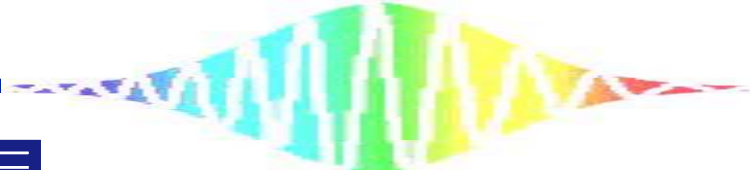


18p-E17-15

# デュアルTHzコムを用いたCW-THz波 のリアルタイム絶対周波数計測

○林建太<sup>1)</sup>, 稲場肇<sup>2,3)</sup>, 美濃島薫<sup>3,4)</sup>, 安井武史<sup>1,3)</sup>

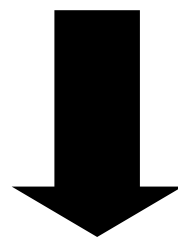
- 1) 徳島大学, 2) 産業技術総合研究所  
3) JST-ERATO, 4) 電気通信大学



# 研究背景

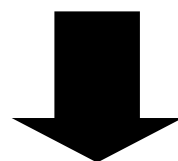
周波数は電磁波の基本的な物理量である

THz無線通信等の  
様々なTHzのアプリが確立



実用的なCW-THz 光源  
(THz-QCL, UTC-PDなど)  
の発達

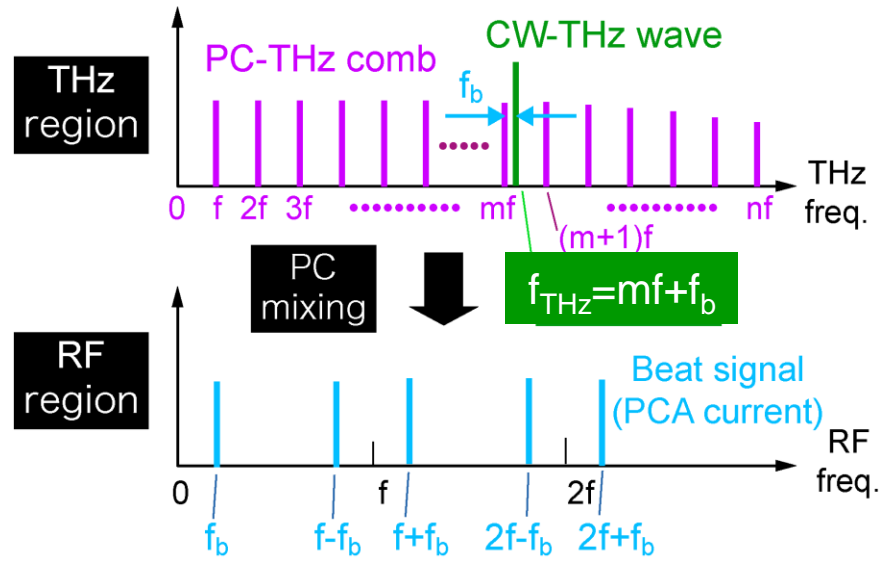
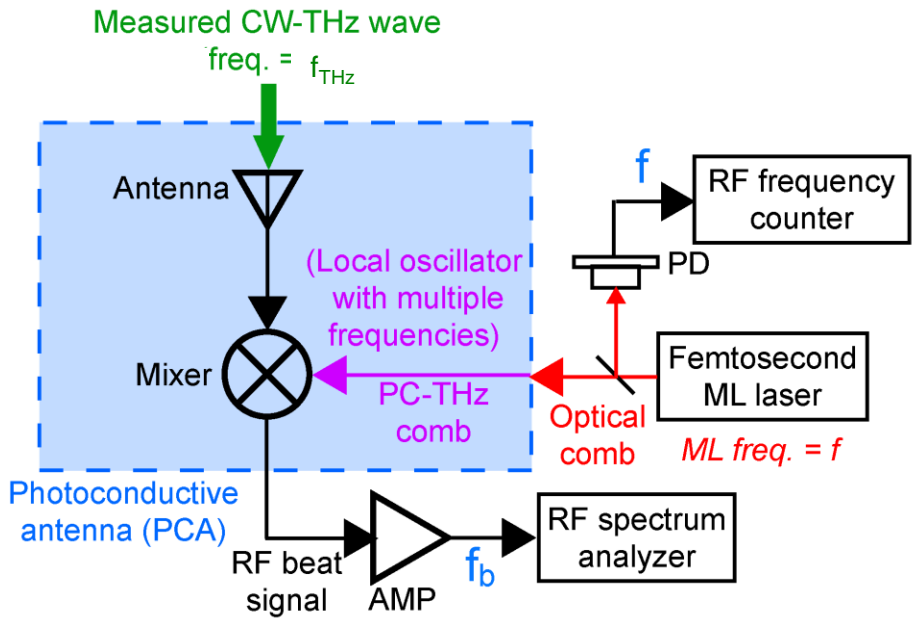
高精度なCW-THz波の周波数計測が  
必要になる!



しかしながら、CW-THz波の絶対周波数計測は  
十分に確立していない!

# 光伝導ミキシング法を用いた THzコム参照型スペクトラム・アナライザ

Freq. domain

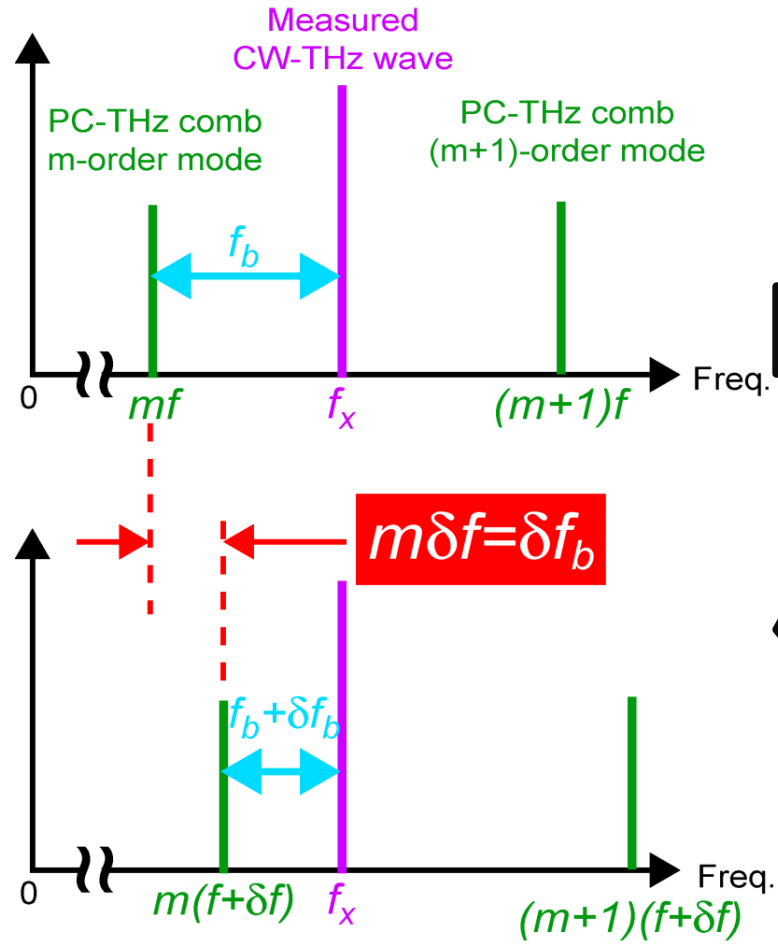


$f_{\text{THz}} = mf \pm f_b$

**m: コムの次数**  
**f: モード同期周波数**  
**f<sub>b</sub>: ビート周波数**

Ref) S. Yokoyama et al, *Opt. Express* **16**, 13052-13061 (2008).  
 T. Yasui et al. *Opt. Express* **17**, 17034-17043 (2009).

# 次数mと符号の決定方法



モード同期周波数を  $\delta f$  だけ変化 ( $f \rightarrow f + \delta f$ )

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|}$$

ビート周波数も  $\delta f_b$  変化 ( $f_b \rightarrow f_b + \delta f_b$ )

$$f_{THz} = mf_{rep1} - f_{beat1} \quad (\delta f_b / \delta f > 0)$$

$$f_{THz} = mf_{rep1} + f_{beat1} \quad (\delta f_b / \delta f < 0)$$

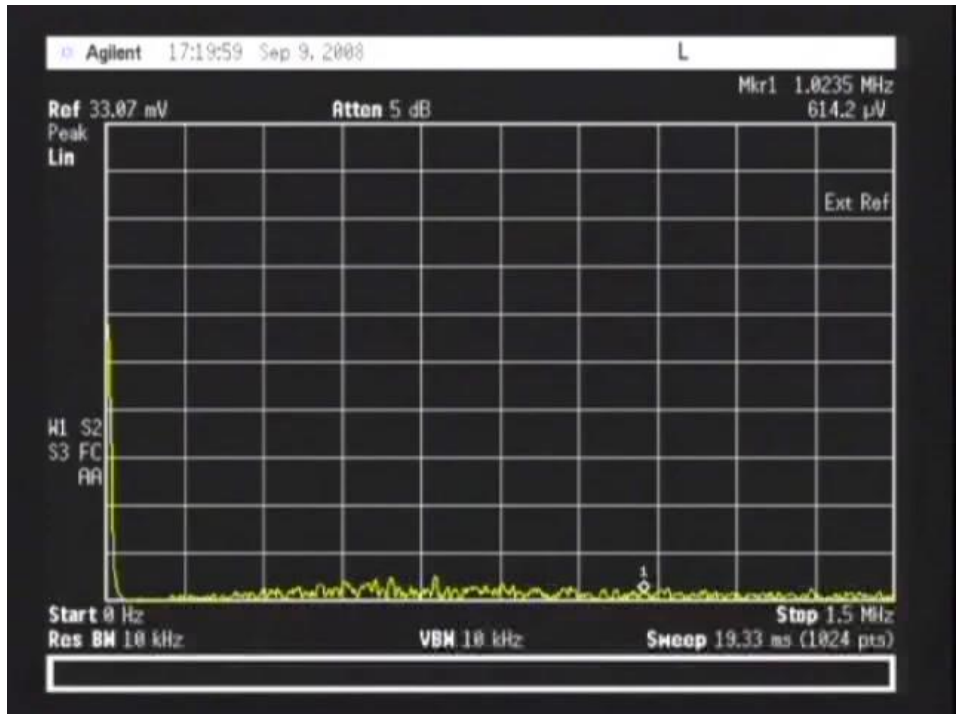
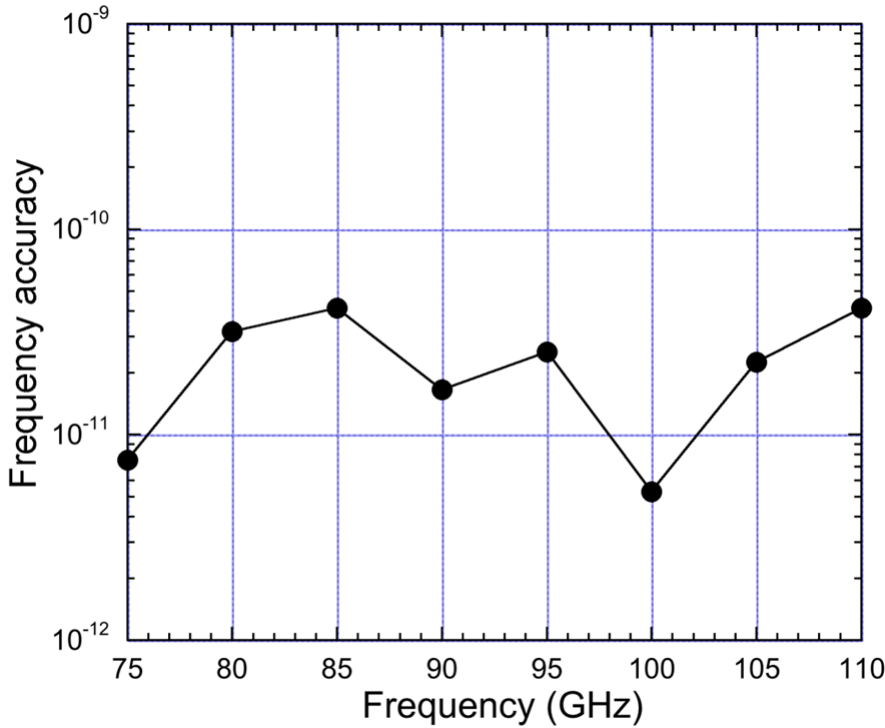


# 研究経過

Ref) T. Yasui et al. *Opt. Express* 17, 17034-17043 (2009).

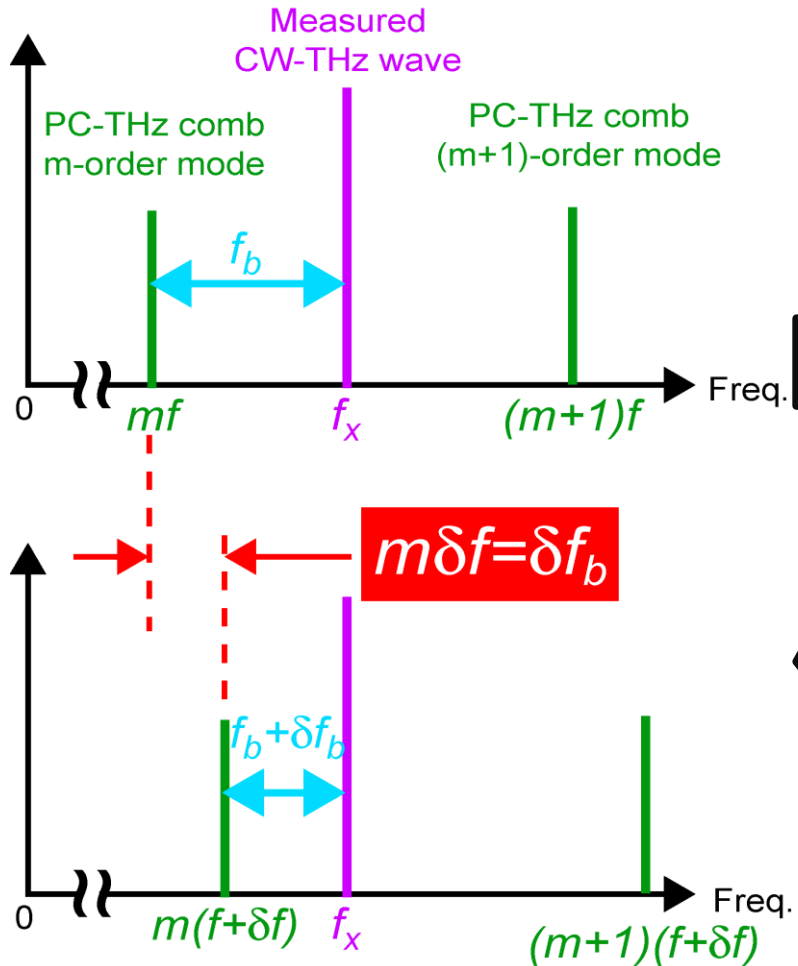
## 絶対周波数計測

## UTC-PDとのビート信号のリアルタイムモニタリング





# THzコムスペアナの問題点



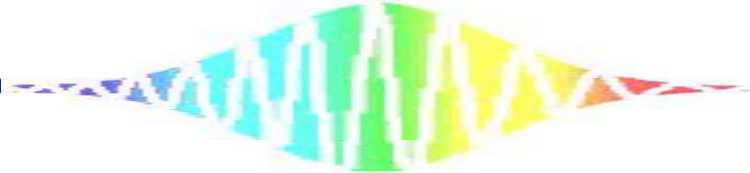
モード同期周波数を  $\delta f$  だけ変化 ( $f \rightarrow f + \delta f$ )

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|}$$

2ステップ測定

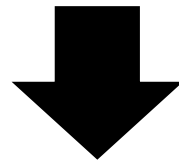
ビート周波数も  $\delta f_b$  変化 ( $f_b \rightarrow f_b + \delta f_b$ )

リアルタイムで絶対周波数を決定できない!  
(時々刻々と変化するCW-THz波は測定困難)



## 従来研究における問題点

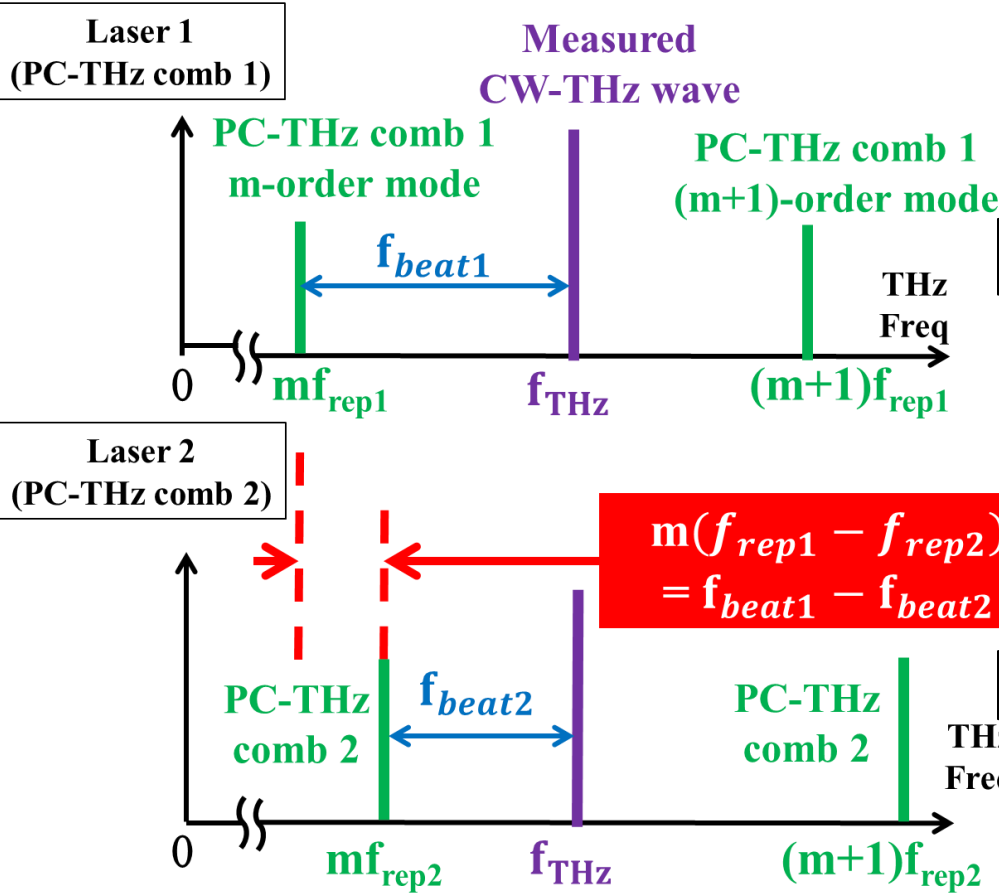
CW-THz波の絶対周波数をリアルタイムで決定出来ない！



## 今回の研究

デュアルPC-THzコムと測定時間波形のヒルベルト変換を用いることで、変動しているCW-THz波の絶対周波数をリアルタイムで決定する

# リアルタイムでの絶対周波数の決定法



デュアルPC-THzコムを用いた並列計測！

$$m = \frac{|f_{beat1} - f_{beat2}|}{|f_{rep1} - f_{rep2}|}$$

周波数カウンタで測定する場合、

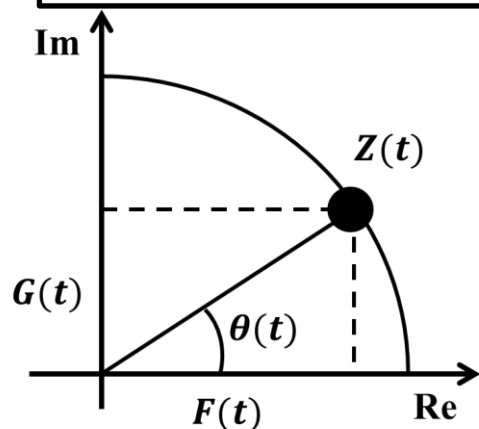
- (1)ゲート時間の制限があり速い現象が計測できない
- (2)高い信号SN比が必要



# 測定時間波形のヒルベルト変換を用いた 瞬時周波数計測

Ref) H. Füsler et al, Appl. Phys. Lett. **99**, 121111 (2011).

ヒルベルト変換とは、実領域の測定信号を複素信号に変換する操作



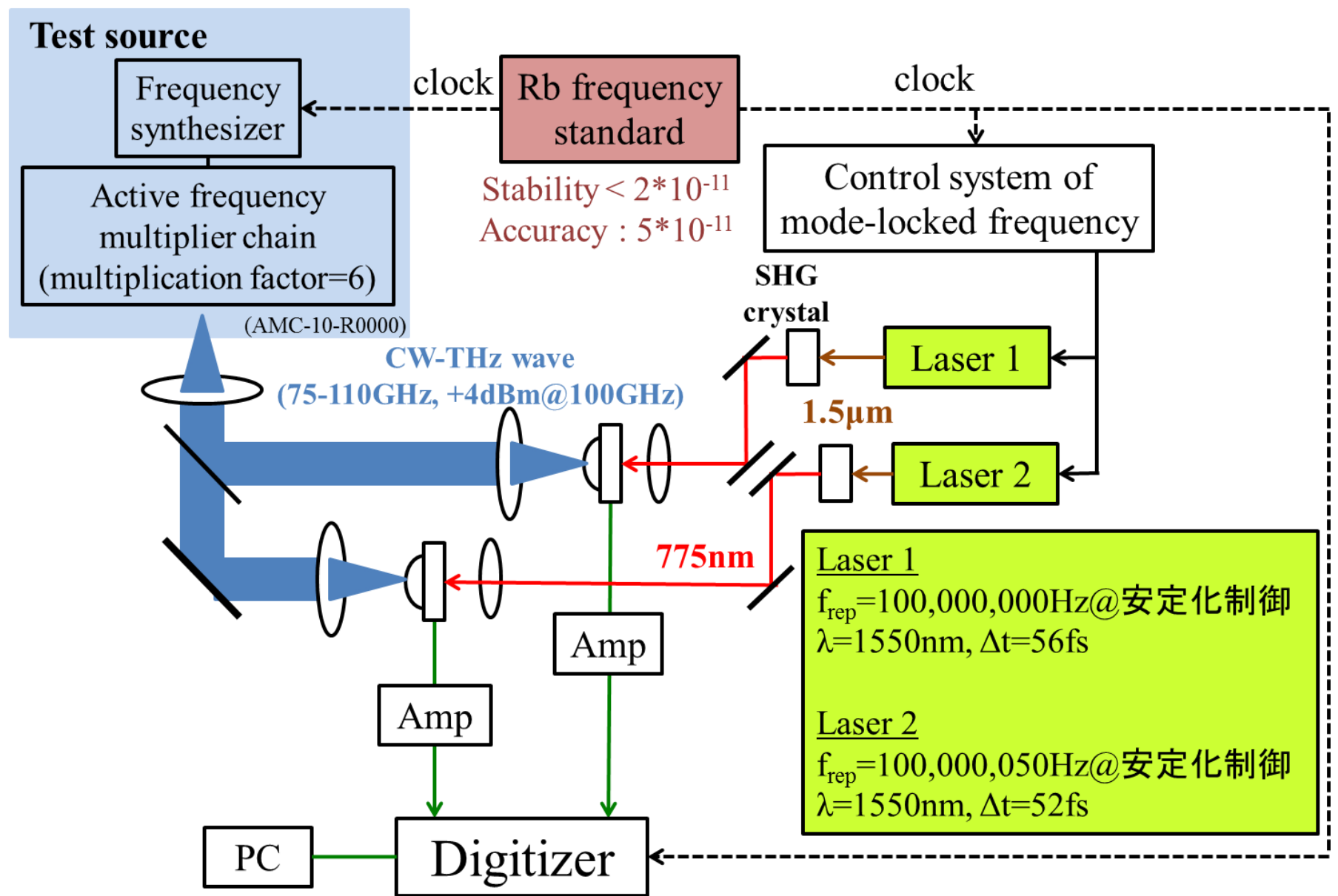
$$Z(t) = F(t) + iG(t) \text{ と表される}$$

$$\theta(t) = \arg[Z(t)] = \tan^{-1} \left[ \frac{G(t)}{F(t)} \right]$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\theta(t)}{dt}$$

これにより求まる瞬時位相を微分することで、  
 $f_{\text{beat1}}$ ,  $f_{\text{beat2}}$  の瞬時周波数を算出することが可能!

# 実験セットアップ



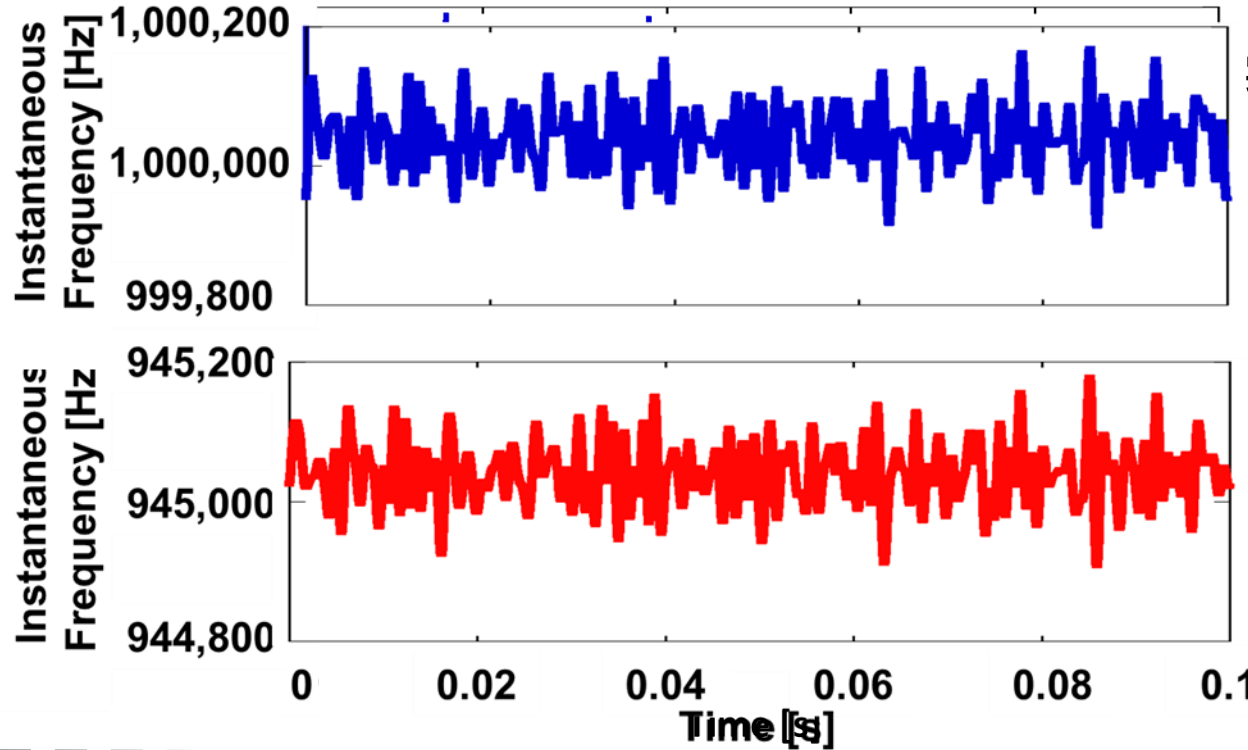


# ビート信号とCW-THz波の測定結果

$f_{beat1}$

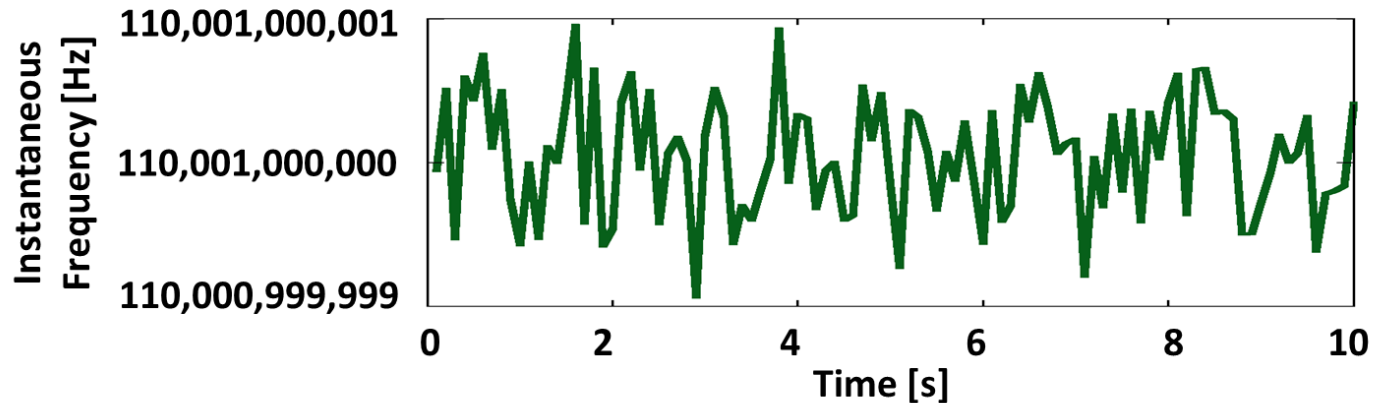
デジタイザーの  
サンプリングレート  
10MHz

$f_{beat2}$



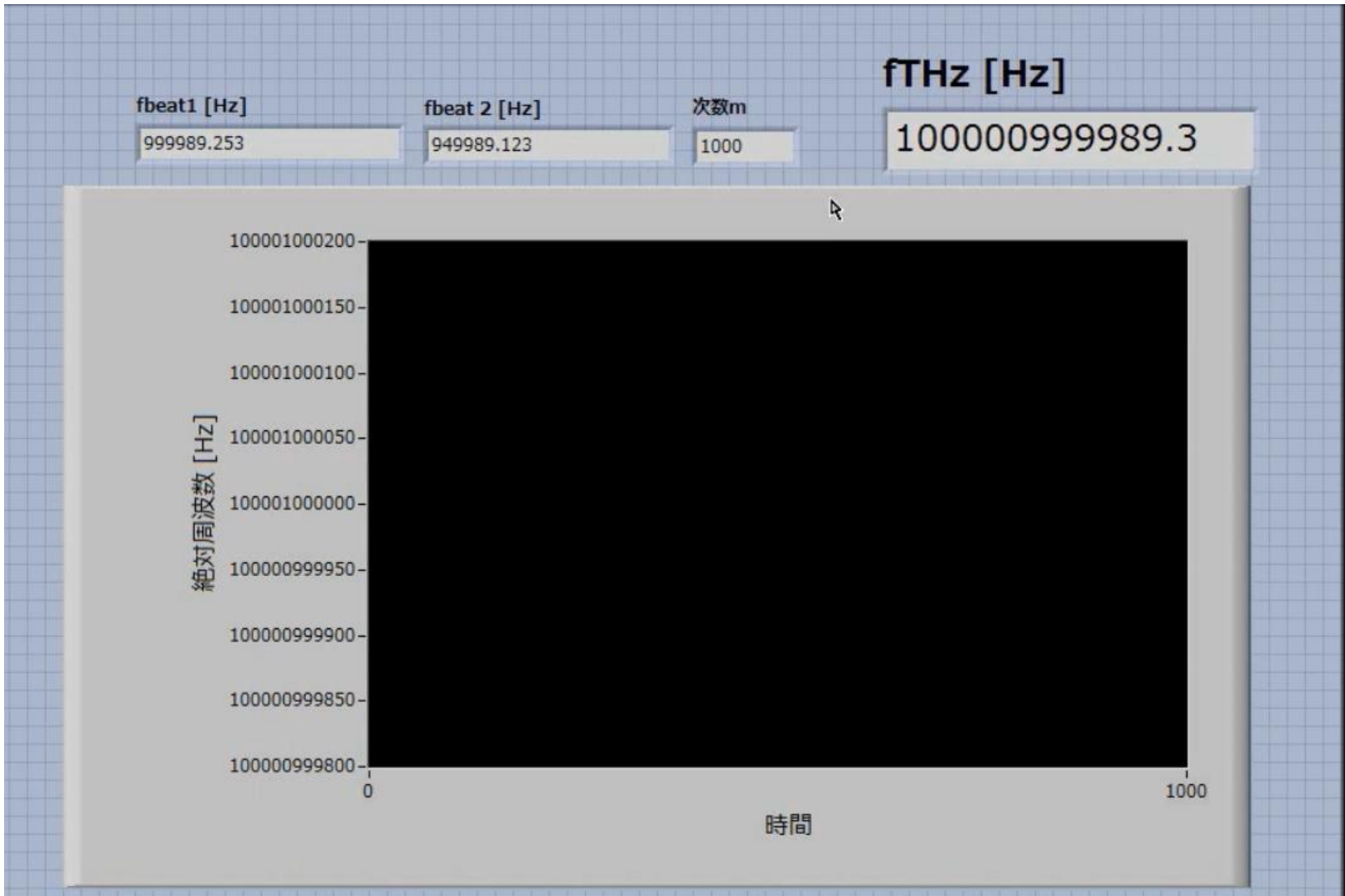
実験条件  
・ 100ms計測  
・ 積算100

$f_{THz}$



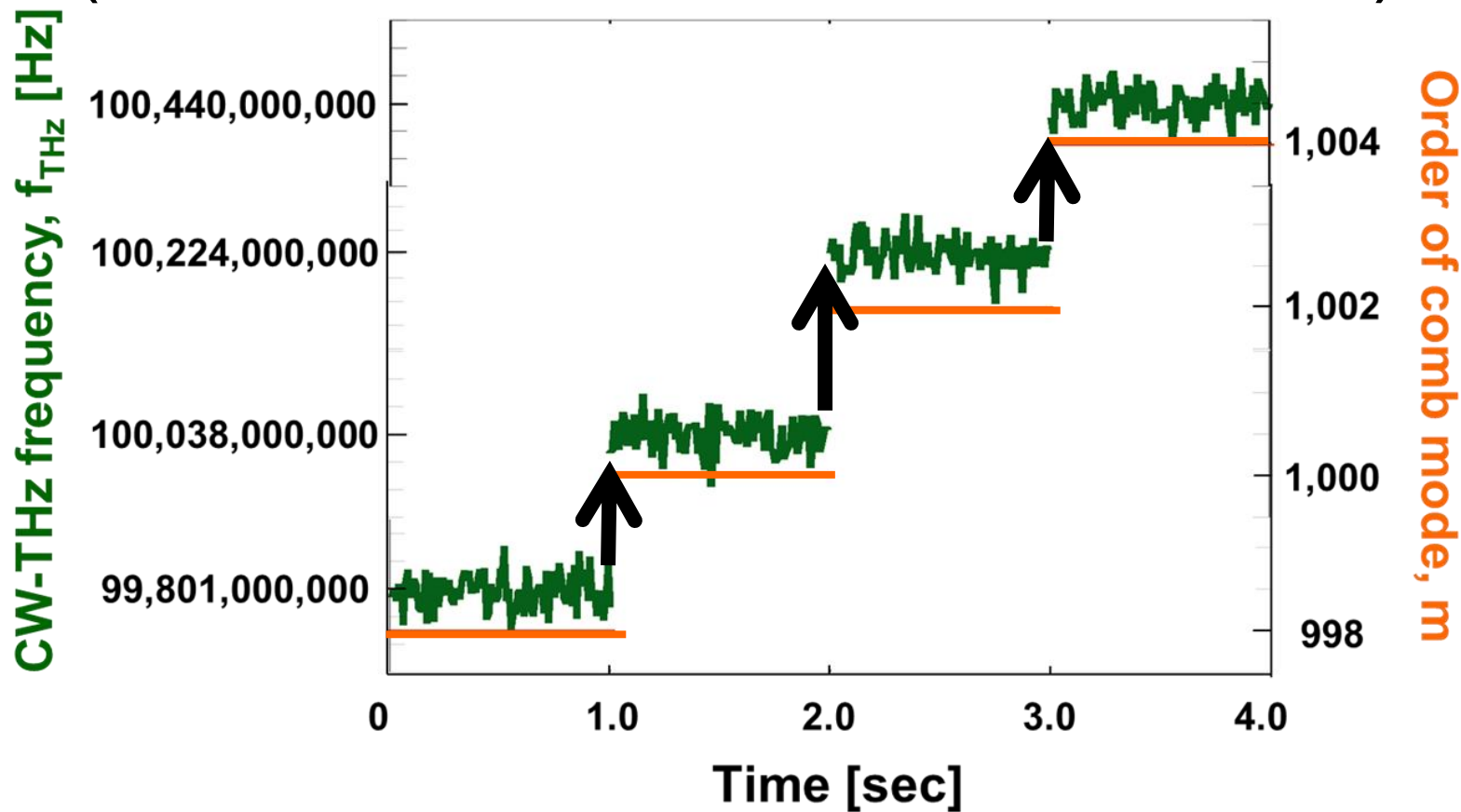
# CW-THz波のリアルタイムモニタリング①

(周波数変動 = 0.1THz ± 100Hz)



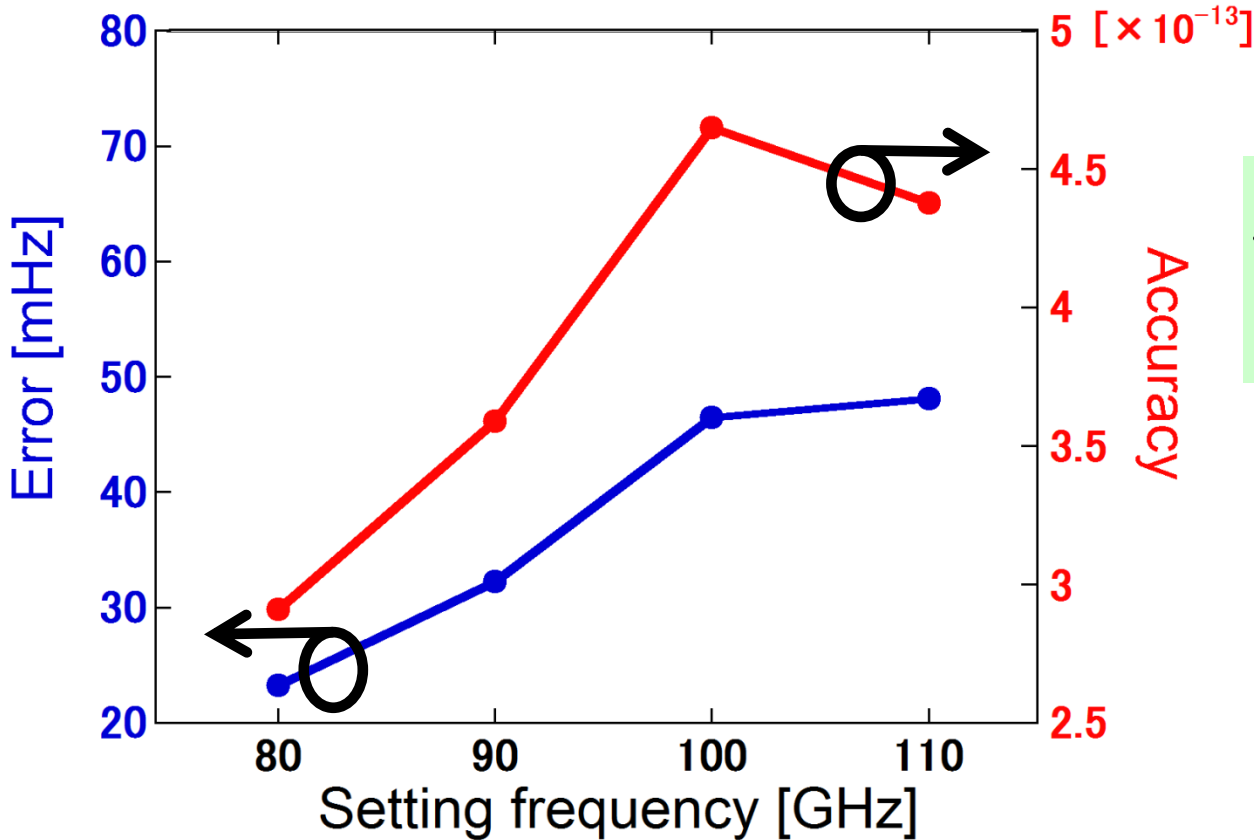
# CW-THz波のリアルタイムモニタリング②

(周波数変動 = 0.1THz + 200MHz)



コムモード次数が変わるような大きな周波数変化  
(モードホップなど)もリアルタイムで計測可能!

# 絶対周波数計測の実験精度



測定誤差の見積もり

$$f_{THz} = mf_{rep1} + f_{beat1}$$

$$Df_{THz} = mDf_{rep1} + Df_{beat1}$$

$$\Delta f_{rep1} = 120\mu\text{Hz}$$

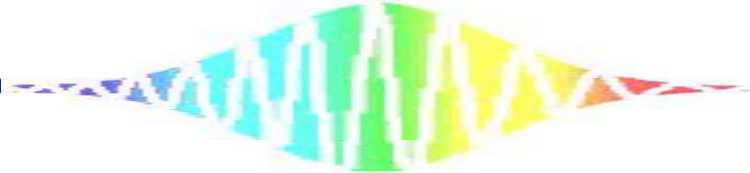
$$\Delta f_{beat1} = 21\text{mHz}$$

$$m = 800 \sim 1100$$



$$\Delta f_{THz} = 117 \sim 153\text{mHz}$$

本実験での平均精度 =  $3.9 \times 10^{-13}$

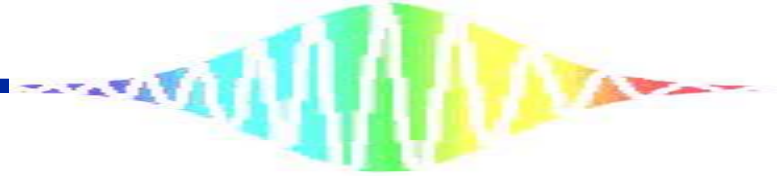


## まとめ

デュアルPC-THzコムと瞬時周波数を用いることで、**変動しているCW-THz波の絶対周波数をリアルタイムで決定した**

## 今後の予定

**一つのPC-THzコムを用いてCW-THz波の絶対周波数をリアルタイムに決定する**





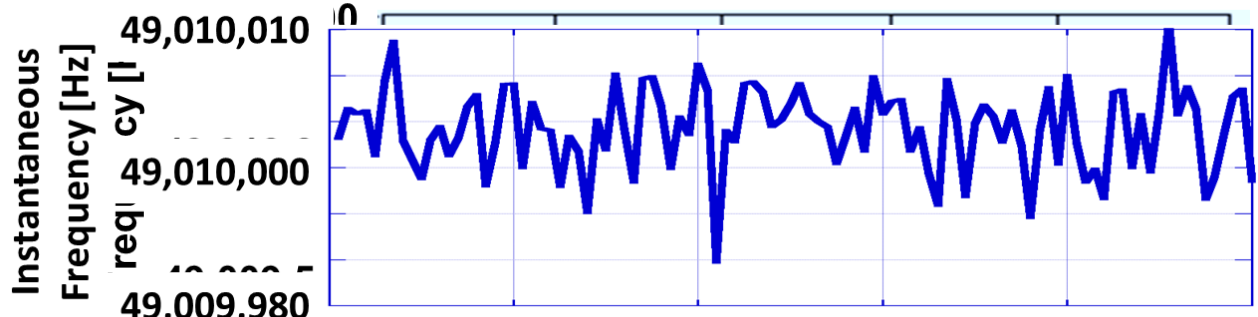


# ビート周波数とCW-THz波の測定結果

**f<sub>beat1</sub>**

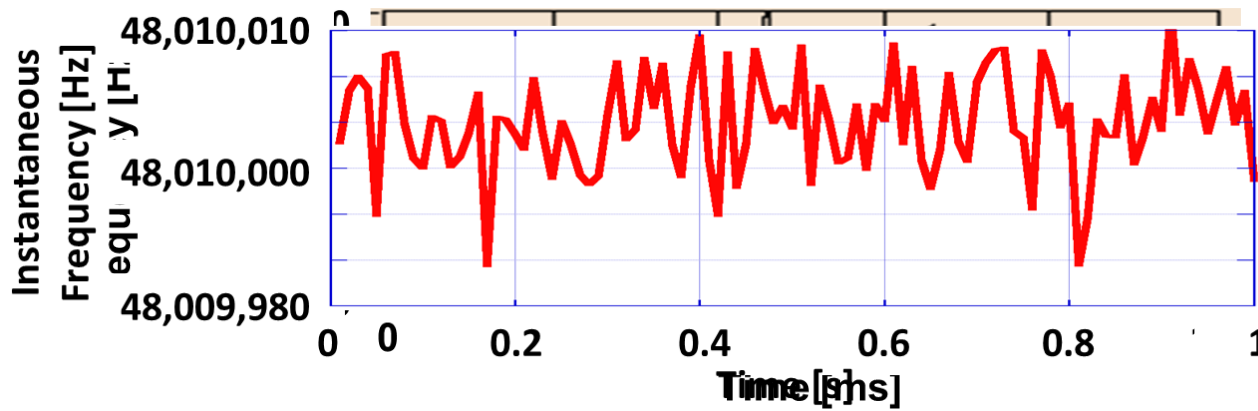
デジタルの  
サンプリングレート  
100MHz

**f<sub>beat2</sub>**

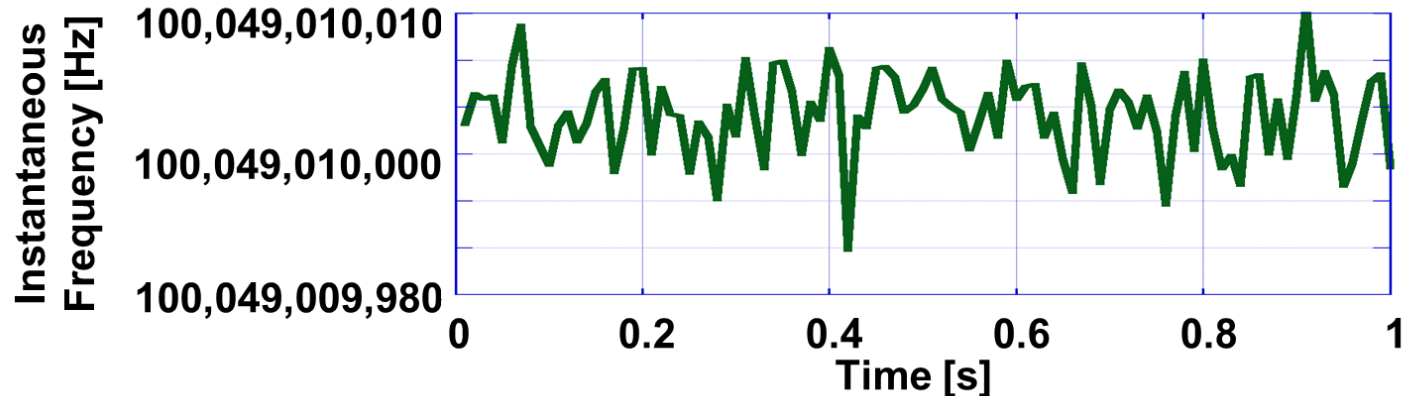


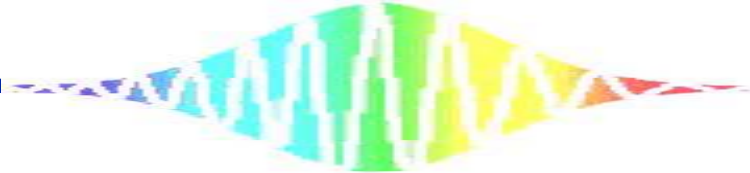
実験条件

- ・ 10ms計測
- ・ 積算100



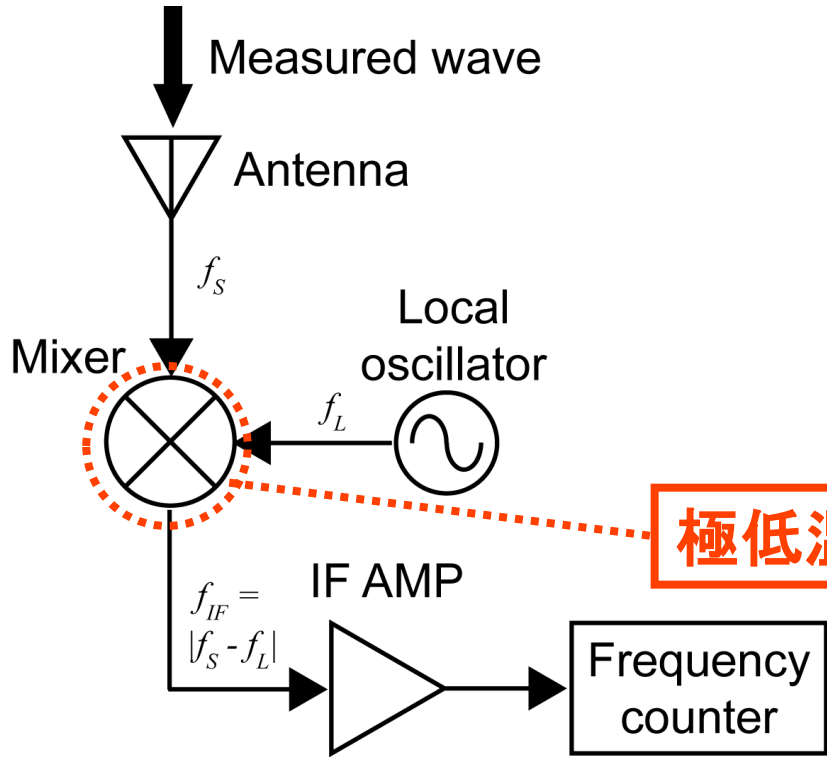
**f<sub>THz</sub>**



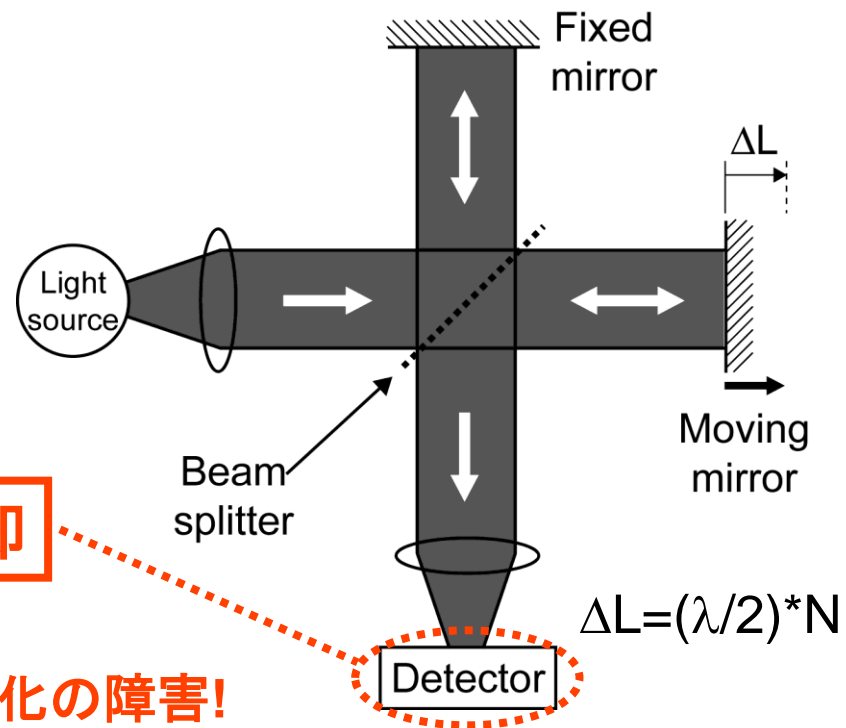


# 従来法

## 電氣的ヘテロダイン法



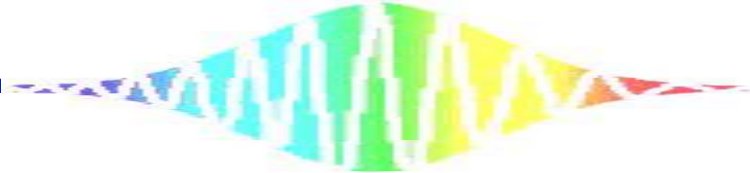
## 光學的手法 (干渉計測)



**極低温冷却**

**実用化の障害!**

テラヘルツ領域 (0.1~10THz) をカバーすることは難しい  
**→THz領域をカバーできる新しい手法が必要!**

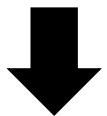


# 背景

近年、テラヘルツ (THz) 波が大容量無線通信のための新しい手段として注目

- THz無線通信など

**多数局間の混信を避ける必要がある**



**THz領域において高精度な周波数計測技術が必要**

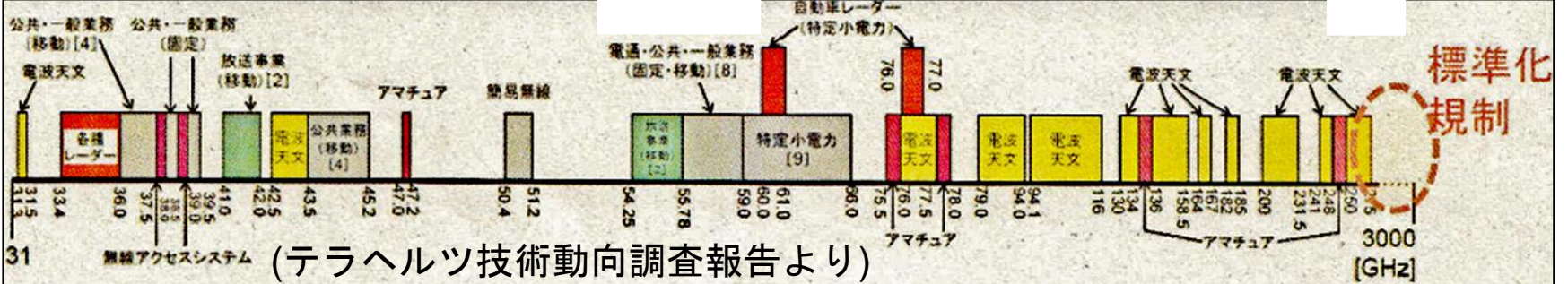
テンポラリなネットワーク



ホットスポット, レンタルDVDショップ

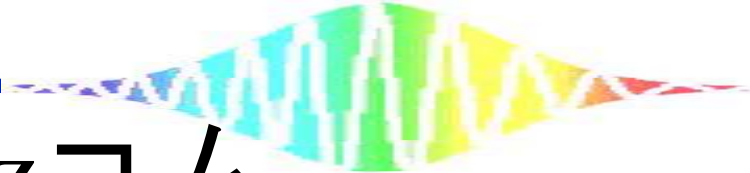


(<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/THP/pdf/oyobuturi300.pdf>より)



標準化  
規制

(テラヘルツ技術動向調査報告より)

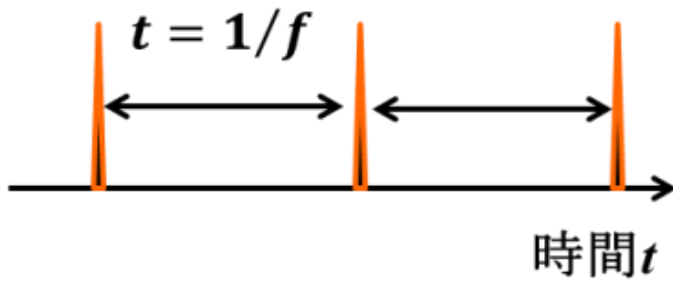


# 光コムとTHzコム

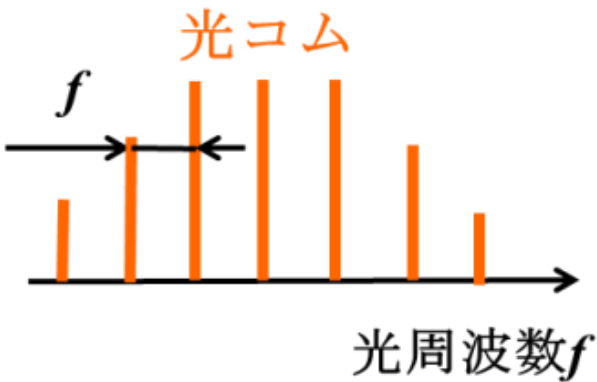
時間領域

周波数領域

モード同期超短パルス列

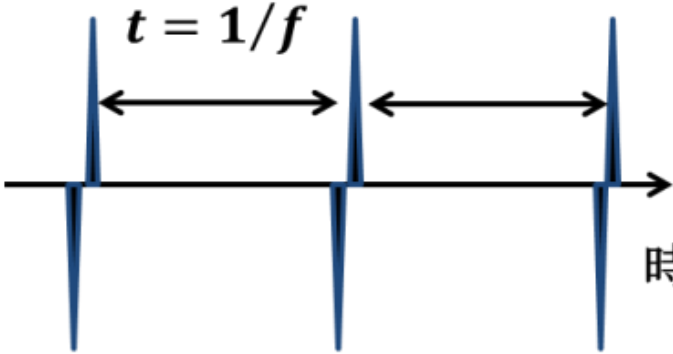


フーリエ変換

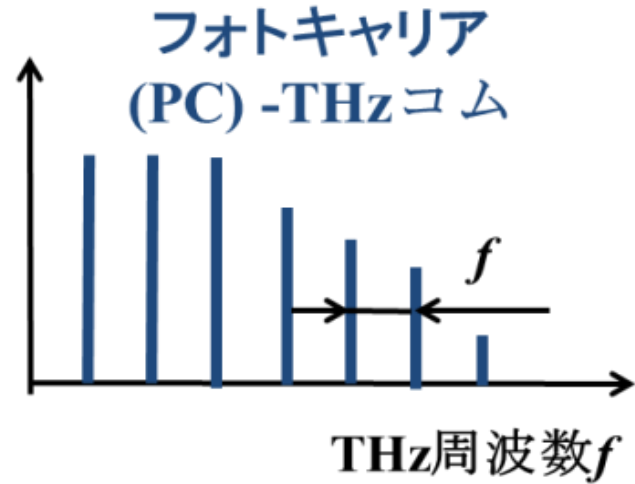


THz検出用PCAに入射すると

ピコ秒モード同期パルス列

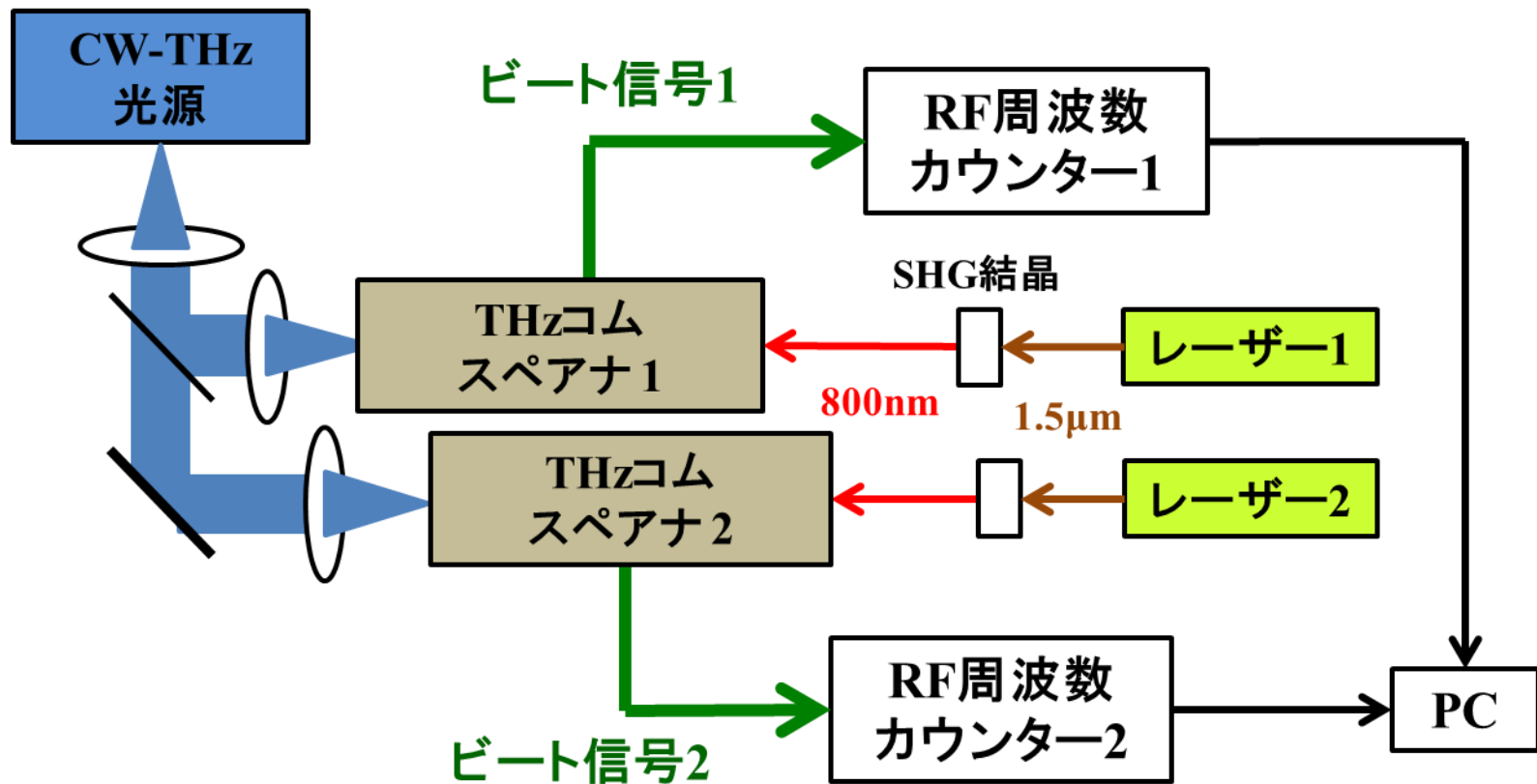


フーリエ変換

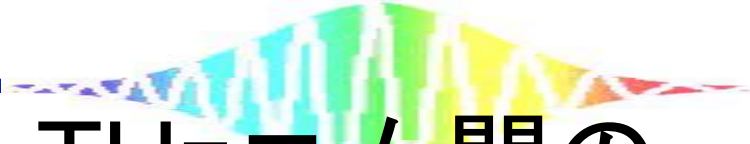


# 従来は

それぞれの $f_{\text{beat}}$ を周波数カウンターで計測  
→その値をPCに取り込み絶対周波数を取得

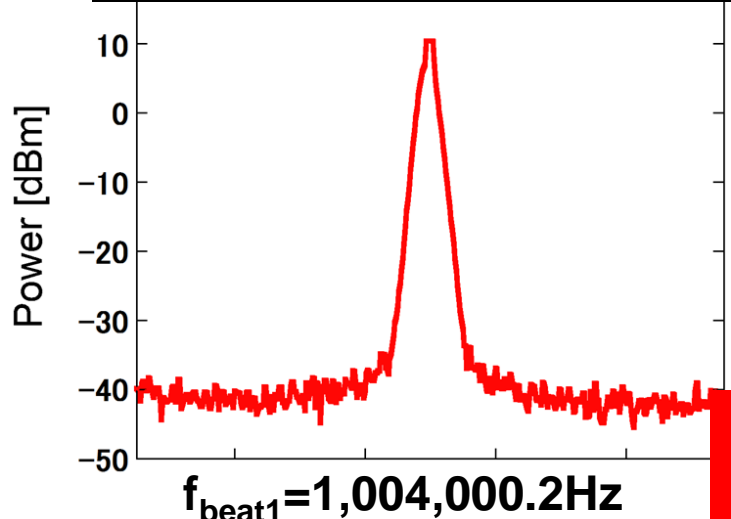


周波数カウンターを利用すると高速計測が困難

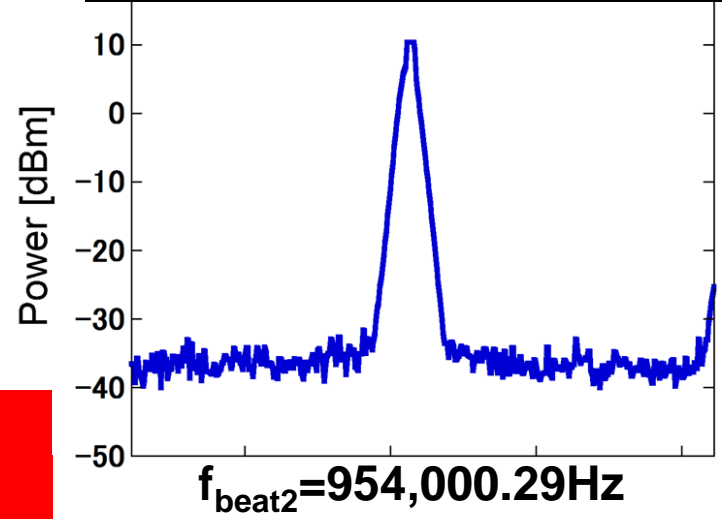


# CW-THz波と2つのPC-THzコム間のビート信号

PC-THzコム (1)  
( $f_{rep1} = 100,000,000$  Hz)  
@安定化制御



PC-THzコム (2)  
( $f_{rep2} = 100,000,050$  Hz)  
@安定化制御



**リアルタイム ↓ で決定出来る!**

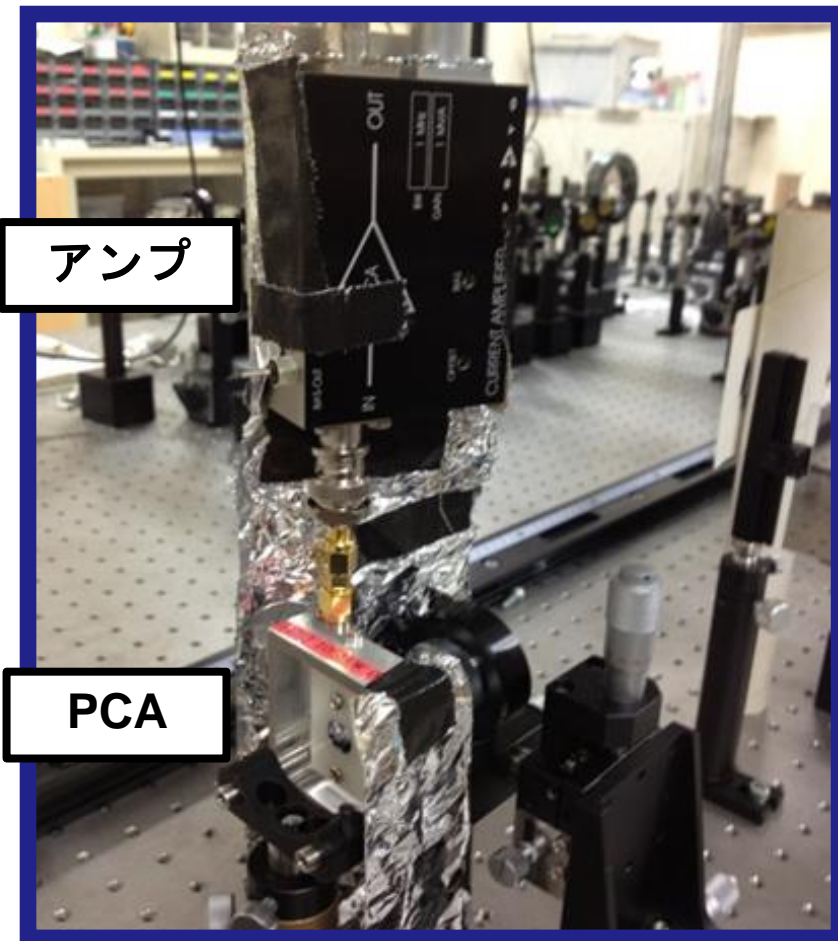
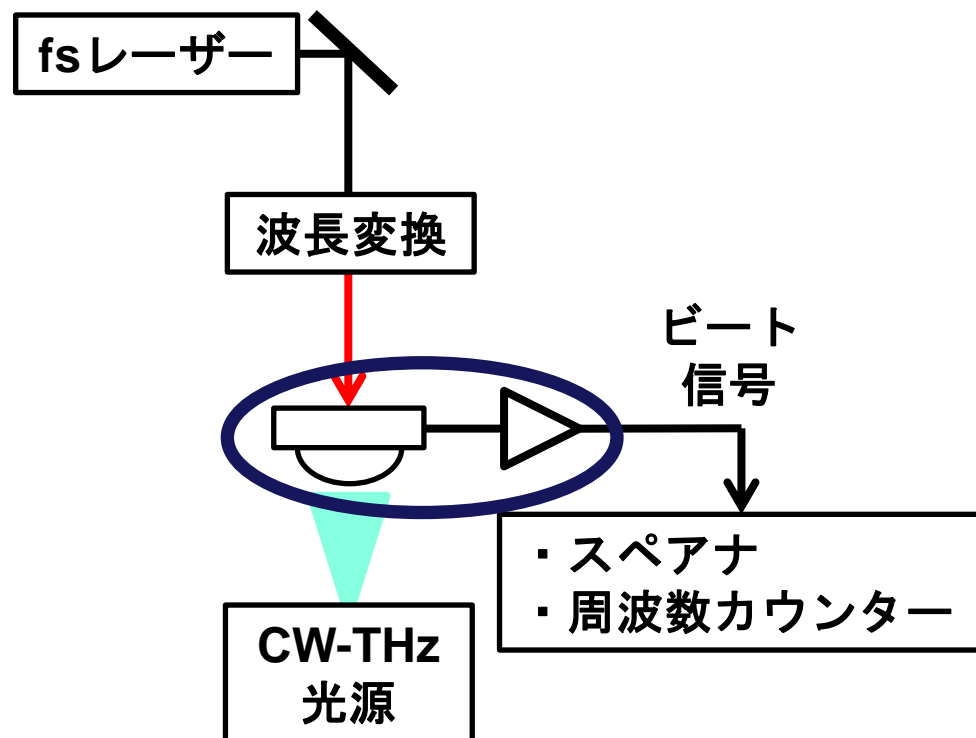
$$m = \frac{|f_{beat1} - f_{beat2}|}{|f_{rep1} - f_{rep2}|}$$

$$= \frac{|1,004,000.2 - 954,000.29|}{|100,000,000 - 100,000,050|} = 1000$$

$$f_{THz} = m f_{rep1} + f_{beat1} = 1000 * 100,000,000 + 1,004,000.2 = 100,001,004,000 \text{ Hz}$$

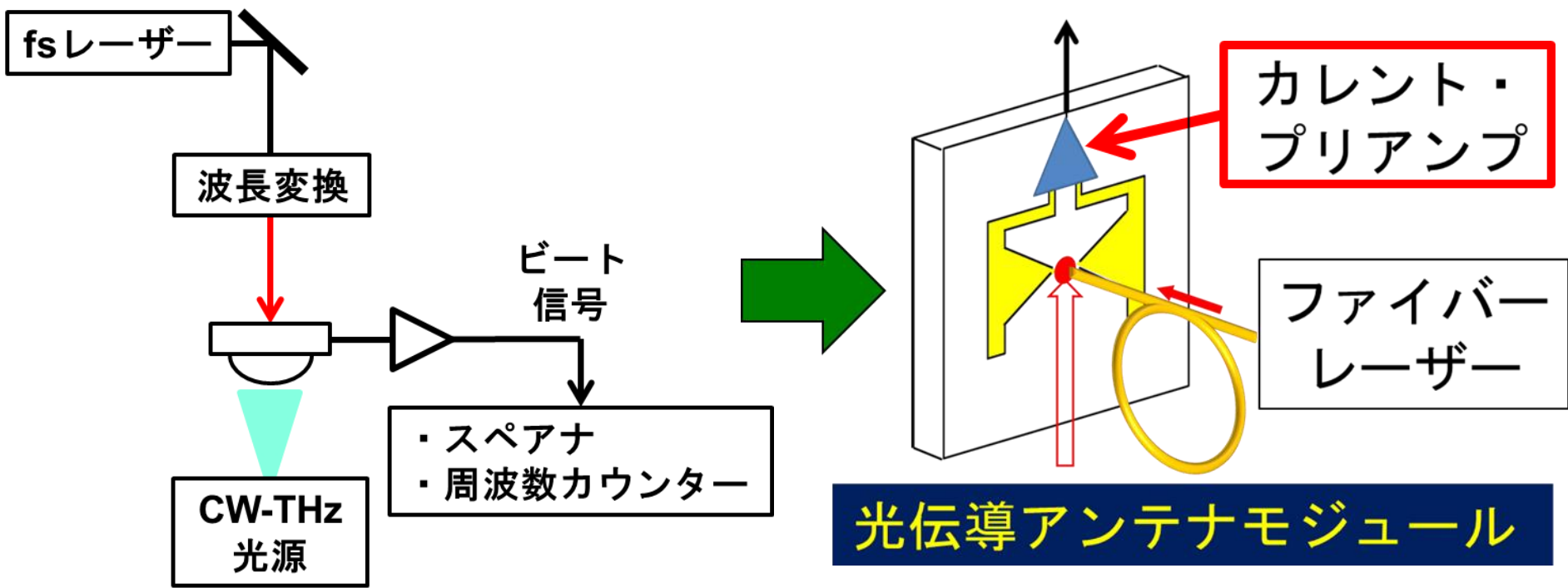


# THzコムスペアナの問題点①



測定ヘッド(PCAとカレントプリアンプ部分)  
が大型である

# 小型PCA・アンプ複合 モジュールの開発



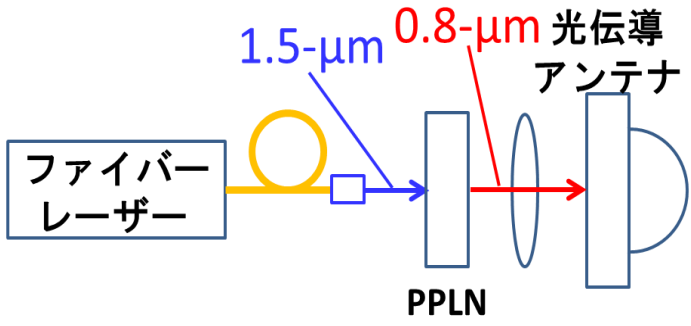
小型、フレキシブル、ロバスト、アライメントフリーといった利点が付加できる



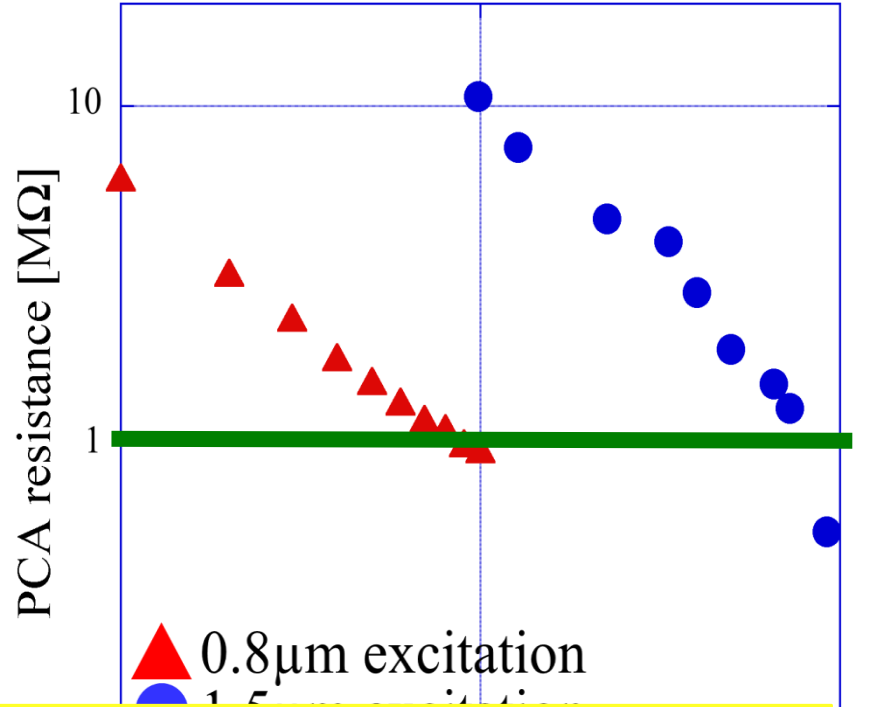
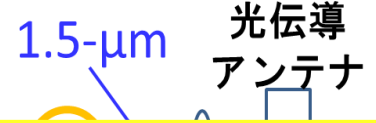
# (a) LT-GaAs-PCAへの1.5μm光 直接カップリング

PCA励起光波長による違い@パワー依存性

LT-GaAs-PCA@0.8μm光



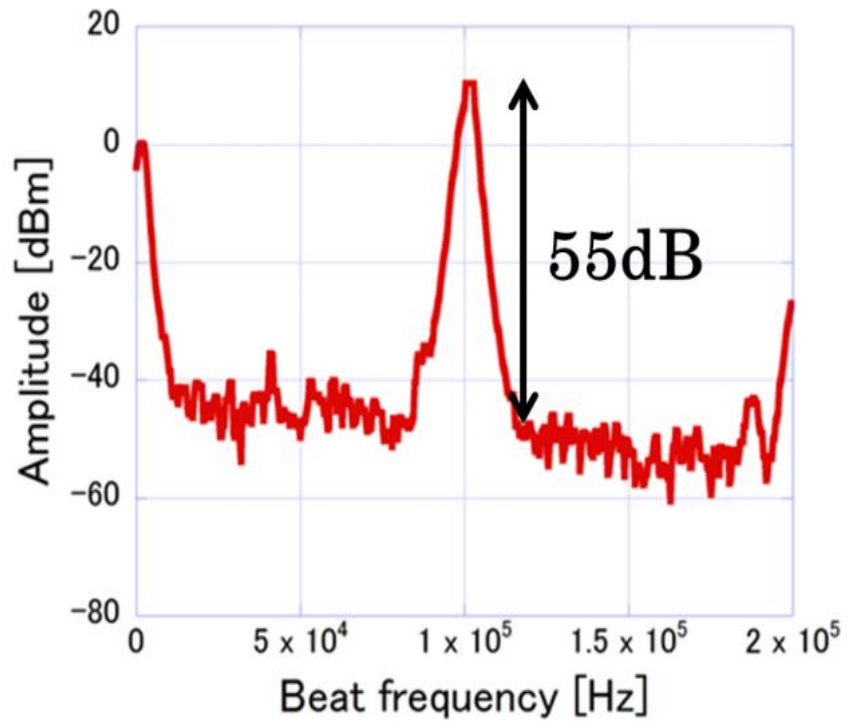
LT-GaAs-PCA@1.5μm光



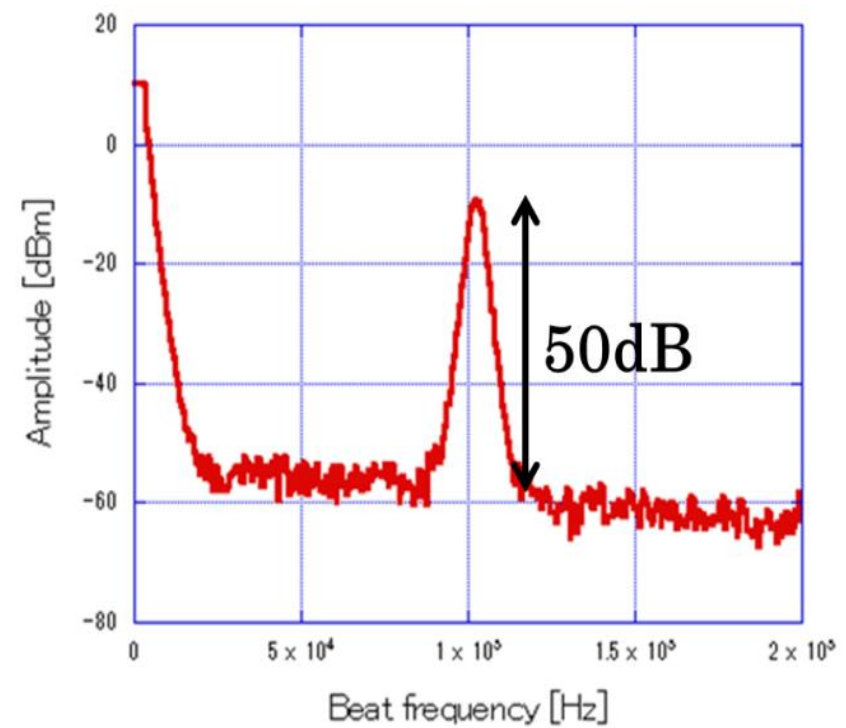
十分なパワーをしっかりと集光すれば、同数の  
フォトキャリア数を生成可能

# THzコムスペアナ信号SN比(100kHz)

0.8 $\mu$ m光  
入射パワー=14mW  
PCA抵抗値=0.65M $\Omega$



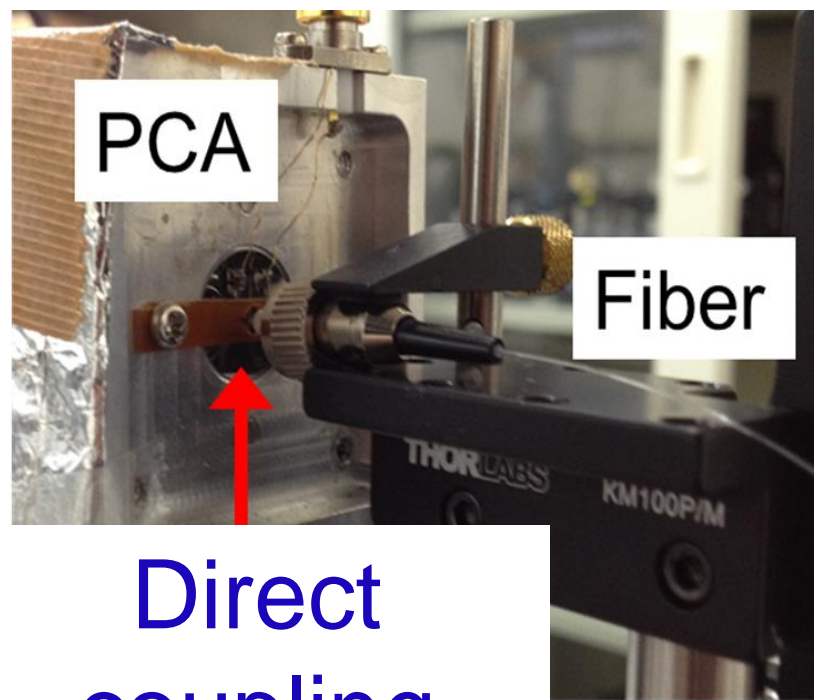
1.5 $\mu$ m光  
入射パワー=100mW  
PCA抵抗値=1.2M $\Omega$



**1.5 $\mu$ m光において0.8 $\mu$ m光と同等の検出感度を確認**

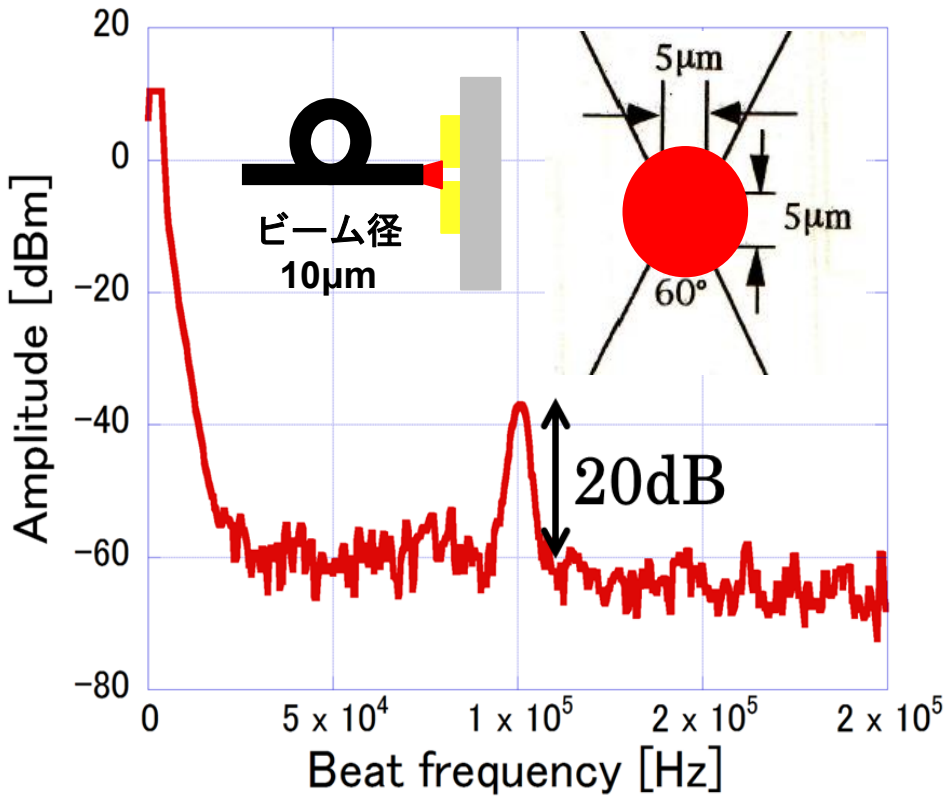
# ファイバーの直接カップリング

入射パワー=189mW  
PCA抵抗値=1.8MΩ



Direct coupling

ビート周波数=100kHz



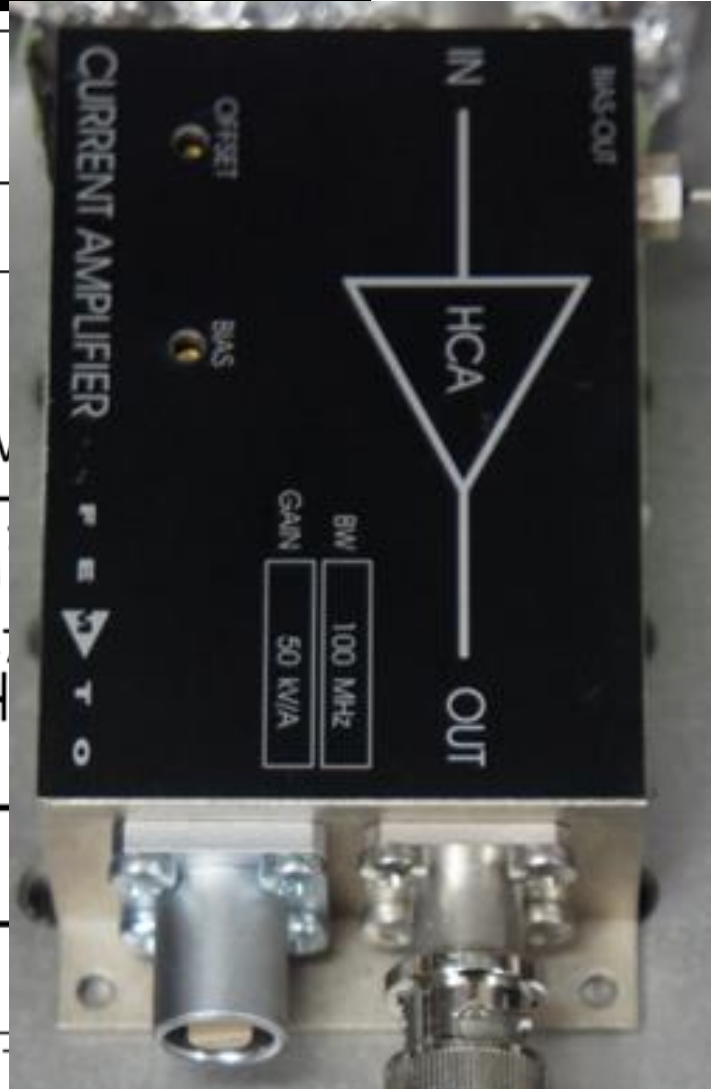
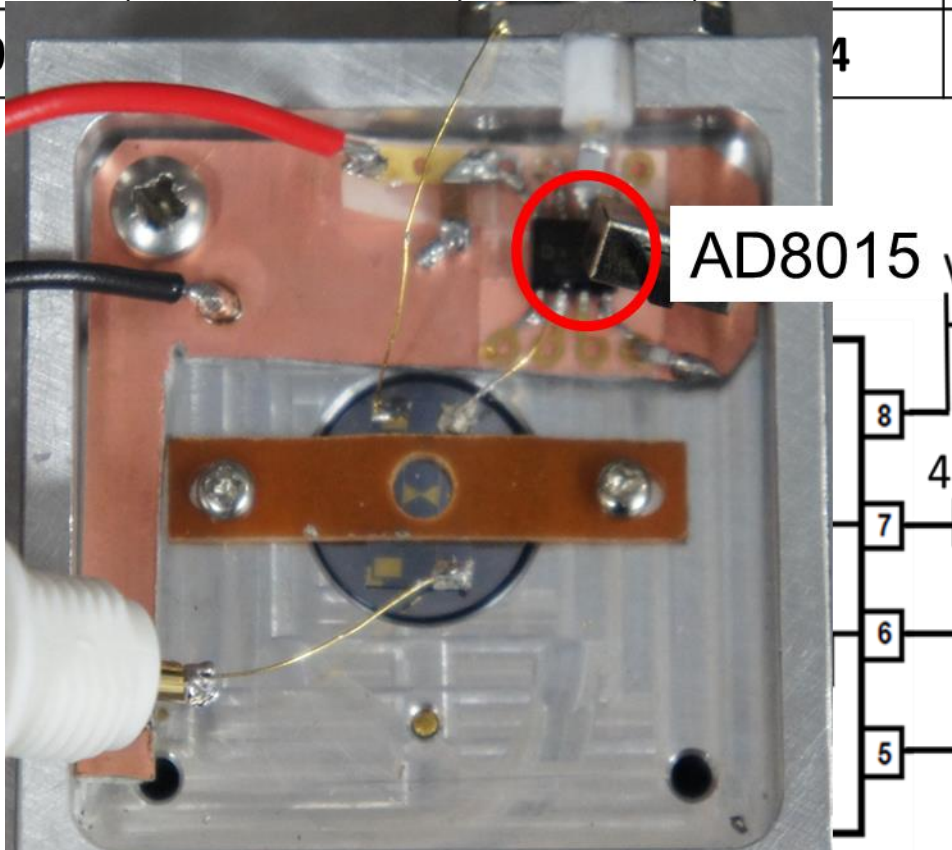
レーザー光のコリメート&集光  
アンテナ形状の最適化

レンズを用いて集光した  
場合に比べ30dB低下

# (b) PCAと高速アンプのモジュール化

## トランス・インピーダンスアンプ

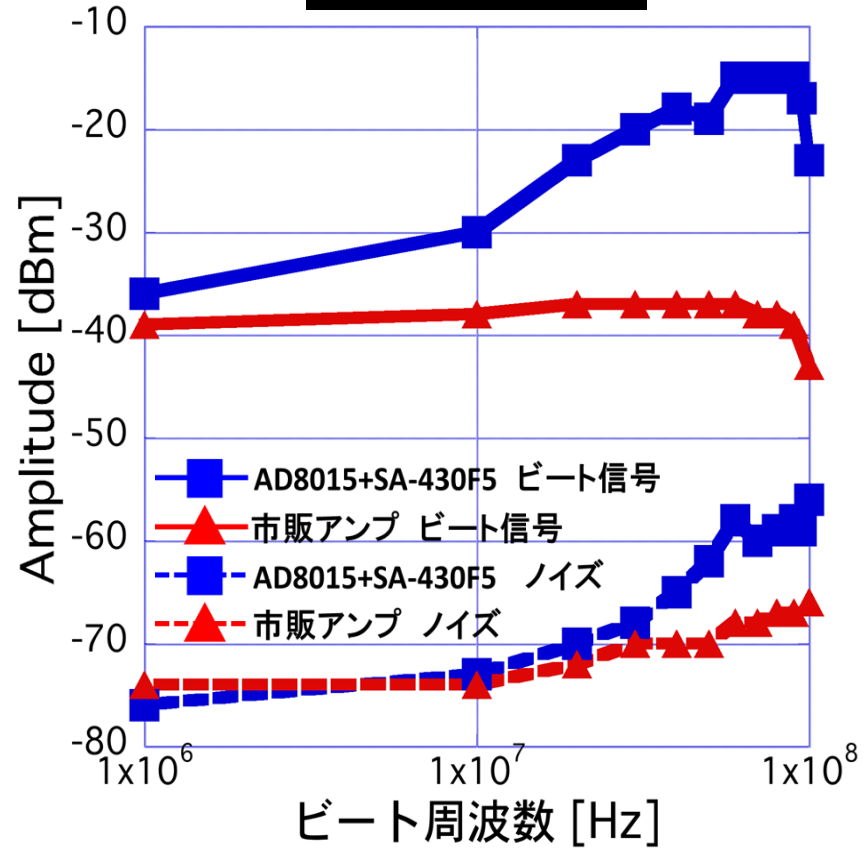
型番	ゲイン R[kΩ]	GB積 $f_u$ [MHz]	入力容量 $C_{IN}$ [pF]
AD80			4



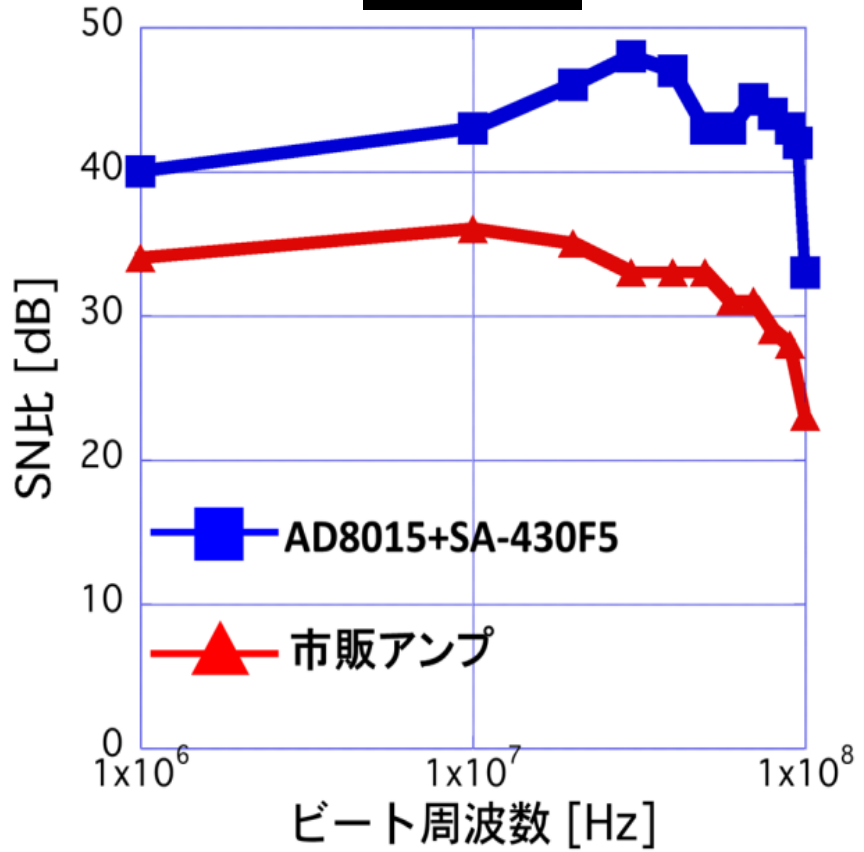


# 実験結果：信号強度とSN比

## 信号強度



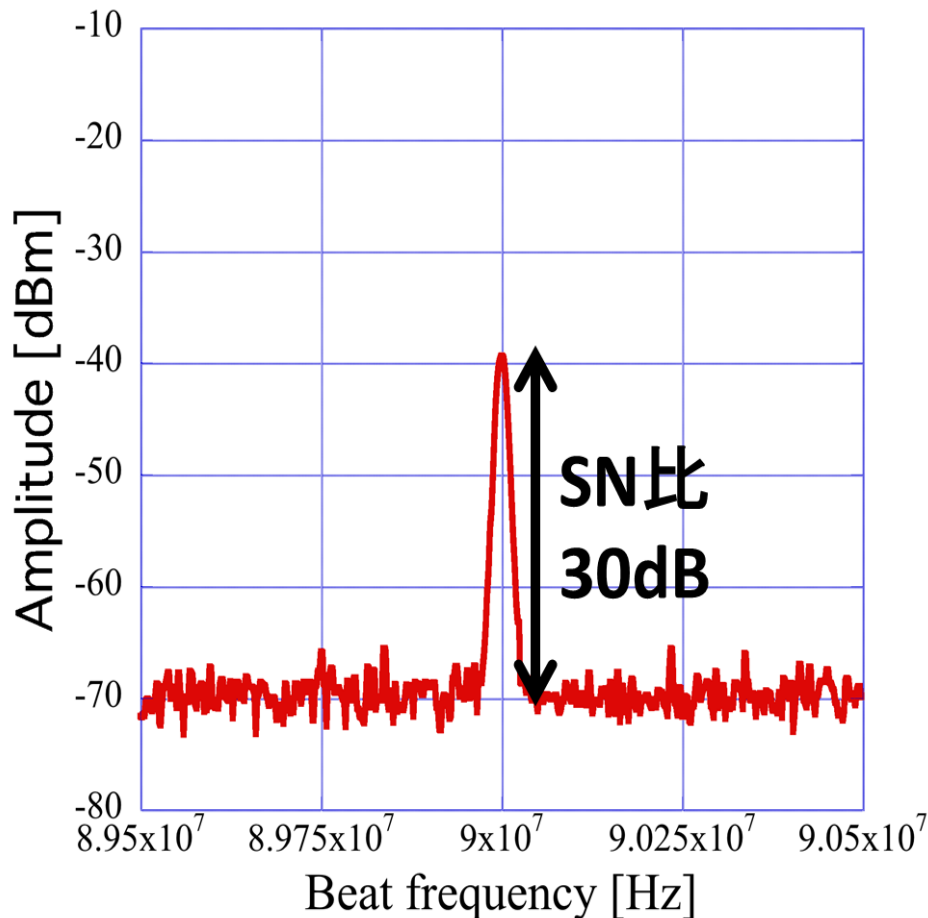
## SN比



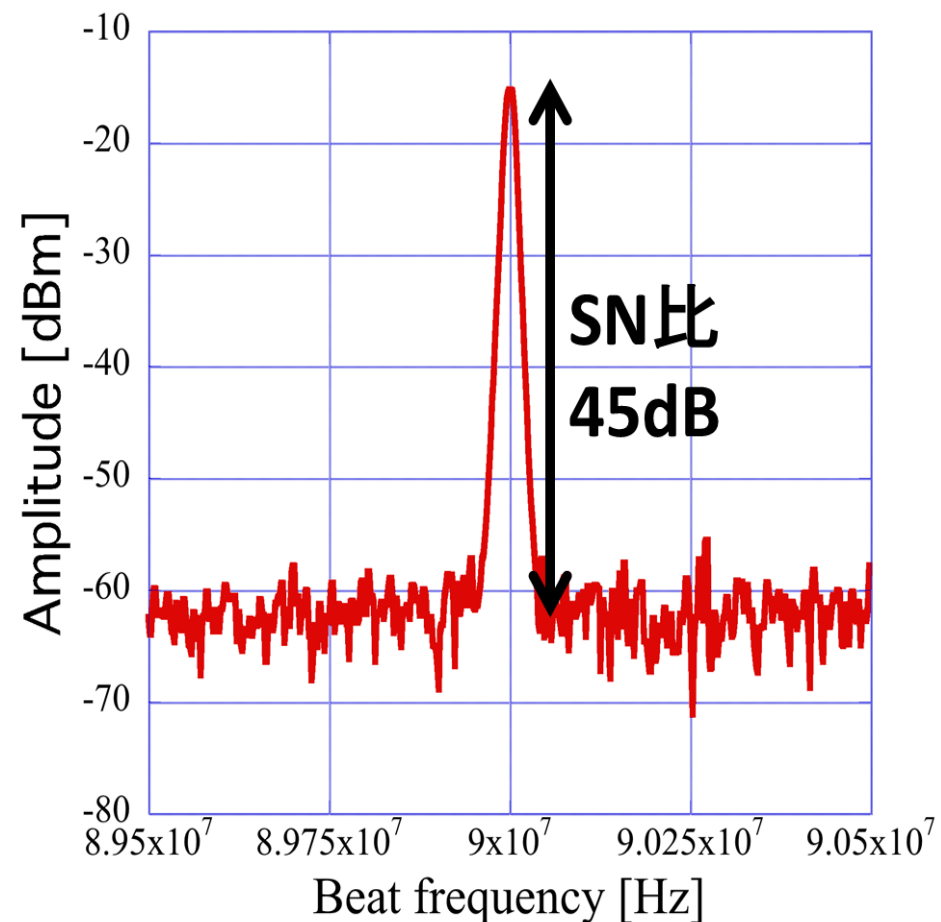
**市販品(帯域100MHz,ゲイン50kΩ)に比べ  
5~15dB検出感度を向上**

# 実験結果：ビート信号スペクトル (ビート周波数90MHz)

PCA + 市販カレント・プリアンプ



PCA・アンプ複合モジュール





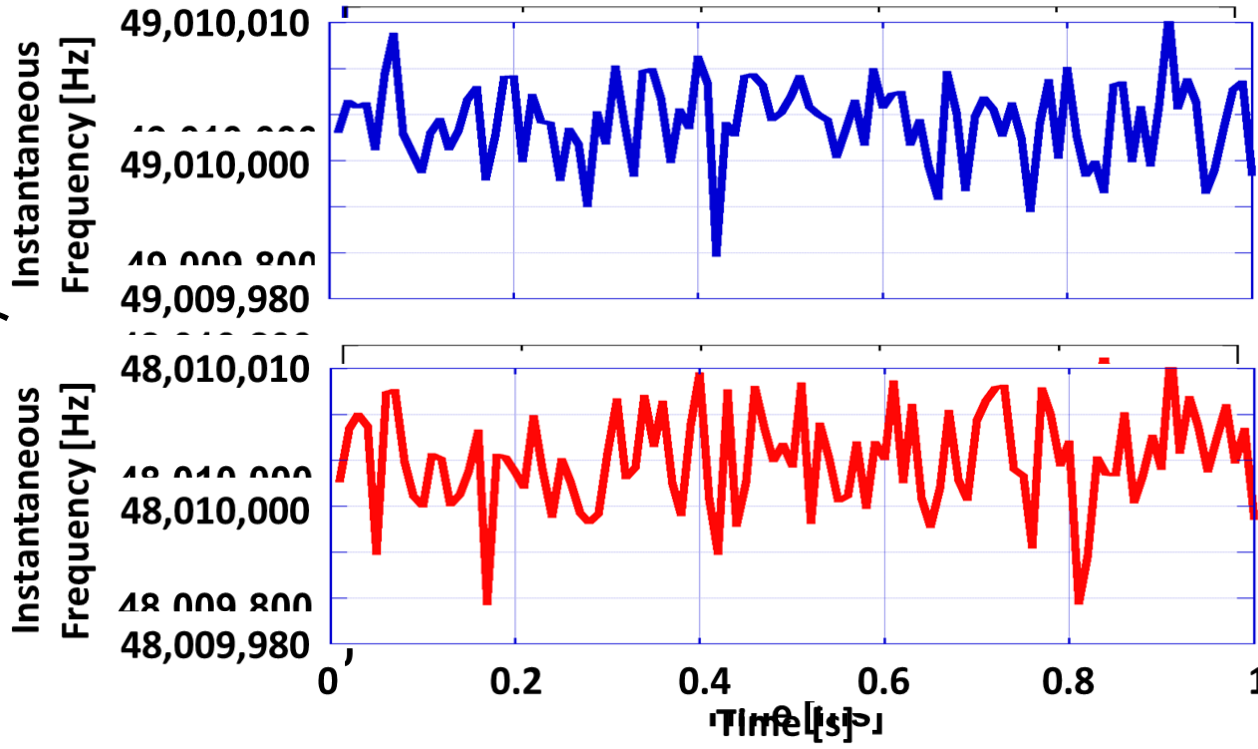


# ビート周波数とCW-THz波の測定結果

**f<sub>beat1</sub>**

デジタルの  
サンプリングレート  
100MHz

**f<sub>beat2</sub>**



実験条件

- ・ 10ms計測
- ・ 積算100

**f<sub>THz</sub>**

