

# **デュアル光周波数コム参照型 広帯域連続可変CW-THz波発生**

**知的力学システム工学専攻**

**安井研究室**

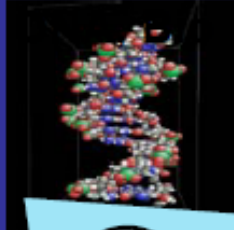
**木村 洸仁**

# テラヘルツ波とは？

## Terahertz sensing



Medicine



Monitoring the environment.



Security

新検出・診断技術

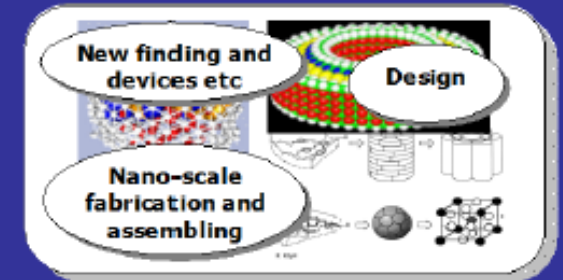
## Terahertz carrier waves



High-capacity communication

大容量通信の基盤技術

## Terahertz high-tech devices

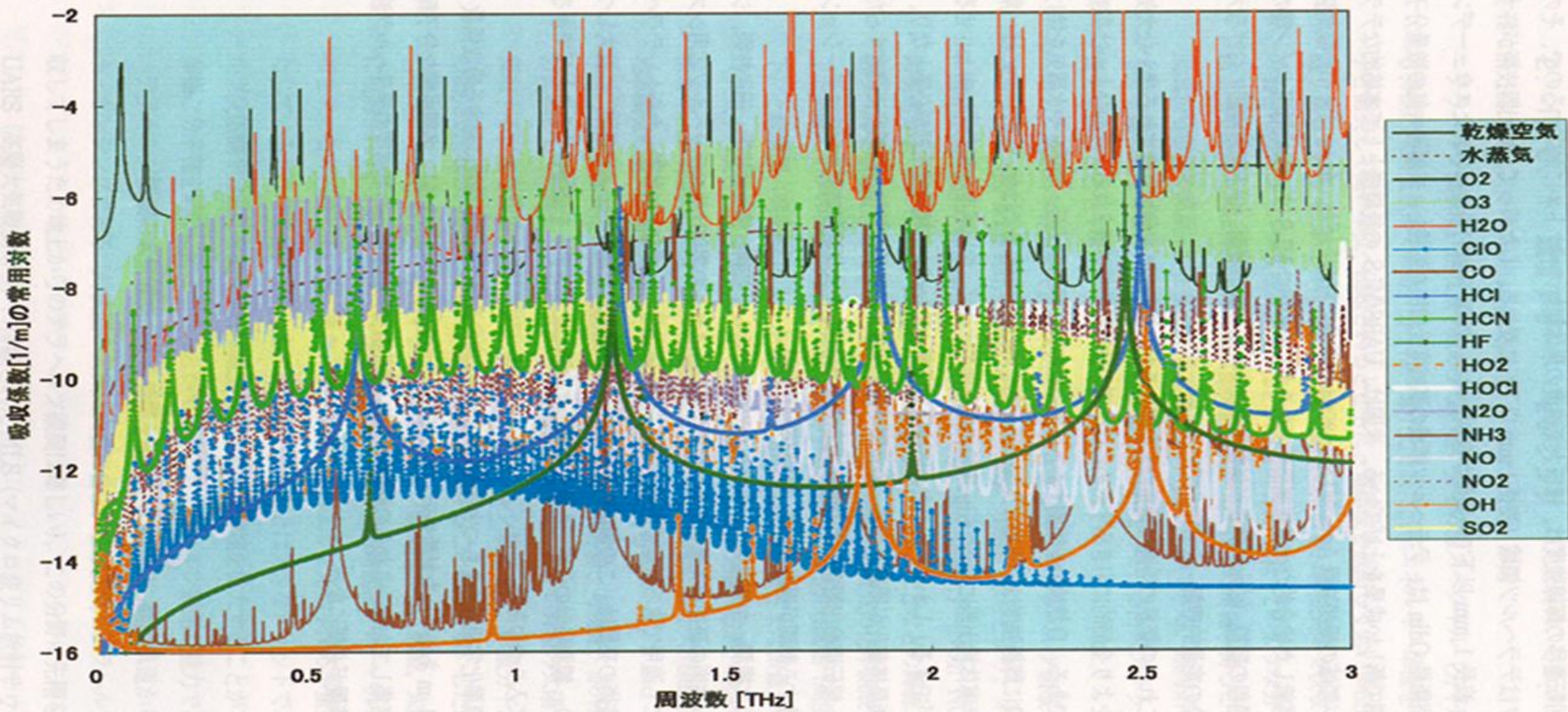


テラヘルツ新機能デバイス

## 特徴

- 近年まで未開拓領域
- 光波と電波の両特徴を併せ持つ
- 非金属物質の良好な透過性
- 非侵襲，安心安全
- 低散乱
- 自由空間の伝搬
- 様々な物質への固有の吸収スペクトル

# THz帯吸収スペクトル@大気ガス



吸収スペクトルはひしめきあって存在する！

引用：『未来を切り拓くTHz技術』

THz領域を『高精度』で『広帯域』に『連続可変』する光源開発

# 各種THz光源

## THzシンセサイザ

・・・THz領域（0.1～10THz）において  
任意の周波数を高精度に，広帯域連続可変

THz波発生源	周波数精度	発生帯域	チューニング性能	動作温度	利便性
光周波数コム参照型 差周波発生	◎	○	△	○	○
周波数逡倍器	◎	△	○	○	◎
THz波パラメトリック 発振器	△	◎	△	△	○
THz-QCL	○	×	×	×	○

広帯域連続可変光コム参照型THzシンセサイザの開発

ノーベル物理学賞 (2005)

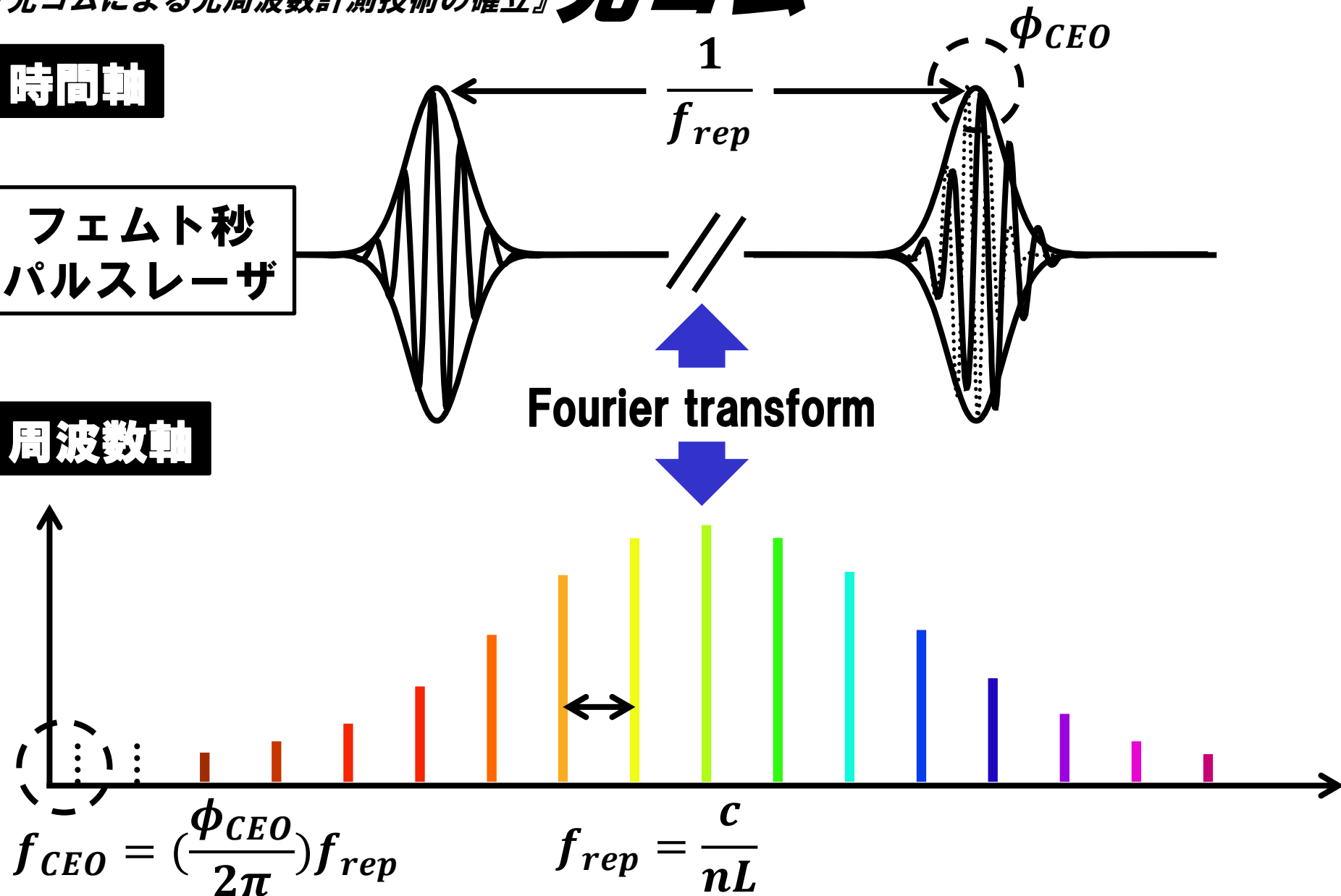
『光コムによる光周波数計測技術の確立』

# 光コム

時間軸

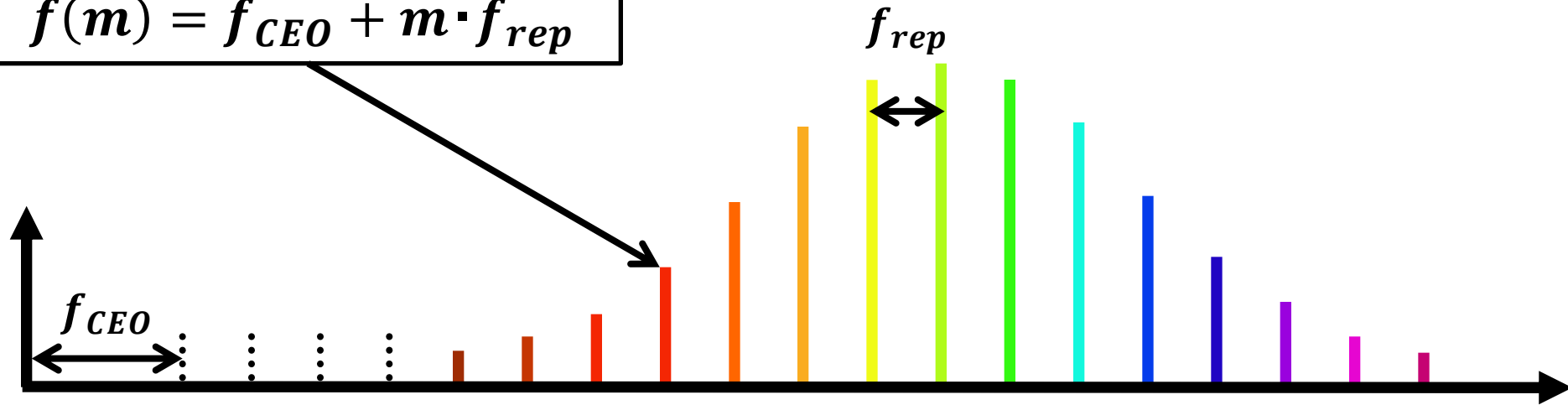
フェムト秒  
パルスレーザ

周波数軸



# 光コム安定化

$$f(m) = f_{CEO} + m \cdot f_{rep}$$



$f_{rep}$ を周波数標準に同期

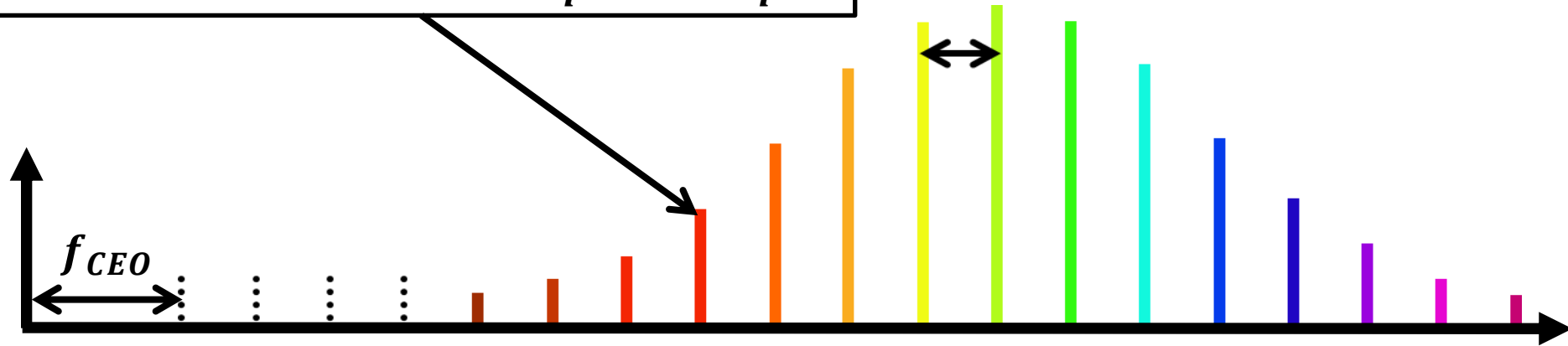
$f_{CEO}$ を周波数標準に同期

『光周波数のものさし』となる！

# 光コム安定化

$$f(m) = f_{CEO} + m \cdot (f_{rep} + \Delta f_{rep})$$

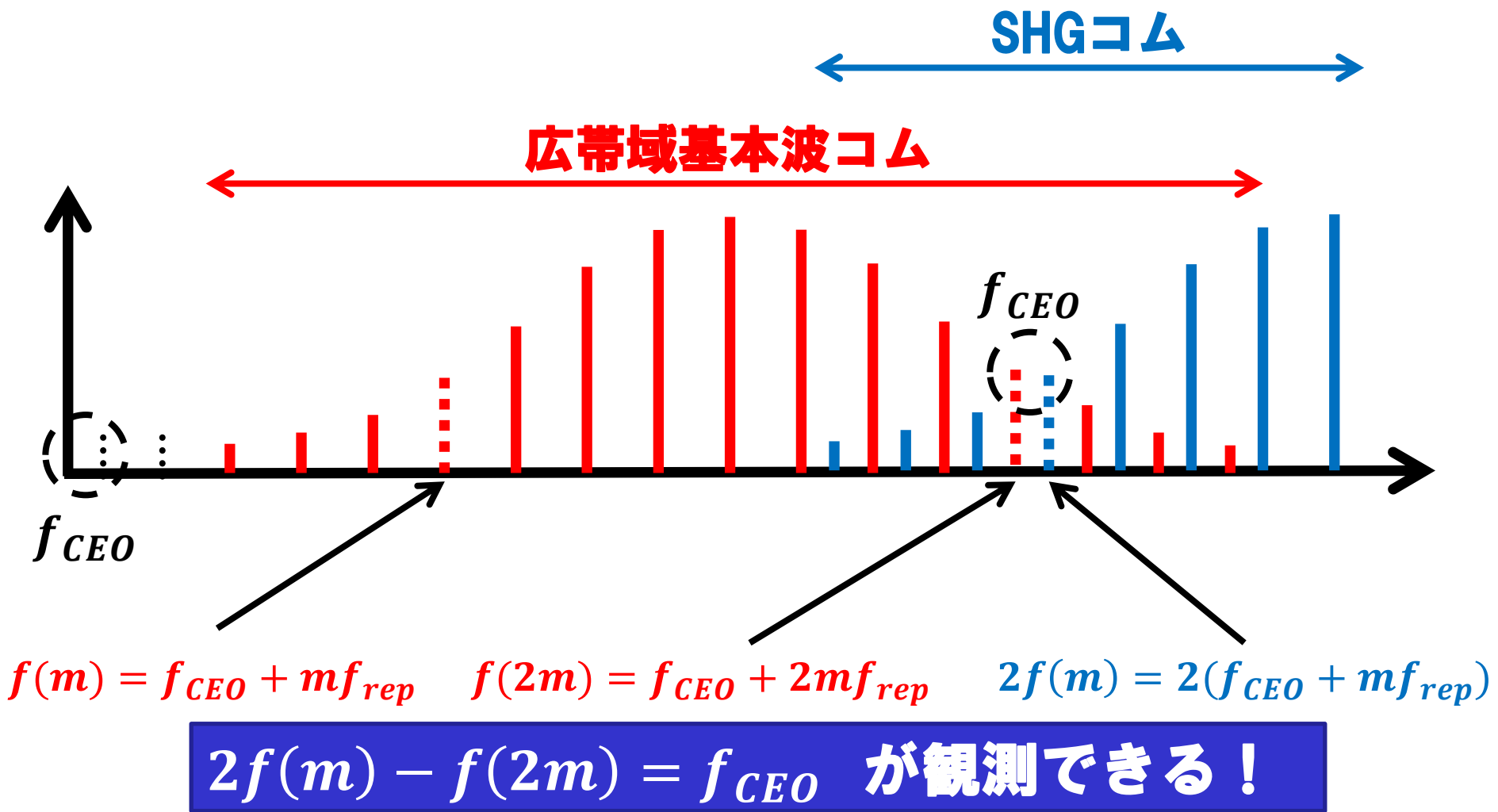
$$f_{rep} + \Delta f_{rep}$$



安定化させ  $f_{rep}$  を変化させる

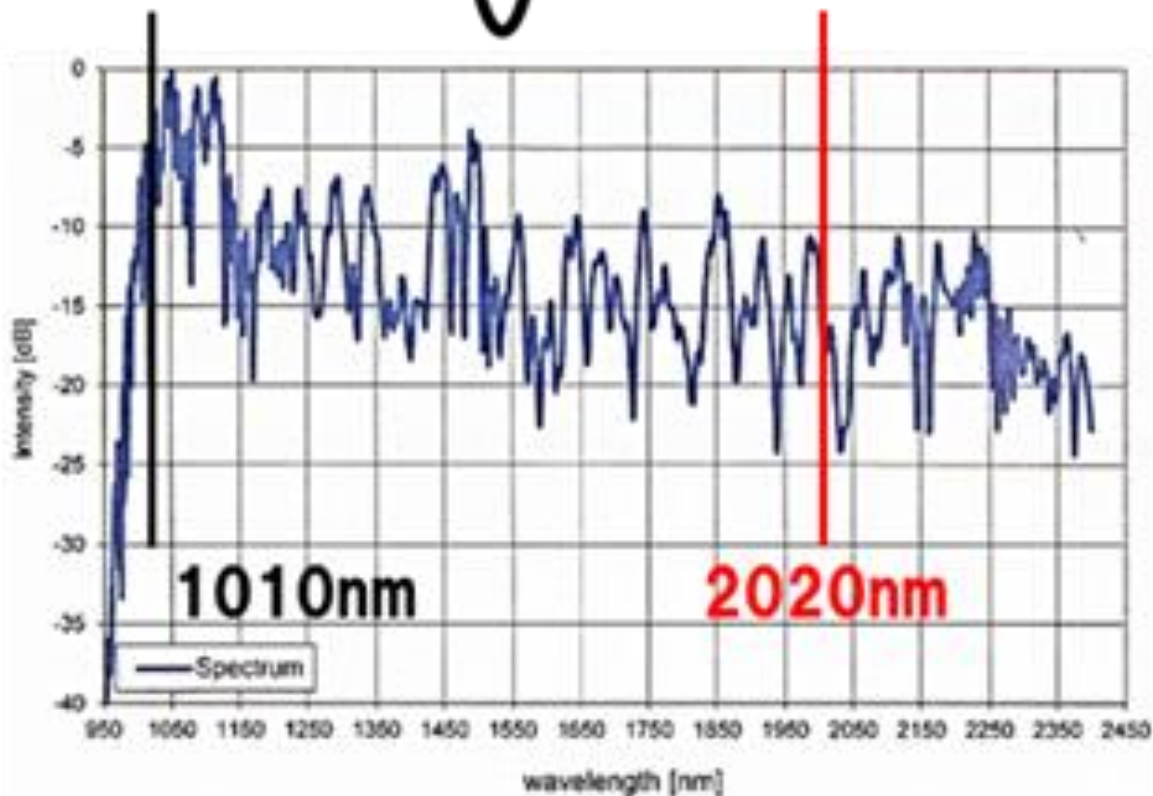
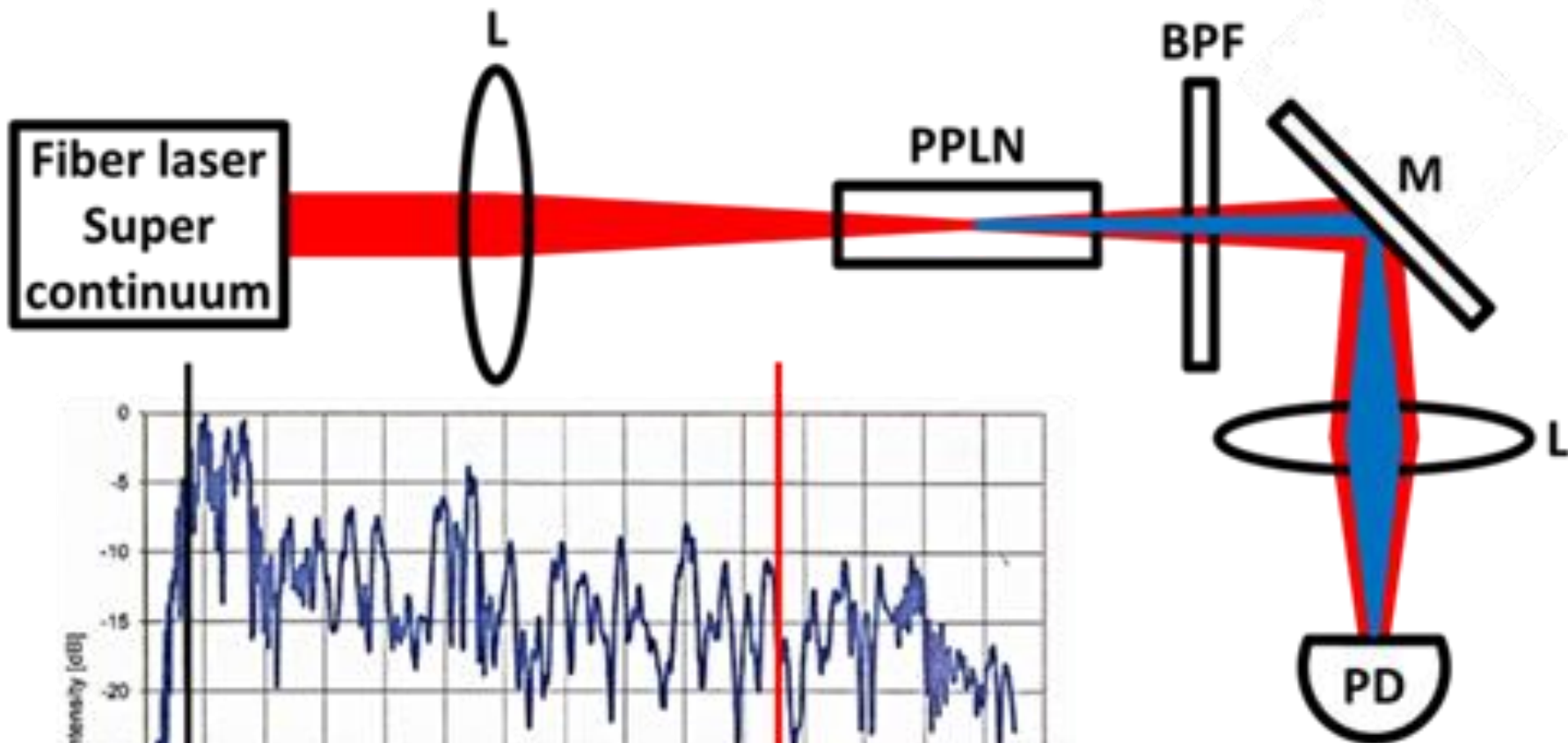
任意の波長（周波数）へ目盛を移動出来る！

# 自己参照法による $f_{CEO}$ 検出

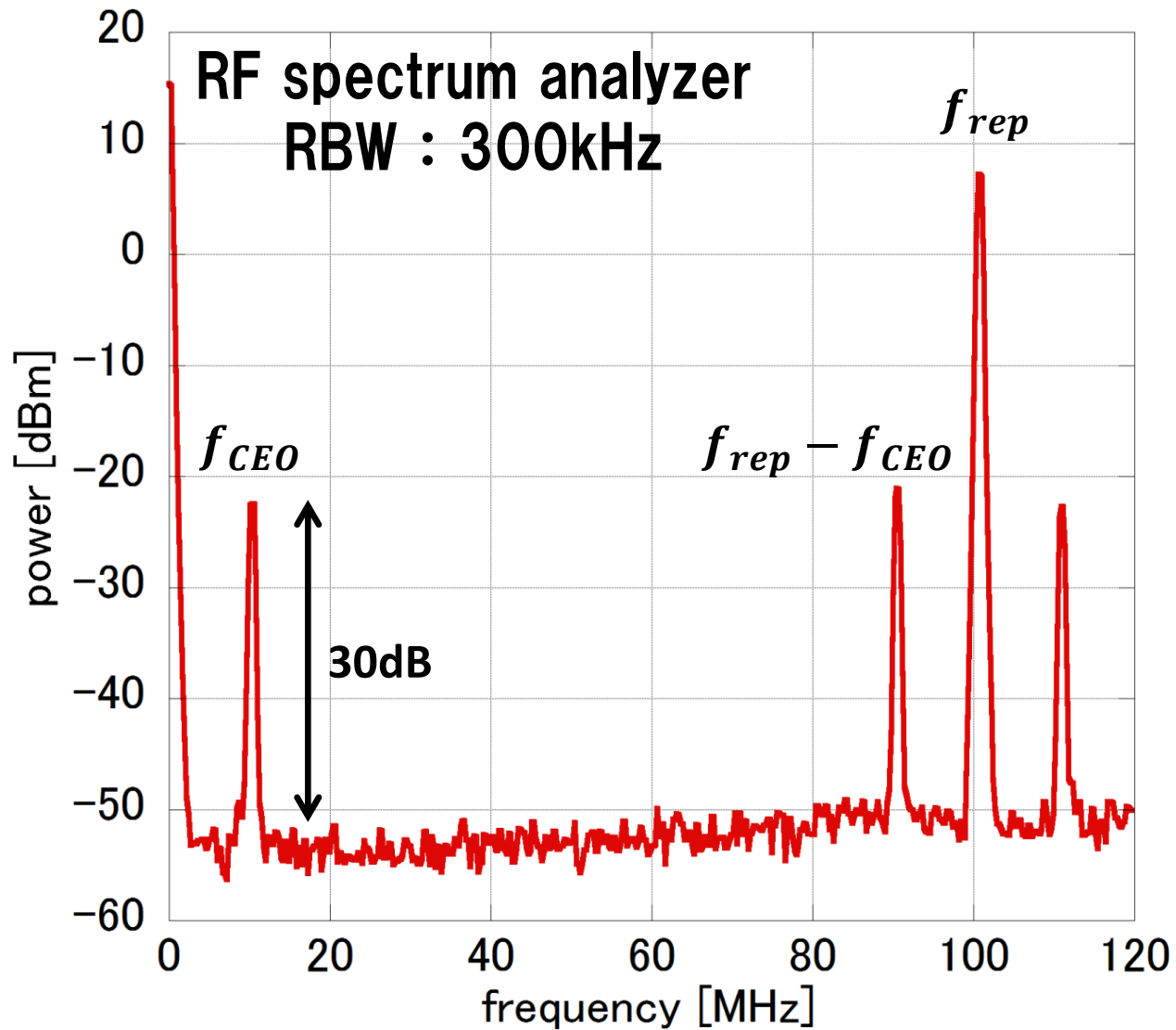




# $f-2f$ 干渉計による $f_{CEO}$ 検出装置

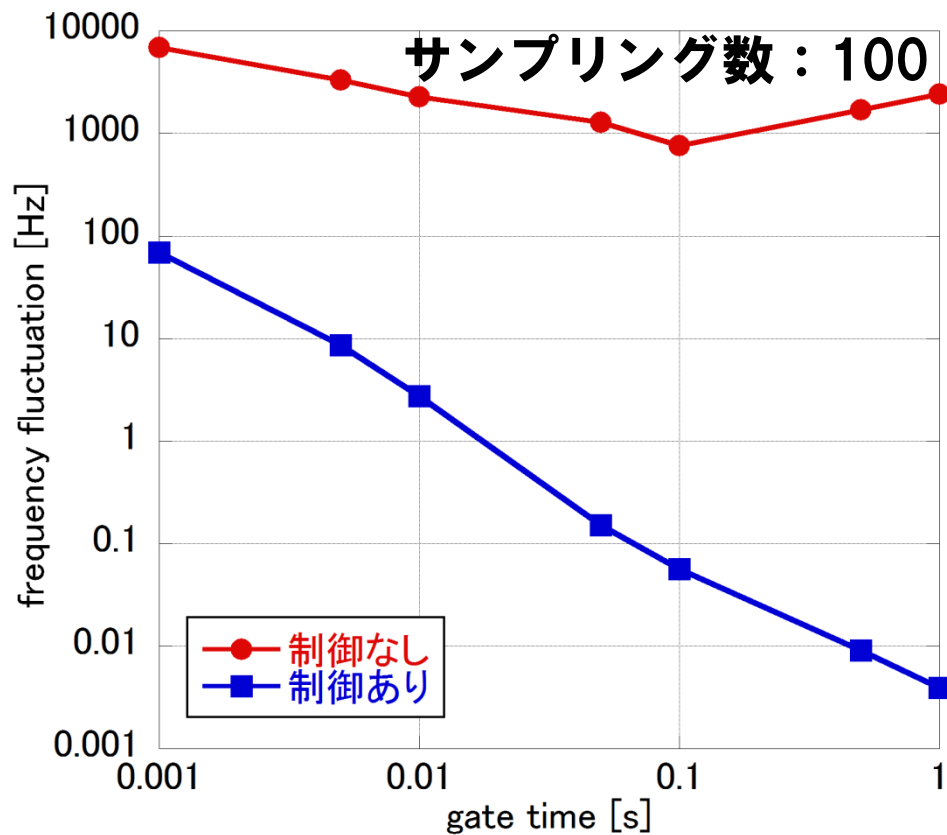


# $f_{CEO}$ 信号

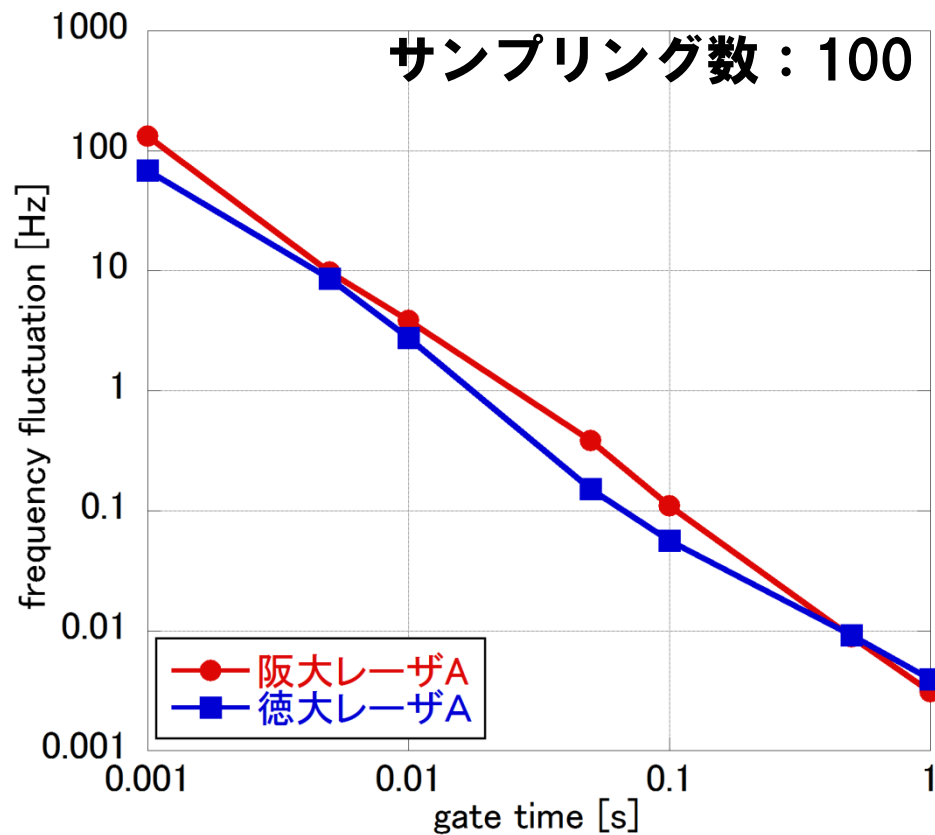


# $f_{CEO}$ 制御

## ポンプLDの駆動電流にフィードバック



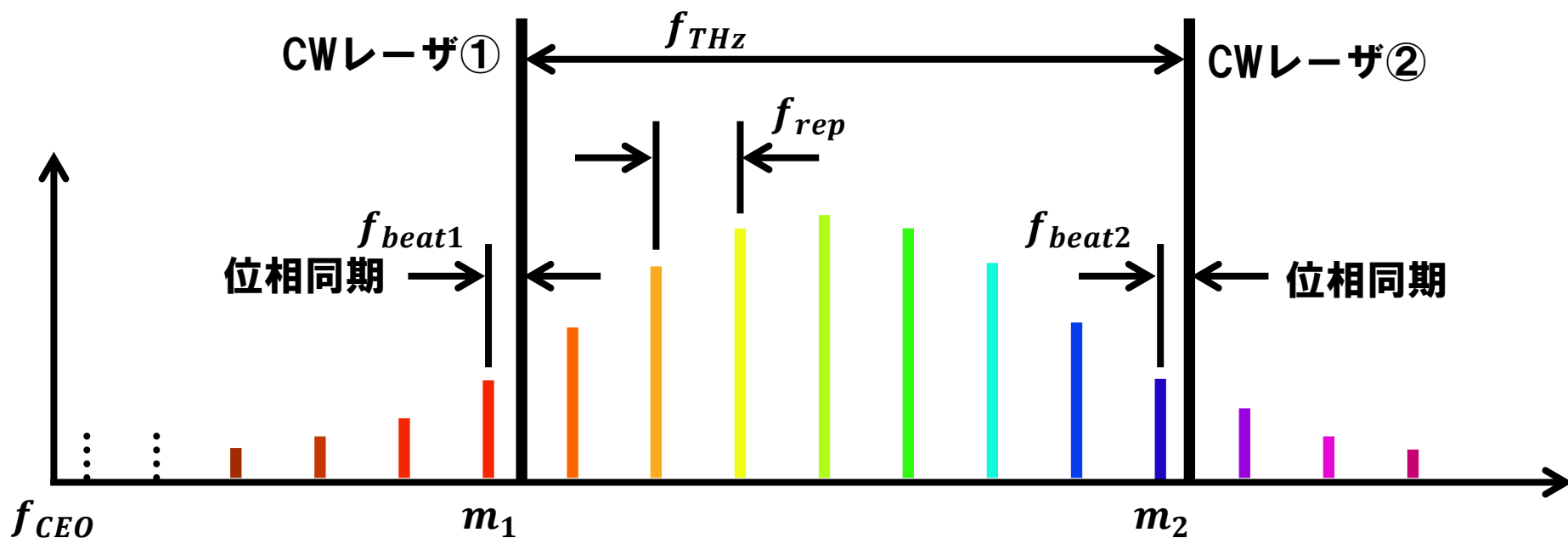
非制御時との比較



市販品との比較

# シングル光コム参照型THzシンセ

## 2台の波長可変CWレーザーの差周波発生によるCW-THz波



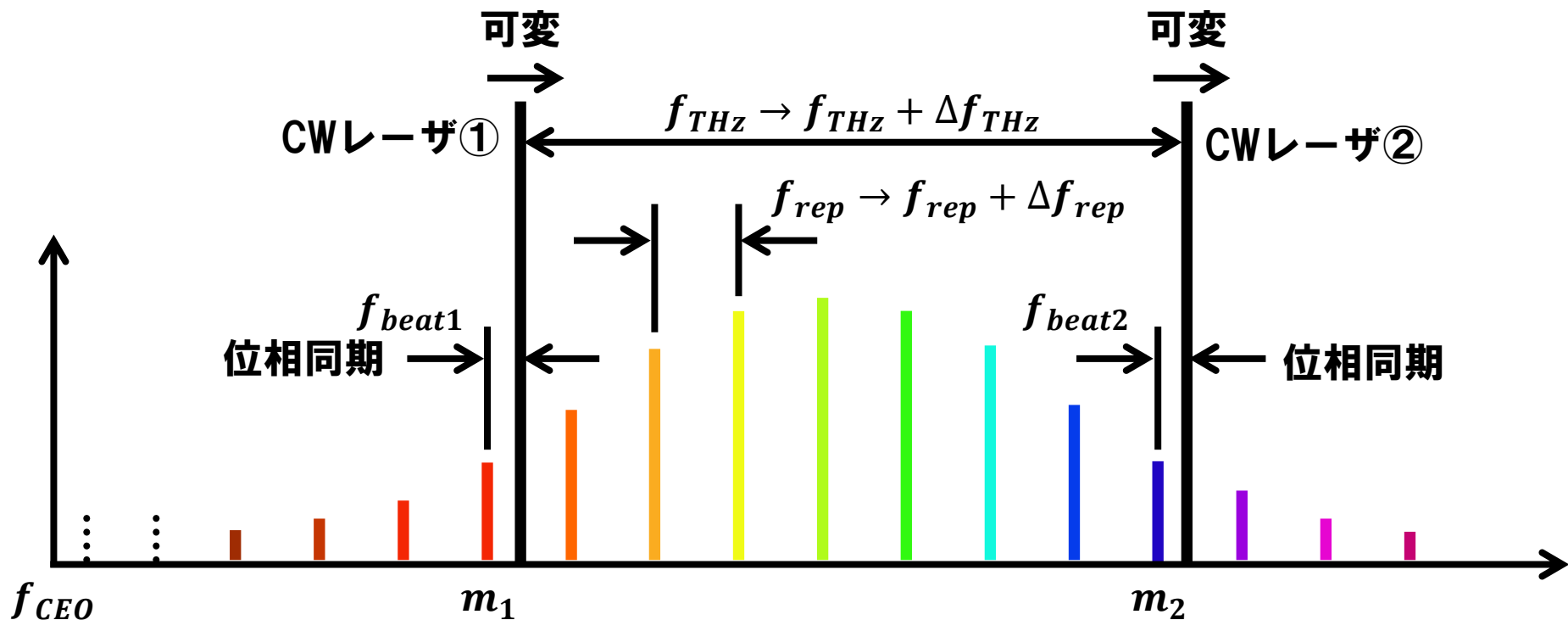
$$\textcircled{1} f_{cw1} = f_{CEO} + m_1 \cdot f_{rep} + f_{beat1}$$

$$\textcircled{2} f_{cw2} = f_{CEO} + m_2 \cdot f_{rep} + f_{beat2}$$

$$f_{THz} = f_{cw2} - f_{cw1} = (m_2 - m_1) \cdot f_{rep} + (f_{beat2} - f_{beat1})$$

# シングル光コム参照型THzシンセ

2台の波長可変CWレーザーの差周波発生によるCW-THz波



$$\textcircled{1} f_{cw1} = f_{CEO} + m_1 \cdot (f_{rep} + \Delta f_{rep}) + f_{beat1}$$

$$\textcircled{2} f_{cw2} = f_{CEO} + m_2 \cdot (f_{rep} + \Delta f_{rep}) + f_{beat2}$$

$$\Delta f_{THz} = (m_2 - m_1) \cdot \Delta f_{rep}$$

10GHz程度の連続可変

$$f_{THz} + \Delta f_{THz} = f_{cw2} - f_{cw1} = (m_2 - m_1) \cdot (f_{rep} + \Delta f_{rep}) + (f_{beat2} - f_{beat1})$$

# デュアル光コム参照型THzシンセ

CWレーザ①

光コム①

$f_{beat1}$   
位相同期

$f_{THz}$

$f_{rep1}$

$f_{CEO1}$

$m_1$

$$\textcircled{1} f_{cw1} = f_{CEO1} + m_1 \cdot f_{rep1} + f_{beat1}$$

$$\textcircled{2} f_{cw2} = f_{CEO2} + m_2 \cdot f_{rep2} + f_{beat2}$$

$$f_{THz} = f_{cw2} - f_{cw1} = (f_{CEO2} + m_2 \cdot f_{rep2} + f_{beat2}) - (f_{CEO1} + m_1 \cdot f_{rep1} + f_{beat1})$$

CWレーザ②

光コム②

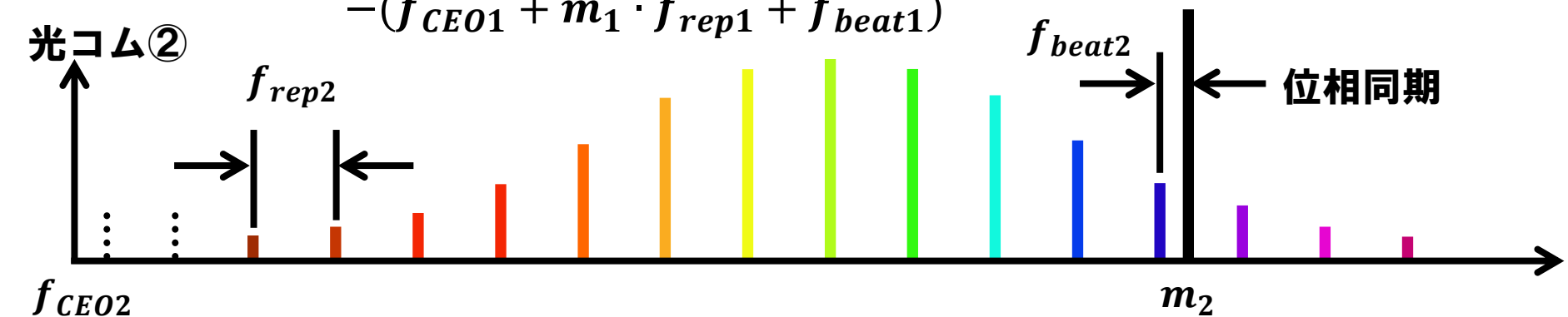
$f_{rep2}$

$f_{beat2}$

位相同期

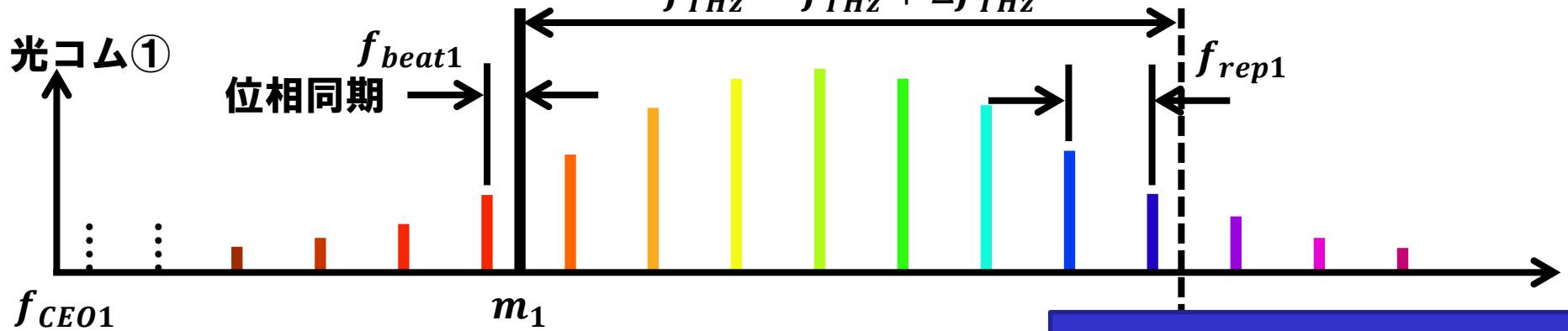
$f_{CEO2}$

$m_2$



# デュアル光コム参照型THzシンセ

CWレーザー① 固定



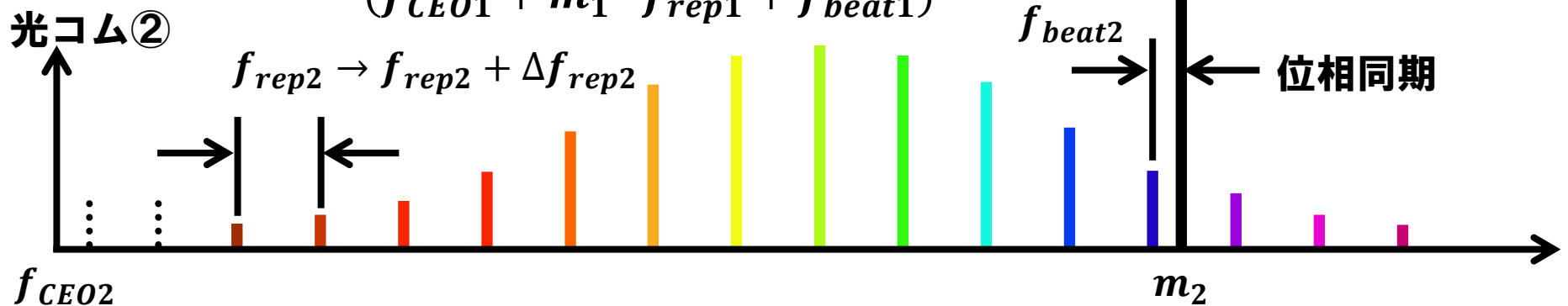
$\Delta f_{THz} = m_2 \cdot \Delta f_{rep2}$   
1THz以上の連続可変

①  $f_{cw1} = f_{CEO1} + m_1 \cdot f_{rep1} + f_{beat1}$

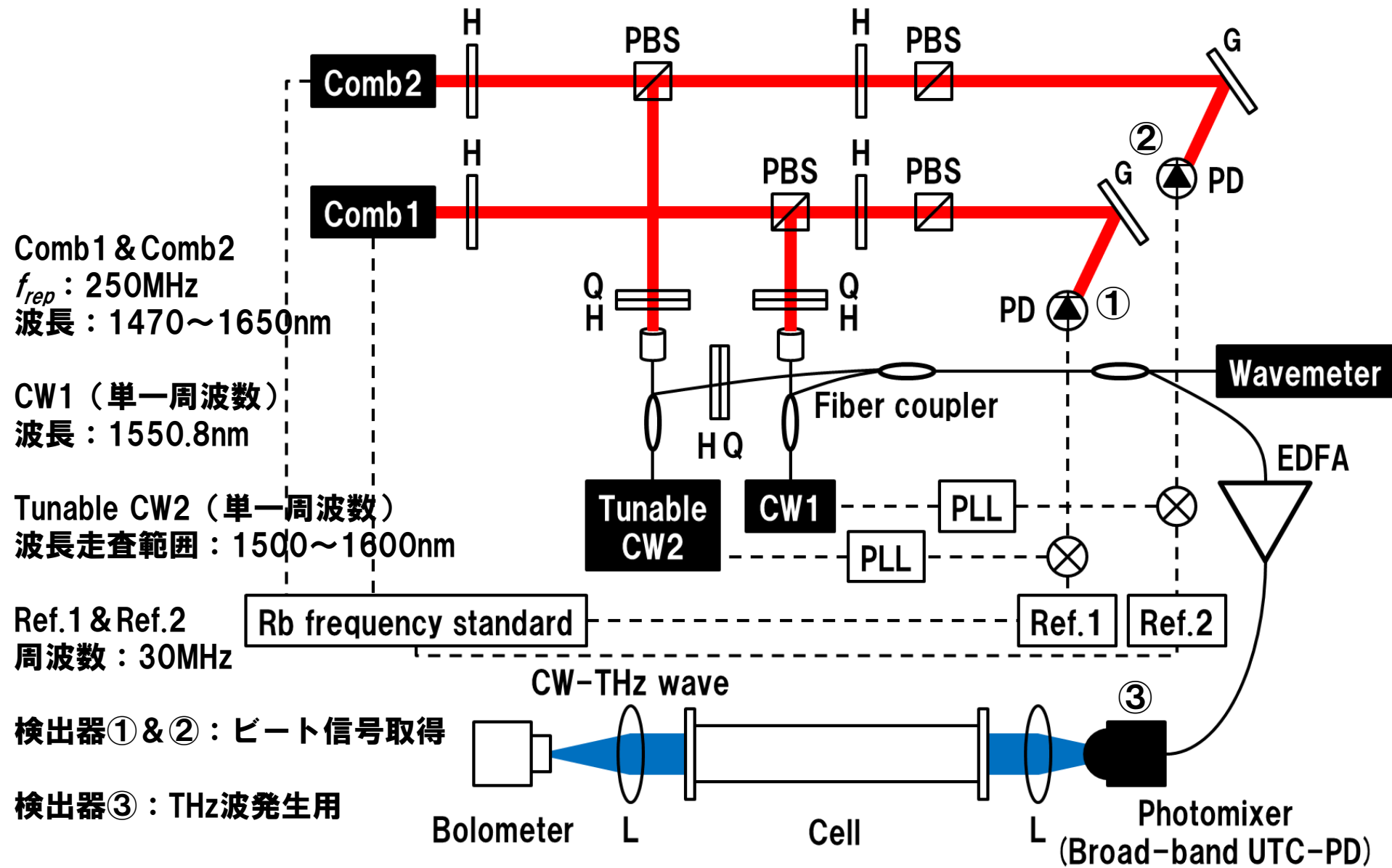
②  $f_{cw2} = f_{CEO2} + m_2 \cdot (f_{rep2} + \Delta f_{rep2}) + f_{beat2}$

$f_{THz} + \Delta f_{THz} = \{ f_{CEO2} + m_2 \cdot (f_{rep2} + \Delta f_{rep2}) + f_{beat2} \}$   
 $- (f_{CEO1} + m_1 \cdot f_{rep1} + f_{beat1})$

可変 CWレーザー②



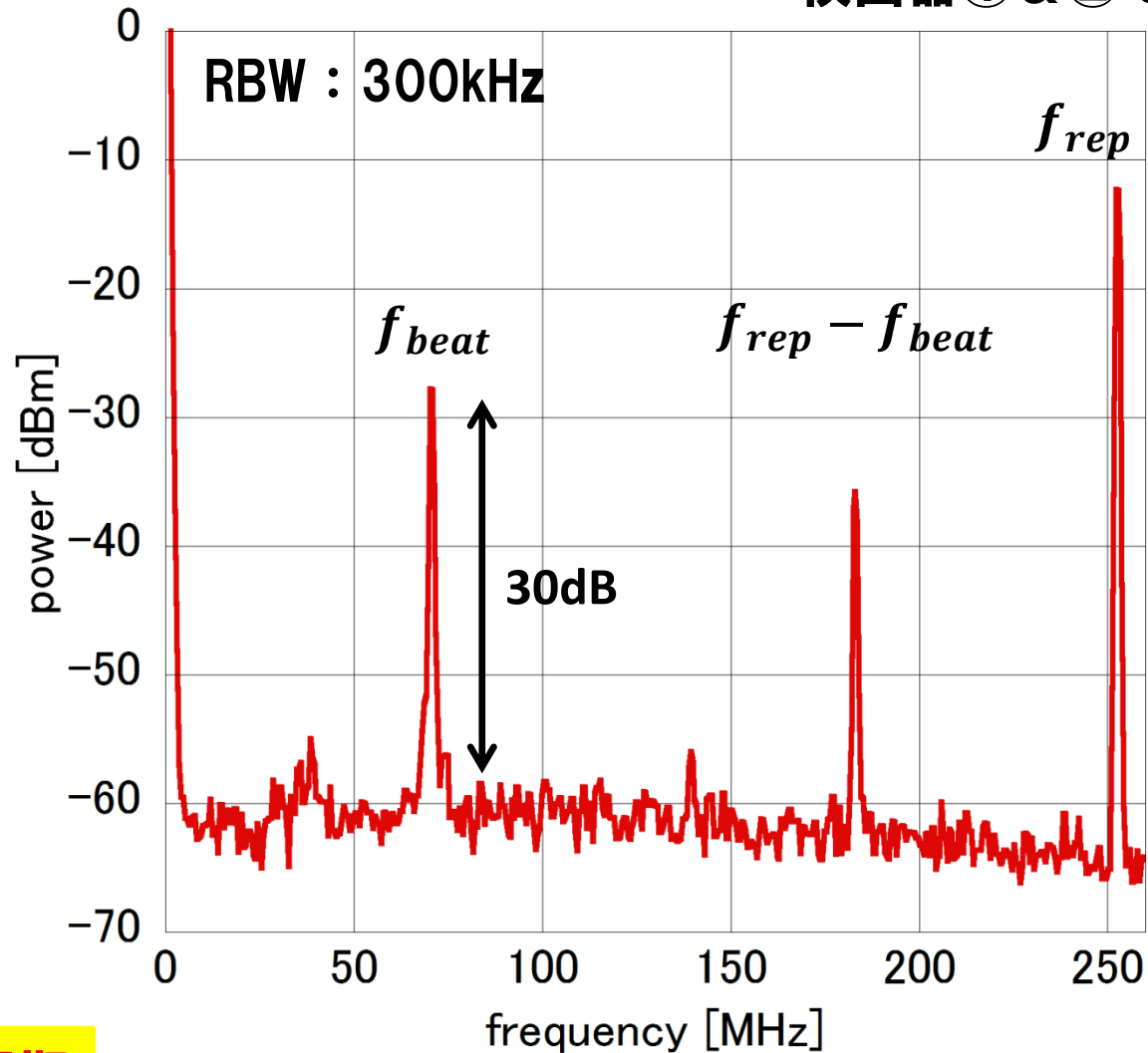
# THzシンセサイザ構成図





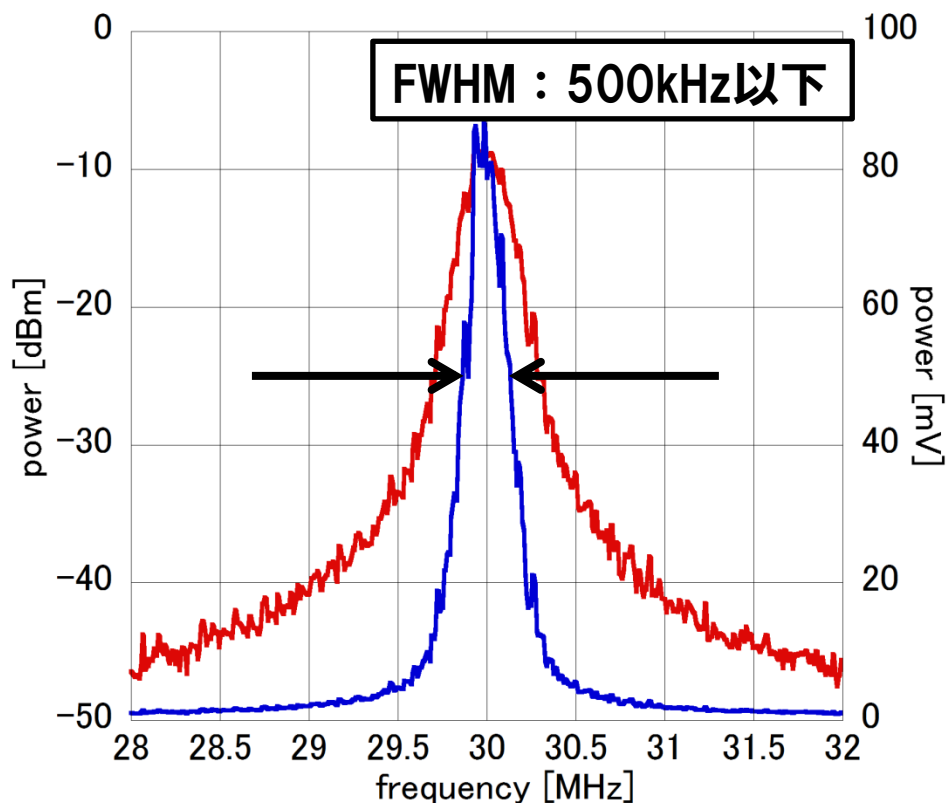
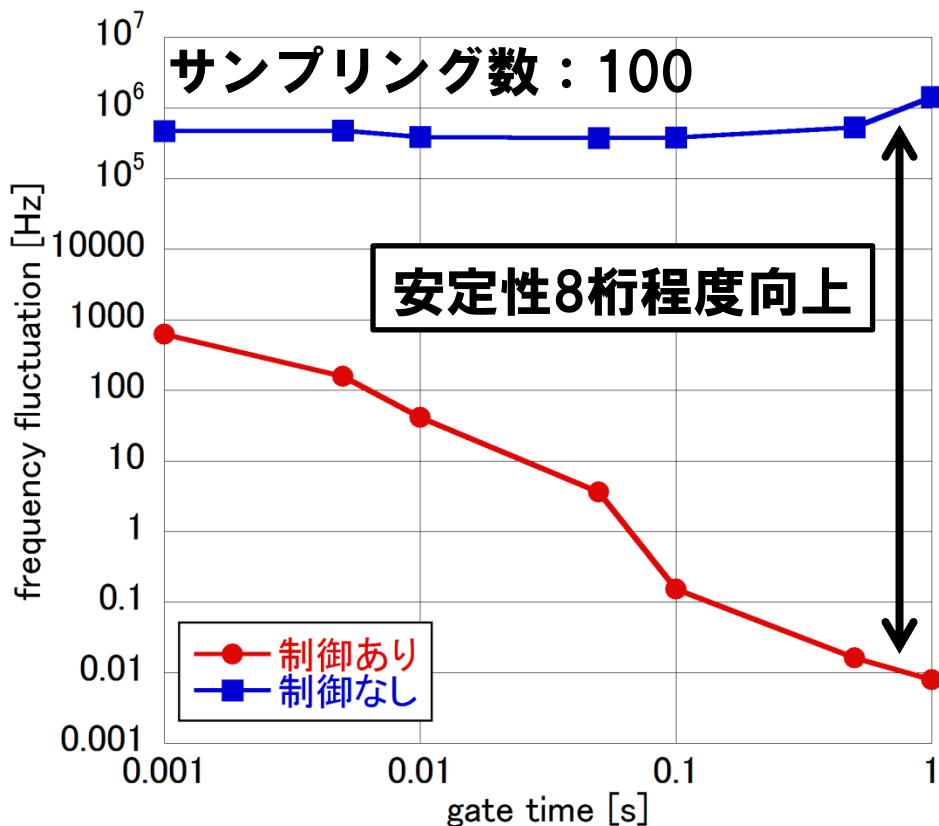
# 光コムとCWレーザーのビート

検出器①&②で得られる信号



Movie : 位相同期

# 位相同期有無によるビート揺らぎ



周波数カウンタによる標準偏差

制御後ビート信号線幅評価

赤 : ログスケール  
青 : リニアスケール

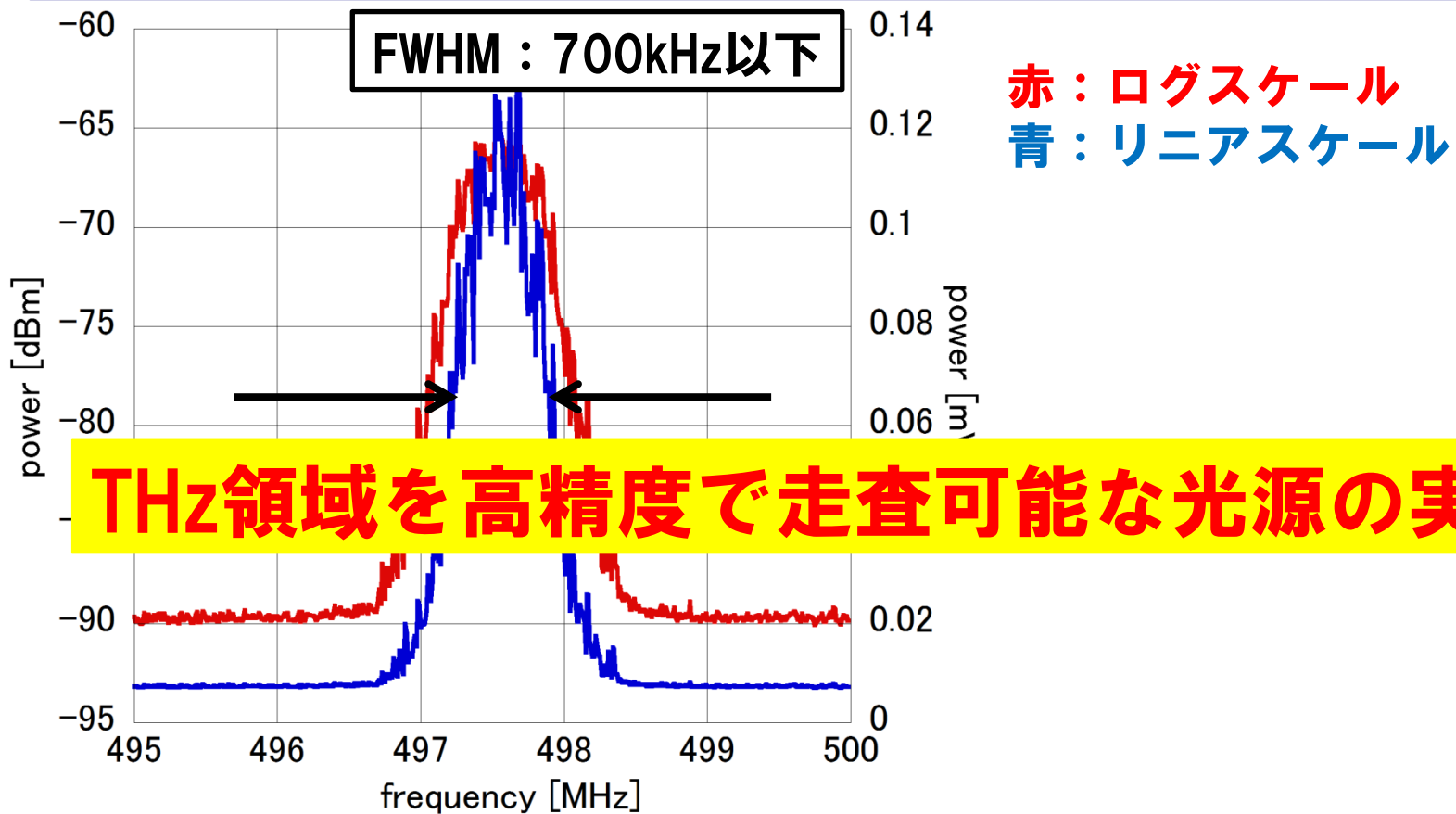
# THz線幅評価

2台のCWレーザの差周波がTHz波になる！

→検出器③で得られる信号がTHz波である

→検出器の帯域の問題によりTHz波の観測が不可

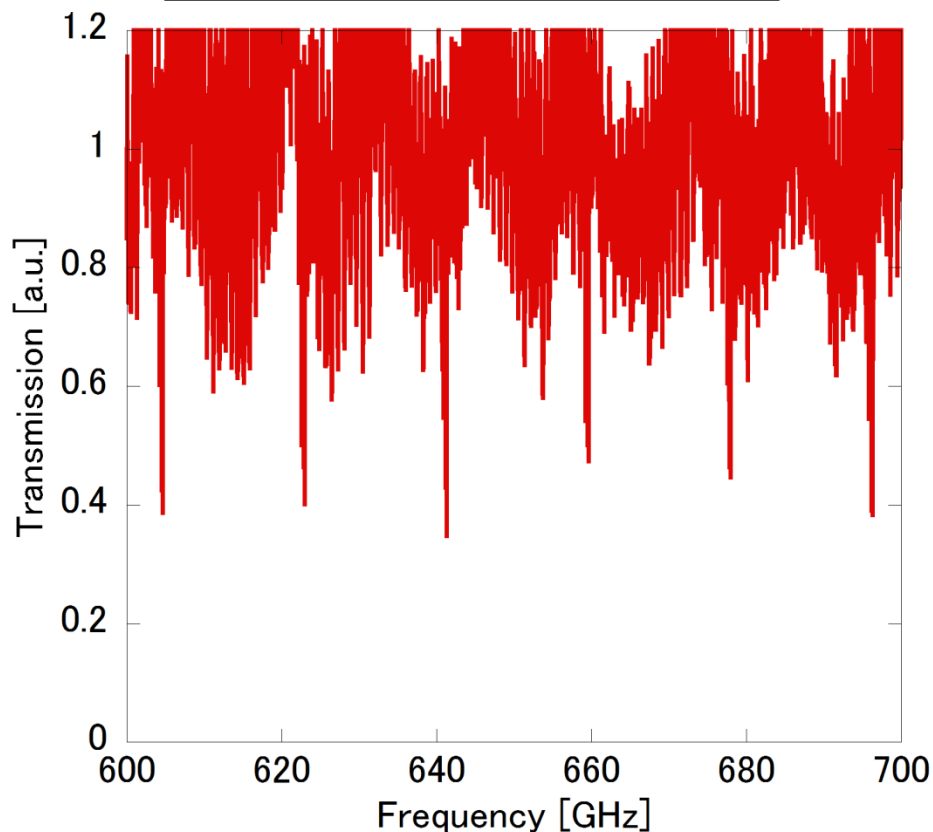
差周波：500MHz程度になるよう2台のCWレーザを走査



# *CH<sub>3</sub>CN*ガス分光@20Pa

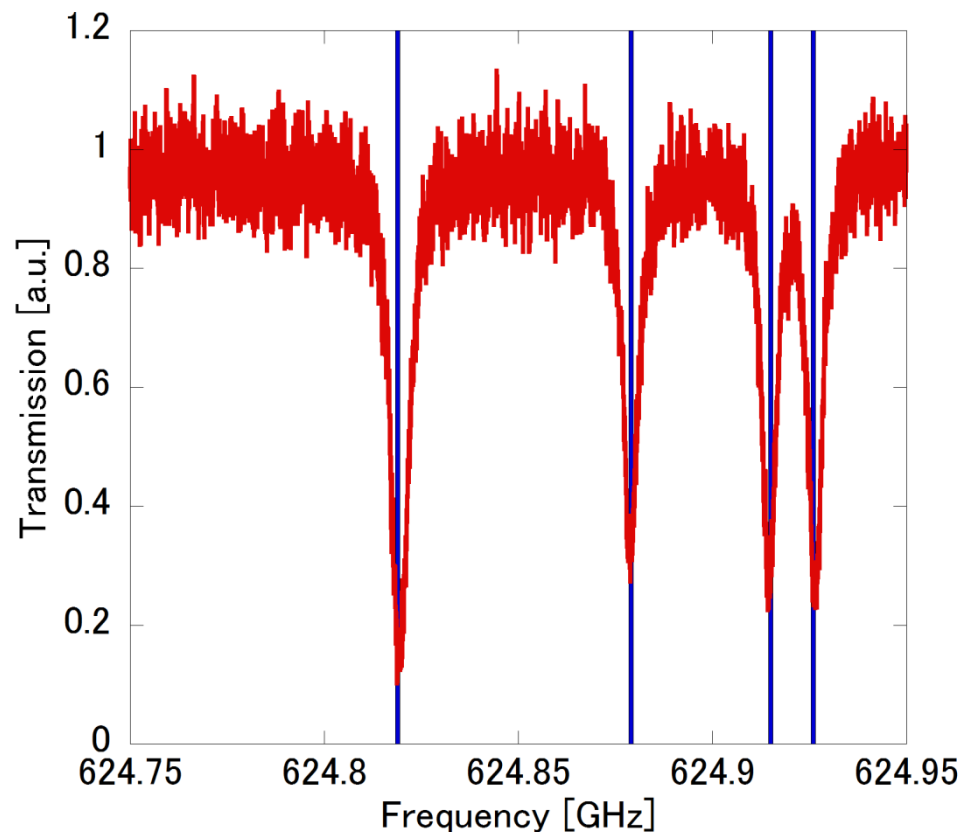
CH<sub>3</sub>CN . . . THz帯に周期的（約18.4GHz間隔）な吸収線を持つ

100GHz連続周波数走査



ステップ周波数：約5MHz  
計測時間：約35分

200MHz連続周波数走査



ステップ周波数：約30kHz  
計測時間：約10分

# まとめ

- 光コムにCWレーザを位相同期
- 差周波500MHzにおいて<700kHzの線幅を取得  
(THz波でもほぼ同等の線幅を得られる)
- CH<sub>3</sub>CNガス分光 (最大100GHz連続走査)

# 今後の予定

- データベースと吸収線比較
- 1THz連続可変THzシンセサイザの実現