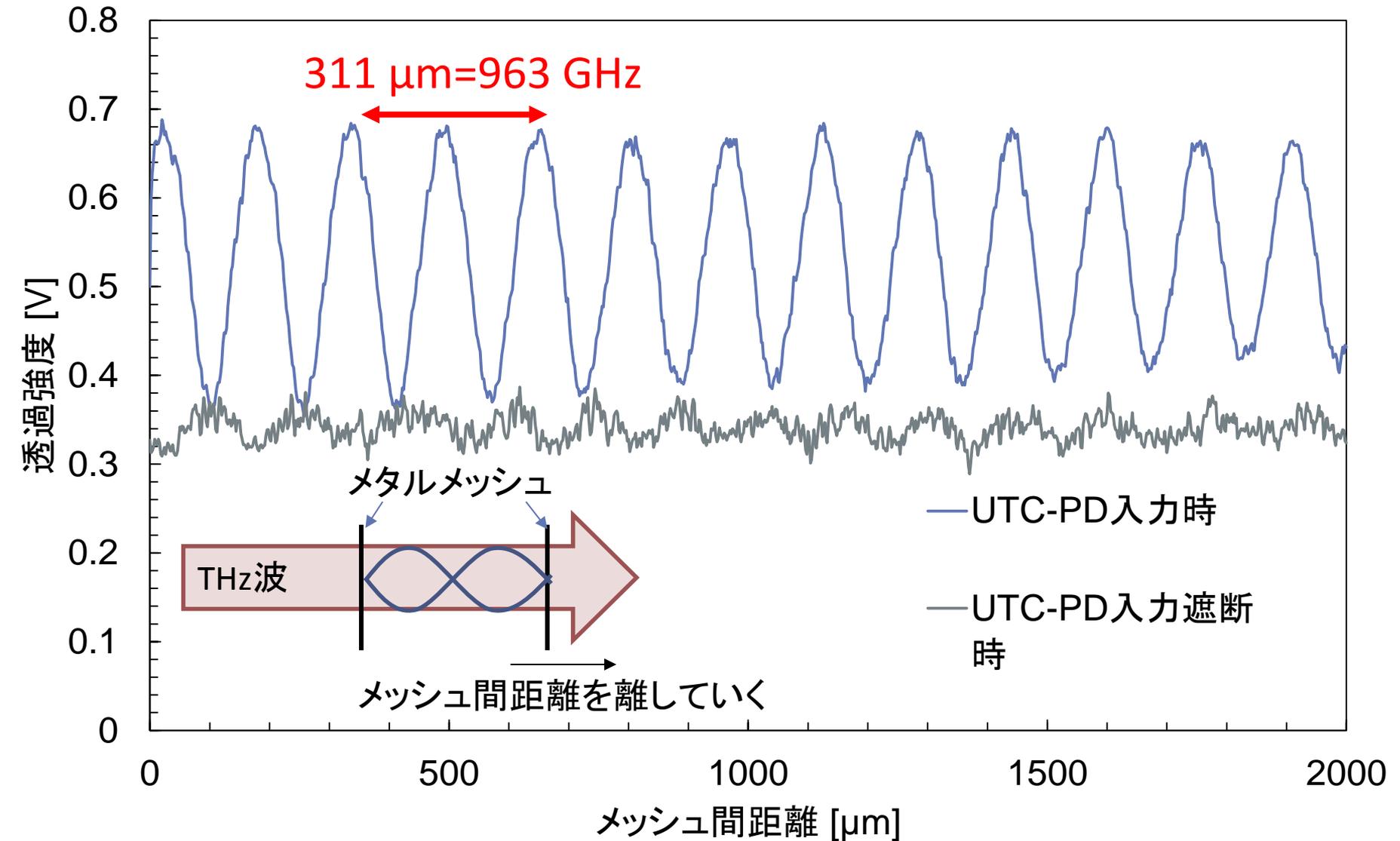
連続波光源の高利得パルス増幅を実現

増幅されたTHz波の周波数測定

スキャニングメタルメッシュエタロンを用いて出力THz波の周波数測定



増幅されたTHz波の周波数測定

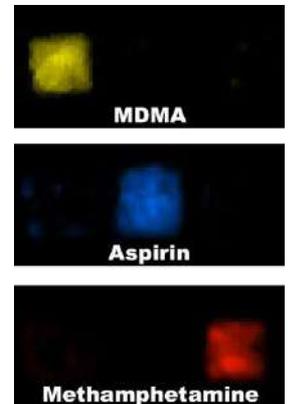
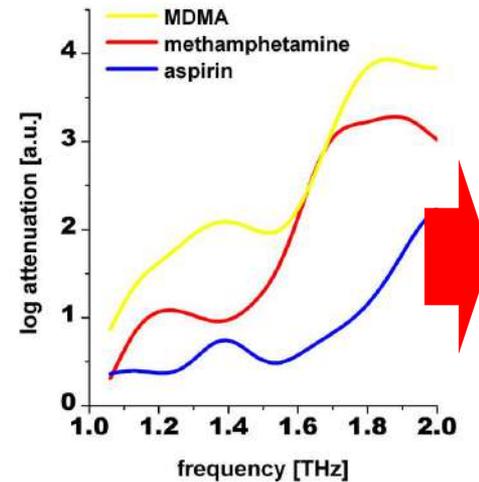
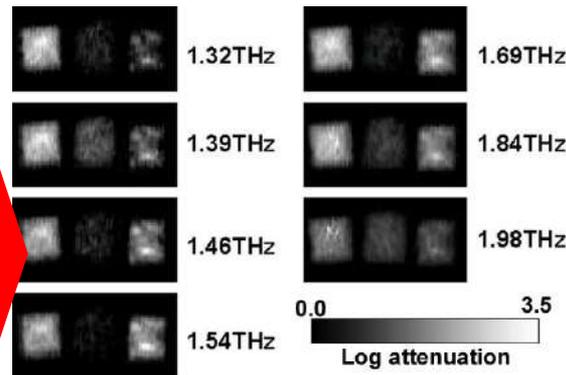
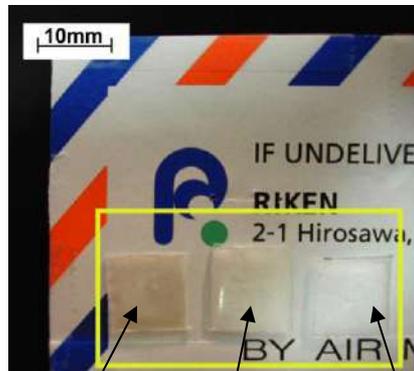


出力が入力と同一周波数であることを確認

Is-TPGを用いた遮蔽物内試薬 の透過分光/イメージング

Is-TPGを用いたTHz分光イメージング 遮蔽物越しの禁止薬物の非破壊検出

目標：X線や警察犬に勝る抑止力



麻薬 アスピリン 覚せい剤

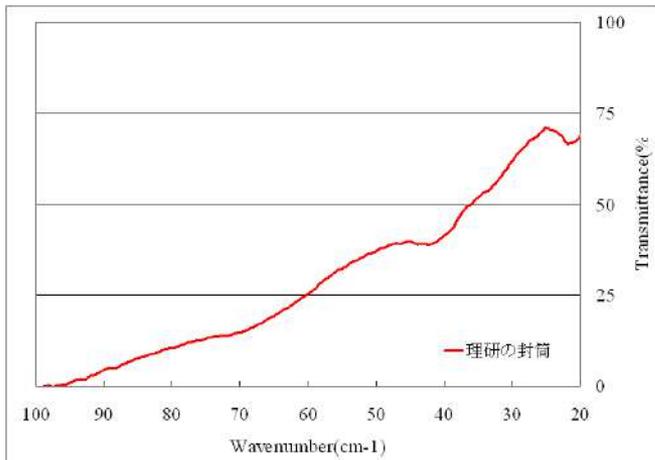
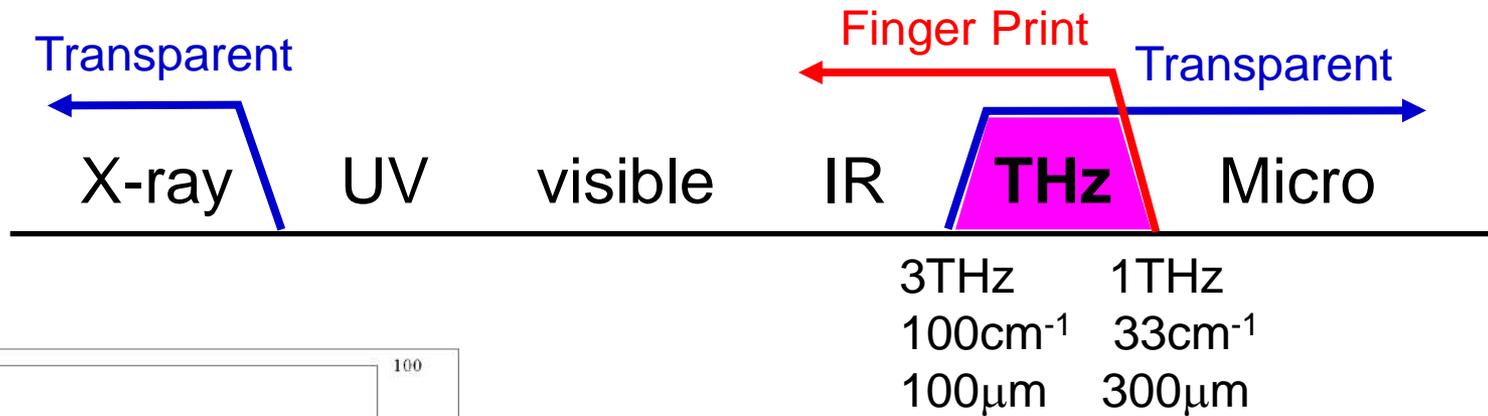
(試料提供：科学警察研究所)

K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, H. Inoue, Optics Express **11** (2003) 2549.

**2003年のTPOを用いた郵便物内の薬物の分光イメージング実験
当時の分光系のDNRは4桁以下で、薄い封筒のみ測定可能だった。
Is-TPGの進化で、厚手の遮蔽物越しの分光イメージングが可能に！**

透視には 0.5 – 3 THz がよい!?

0.5 – 3 THz 帯は物体の非破壊検出に適する
殆どの指紋スペクトルが0.5THz以上の領域に存在
多くの物質が 3THz以下の領域で透明



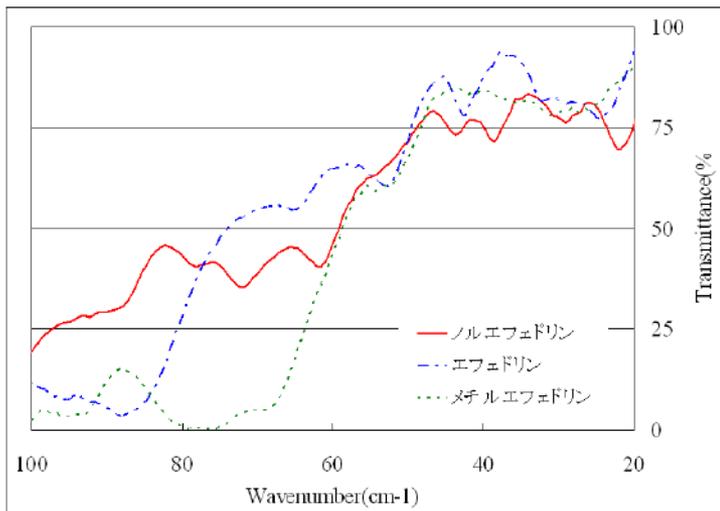
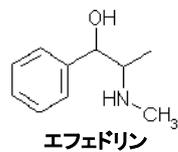
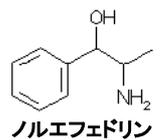
0.5 – 3THz はTPO, is-TPG, TDSの可変域!

封筒などに隠された覚せい剤や麻薬などの非破壊検査

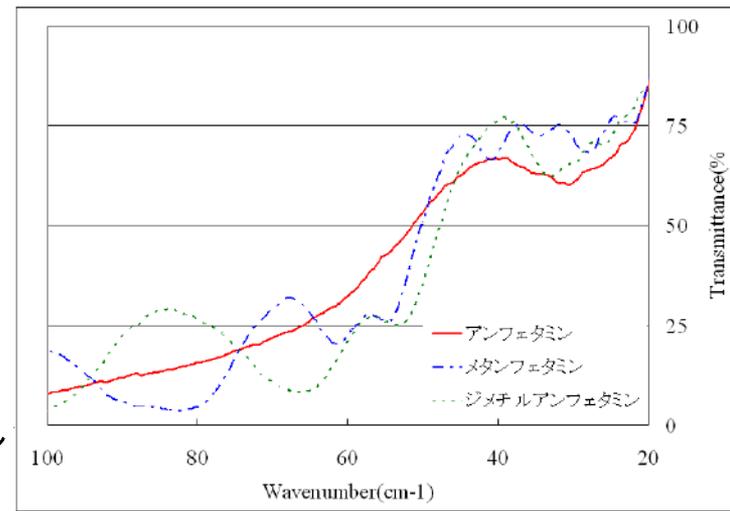
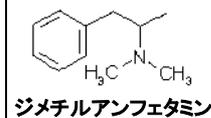
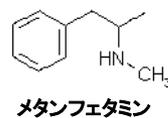
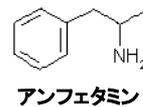
- 信書は捜査令状なしで開封できない。非破壊検出の手段が無く、自由に国境あるいは国内の郵便局を通過。
- X線スキャナーは、ビニール小袋や錠剤の形を見ることはできても薬物の種類の同定はできない ⇒ 開封して調べるに足る根拠は得られない。
- 探知機や探知犬の場合は、薬物の一部が僅かでも封筒の外に漏れていなければ検出できない。
- ミリ波イメージングの研究：ミリ波帯域には試薬類の指紋スペクトルが乏しいため薬物の種類の同定は困難。空間分解能も数ミリメートル。
- 赤外線イメージングの研究：赤外領域には試薬類の指紋スペクトルは存在するが、紙による吸収・散乱が強いことが測定の妨げ。
- THz波にとって封筒中の粉体などの透視は容易であり、かつ禁止薬物類も固有のスペクトルを有することが今回確認されたので、最適の非破壊検査

代表的禁止薬物等20種類全てに指紋スペクトル

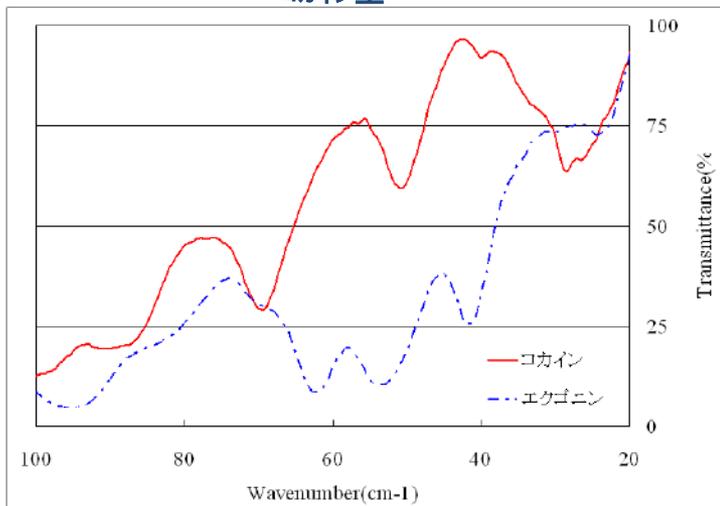
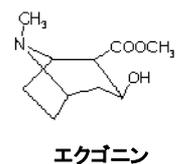
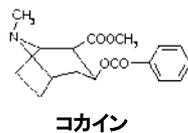
覚せい剤原料



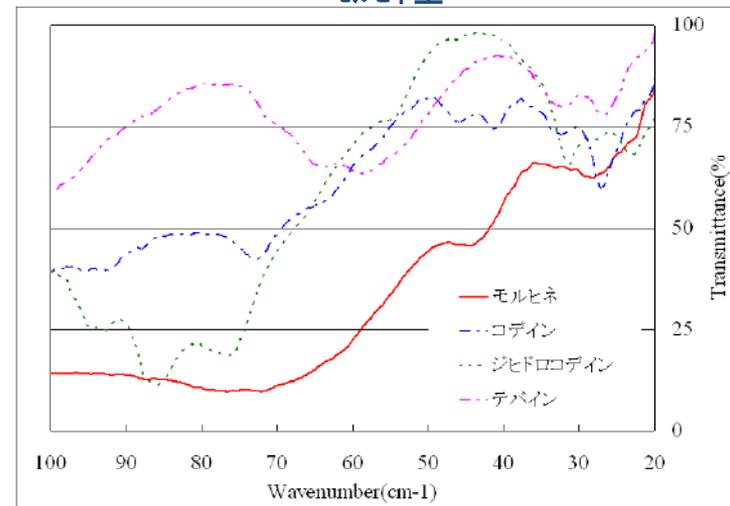
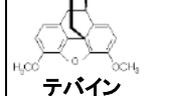
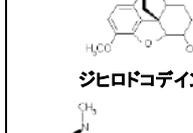
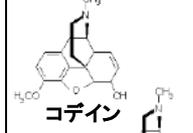
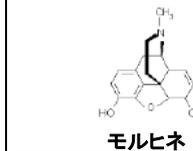
覚せい剤



コカイン型



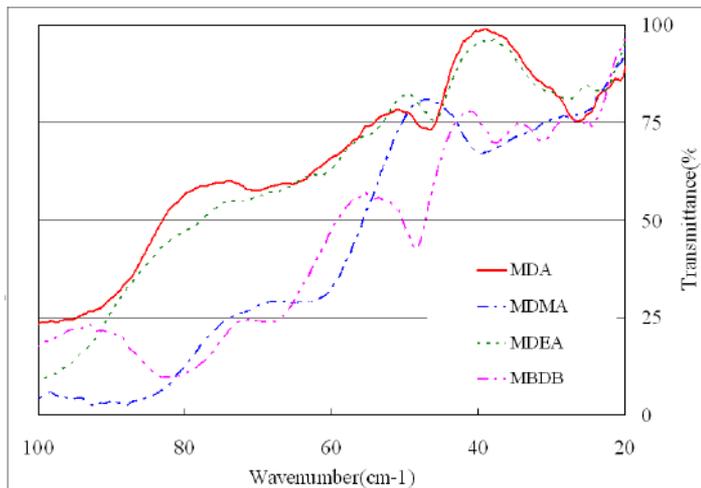
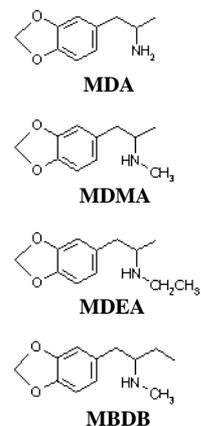
モルヒネ型



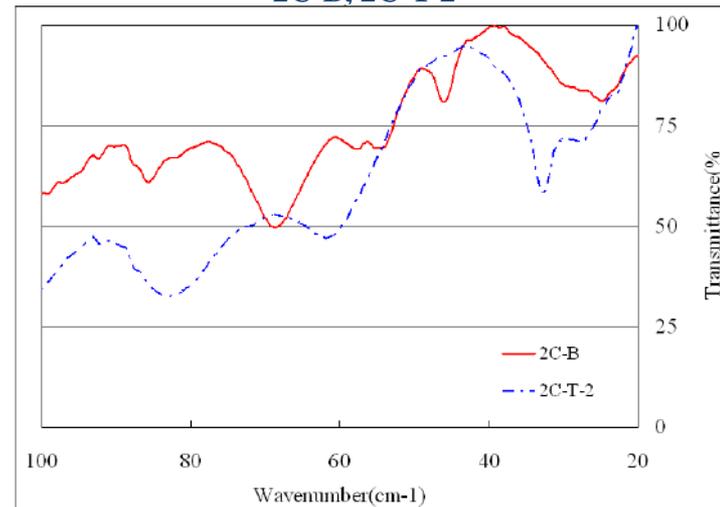
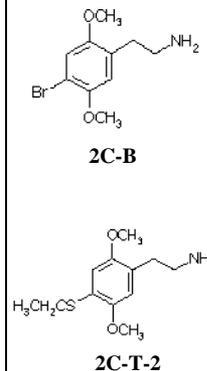
禁止薬物類は主成分分析などで十分識別可能。

禁止薬物等の指紋スペクトル

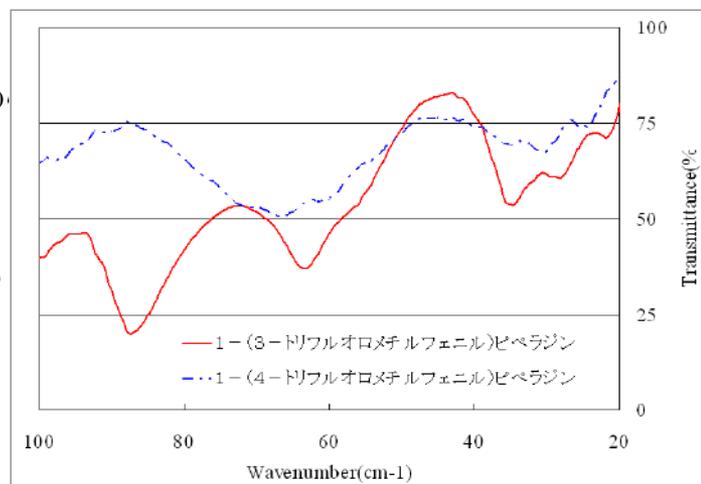
幻覚剤型



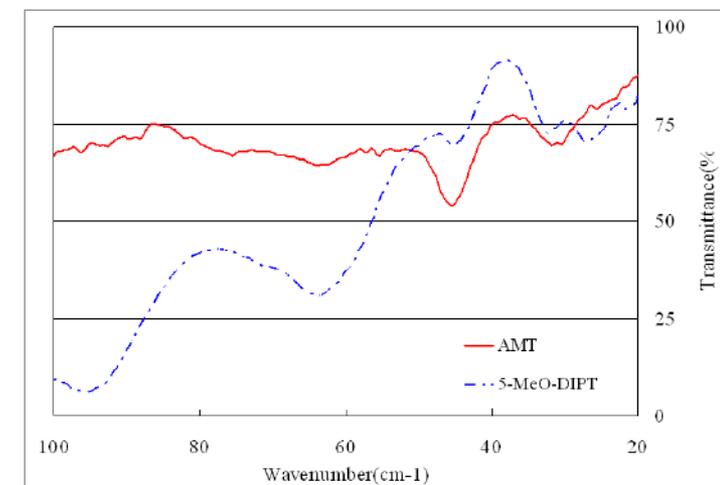
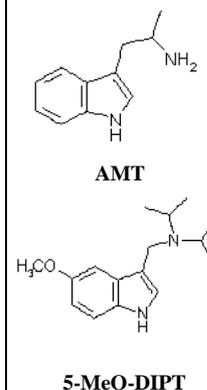
2C-B, 2C-T-2



ピペラジン



AMT, 5-MeO-DIPT



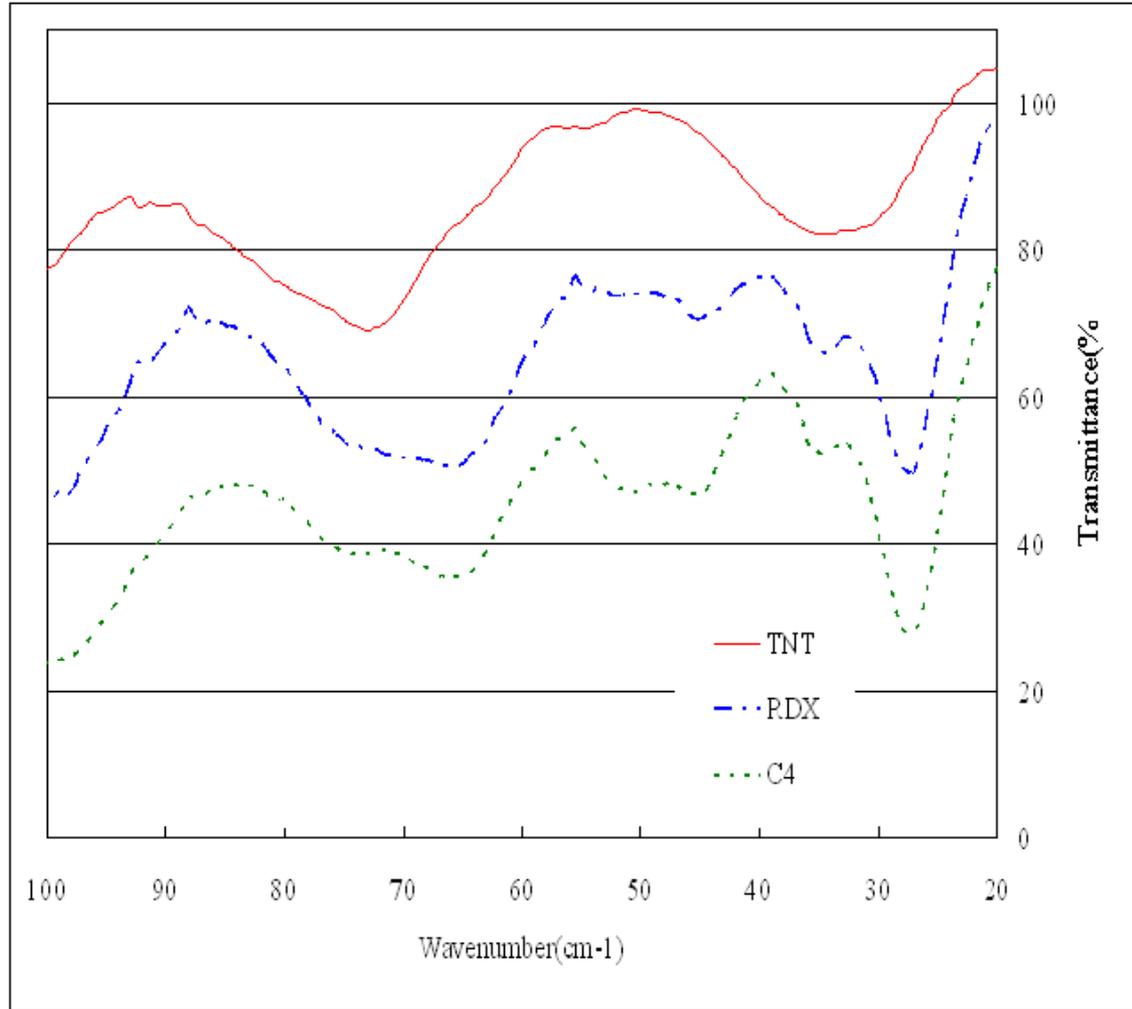
重要な点：紙などを良く透過する 100cm^{-1} 以下の領域の指紋スペクトル

代表的な爆薬指紋スペクトル

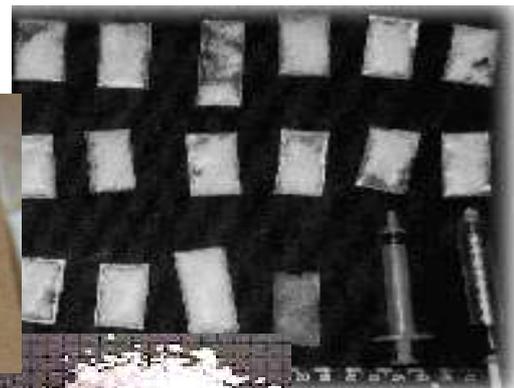
Cc1c([N+](=O)[O-])cc([N+](=O)[O-])cc1[N+](=O)[O-]
TNT
世界各国で使用されている代表的な爆薬



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



郵便物内の禁止薬物検出にはTDSよりもis-TPGが有利かも

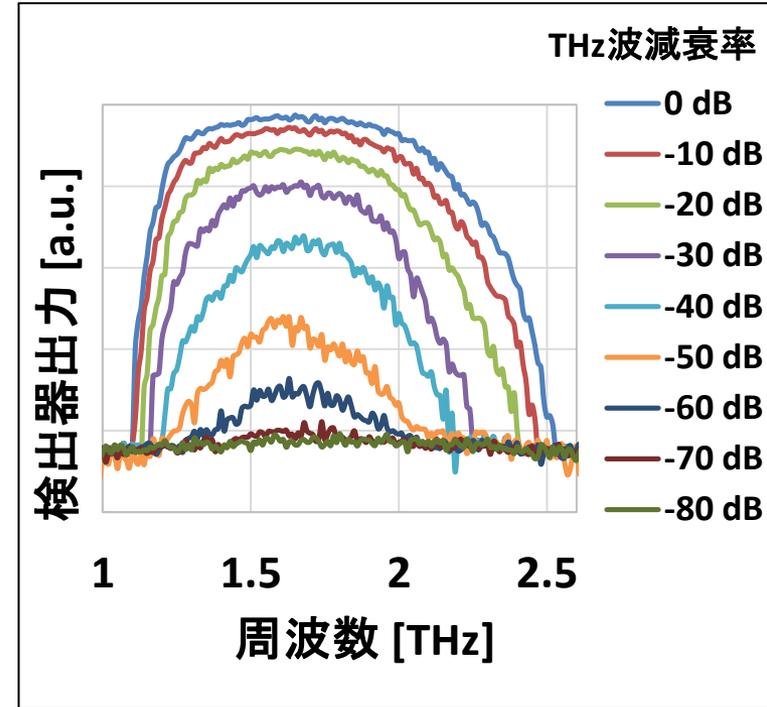
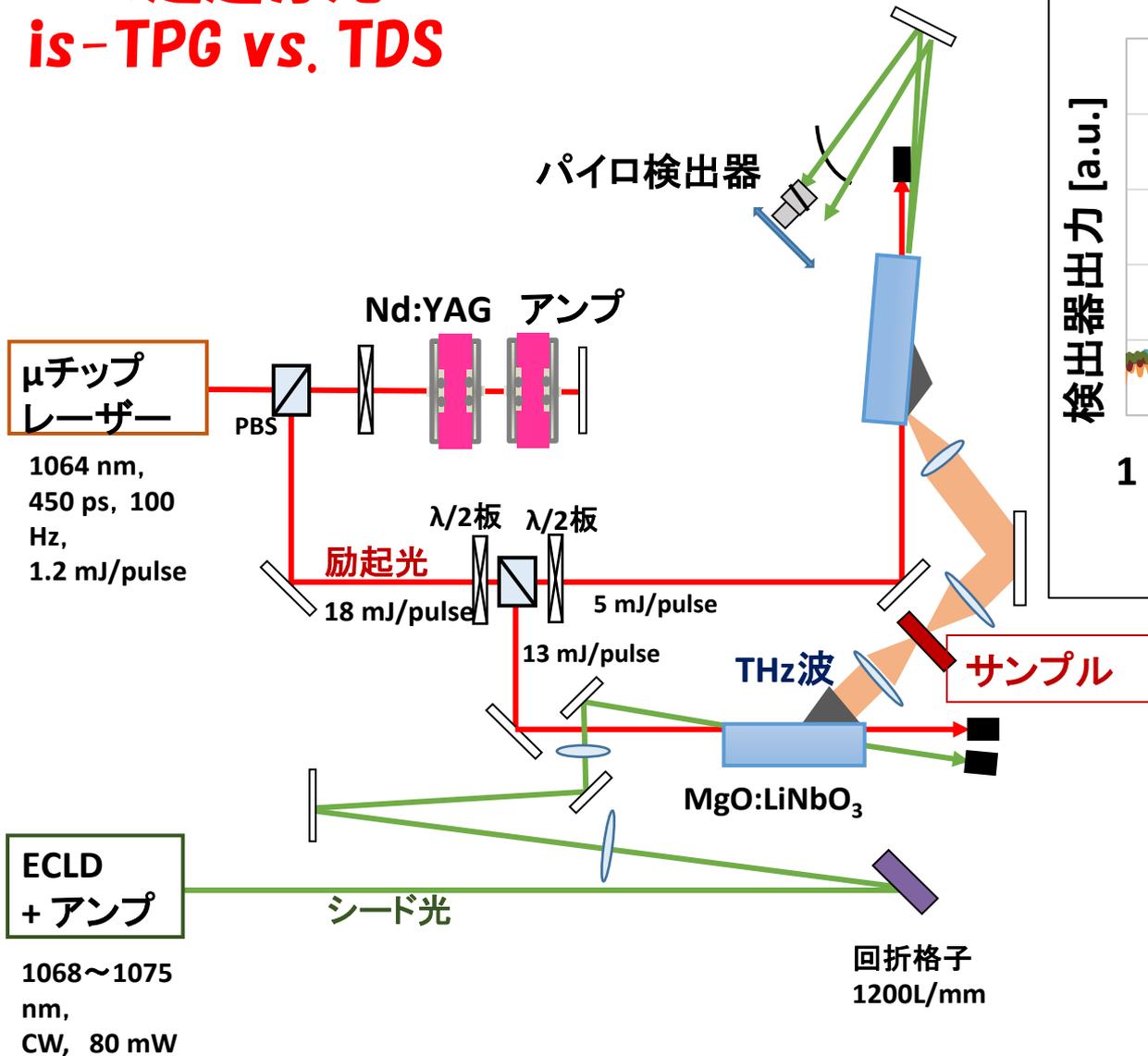


TDSは素晴らしい基盤技術だが、課題も。。。

- TDSの光伝導アンテナ(PCA)は数十 μm 径のピンポイント検出
⇒ 散乱、回折に比較的弱い ⇒ is-TPGの検出器は LiNbO_3 結晶 の数mm径
- TDSは高周波側出力が弱い
- 乱れた時間波形を正確にサンプリングできないとスペクトルにエラーが生じる

is-TPG透過分光実験系

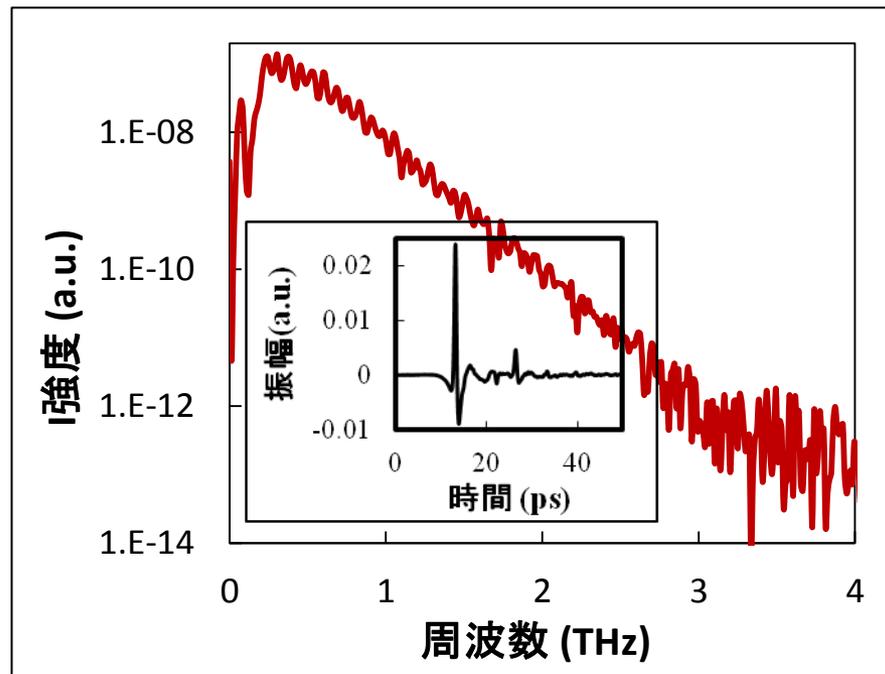
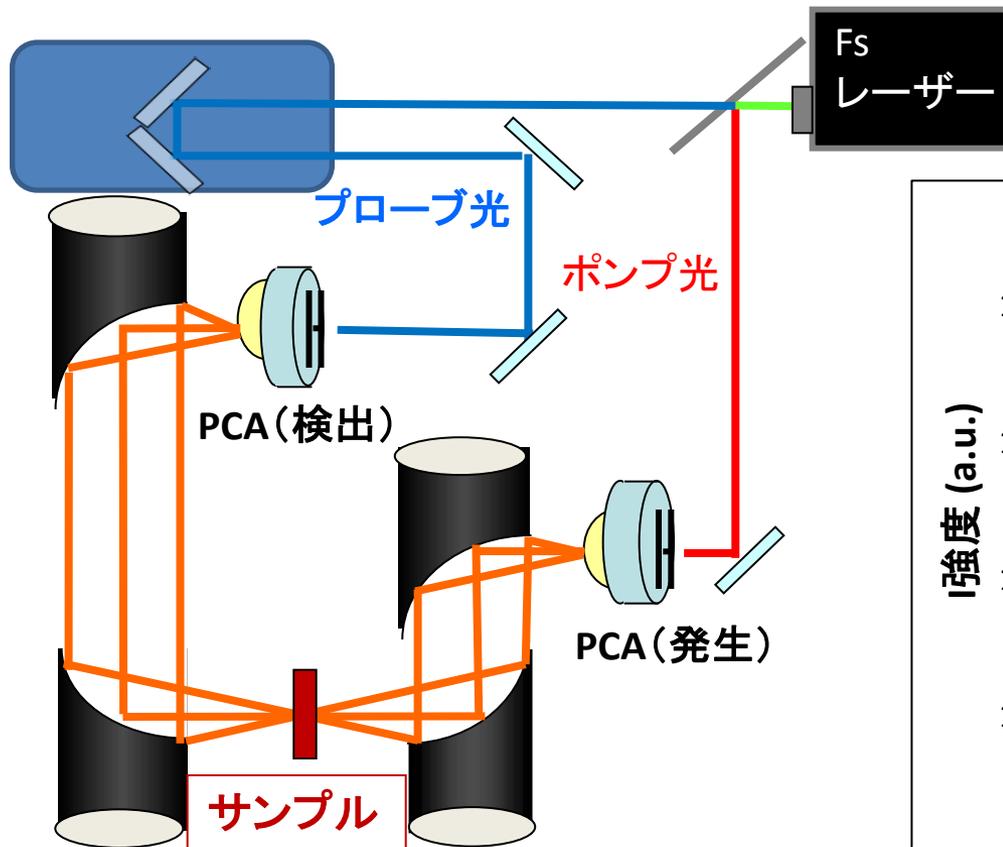
遮蔽物内試薬 の透過分光 is-TPG vs. TDS



is-TPGスペクトル

遮蔽物内試薬 の透過分光 is-TPG vs. TDS

THz-TDS透過分光実験系



THz-TDS透過分光実験系

THz-TDSスペクトル

遮蔽物内試薬サンプル (監修:名古屋税関職員)

試薬: 3種類の糖類の粉末

- ・マルトース、グルコース、フルクトース
- ・粉末(粒径32~75 μm)



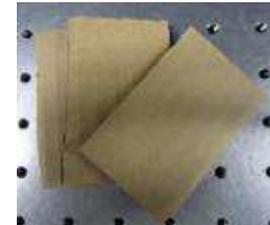
粉末
厚み: 0.5 mm

遮蔽物: 3種類

- ・厚紙封筒(EMS封筒)
- ・段ボール
- ・裏面に気泡緩衝材を貼った厚紙封筒



厚紙封筒



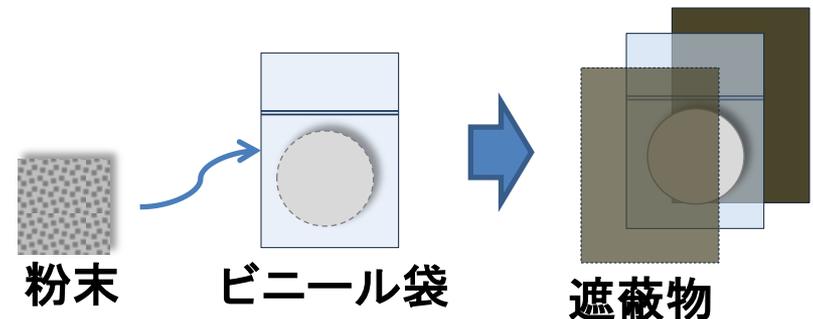
ダンボール



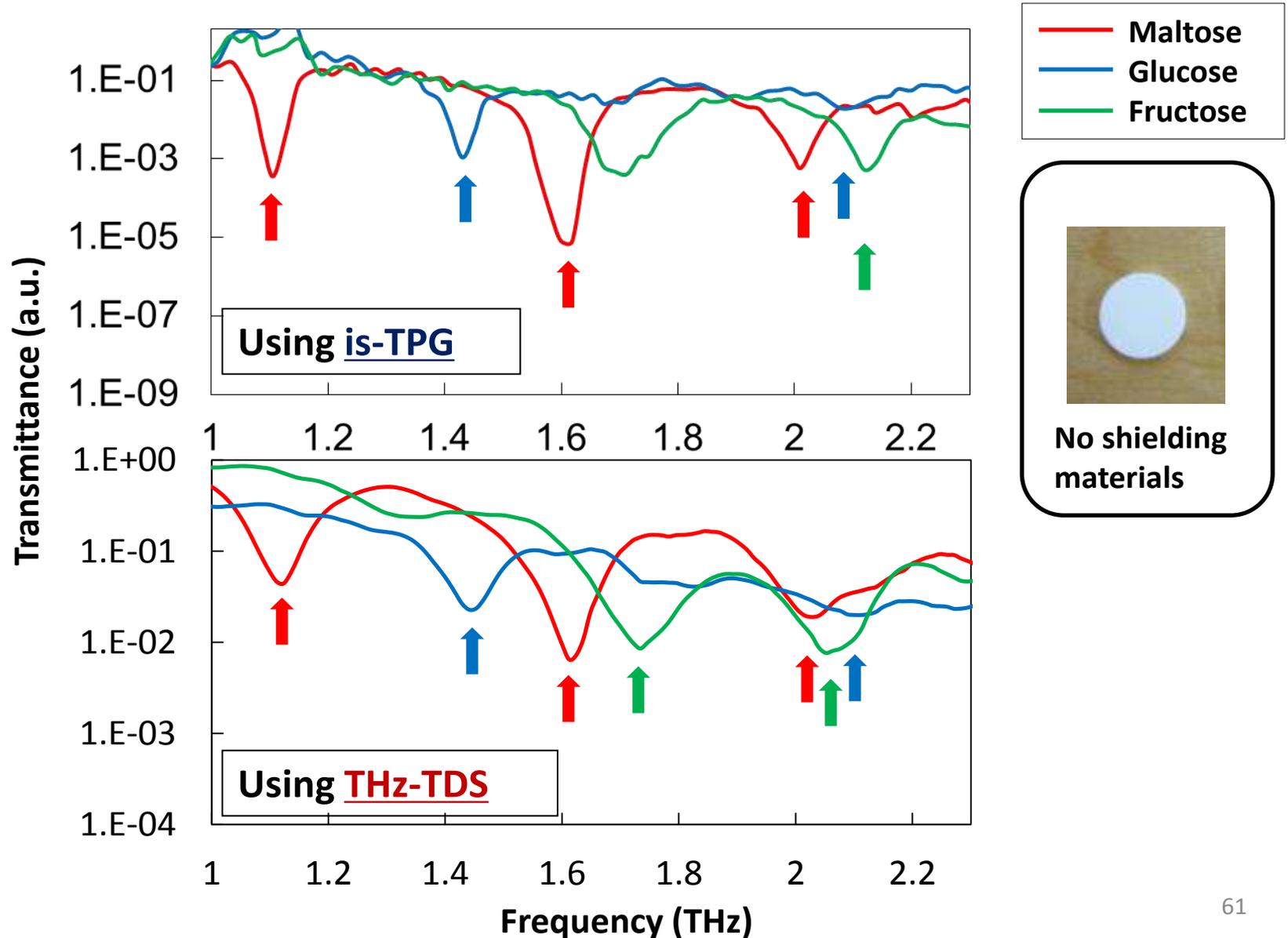
厚紙封筒+気泡緩衝材

サンプル作製・透過分光測定手順

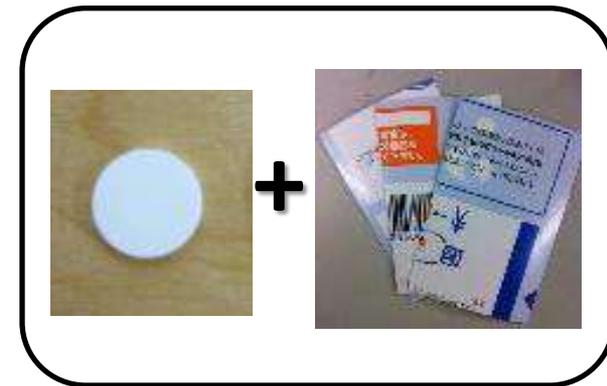
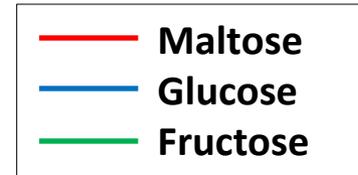
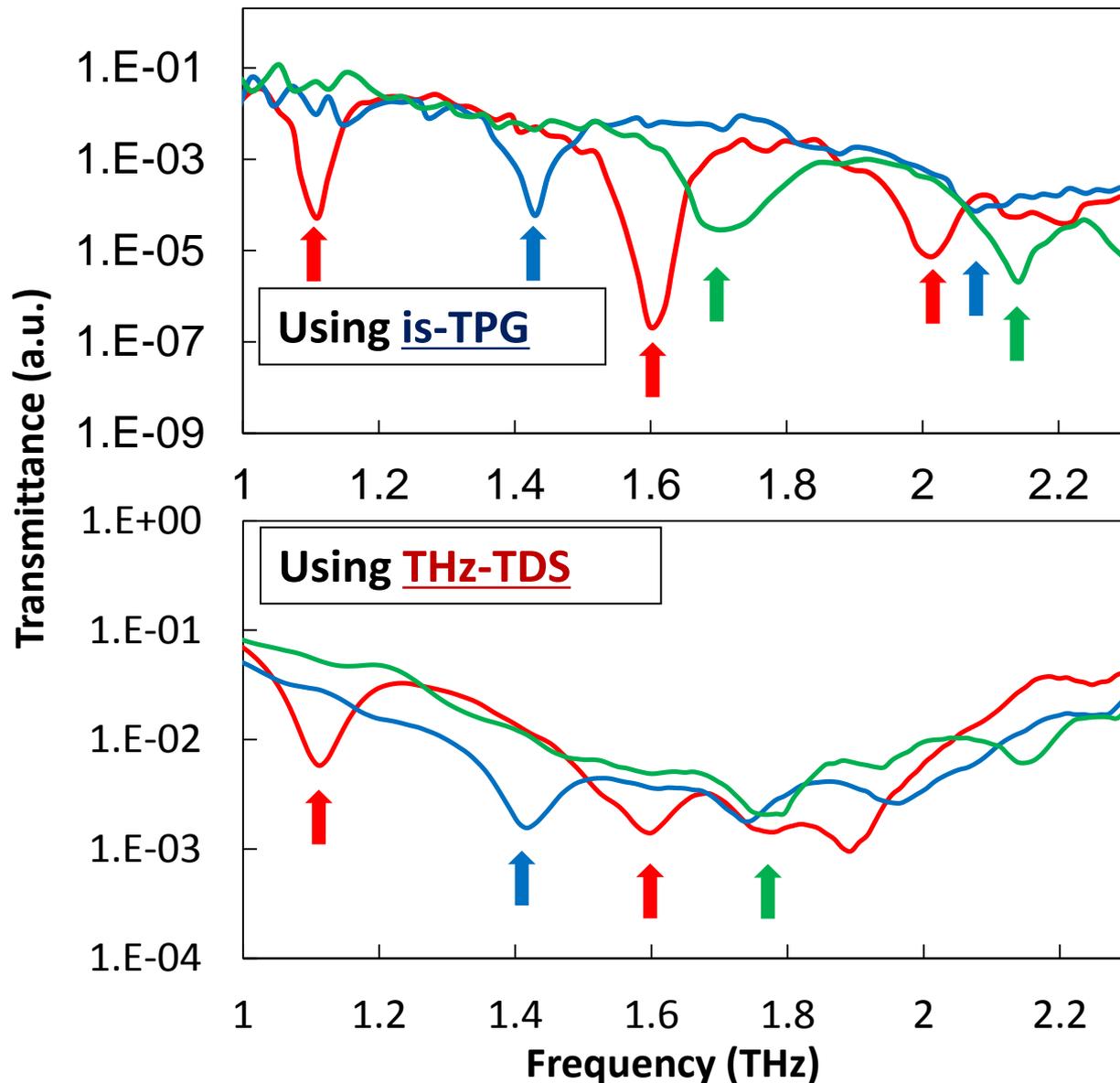
- ・試薬粉末をビニール袋に封入
- ・遮蔽物2枚の間に挟み込み
- ・遮蔽物越しに試薬を透過分光



分光結果①: 錠剤サンプル・遮蔽物なし

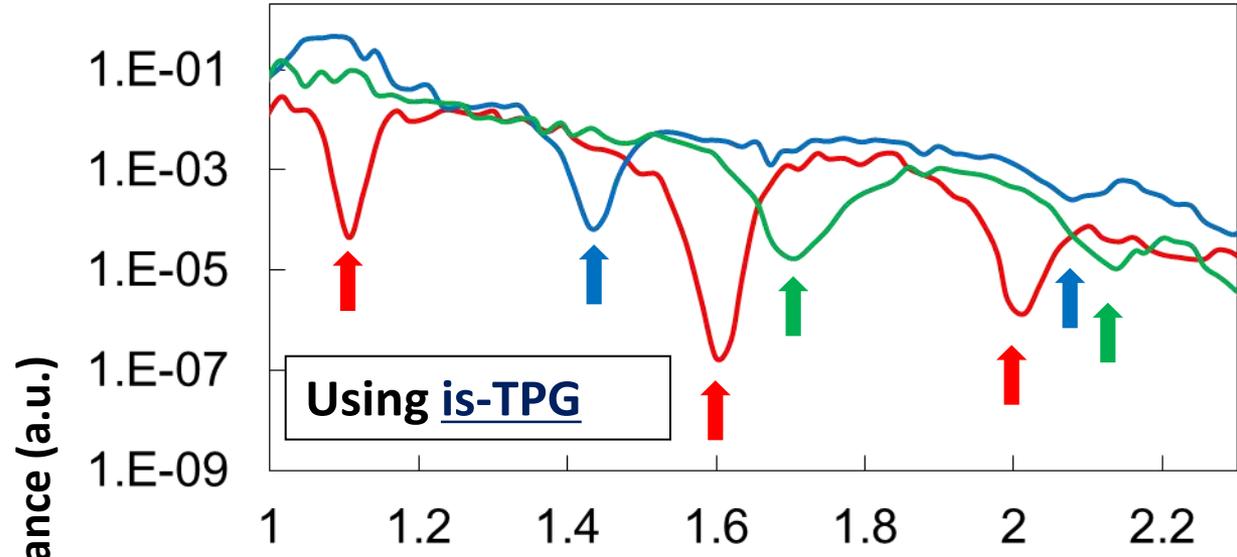


分光結果②: 錠剤サンプル・厚紙封筒

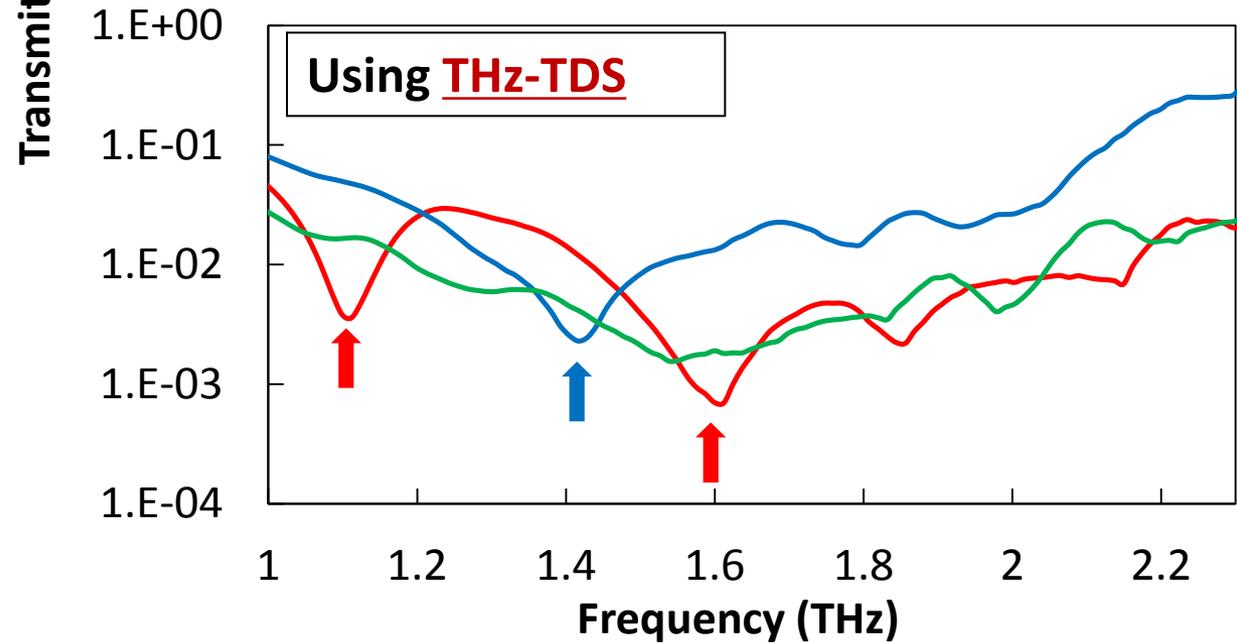
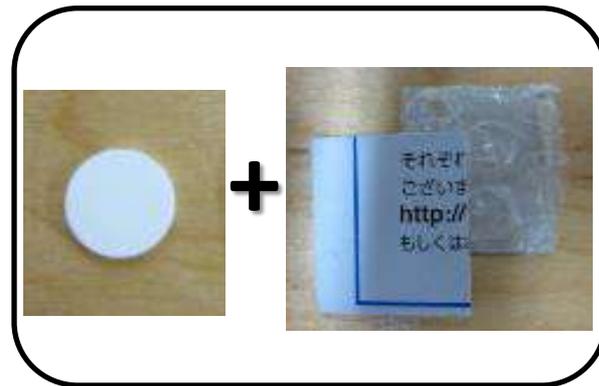


Distinguishable
absorption peaks
is-TPG : 1.1 ~ 2.2 THz
THz-TDS : 1.1 ~ 1.6 THz

分光結果③: 錠剤サンプル・厚紙封筒 + 気泡緩衝材

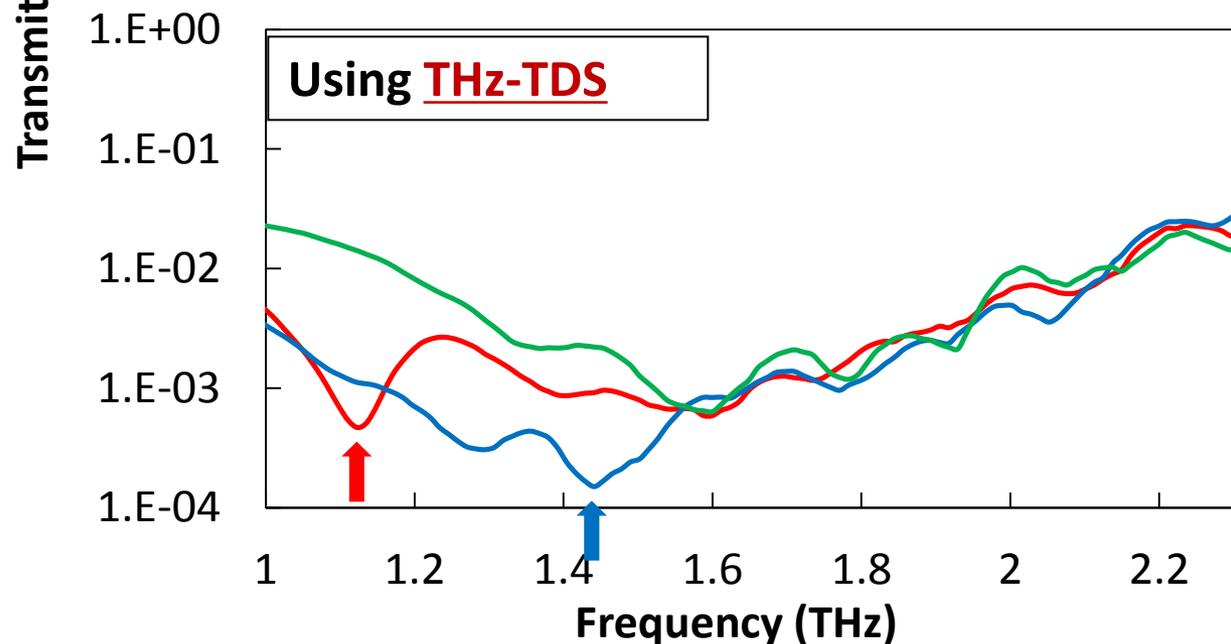
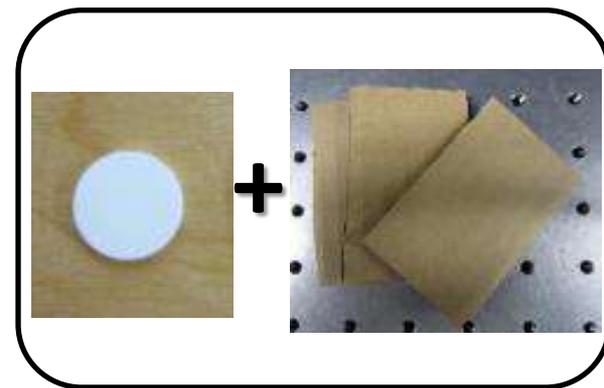
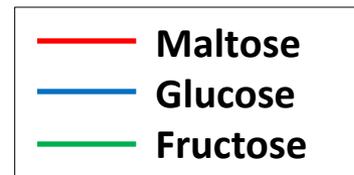
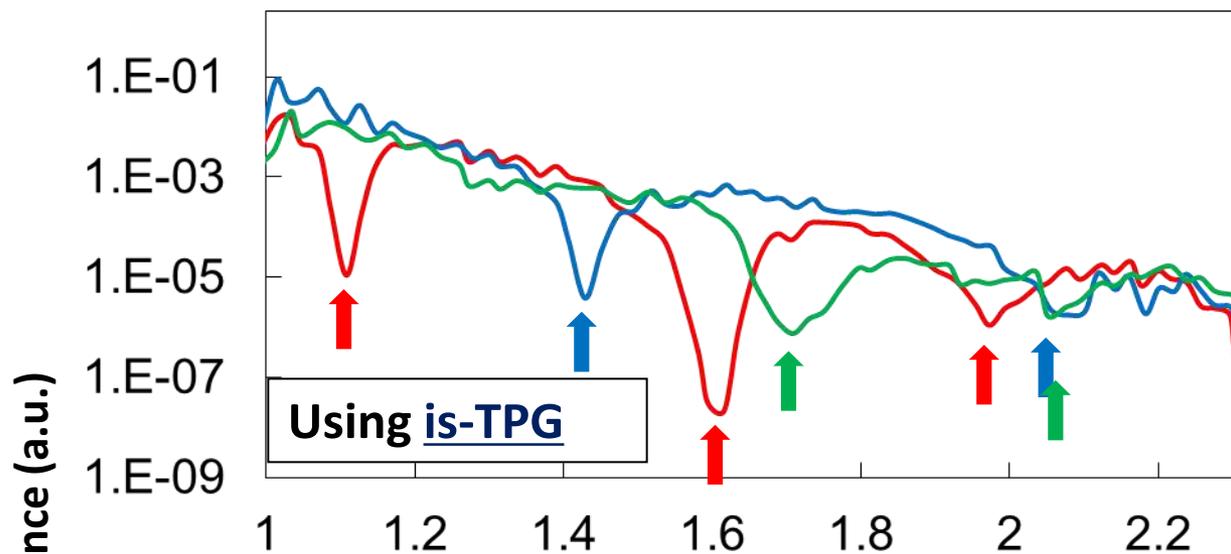


- Maltose
- Glucose
- Fructose



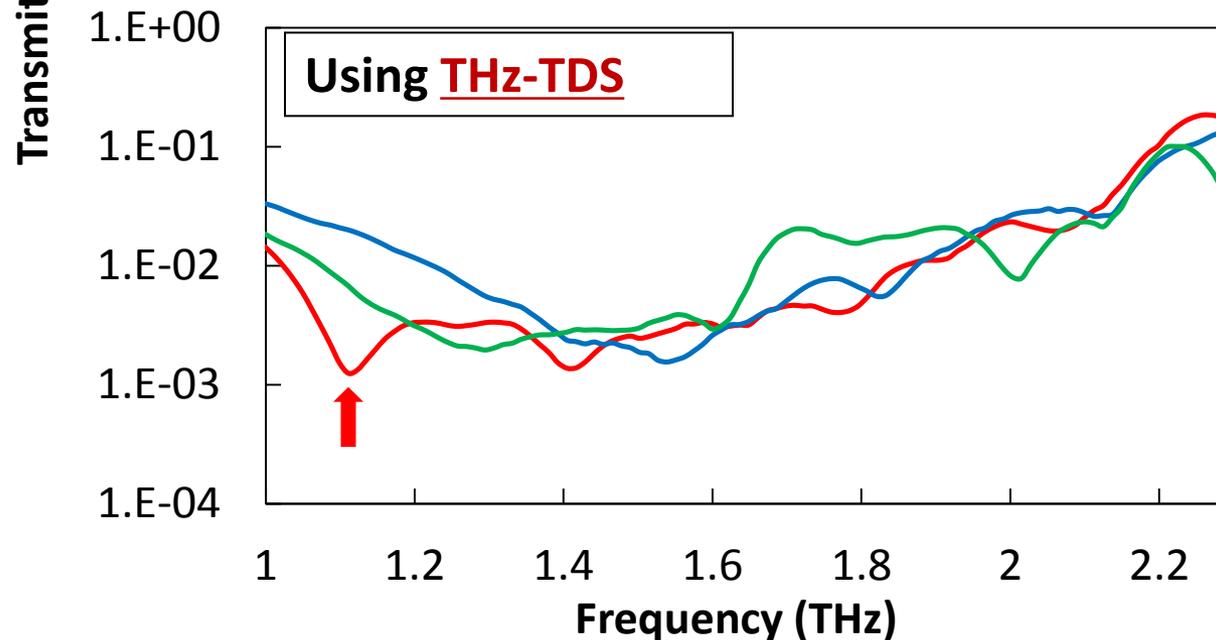
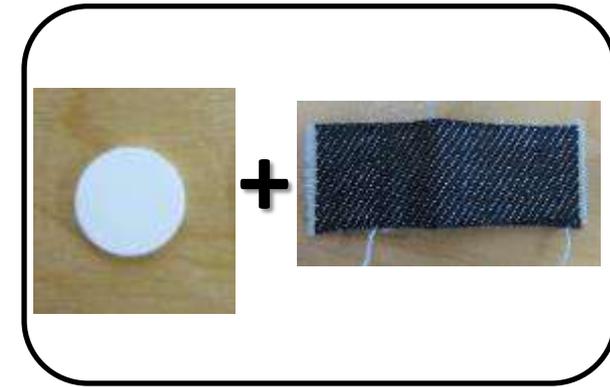
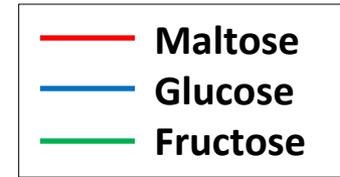
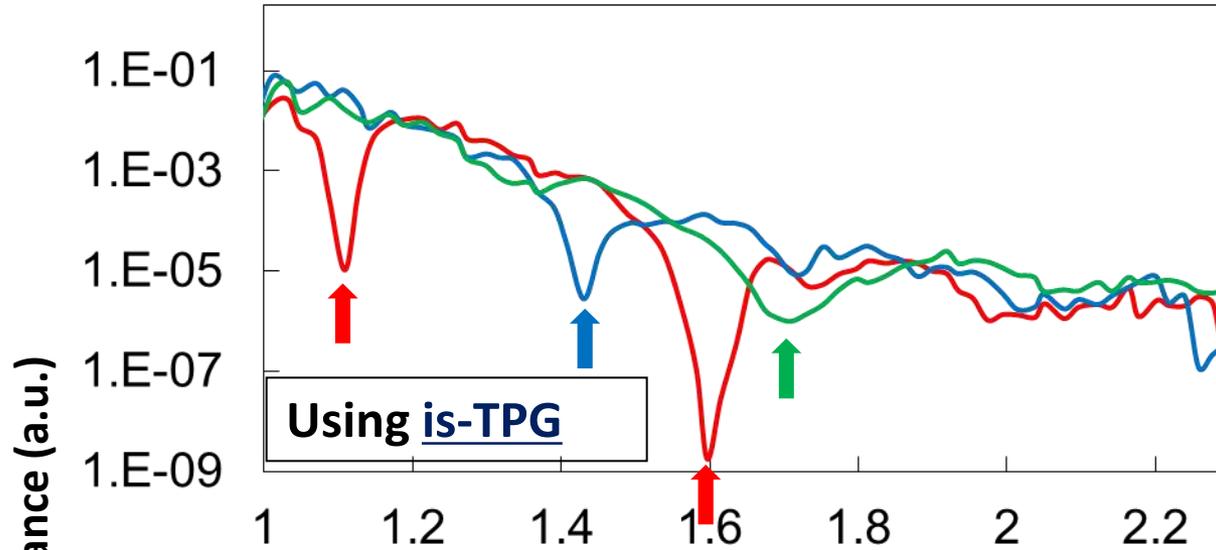
Distinguishable
absorption peaks
 is-TPG : 1.1 ~ 2.2 THz
 THz-TDS : 1.1 ~ 1.6 THz

分光結果④：錠剤サンプル・ダンボール2枚



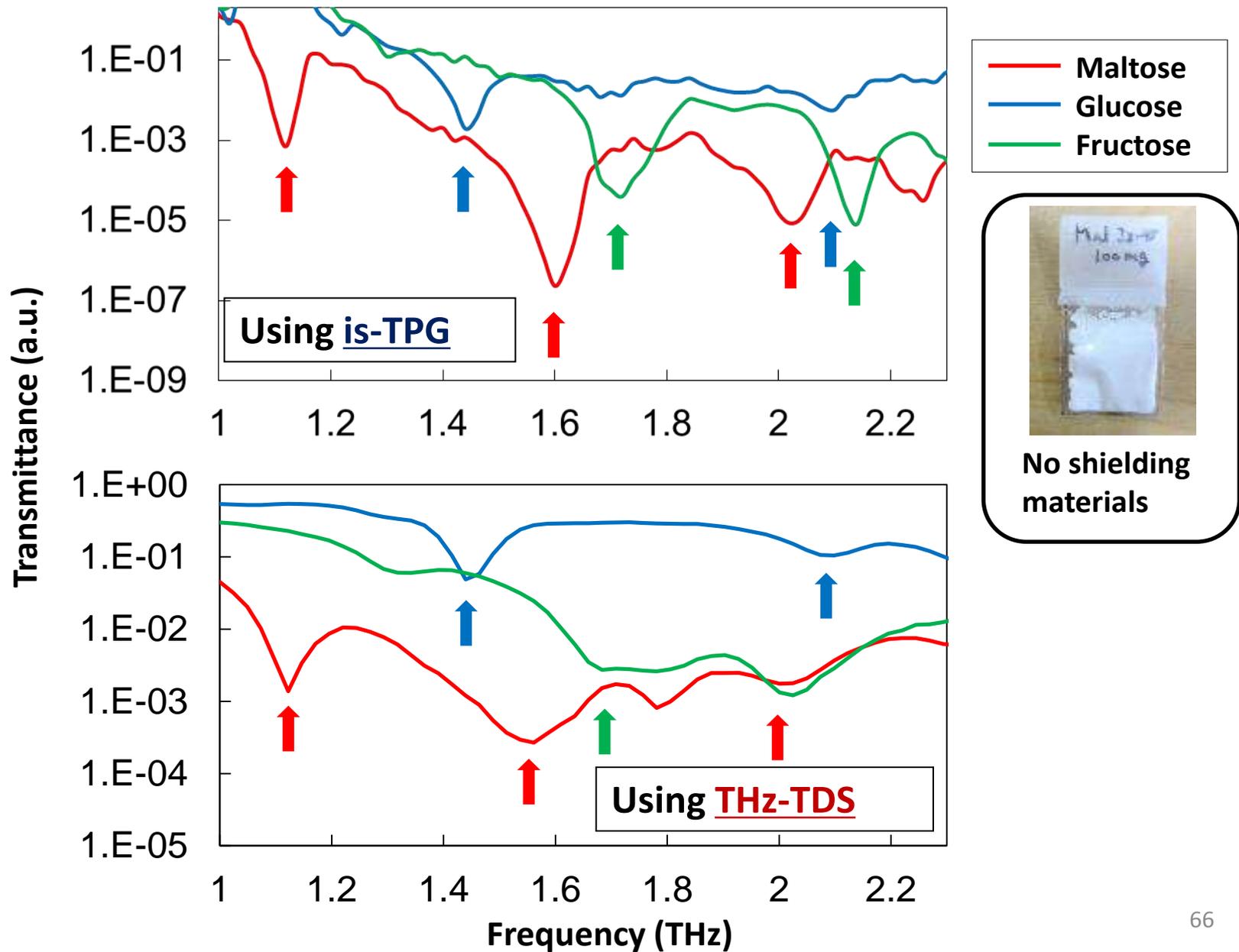
Distinguishable
absorption peaks
is-TPG : 1.1 ~ 2.1 THz
THz-TDS : 1.1 ~ 1.4 THz

分光結果⑤: 錠剤サンプル・布 (ジーンズ生地)

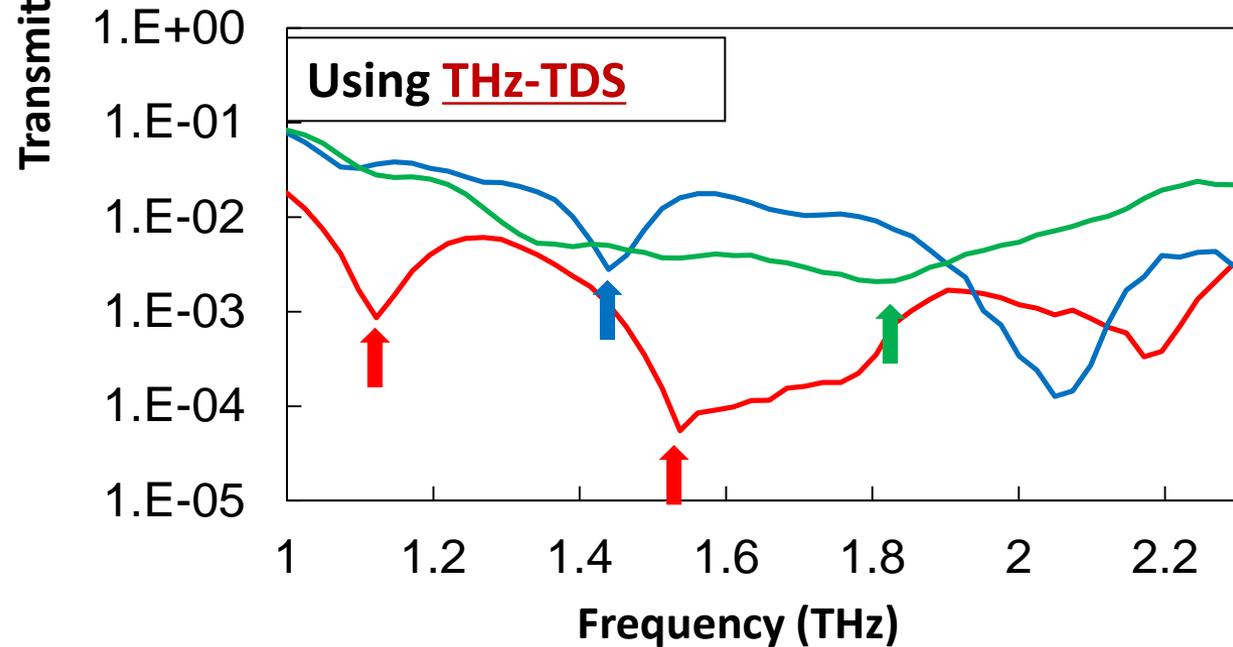
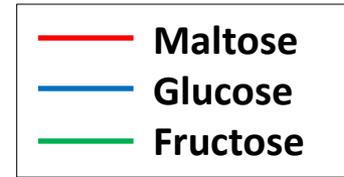
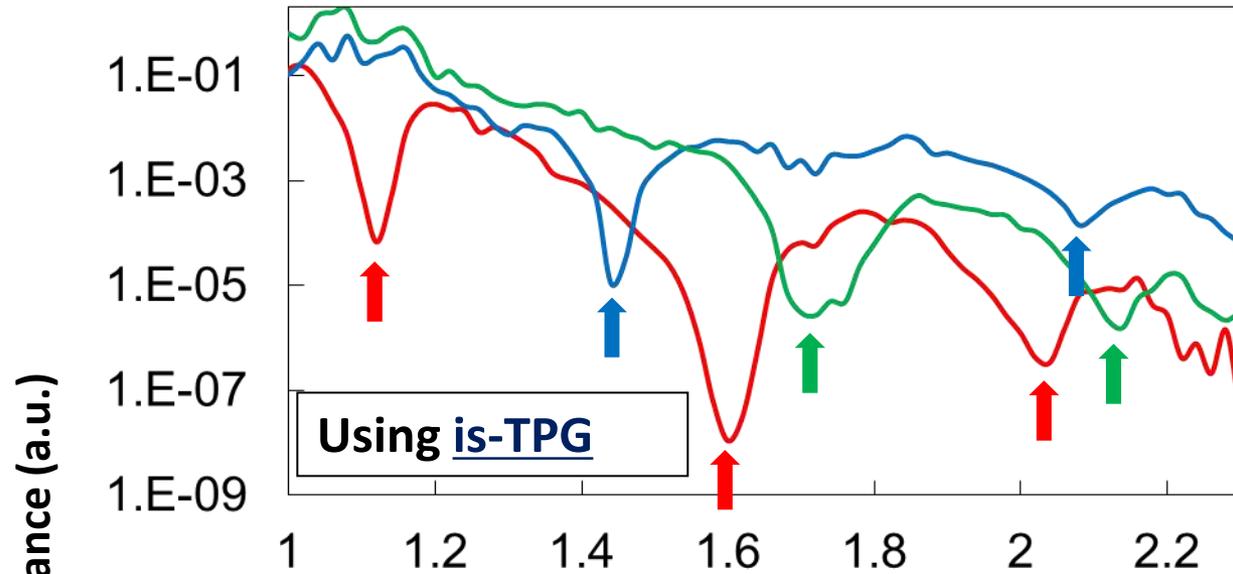


Distinguishable
absorption peaks
is-TPG : 1.1 ~ 1.8 THz
THz-TDS : ~ 1.1 THz

分光結果⑥: 粉末サンプル・遮蔽物なし

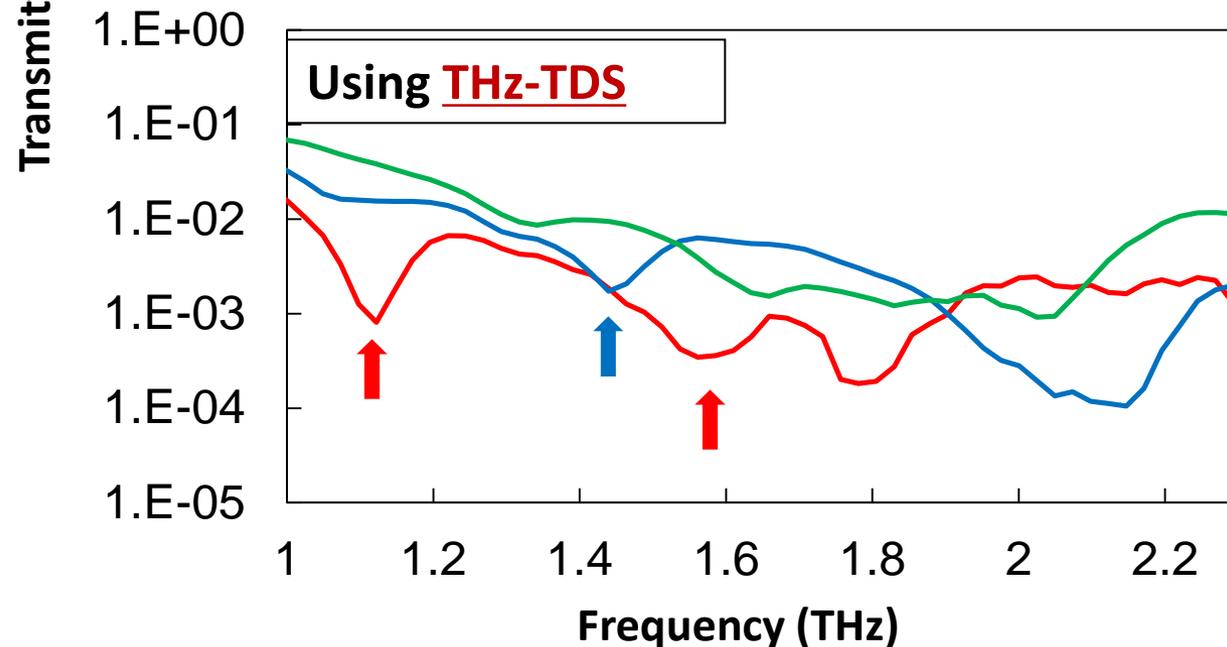
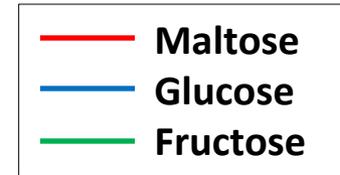
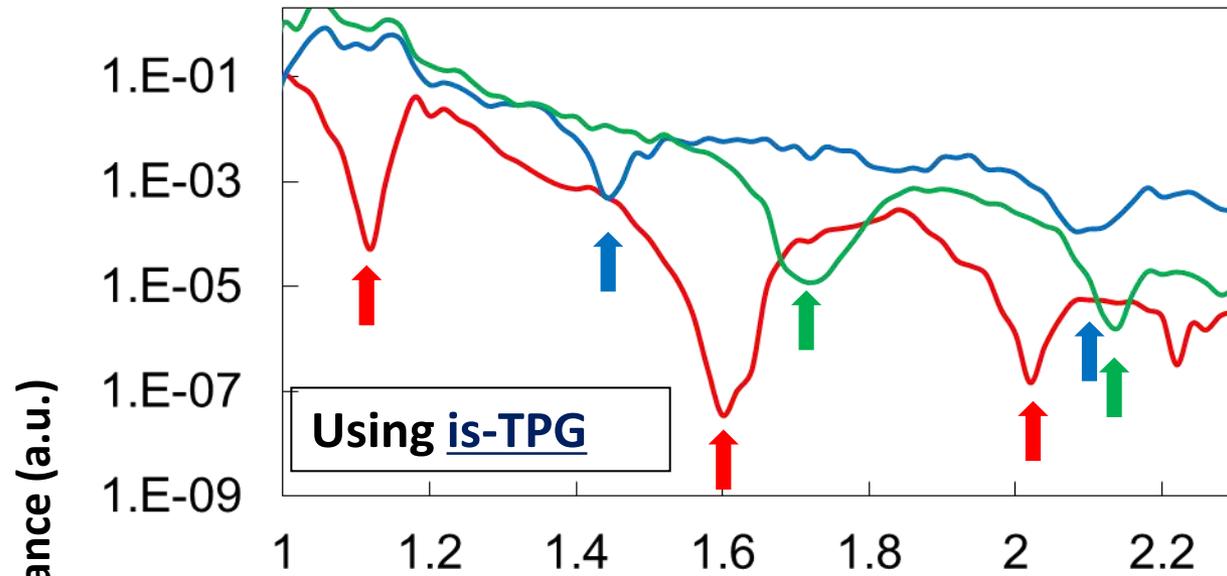


分光結果⑦: 粉末サンプル・厚紙封筒



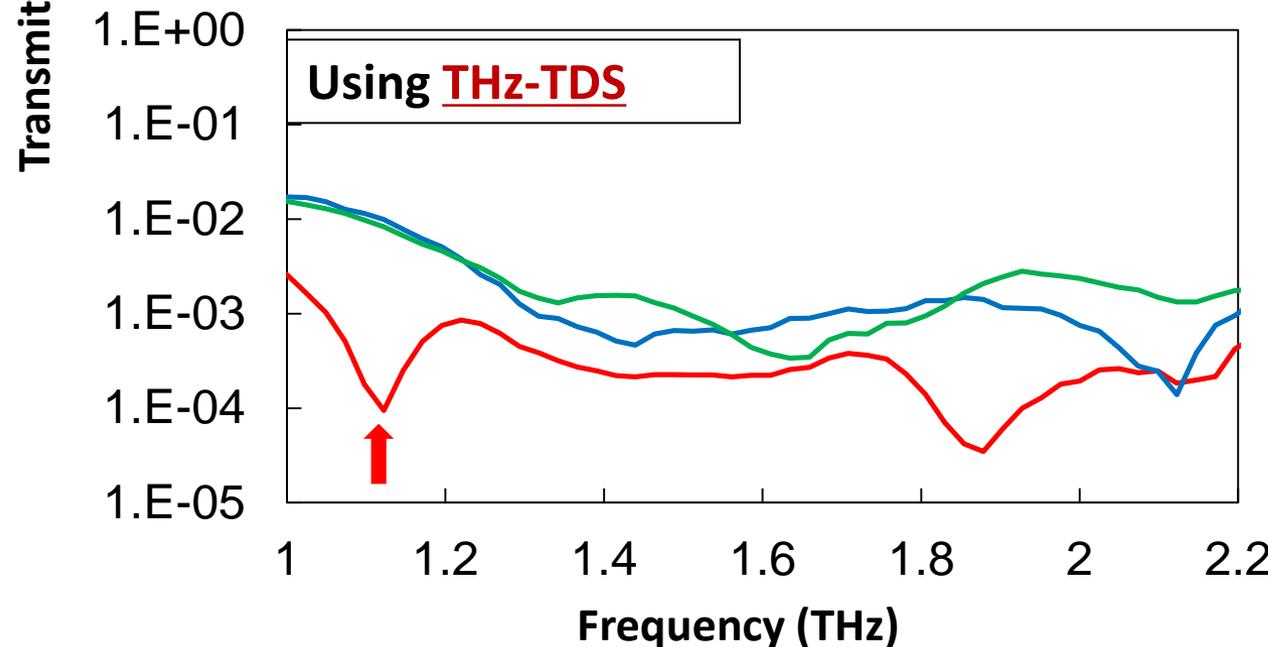
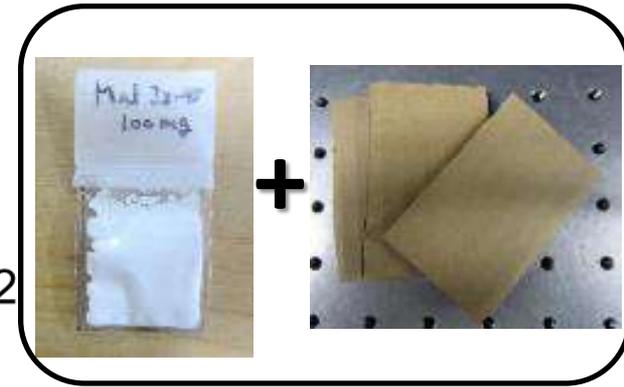
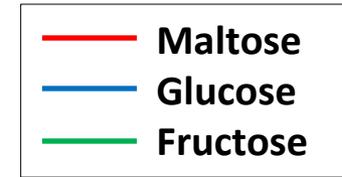
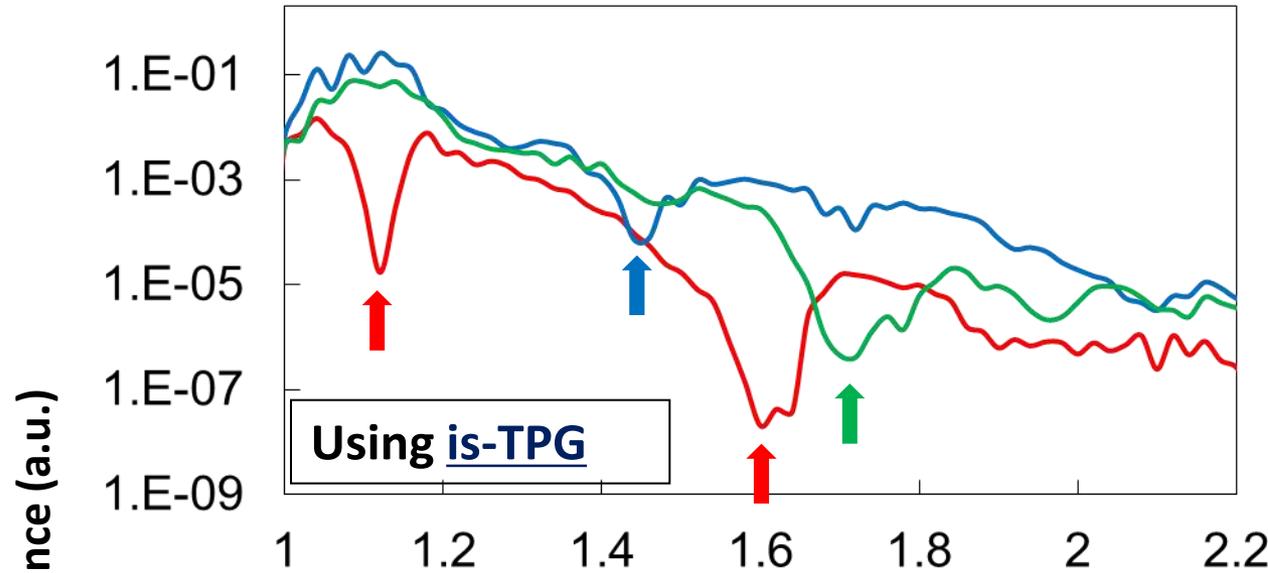
Distinguishable
absorption peaks
is-TPG : 1.1 ~ 2.2 THz
THz-TDS : 1.1 ~ 1.8 THz

分光結果⑧: 粉末サンプル・厚紙封筒 + 気泡緩衝材



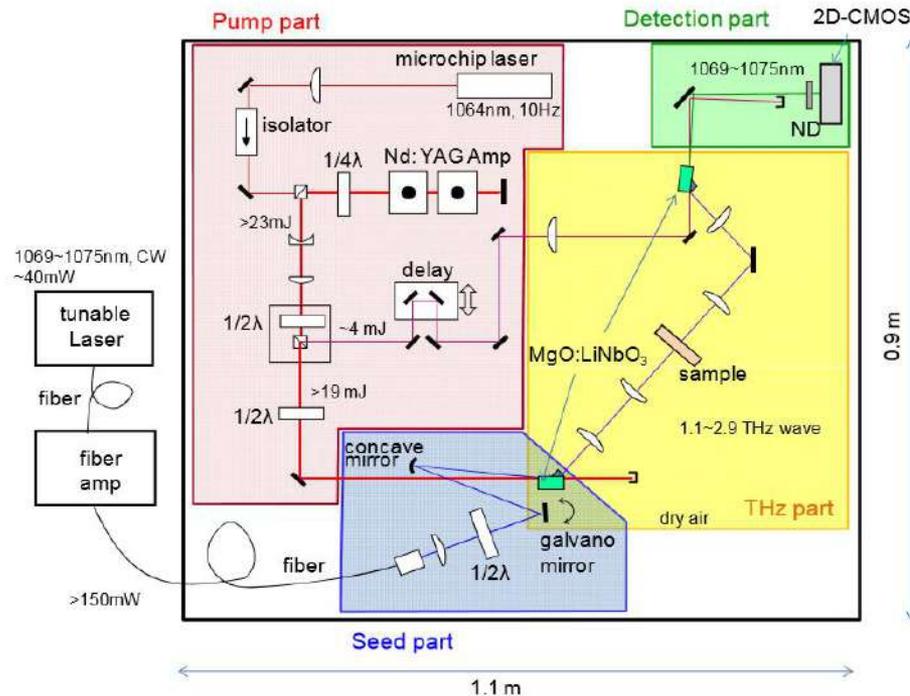
Distinguishable
absorption peaks
is-TPG : 1.1 ~ 2.2 THz
THz-TDS : 1.1 ~ 1.6 THz

分光結果⑨: 粉末サンプル・ダンボール2枚



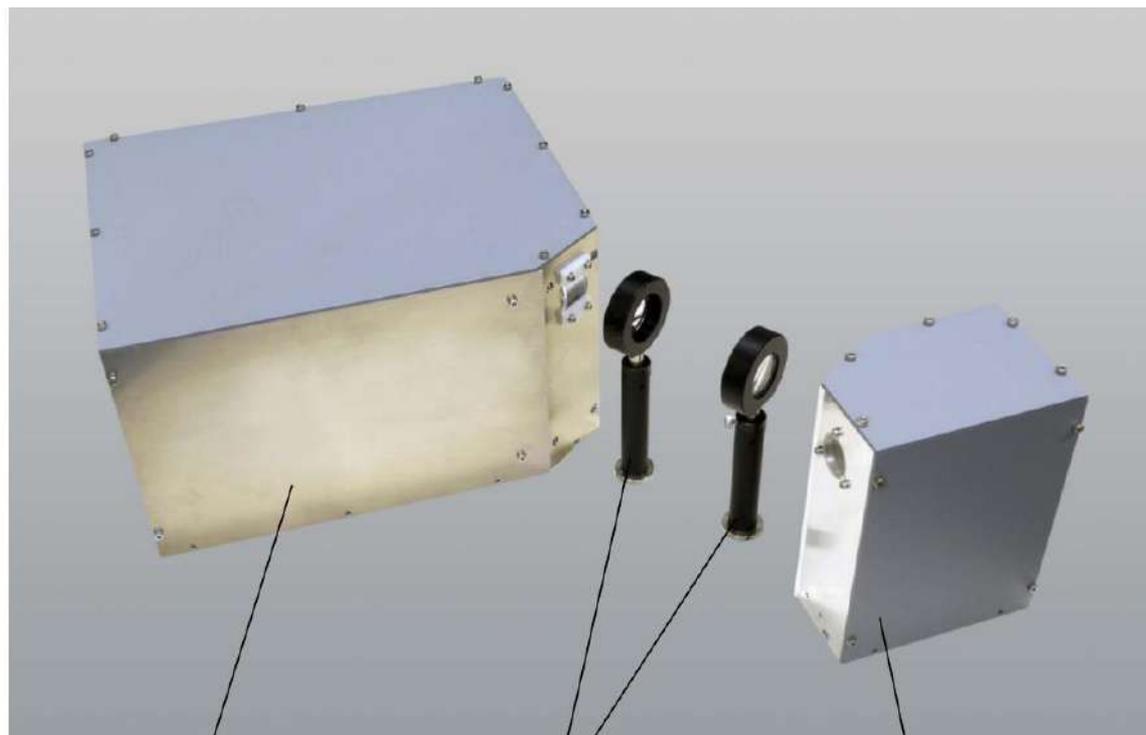
Distinguishable
absorption peaks
is-TPG : 1.1 ~ 1.7 THz
THz-TDS : ~ 1.1 THz

is-TPG 分光システムのプロトタイプ機 HITACHI HIGHTECH Inc. との共同開発



Commercially available!

is-TPG 分光システムのプロトタイプ機 澁谷工業 との共同開発



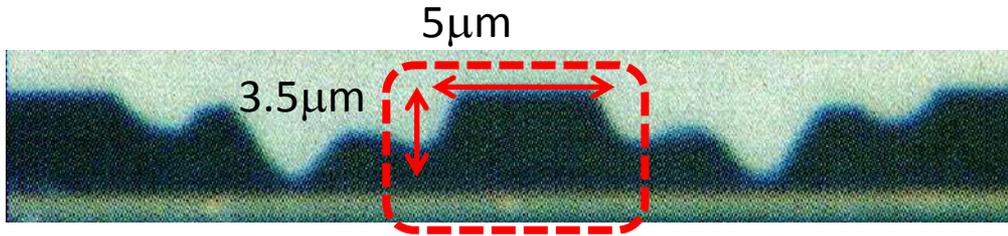
Emitter is-TPG

Tsurupika lens

Detector is-TPG

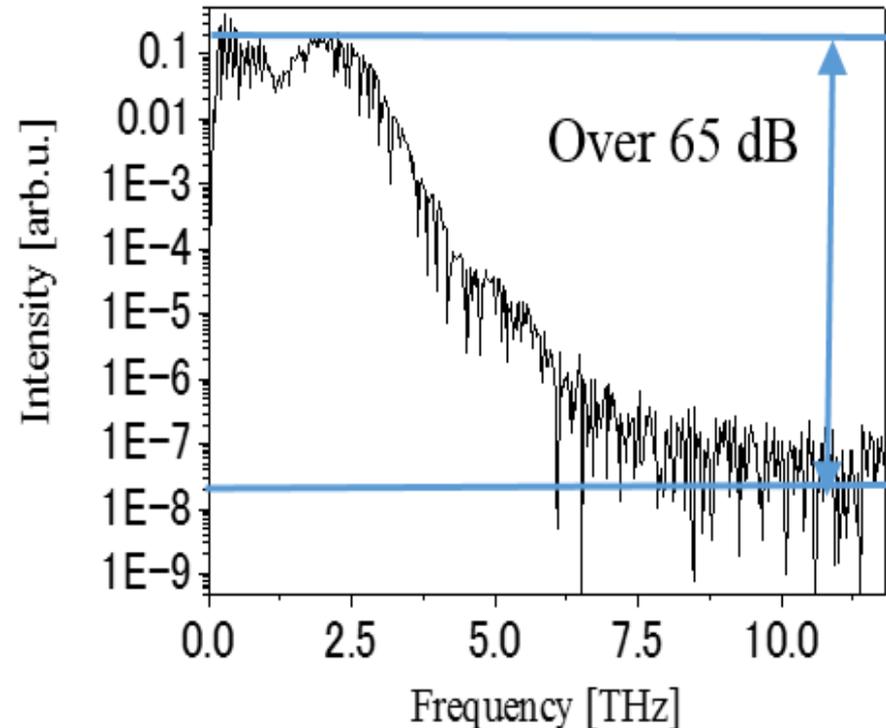
Commercially available!

我々はTDSも研究している(一例として) MgO:LiNbO₃ リッジ導波路を用いたTDS用光源



MgO: LNリッジ導波路 日本ガイシ製
10mm長

7THzまで高強度で
発生可能
ADVANTEST社が
TDS製品に採用



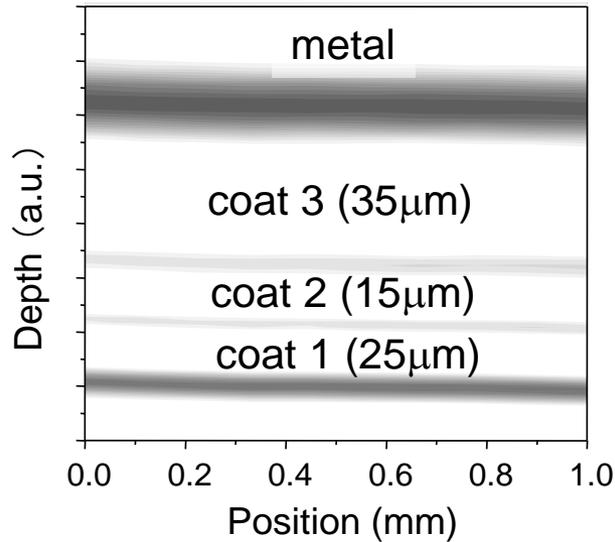
ADVANTEST.

テラヘルツ分光・イメージング 解析プラットフォーム

研究用途から産業用組み込みまでをカバー



我々はTDSも研究している(一例として) DAST結晶を用いたTDSによる反射型トモグラフィー

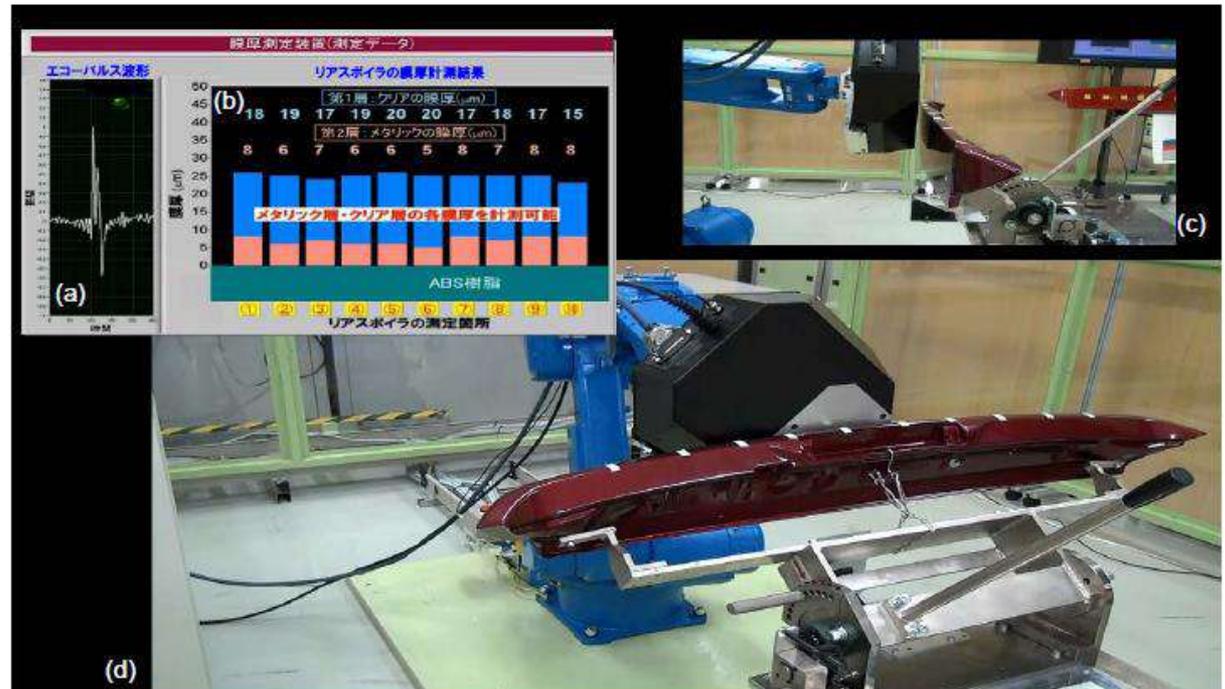


車の3層ペイント
の断層画像



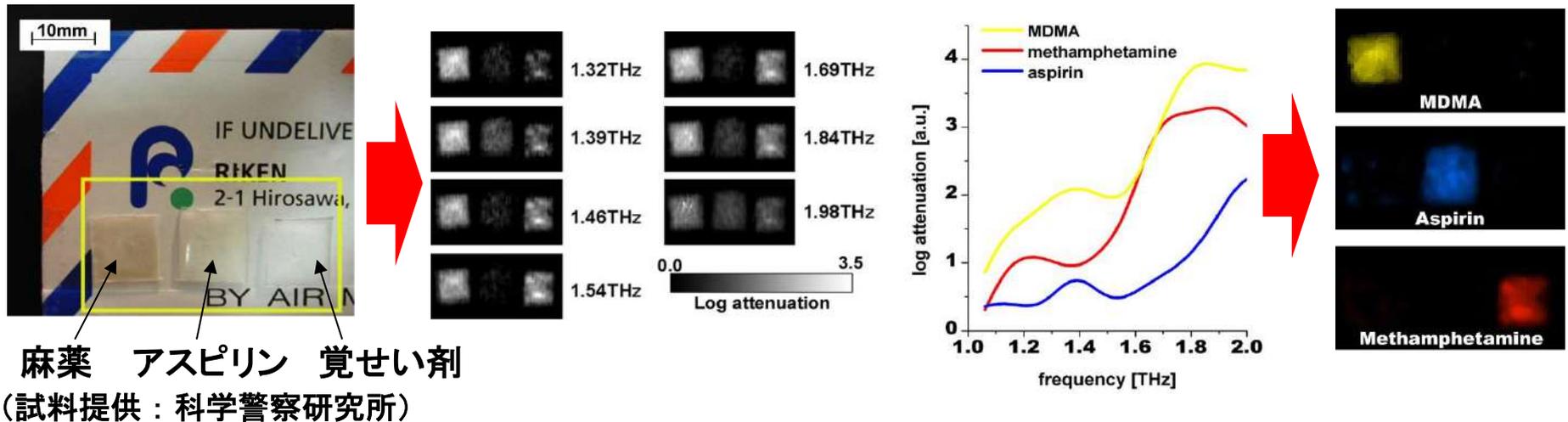
DAST結晶

25THzまで発生可能
奥行分解能5 μ m
アイシン精機が車部品の
コーティング検査に採用



封筒中の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（dl-メチレンジオキシメタンフェタミン、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。

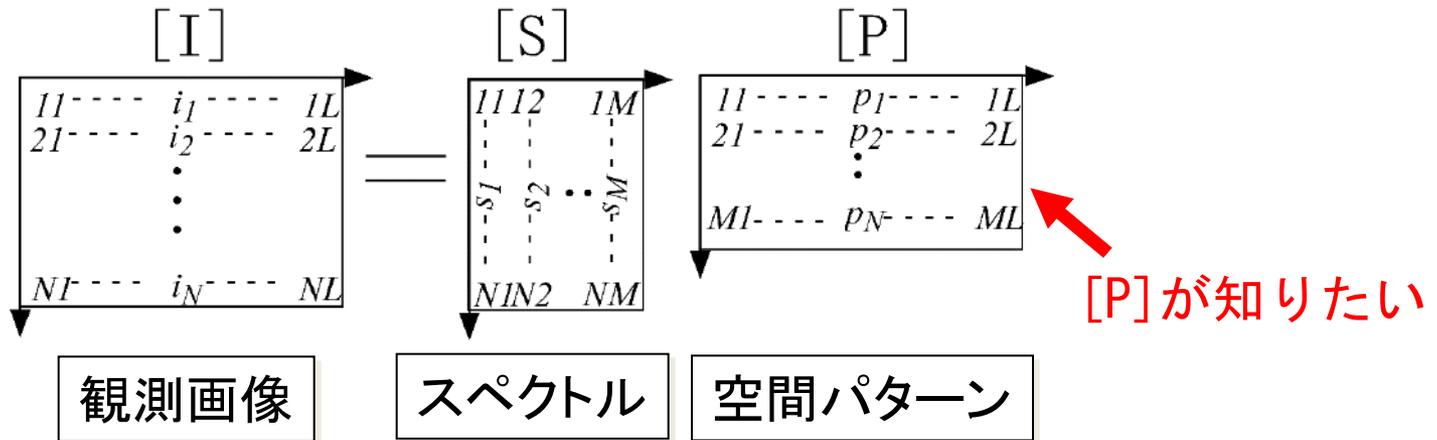


初めて郵便物中の試薬の非破壊検出・同定が可能に

テラヘルツ分光イメージングによる試薬類の主成分分析

マルチスペクトル画像に対し、ターゲット物質の吸収スペクトルを
行列演算し、対象物質の空間パターンおよび濃度分布を抽出

M種の物質から成る測定対象をN通りの波長でイメージング
⇒線形行列方程式

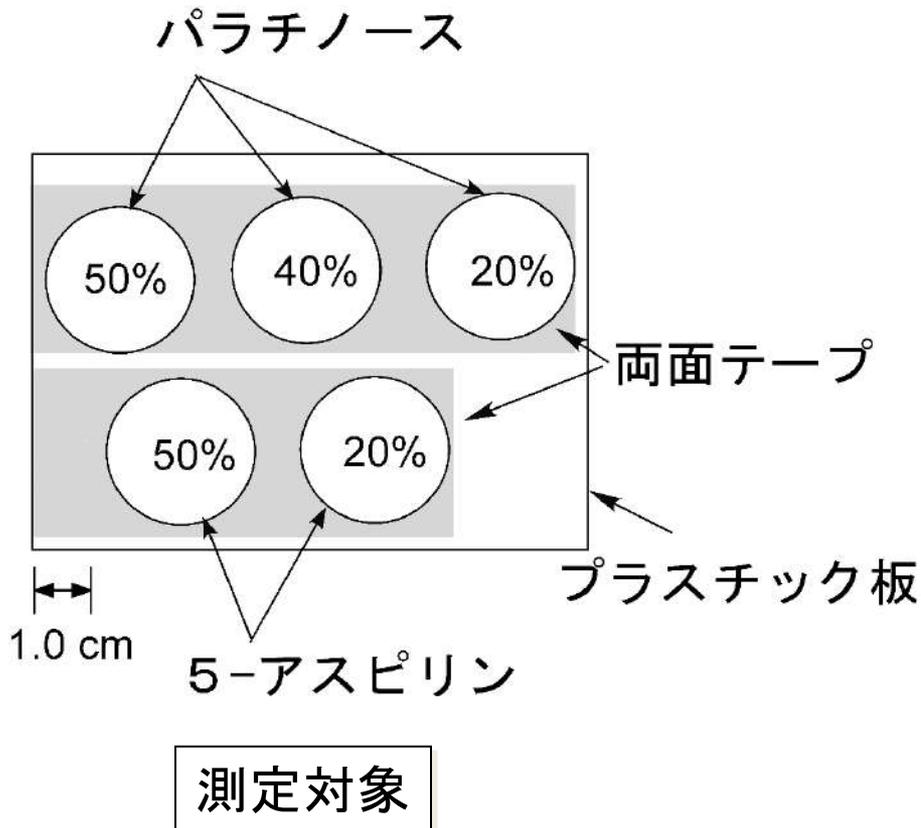


N=Mの場合：単純に $[P]=[S]^{-1}[I]$ を計算すれば求まる。
N>Mの場合：最小2乗法により $[P]=([S]^t[S])^{-1}[S]^t[I]$

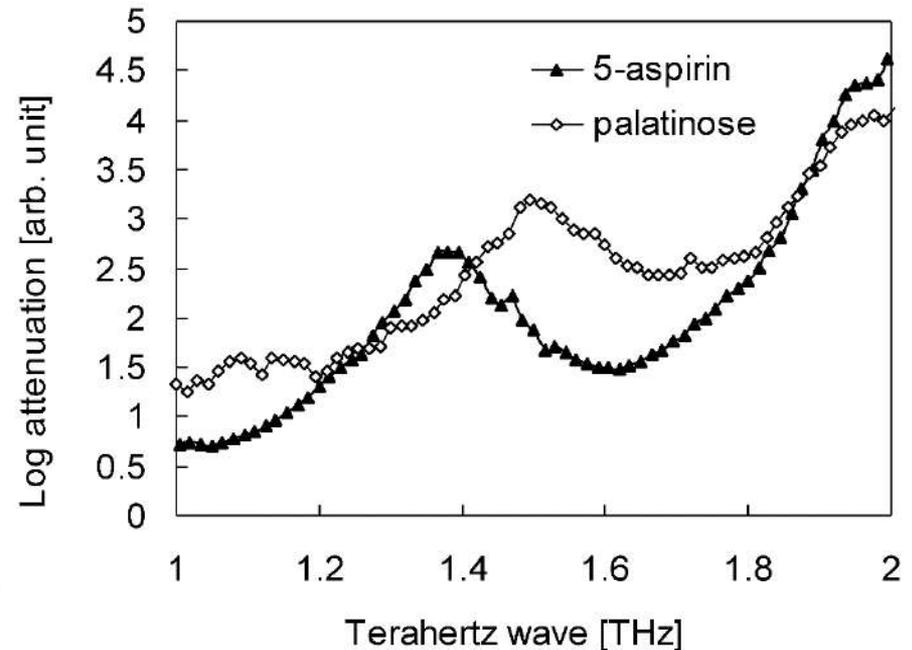
THz波は主にサンプル中の吸収によって減衰するので、透過強度はランベルト・ベール則を満たす。
⇒ 透過画像と入射光強度の比の対数をとる。

原理検証実験の測定サンプルと分光特性

ポリエチレン粉末と試薬を混合したペレット 直径:13mm, 重さ:0.2g



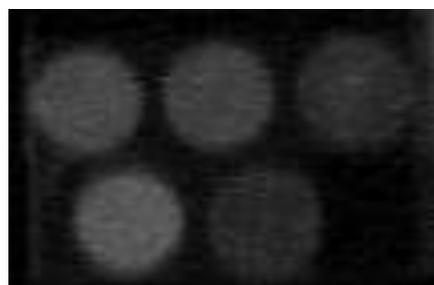
比較的良く似たスペクトルの物質の分離を試みた



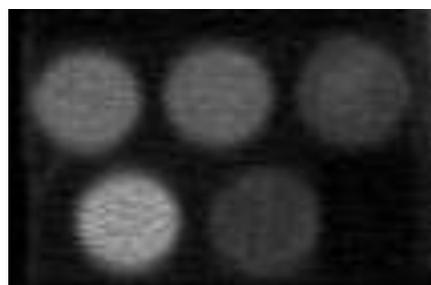
TPOで測定した分光データ
(濃度:50%)

マルチスペクトル画像

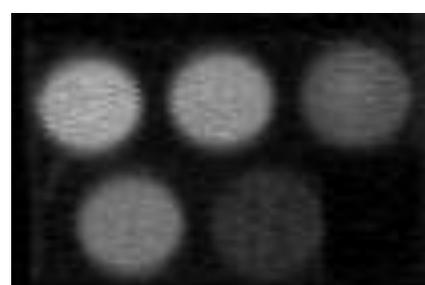
- ・ イメージング領域 : $50 \times 35 \text{mm}^2$
- ・ 画素数 : 100×70 (1画素 : 0.5mm^2)
- ・ 表示 : Logスケール $-\ln(I_t/I_0) = \alpha t \rightarrow$ 吸光度



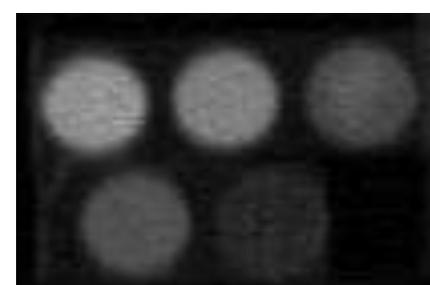
1.3 THz



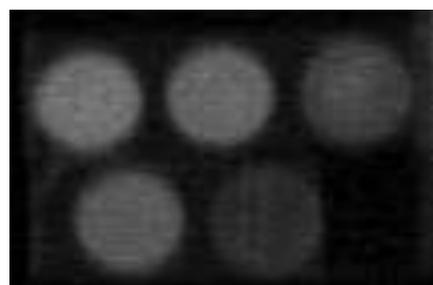
1.4 THz



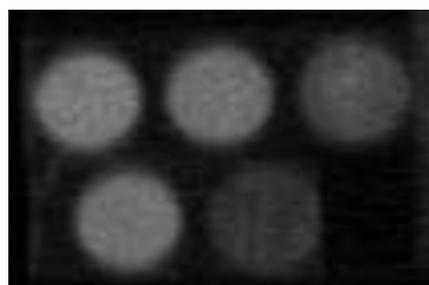
1.5 THz



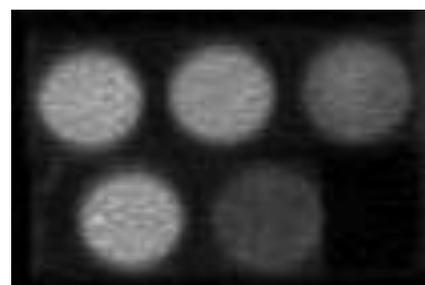
1.6 THz



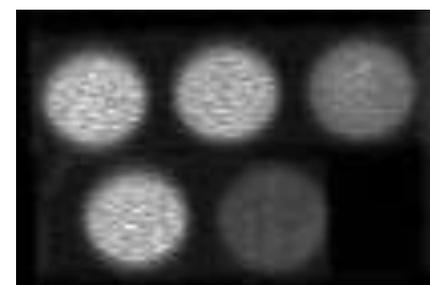
1.7 THz



1.8 THz

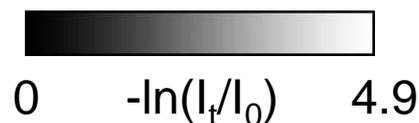


1.9 THz

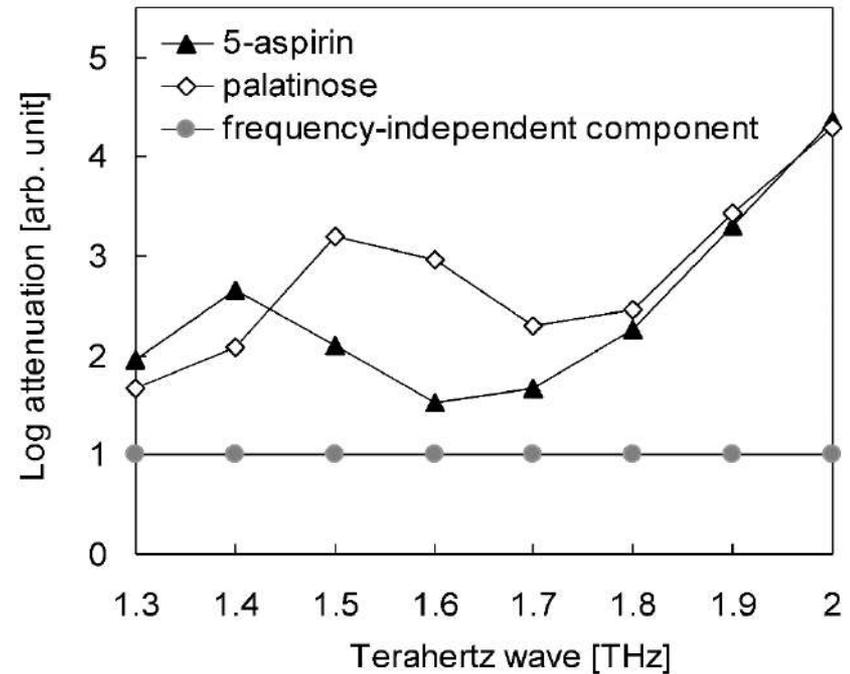
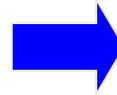
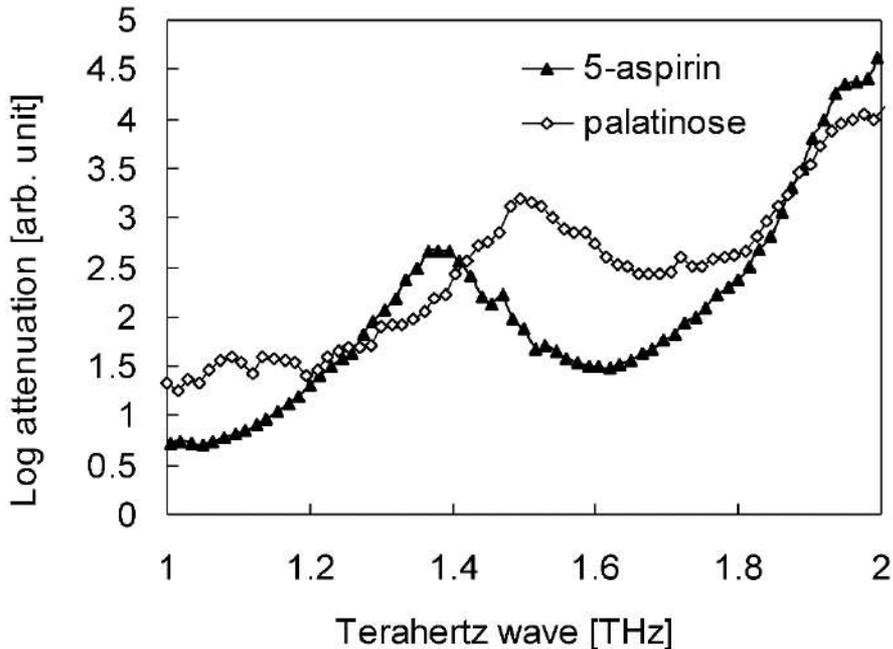


2.0 THz

これが観測画像の行列[I]を与える



スペクトルデータセット

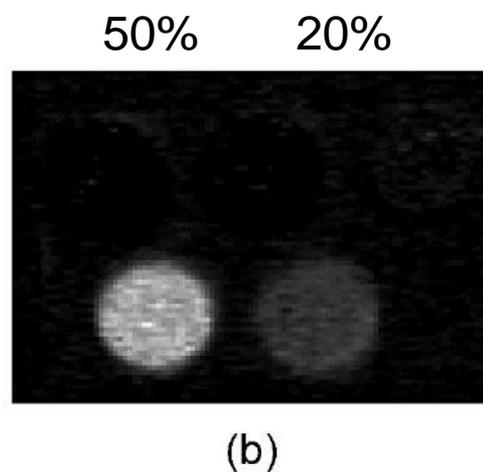
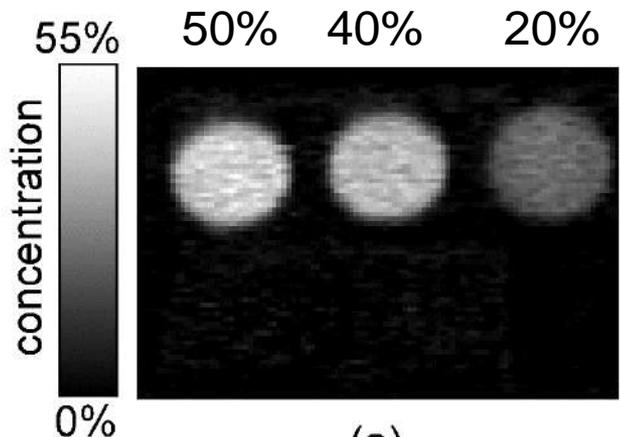


マルチスペクトル画像の撮像周波数における吸光度
これがスペクトルの行列[S]を与える

ポリエチレン, プラスチック, 紙, テープなどの吸収スペクトル
およびノイズ成分の周波数依存性が試薬類のそれに比べて小さい
⇒ 行列[S]に周波数に依存しない成分を仮想的に追加

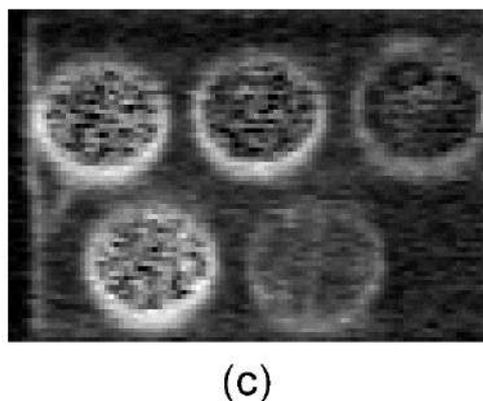
成分パターンの行列[P]の分析結果

$$[P] = ([S]^t[S])^{-1}[S]^t [I]$$



(a) パラチノース
測定濃度44, 39, 22%

(b) 5-アスピリン
測定濃度46, 17%

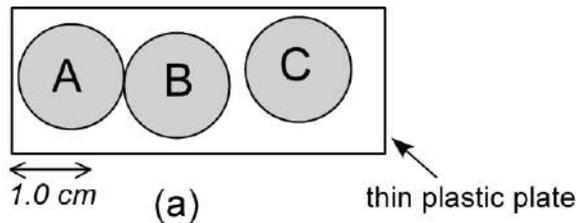


(c) 周波数無依存成分に
テープやノイズ成分を
「押し付ける」ことに成功

- ペレットサイズに相当する直径22ピクセルのROI (region of interest)を設定。
- 50%濃度の薬品サンプルを用いて吸収強度[S]を測定したので、得られた成分パターンに50%をかけて濃度を算出。

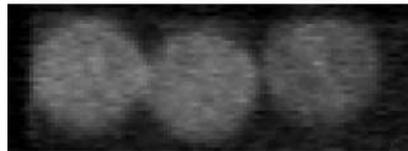
混合サンプルの成分パターン

2種類の試薬が混合したサンプルの識別、
および特定の試薬の有無の判別を試みた

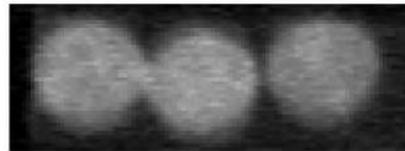


(a) 撮像対象の3種のペレット

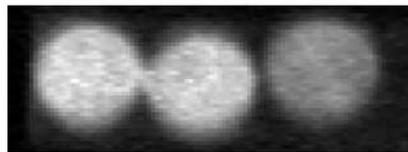
A: アスピリン30%
B: アスピリンとパラチノース
の15%ずつの混合
C: パラチノース30%



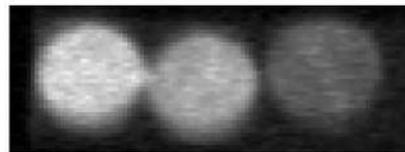
(b)



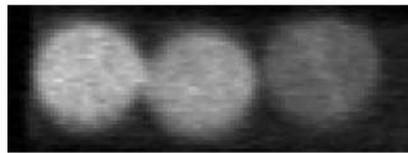
(c)



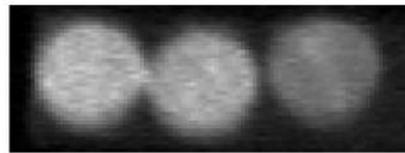
(d)



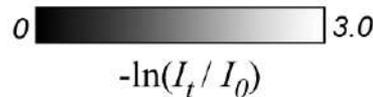
(e)



(f)



(g)

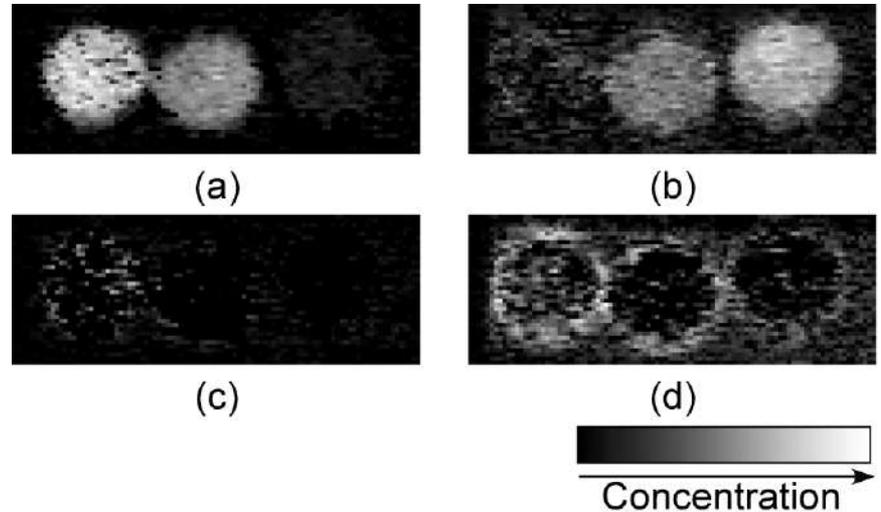
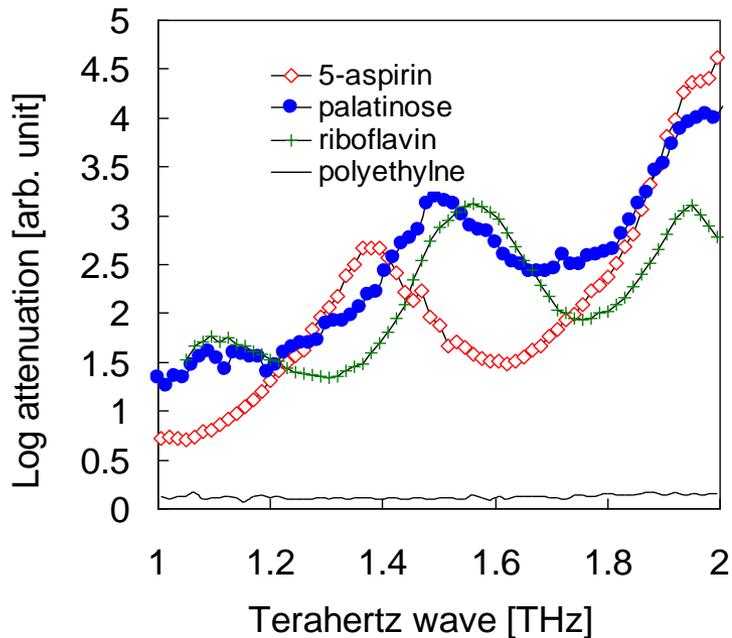


(b)–(g) マルチスペクトル画像

測定周波数は

(b) 1.3 (c) 1.4 (d) 1.5 (e) 1.6
(f) 1.7 (g) 1.8 THz。

混合サンプル、存在しないサンプルの識別



サンプルのテラヘルツ分光スペクトル。存在しないリボフラビンを追加。

(a) アスピリン, (b) パラチノース,
(c) リボフラビン, (d) 周波数無依存成分

●混合サンプルの識別可能： 画像から得られた濃度は、ペレットAおよびCは30%および28%で、実際の濃度30%と良く一致。ペレットBについてはアスピリンおよびパラチノースが22%および16%。

●存在しないサンプルの識別も可能： リボフラビンの成分パターンは現れない、すなわち含まれない
⇒ パソコンにあらかじめ記録したデータベースによる検査が可能。

分光イメージング結果(粉末サンプル)

マルトース&グルコース&フルクトース

EMS封筒2枚・段ボール2枚・緩衝材4枚=23mm厚で遮蔽



Maltose

Glucose

Fructose

(サイズ: 10mm × 10mm)



EMS封筒(2枚)

&



段ボール(2枚)

&



緩衝材(4枚)



測定条件

周波数範囲: 1.4-1.9THz

周波数点数: 12点

画素数: 42 × 12

解像度: 1mm



(正面)



(側面)

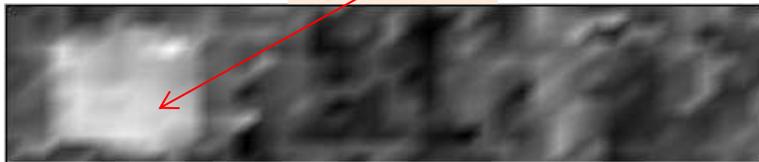
分光イメージング結果(粉末サンプル)

EMS封筒2枚・段ボール2枚・緩衝材4枚=23mm厚で遮蔽

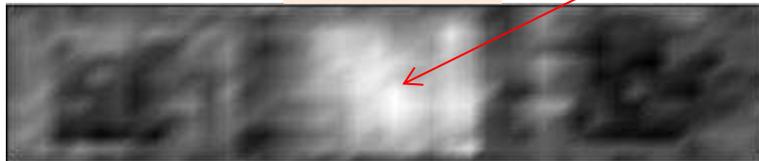


Photograph

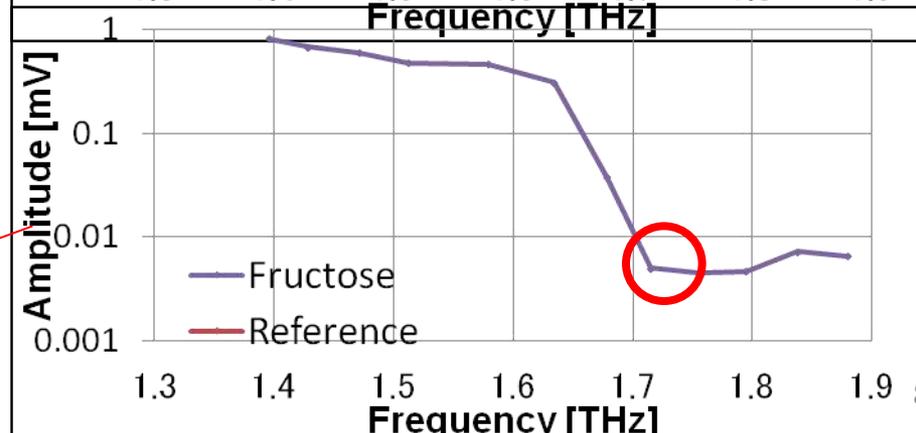
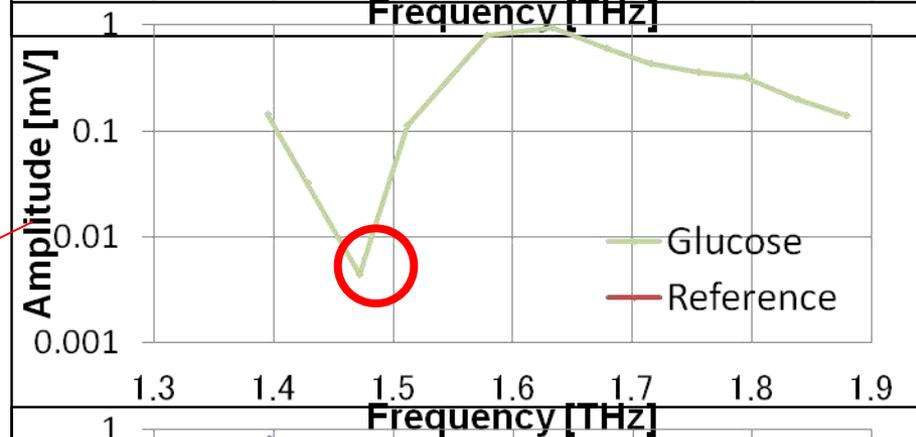
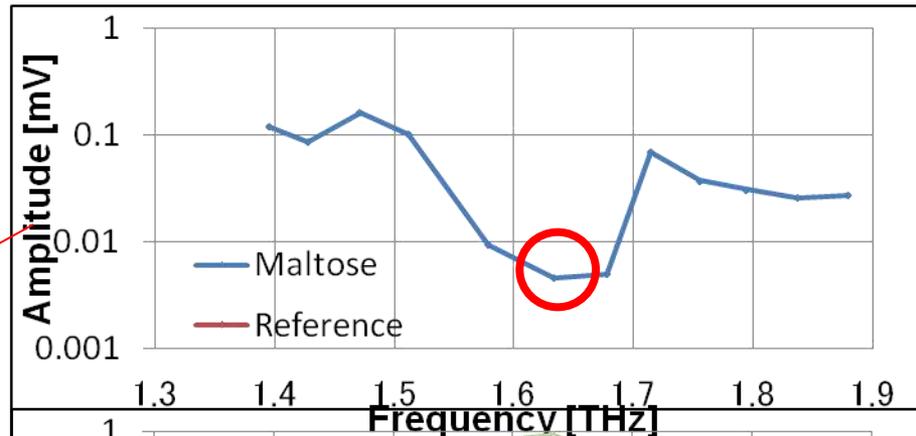
Maltose



Glucose



Fructose



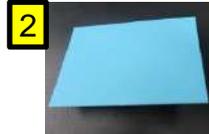
THz波を百万分の一しか透さない 遮蔽物越しの分光イメージング例

Maltose	Glucose	Lactose
---------	---------	---------



1 mm^t, Grain size:
32~125 μm

Shielding materials



1 sheet of cardboard



2 sheets of cushioning

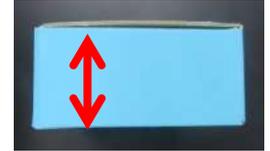


4 sheets of bubble wrap

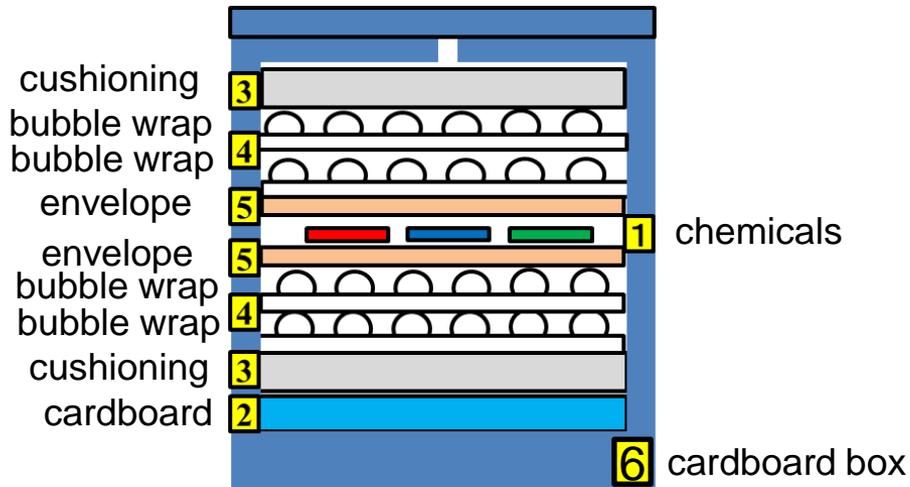


2 envelopes

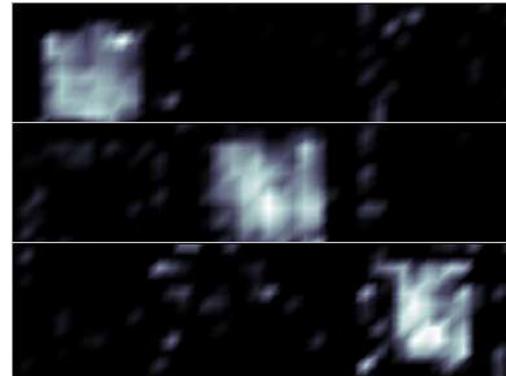
Cardboard box



Total thickness: 42 mm



Maltose	Glucose	Lactose
---------	---------	---------



Total Attenuation (@ 1.3THz) : -60 dB

We could differentiate chemicals!

Is-TPGを用いた遮蔽物越しの分光/イメージングのまとめ

○透過分光測定

- ✓ is-TPGは、吸収ピークを遮蔽物越しに明瞭に分光
- ✓ THz-TDSは、低周波数帯域で吸収ピークを分光可能

○分光イメージング

- ✓ 錠剤・粉末いずれも遮蔽物越しの試薬の識別が可能
- ✓ 段ボールなど分厚い 遮蔽物越しの試薬の識別が可能



**2003年のTPOを用いた郵便物内の
薬物の分光イメージング実験
に比べ格段に厚手の遮蔽物越しの
分光イメージングが可能に！**

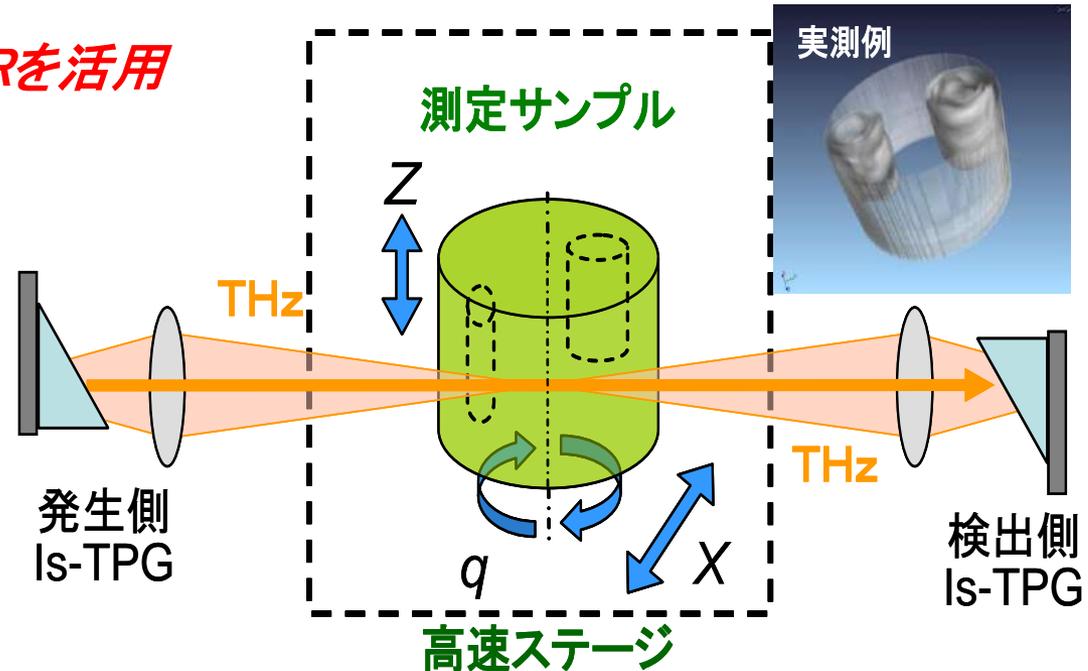
THzヘテロダインCT/分光イメージングの応用開拓

- ◆プラスチック製品、セラミクス製品などの非破壊検査
- ◆EMS封筒などに隠された薬物、爆薬検出
- ◆製薬ラインのロットミス、薬局での処方箋ミス

過去に、光ヘテロダインCTの苦戦（東北大通研稲場研）
他方、日立は指の静脈認証を散乱光の血流ドップラーで実現

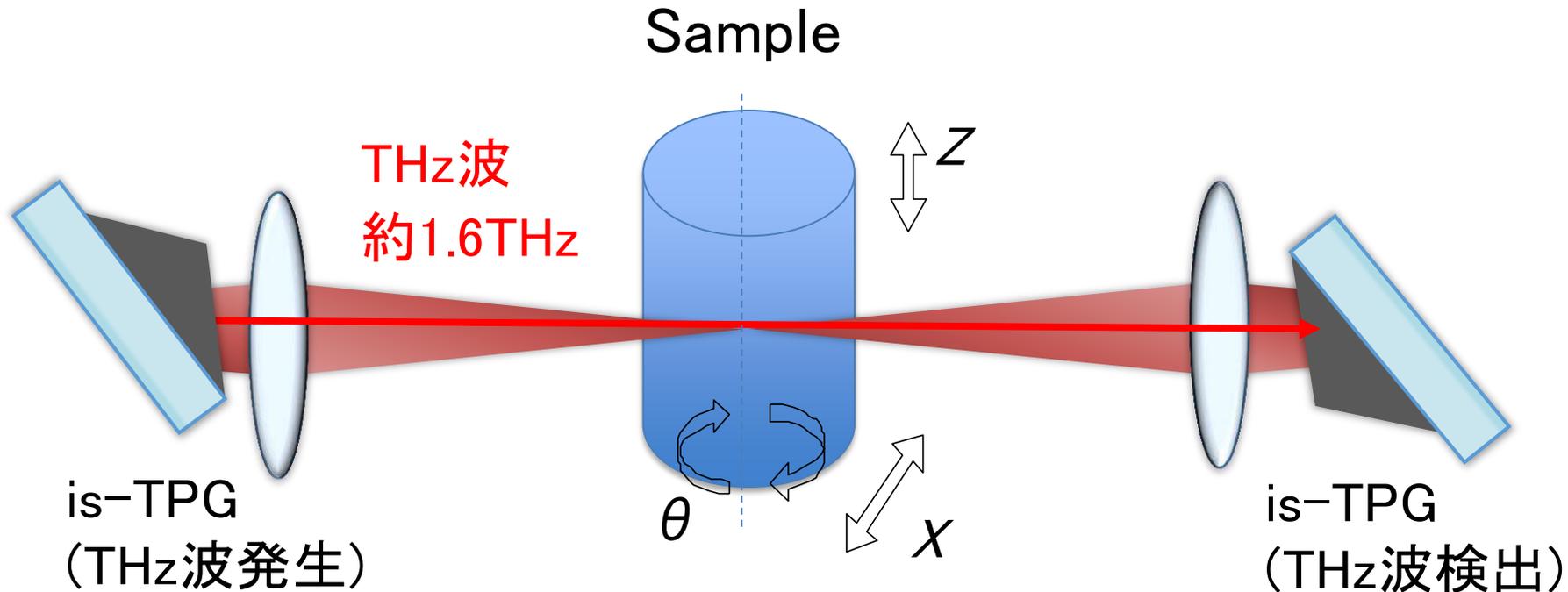
THz波は光波より悠に長波長⇒コヒーレント透過成分多い

さらに10桁以上のDNRを活用



is-TPGを発生/検出に用いる
THzヘテロダインCTシステム。
分光CTイメージングも可能。

is-TPGを用いたTHz-CTの実験系



自動ステージ

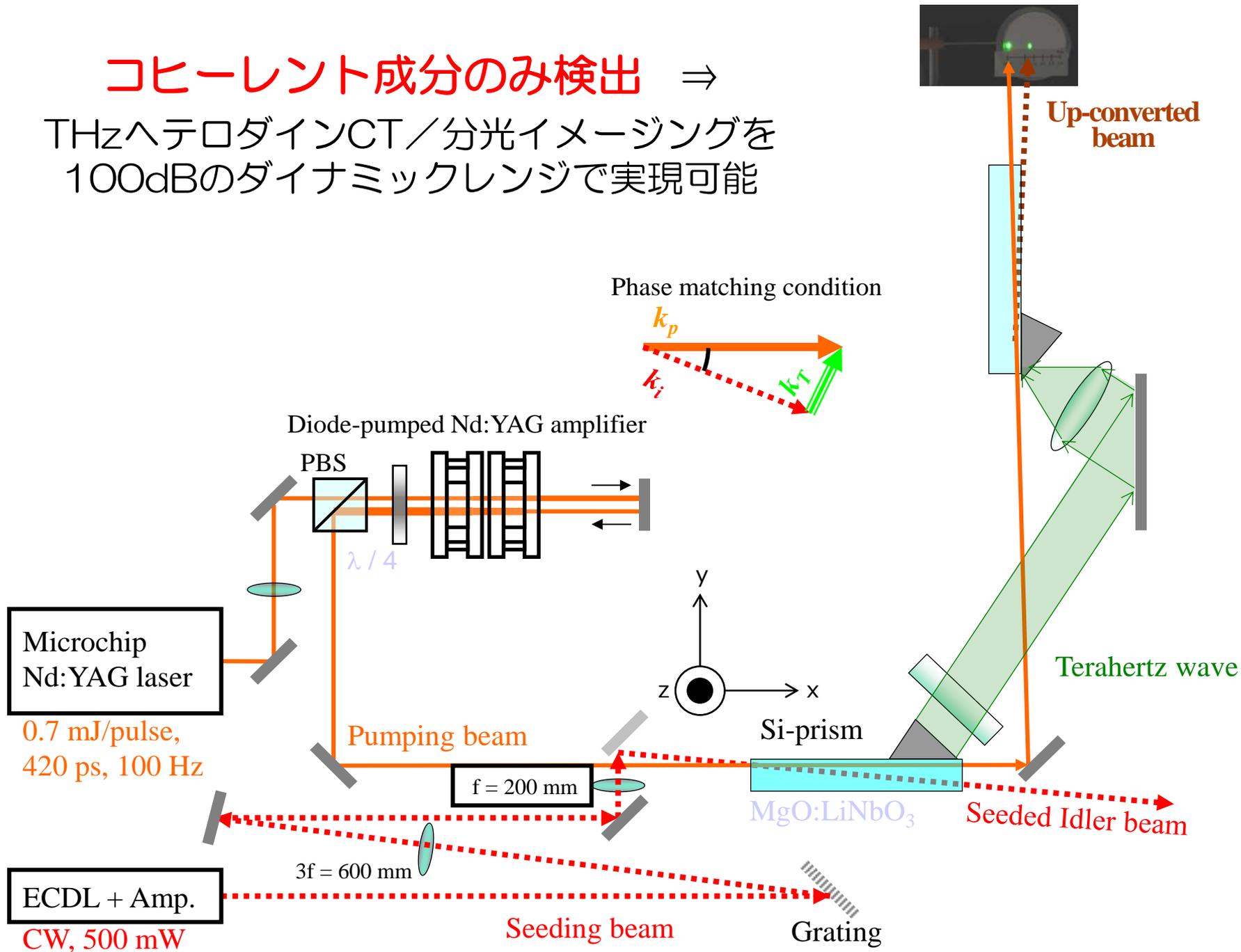
θ : 0~360°の範囲で回転

X : 0.25~1mmずつ水平方向に移動

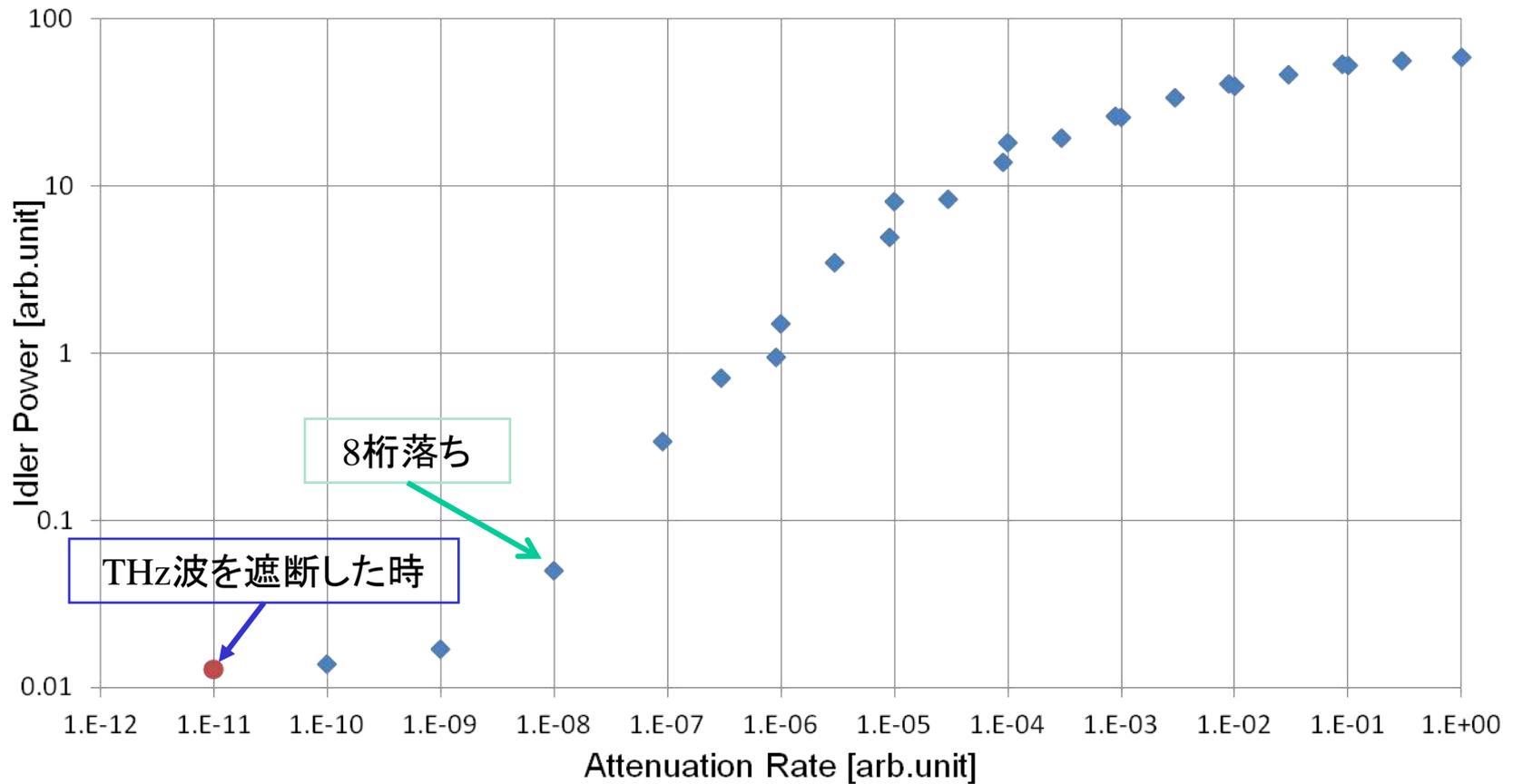
Z : 1mmずつ鉛直方向に移動

コヒーレント成分のみ検出 ⇒

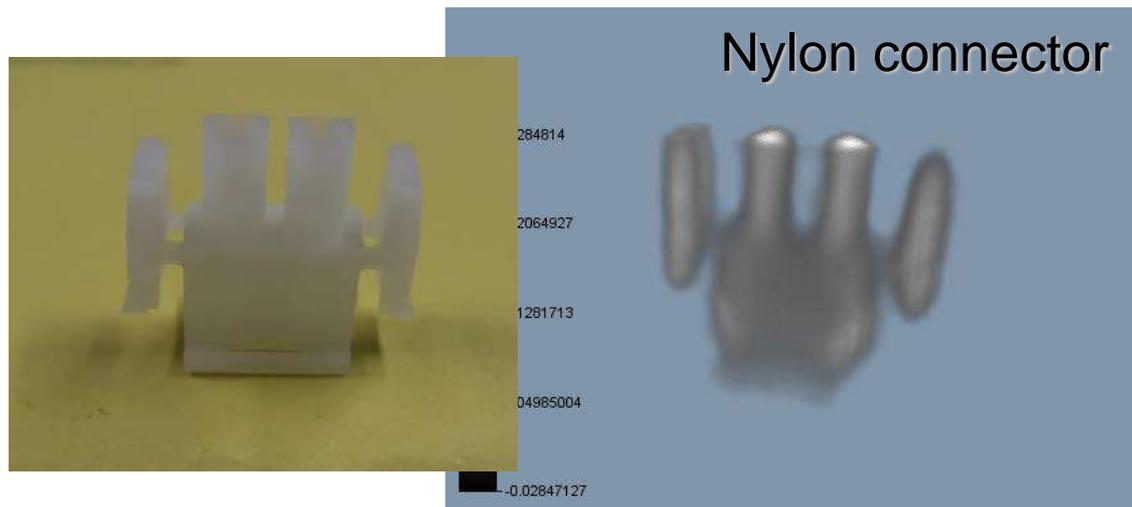
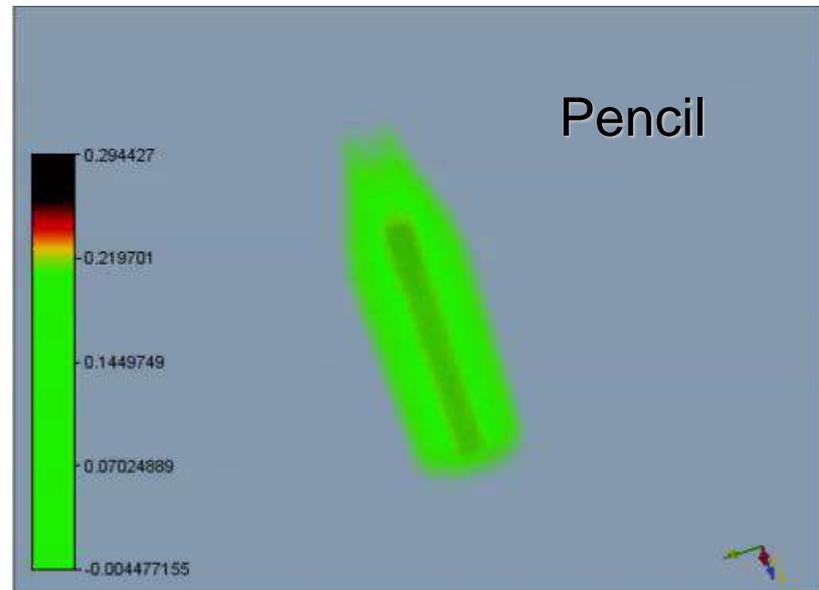
THzヘテロダイナICT/分光イメージングを
100dBのダイナミックレンジで実現可能



iS-TPG2号機のダイナミックレンジ

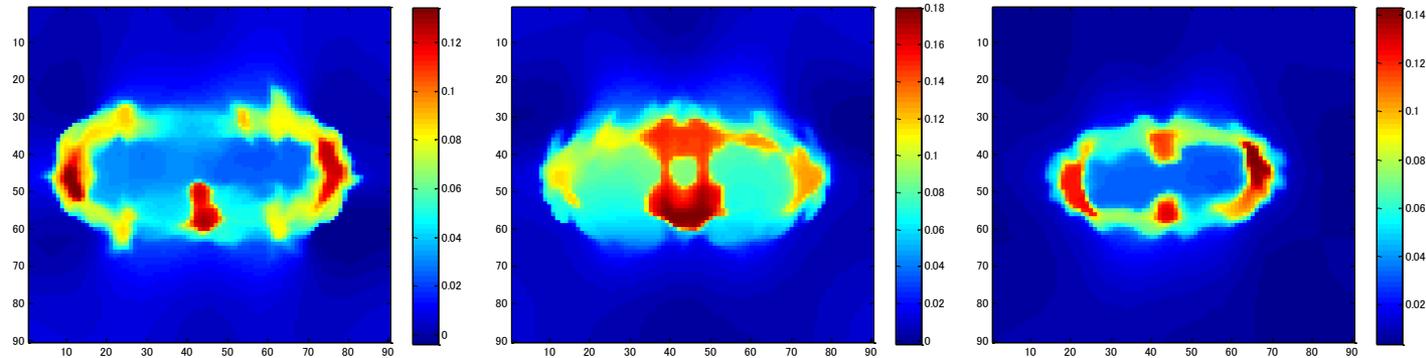


is-TPGを用いたTHz-CTの初期的結果



コンセントの3D-CT

測定サンプル



最も減衰している箇所は約7桁落ち

コンセントの3D-CT

測定サンプル



最も減衰している箇所は約7桁落ち

まとめ

- 光注入型THzパラメトリック
発生/検出/および分光システム
- 多波長化によるワンパルス分光
- 試薬の遮蔽物越しのテラヘルツ分光
- THz-3D CT

謝辞

名大： 阪井ひかる
現 NICT： 林伸一郎
分子研： 平等拓範