

# 研究報告

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

H26/4/9 M2 林 建太

# テラヘルツ無線通信

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

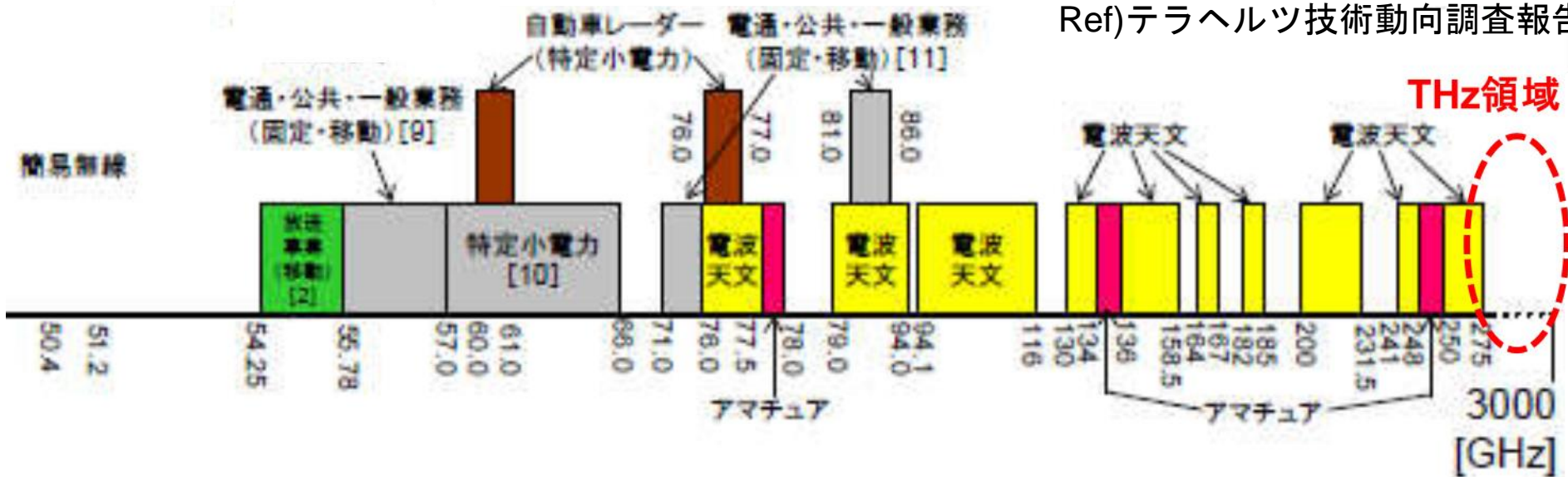


テンポラリーな回線や  
災害・緊急時のバック  
アップ回線

ホットスポットなどでの  
非接触瞬時データ転送

# 無線通信の周波数割り当て状況

Ref) テラヘルツ技術動向調査報告



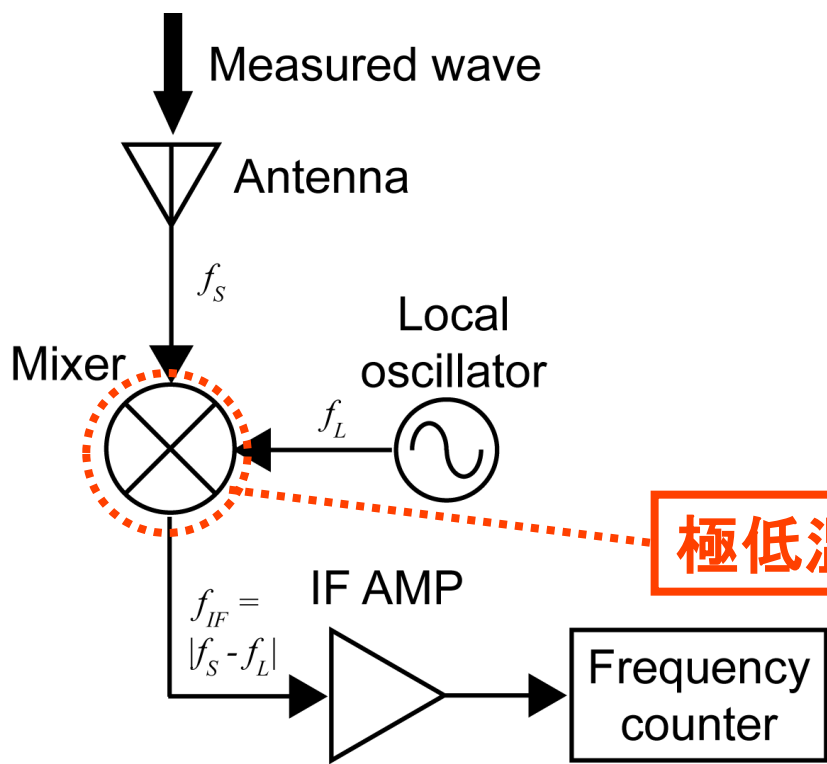
THz帯における周波数計測技術は  
十分に確立していない



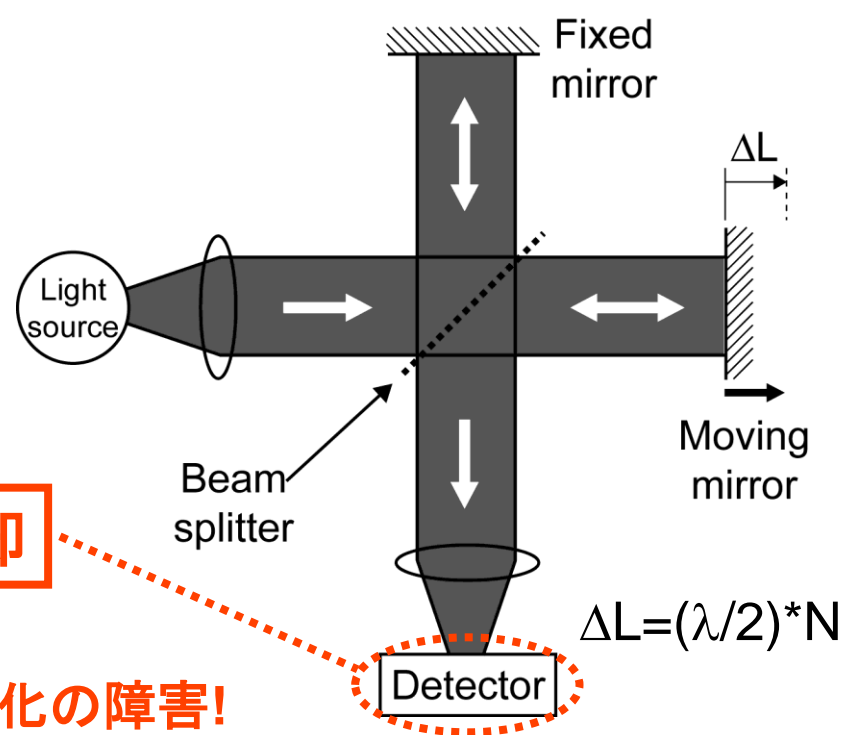
高精度なCW-THz波の周波数計測技術が  
求められている!

# 周波数計測の従来法

## 電気的手法 (ヘテロダイン)



## 光学的手法 (干渉計測)



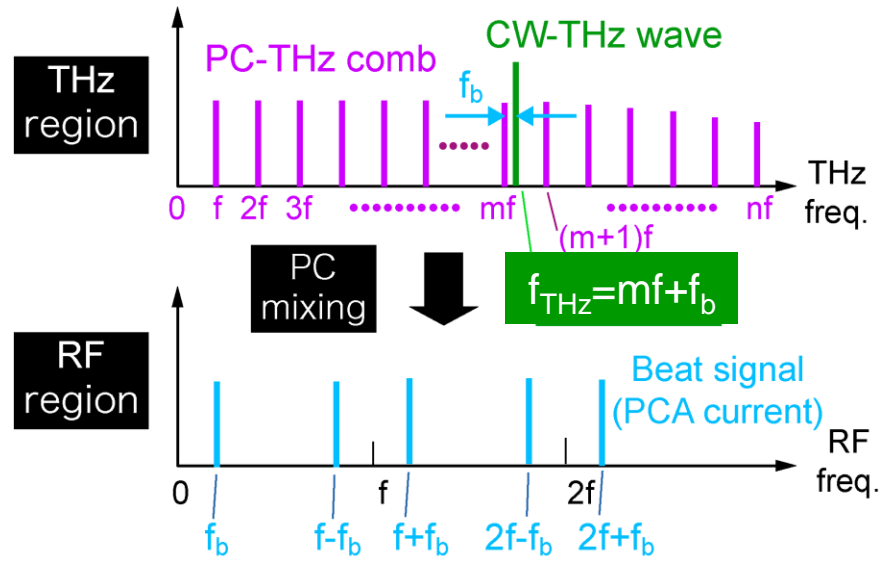
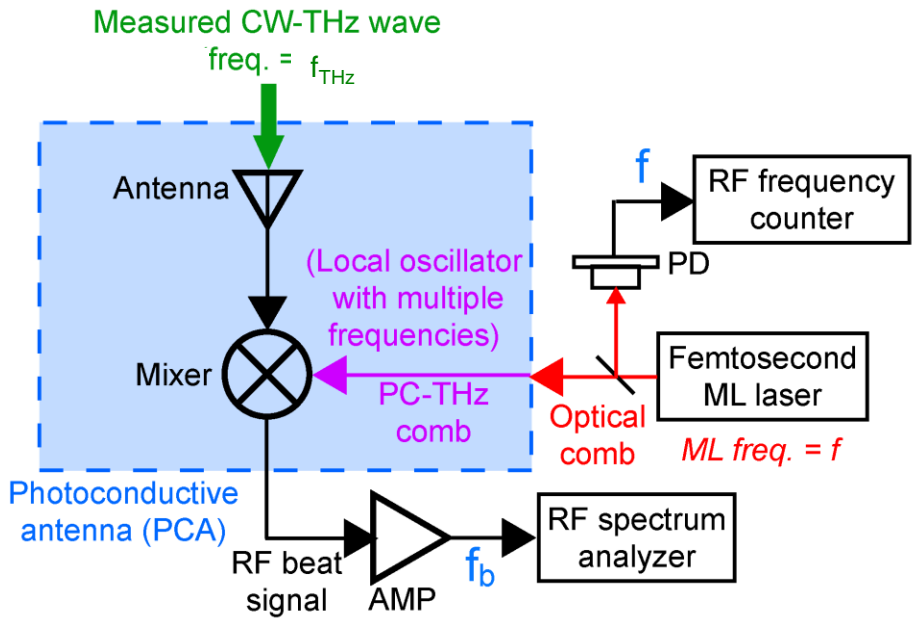
**極低温冷却**

**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領域をフルカバーできる新しい手法が必要!**

# 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

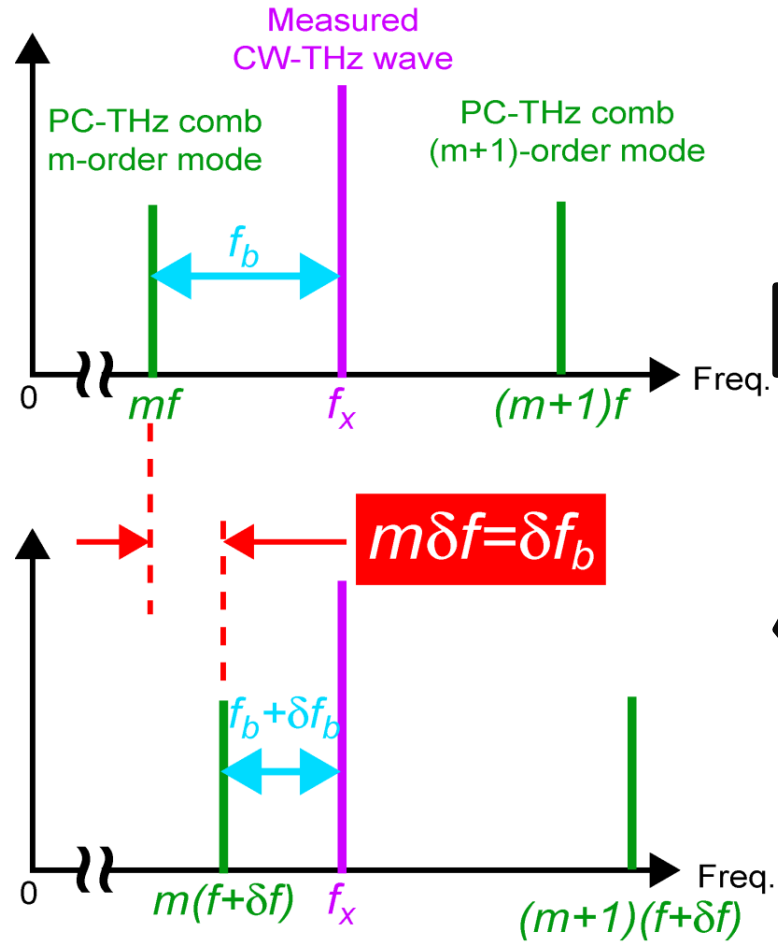


$f_{THz} = mf \pm f_b$

$m$ : コムの次数  
 $f$ : モード同期周波数  
 $f_b$ : 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 ( $f_b \rightarrow f_b + \delta f_b$ )

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

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

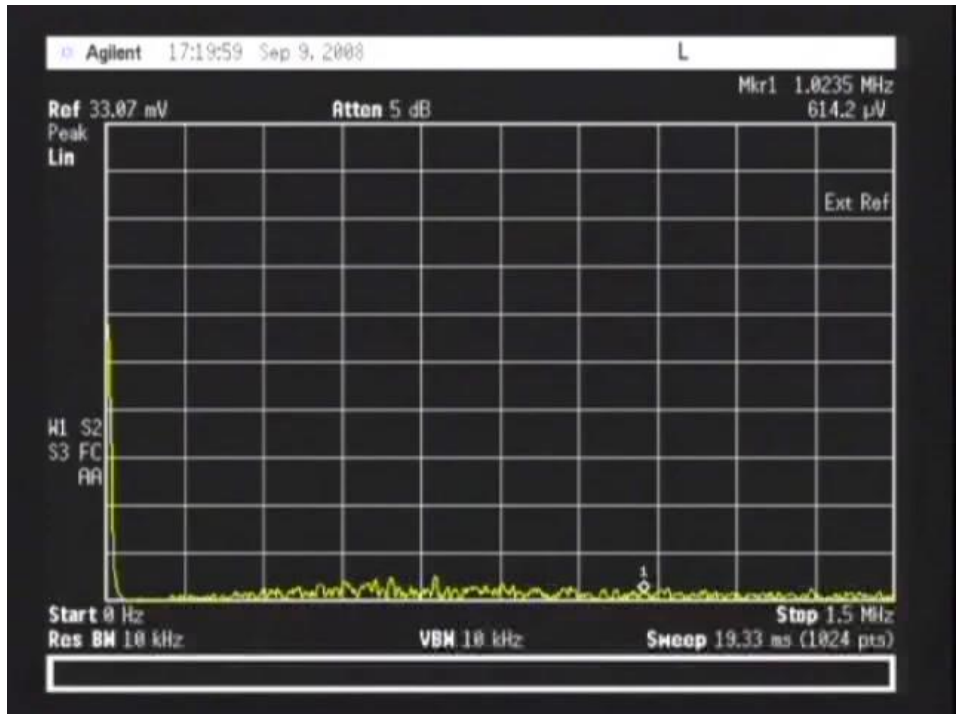
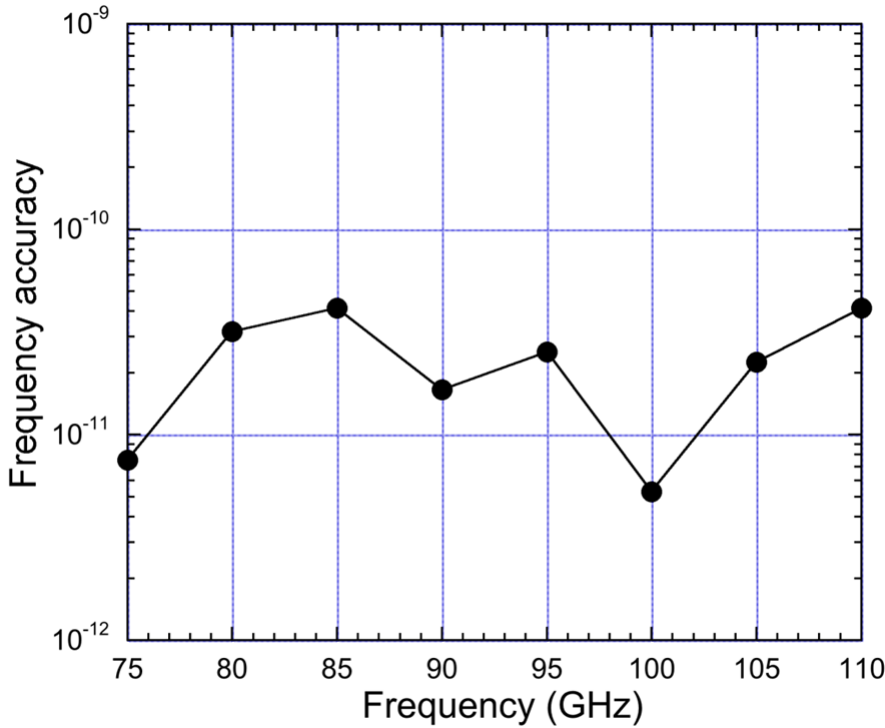


# 研究経過

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

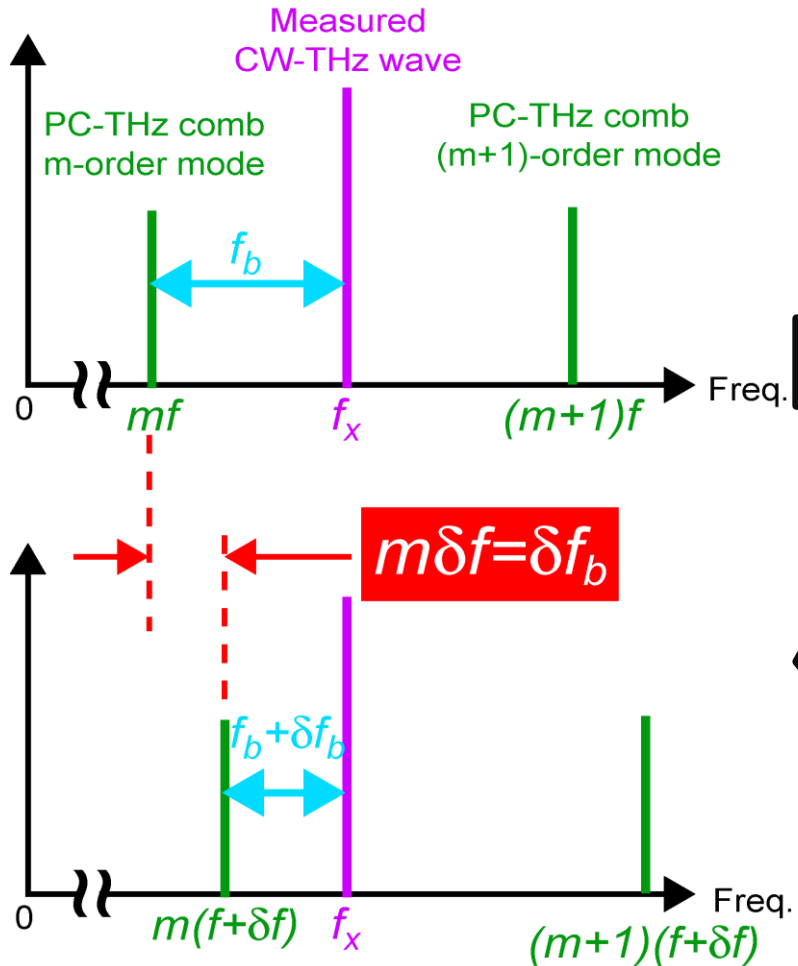
## 絶対周波数計測

## 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 ( $f \rightarrow f + \delta f$ )

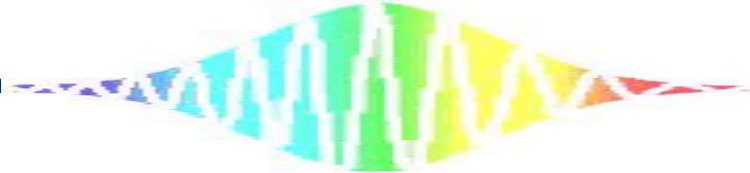
$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|}$$

2ステップ測定

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

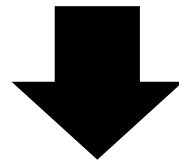
リアルタイムで絶対周波数を決定できない!  
(時々刻々と変化するCW-THz波は測定困難)





## 従来研究における問題点

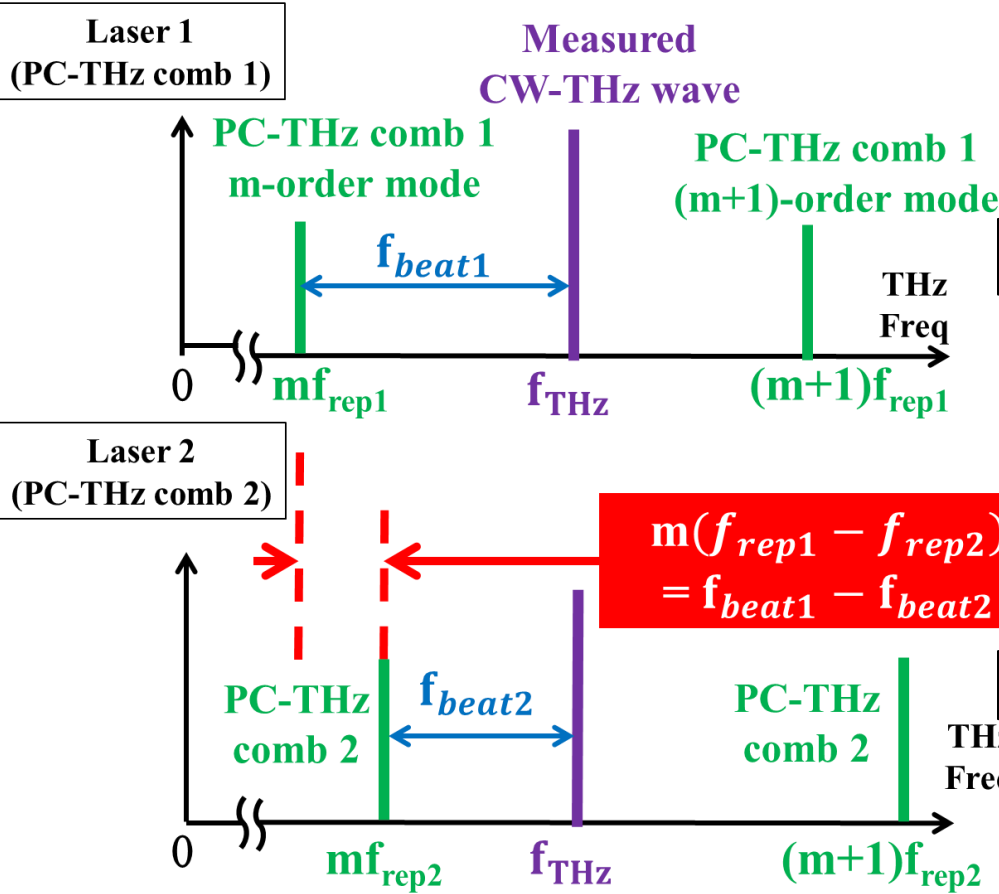
CW-THz波の絶対周波数をリアルタイムで決定出来ない！



## 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！

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

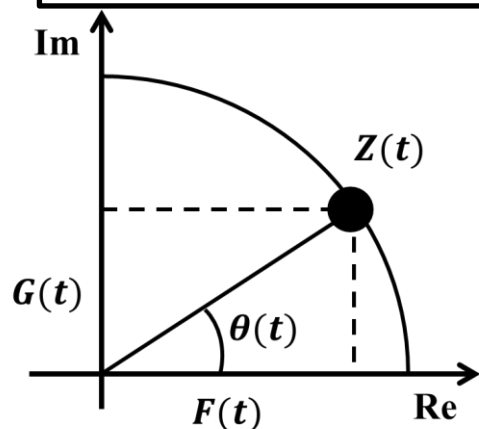
周波数カウンタで測定する場合、

- (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. 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



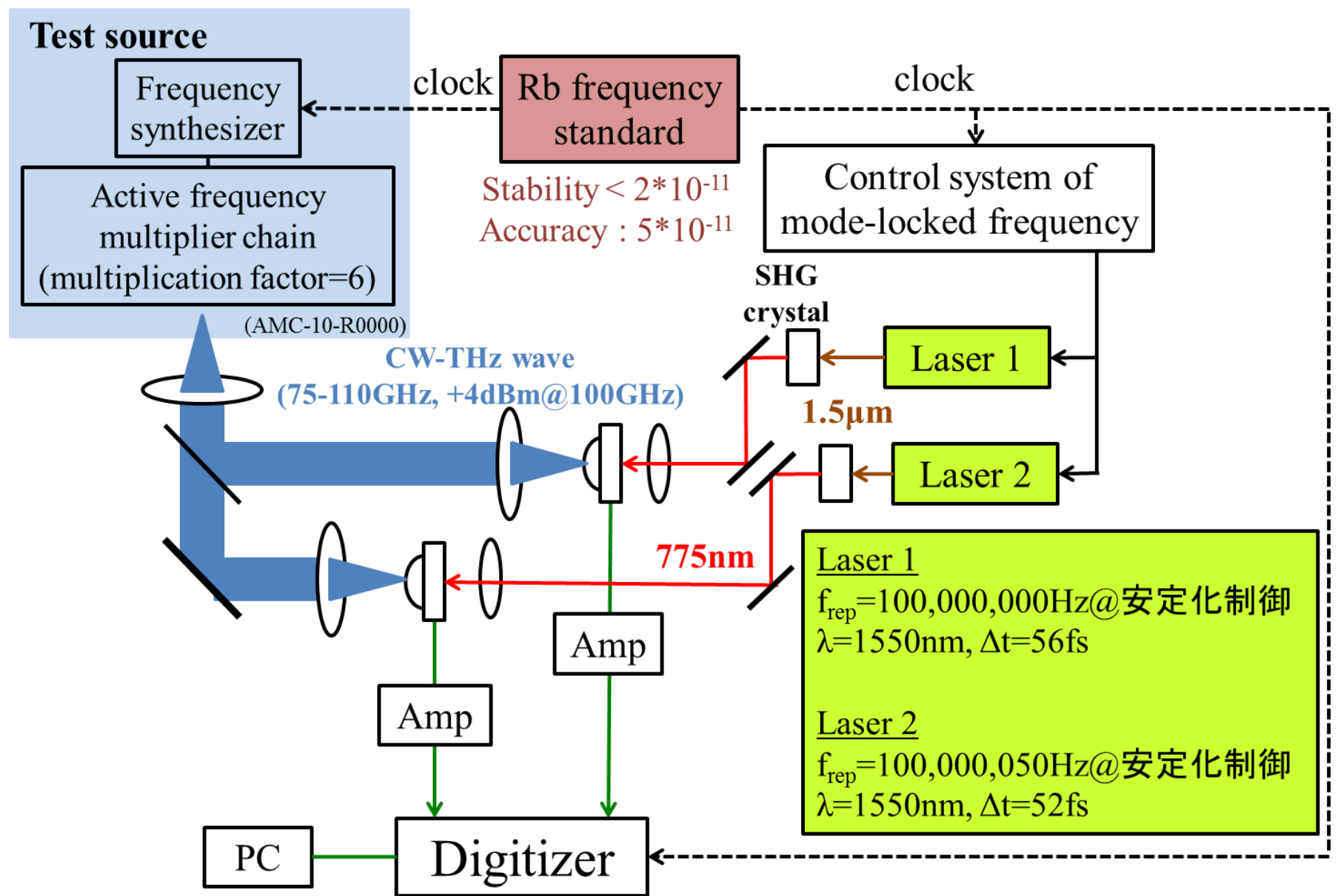
$$Z(t) = F(t) + iG(t) \text{ と表される}$$

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

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

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



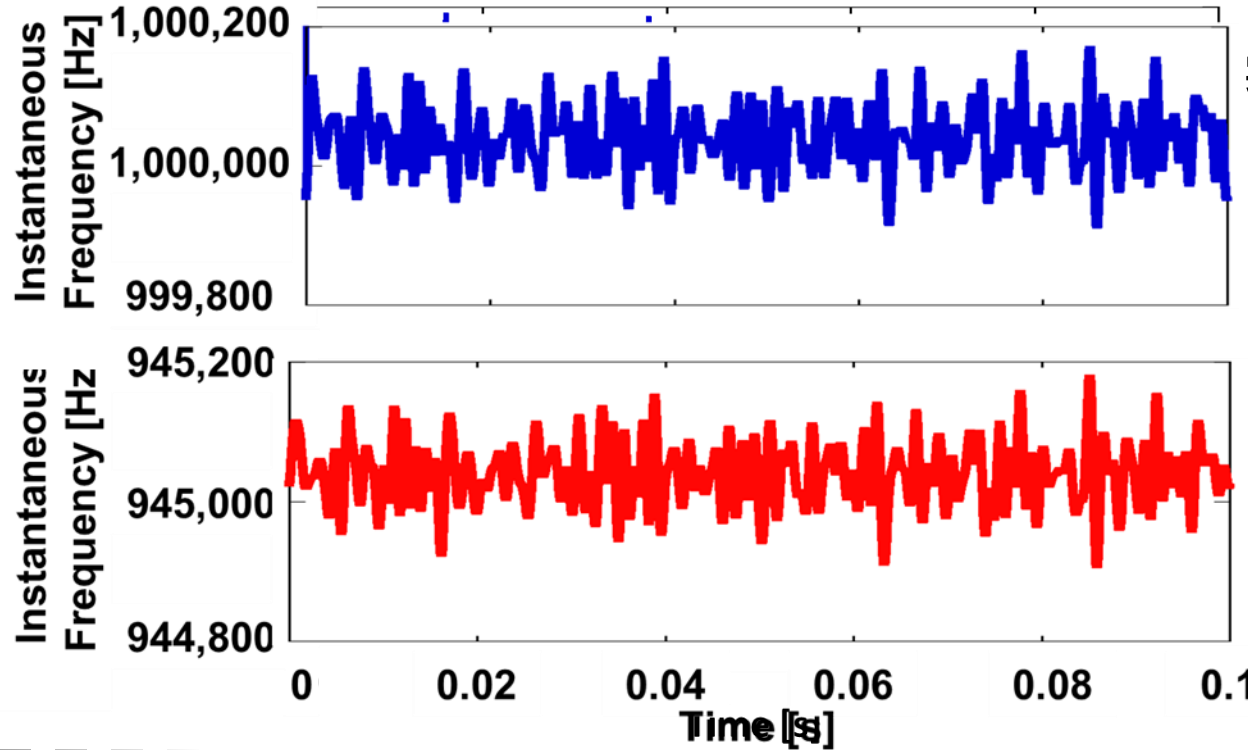


# ビート信号とCW-THz波の測定結果

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

デジタイザーの  
サンプリングレート  
10MHz

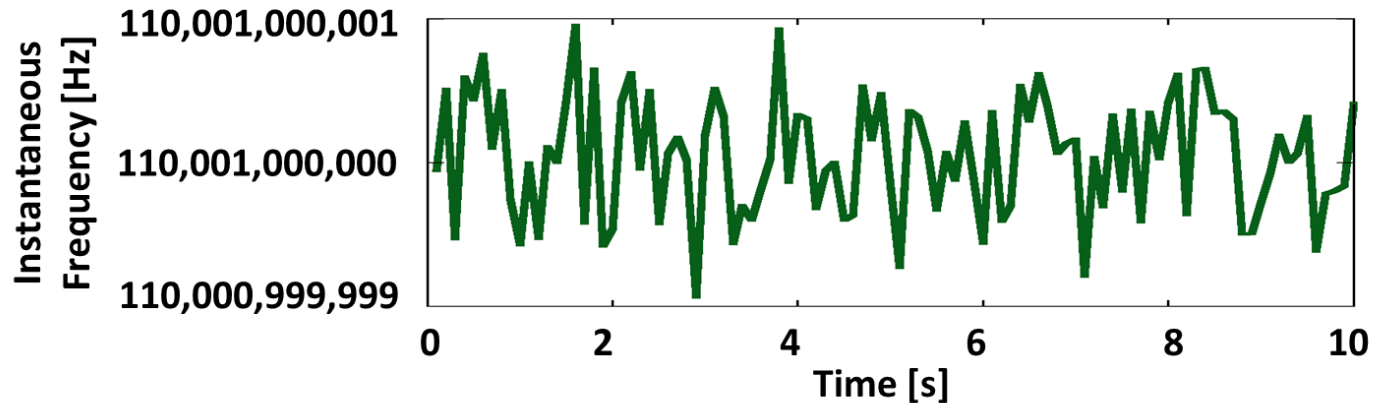
**f<sub>beat2</sub>**



実験条件

- ・ 100ms計測
- ・ 積算100

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



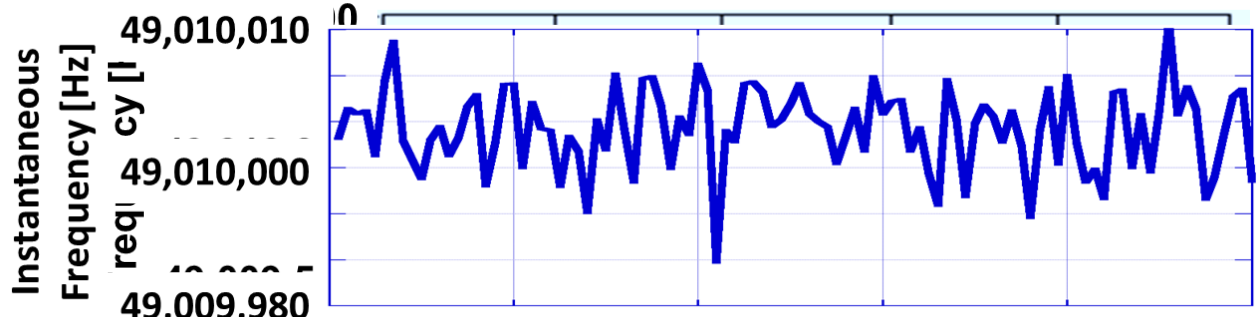


# ビート周波数とCW-THz波の測定結果

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

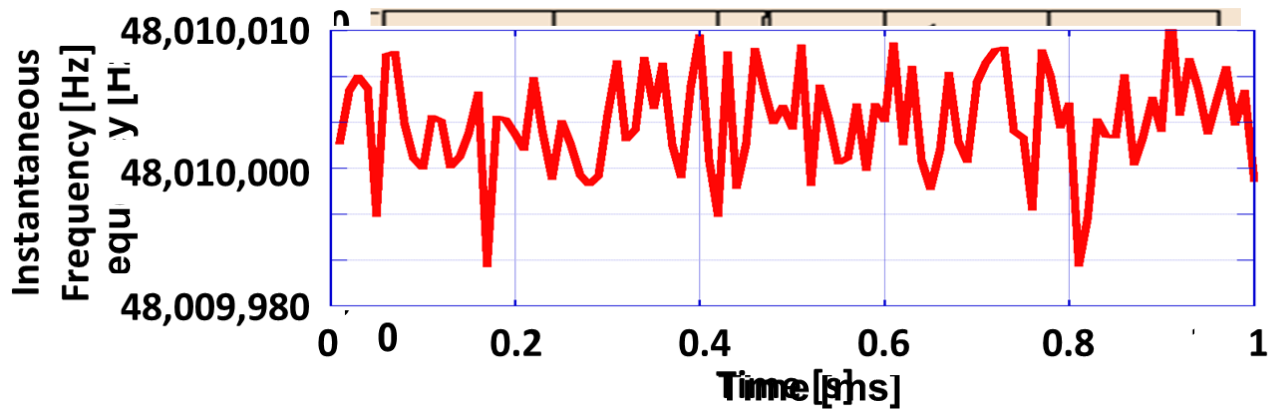
デジタルの  
サンプリングレート  
100MHz

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

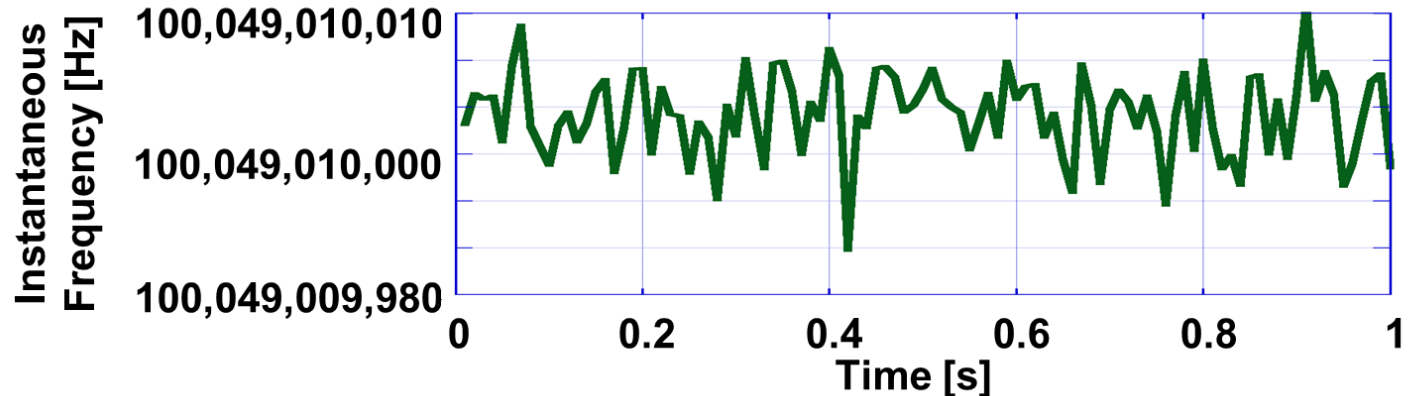


実験条件

- ・ 10ms計測
- ・ 積算100

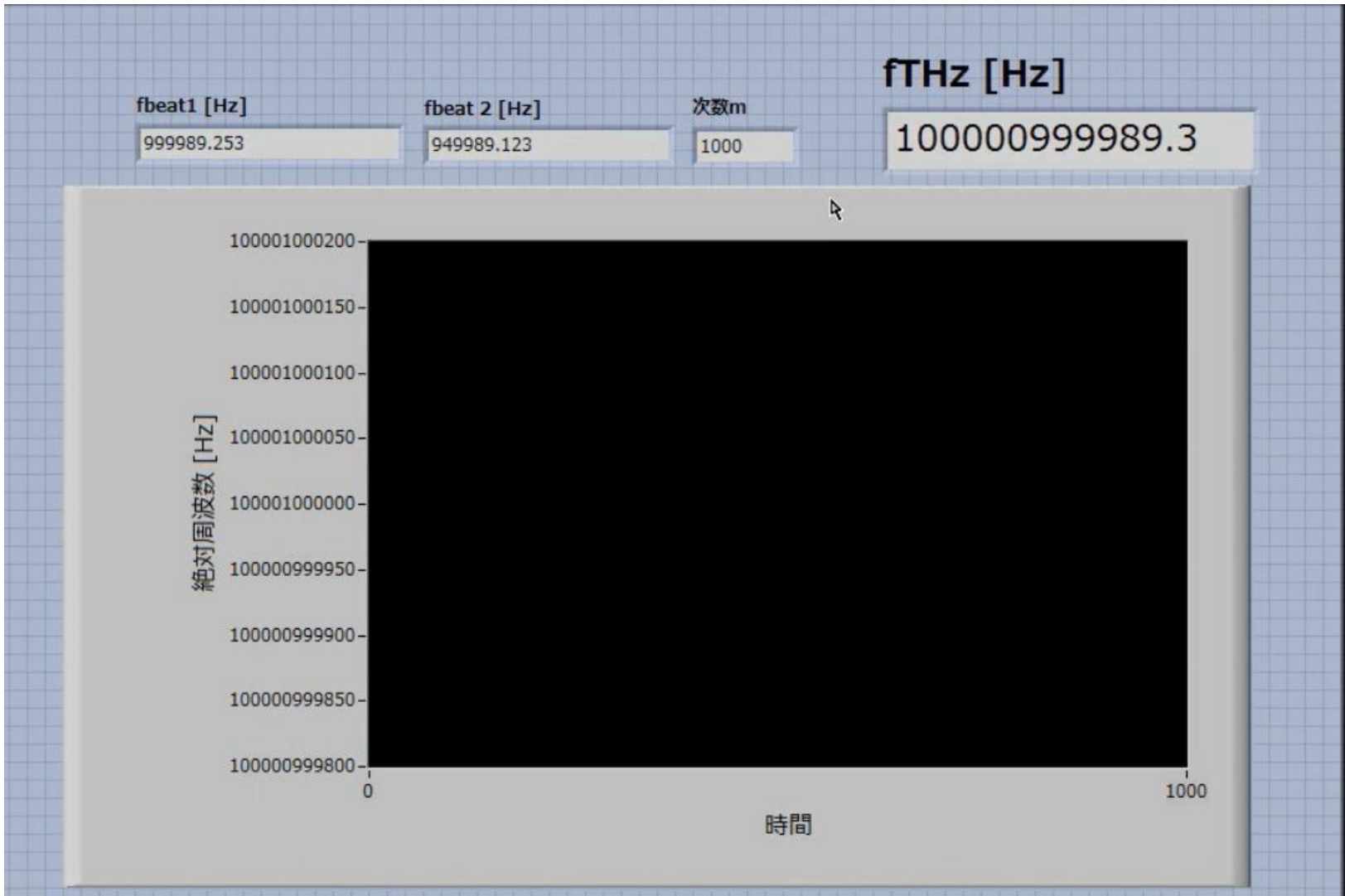


**f<sub>THz</sub>**



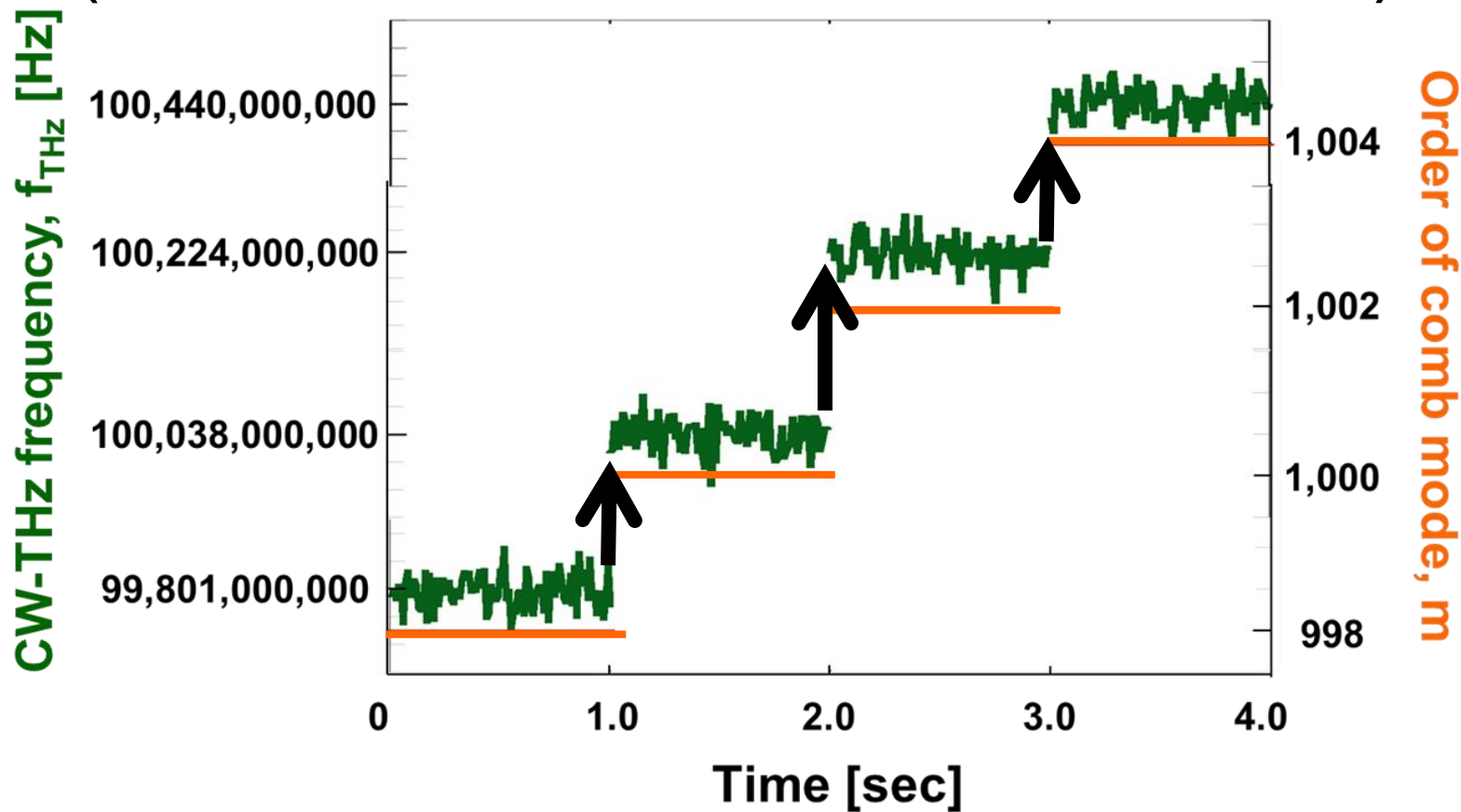
# CW-THz波のリアルタイムモニタリング①

(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

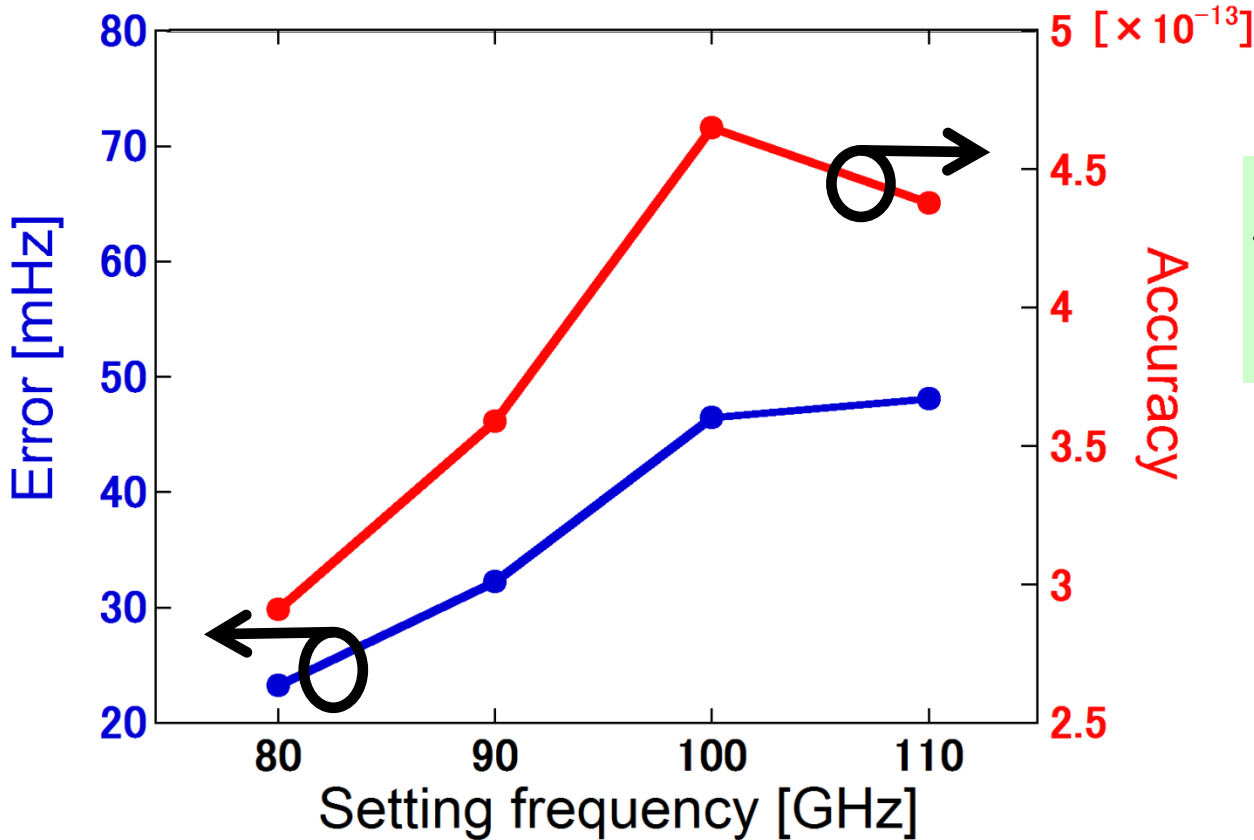
(周波数変動 = 0.1THz + 200MHz)



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

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

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

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

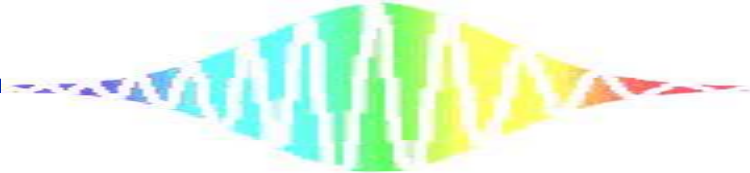
$$\Delta f_{beat1} = 21\text{mHz}$$

$$m = 800 \sim 1100$$



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

本実験での平均精度 =  $3.9 \times 10^{-13}$

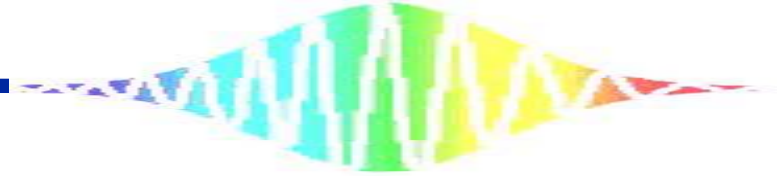


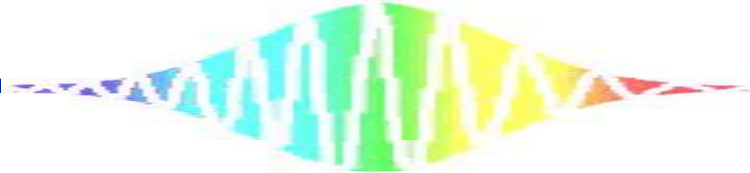
## まとめ

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

- ・ 絶対周波数計測関係のデータを取りきる
- ・ THz-QCLとのビート信号検出



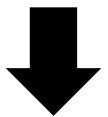


# 背景

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)

