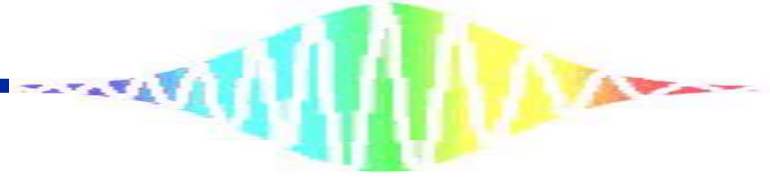


# デュアルTHzコム間ビート 信号の抽出とその応用

徳島大学

市川竜嗣、安井武史



# 共同研究者

電通大 美濃島薫 教授  
産総研 稲葉肇 博士

# 光コムとTHzコム

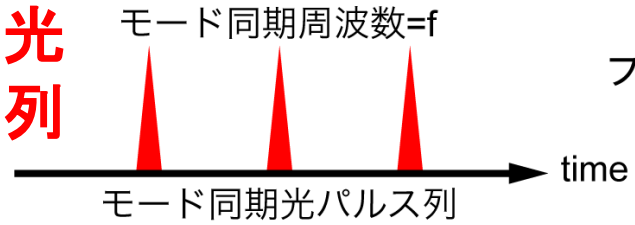
2005年ノーベル物理学賞

時間領域

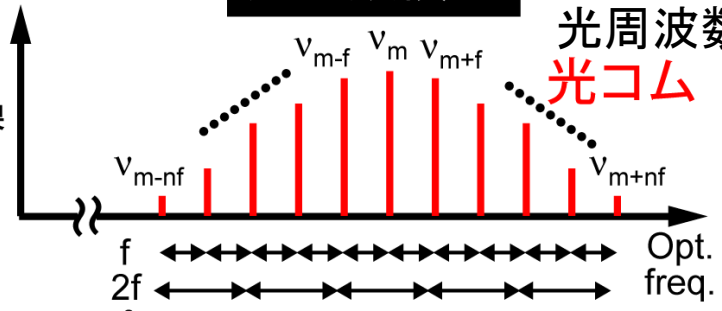
周波数領域

超精密分光  
光周波数標準  
光コム

フェムト秒光  
パルス列

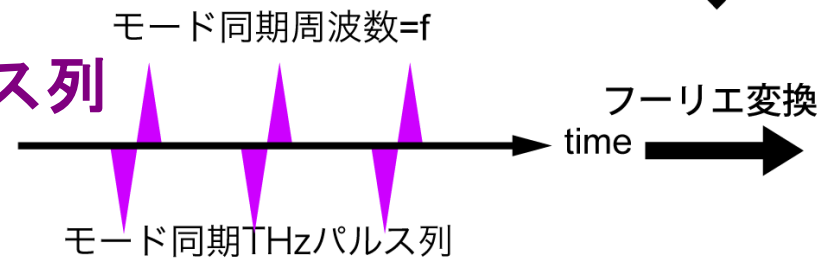


フーリエ変換

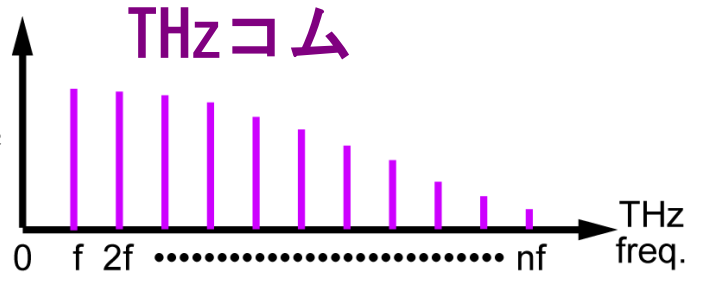


光伝導アンテナ or 非線形光学結晶

THz  
パルス列



フーリエ変換



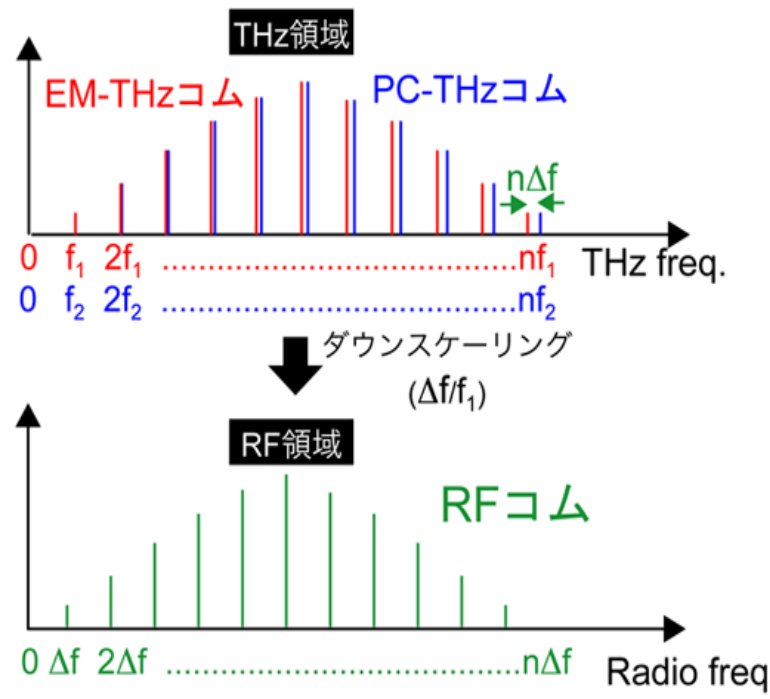
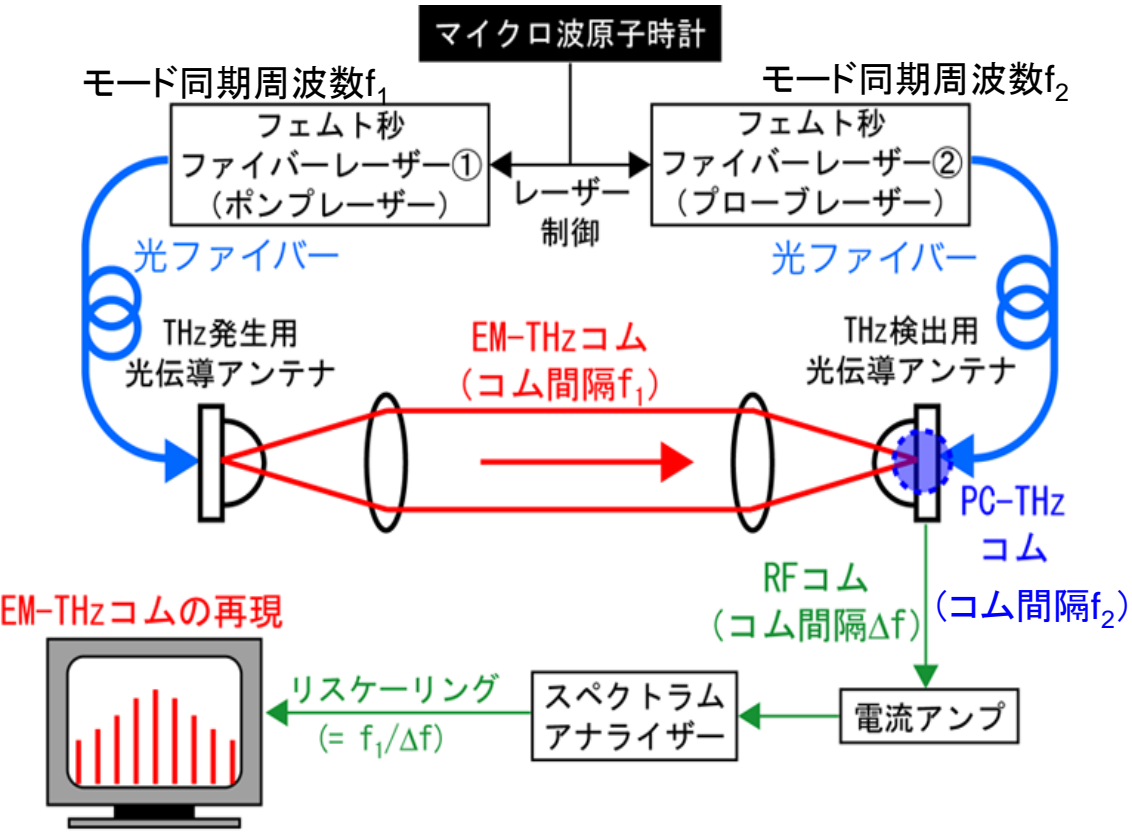
光領域やTHz領域における超精密周波数ものさし

(数万～数十万本に及ぶ狭線幅CWレーザー光が等間隔で並んだ集合体)

(単純性, 広帯域選択性, 高スペクトル純度, 周波数逡倍性)

# デュアルTHzコム利用@周波数領域

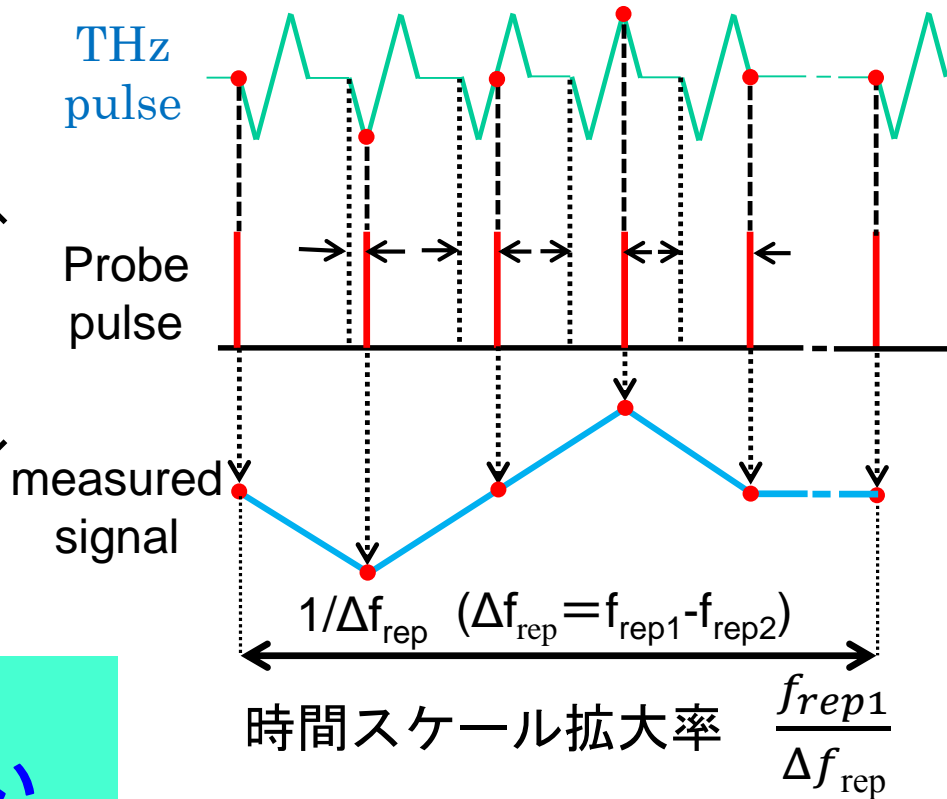
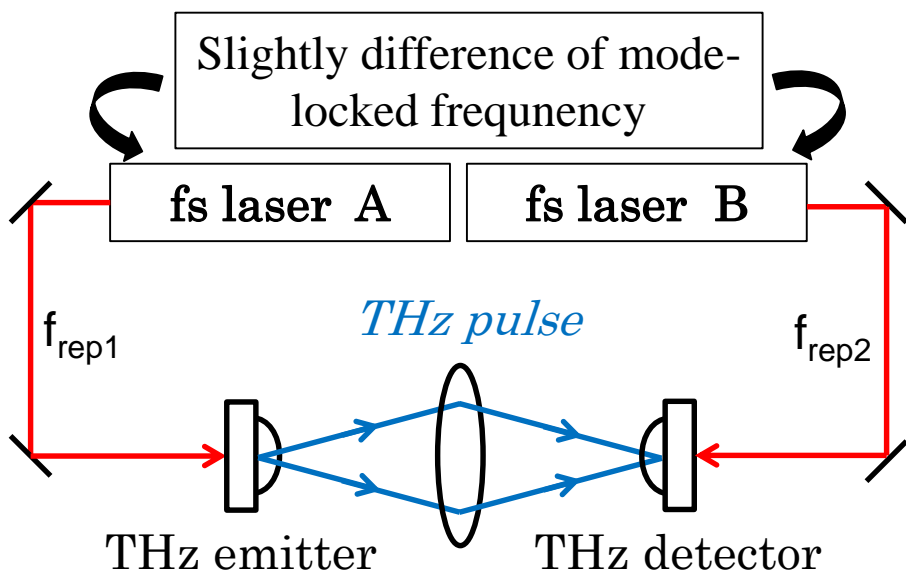
## デュアルTHzコム分光法



**CW-THz波の狭線幅特性とTHzパルスの広帯域スペクトル特性の融合  
マイクロ波周波数標準へのトレーサビリティ**

# デュアルTHzコムの利用@時間領域

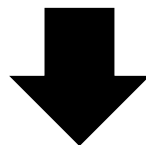
## 非同期光サンプリング式THz-TDS (ASOPS-THz-TDS)



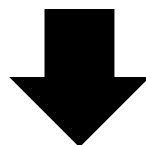
- ・ 機械式ステージが不要
- ・ 光路長を合わせる必要がない
- ・ 長い測定時間窓の取得が可能  
→ 周波数分解能が高い
- ・ 実時間測定 (1周期 =  $1/\Delta f_{\text{rep}}$ )

ピコ秒オーダーの時間波形をマイクロ秒オーダーまで時間スケールを拡大

# デュアルTHzコム分光法, ASOPS-THz-TDS



コム間隔 $f_{\text{rep}}$ とコム間ビート $\Delta f_{\text{rep}}$ を介して  
周波数(時間)スケールを変換

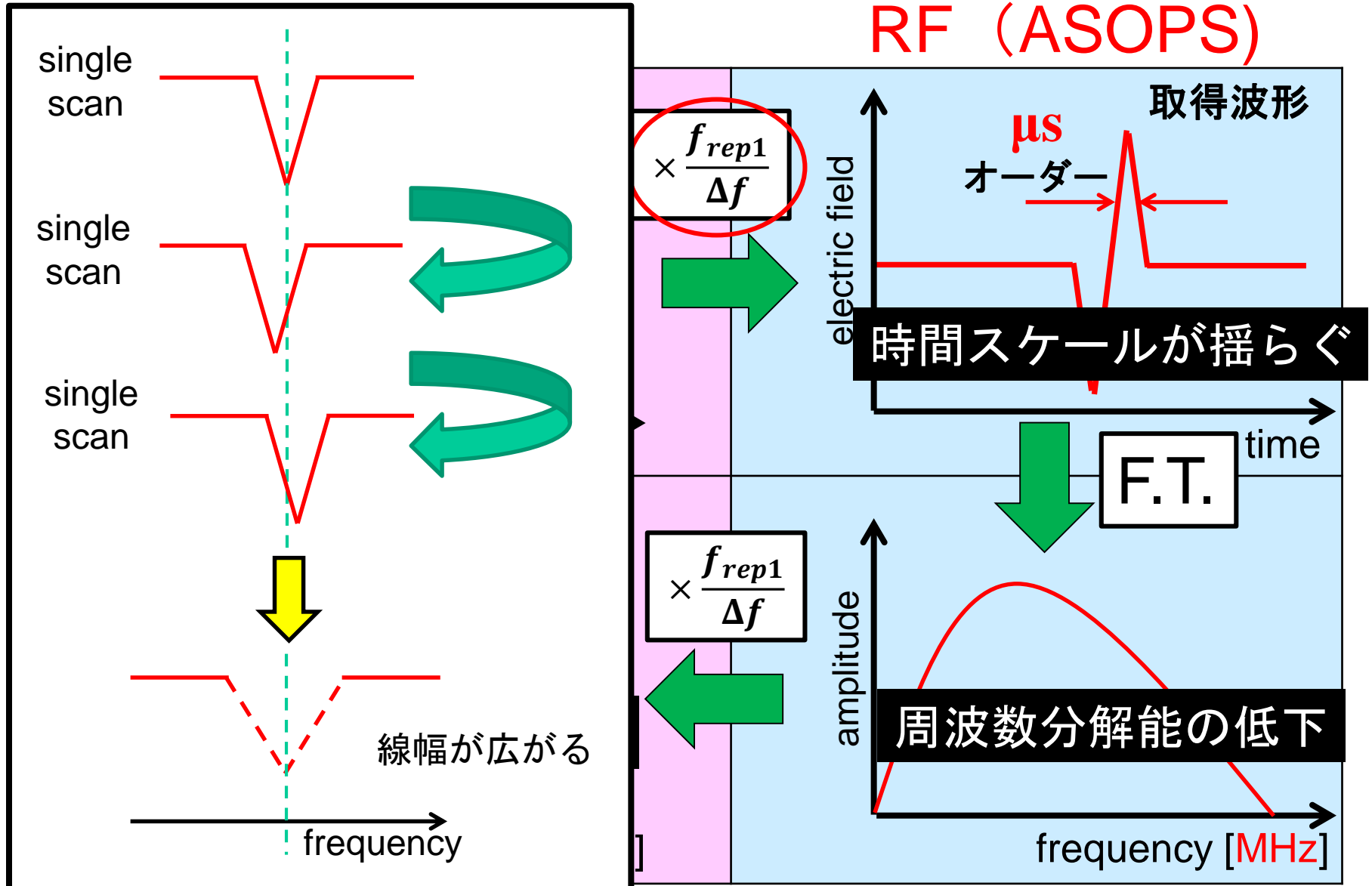


$f_{\text{rep}}$ : 直接制御@周波数標準

$\Delta f_{\text{rep}}$ : 間接制御@揺らぎ残存

$\Delta f_{\text{rep}}$  揺らぎ(レーザー間タイミングジッター)が  
スペクトルの周波数不確かさを決定

# ASOPS-THz-TDSにおける信号の流れ



# デュアルTHzコム分光法, ASOPS-THz-TDS

コム間隔 $f_{\text{rep}}$ とコム間ビート $\Delta f_{\text{rep}}$ を介して  
周波数(時間)スケールを変換

$f_{\text{rep}}$ : 直接制御@周波数標準

$\Delta f_{\text{rep}}$ : 間接制御@揺らぎ残存

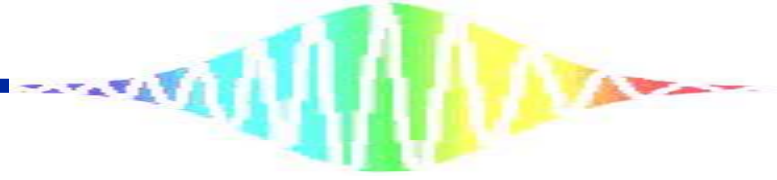
$\Delta f_{\text{rep}}$  揺らぎ(レーザー間タイミングジッター)が  
スペクトルの周波数不確かさを決定

高次コム間ビート(デュアルTHzコム間ビート) $m\Delta f_{\text{rep}}$   
の抽出が必要!



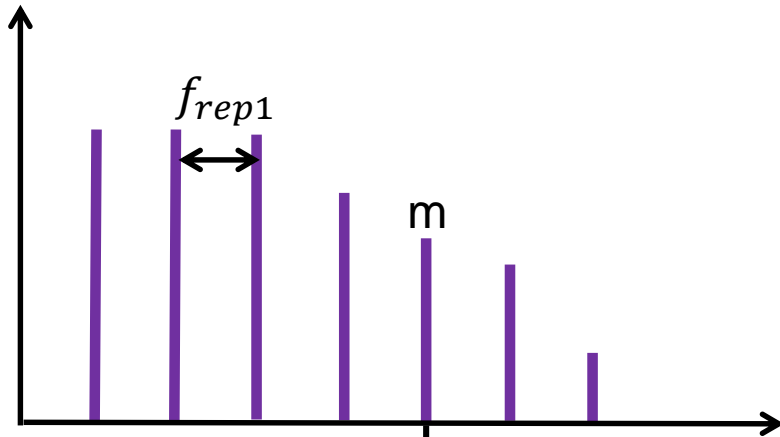
# 本研究の報告内容

- ①デュアルTHzスペアナを用いたデュアルTHzコム間ビートの抽出
- ②ASOPS-THz-TDSにおけるタイミングジッタの抑制
- ③アダプティブ・サンプリングへの応用



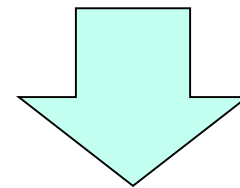
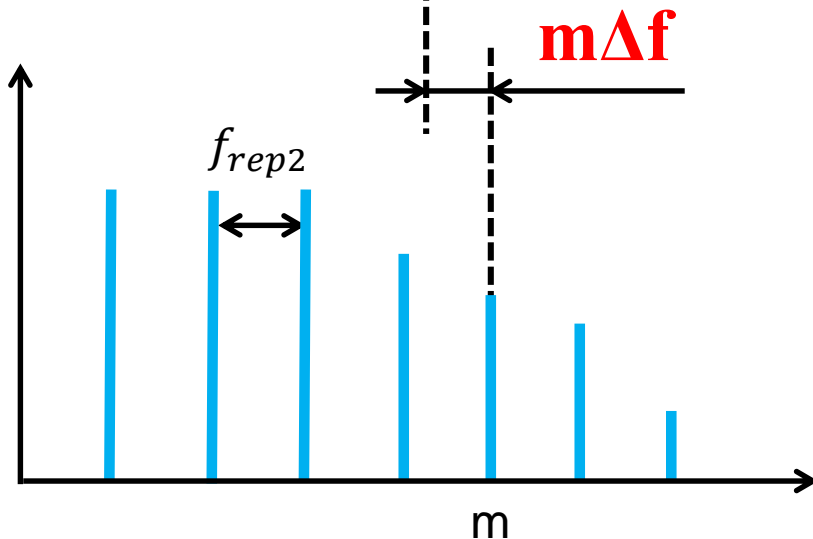
# ①デュアルTHzスペアナを用いた デュアルTHzコム間ビートの抽出

# デュアルTHzコム間ビートの抽出



- ・ 一本のコムは非常に微弱
- ・ 一本のみを分離できない

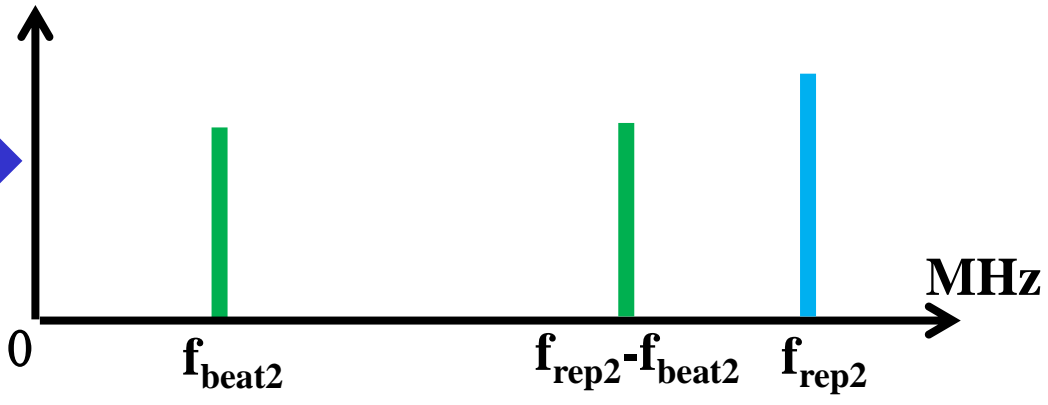
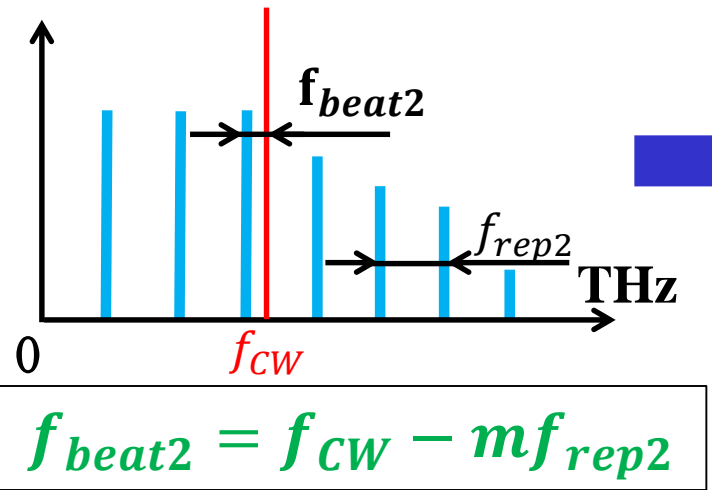
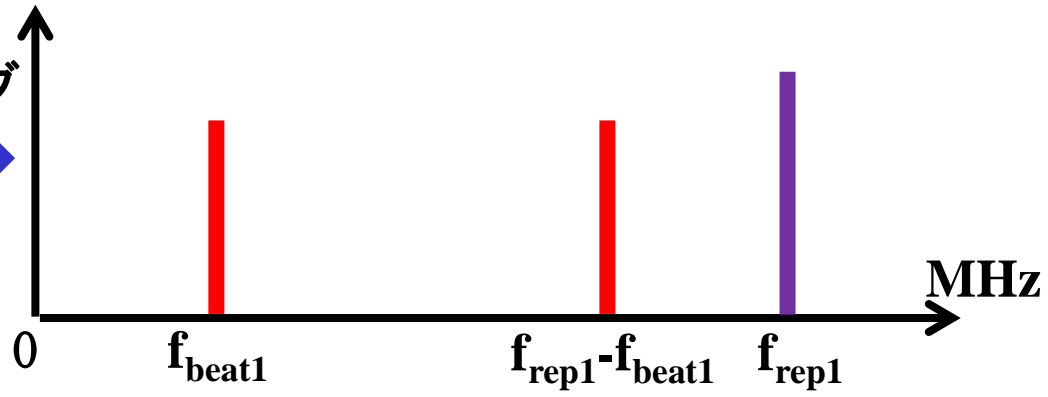
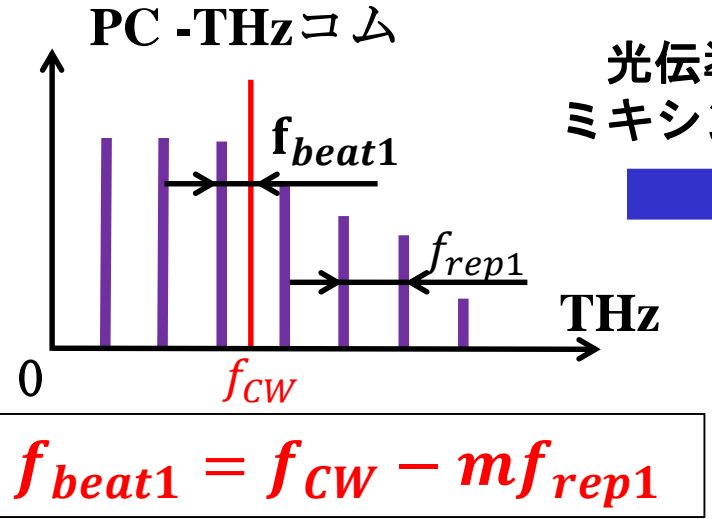
$m\Delta f$  を抽出するためには



デュアルTHzスペアナ  
を用いる

# デュアルTHzスペアナを用いた コム間ビートの抽出

ref) Shuko Yokoyama et al., Optics Express, Vol. 16, Issue 17, pp. 13052-13061 (2008)

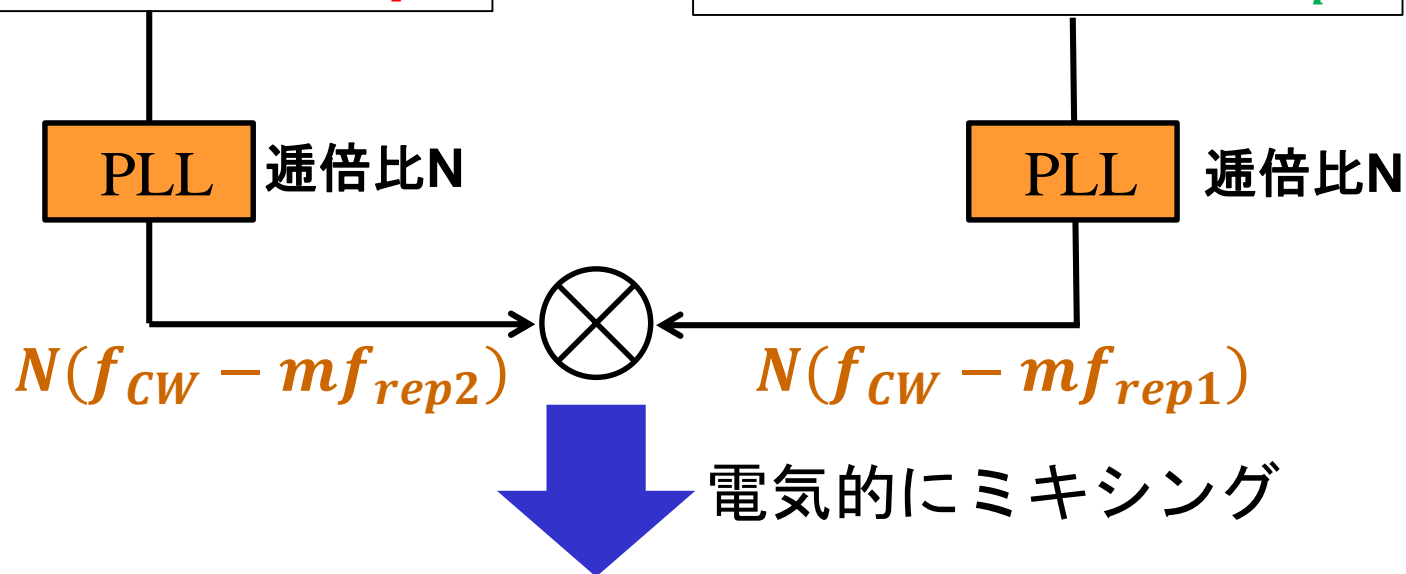


# デュアルTHzスペアナを用いた コム間ビートの抽出

ref) Shuko Yokoyama et al., Optics Express, Vol. 16, Issue 17, pp. 13052-13061 (2008)

$$f_{beat1} = f_{CW} - m f_{rep1}$$

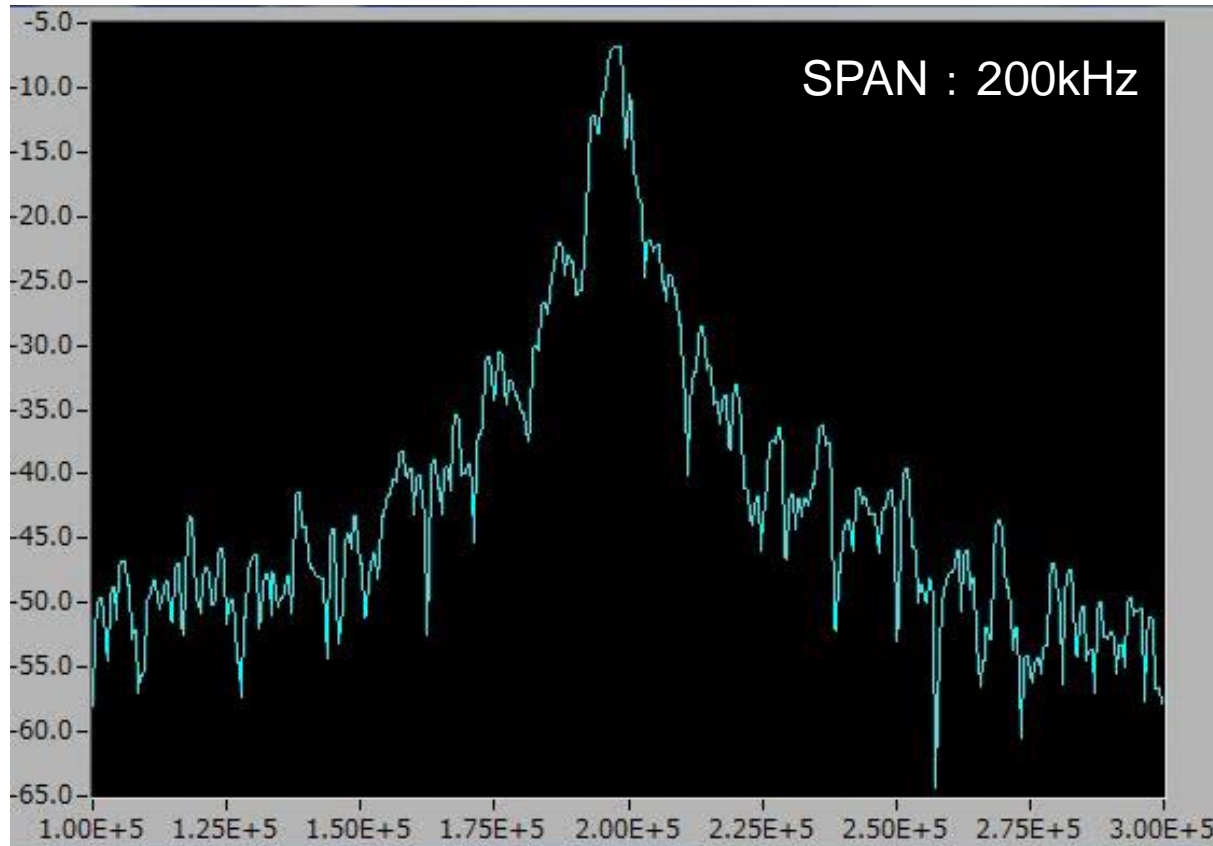
$$f_{beat2} = f_{CW} - m f_{rep2}$$



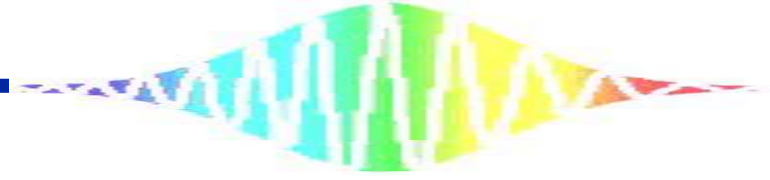
$$f_{beat1} - f_{beat2} = N \times m (f_{rep2} - f_{rep1}) = N \times m \Delta f_{rep}$$

**$N \times m$  次のコム間ビートの抽出**

# デュアルTHzコム間ビートの RFスペクトル



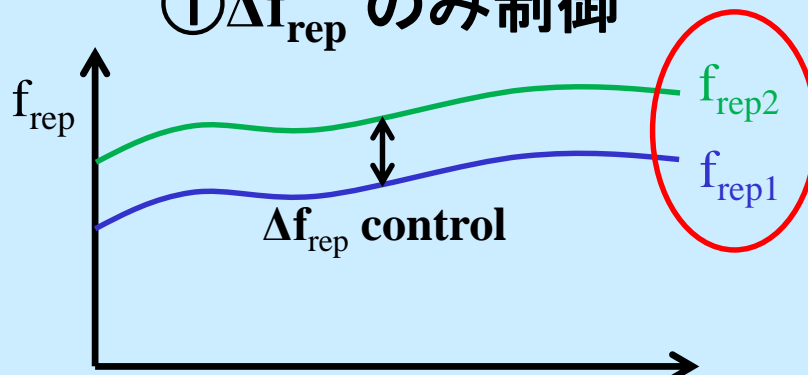
$$N \times m \Delta f_{rep} = 40 \times 1000 \text{ 次} \times 5 \text{ Hz} \approx 200 \text{ kHz}$$



## ②ASOPS-THz-TDSにおけるタイミングジッターの抑制

# ASOPSにおけるレーザー制御法

①  $\Delta f_{\text{rep}}$  のみ制御



$f_{\text{rep}}$

$\Delta f_{\text{rep}}$  control

$f_{\text{rep}2}$

$f_{\text{rep}1}$

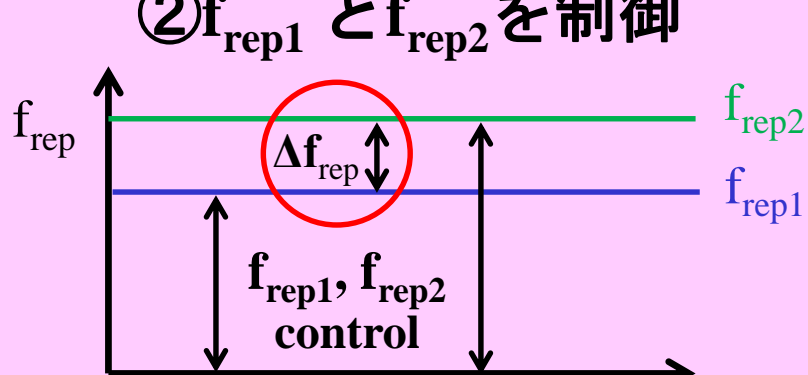
time

$\Delta f_{\text{rep}}$  を直接安定化  
( $f_{\text{rep}1}$  はフリーラン)

ref) A. Bartels et al. Opt. Express, Vol.14, 430-437 (2006)

$\Delta f_{\text{rep}} \rightarrow$  安定化  
 $f_{\text{rep}} \rightarrow$  不安定

②  $f_{\text{rep}1}$  と  $f_{\text{rep}2}$  を制御



$f_{\text{rep}}$

$\Delta f_{\text{rep}}$

$f_{\text{rep}2}$

$f_{\text{rep}1}$

time

$f_{\text{rep}1}, f_{\text{rep}2}$  control

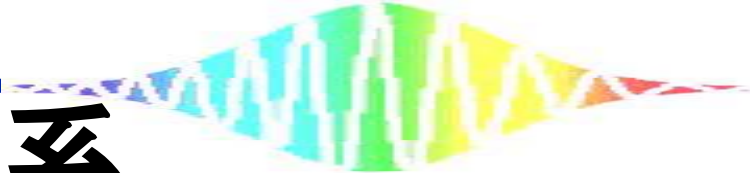
$f_{\text{rep}1}$  と  $f_{\text{rep}2}$  を直接安定化  
 $\Delta f_{\text{rep}}$  を間接安定化

ref) T. Yasui et al. Opt. Lett., Vol. 35, 1689-1691 (2010).

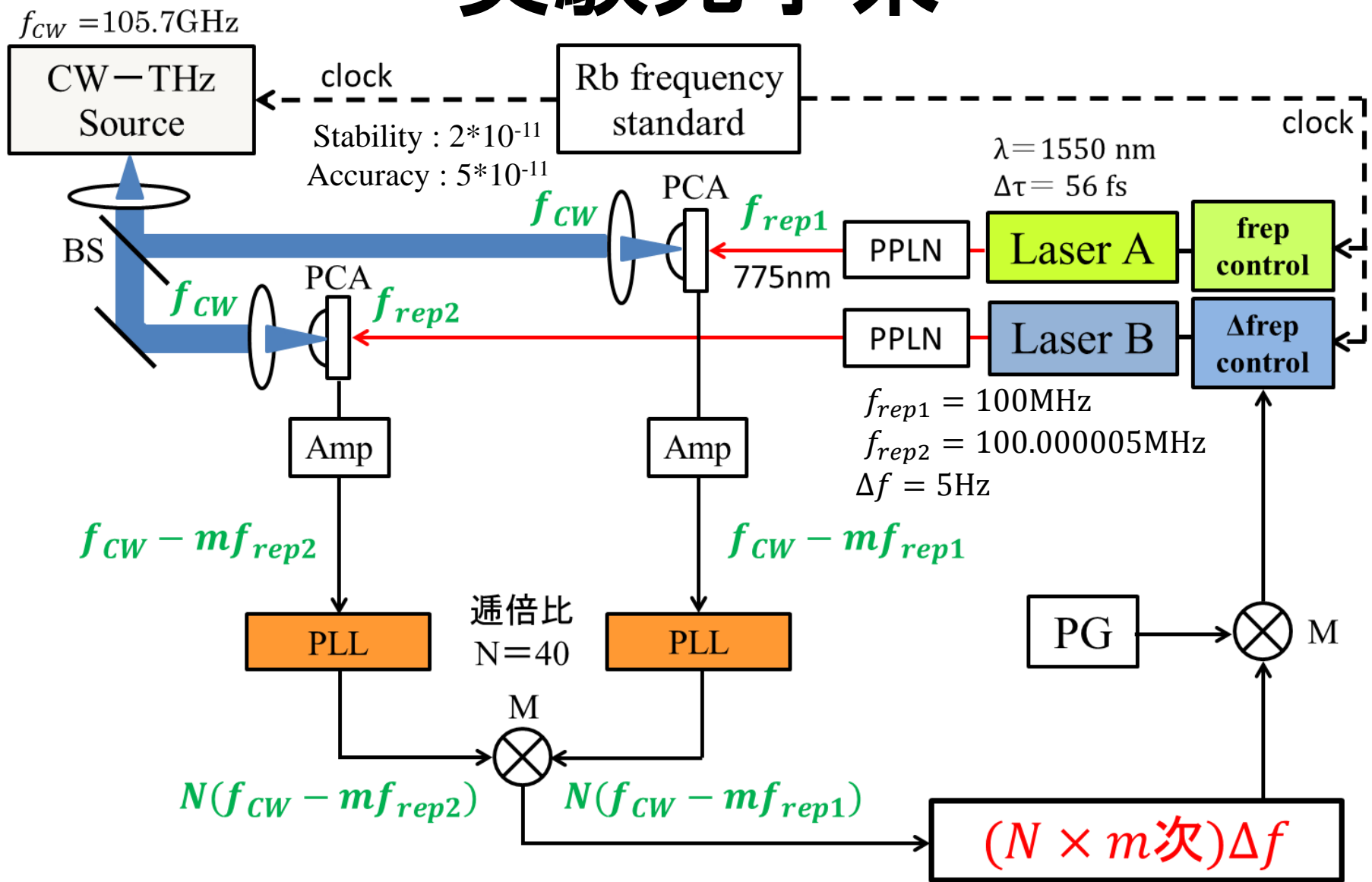
$f_{\text{rep}} \rightarrow$  安定化  
 $\Delta f_{\text{rep}} \rightarrow$  不安定

$f_{\text{rep}}$  と  $\Delta f_{\text{rep}}$  両方の安定化が必要！





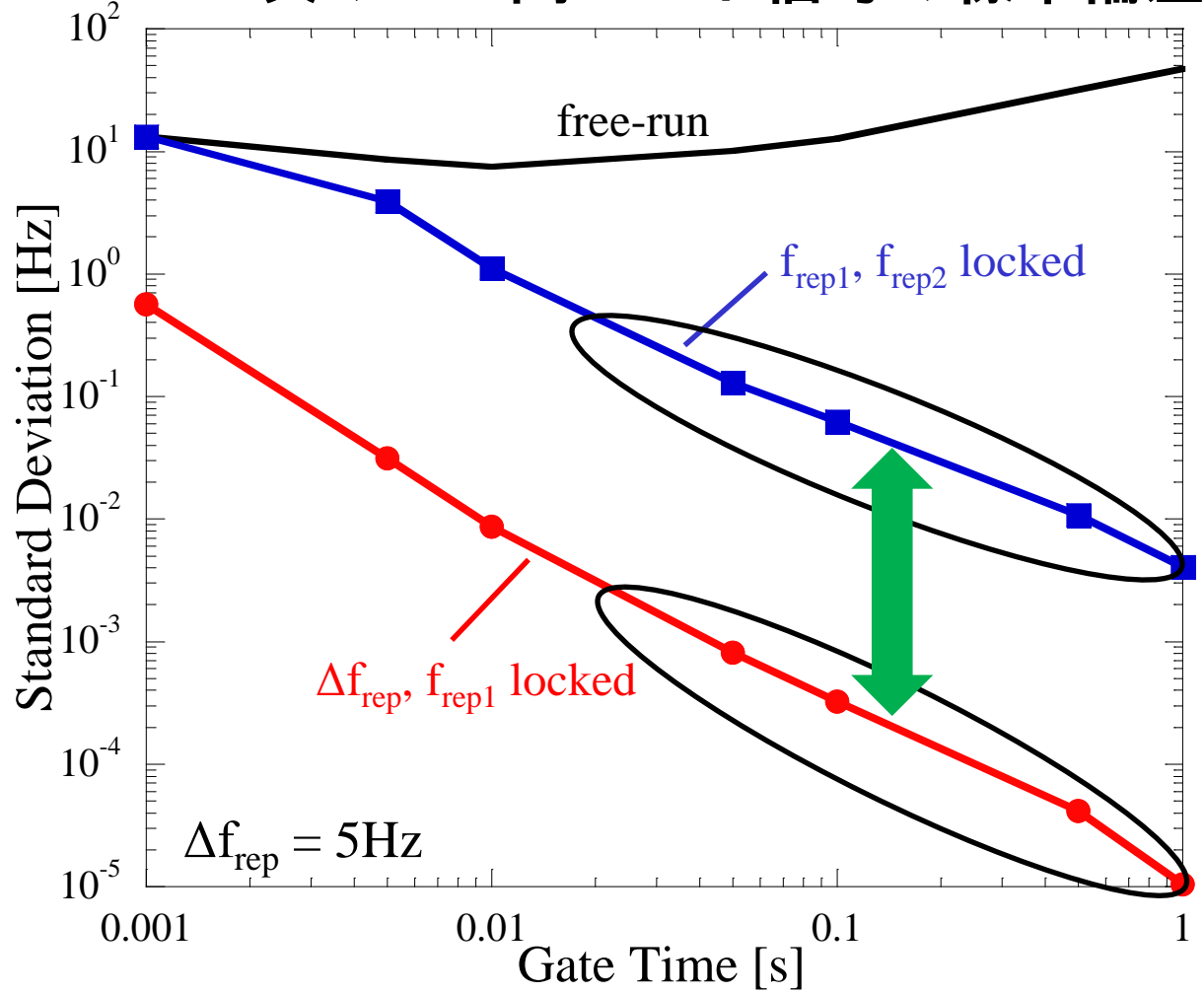
# 実験光学系



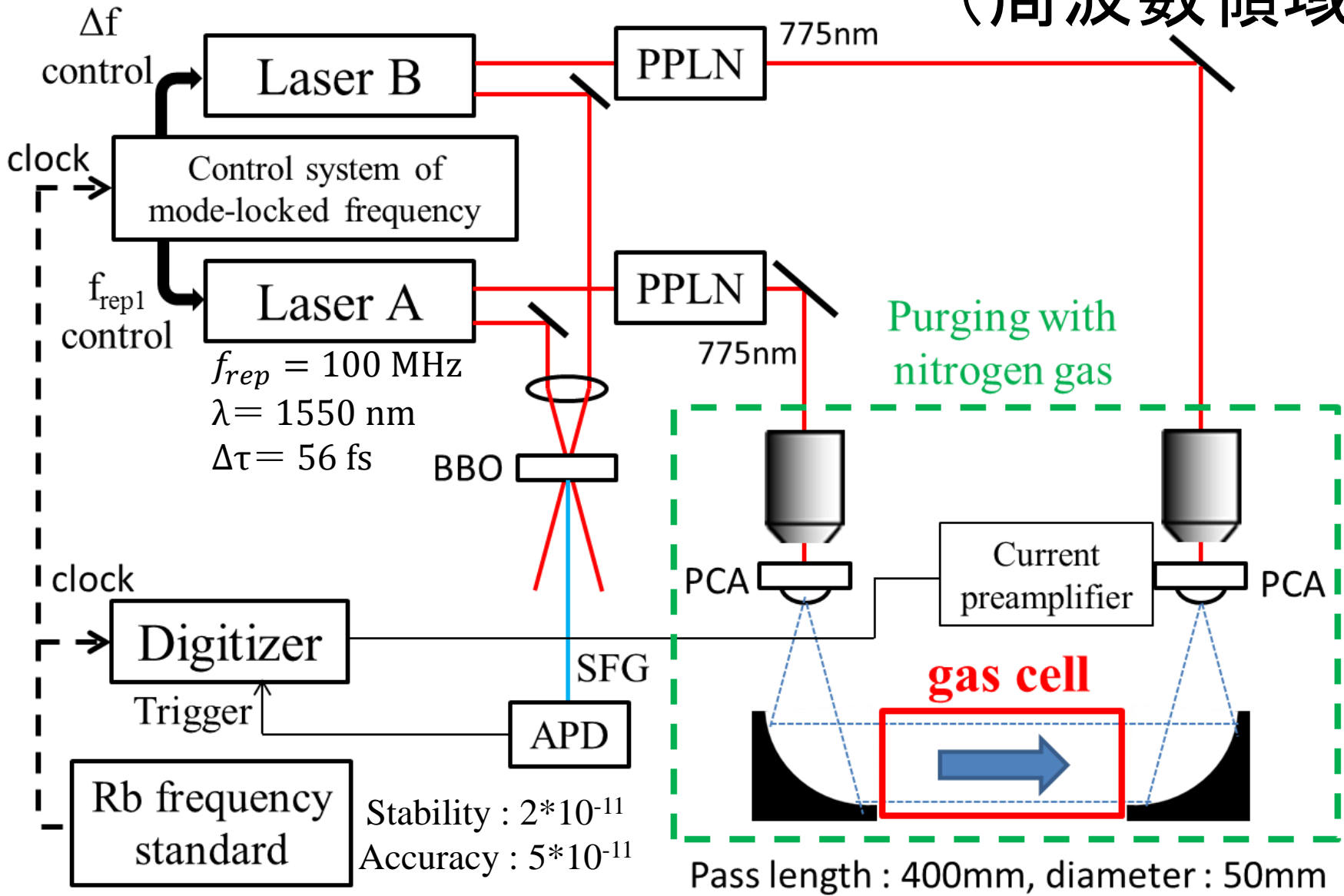
$$40 \times 1057 \text{次} \times \Delta f 5\text{Hz} = 211.4\text{kHz}$$

# デュアルTHzコム間ビートの周波数安定性

## 1057次のコム間ビート信号の標準偏差

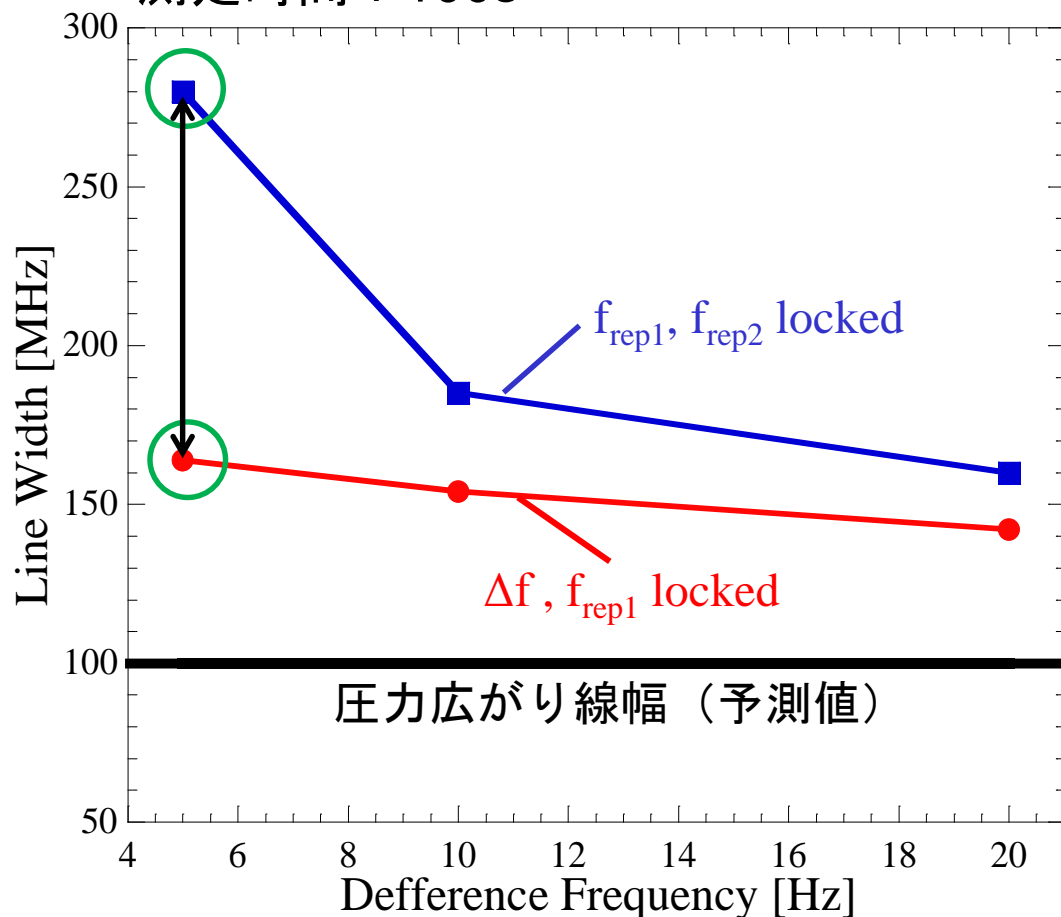


# 低圧ガス分光を用いたジッター—評価 (周波数領域)



# 低圧ガス分光によるジッターの評価

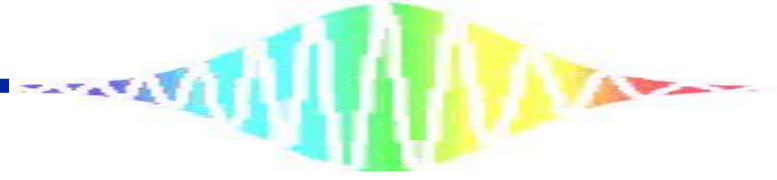
サンプル：水蒸気50Pa, 窒素1350Pa  
 圧力広がり線幅（予測値）：100MHz  
 測定時間：100s



$\Delta f = 5\text{Hz}$ において

①  $f_{\text{rep1}}$  &  $f_{\text{rep2}}$  制御  
 ジッターの影響により線幅が広がっている

②  $\Delta f$  &  $f_{\text{rep1}}$  制御  
 ジッターの影響を抑えている



# ③アダプティブ・サンプリングへの 応用

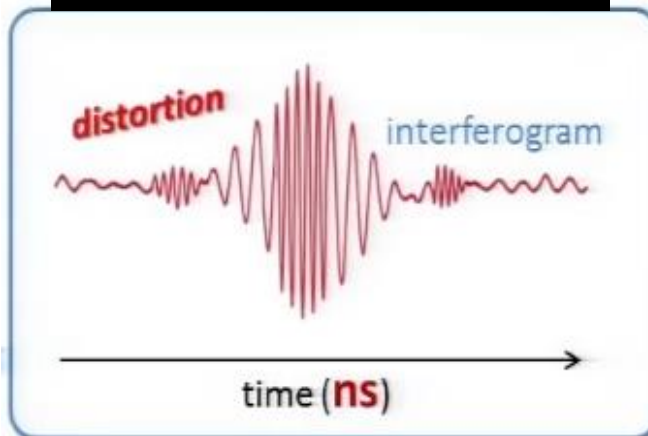
# アダプティブ・サンプリング

Ref) T. Ideguchi, arXiv:1201.4177 (2012).

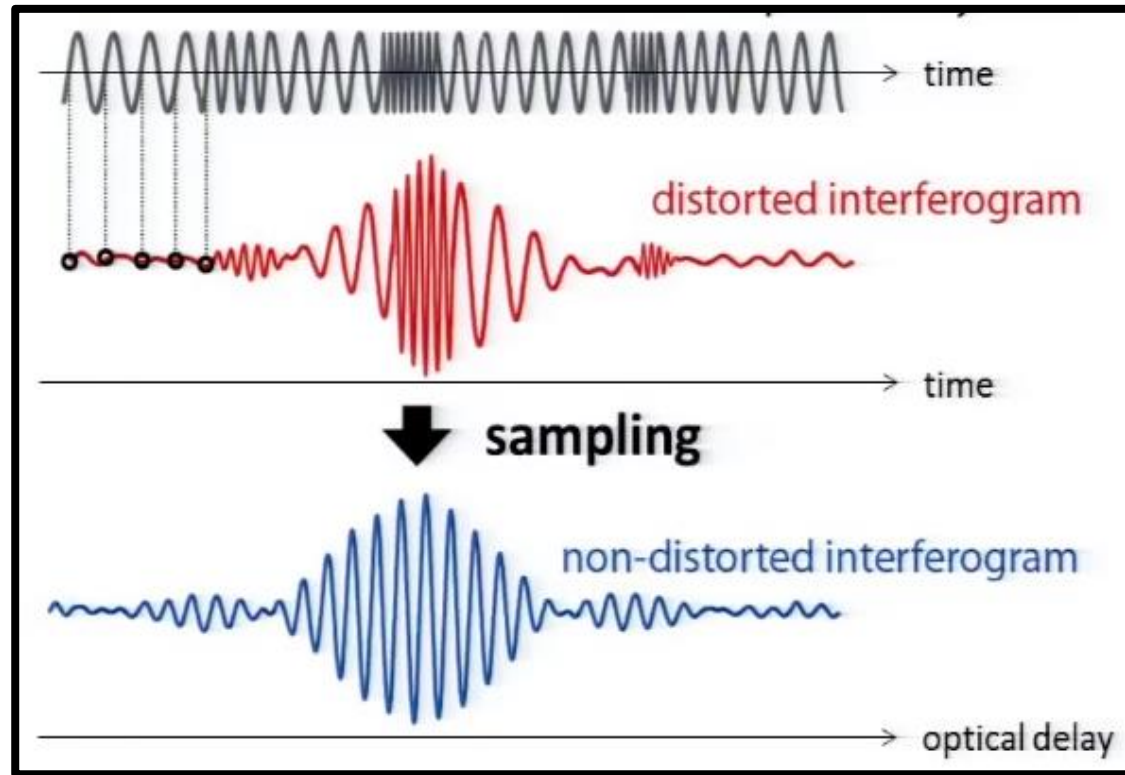
安定化制御



フリーランニング

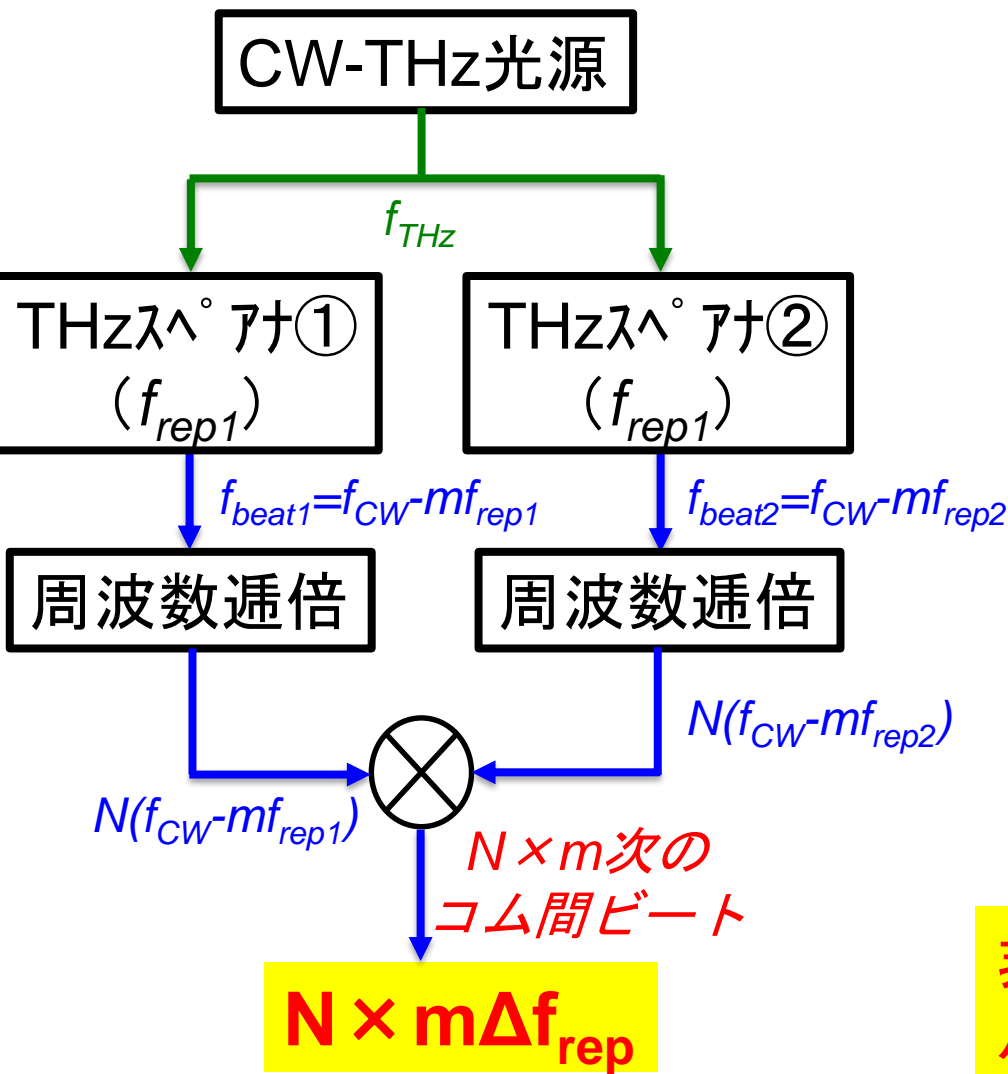


モード同期周波数の揺らぎを反映したサンプリング・クロックを生成すれば、時間軸の線形性を保てる！

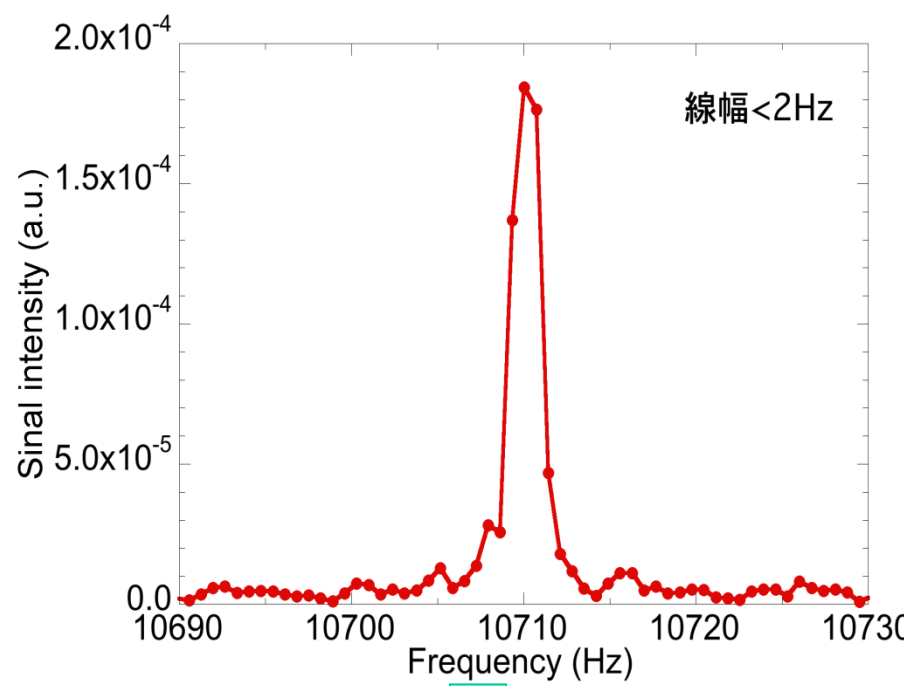


時間軸の線形性が保たれない！

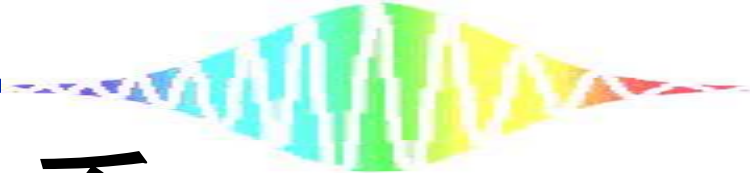
# THzアダプティブ・サンプリング・クロック (デュアルTHzコム間ビート) の生成



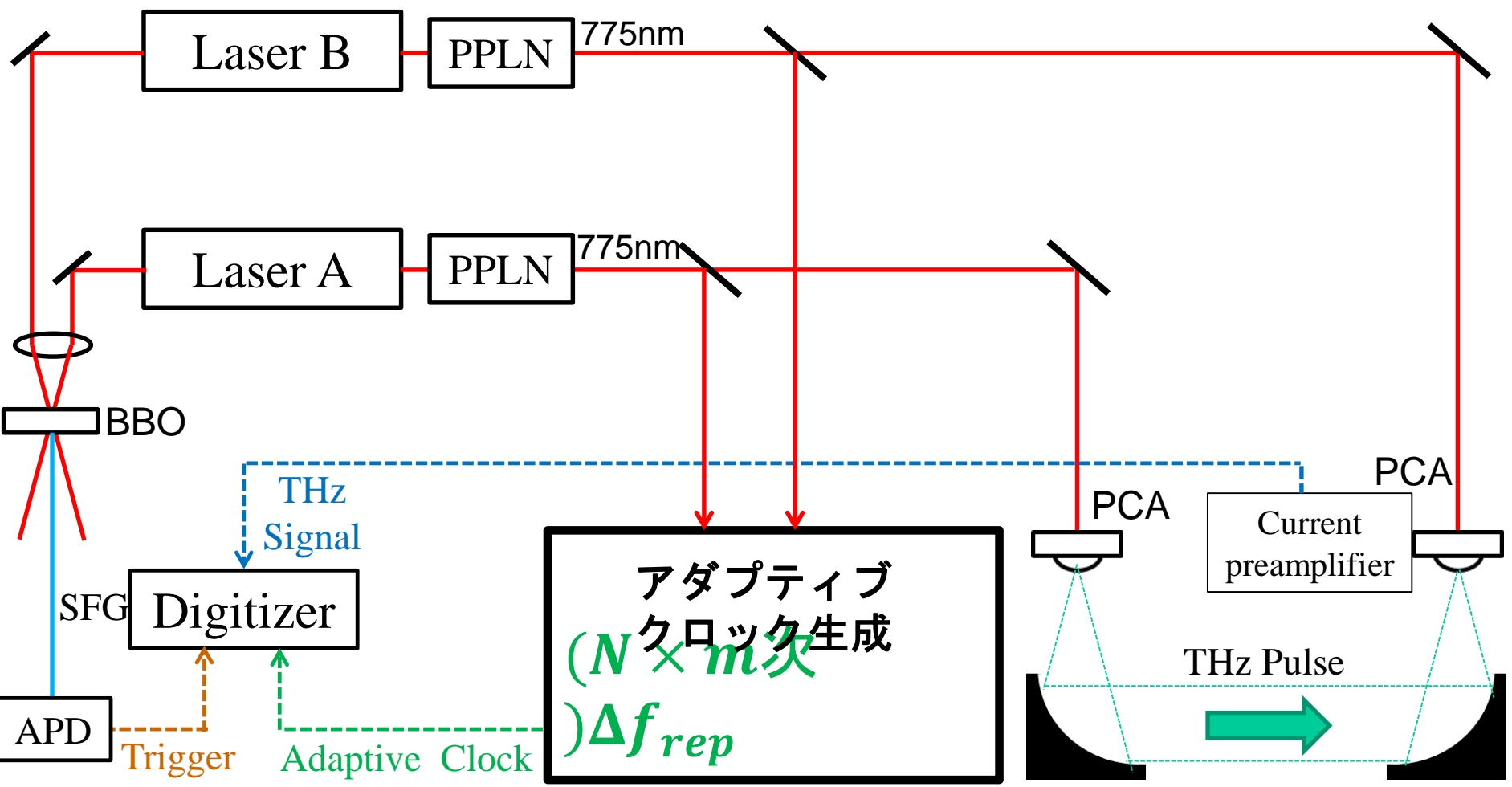
1000次のコム間ビート信号



非制御レーザーを用いたデュアルTHzコム分光法が可能に！



# 実験光学系



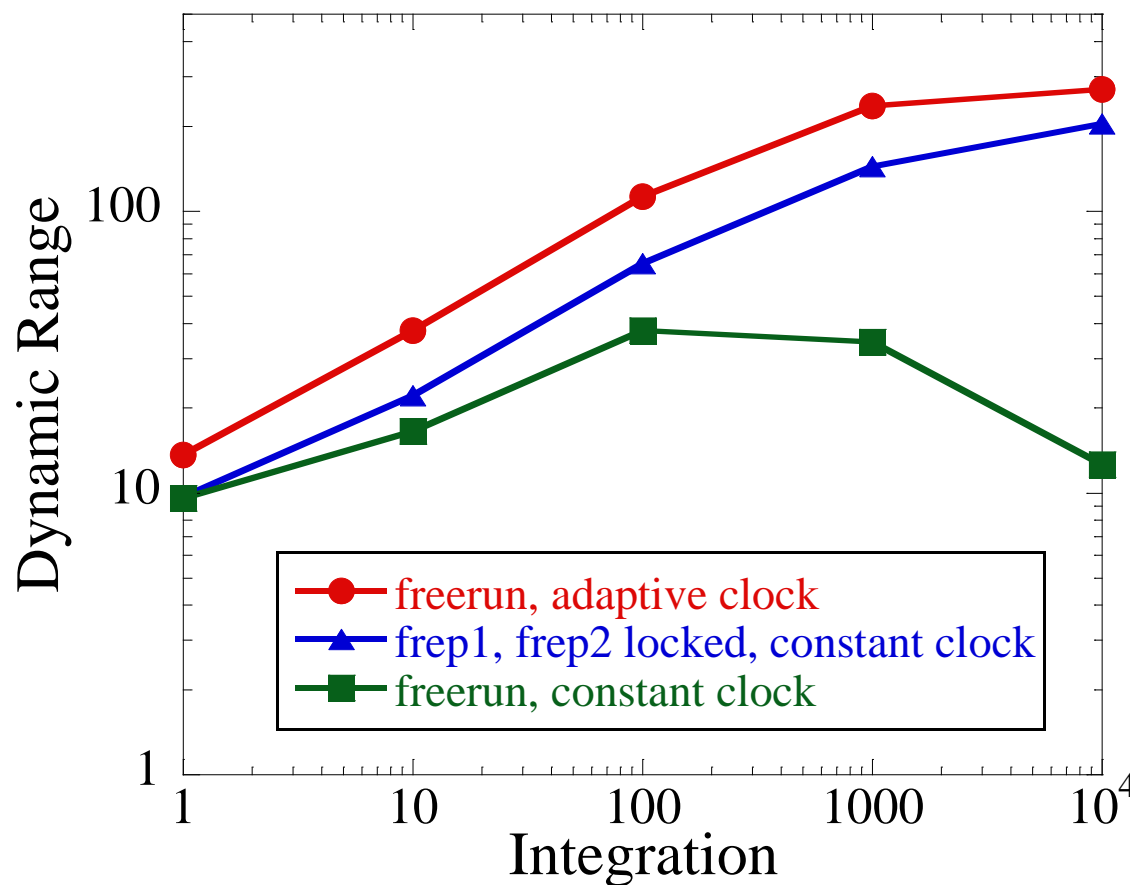
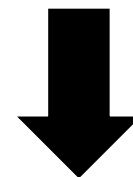


# 時間波形ダイナミックレンジの比較

$\Delta f_{\text{rep}} = 50\text{Hz}$

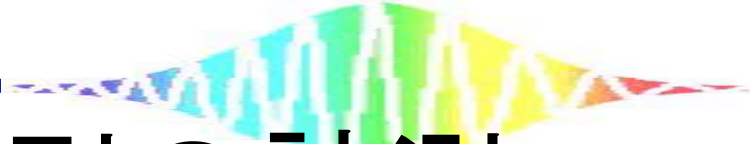
コンスタントクロック : 2MHz

アダプティブクロック : 2MHz



- フリーランでは、ジッターの影響により積算できていない
- 制御した状態でも、ジッターの影響あり

**アダプティブサンプリングによってキャンセル**

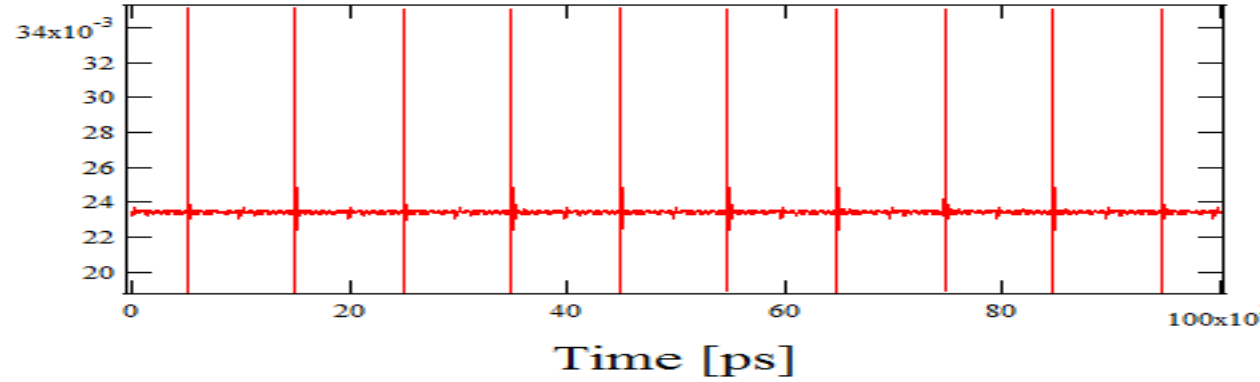


# 10連THzパルス列の計測

freerun  
Adaptive clock

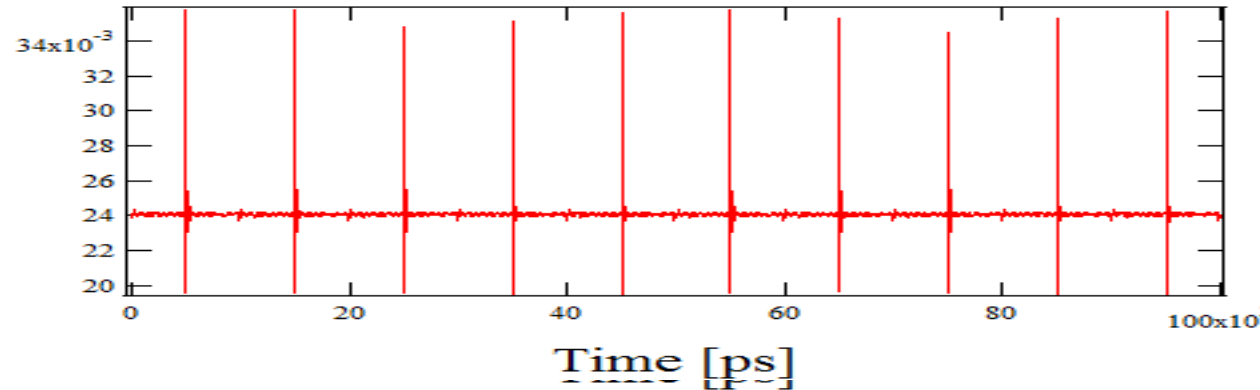
ジッターの影響を  
キャンセル

Electric Field [a.u.]



$f_{rep1}, f_{rep2}$  locked  
Constant clock

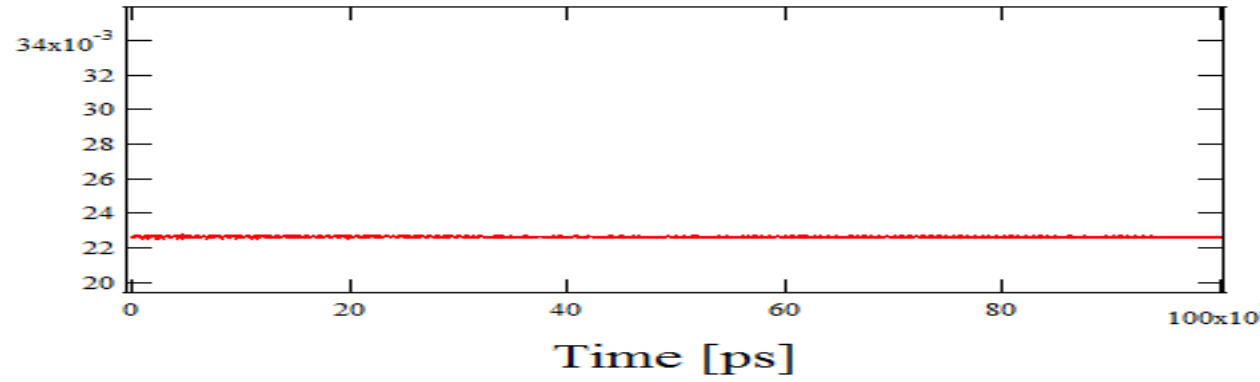
Electric Field [a.u.]



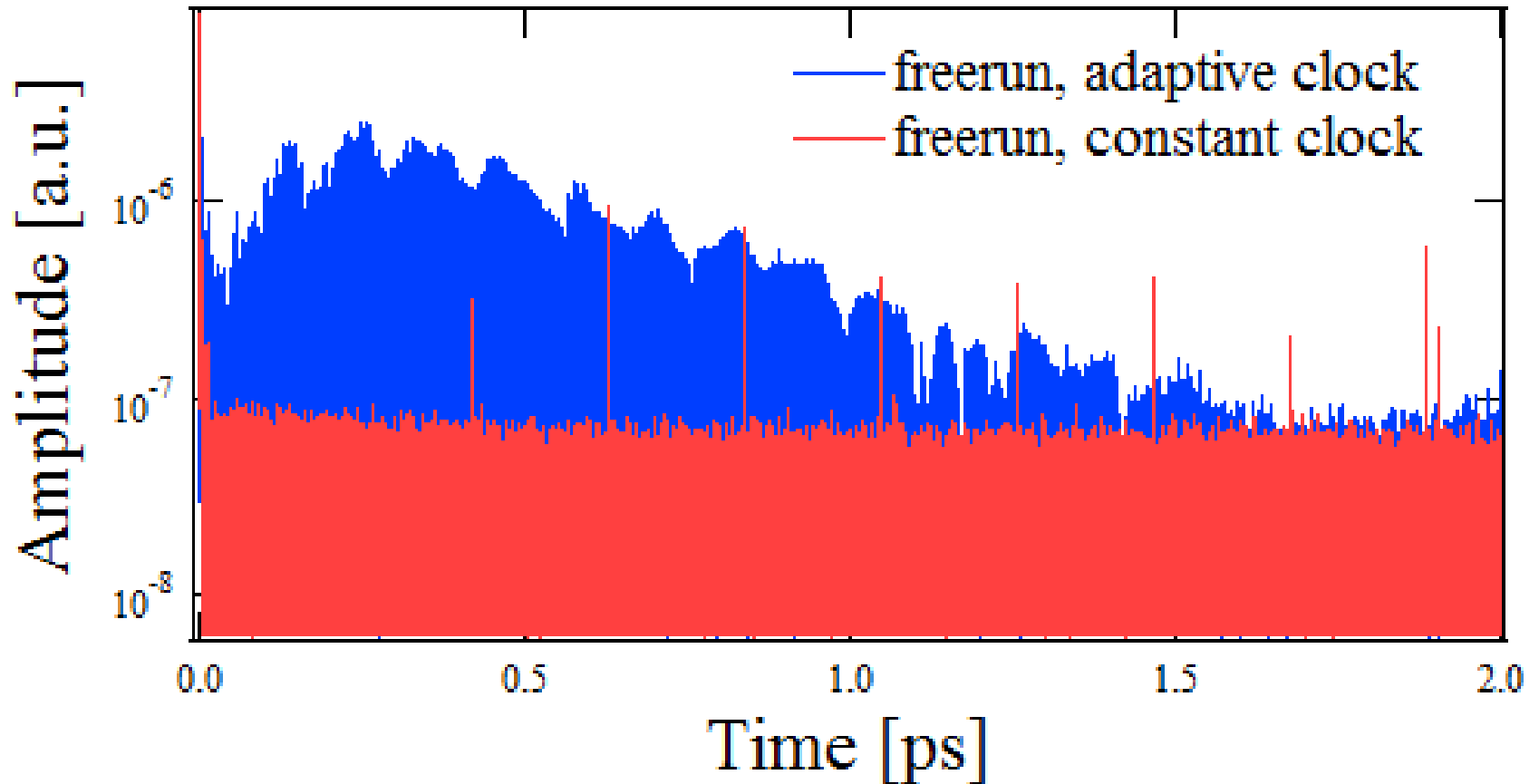
freerun  
Constant clock

ジッターの影響で  
積算できない

Electric Field [a.u.]



# THzコム・スペクトル

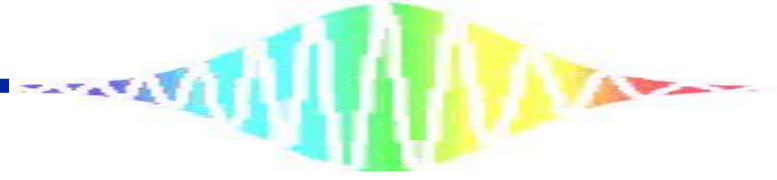


非制御レーザーによる  
デュアルTHzコム分光

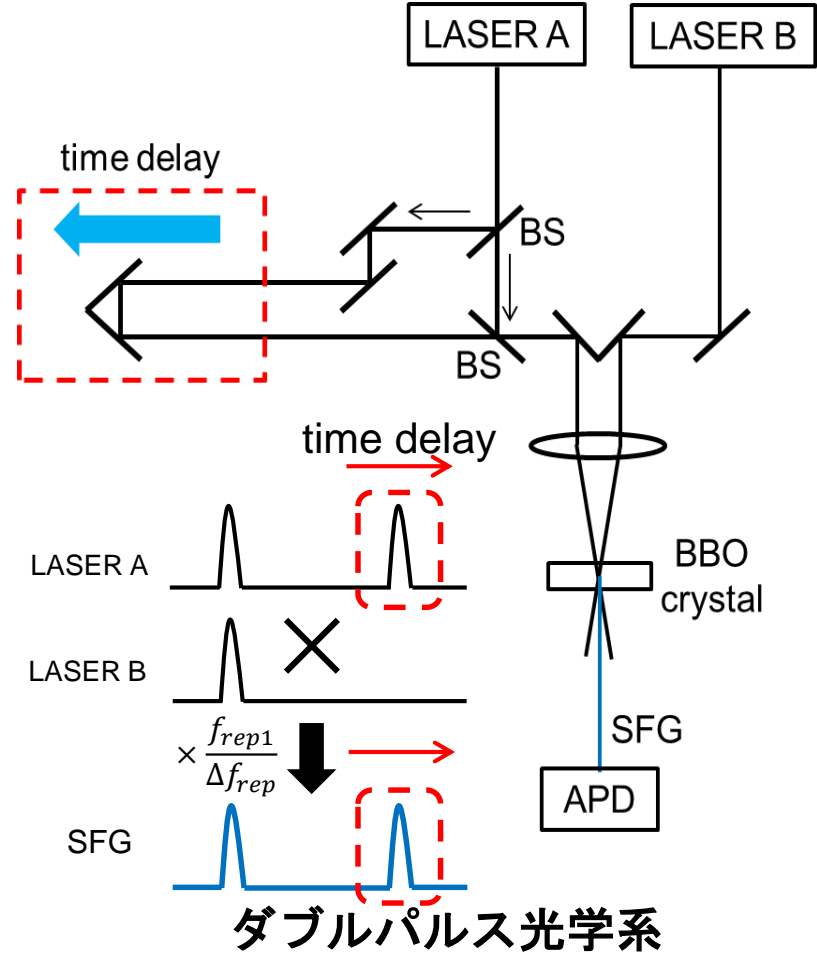
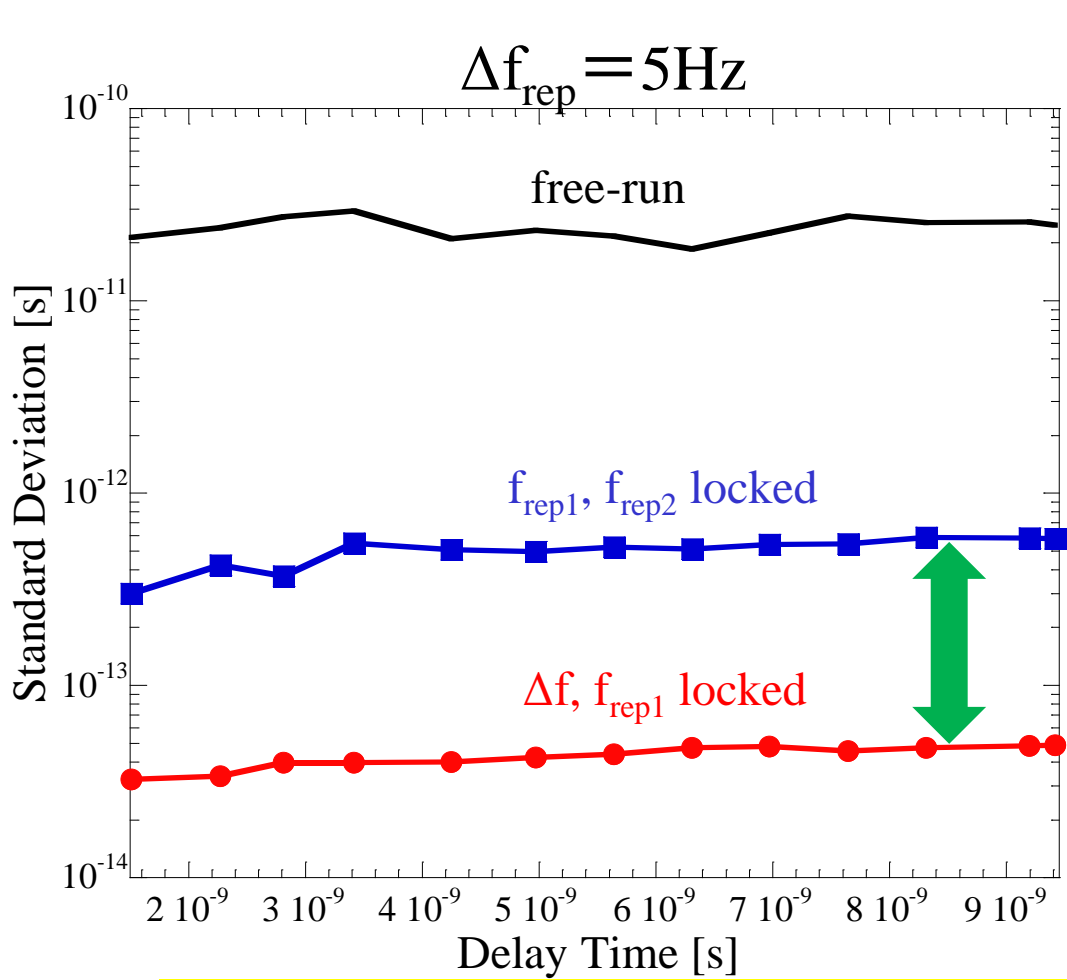
# まとめ

## デュアルTHzコム間ビートの抽出と その応用

- ① デュアルTHzスペアナを用いて高次のコム間ビートを抽出
- ② ASOPS-THz-TDSにおけるタイミングジッタの抑制
- ③ 非制御レーザーを用いたアダプティブサンプリング

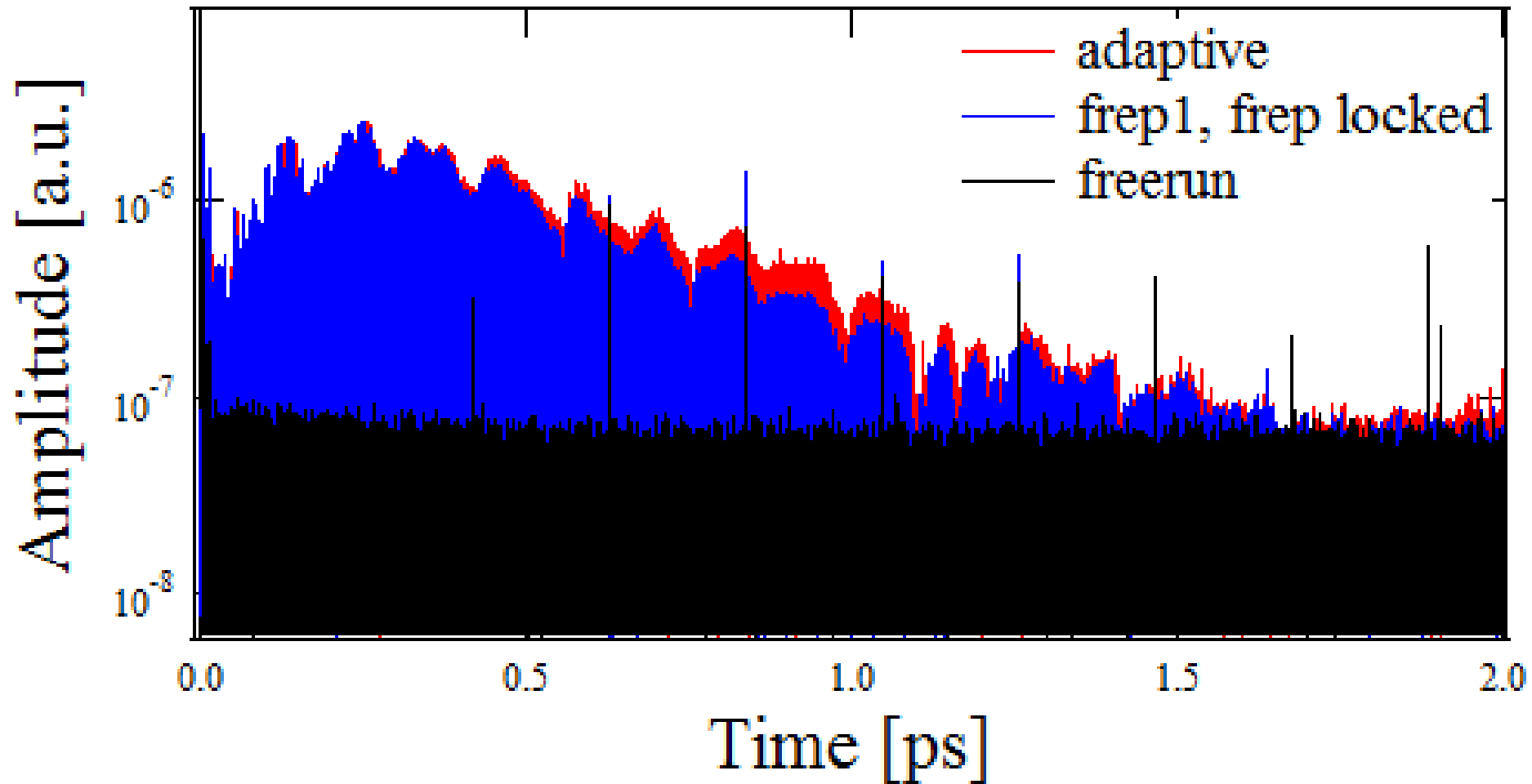


# 時間遅延走査ダブルパルスによる ジッターの評価（時間領域）

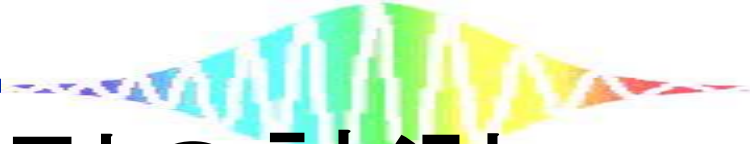


**$\Delta f_{rep}$  &  $f_{rep1}$  制御によるジッターの抑制**

# THzコム・スペクトル



非制御レーザーによるデュアルTHz分光が可能

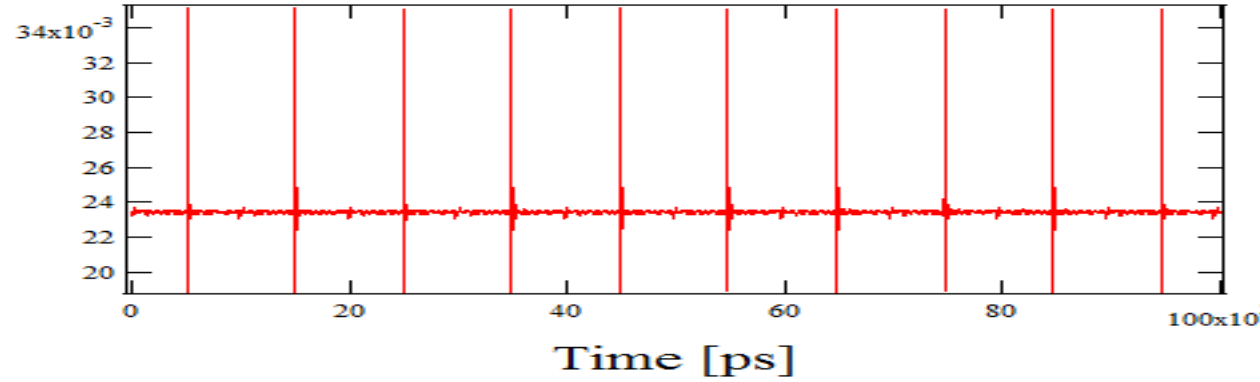


# 10連THzパルス列の計測

freerun  
Adaptive clock

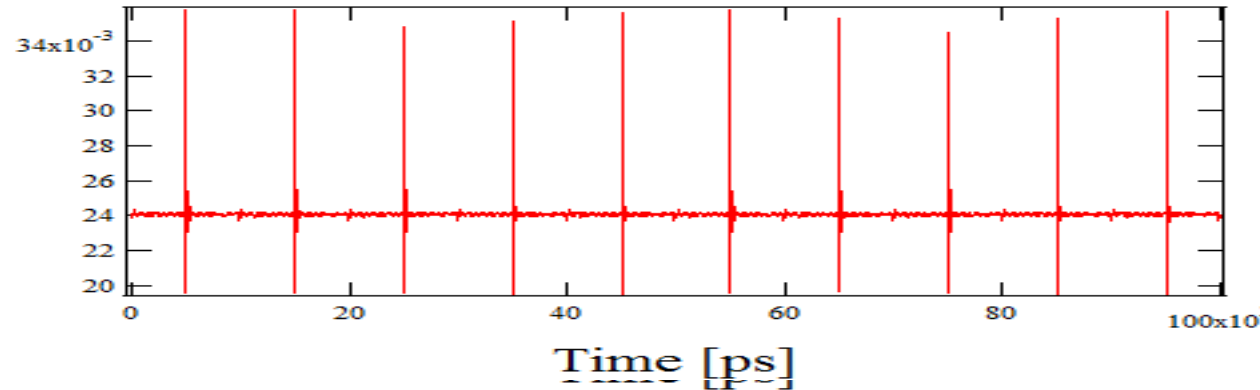
ジッターの影響を  
キャンセル

Electric Field [a.u.]



$f_{rep1}, f_{rep2}$  locked  
Constant clock

Electric Field [a.u.]



freerun  
Constant clock

ジッターの影響で  
積算できない

Electric Field [a.u.]

