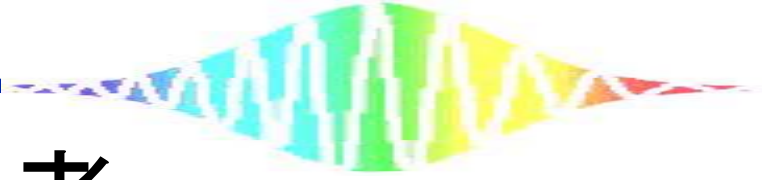


# デュアルTHzコムを用いたCW-THz波 のリアルタイム絶対周波数計測

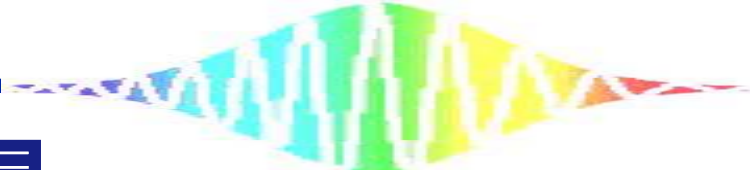
徳島大学

林 建太, 小倉 隆志, 安井 武史



# 共同研究者

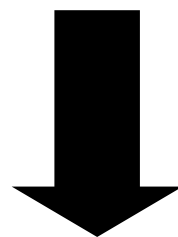
電通大 美濃島薫 教授  
産総研 稲場肇 博士



# 研究背景

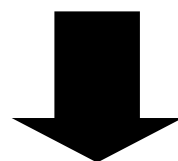
周波数は電磁波の基本的な物理量である

THz無線通信等の  
様々なTHzのアプリが確立



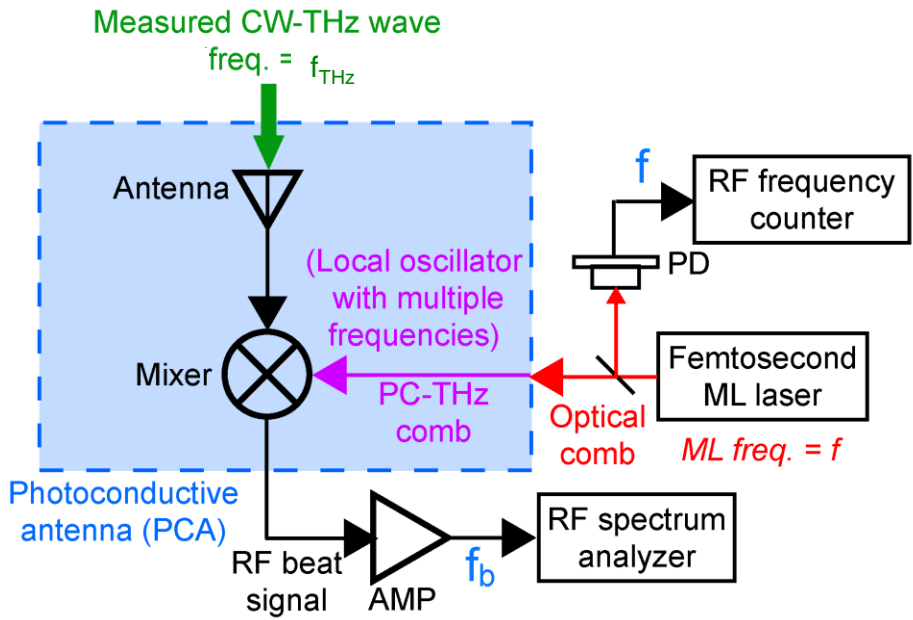
実用的なCW-THz 光源  
(THz-QCL, UTC-PDなど)  
の発達

高精度なCW-THz波の周波数計測が  
必要になる!

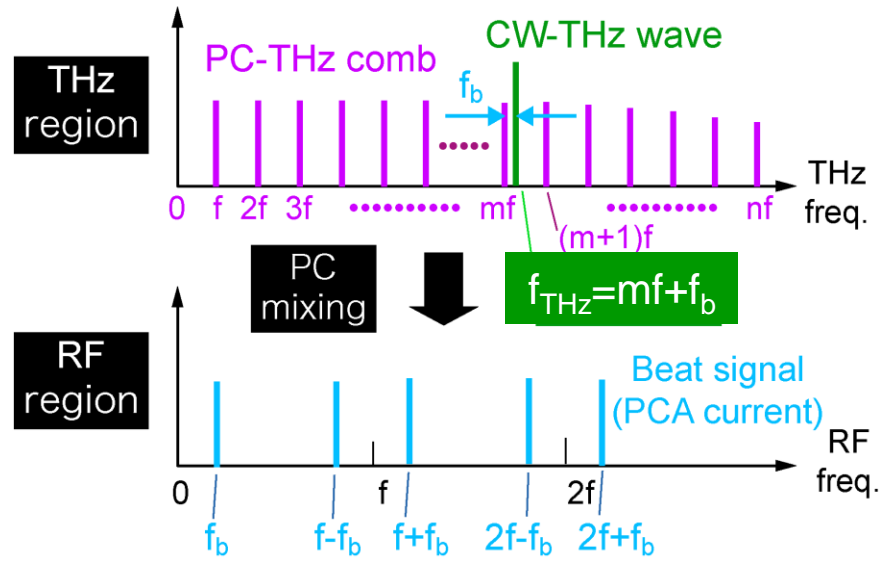


しかしながら、CW-THz波の絶対周波数計測は  
十分に確立していない!

# 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・アナライザー



## Freq. domain

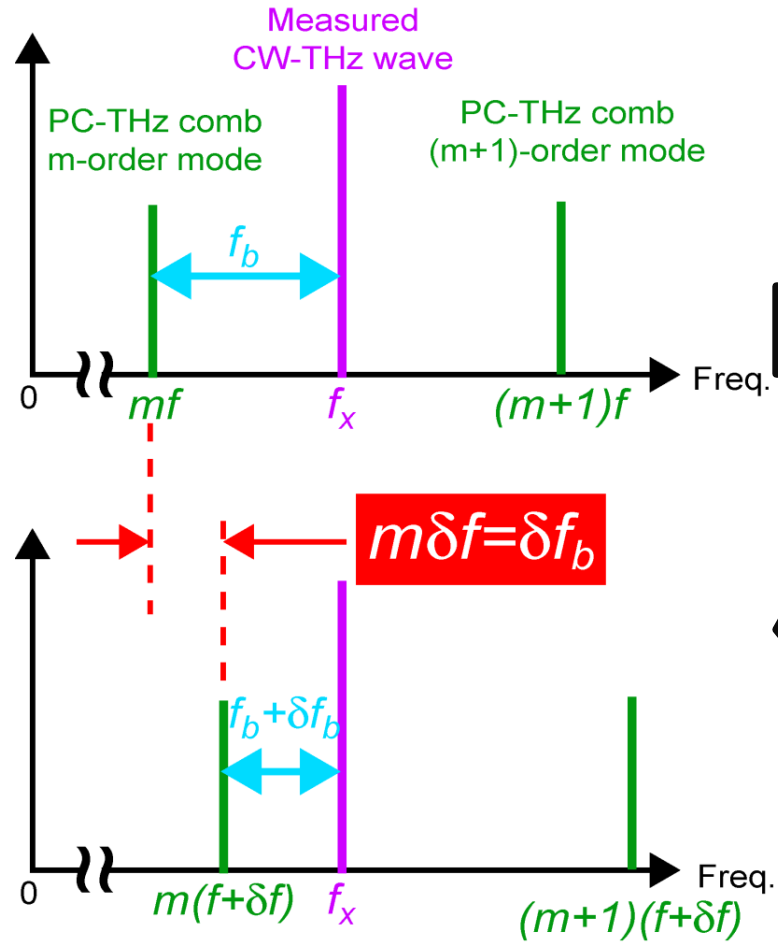


$f_{THz} = mf \pm f_b$

**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 ( $f_b \rightarrow f_b + \delta f_b$ )

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

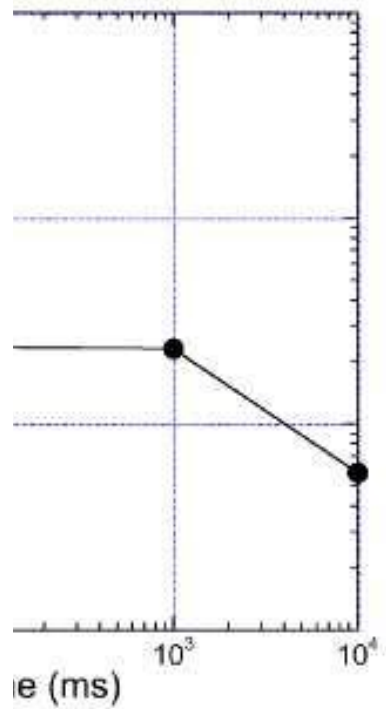
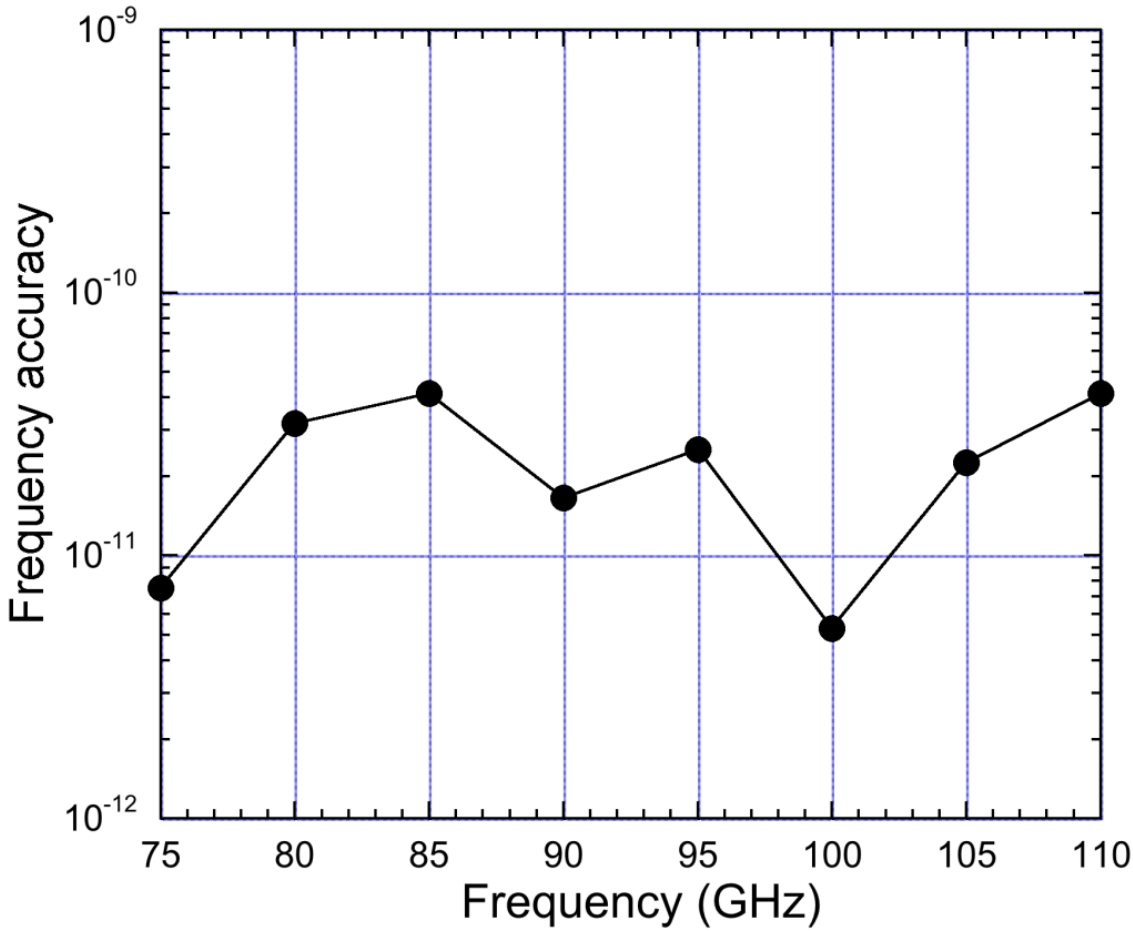
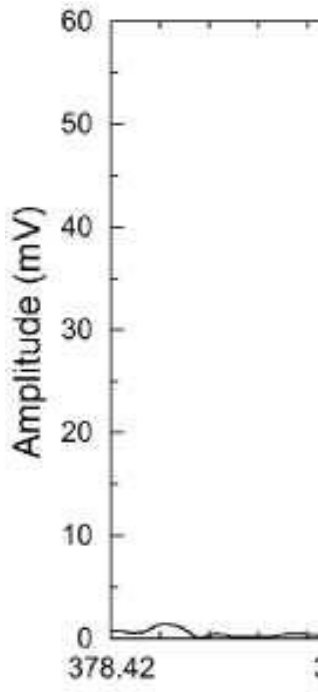
$$f_{THz} = mf_{rep1} + f_{beat1} \quad (\delta f_b / \delta f < 0)$$



# 研究経過①

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

## 絶対周波数計測



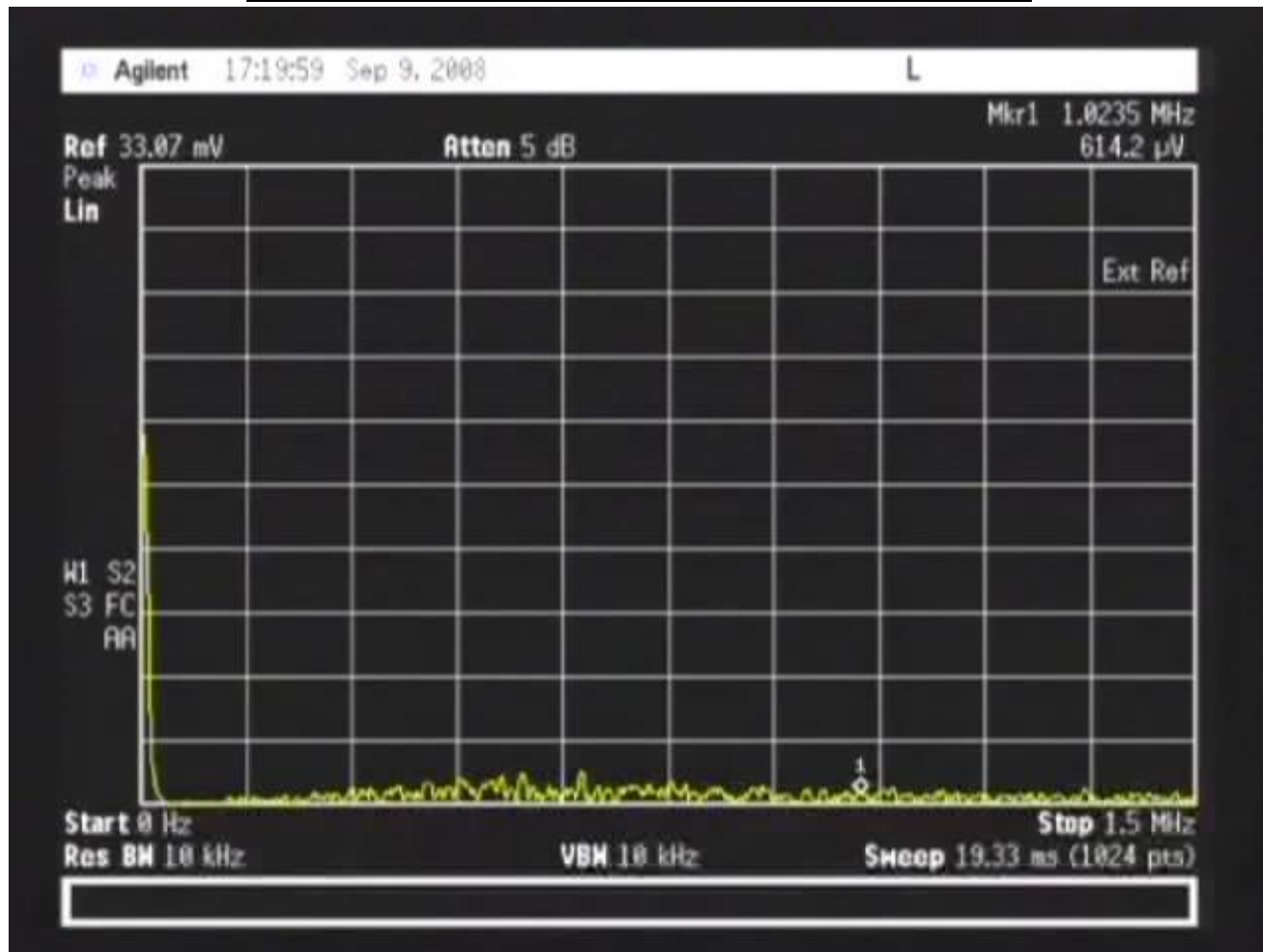
ビー

言号の  
安定性

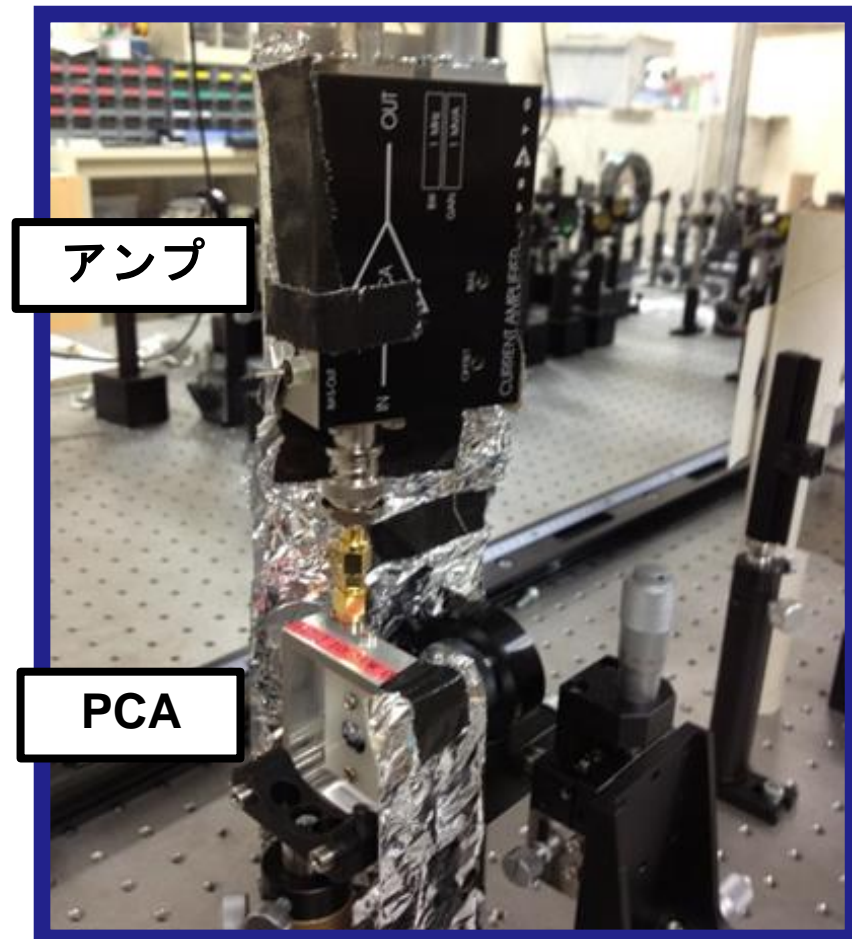
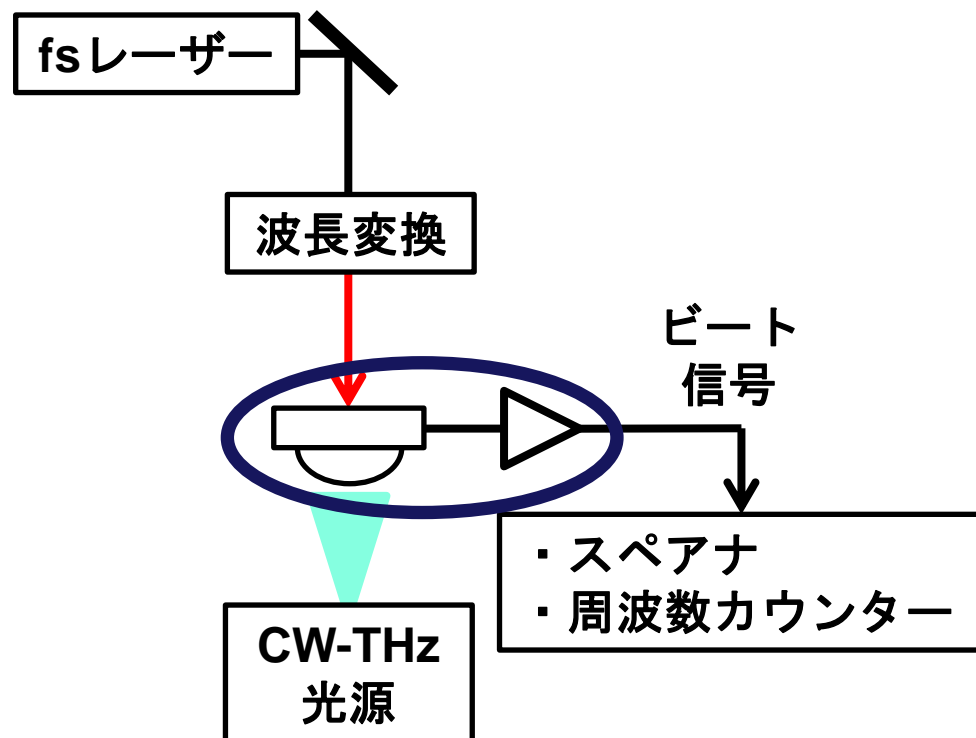
# 研究経過②

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

## UTC-PDとのビート信号のリアルタイムモニタリング



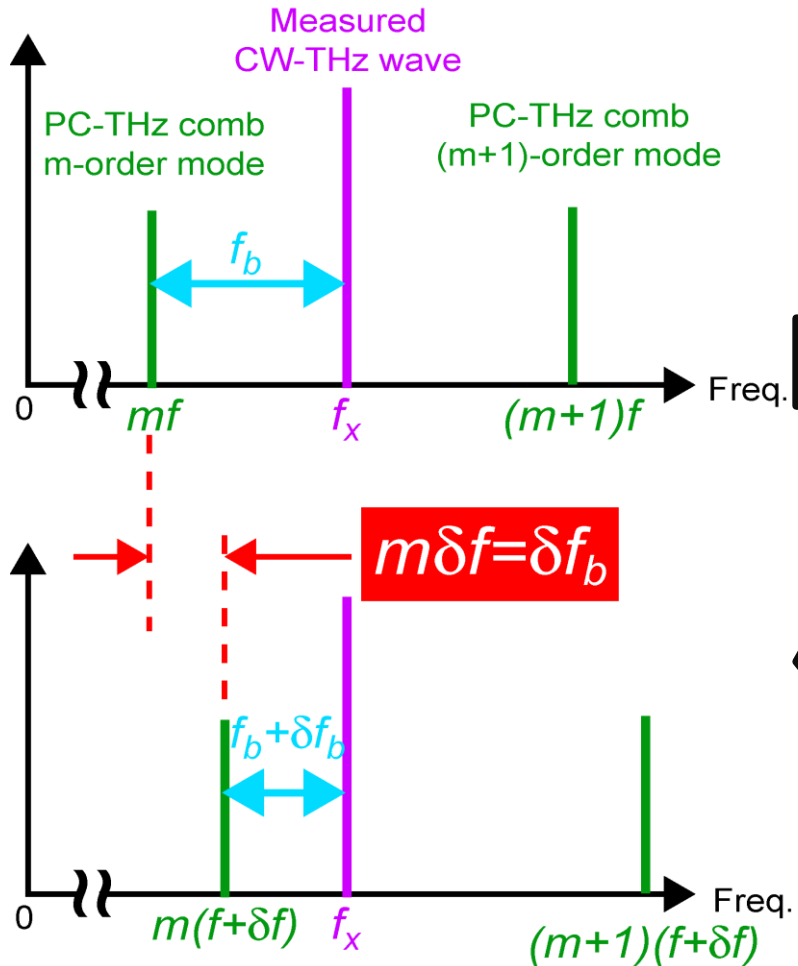
# THzコムスペアナの問題点①



測定ヘッド(PCAとカレントプリアンプ部分)  
が大型である



# THzコムスペアナの問題点②



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

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

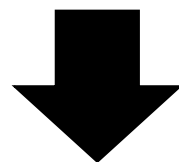
2ステップ測定

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)

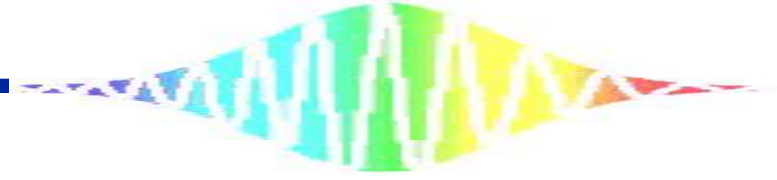
## 従来研究における問題点

- ① 測定ヘッド (PCAとカレント・プリアンプ) が**大型化**！
- ② CW-THz波の絶対周波数を**リアルタイムで決定**出来ない！



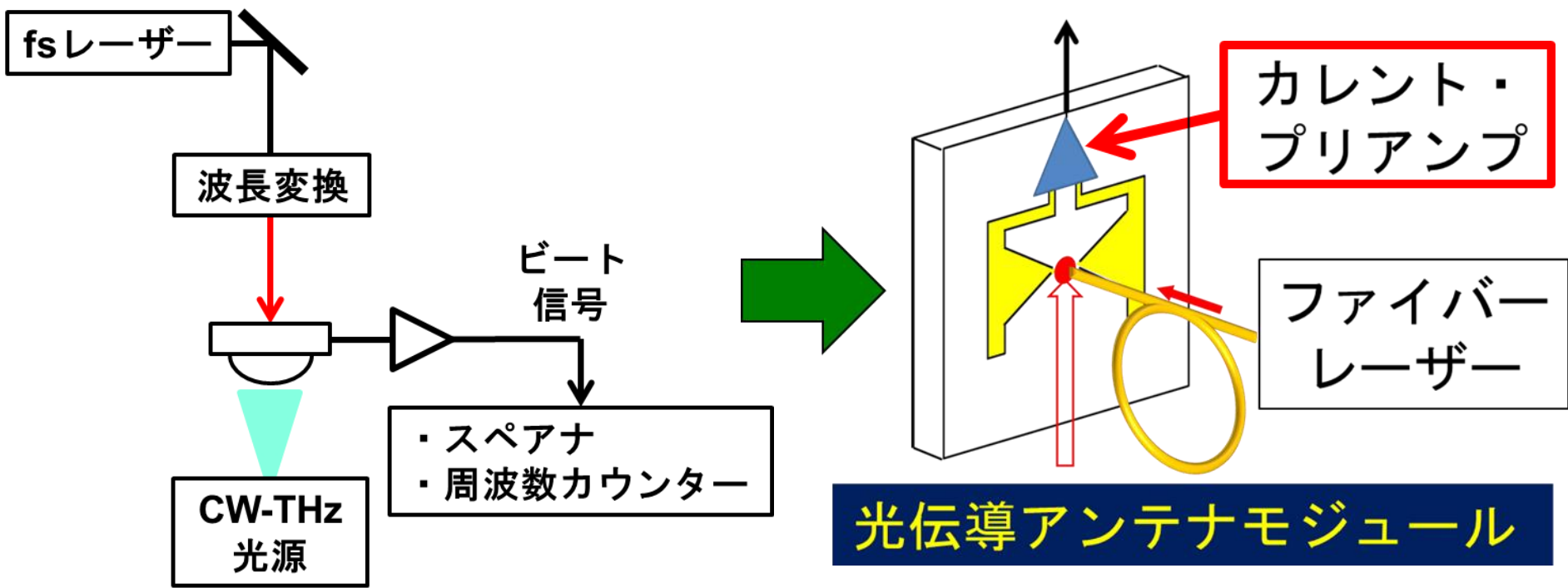
## 今回の研究

- ① **小型PCA・アンプ複合モジュールを開発し、特性評価を行う**
- ② デュアルPC-THzコムを用いることで、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



# ① 小型PCA・アンプ複合 モジュールの開発

# 小型PCA・アンプ複合 モジュールの開発

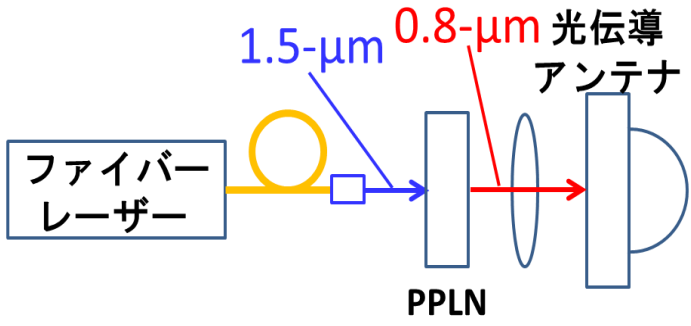


小型、フレキシブル、ロバスト、アライメントフリーといった利点が付加できる

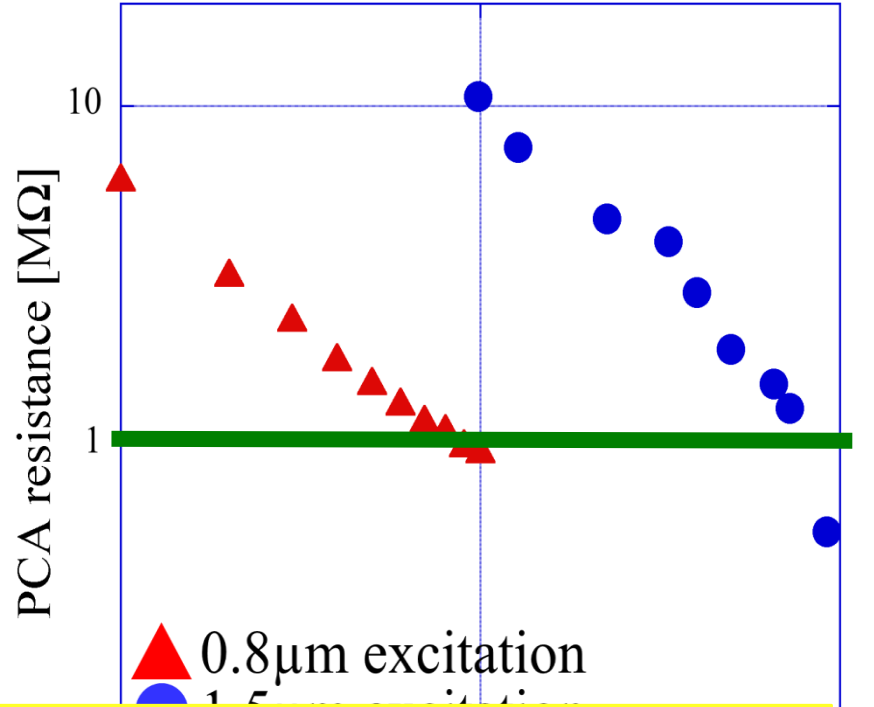
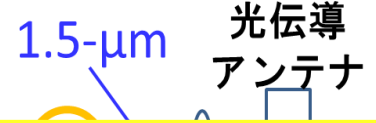
# (a) LT-GaAs-PCAへの1.5μm光 直接カップリング

PCA励起光波長による違い@パワー依存性

LT-GaAs-PCA@0.8μm光



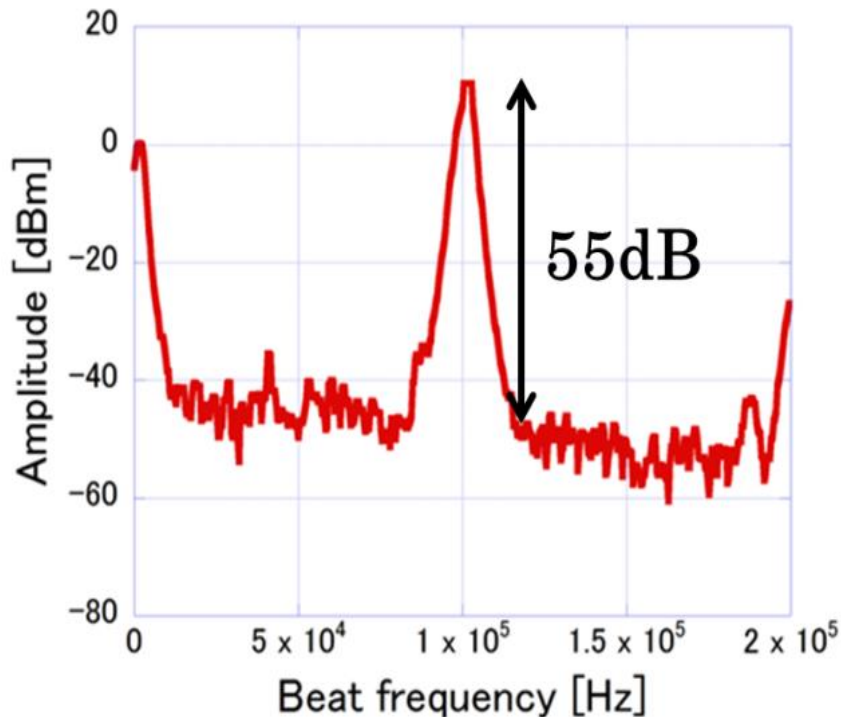
LT-GaAs-PCA@1.5μm光



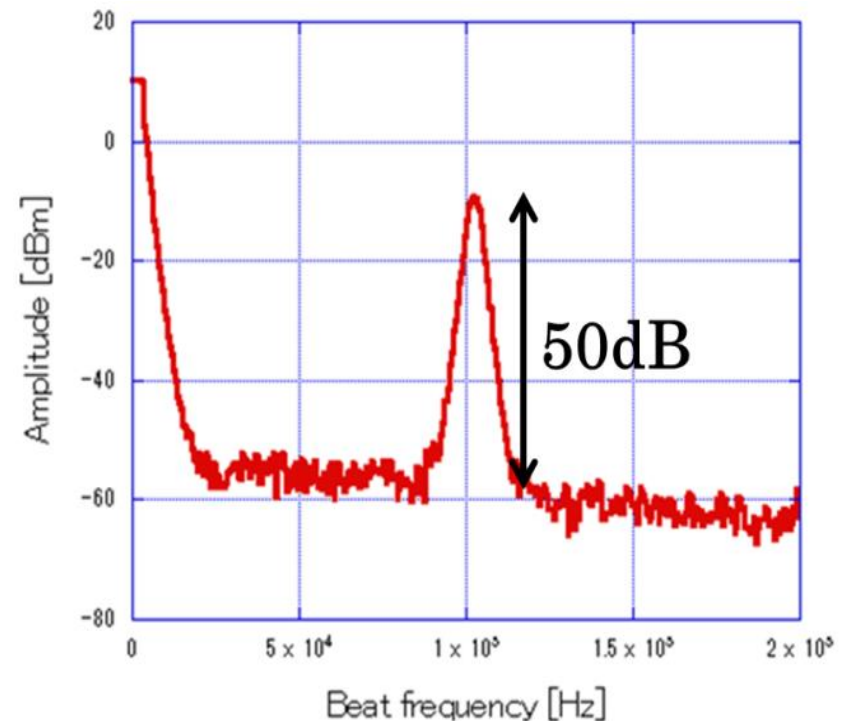
十分なパワーをしっかりと集光すれば、同数の  
フォトキャリア数を生成可能

# 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 $\Omega$



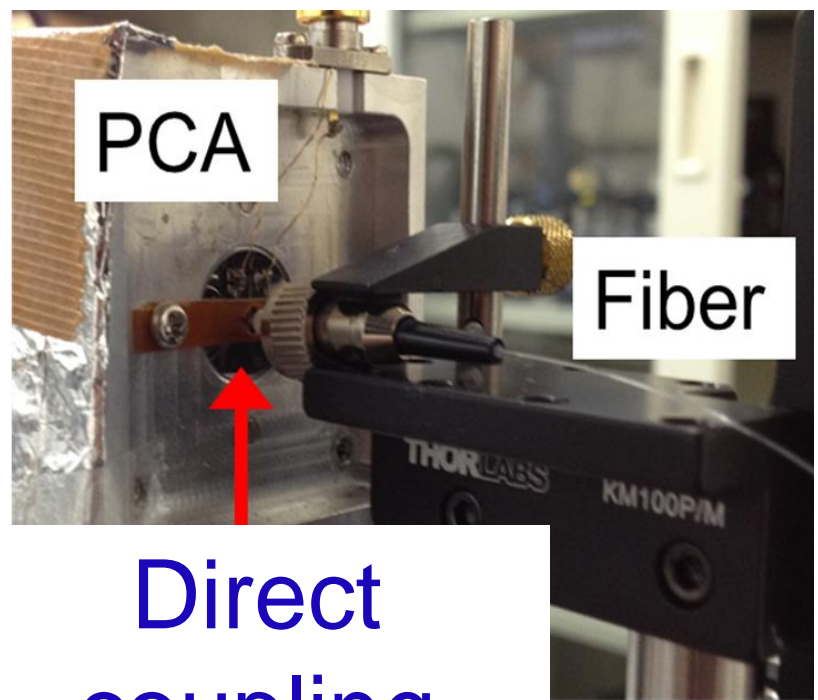
1.5 $\mu$ m光  
入射パワー=100mW  
PCA抵抗値=1.2M $\Omega$



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

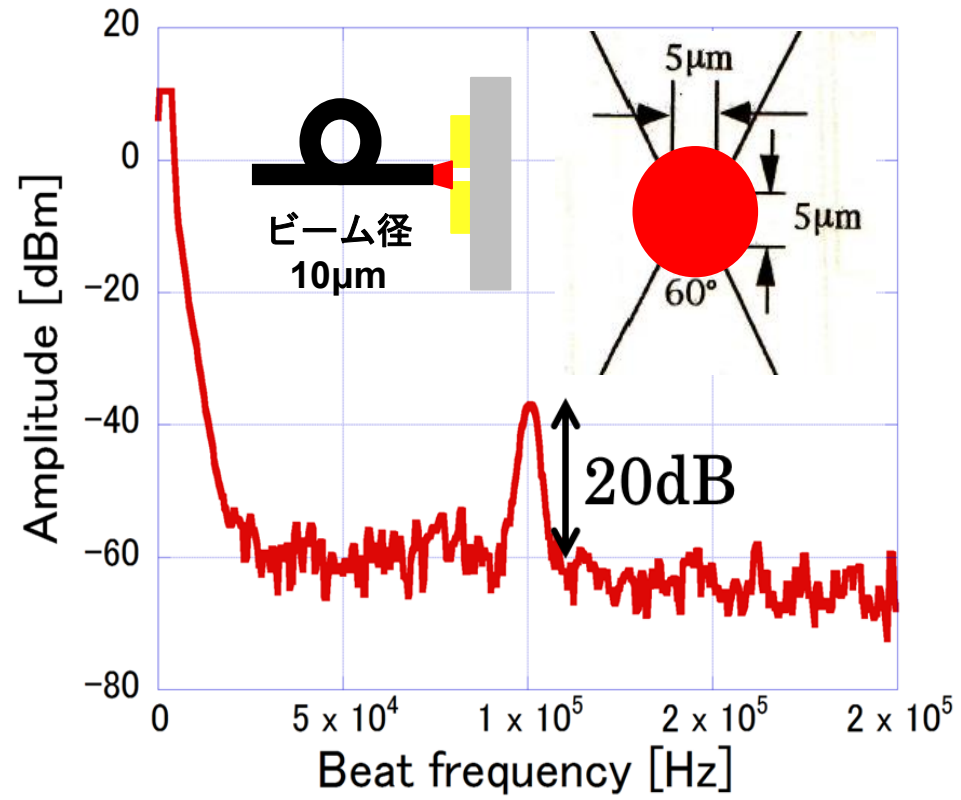
# ファイバーの直接カップリング

入射パワー=189mW  
PCA抵抗値=1.8MΩ



Direct coupling

ビート周波数=100kHz



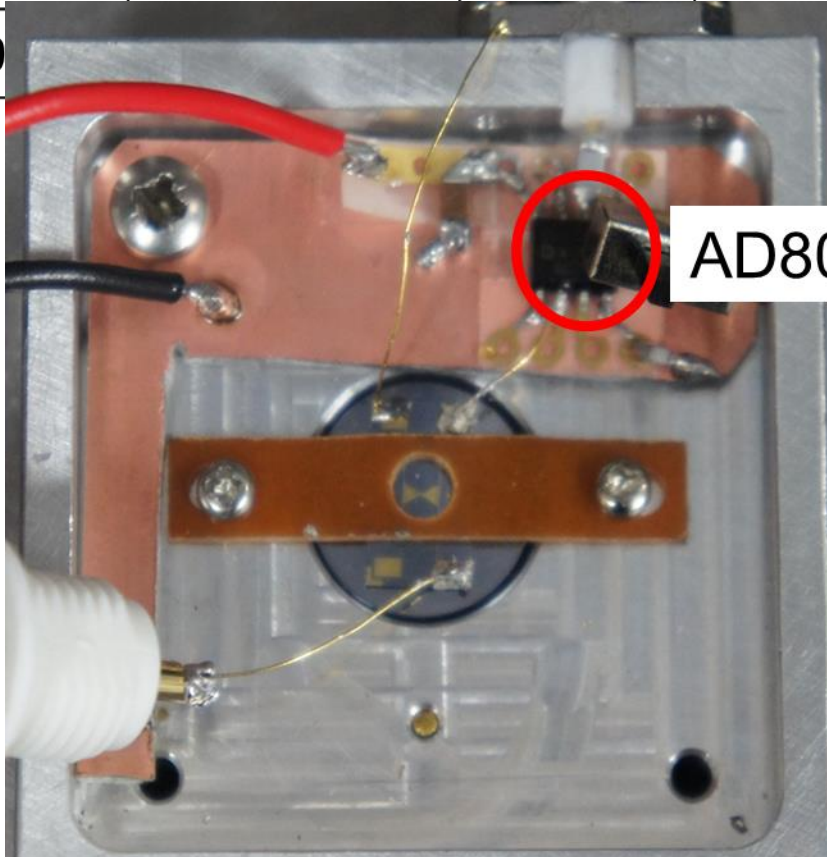
レーザー光のコリメート&集光  
アンテナ形状の最適化

レンズを用いて集光した  
場合に比べ30dB低下

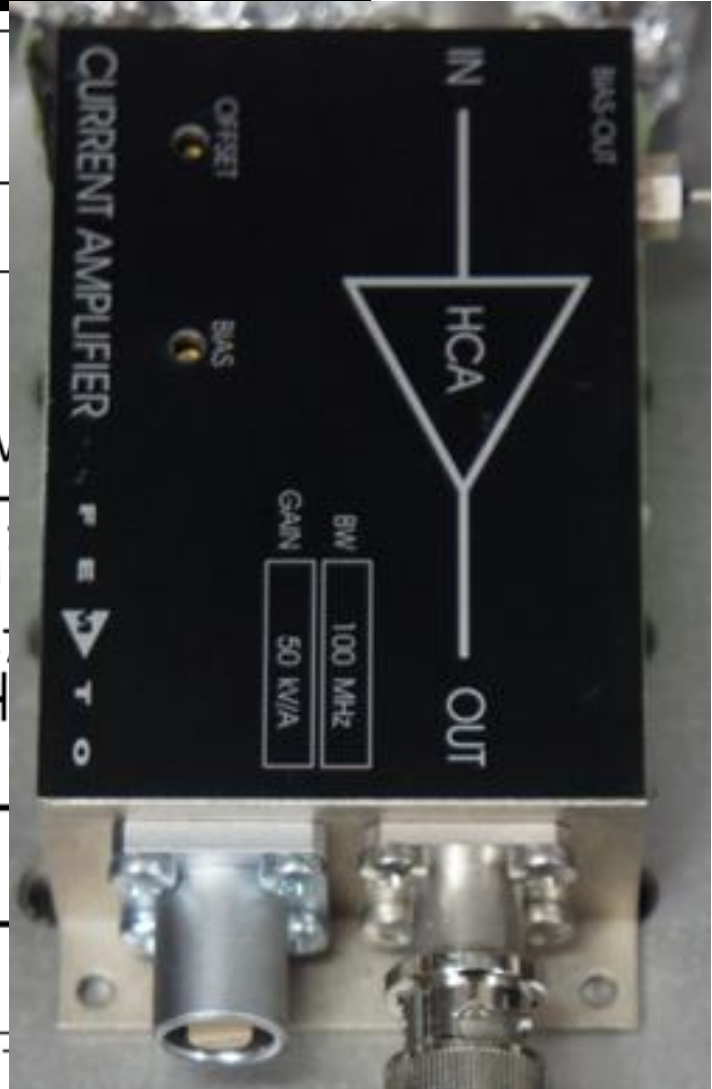
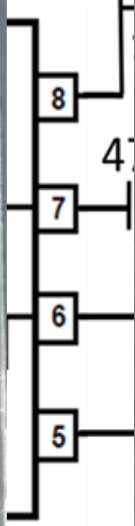
# (b) PCAと高速アンプのモジュール化

## 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



AD8015

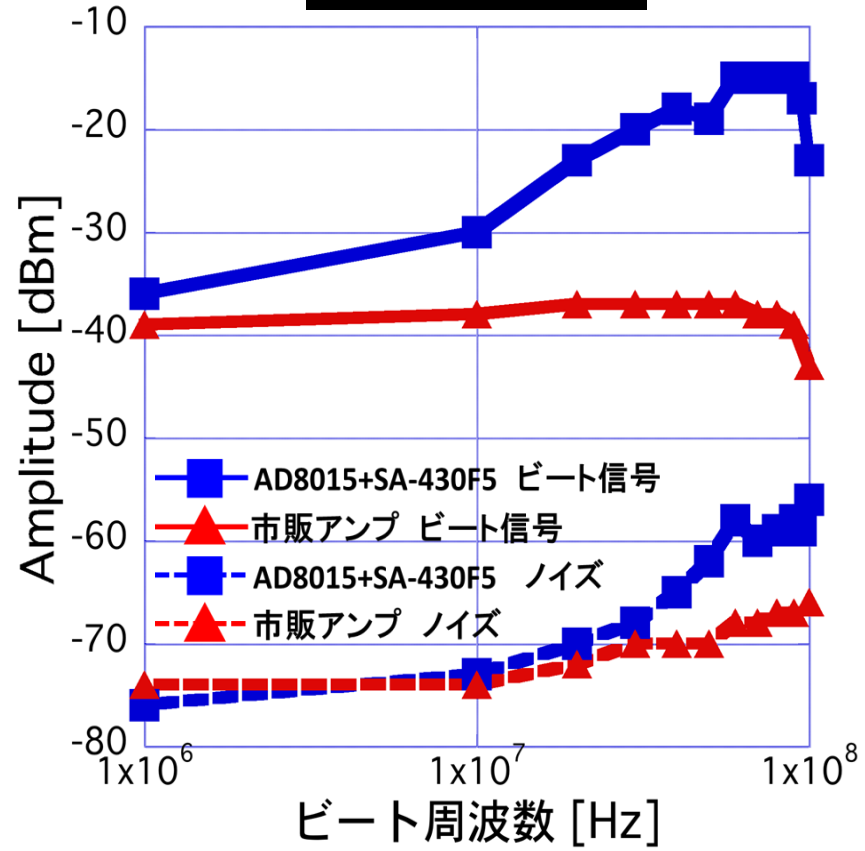




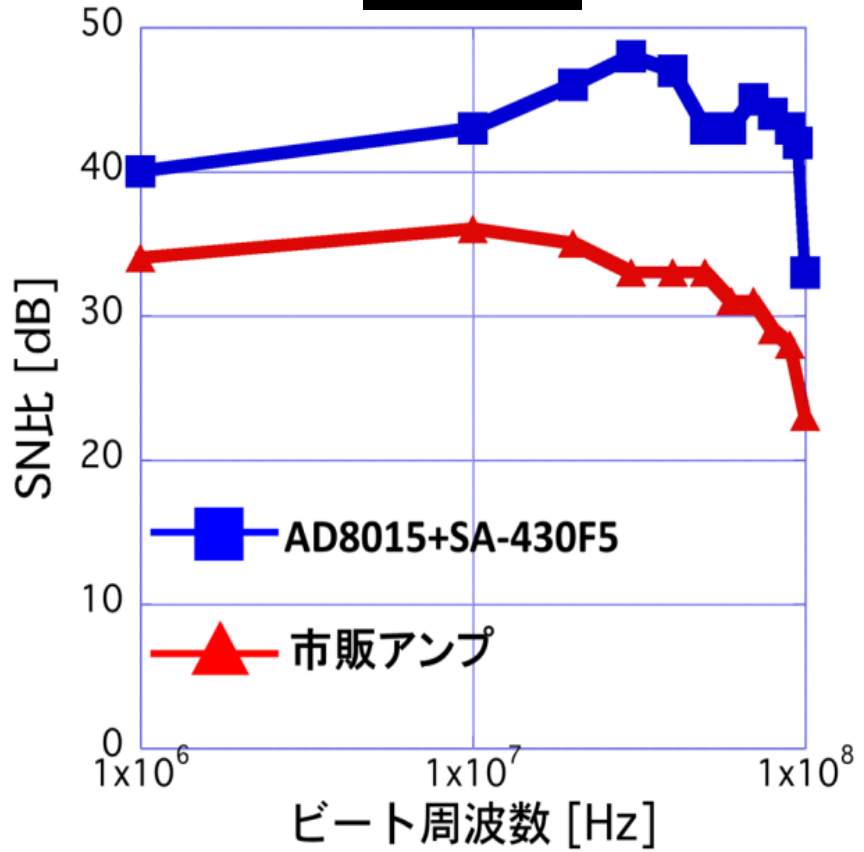


# 実験結果：信号強度とSN比

## 信号強度



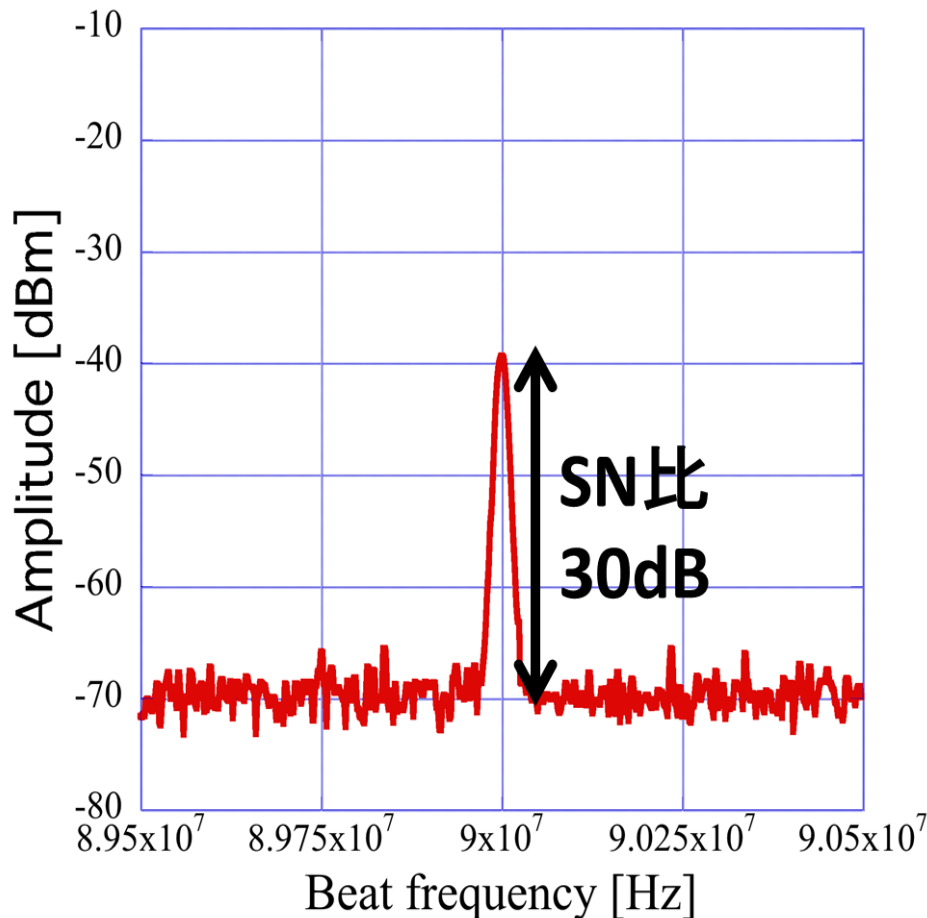
## SN比



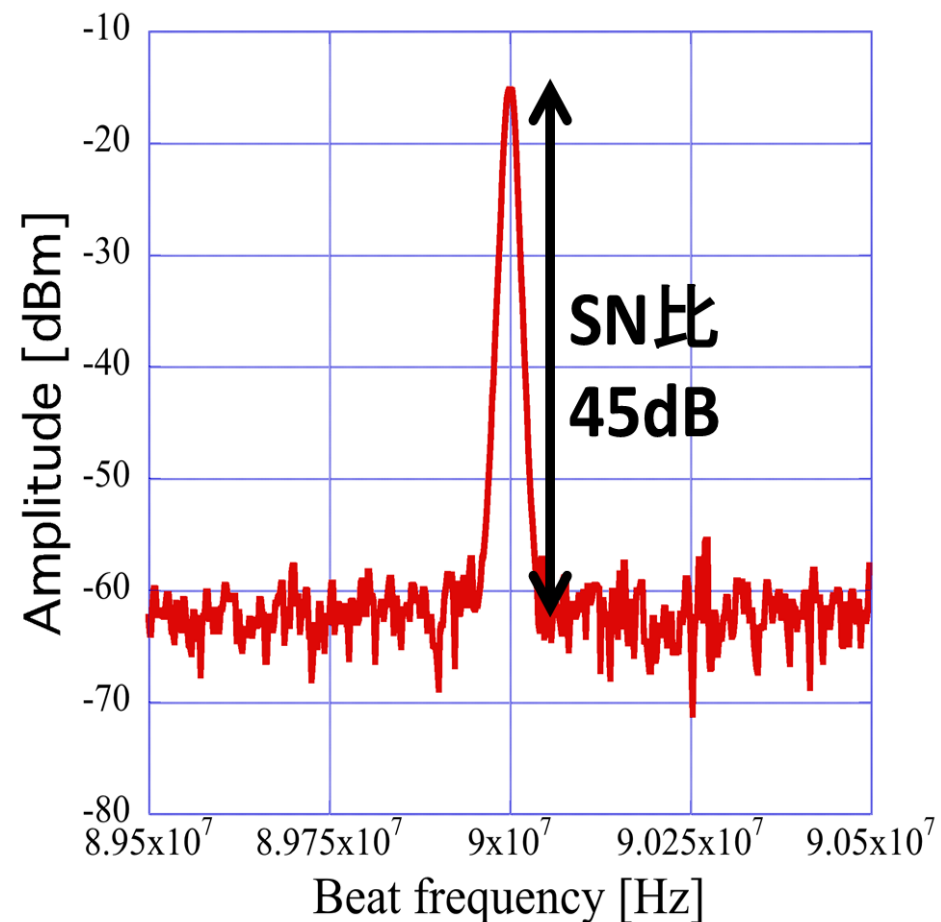
**市販品(帯域100MHz,ゲイン50kΩ)に比べ  
5~15dB検出感度を向上**

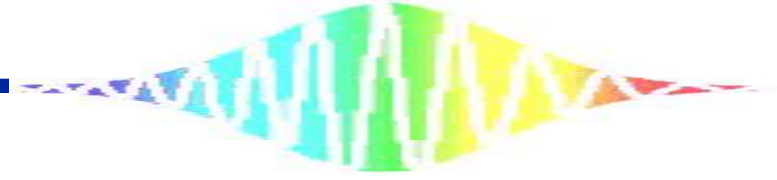
# 実験結果：ビート信号スペクトル (ビート周波数90MHz)

PCA + 市販カレント・プリアンプ



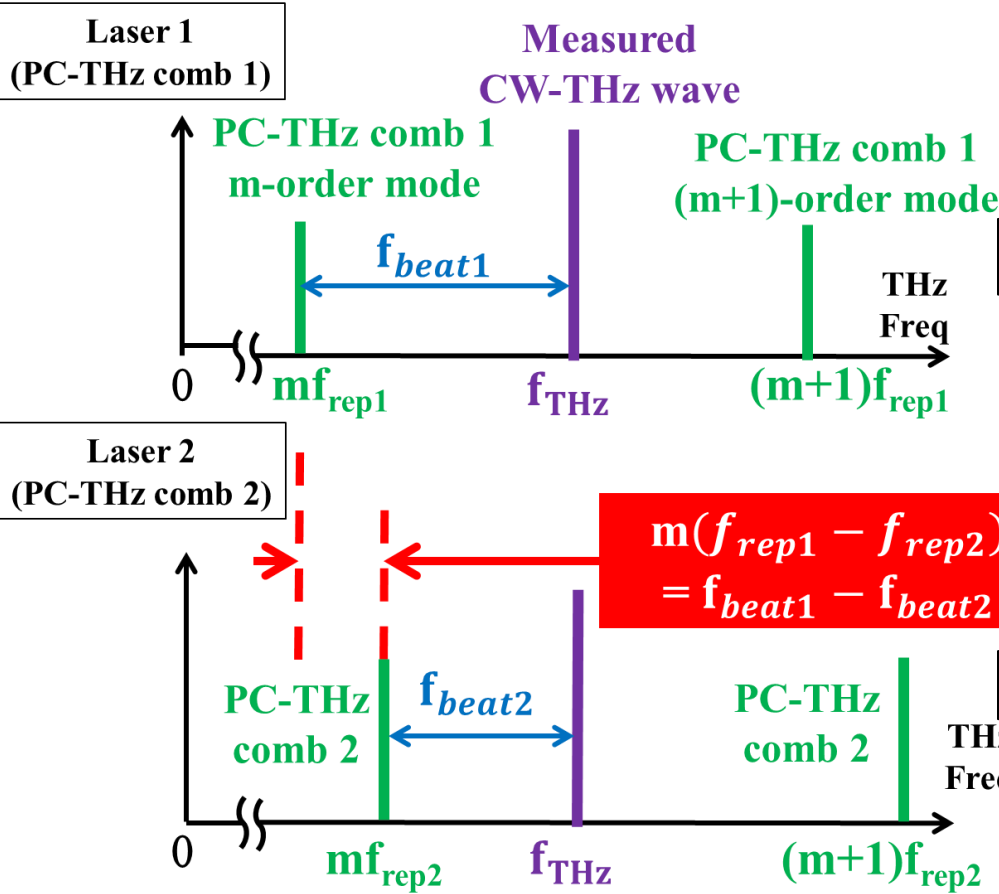
PCA・アンプ複合モジュール





## ② デュアルPC-THzコムを用いたリアルタイム絶対周波数計測

# 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！

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

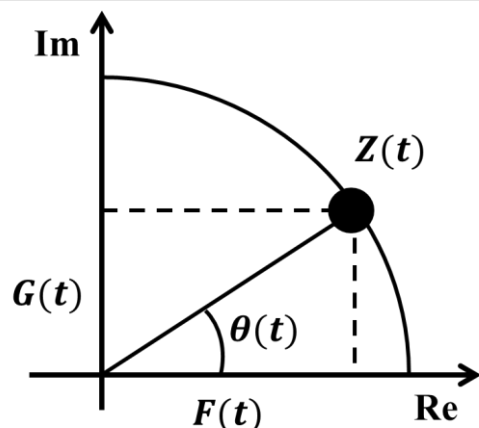
周波数カウンタで測定する場合、

- (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

# ヒルベルト変換を用いた瞬時周波数計測

Ref) H. Fuser 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



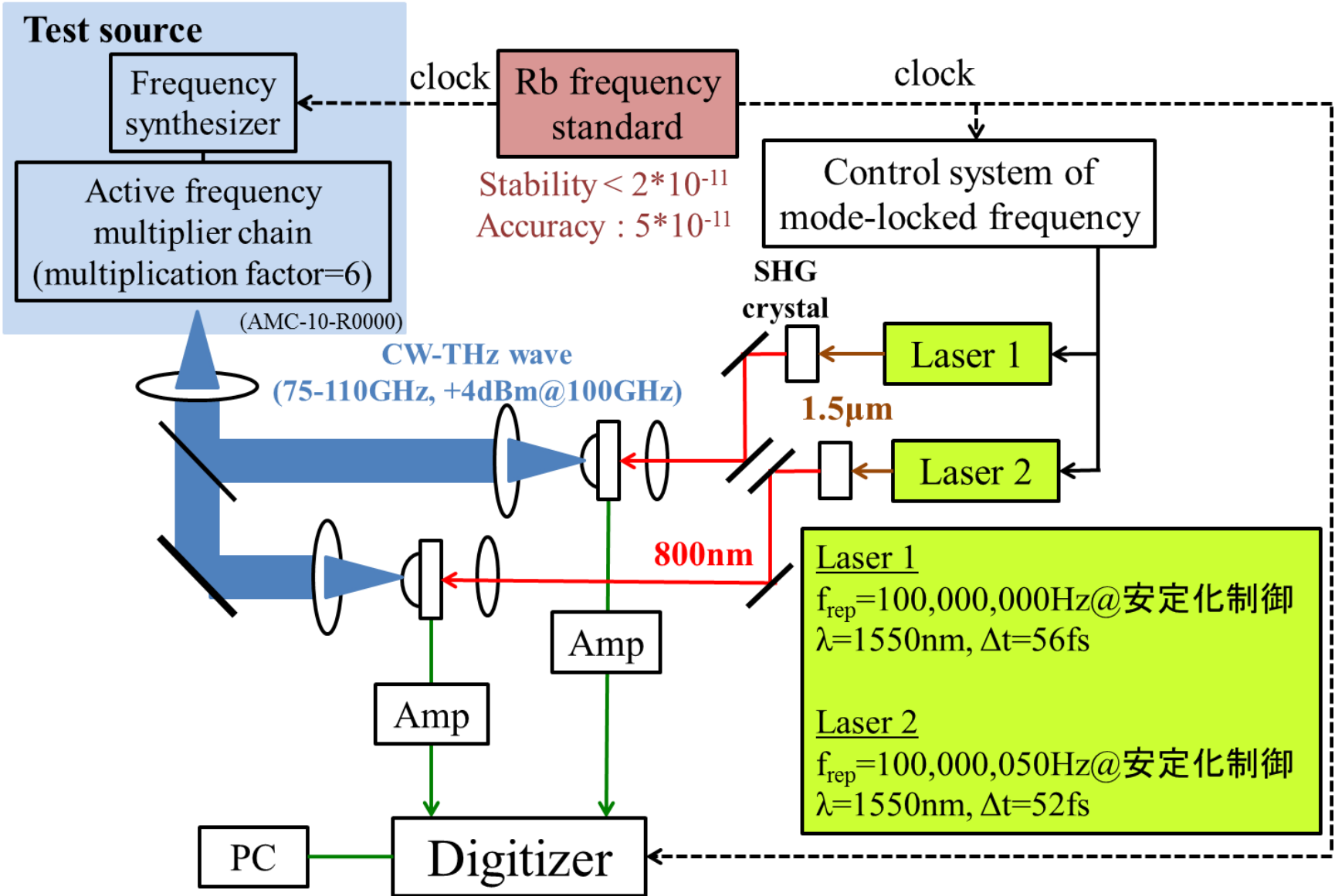
$$Z(t) = F(t) + iG(t) \text{ と表される}$$

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

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

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



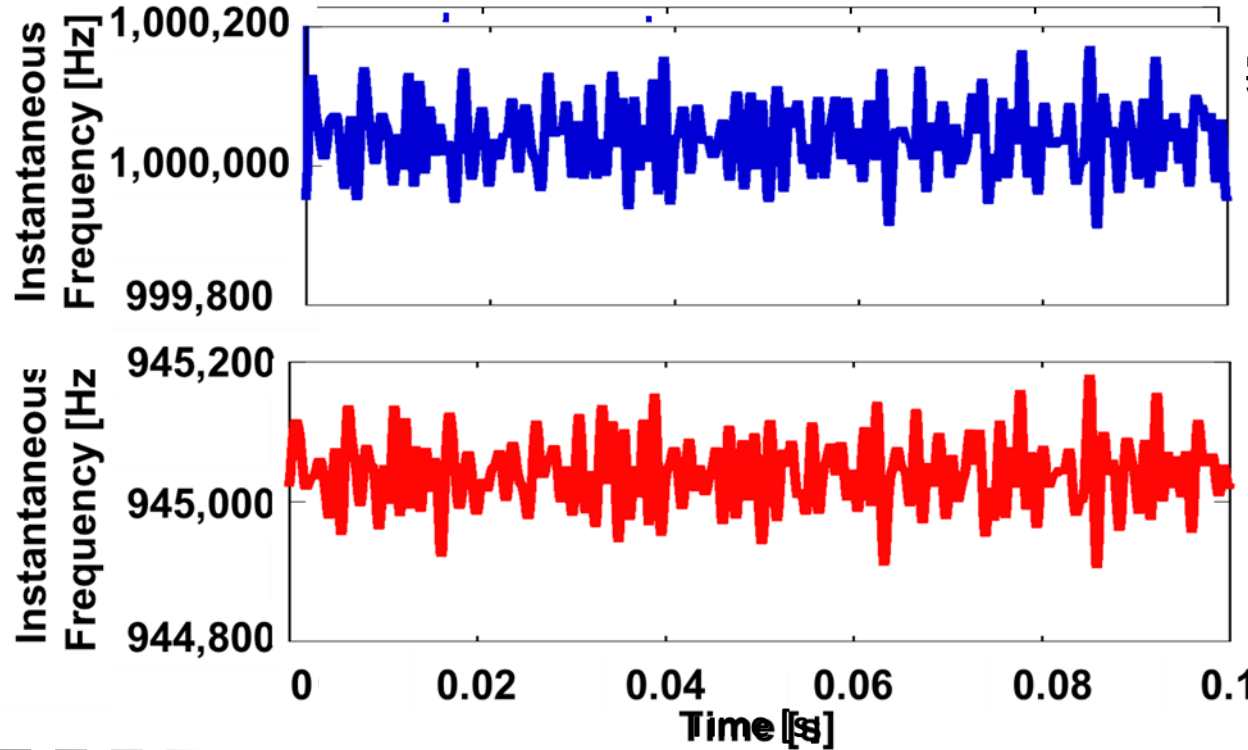


# ビート周波数とCW-THz波の測定結果

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

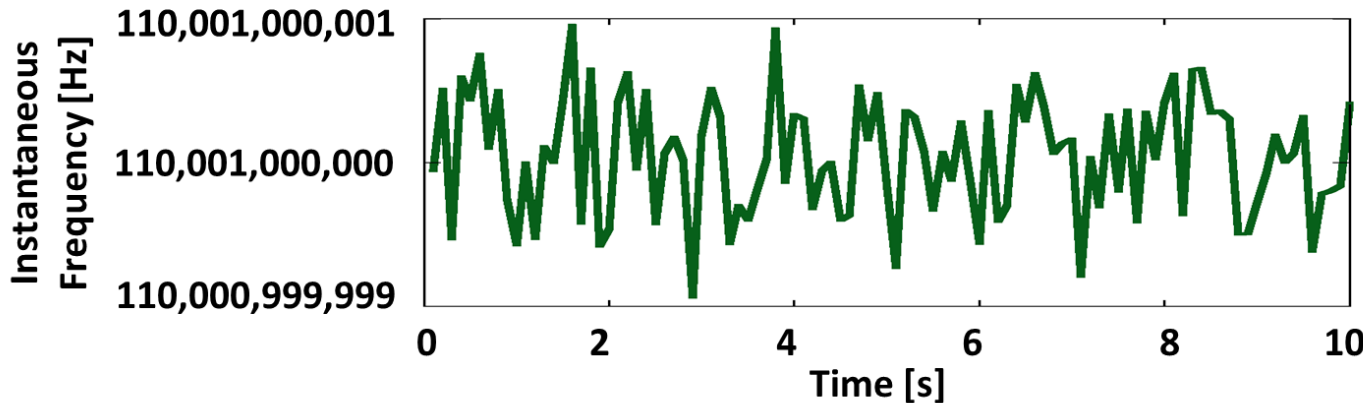
デジタルの  
サンプリングレート  
10MHz

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



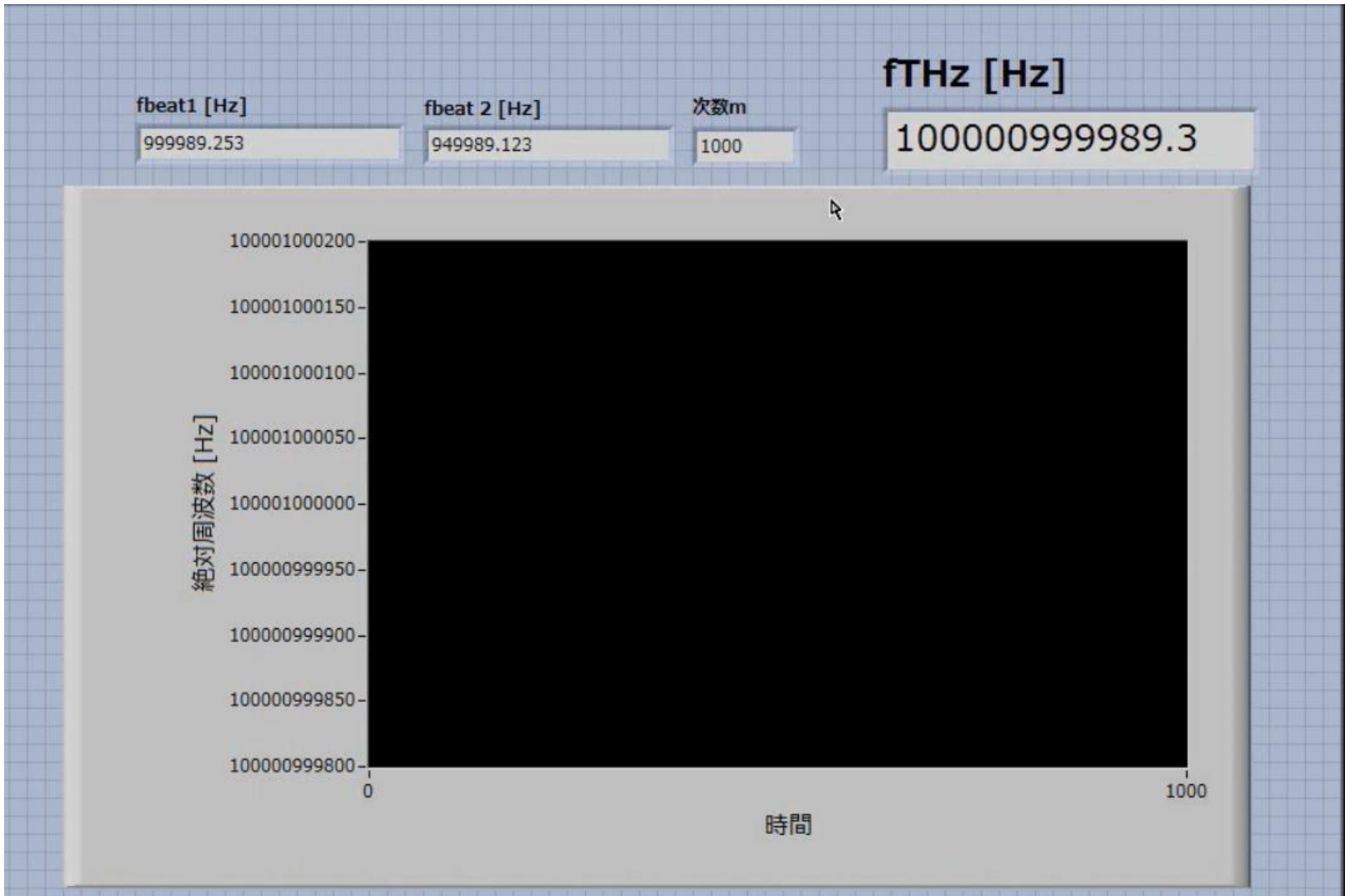
- 実験条件
- ・ 100ms計測
  - ・ 積算100

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



# CW-THz波のリアルタイムモニタリング①

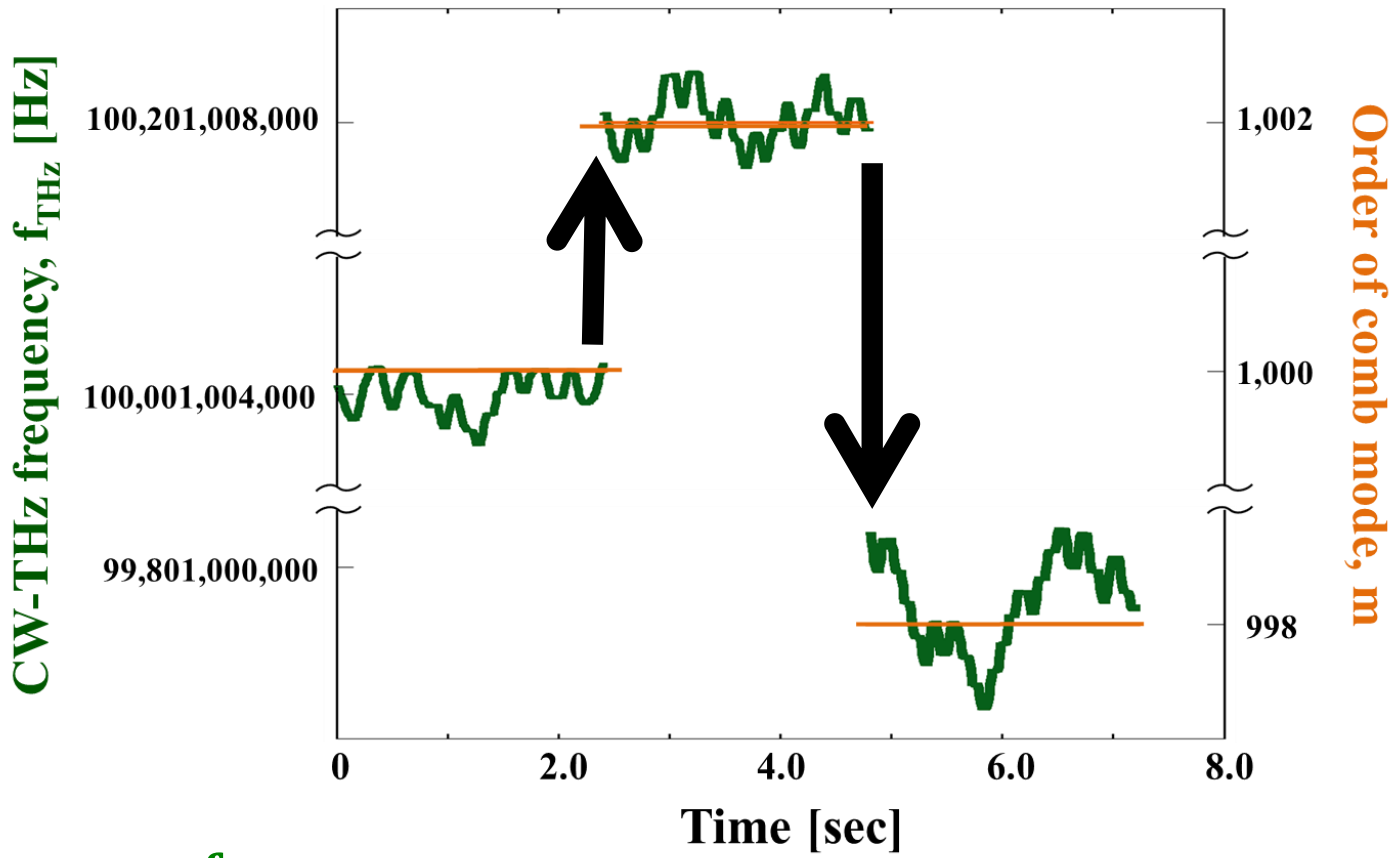
(周波数変動=0.1THz±100Hz)





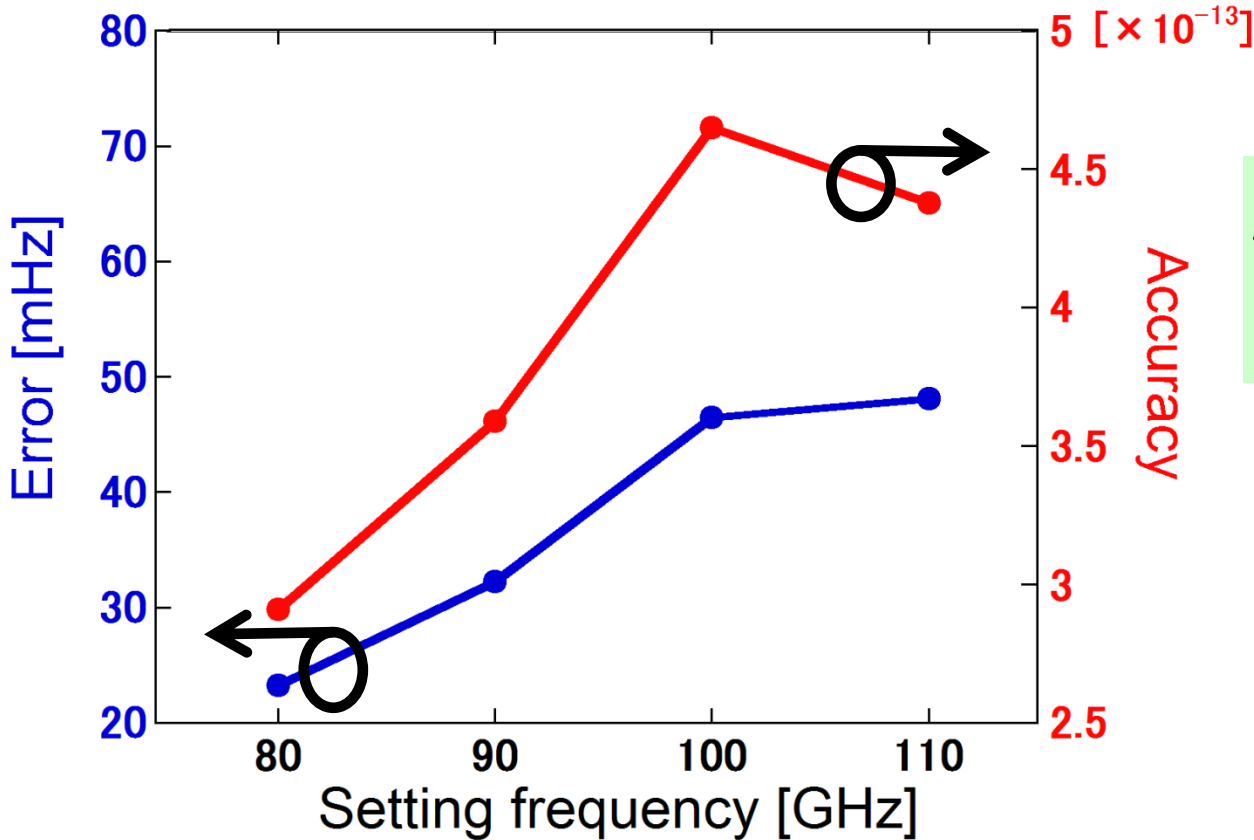
# CW-THz波のリアルタイムモニタリング②

(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

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

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

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

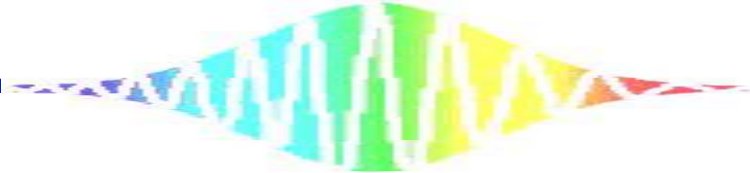
$$\Delta f_{beat1} = 21\text{mHz}$$

$$m = 800 \sim 1100$$



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

本実験での平均精度 =  $3.9 \times 10^{-13}$

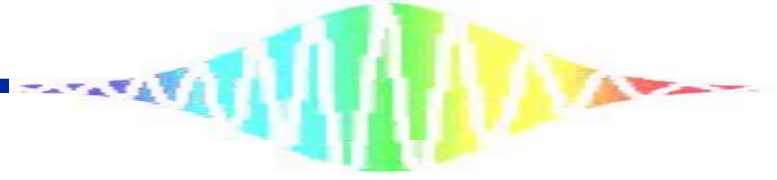


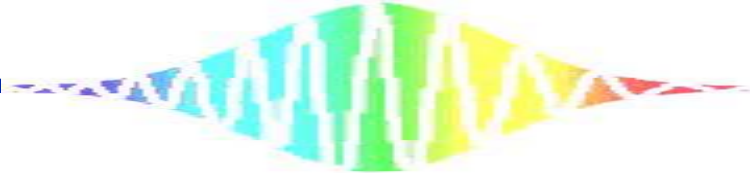
## まとめ

- ① **小型PCA・アンプ複合モジュール**を作製し、市販品よりも高SN特性を実現
- ② デュアルPC-THzコムと瞬時周波数を用いることで、**リアルタイム絶対周波数計測**を実現

## 今後の予定

**一つのPC-THzコム**を用いて絶対周波数をリアルタイムに決定する



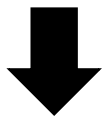


# 背景

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**

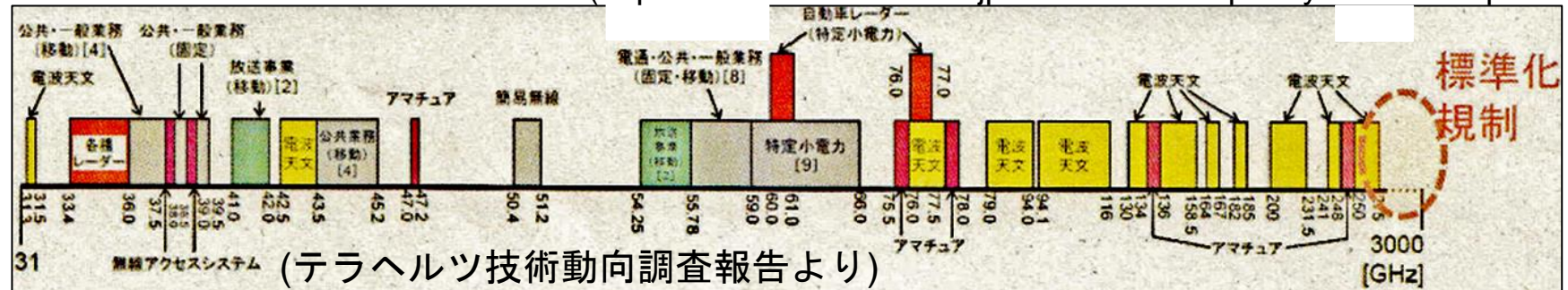
## テンポラリなネットワーク



## ホットスポット、レンタルDVDショップ

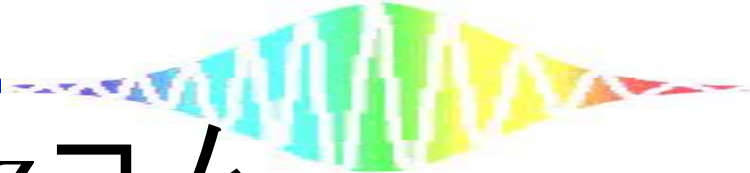


(<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/THP/pdf/oyobuturi300.pdf>より)



標準化  
規制

(テラヘルツ技術動向調査報告より)

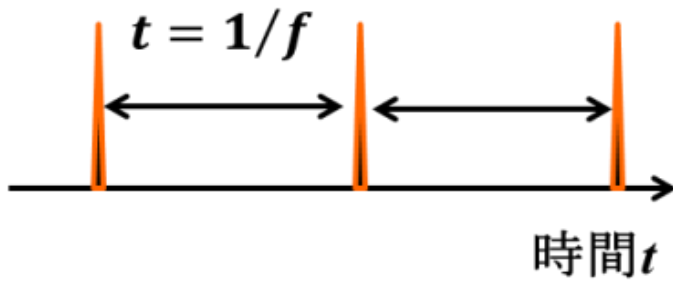


# 光コムとTHzコム

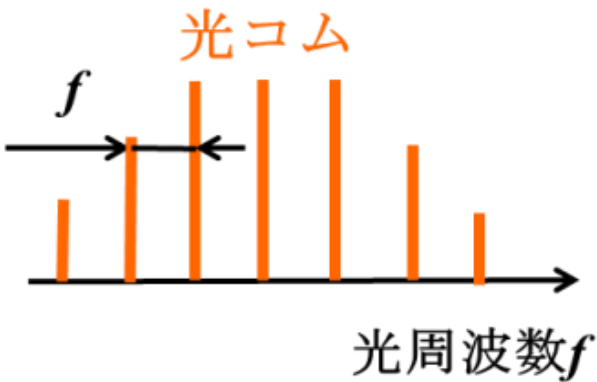
時間領域

周波数領域

モード同期超短パルス列

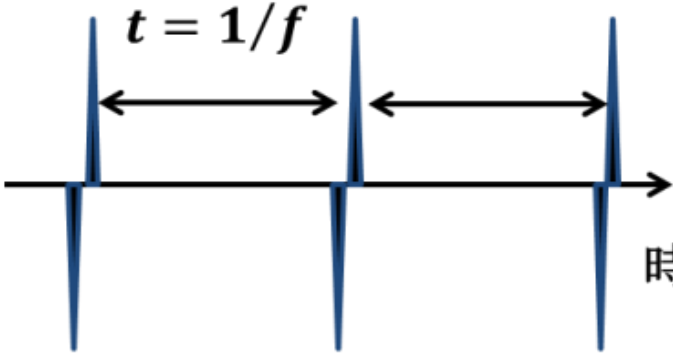


フーリエ変換

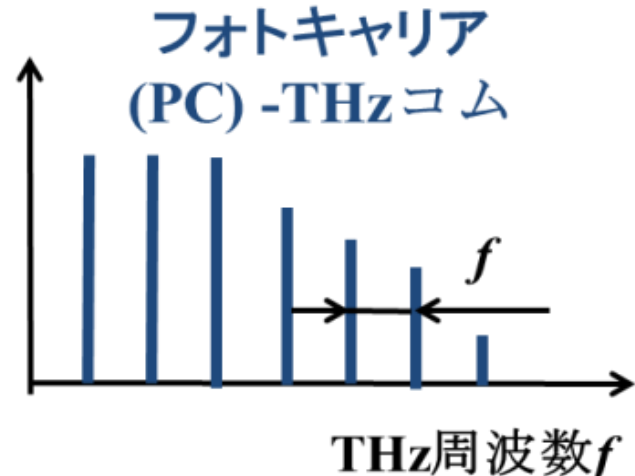


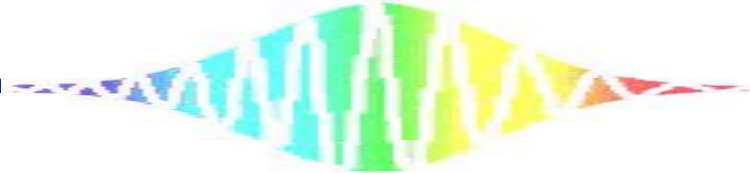
THz検出用PCAに入射すると

ピコ秒モード同期パルス列



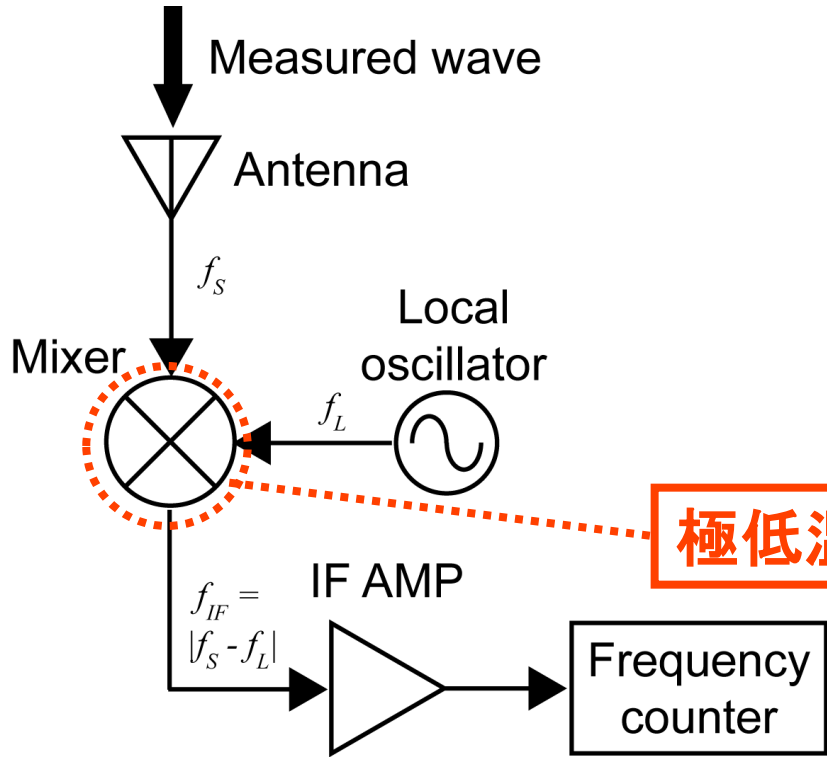
フーリエ変換



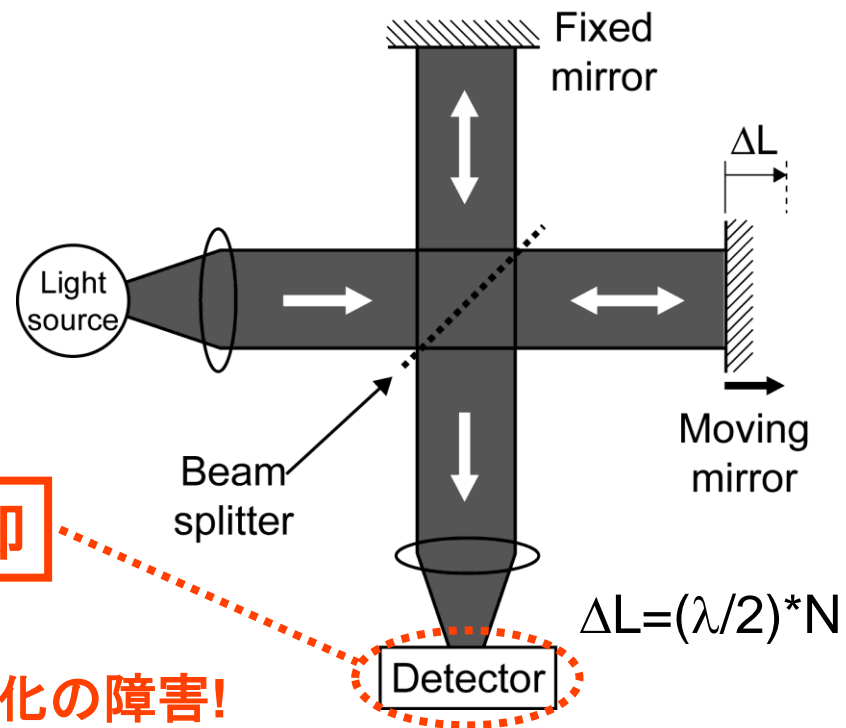


# 従来法

## 電氣的ヘテロダイナ法

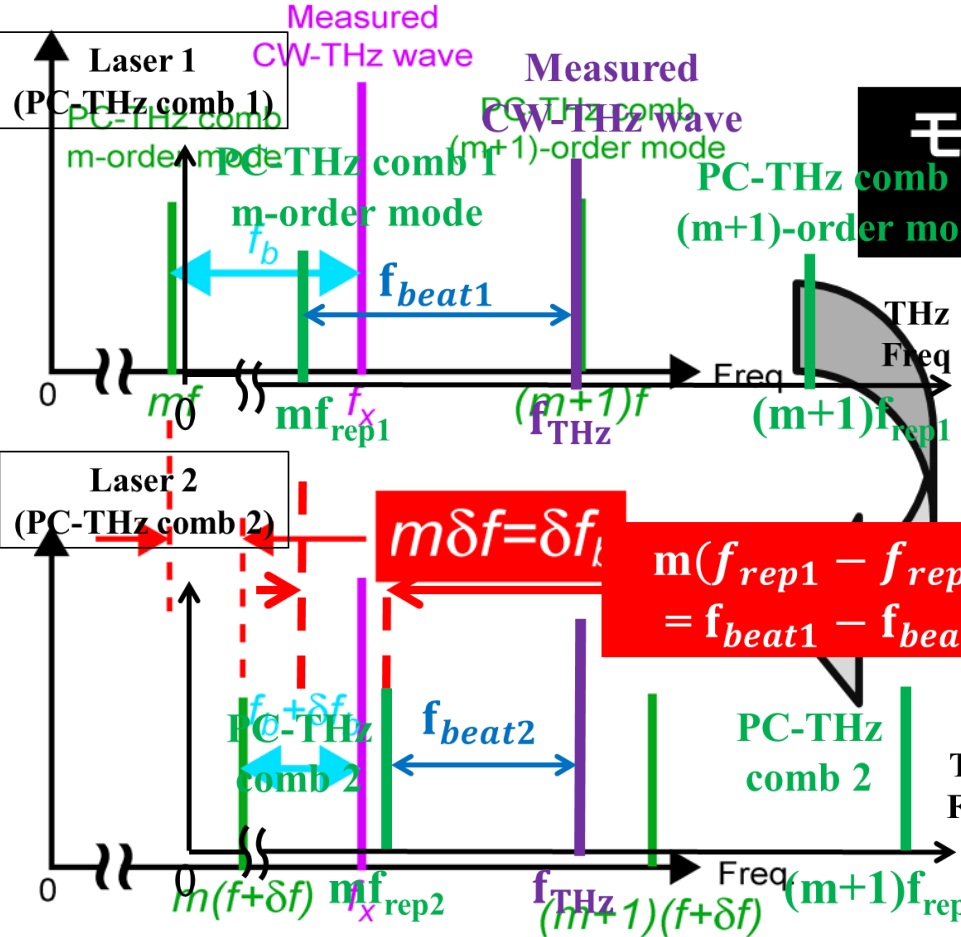


## 光學的手法 (干渉計測)



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!

# 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!**

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

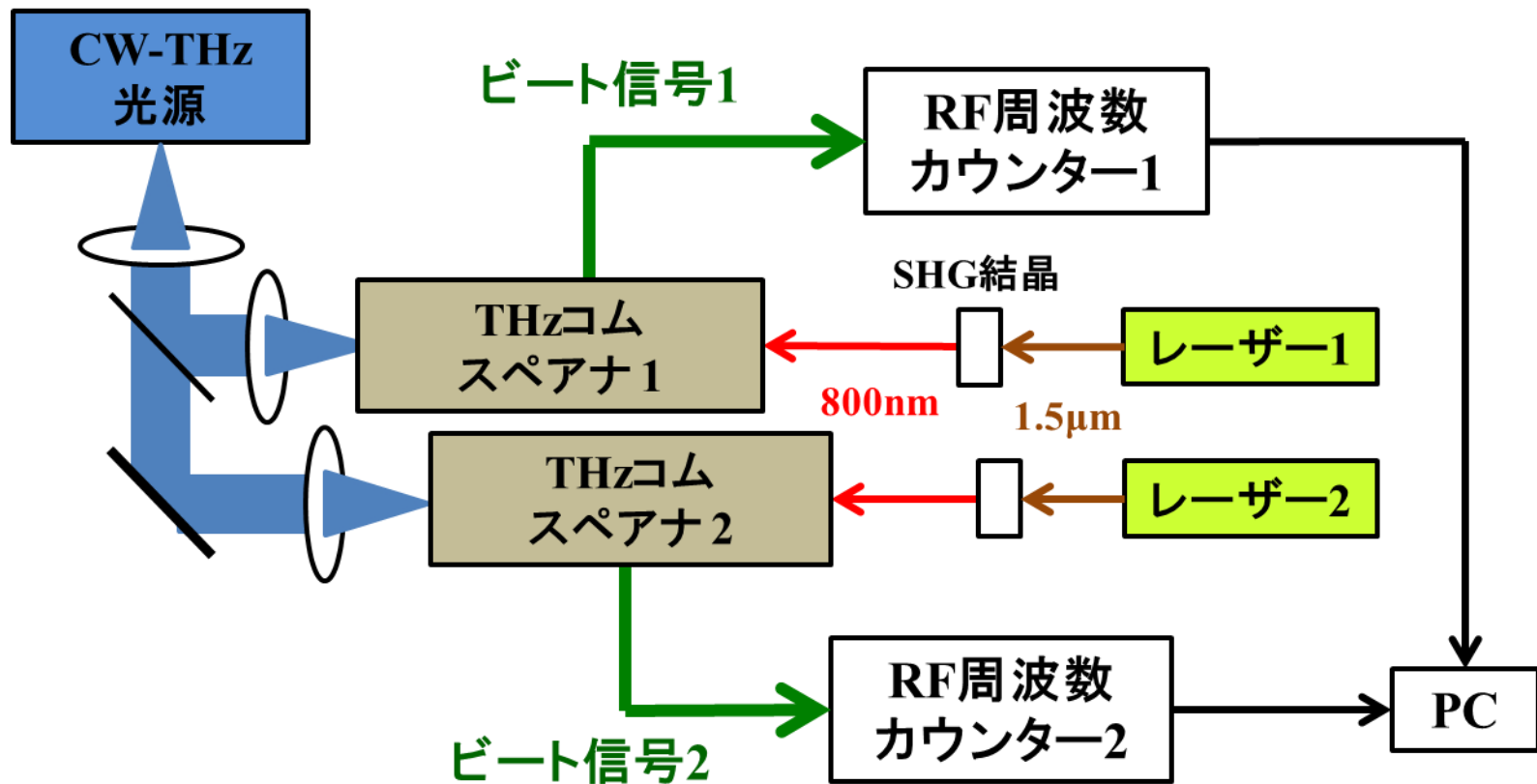
**ビート周波数も  $\delta f_b$  変化 ( $f_b \rightarrow f_b + \delta f_b$ )**

$f_{THz}$  変動の大きなCW-THz波の絶対周波数は  $>0$ )  
計測できない!  $<0$ )

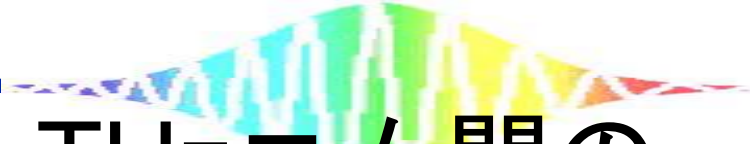


# 従来は

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

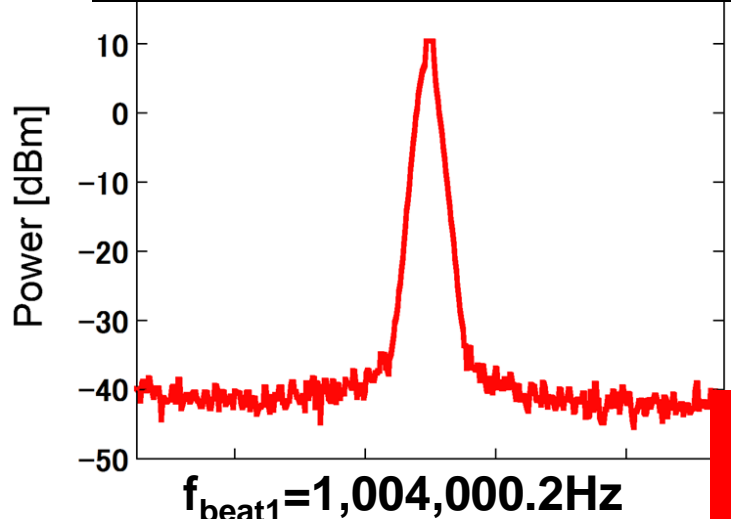


周波数カウンターを利用すると高速計測が困難

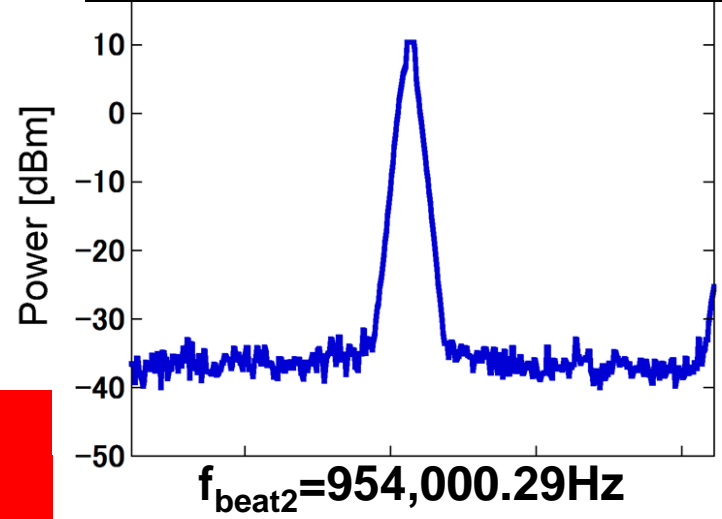


# CW-THz波と2つのPC-THzコム間のビート信号

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!**

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

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

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

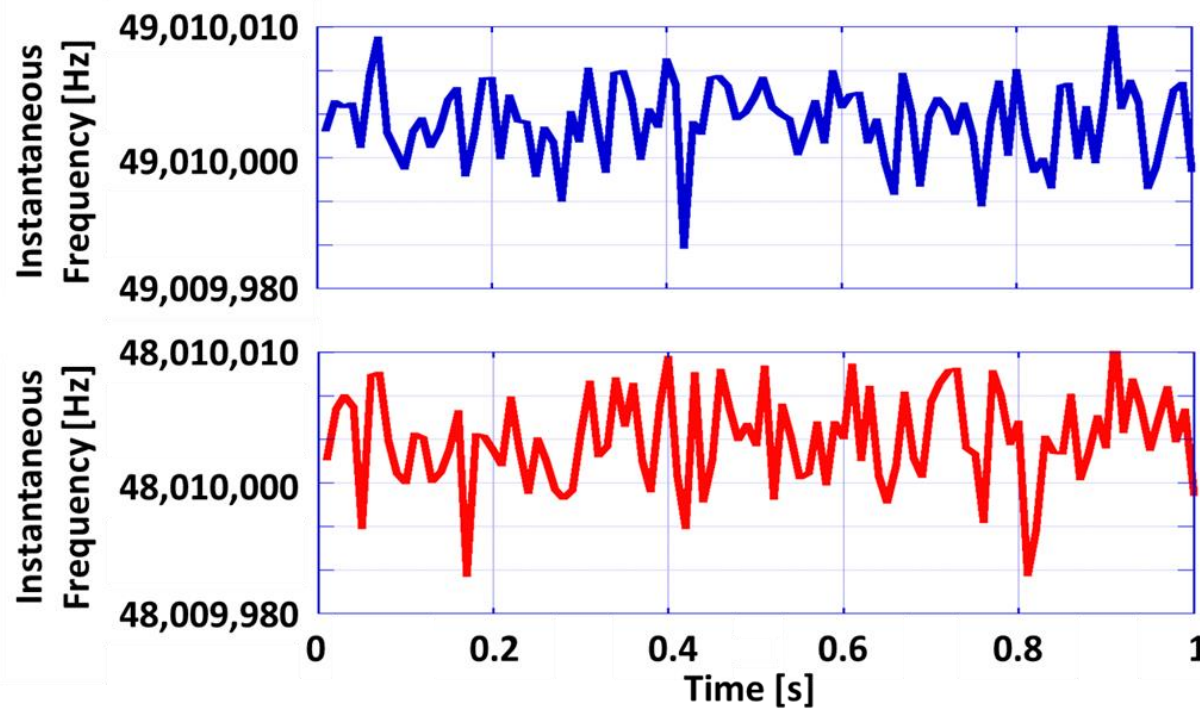


# ビート周波数とCW-THz波の測定結果

**$f_{beat1}$**

デジタルサイザーの  
サンプリングレート  
100MHz

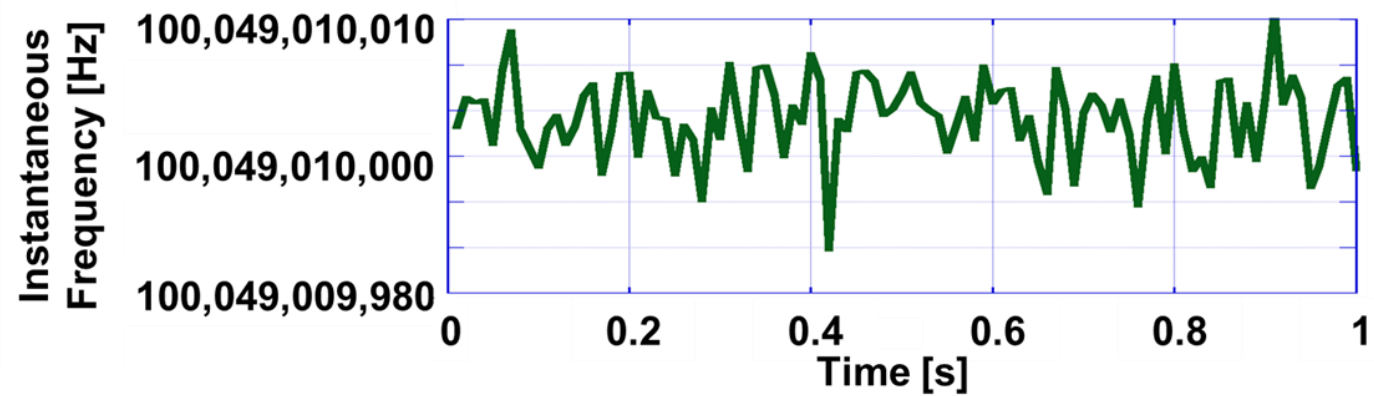
**$f_{beat2}$**

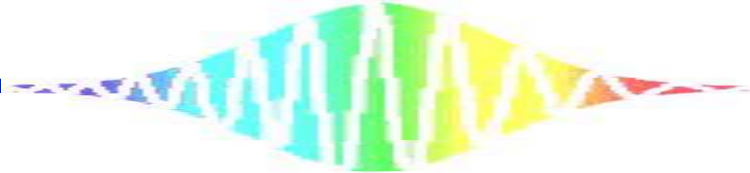


実験条件

- ・ 10ms計測
- ・ 積算100

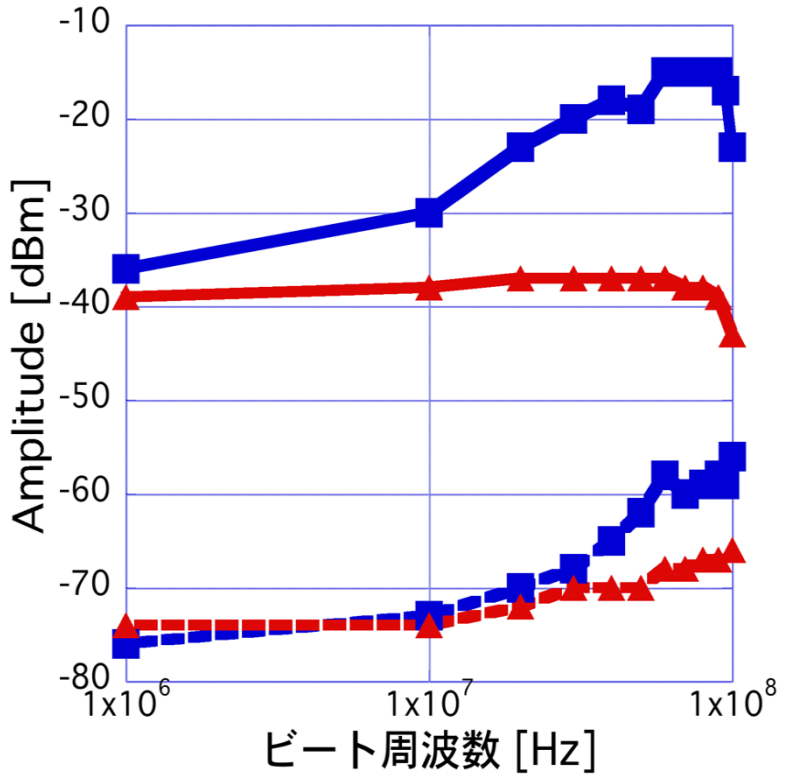
**$f_{THz}$**





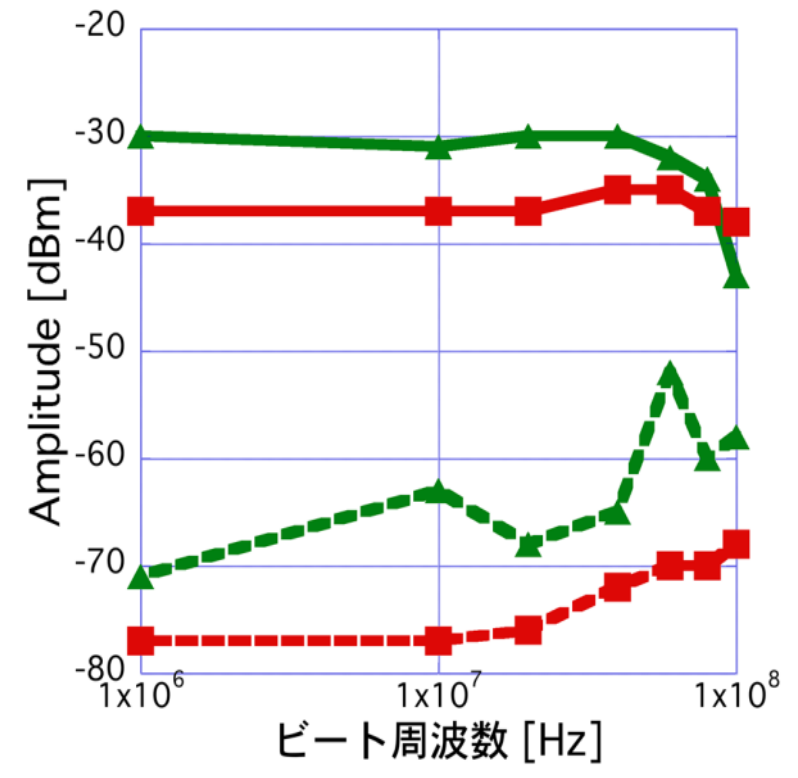
# 信号強度比較

- AD8015+SA-430F5 ビート信号
- ▲ 市販アンプ ビート信号
- AD8015+SA-430F5 ノイズ
- ▲ 市販アンプ ノイズ



**組み込み型**

- 市販アンプ ビート信号
- ▲ AD8015+SA-430F5() ビート信号
- 市販アンプ ノイズ
- ▲ AD8015+SA-430F5() ノイズ



**外付け型**