



研究計画および進捗状況

テラヘルツ・広帯域スペクトル
操作グループ（徳島大学）

安井 武史

美濃島ERATO 第1回領域会議
(2014/5/19@電通大)

徳島大学サイト

肩書	氏名	職位	専門
GL	安井 武史	教授	THzコム、レーザー制御、SHG顕微鏡
サブGL	水谷 康弘	講師	偏光計測、ゴーストイメージング
	山本 裕紹	客員准教授	画像計測、ディスプレイ
研究員	岩田 哲郎	教授	表面プラズモン、偏光計測
	謝 宜達	特任研究員 (ERATO)	THzコム、光コム
	ハルソノ・ チャフヤディ	特任研究員 (キャノ財団)	非線形ラマン顕微鏡 レーザー制御
RA	長谷 栄治	D1	SHG顕微鏡
研究推進員	隅野 由美	技術補佐員	英語

※今年11月より、ポスドク1名@偏光計測が合流予定

研究内容

①THzコム計測の高度化と応用計測 展開

★THz波の特徴を活かした革新的応用

②新奇光コム計測の開拓と応用計測 展開

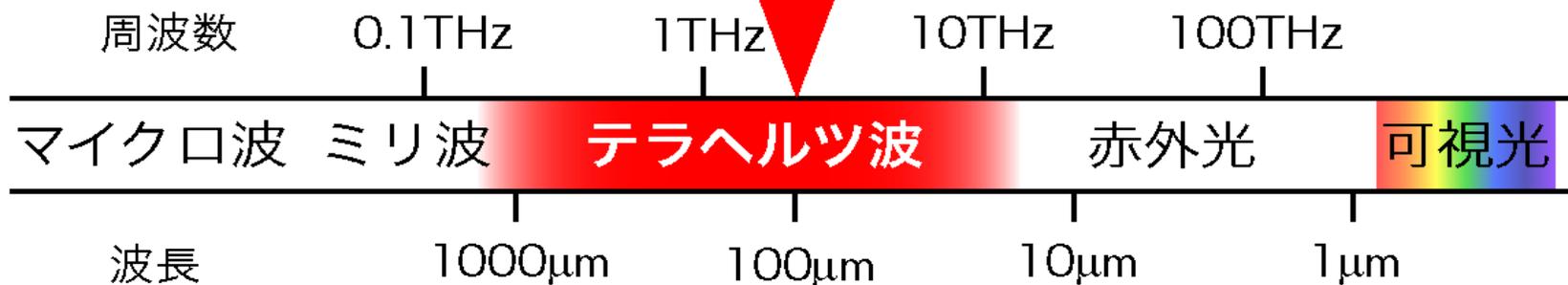
★光計測屋が光コムを使うと何が出来る？

① THzコム計測の高度化 と応用計測展開

- CW-THz基準/可変周波数発生
 - ☞ 分光、ホログラフィー
- 広帯域THzスペクトル計測
 - ☞ 分光
- CW-THz周波数/位相計測
 - ☞ レーダー、ホログラフィー

テラヘルツ (10^{12}Hz) 波

電磁波最後のフロンティア



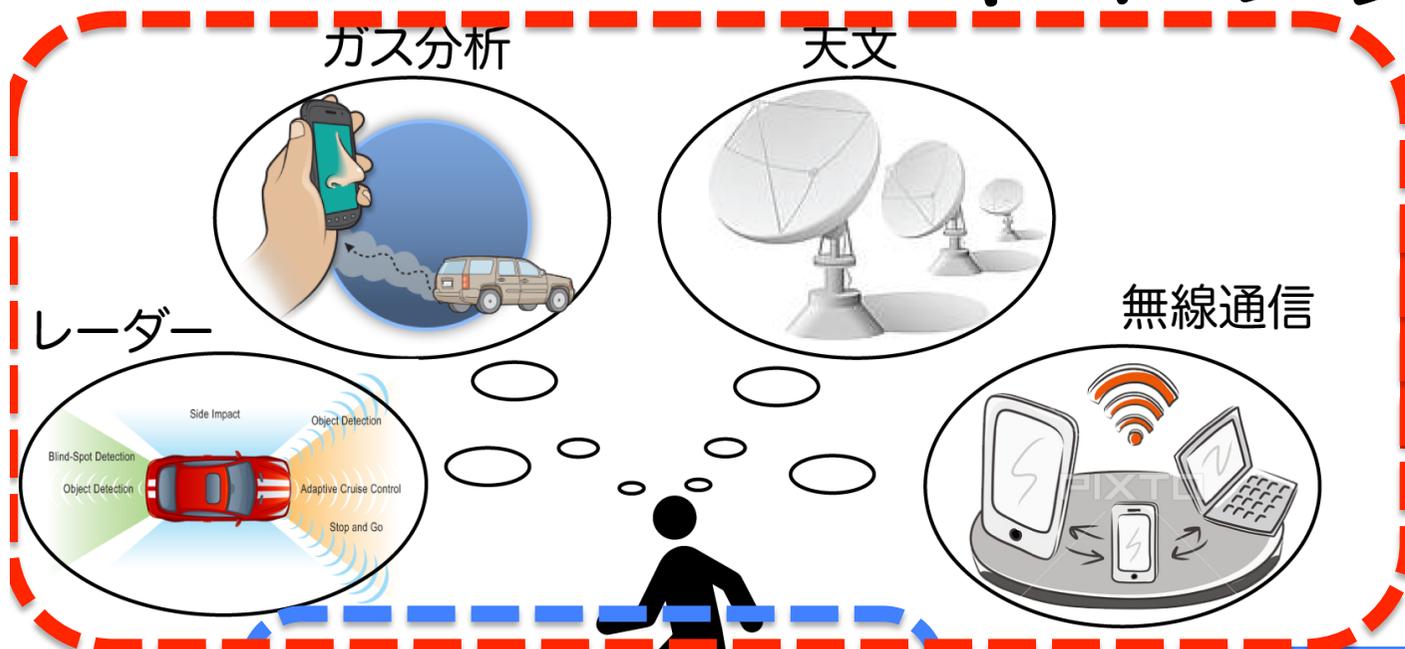
電波の透過性

光電波

光波の直進性

安心安全で便利な未来を実現するための研究
(10年後、THz技術は、我々の身の回りにあふれている！)

THzギャップ



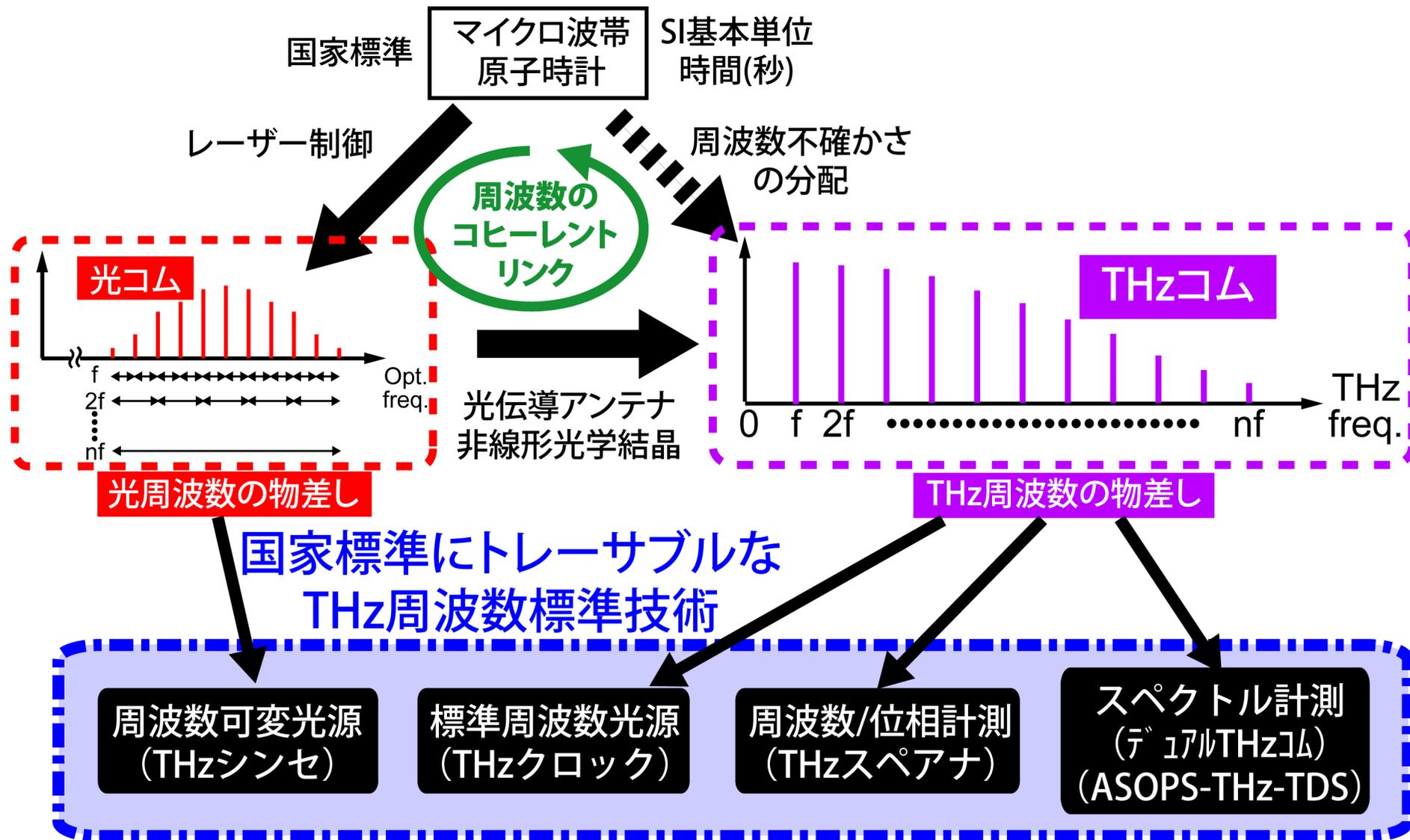
美濃島ERATO
(徳大サイト)



研究成果展開事業
産学共創基礎基盤研究
プログラム
知のプラットフォームの構築に向けて

国家標準にトレーサブルなコヒーレント周波数リンクの創生とそれに基づいたテラヘルツ周波数標準技術の系統的構築

周波数コムのコヒーレント・リンク



THzガス分光

(1) 極性分子の回転遷移

- ✓ 豊富なTHz指紋スペクトル
- ✓ 高い分子識別能@低圧
(圧力拡がり > ドップラー拡がり)
- ✓ 高感度

(2) 散乱微粒子の散乱による影響が小さい

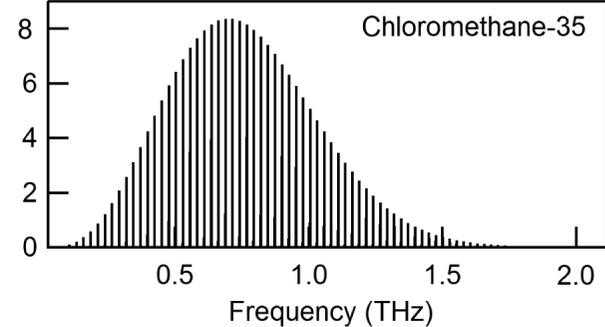
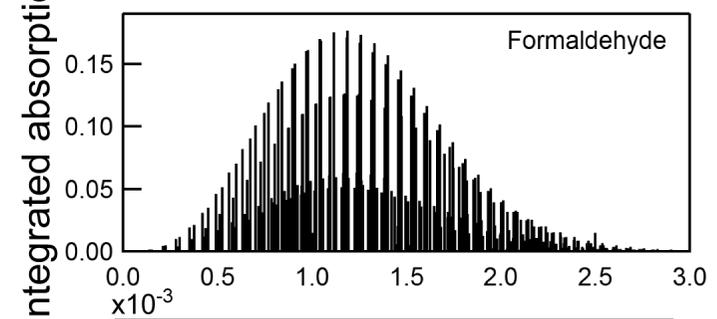
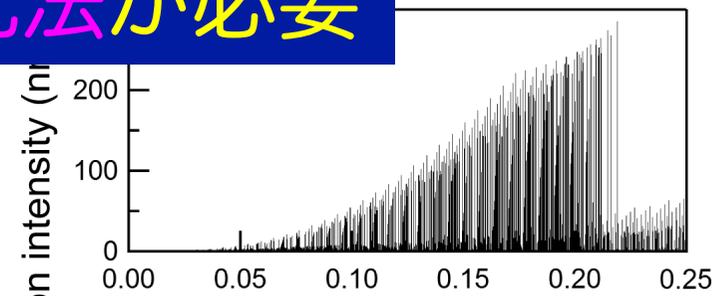
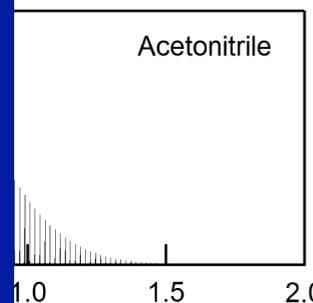
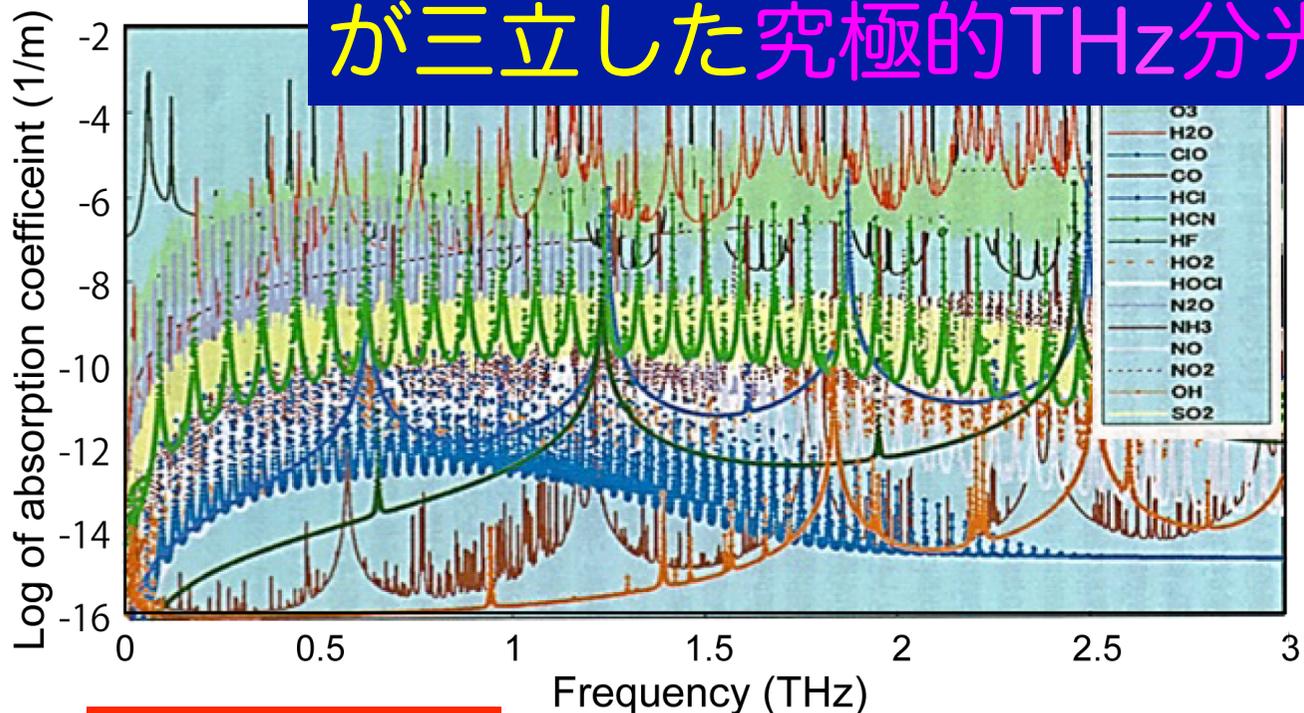
- ✓ THz波長 \gg 粒子径
- ✓ 散乱微粒子混在ガスでも分析可能

①高いスペクトル分解能

②高いスペクトル確度

③広帯域スペクトル特性

が三立した究極的THz分光法が必要



VOCガス

ターゲット

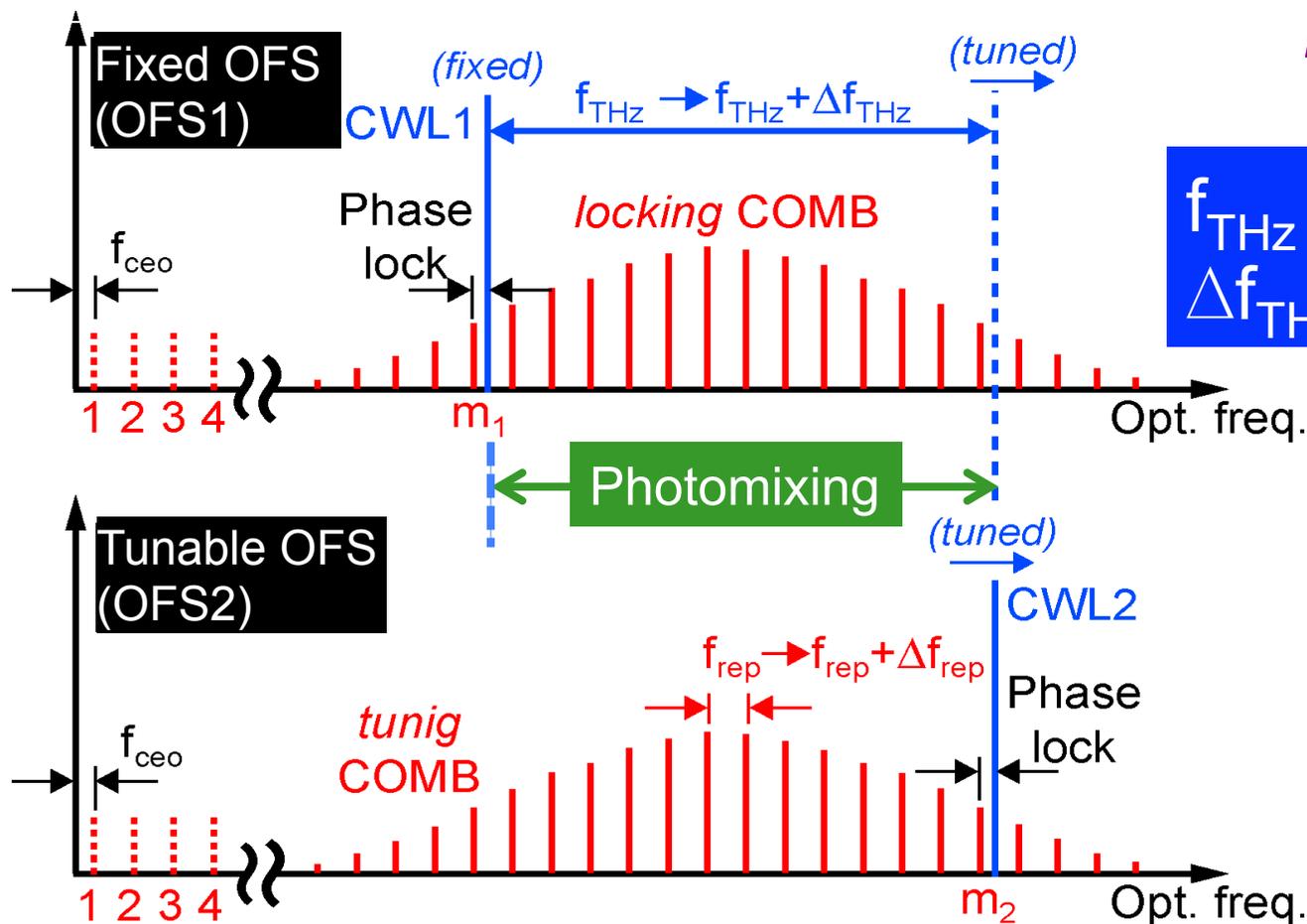
散乱微粒子混在ガスの*in situ*分析

- ・ 燃焼過程 (煙・スス混在)
- ・ VOCガス (エアロゾル混在)

THz分光ツール①：THzシンセ

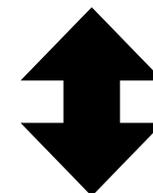
光シンセのフォトミキシング

ref) Opt. Express 19, 4428 (2011)



$$f_{\text{THz}} = f_{\text{ofs2}} - f_{\text{ofs1}}$$

$$\Delta f_{\text{THz}} = m_2 \times \Delta f_{\text{rep2}} = \Delta f_{\text{ofs2}}$$



$$m_2 \gg \Delta m$$

Previous method based on one optical comb

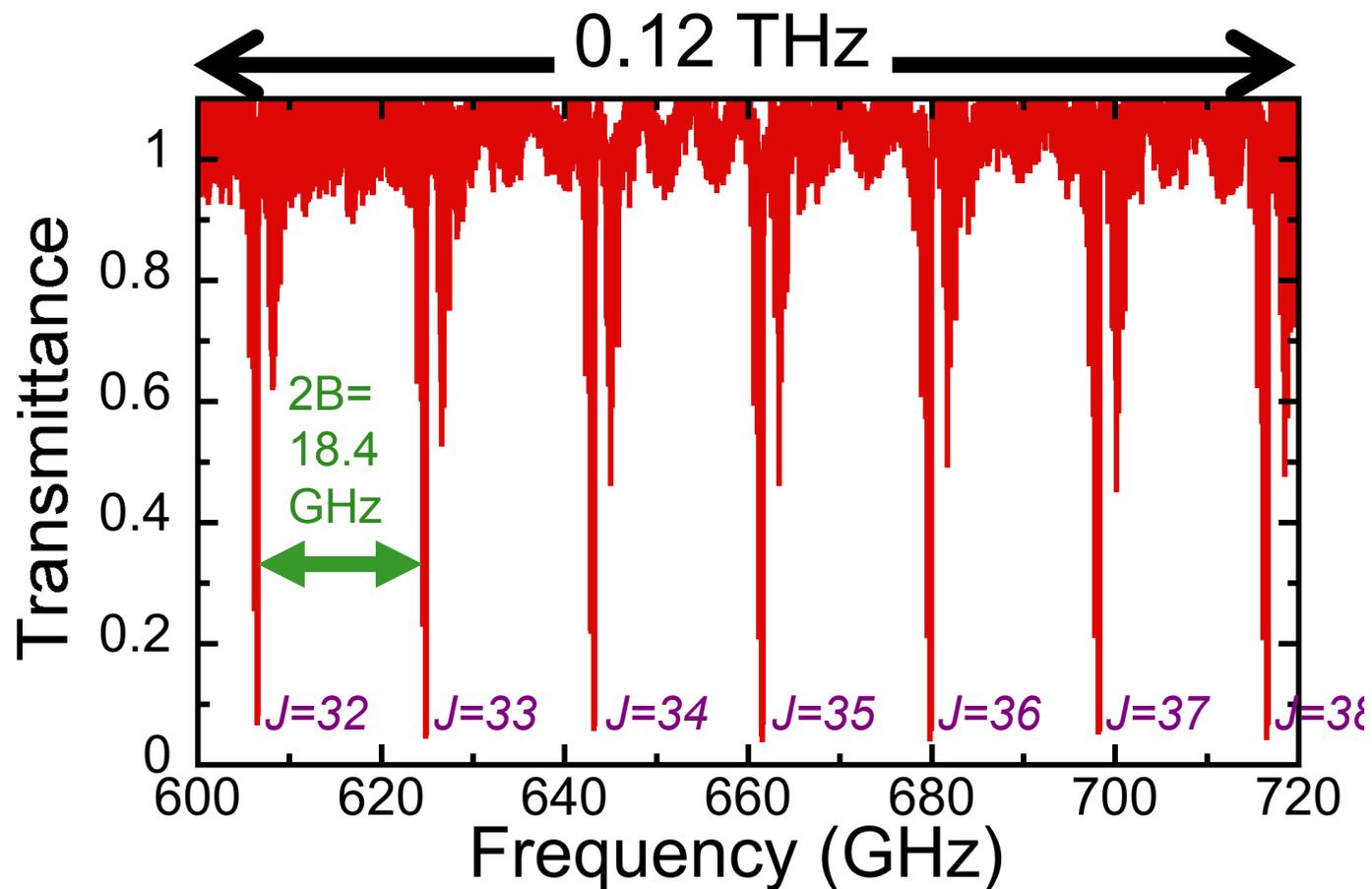
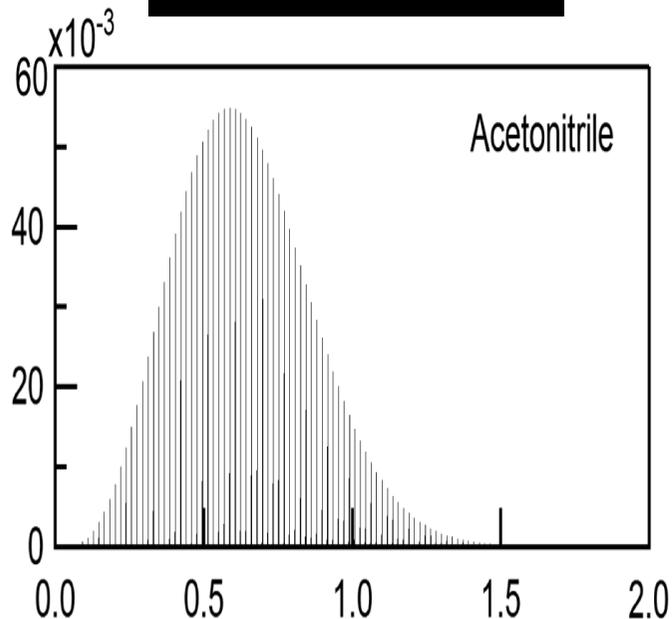
$$\Delta f_{\text{THz}} = \Delta m \times \Delta f_{\text{rep}}$$

Continuous tuning range is largely increased!

Gas-phase spectroscopy of CH_3CN at 20 Pa

Wide tuning from 0.6 to 0.72 THz at step of 5 MHz

スペクトル
データベース

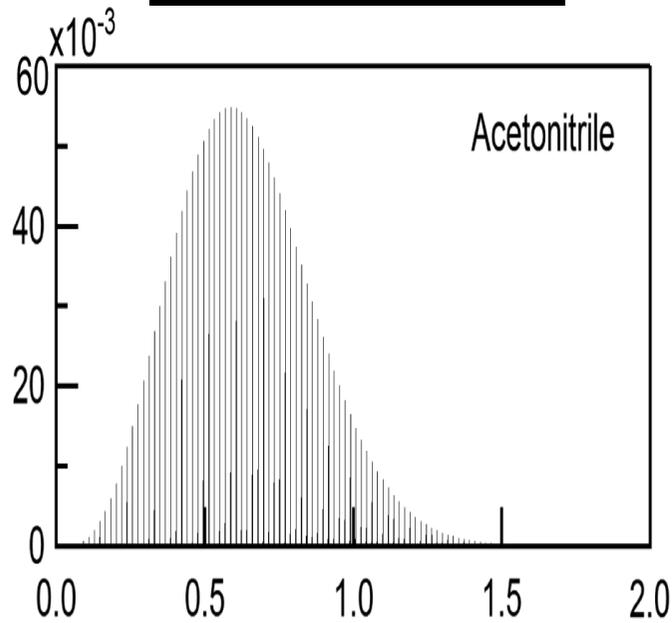


7 manifolds of rotation transitions appeared at every 2B

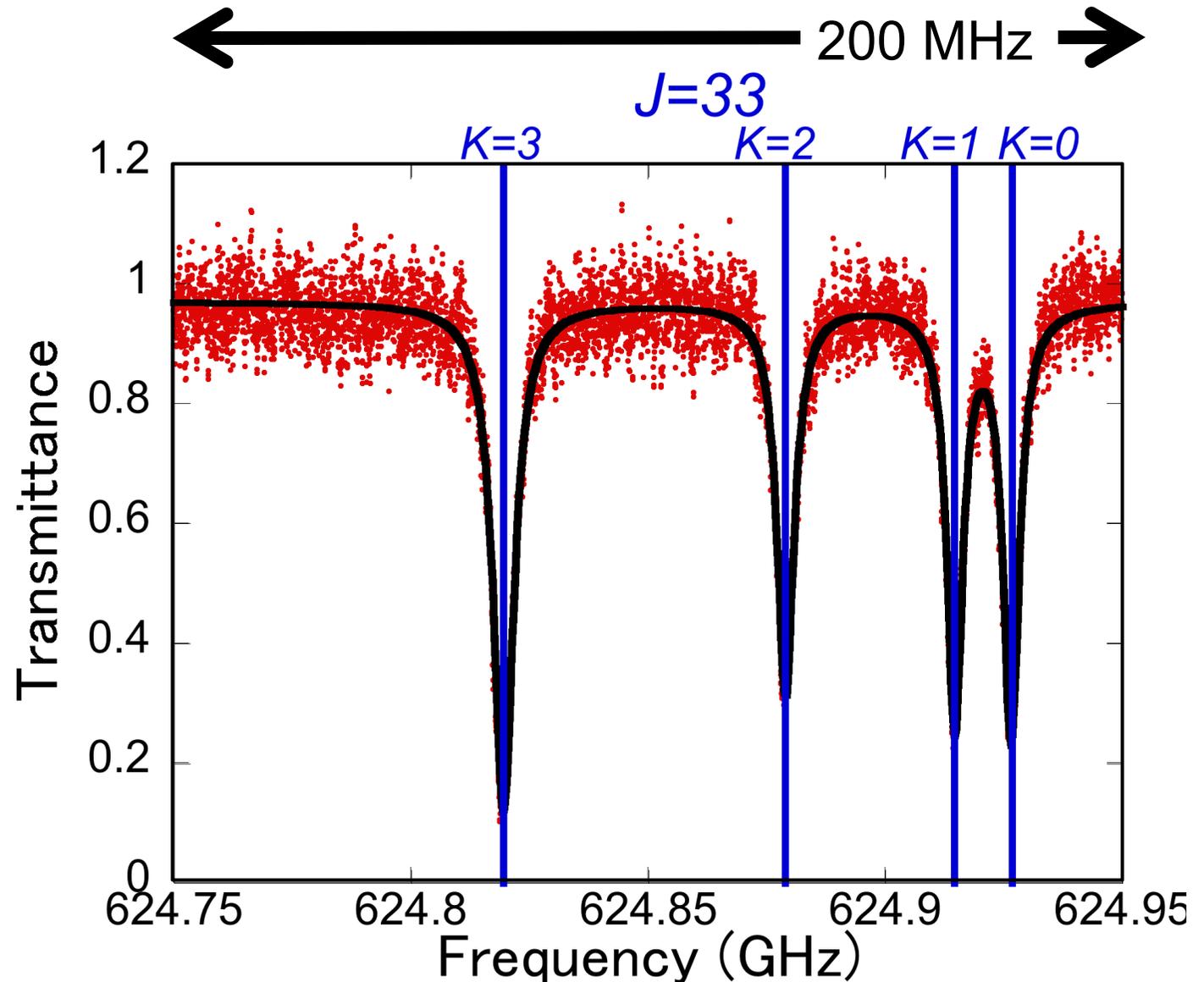
Gas-phase spectroscopy of CH₃CN at 20 Pa

Fine tuning from 0.62475 to 0.62495 THz at step of 30 kHz

スペクトル
データベース

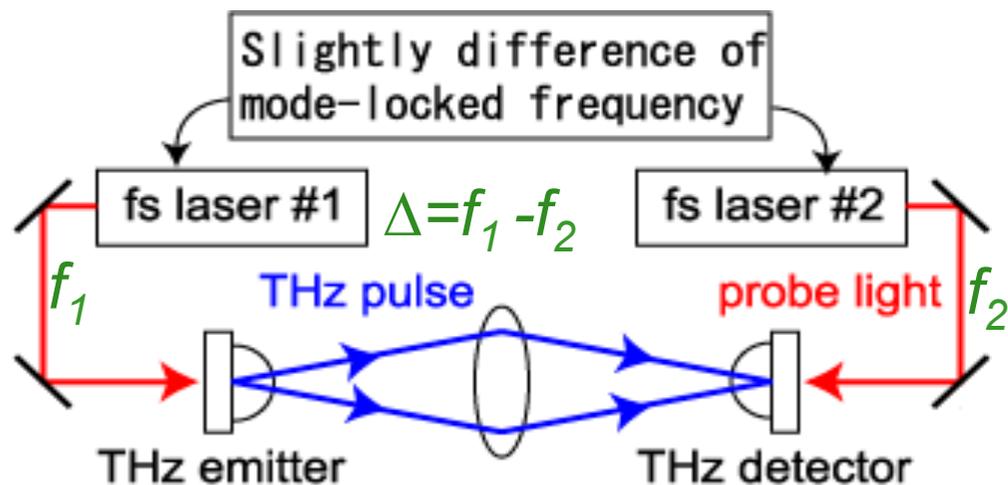


スペクトル分解能
<500kHz
スペクトル確度
< 10^7

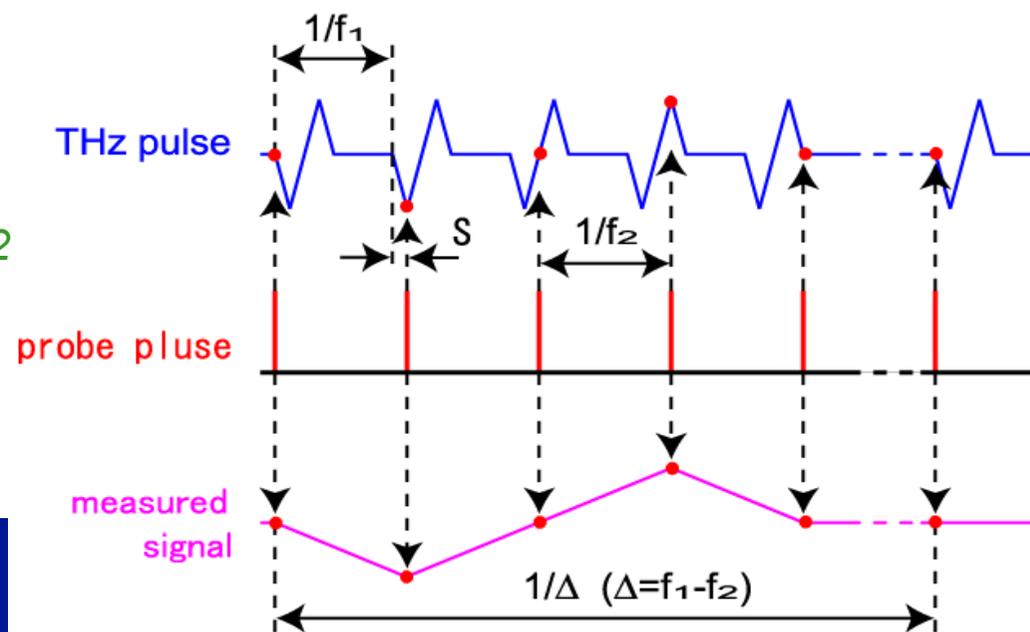


THz分光ツール②：非同期光サンプリング式THz-TDS デュアルTHzコム分光法

ref) T. Yasui et al., Appl. Phys. Lett. 87, 061101 (2005).
特許4565198&米国特許7605371



THzパルスとプローブパルスの
重なるタイミングが各パルス
毎に自動的にシフト

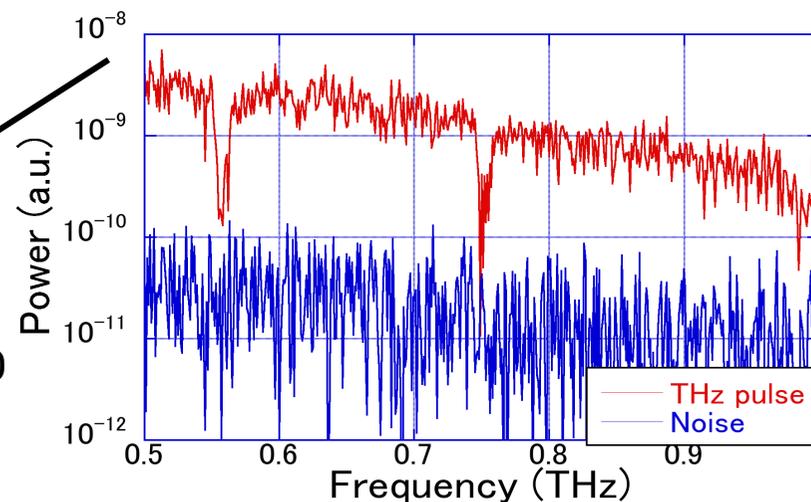
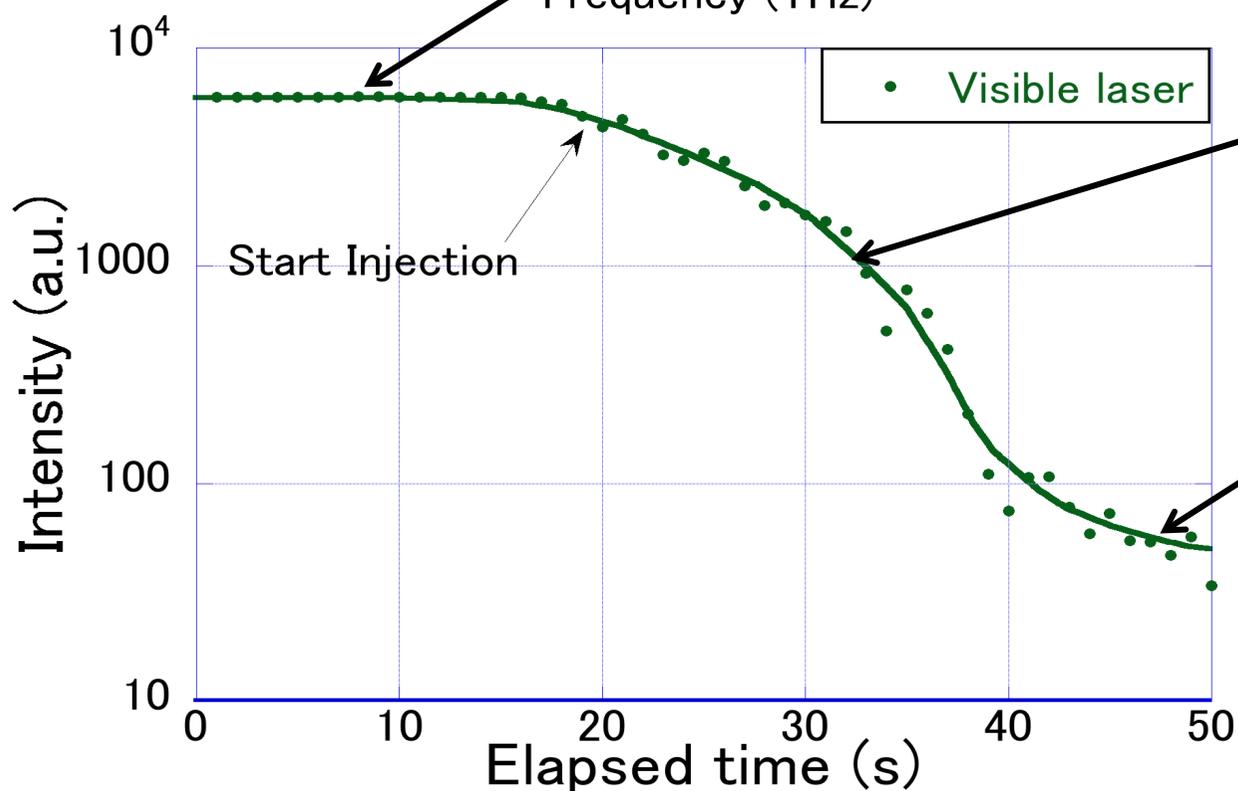
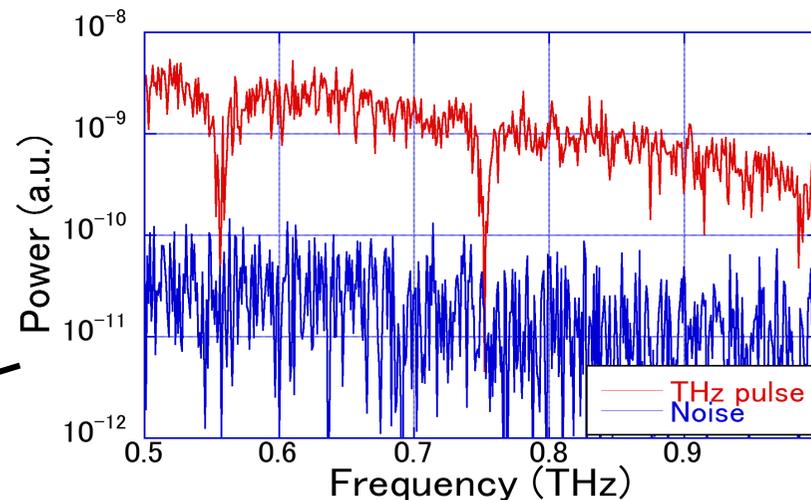
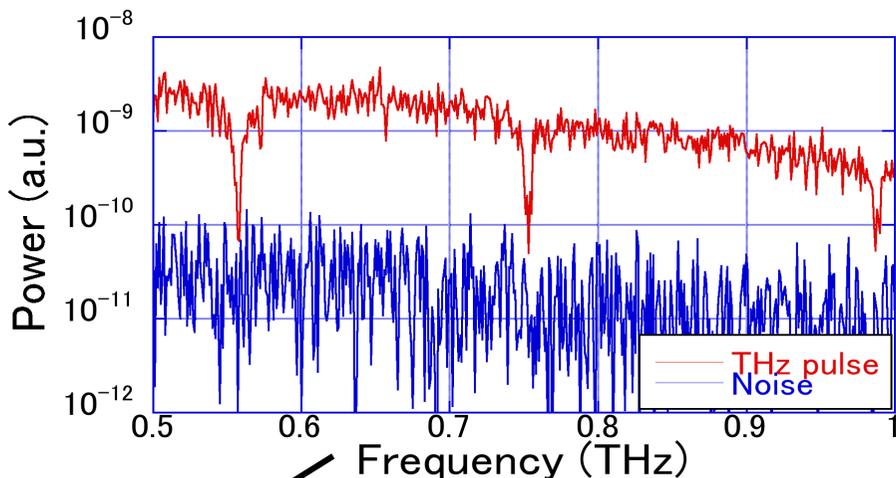


- ・ 機械式時間遅延走査が不要
- ・ 高速測定(スキャンレート Δ)
- ・ 任意の測定時間窓を設定可能
- ・ スペクトル確度はモード同期周波数の安定性に依存

ピコ秒オーダー (周期 $1/f_1$) のTHzパルスをマイクロ秒オーダー (周期 $1/\Delta$) までスケール拡大
(時間スケール拡大率 $=f_1/\Delta$)

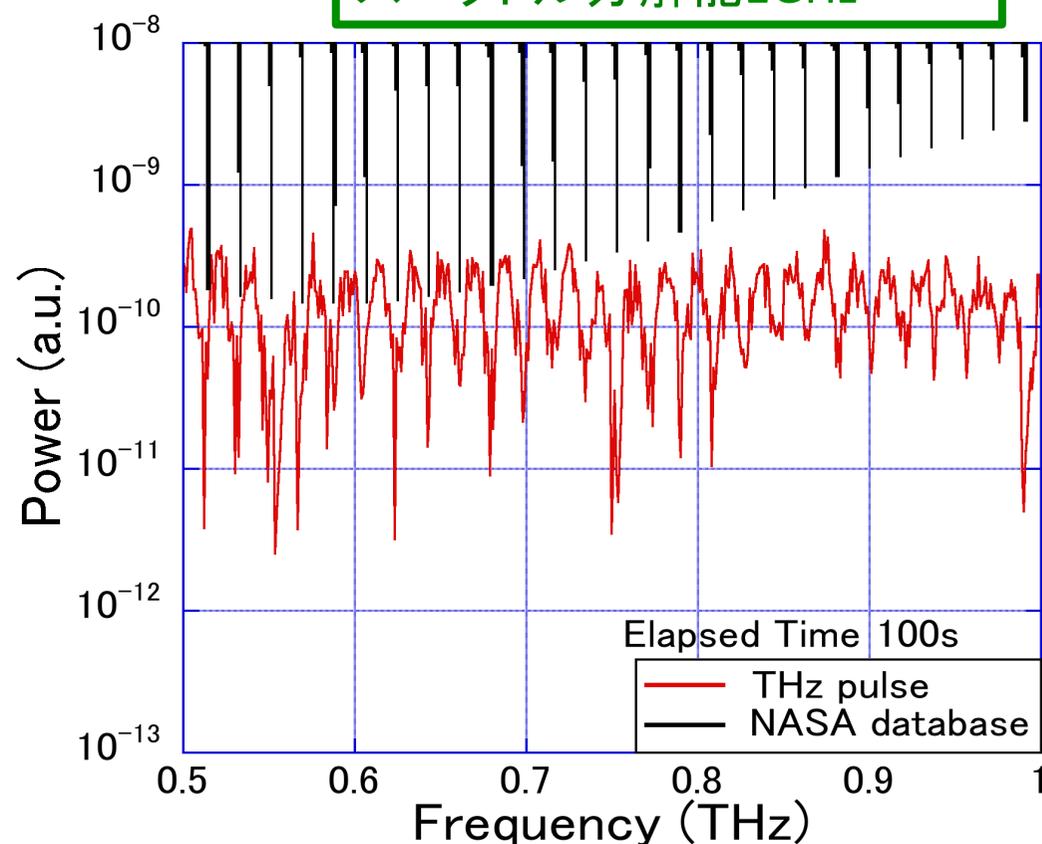
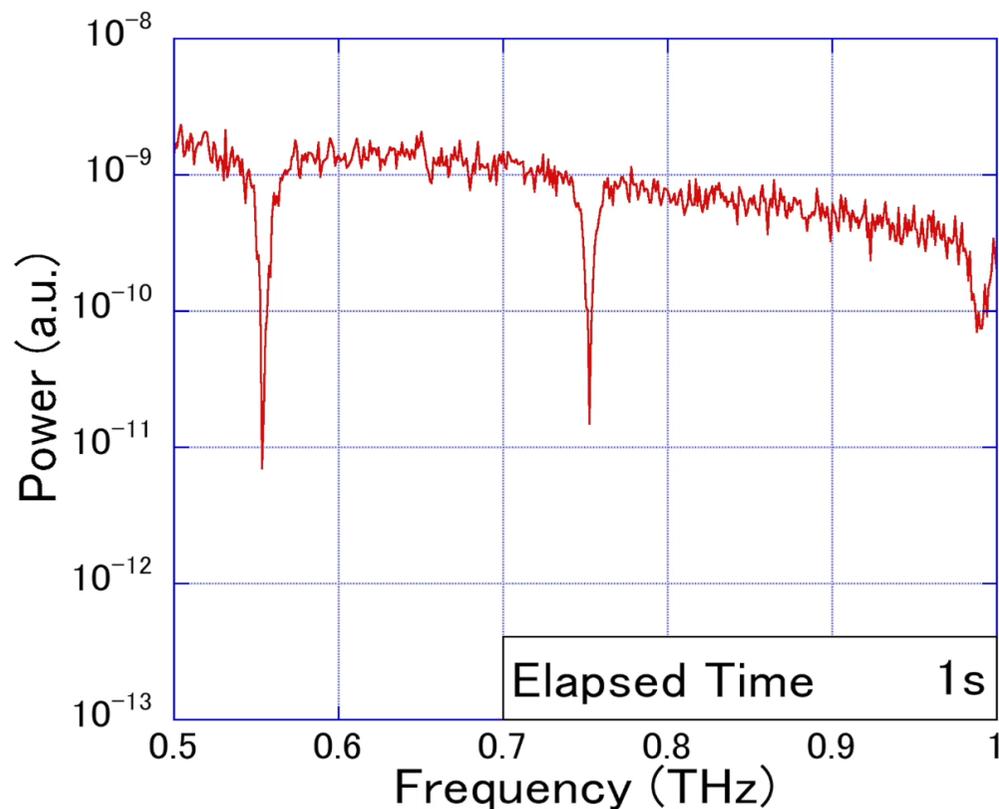
エアロゾル(線香煙)注入による信号変化 (THz, 可視光)

計測時間1s、光路長200mm
スペクトル分解能1GHz



エアロゾル（線香煙）混在状況におけるアセトニトリルの動的分光

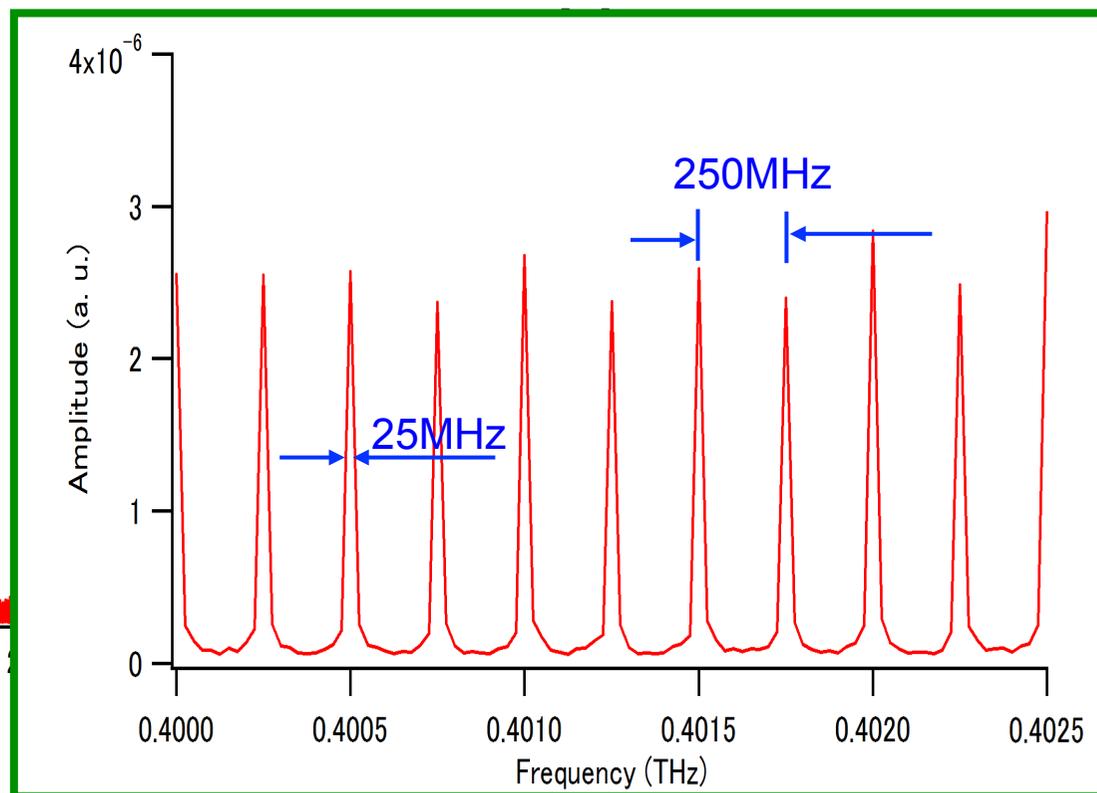
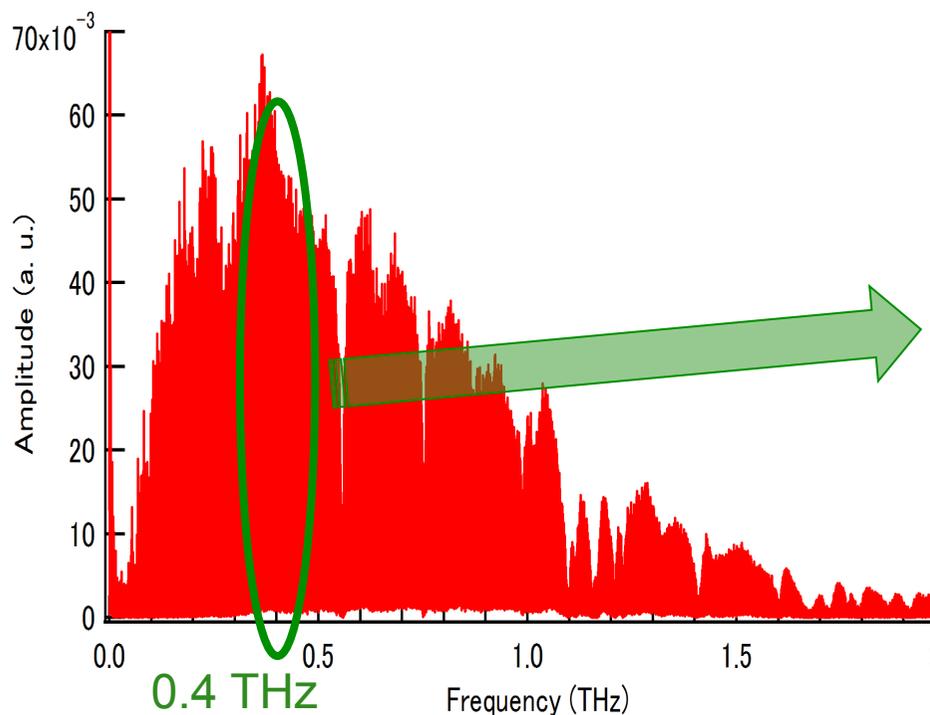
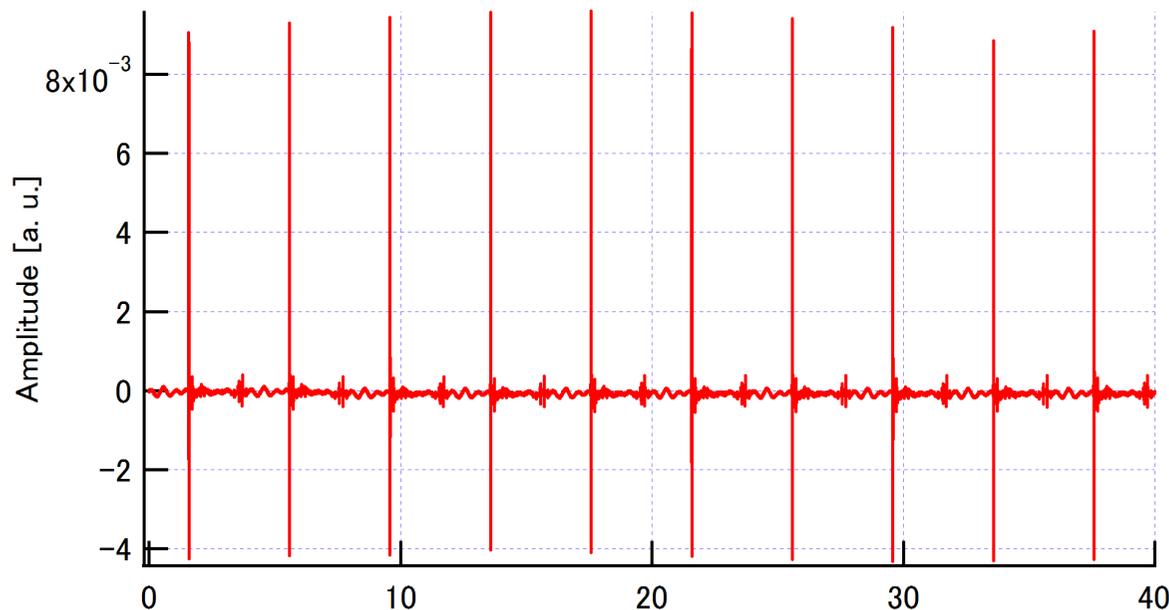
計測時間1s、光路長200mm
スペクトル分解能1GHz



アセトニトリルの吸収線とNASAのデータベースとの一致を確認

煙による散乱の影響を受けずにアセトニトリルのみの時間的変化の観察に成功

THz分光ツール ③：デュアル THzコム分光法



ギャップレスTHzコム (THzコムの走査)

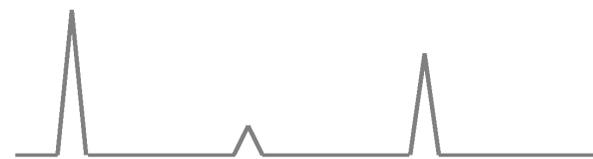
THzコム分光法では、コムが離散的に分布してるので、スペクトルサンプリング間隔はコム間隔になる。

コム線幅 \ll コム間隔

コム・モードを高精度に少しずつ横ずらししながらコム・モード間のギャップを補完する

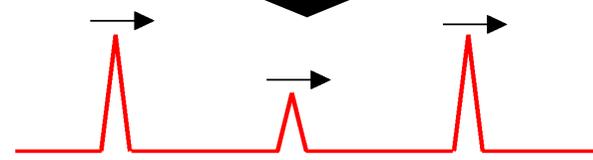
スペクトルサンプリング間隔をコムモードの線幅まで、向上できる！

Comb-mode position #1



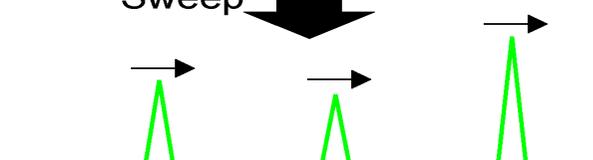
Sweep

Comb-mode position #2



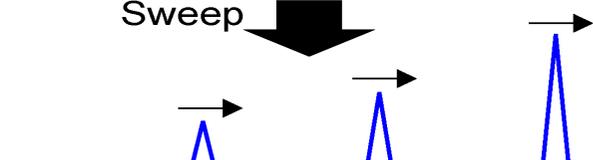
Sweep

Comb-mode position #3



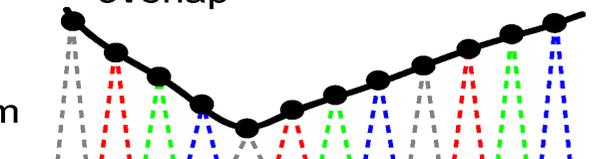
Sweep

Comb-mode position #4



Spectral overlap

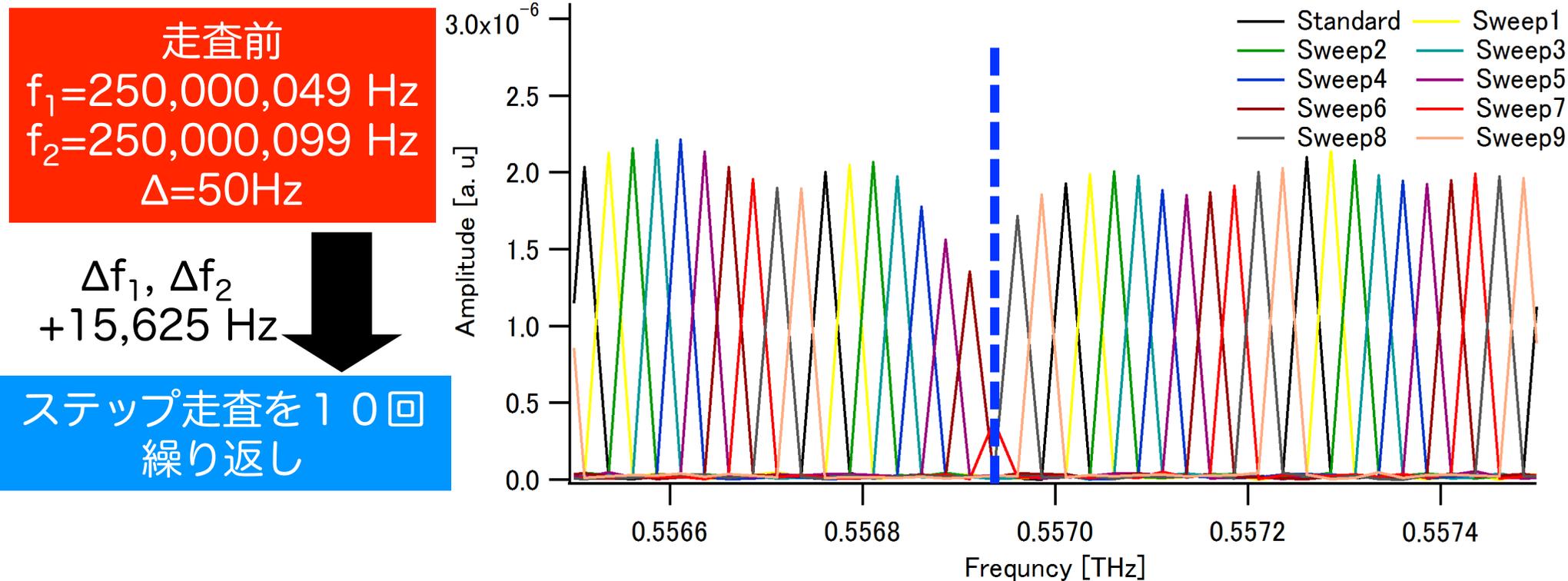
Interpolated THz comb spectrum



低圧水蒸気の分光計測

回転遷移 $1_{10} \rightarrow 1_{01}$: 0.5569360 THz @ NASA database
(圧力拡がり線幅 = 23 MHz @ H₂O:10 Pa & N₂:320 Pa)

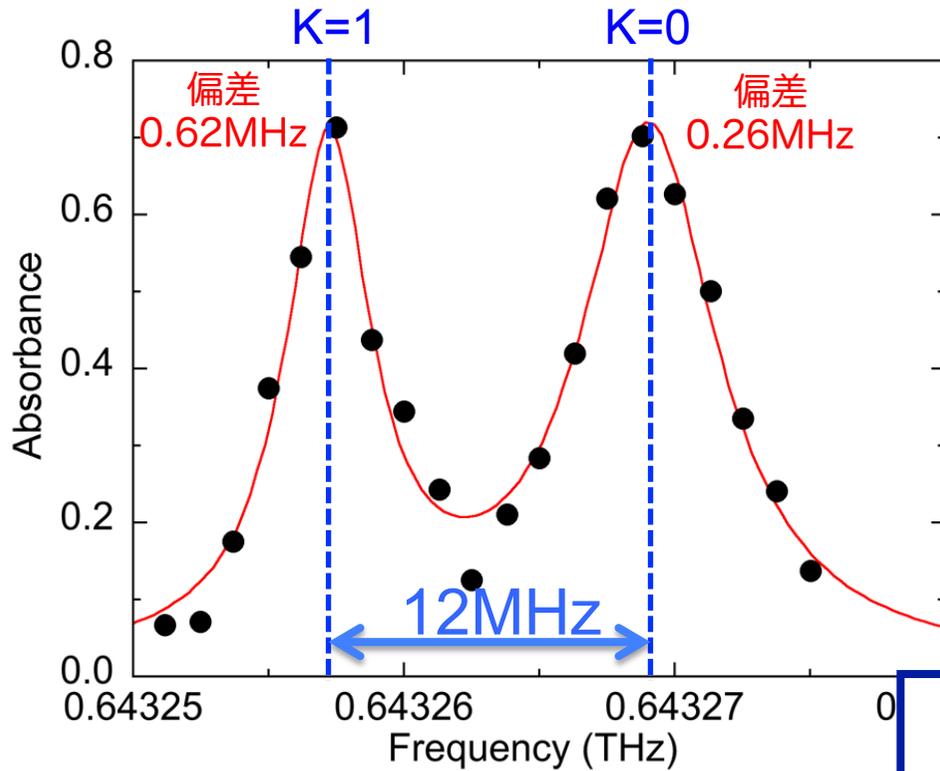
振幅スペクトル (10周期ギャップレスTHzコム)



THzコムをギャップレス化

低圧アセトニトリル (CH₃CN) の分光計測

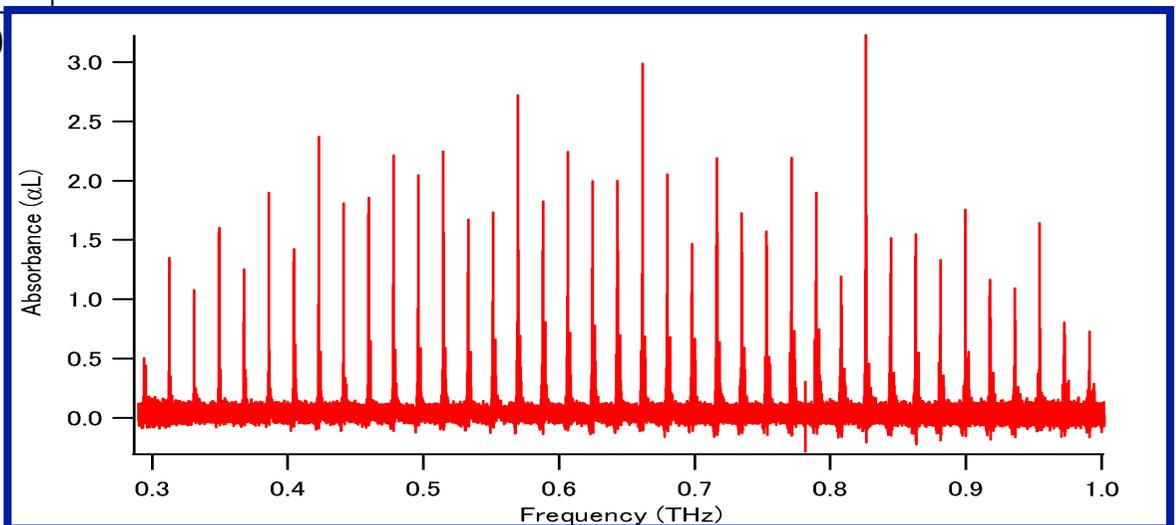
吸収スペクトル (100周期ギャップレスTHzコム)



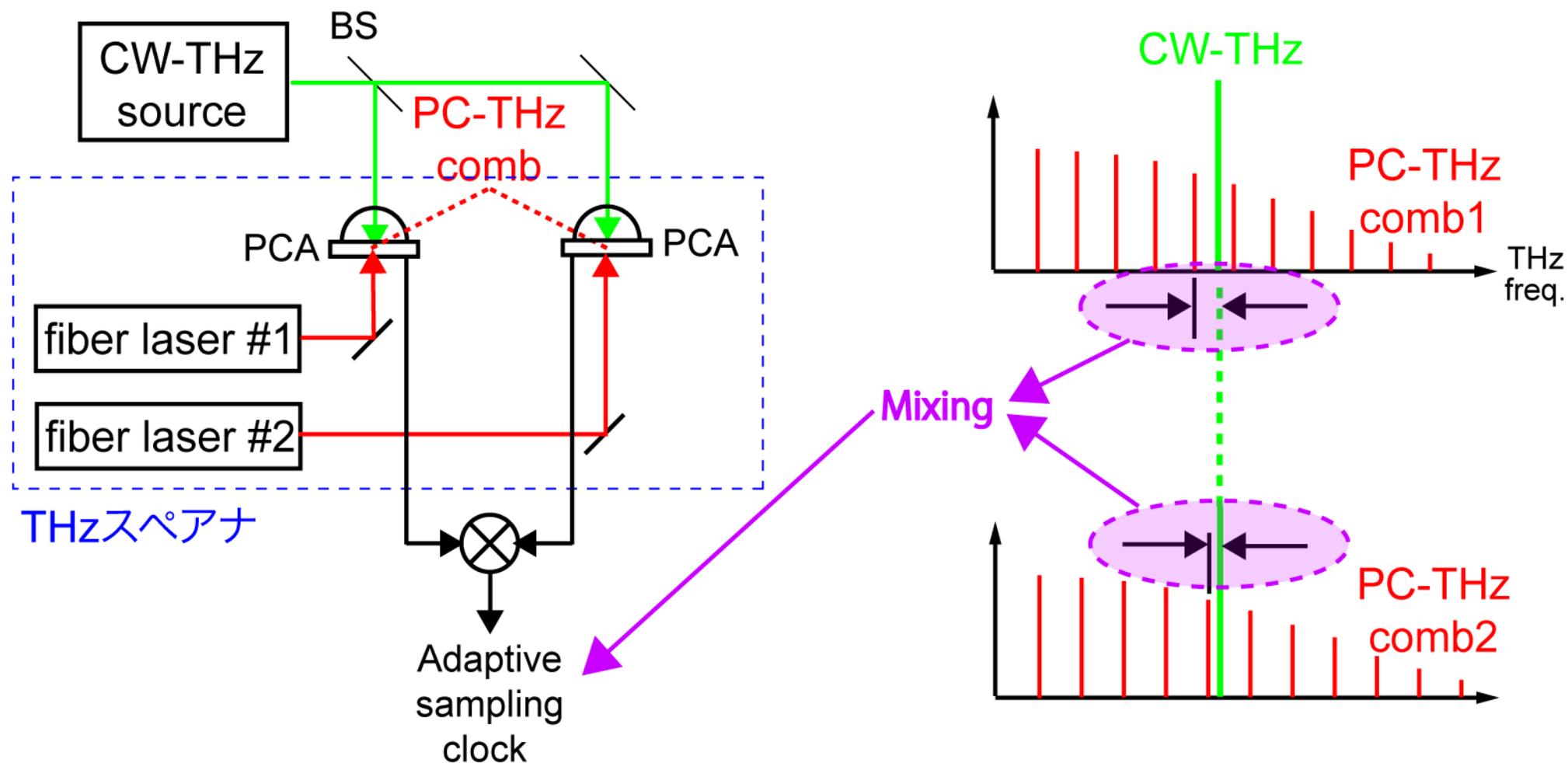
NASAデータベースとの偏差
1MHz以下(スペクトル確度 $<10^{-7}$)

↓
データベースの高精度化

極めて周波数ダイナミック
レンジ (不確かさ
1MHz@周波数1THz) の
広い分光計測を実現

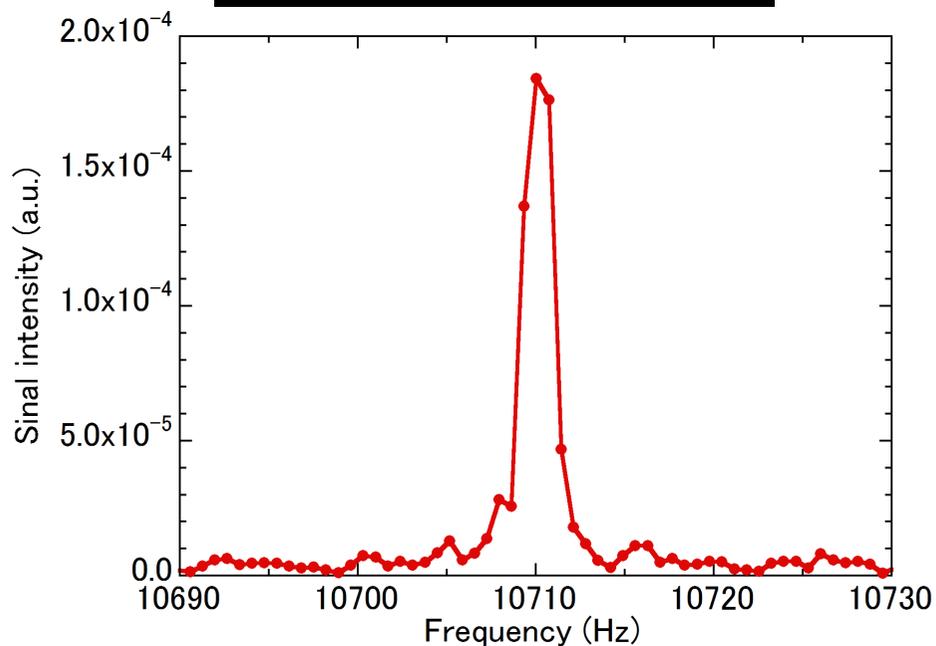


THzアダプティブ・サンプリング @フリーランニングレーザー

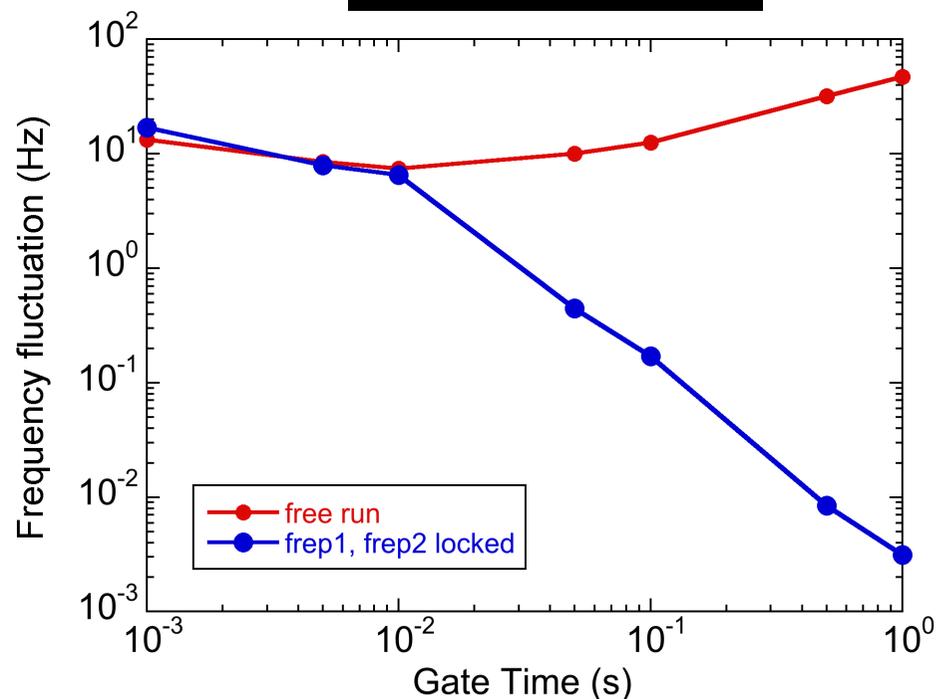


アダプティブ・サンプリング・クロック （THzコム間ビート信号）の抽出

スペクトル波形



周波数変動



4THzにおけるデュアルTHzコム間ビート信号を抽出

アダプティブ・サンプリング式 デュアルTHzコム分光法

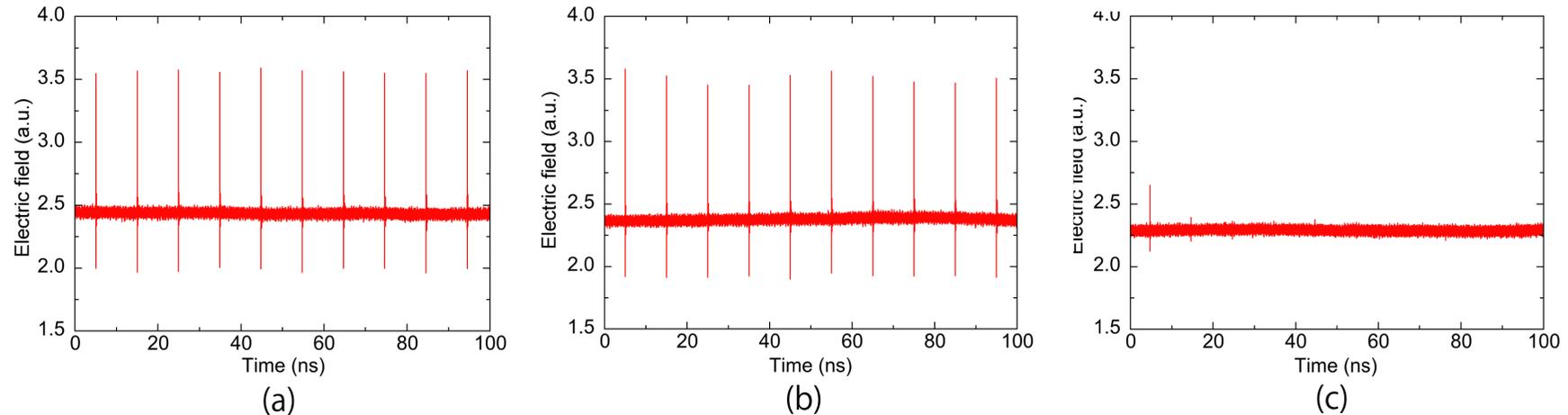


図3 10連 THzパルス列の電場時間波形（信号積算回数 100回）。(a) アダプティブ・サンプリング（フリーランニングレーザー）、(b) コンスタント・サンプリング（周波数安定化レーザー）、(c) コンスタント・サンプリング（フリーランニングレーザー）

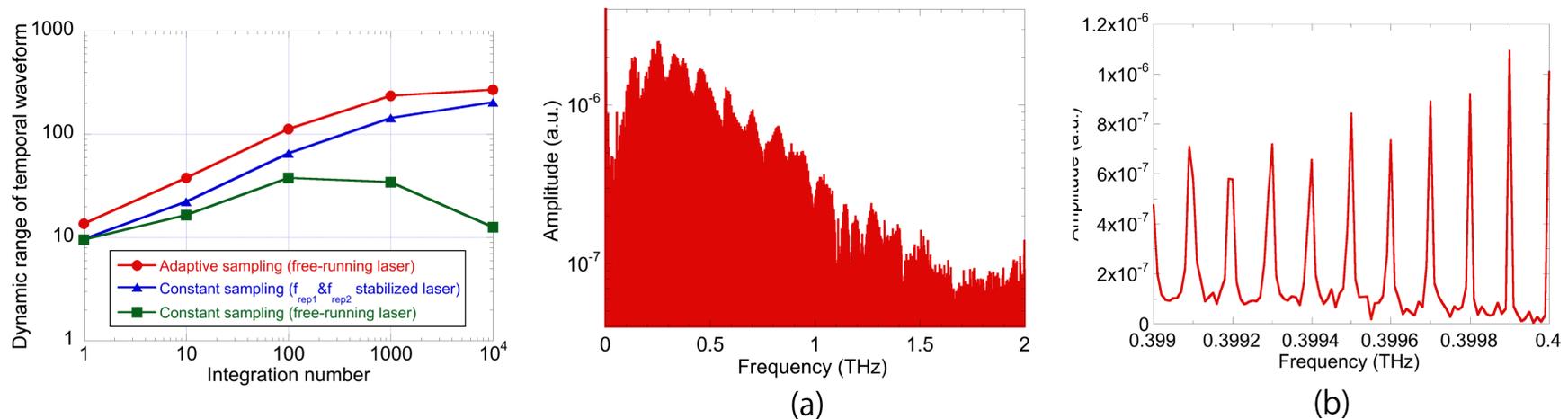


図4 THzパルス列電場時間波形の信号ダイナミックレンジ

図5 アダプティブ・サンプリング（フリーランニングレーザー）によって取得されたTHzコムの(a)全体図と(b)拡大図

THzレーダー

大型装置・大型構造物の製作・評価・管理において
高精度な距離・形状計測が求められている



航空機



パラボラアンテナ

光学的距離計：粗面物体には適用困難
電波レーダー：精度/空間分解能が
不十分

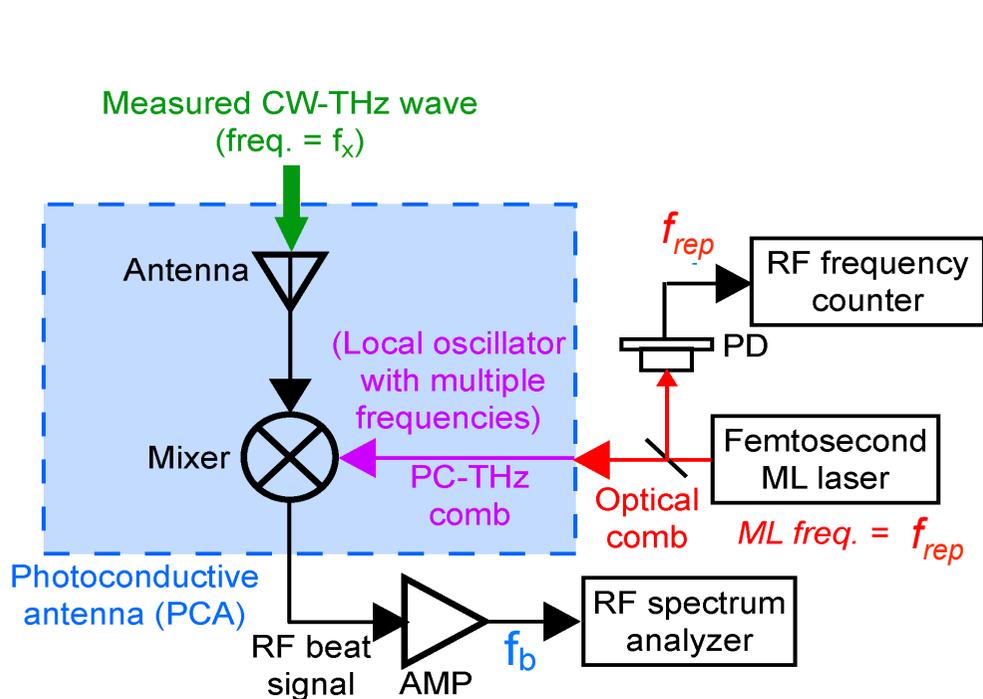


光学粗面物体の直接計測

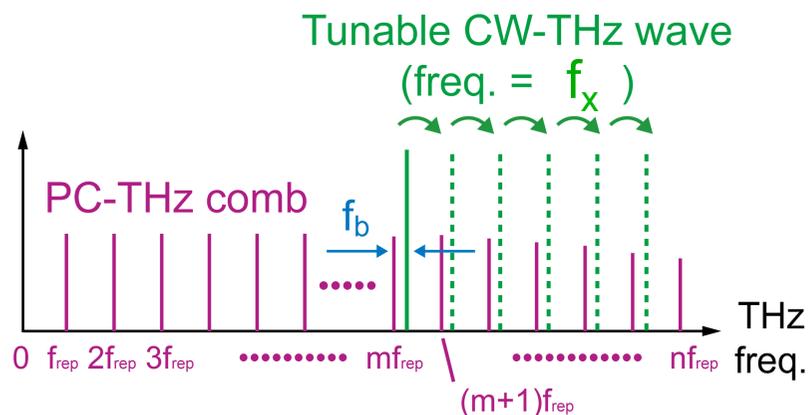


橋梁

THz周波数/位相計測

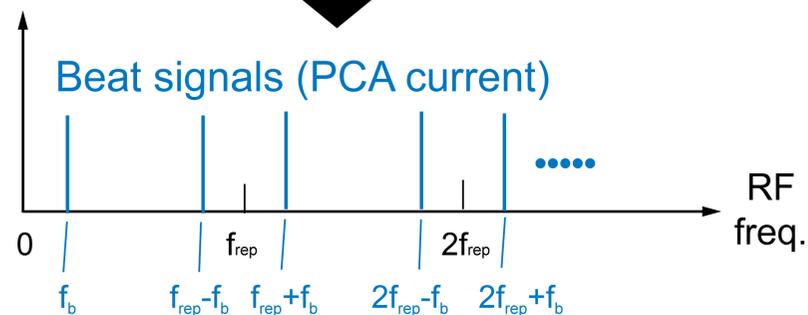


THz region



Photoconductive Mixing

RF region

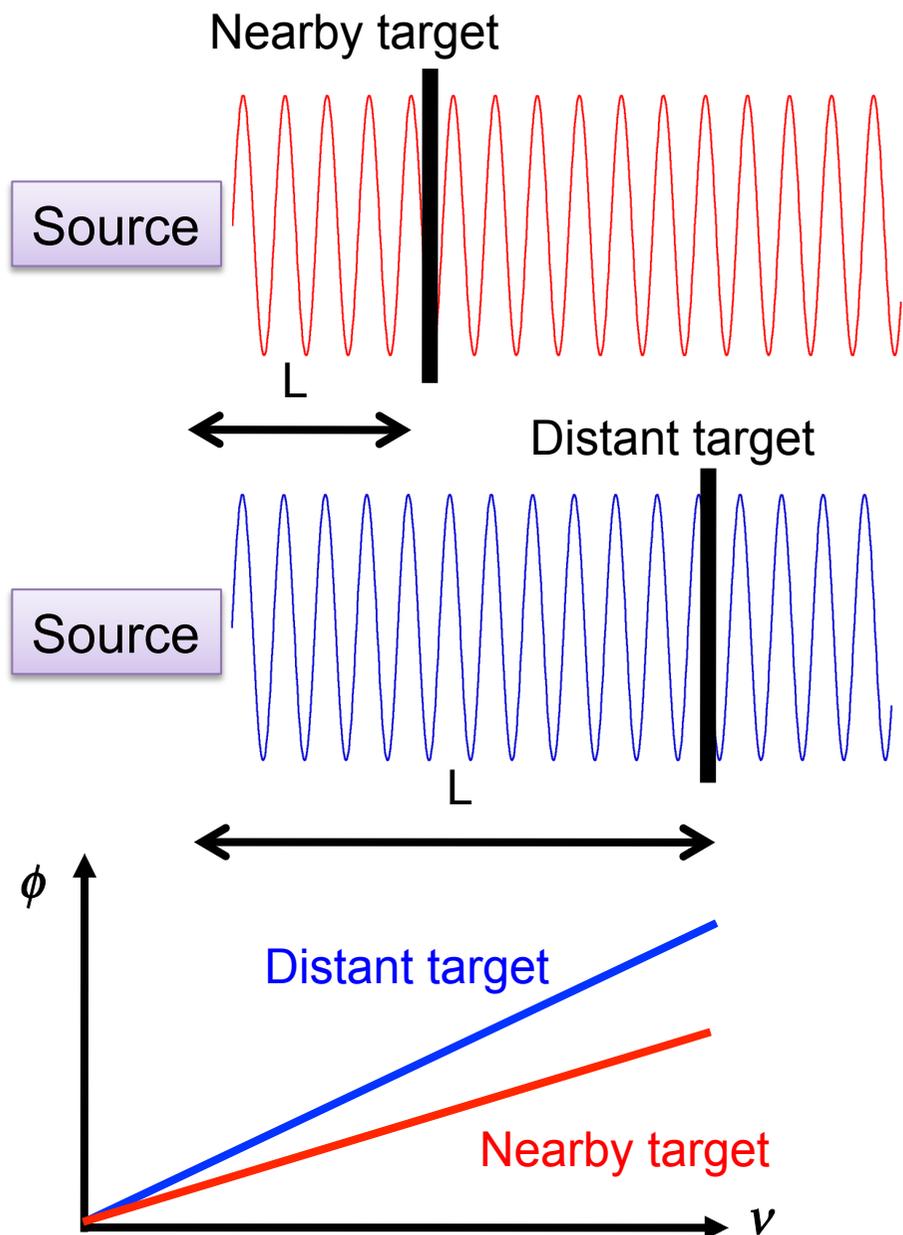


- ①PCAをハテダインシターとして利用することにより、室温環境における高感度検出を実現
- ②PC-THzコムを局部発振器として利用することにより、1台でTHz領域をフルカバー

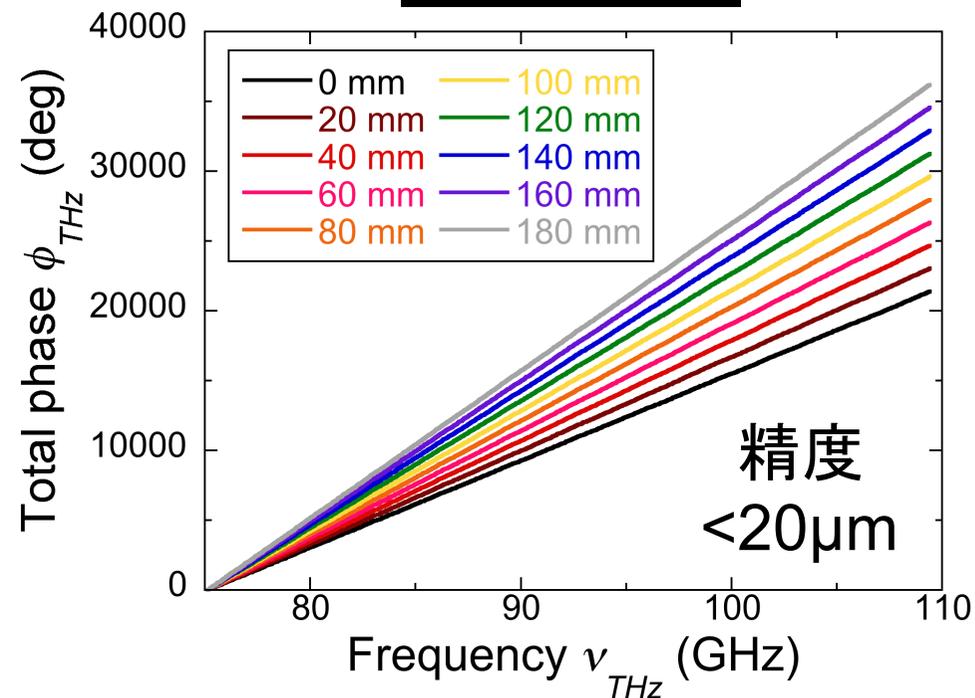
$$f_b = f_x - mf_{rep}$$

$$f_b = f_x - f_{rep}$$

位相勾配を用いた距離計測



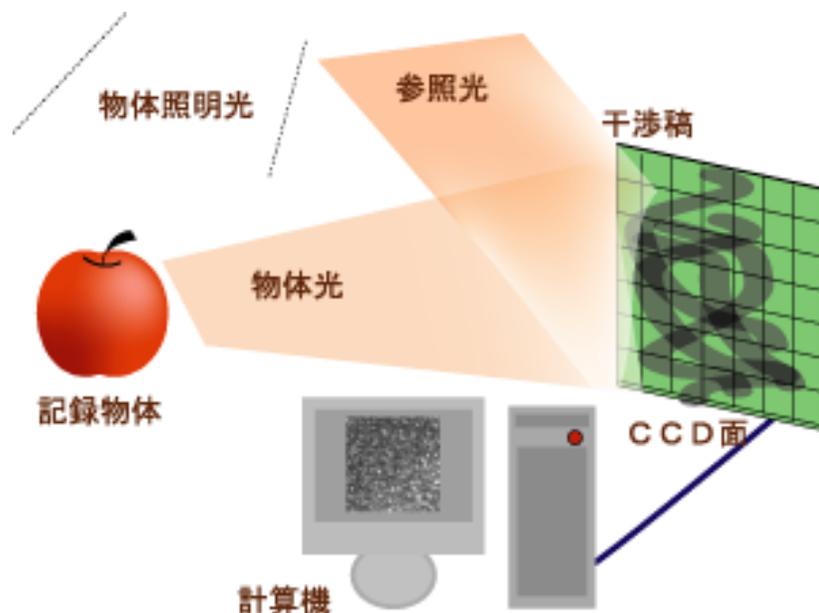
位相勾配



単一周波数CW-THz波を用いた位相計測に接続可能
 広い距離ダイナミックレンジと高い分解能を両立

THzデジタル・ホログラフィー

可視デジタル・ホログラフィー



例) 3次元表面形状測定

THzデジタル・ホログラフィー

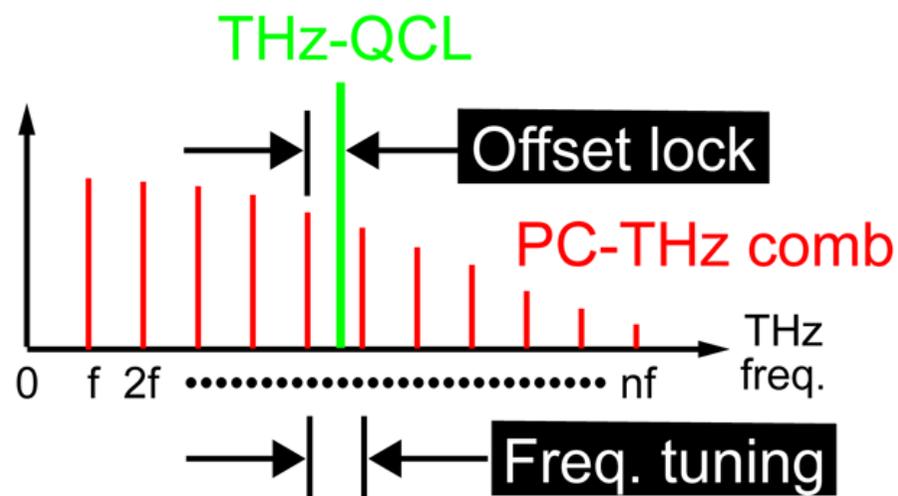
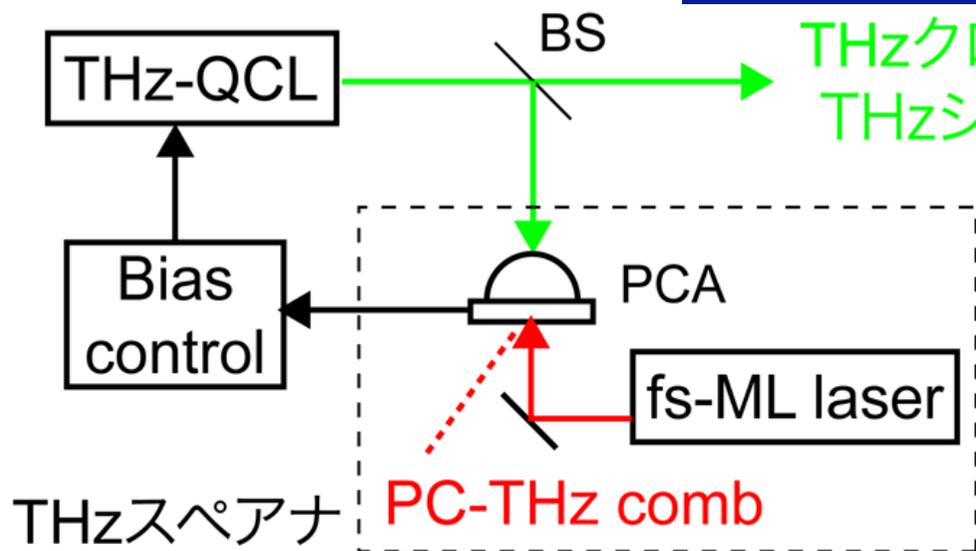
- ✓ THz波の良好な物質透過性を利用することにより、**内部構造を3次元**で可視化できる
- ✓ 2次元自由空間電気光学サンプリングの利用により、**電場振幅/位相イメージの直接取得が可能** → **干渉計測が不要**
- ✓ THz指紋スペクトルを利用すると、**成分分析型内部透視イメージング**が可能。

ソフトマテリアルの非破壊検査



THzコム位相同期THz-QCL

アクティブ制御



パッシブ制御

- インジェクションロック@THzコム > 高出力THzシンセ?
or 高出力THzコム?
- インジェクションロック@THzシンセ > 高出力THzシンセ?

THz電場イメージング@THz-QCL

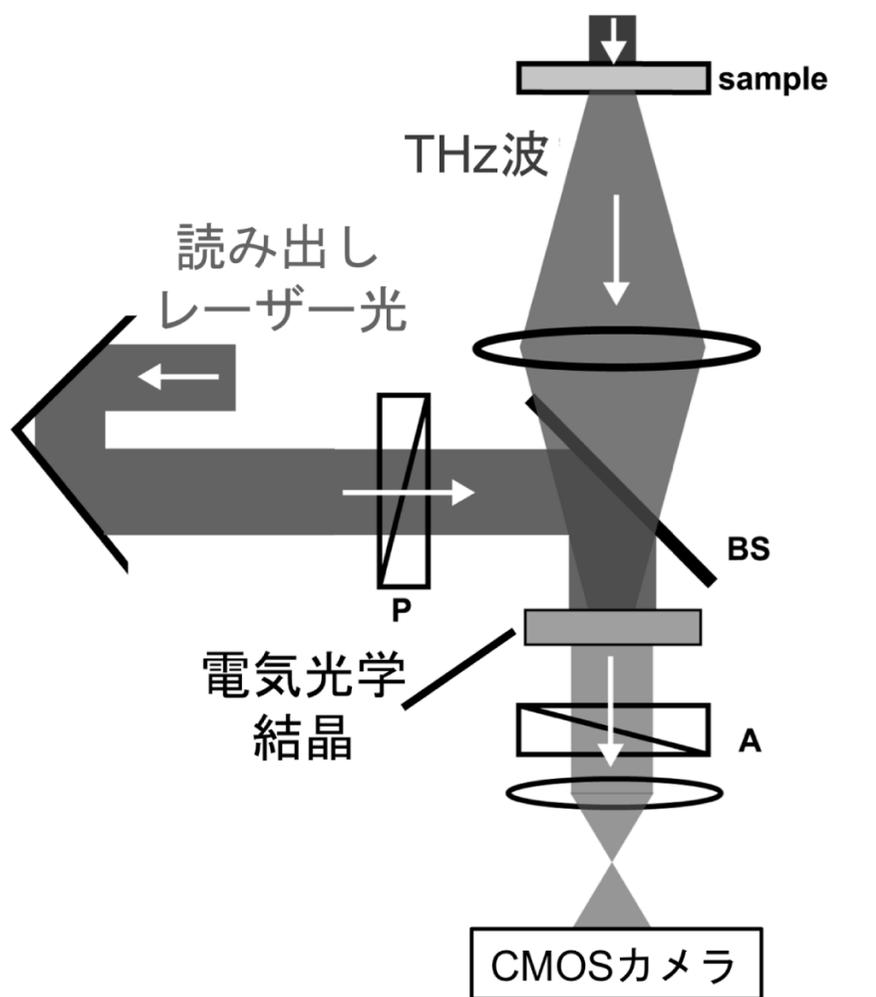


図1 2次元自由空間電気光学サンプリグ

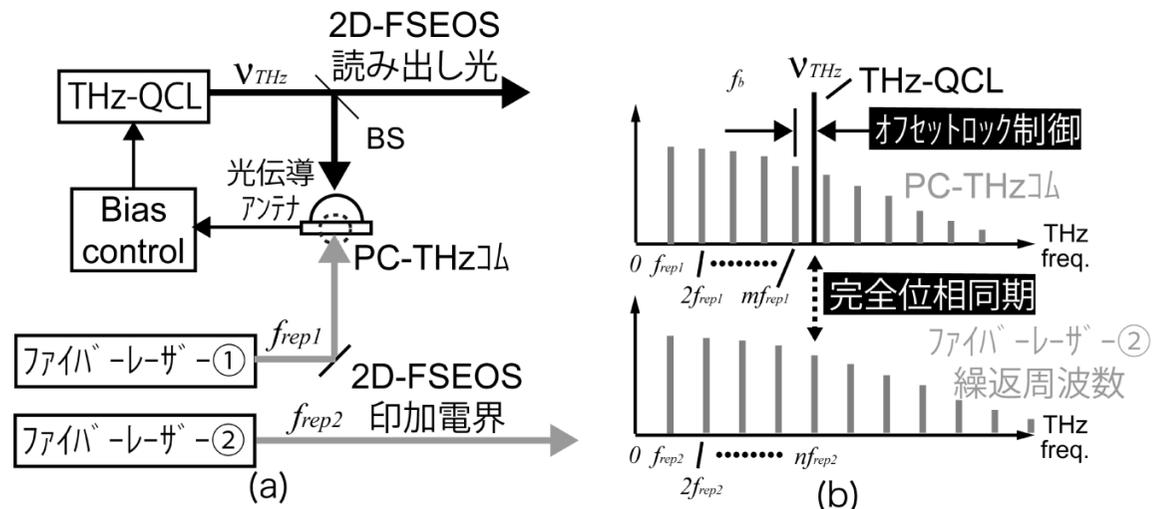


図2 THz-QCLの周波数安定化制御

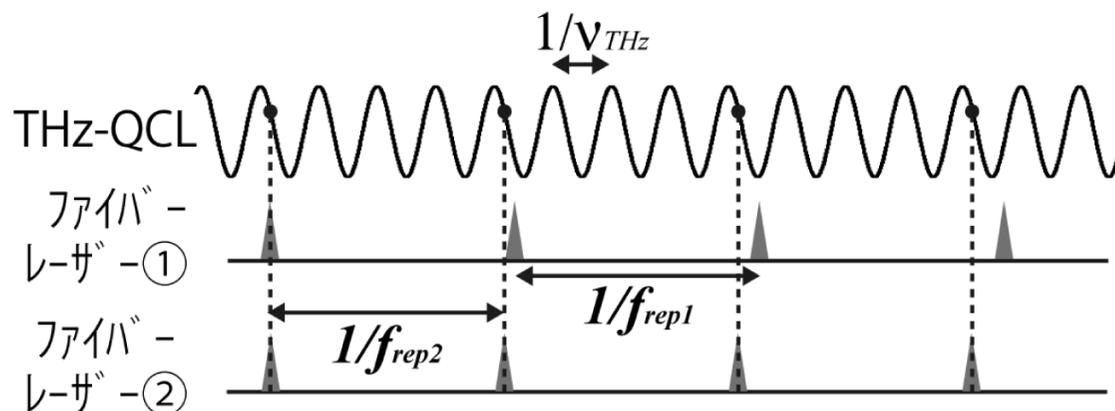


図3 タイミングチャート

THzブックスキャン

ページめくり無しの
ブックスキャン

手段

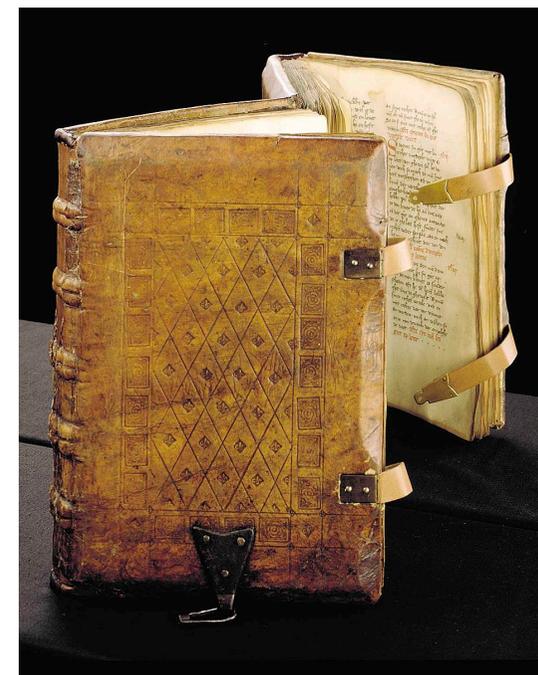
- テラヘルツ利用DH（デジタルホログラフィー）
- 高精度の位相検出により，情報を取得
- キャリア周波数の変調により，限定した注目深さのスキャン

技術上のポイント

- テラヘルツ波に対しては，文字が回折格子になること
(100 dpi = 251um)
- 位相の直接計測（THzの利点）
- 印字部分の吸収が少なくても，位相変化を検出

利点

- 開けない文書の内容を読み取れること
(水没した書籍，脆い文書など)
- (将来的には) 高速化
- 書籍セキュリティ：文字を読めなくても異物検出

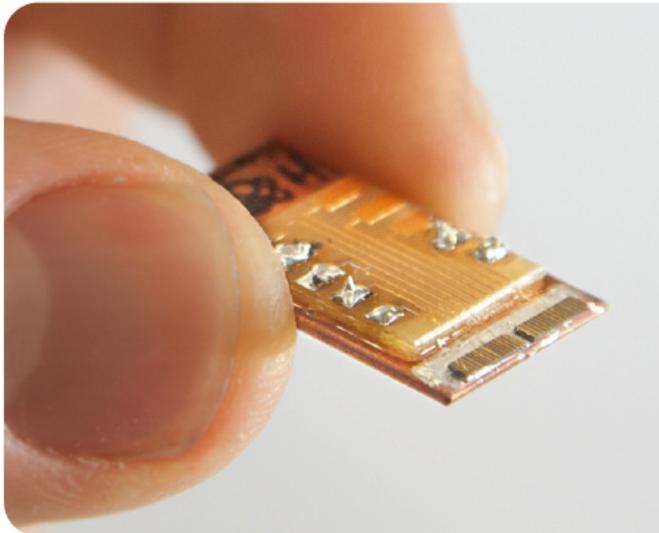


[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:Sachsenspiegel.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sachsenspiegel.jpg)

[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:P._Oxy._XXII_2331.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:P._Oxy._XXII_2331.jpg)

TERACOMBプロジェクト in EU

ウィーン工科大
パリ第7大
ETH Zurich
MenloSystems
ボルドー大
ケンブリッジ大



**QUANTUM CASCADE LASER
BASED TERAHERTZ
FREQUENCY COMBS**

THE GOALS

The project goal is to provide the enabling technology for realizing a compact, high power and cost effective way of THz wave synthesis using a THz frequency comb.

A frequency comb is essentially a laser beam whose spectrum consists of many regularly spaced laser lines with different frequencies. Despite the huge bandwidth, this light source provides both spatially and temporally coherent radiation with an excellent brilliance.

Aim of this project is to provide the technological platform necessary for enabling the generation of high power THz frequency combs with a bandwidth of up to 1 THz and sufficiently high frequency stability.



Milestones:

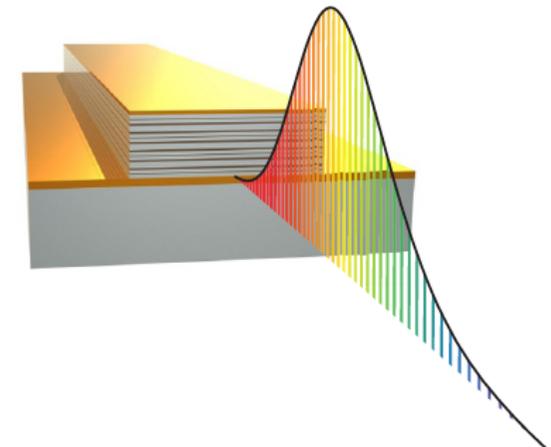
- Realization of a THz quantum cascade laser with a gain bandwidth of up to 1 THz
- Demonstration of mode locked operation of such a THz quantum cascade laser
- Development of highly sensitive detection methods for THz frequency combs

THE APPLICATIONS

Such THz frequency combs can be used for a variety of applications such as:

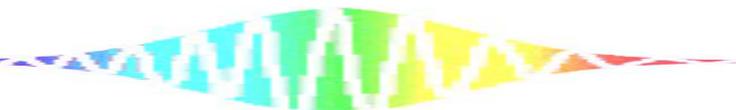
- Biomedical imaging
- Quality control in industry/production
- Quick, sensitive and non-destructive analysis and identification of chemicals, e.g. for environmental monitoring
- Detection of substances relevant for security, e.g. explosives, drugs, chemical and biological agents

Furthermore, THz frequency combs represent an enabling technology for the next-generation of wireless communications with transfer rates in the terabit per second range.



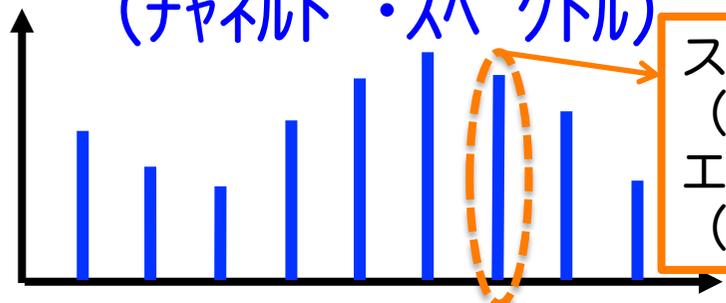
②新奇光コム計測の開拓 と応用計測展開

- 偏光コム
- 画像コム
- センシングコム
- 次元変換コム



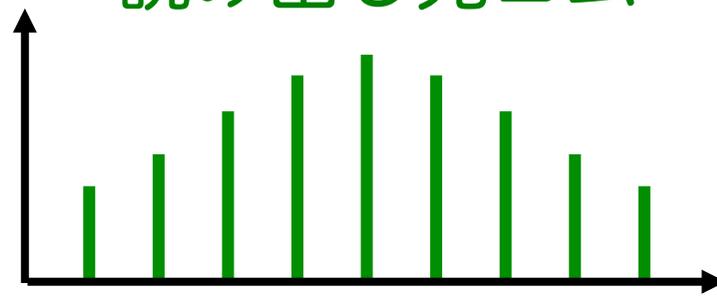
偏光コム

偏光コム
(チャネル・スペクトル)



ストークス・パラメーター
(S_1, S_2, S_3)
エリプソ・パラメーター
(Δ, Ψ)

読み出し光コム

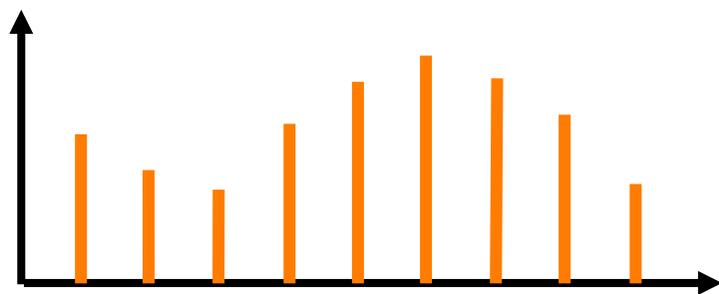


偏光&分光計測@デュアル光コム

分光器フリー

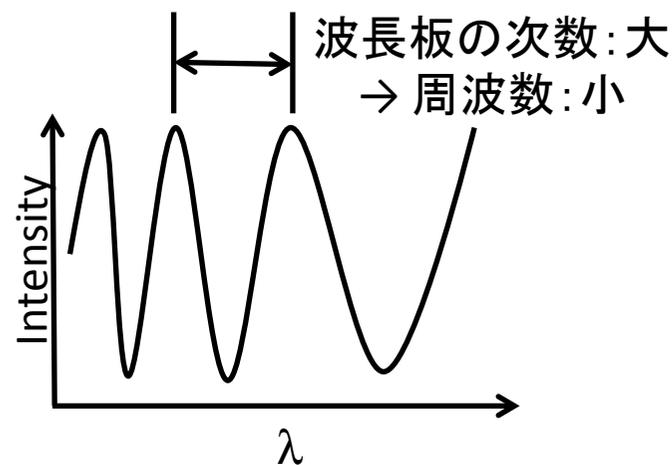
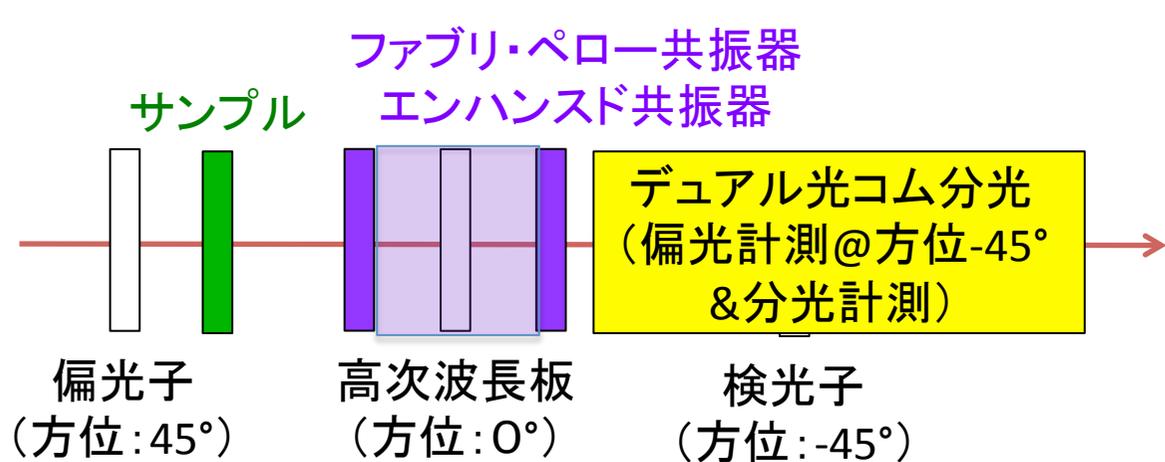
回転偏光素子フリー

偏光RFコム (電気コム)

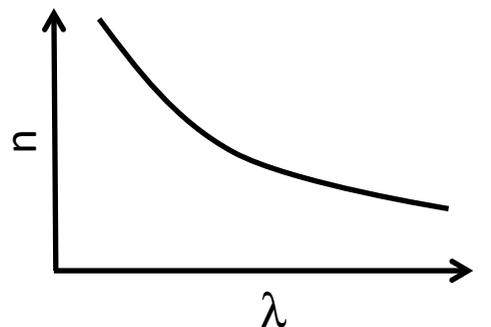
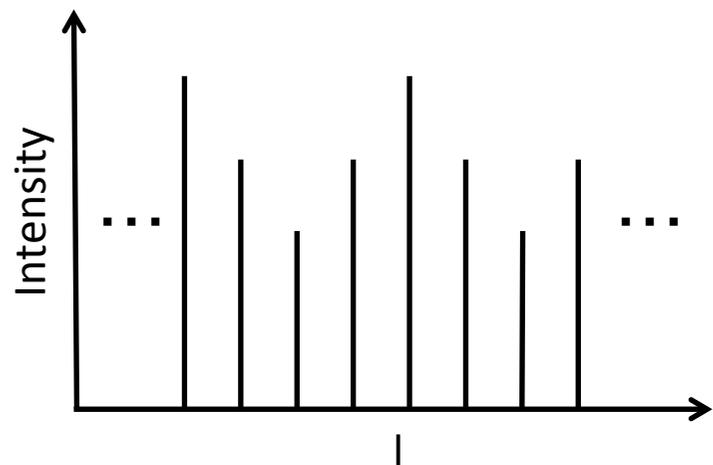


偏光解析の
大幅な高精度化

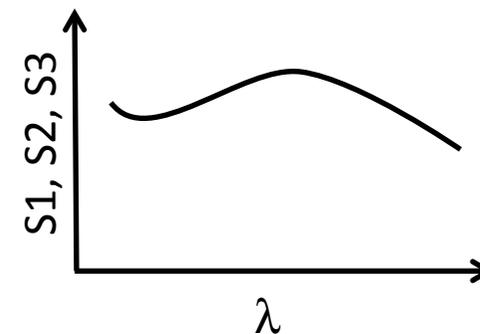
ハイパー・チャンネルドスペクトル



波長板の次数をあげることで
チャンネルドスペクトルを高密度化



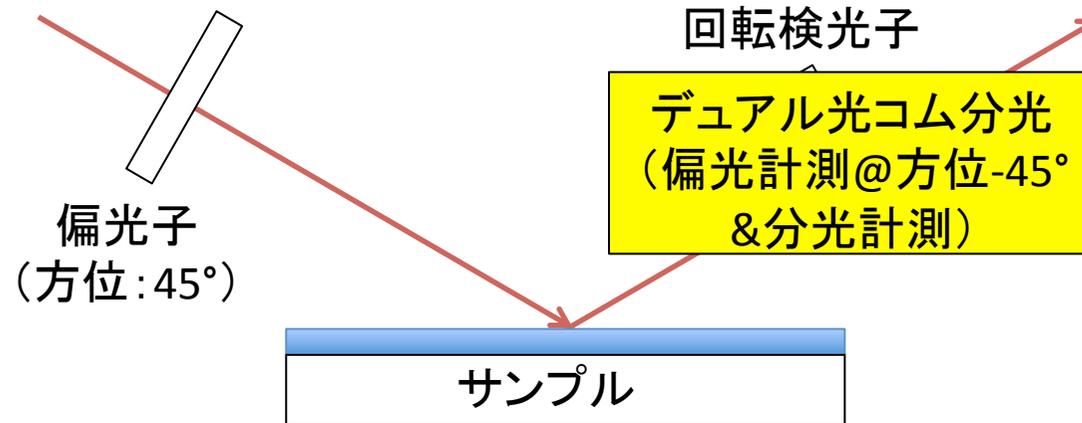
高精度屈折率分散計測



高精度偏光計測

・複屈折標準試料の作製

分光コム・エリプソメトリー



振幅と位相の同時計測

- ☞ 複素屈折率の直接算出
- ☞ 偏光子の回転不要
- ☞ 実時間測定

高分解能測定

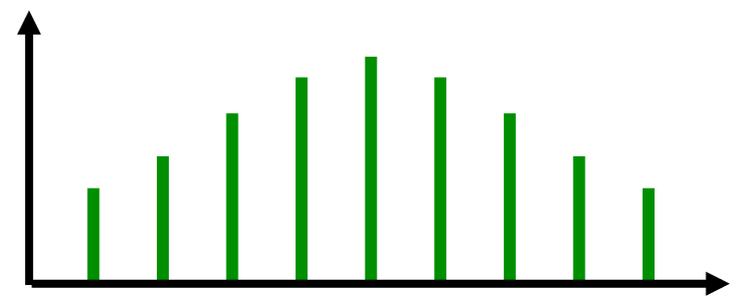
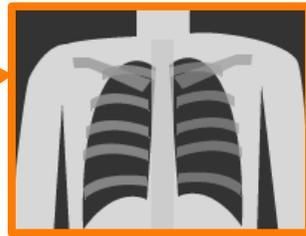
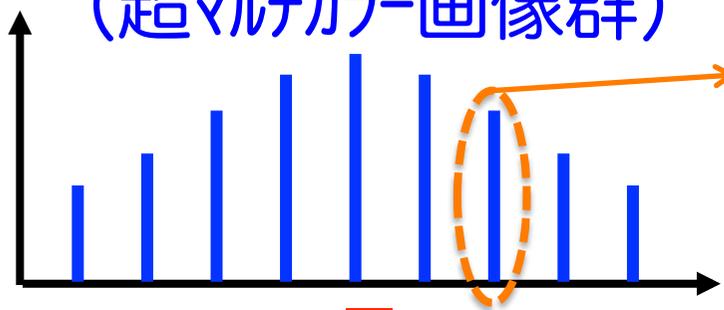
- ☞ モデルフィッティング精度の向上



画像コム
(超マルチカラー画像群)

画像コム

読み出しコム

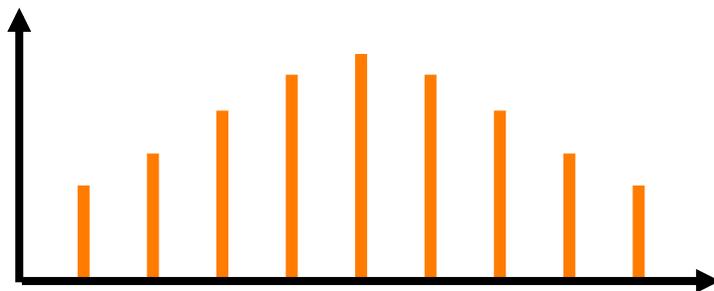


デュアル光コム分光イメージング

ロックイン・イメージング

(振幅&位相&画像&周波数の多重化)

画像RFコム (電気コム)



任意波長のイメージ抽出

バイイメージング

光情報記録

3次元内部透視

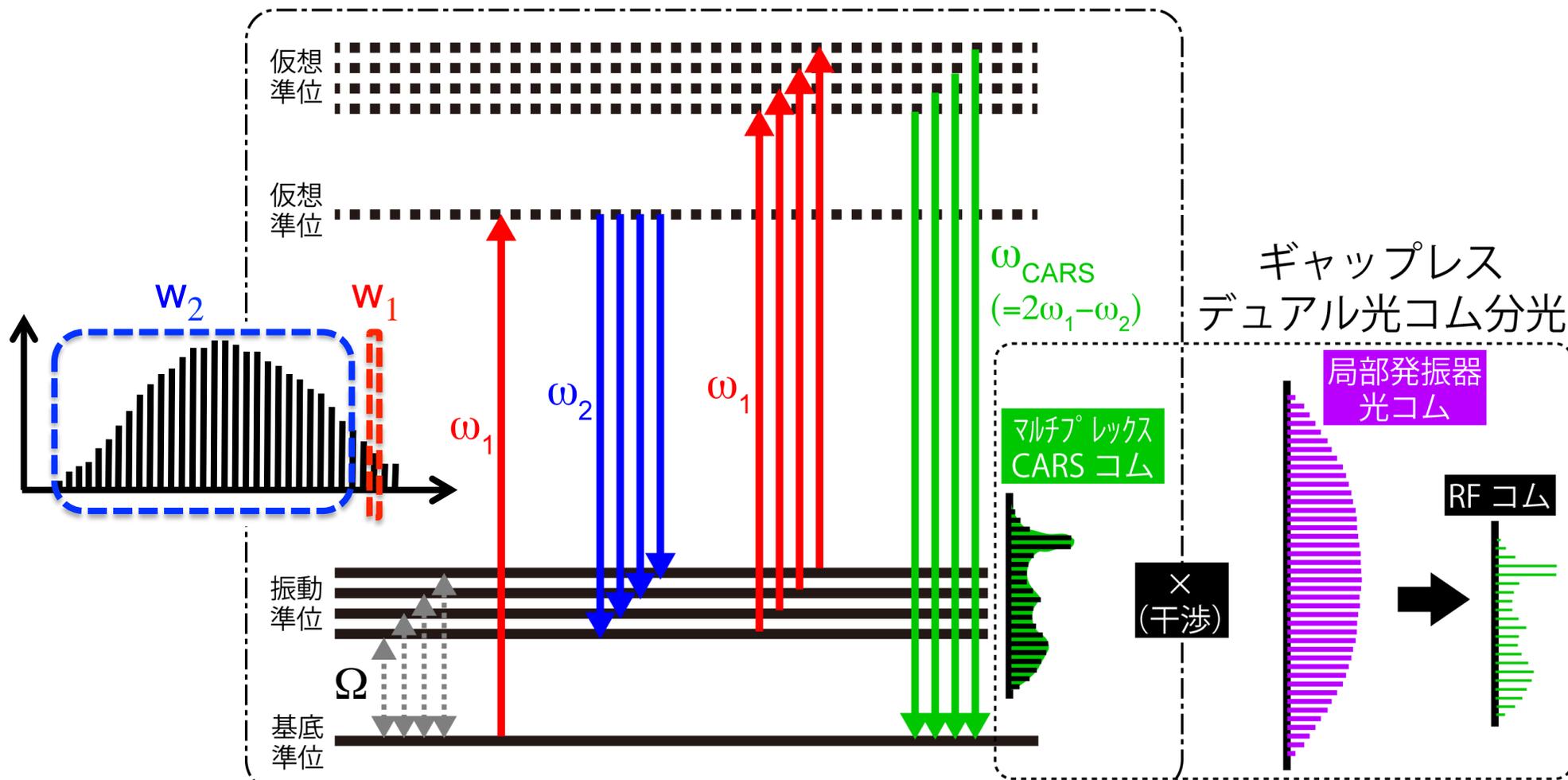
ディスプレイ

光情報量の大幅な増大

(画像、振幅、位相、周波数)

画像コムと非線形ラマン分光の融合

マルチプレックス CARS 過程



分子指紋を究極の分光性能（高分解能、高確度、広帯域、実時間、高感度）で識別して画像化

エッジリットコムディスプレイ

エッジ照明ディスプレイ

ガラス基板の側面から照明光を入射，ガラス面上に映像を表示する技術。従来はガラスの片面の形状を加工して

特定の位置までは全反射で伝搬するようにして実現されていた。

透過像が歪む欠点があるだけでなく，大画面化と像の明るさと精度に課題。

参考: edge lit 技術自体は，LCDのLEDバックライトに普及。

要素技術

- 光コイルを使って，世界最大のフラットパネルディスプレイを。米国 Sun Innovations社が透明な蛍光スクリーンを開発[1]
- 周波数分解されたビームの交差位置で2光子吸収可能であれば，周波数を空間位置に対応付け可能
- 蛍光励起
 - コイルの周波数密度の高さと位相が揃っていることが重要なファクター。
 - 赤(390-410nm)
 - 緑(490-510nm)
 - 青(420-440nm)
- 静止画の表示であれば，ガラス面を共振器のようにして使って映像表示可能か？入射側と反対側のエッジで反射した光パルスと入射光パルスが重なった位置で発光。

小型画面であれば

[1] Ted Sun et al., SID 2013 DIGEST, pp.

- ホログラム多焦点レンズを使って周波数ごとに位置の異なる集光点を形成。

映画「Minority Report」に出てくるような透明ガラス表示

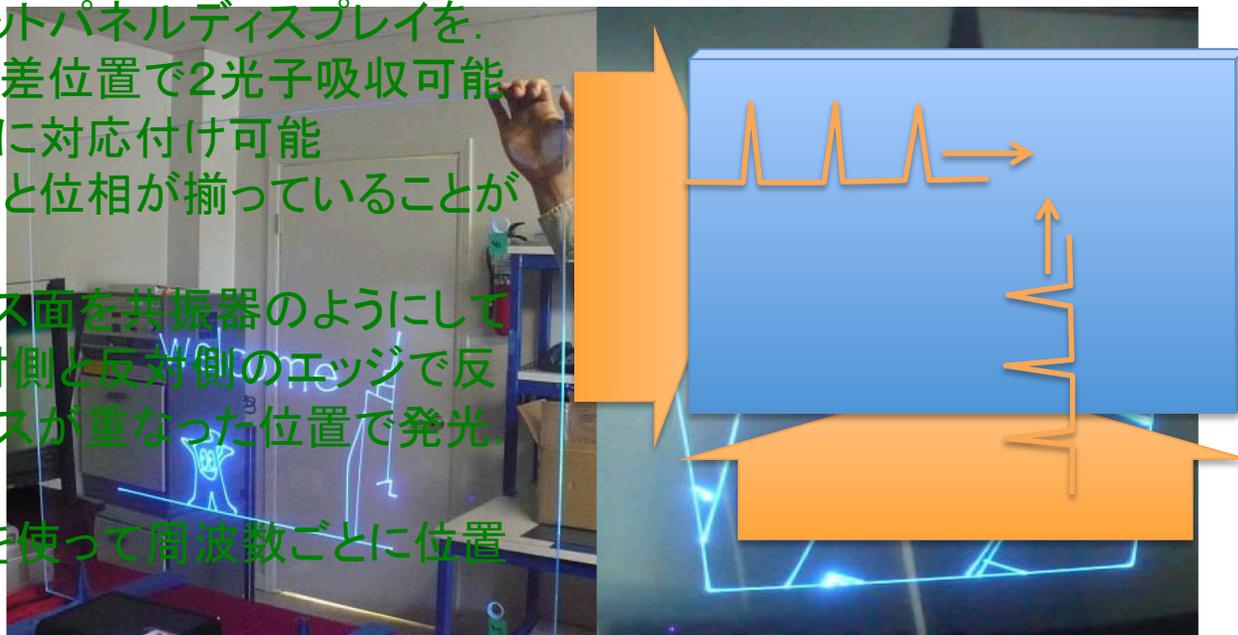
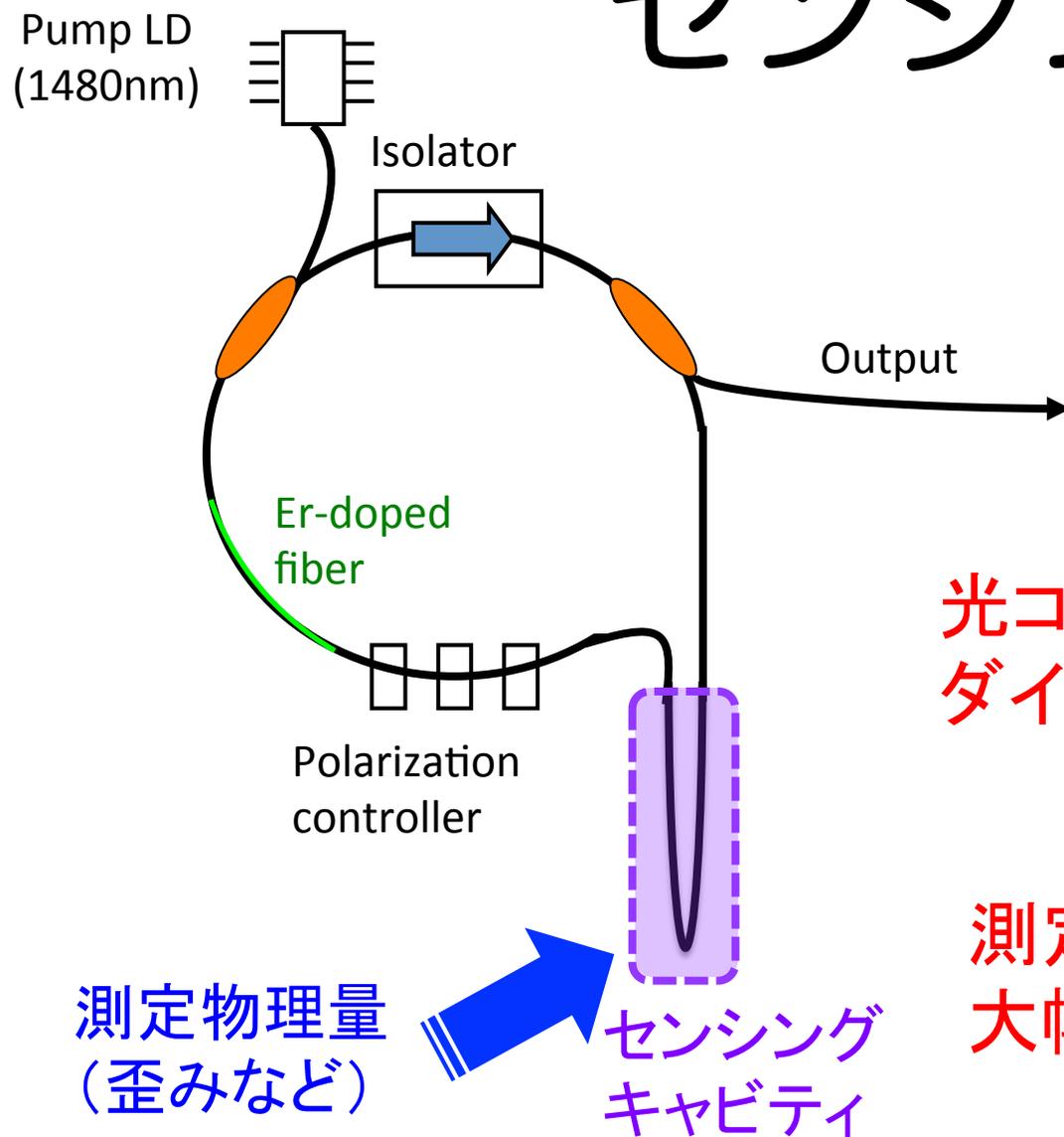


Figure 5. Demo images presented on the full-size display glass or windshield coated with transparent nano-phosphor, excited from a blue-ray laser image projector.

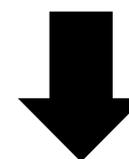


センシングコム



測定物理量を
周波数に置換

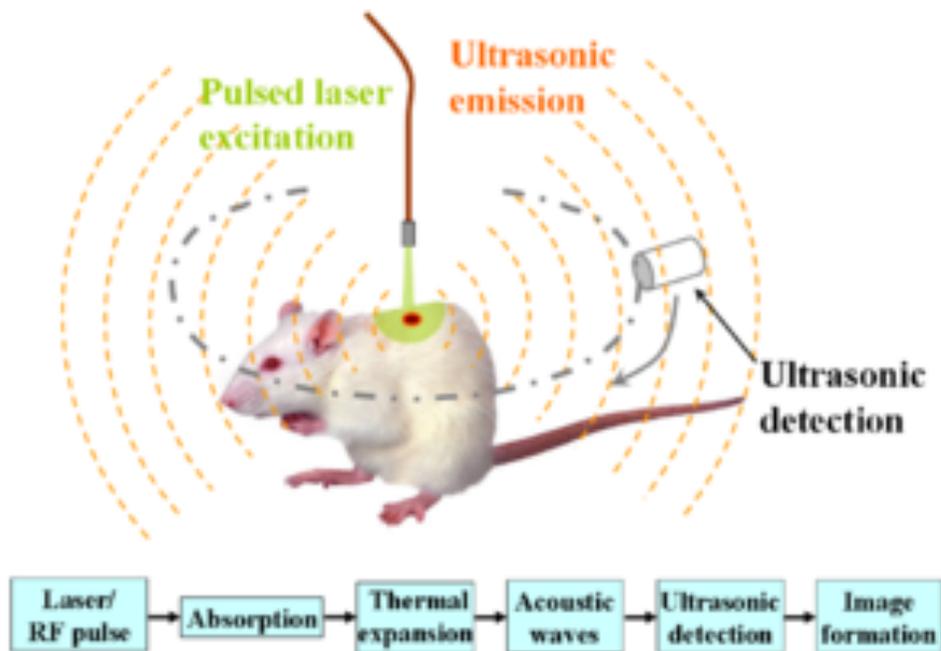
光コムの圧倒的な周波数
ダイナミックレンジの利用



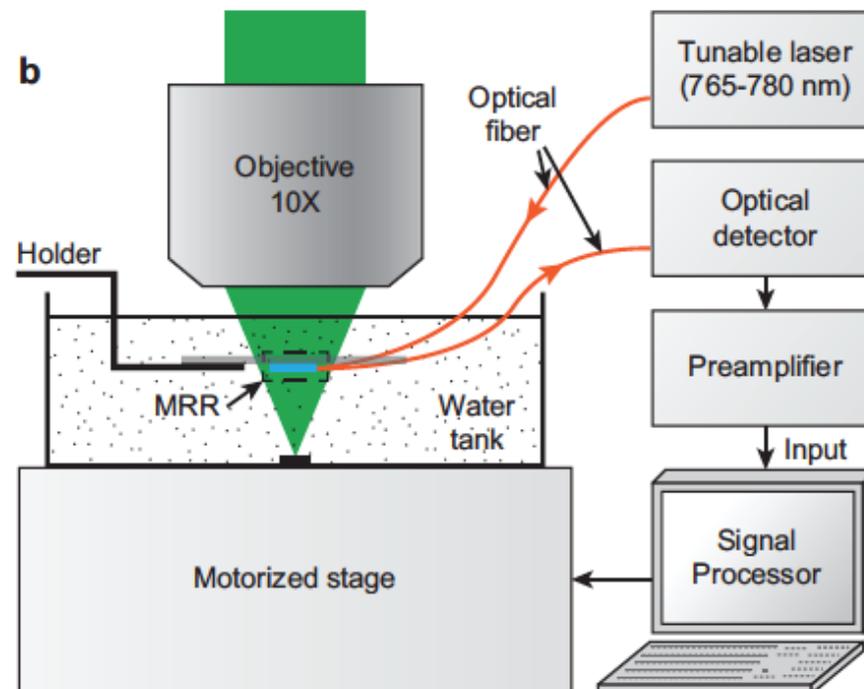
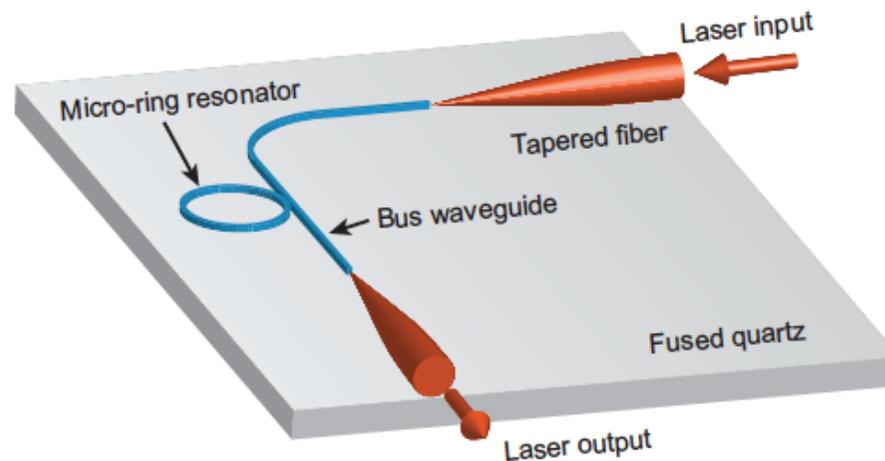
測定ダイナミックレンジの
大幅な拡大

光音響イメージングへの応用

超音波トランスデューサー@従来



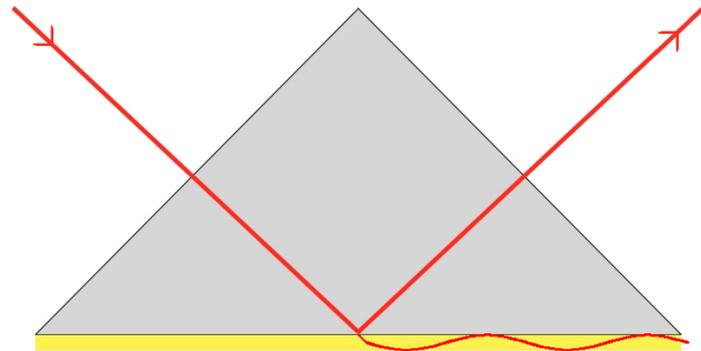
光センシング



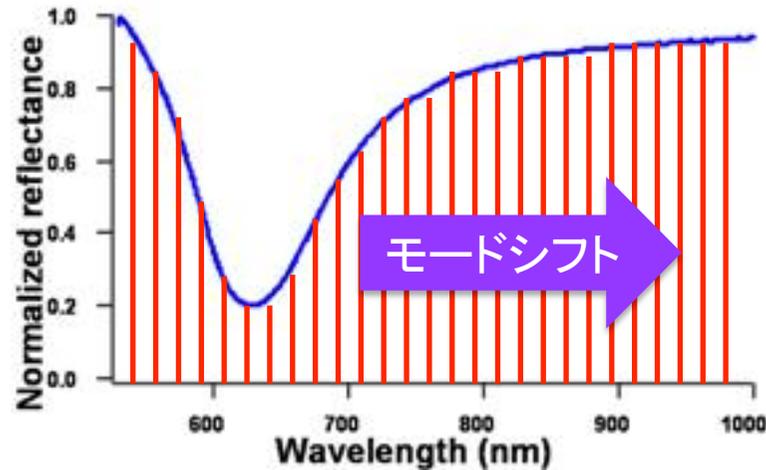
Scientific Reports 4, 4496 (2014).

SPRセンシング

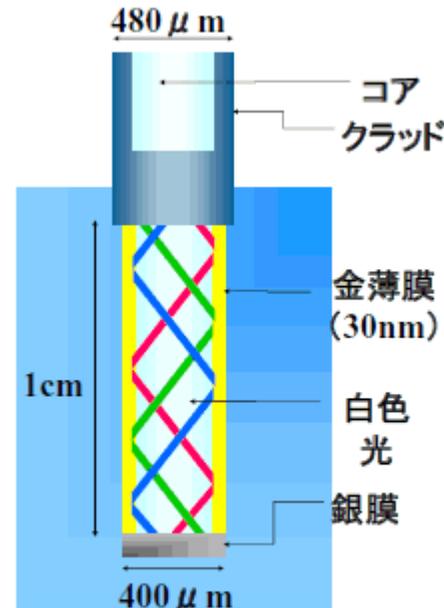
プラズマ振動とエヴァネッセント光の結合



クレッチマン配置



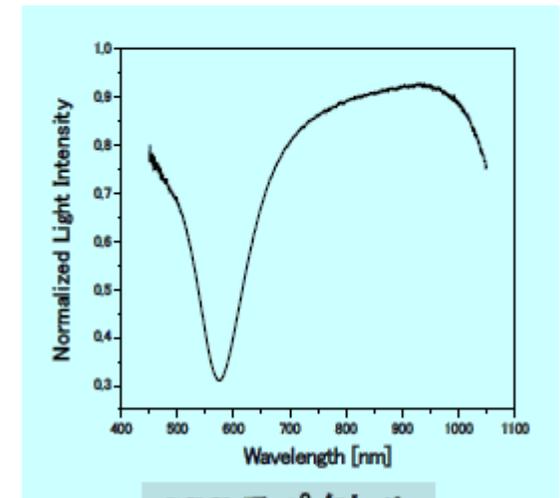
スペクトルモード



SPRファイバープローブ

表面プラズモン共鳴 (SPR)

入射エネルギーの吸収



SPRスペクトル

f_{rep} 変化 @ 共鳴波長 ?

コムモードシフト @ 共鳴波長 ?

高分解能スペクトル @ デュアル光コム

複素SPRスペクトル (K-K変換なし)

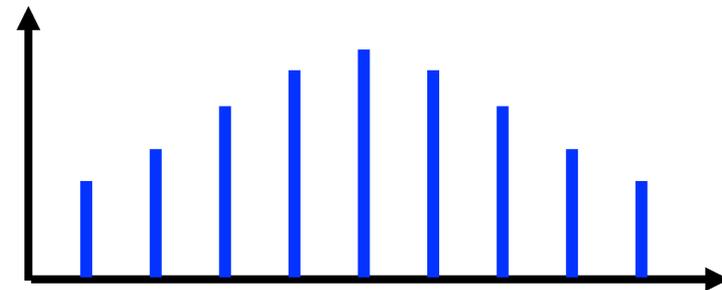
レーザー波長の問題 ?

次元変換コム

時間情報
空間情報
偏光情報
その他

波長変換

次元変換コム



各種情報を光コムに重畳

デュアル光コム

コム・モード数
☞ 膨大なチャネル数
コム・モード線幅
☞ 極小のサンプリング幅

波長情報で読み出し

チャープ光の利用

時間-波長変換

線形チャープ



時間波形をスペクトル波形にエンコード



デュアル光コムで超高分解分光



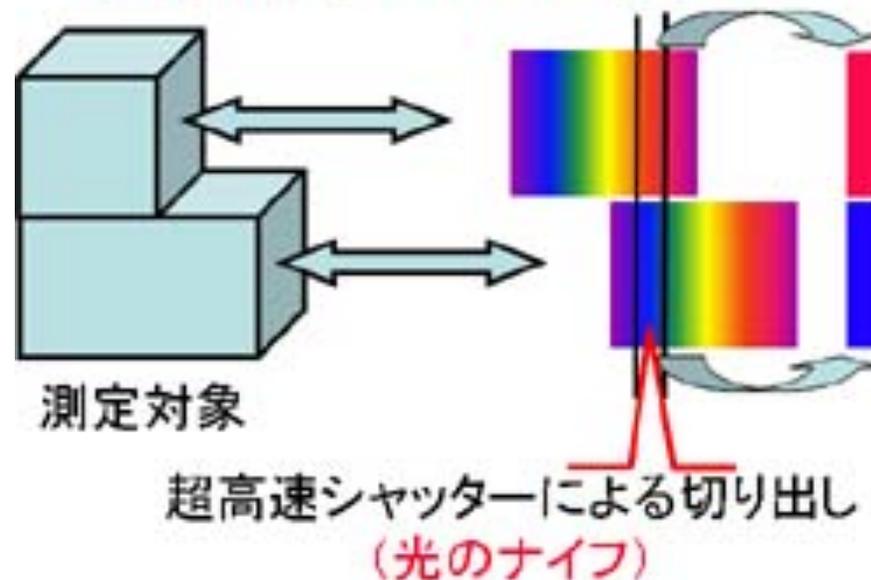
シャッター時間：コムモード線幅
(パルス幅とは独立)
データ点数：コムモード総数
(数万チャンネル)



究極の時間分解能 (<1 fs) が可能
(但し、かなり離散サンプリング)

3次元形状計測@美濃島さん

チャープしたフェムト秒パルス
(多色が規則的に並ぶ"時間の虹")

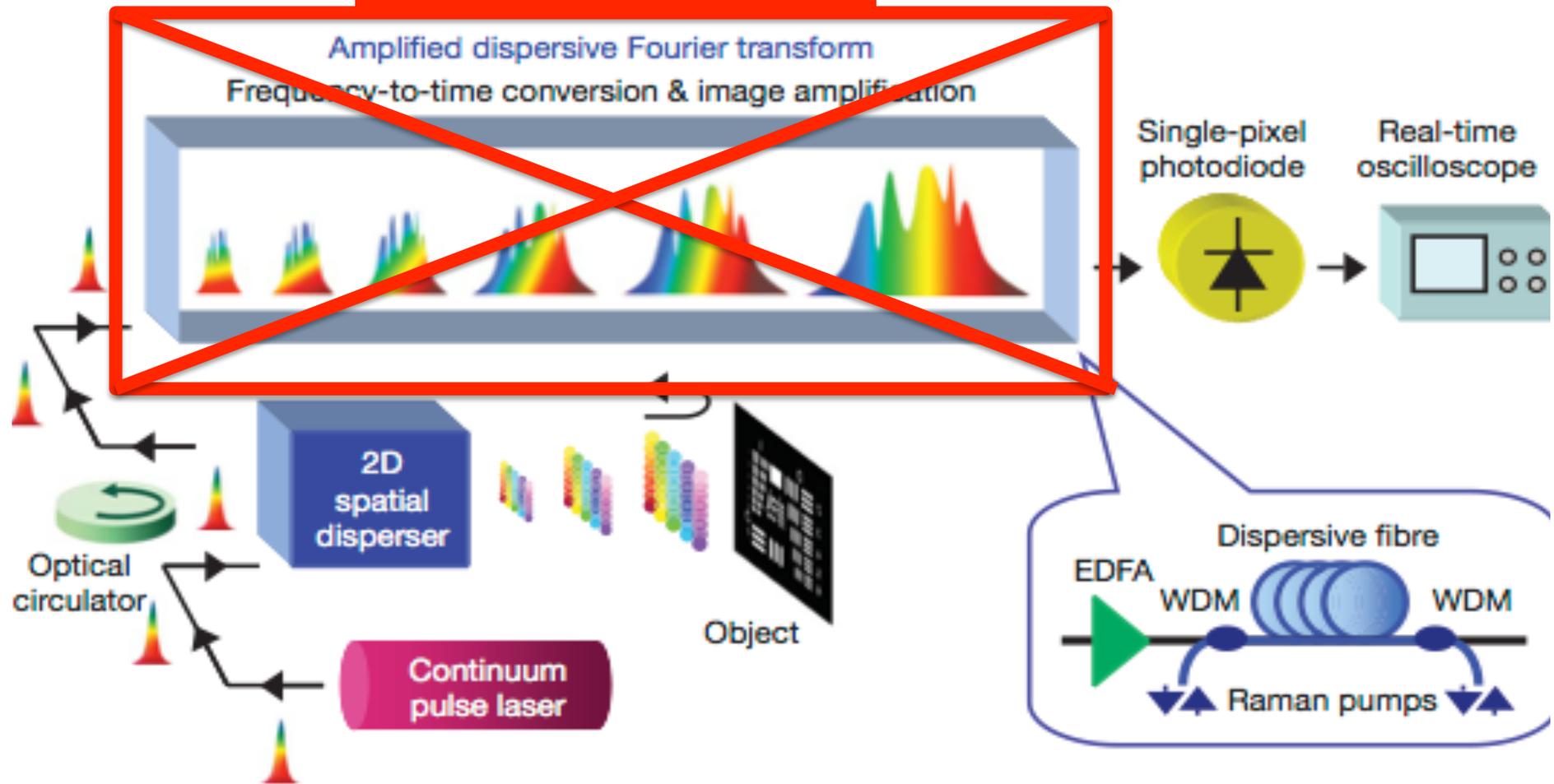


深さ分解能の大幅な向上
画像コムと融合

STEAM camera@東大・合田先生

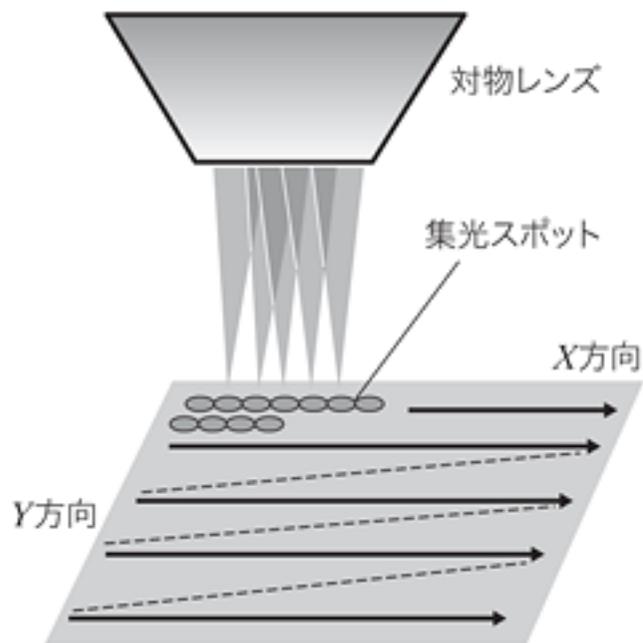
デュアル光コム

空間-波長変換



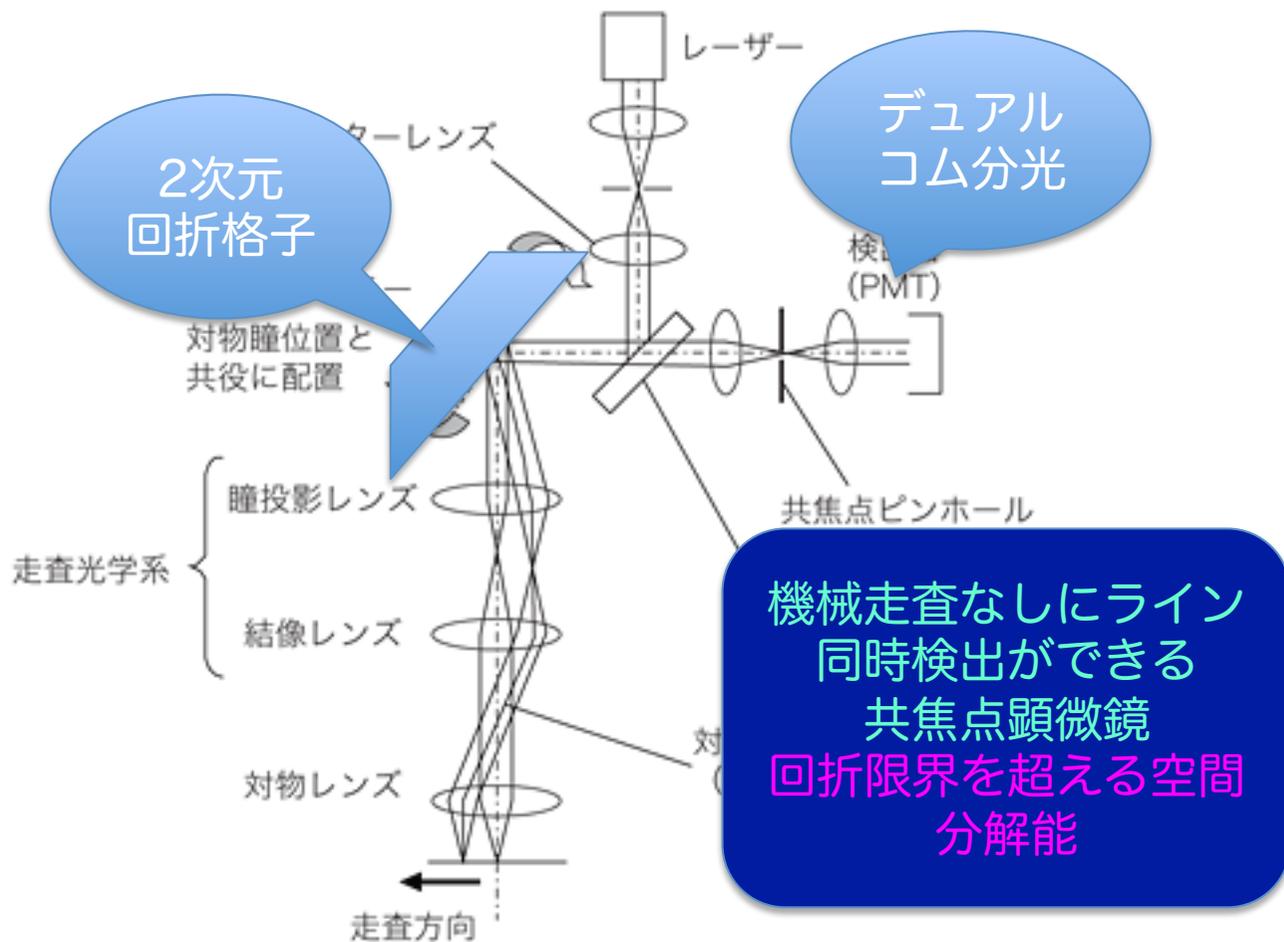
ref) Nature 458, 1145 (2009).

スキャンフリーなフルフィールド共焦点顕微鏡



レーザービーム走査による画像形成概念図

<http://bioimaging.jp/learn/023/>

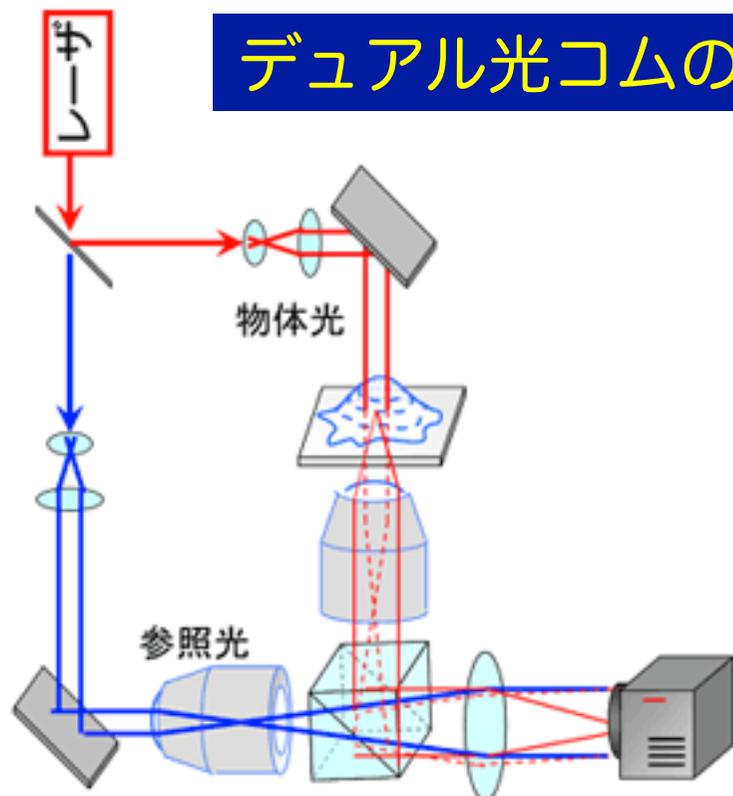


機械走査なしにライン同時検出ができる
共焦点顕微鏡
回折限界を超える空間分解能

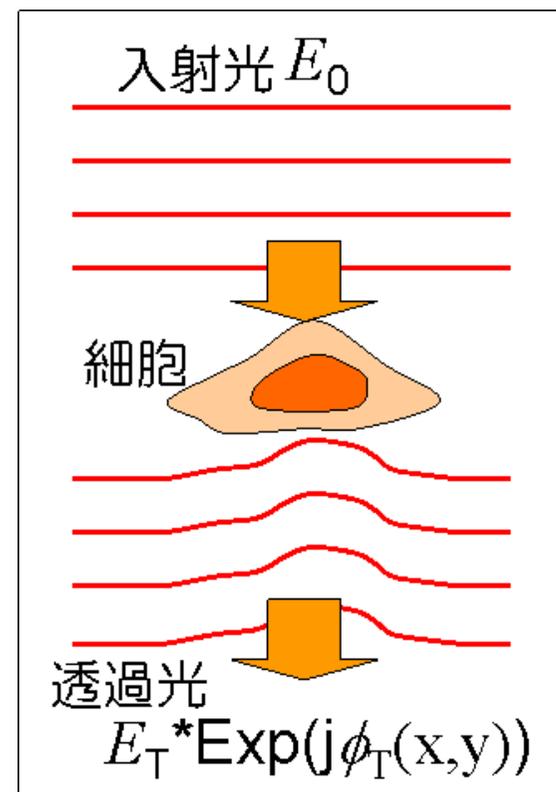
共焦点顕微鏡の光学系概略

http://bioimaging.jp/learn/023/index_2.html

定量位相差顕微鏡@浜ホト



デュアル光コムを導入

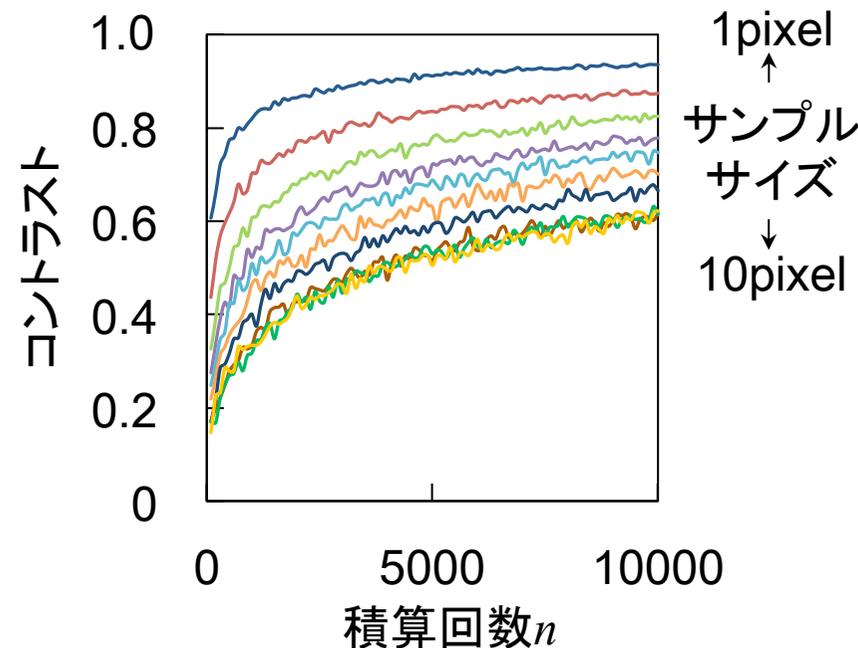
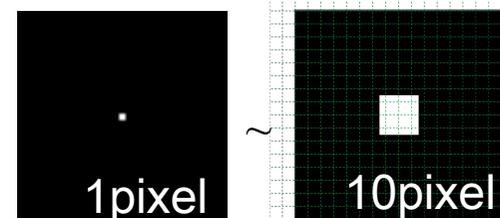
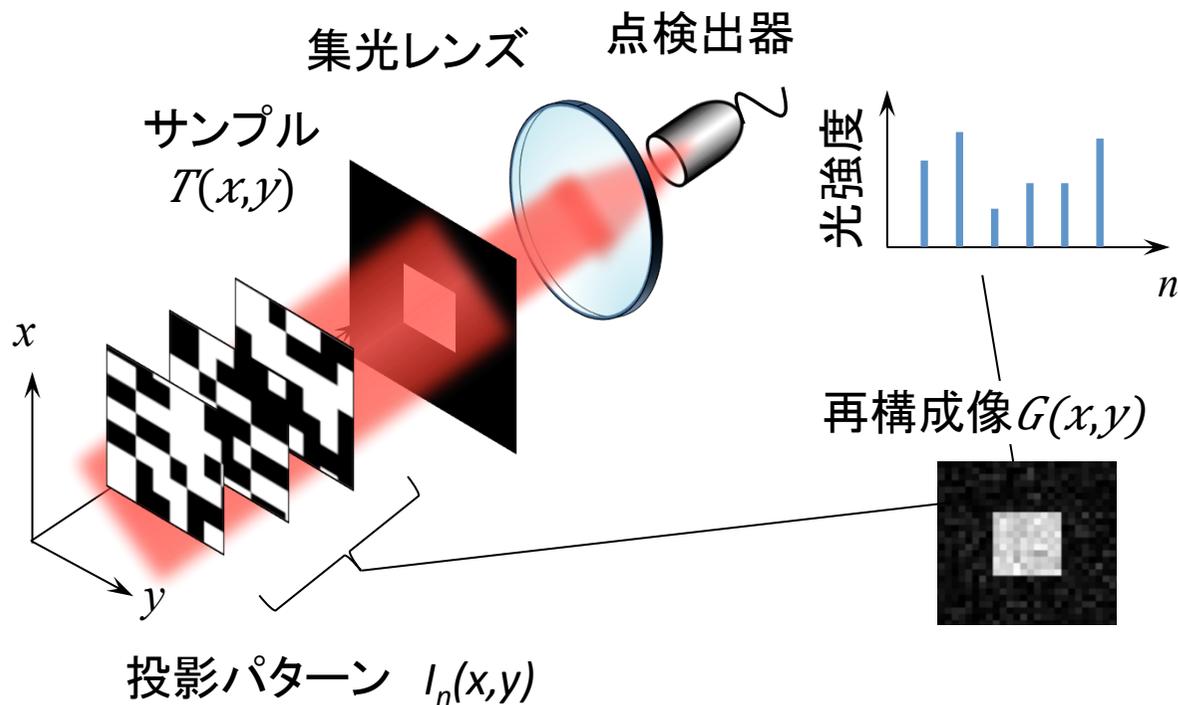


- マルチチャンネルの分光ホログラフィーを取得@画像コム.
- スキャンレス・フルフィールド共焦点顕微鏡との併用
 - ☞ ホログラフィーと共焦点機能の融合による
高分解能3次元化

ゴーストイメージング

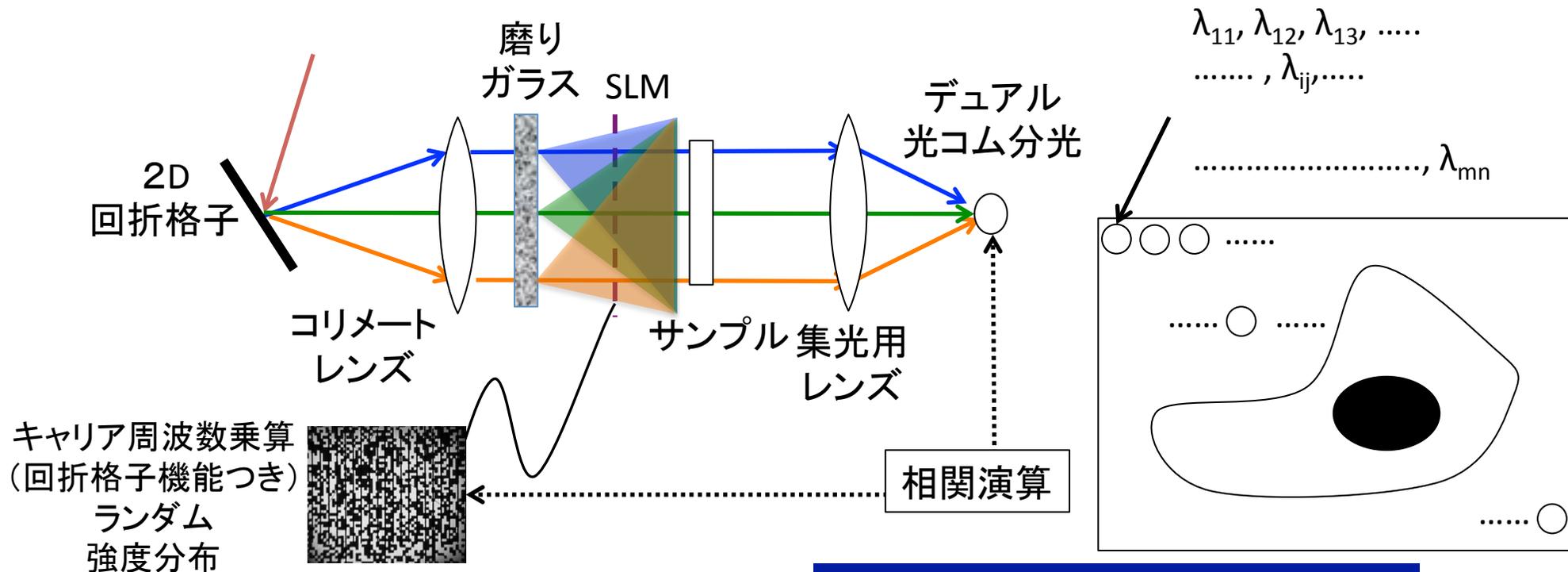
光強度相関による
点検出イメージング法

Pittman, Phys. Rev. A. 52, 3429-3432, (1995).



- ・点から2次元情報を再構成
- ・非走査型の簡便な光学系
- ・信号積算が必要

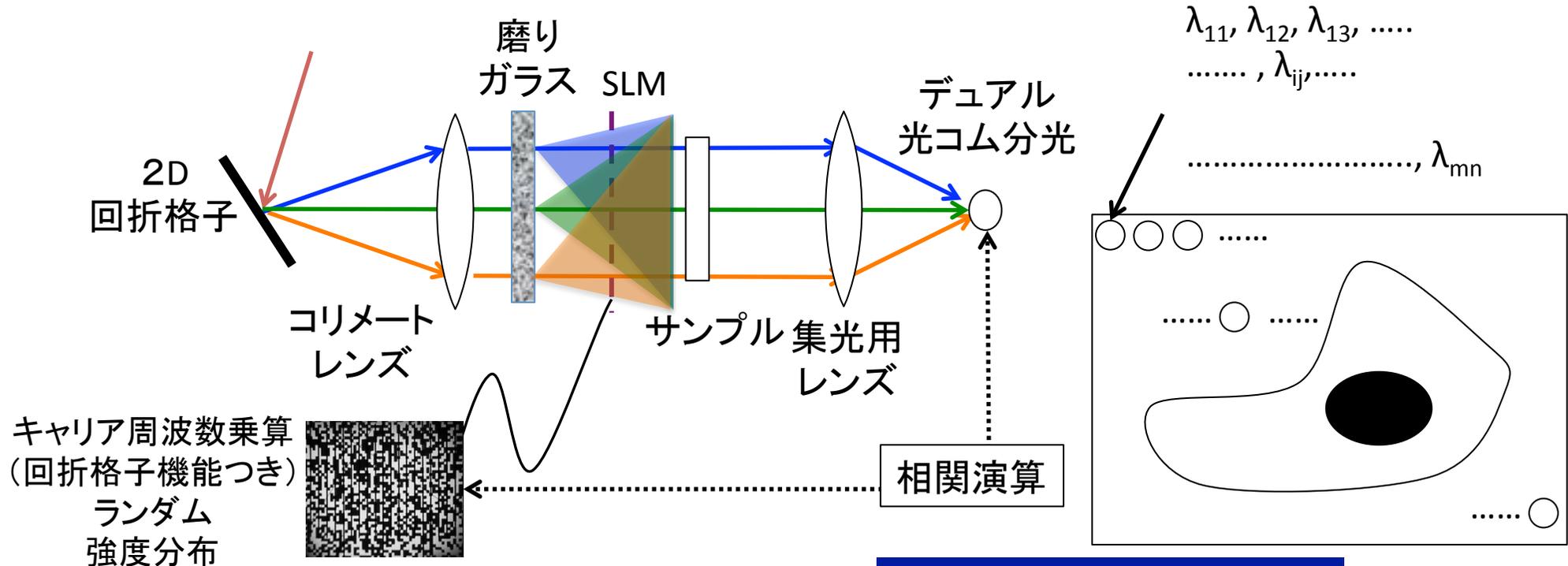
シングルショット・ゴーストイメージング



信号積算-波長変換

各波長を2次元平面上にマッピング
 2次元グリッド状に並んだ各波長光を、磨りガラスで個々に発散
 SLMを用いて、キャリア周波数を付与することで、回折による波長依存性のあるランダム強度分布
 コムモード数に等しい分光画像情報が重畳した光を、デュアル光コムで分光
 各コムモード成分毎に相関演算
 単色光を用いた繰り返し計測(従来法)の役割を、各コムモードで代用することにより(コムモード数分の繰り返し計測に相当)、シングルショットのゴーストイメージングを実現

超解像ゴーストイメージング



空間-波長変換

各波長を2次元平面上にマッピング

2次元グリッド状に並んだ各波長光を、磨りガラスで個々に発散

SLMを用いて、キャリア周波数を付与することで、回折による波長依存性のあるランダム強度分布

コムモード数に等しい分光画像情報が重畳した光を、デュアル光コムで分光

各コムモード成分毎に相関演算

繰り返し計測

波長別ゴーストイメージングを再構成(デコンボリューション)することで解像力を向上



研究計画

		2013	2014	2015	2016	2017	2018
①THzコム 計測	<u>計測の高度化</u>	→					
	<u>応用計測展開</u>			→			
②新奇光コム計測	<u>計測の開拓</u>		→				
	<u>応用計測展開</u>				→		

まとめ

①THzコム計測の高度化と応用計測展開

★計測手法はそれなりに成熟

★機械工学のBKGを活かした実用展開

②新奇光コム計測の開拓と応用計測展開

➤色々と新しいことが出来そう

➤しかしスピード勝負になりそう？

➤現状は低ジッターなデュアル光コム分光装置を構築中

👉産総研の協力をお願いします