

# THz コム間ビート信号の抽出とそれを用いたレーザー制御手法におけるジッター評価

## 1. イントロダクション

フェムト秒レーザー光によって発生させたモード同期テラヘルツ (THz) パルス列は、周波数領域において、多数の周波数モード列が櫛の歯状に等間隔で並んだ THz コムのスペクトルを示す[1]。THz コムの超微細スペクトル構造を直接計測することは困難であるが、繰り返し周波数 ( $f_{\text{rep}}$ ) がわずかに異なる別の THz コムを局部発振器として用いて多周波ヘテロダイン法 (非同期光サンプリング式 THz 時間領域分光法: ASOPS-THz-TDS) で RF 帯にダウンスケーリングすることにより、THz コムを分光計測に用いることが可能になる (デュアル THz コム分光法) [2-4]。この手法では、従来の THz 時間領域分光法 (THz-TDS) と比べ、短時間で計測が可能、機械的走査が不要、高い周波数分解能といった、優れた利点を有している。しかし、デュアル THz コム分光法を行う際に、レーザーの繰り返し周波数の不安定性が問題となってくる。そのため、繰り返し周波数  $f_{\text{rep}}$ 、および 2 台レーザーのコム間ビート  $\Delta f_{\text{rep}}$  の両方を安定化しなければならない。従来は、2 台のレーザーのコム間ビート  $\Delta f_{\text{rep}}$  のみを安定化[5]、②2 台のレーザーの  $f_{\text{rep}}$  を独立に安定化[6]、といった手法がとられていたが、 $f_{\text{rep}}$ 、 $\Delta f_{\text{rep}}$  の両方の安定化は行われていなかった。そこでデュアル THz コム間のビート信号を抽出し制御を行うことで、レーザー間のタイミングジッターの更なる抑制や、フリーランニングレーザーをデュアル THz コム分光法に用いることが可能になると期待される。

本研究では、 $f_{\text{rep}}$ 、 $\Delta f_{\text{rep}}$  の両方の安定化を行うために、デュアル THz スペアナおよび周波数逡倍を用いて、デュアル THz コム間の高次のビートを抽出し制御を行い、コム間ビートの周波数安定性、そしてレーザー間のタイミングジッターの影響について、結果を報告する。

## 2. 非同期光サンプリング法 (ASOPS 法) におけるタイミングジッターの影響

### 2.1 ASOPS 法の原理

ステージ走査式 THz-TDS の欠点であるスペクトル分解能向上と計測時間短縮のトレードオフの関係を解消するための手段として、ASOPS法がある。図2-1 にASOPS法の光学系とタイミングチャートを示す。図2-2 にASOPS法における信号の流れを示す。ASOPS法では、2台のレーザーの繰り返し周波数  $f_{\text{rep}1}$ 、 $f_{\text{rep}2}$  がわずかに異なるように安定化制御を行う。こ

れにより、THzパルスとプローブパルスが1周期ごとに、

$$s = \frac{1}{f_{rep1}} - \frac{1}{f_{rep2}} = \frac{\Delta f_{rep}}{f_{rep1}f_{rep2}}$$

だけずれていく。その結果、機械式時間遅延走査が不要となり、ピコ秒オーダーのTHzパルスをマイクロ秒オーダーまで拡大して高速サンプリングするため、オシロスコープで実時間計測できる。このASOPS法をTHz-TDSに適用すると、機械式時間遅延走査では達成不可能な広い測定時間窓で時間波形が高速取得でき、スペクトル分解能を大幅に向上できる可能性を有している。このときの時間スケール拡大率は「 $f_{rep1}/\Delta f_{rep}$ 」である。そして取得した波形をフーリエ変換してRF帯の周波数スペクトルを得た後、さらに時間スケール拡大率でリスケールすることによりTHz領域の周波数スペクトルを得ることができる。

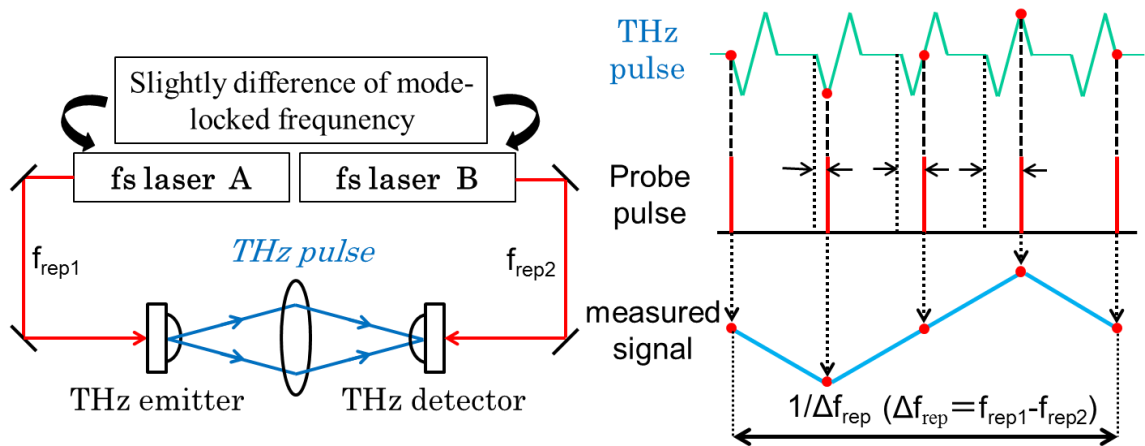


図2-1 ASOPS法の光学系とタイミングチャート

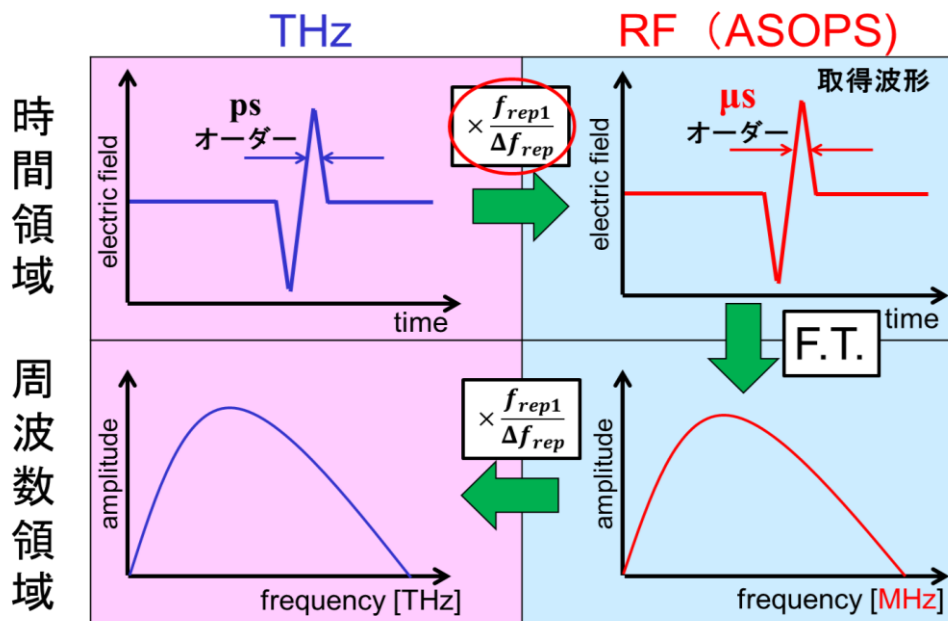


図 2-2 ASOPS-THz-TDS における信号の流れ

## 2.2 タイミングジッターの影響

しかし、ASOPS法では、このように時間スケール拡大率  $f_{\text{rep1}}/\Delta f_{\text{rep}}$  に基づいてスペクトルの目盛づけを行うため、スペクトル分解能と確度は  $f_{\text{rep1}}$ 、 $\Delta f_{\text{rep}}$  の安定性に依存する。これらのパラメータが揺らぐことにより、取得した波形の時間領域ではスキャンごとに時間スケールの揺らぎが生じる。その結果として、周波数領域ではスキャンごとに周波数スケールが変動してしまうため、吸収線のピークの位置がずれてしまい、積算した波形の吸収線の線幅が太るといった問題が生じる（図2-3）。

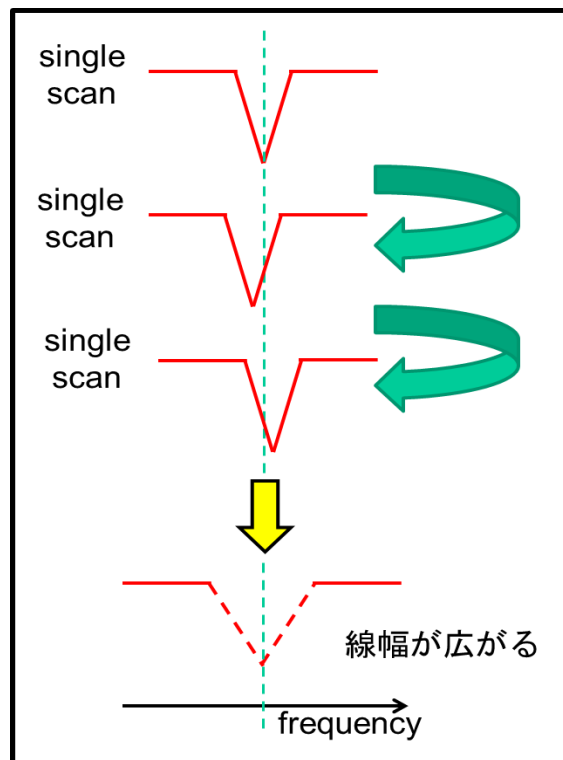


図 2-3 周波数領域におけるタイミングジッターの影響

## 2.3 従来のレーザー制御法 [5], [6]

この問題を解消するためには、 $f_{\text{rep1}}$ 、 $\Delta f_{\text{rep}}$  を抑制しなければならない。これらの揺らぎを解消するために従来行われた方法として、① $f_{\text{rep1}}$  がフリーランの状態、 $f_{\text{rep2}}$  を  $f_{\text{rep1}}$  とのコム間ビート  $\Delta f_{\text{rep}}$  が一定になるように制御を行うという手法[5]、② $f_{\text{rep1}}$  と  $f_{\text{rep2}}$  を直接安定化するという手法[6]がある。

図2-4にこれらの手法の概念図および各パラメータを示す。一つ目の手法において、A. Bartelsらは1GHzの高繰り返しのTi:Sレーザーを用いており、さらに検出手法は、EO検出で行っている。そのため、検出エレクトロニクスの帯域制限が緩和され、 $\Delta f_{\text{rep}}$  を高く設定することが可能となる。時間スケール拡大率  $f_{\text{rep1}} / \Delta f_{\text{rep}}$  の揺らぎにおいて支配的なのは  $\Delta f_{\text{rep}}$  であるため、EO検出を用いて  $\Delta f_{\text{rep}}$  を高くすることは、タイミングジッターの影響を抑える

ための有効な手段である。しかし、この手法では $f_{\text{rep1}}$  がフリーランであるため、 $f_{\text{rep1}}$  の安定性に不安が生じる。また、二つ目の手法では、PCA検出を行っているため、検出エレクトロニクス の帯域制限により $\Delta f_{\text{rep}}$  を高くすることができない。さらに、 $f_{\text{rep1}}$  は安定性11桁のRb原子時計に同期させているものの、 $\Delta f_{\text{rep}}$  は間接的に制御されているため、タイミングジッターが生じている可能性がある。

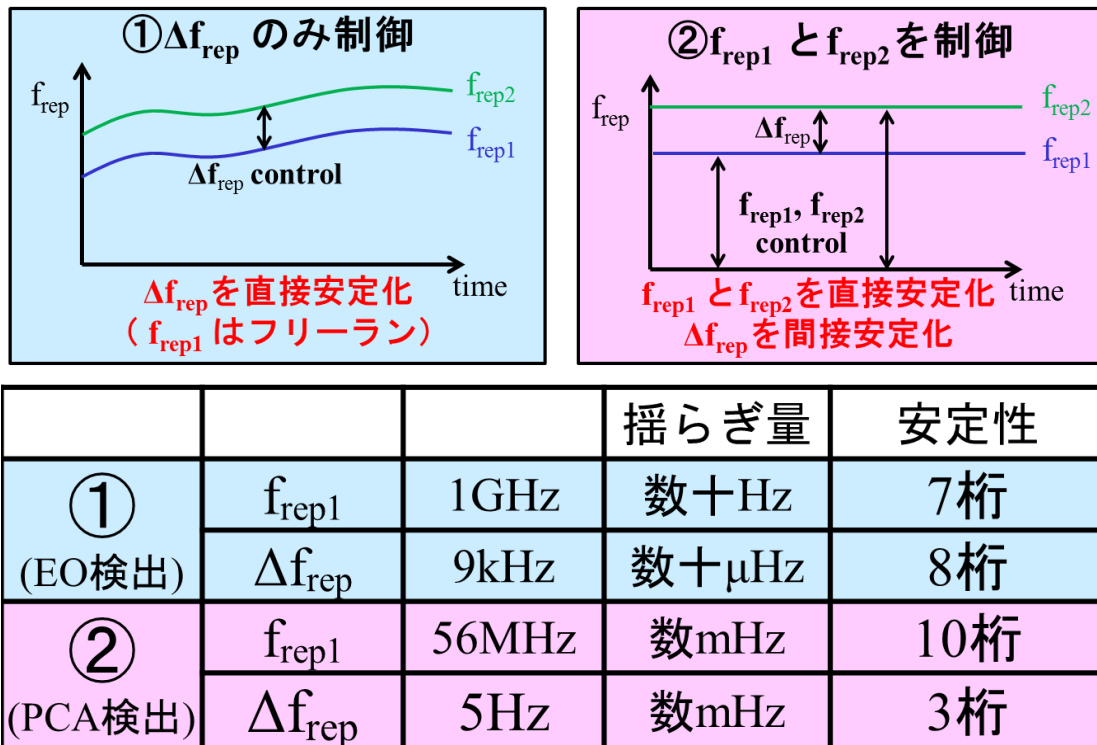


図 2-4 従来法の概念図および各パラメータ

### 3. 実験原理

タイミングジッターの影響を抑制するためには、 $f_{\text{rep1}} \cdot \Delta f_{\text{rep}}$  の両方の安定性をさらに向上させる必要がある。そこで今回は、 $f_{\text{rep1}}$  を直接安定化し、 $f_{\text{rep2}}$  を  $f_{\text{rep1}}$  とのコム間ビート  $\Delta f_{\text{rep}}$  が一定になるように制御を行った。図 3-1 に本手法による安定化制御の概念図を示す。これにより、 $f_{\text{rep1}} \cdot \Delta f_{\text{rep}}$  の両方の安定化制御が可能となる。この制御を行うためにはコム間ビート  $\Delta f_{\text{rep}}$  の信号が必要であるが、 $\Delta f_{\text{rep}}$  の信号は小さく、制御に用いることは難しい。そのため、中間発振器として CW-THz 波、さらに PLL により周波数逡倍を行う。これにより、約 40000 次のコム間ビート信号を生成する。

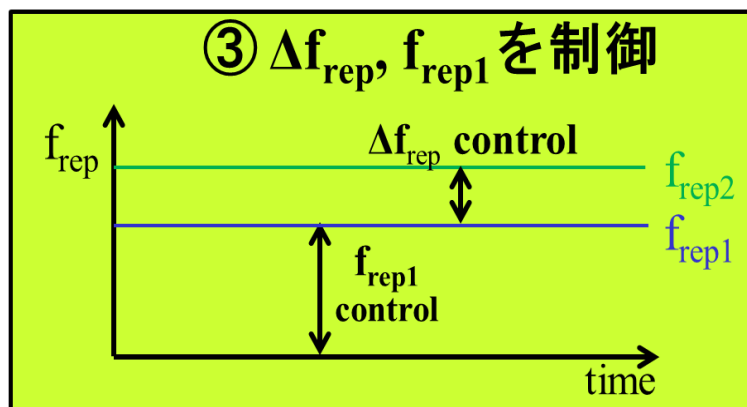


図 3-1 本手法による安定化制御の概念図

まず、繰り返し周波数  $f_{\text{rep1}}$  のモード同期光パルスをレンズで光伝導アンテナ (PCA) のアンテナギャップに集光することにより、PCA 内部にフォトキャリアテラヘルツ (PC-THz) コムが生成される。PC-THz コムは、モード同期周波数間隔で RF 領域から THz 領域まで切れ目なく存在する。そして、CW-THz 波 (75GHz~110GHz) をモード同期光パルスの入射方向と反対に取り付けられた半球シリコンレンズを介して、PCA に入射する。その結果、CW-THz 波と最隣接した  $m$  番目の PC-THz コム間での光伝導ミキシングにより、ビー

ト  $f_{\text{beat1}}$  が生ずる (図 3-2)。このとき、 $f_{\text{beat1}}$  は

$$f_{\text{beat1}} = f_{\text{CW}} - m f_{\text{rep1}} \quad (3-1)\text{式}$$

また、繰り返し周波数  $f_{\text{rep2}}$  間隔で並ぶ二つ目の PC-THz コムと CW-THz 波とのビート  $f_{\text{beat2}}$  も同様に、

$$f_{\text{beat2}} = f_{\text{CW}} - m f_{\text{rep2}} \quad (3-2)\text{式}$$

と表せる。

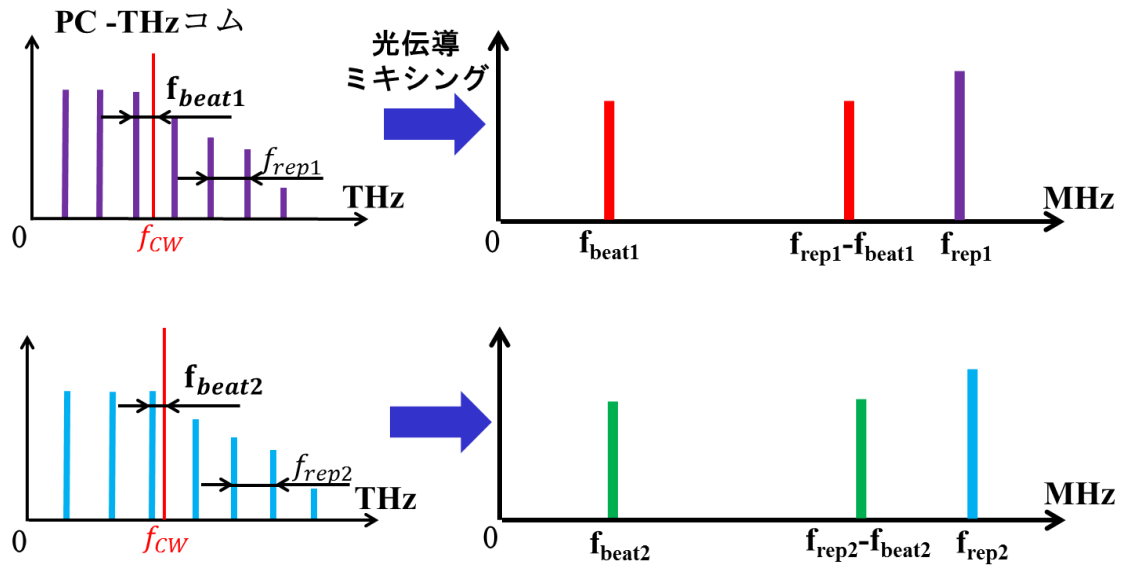


図 3-2 光伝導ミキシングによるビート信号の生成

これらの信号を、PLLにより周波数を  $N$  倍し、ミキシングすることにより、

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

となり、 $N \times m$  次のコム間ビート信号が生成される。この方法では、CW-THz 波の揺らぎはミキシングすることによりキャンセルされるため、広い線幅を有する CW-THz 波を用いることも可能である。

#### 4. 実験光学系

図 4-1 に実験光学系を示す。レーザーの繰り返し周波数はそれぞれ、レーザーA ( $f_{rep1}$ ) = 100.000005 MHz、レーザーB ( $f_{rep2}$ ) = 100.000000 MHz である。また、CW-THz 波の出力周波数は 105.7 GHz で行なった。これらは、安定度  $2 \times 10^{-11}$ 、確度  $5 \times 10^{-11}$  のルビジウム周波数標準器と同期している。レーザーA の繰り返し周波数  $f_{rep1}$  は安定化制御を行っている。2 台のモード同期レーザーから発生したモード同期光パルスは、レンズを通り PCA に入射し、PCA 内部に PC-THz コムが発生する。また、CW-THz 波はモード同期光パルスの入射方向と反対に取り付けられた半球シリコンレンズを介して、PCA に入射し、CW-THz 波と  $m$  番目の PC-THz コム間での光伝導ミキシングにより、PCA からビート信号が出力される。ビート信号は、帯域 1 MHz・ゲイン 1 MV/A のカレントプリアンプ及び後段のアンプで増幅された後、PLLにより周波数が 40 倍される (逡倍比  $N=40$ )。その後、これらの信号はミキシングされ、 $N \times m$  次のコム間ビート信号が得られる。今回は、コム間ビートを 5 Hz、 $m=1057$  次、逡倍比  $N=40$  で行ったため、 $1057 \text{ 次} \times \text{逡倍比 } 40 \times 5 \text{ Hz} = 211.4 \text{ kHz}$  の制

御信号となる。この信号を参照信号と比較してレーザーBにフィードバックすることにより、コム間ビートの安定化制御を行う。

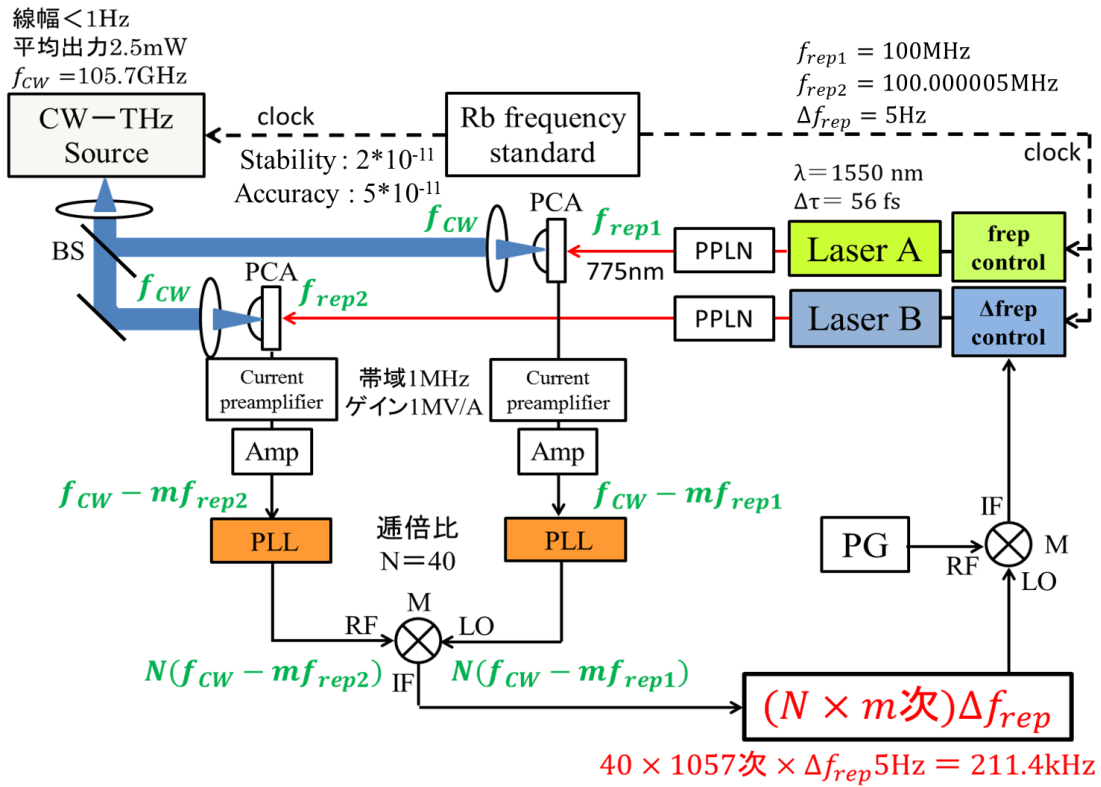


図 4-1 実験光学系

## 5. 実験結果

### 5.1 信号スペクトルの観測

スペアナ・オシロスコープにおいて観測した、

図 5-2 に、スペアナ・オシロスコープにおいて観測した

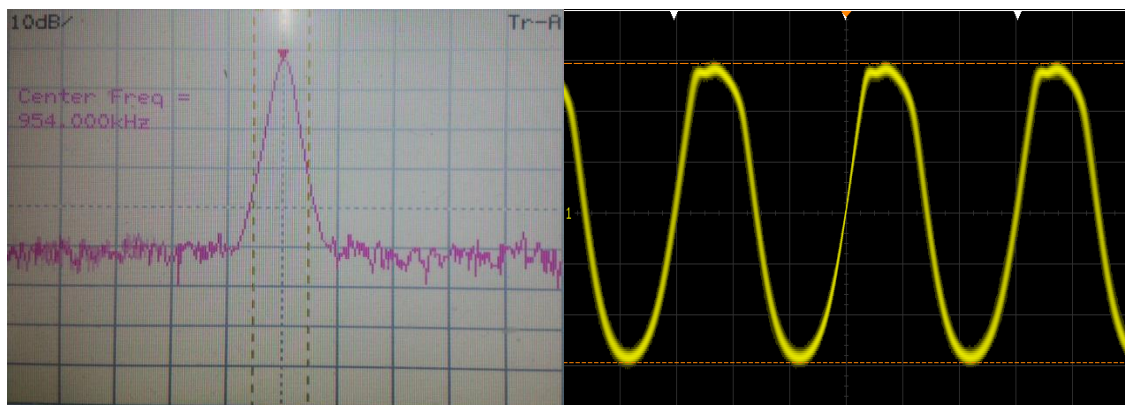


図 5-1 PC-THz コムと CW-THz 波とのビート (アンプ後)

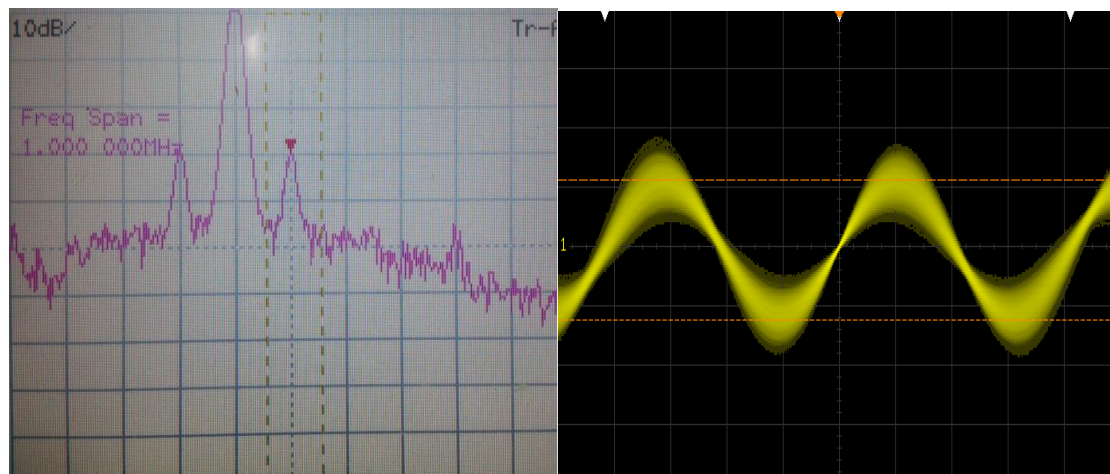


図 5-2 (1057×40) 次のコム間ビート

## 5.2 コム間ビート信号の周波数安定性評価

今回用いた手法の安定性を評価するために、従来法である  $f_{\text{rep}1}$  と  $f_{\text{rep}2}$  をそれぞれ安定化制御した場合との比較を、周波数カウンタ (Agilent 社 : 53132A) の標準偏差機能を用いて行なった。図 5-3 に、サンプリング数を 100 とし、ゲート時間を 0.001 秒、0.005 秒、0.01 秒、0.05 秒、0.1 秒、0.5 秒、1 秒と変化させた場合の 1057 次のコム間ビート信号の標準偏差を示す。 $\Delta f_{\text{rep}}$  は 5Hz とした。フリーランの状態では、 $\Delta f_{\text{rep}}$ 、 $f_{\text{rep}1}$  は制御していない。 $f_{\text{rep}1}$ 、 $f_{\text{rep}2}$  をそれぞれ安定化制御した場合は、ゲート時間が 1 秒のとき、標準偏差はおよそ 5mHz 程度となった。差周波制御では、ゲート時間が 1 秒の時に、逡倍比 1 および 10 で数百  $\mu\text{Hz}$ 、逡倍比 20 および 40 で数十  $\mu\text{Hz}$  の標準偏差となった。この結果から、今回の制御手法を用いることにより、2 台のモード同期レーザー間のコム間ビートが安定化できていることが分かる。また、逡倍比 40 において制御信号が最も高くなり (211.4kHz)、コム間ビートの揺らぎを最も抑えていることが確認できる。しかし、逡倍比 1 (5282Hz) と 10



(52850Hz) を比較すると、制御信号としては逡倍比 10 の方が高いにも関わらず、若干ではあるが逡倍比 1 の方が揺らぎを抑えている。これについては、まだ原因を解明できておらず、調査中である。

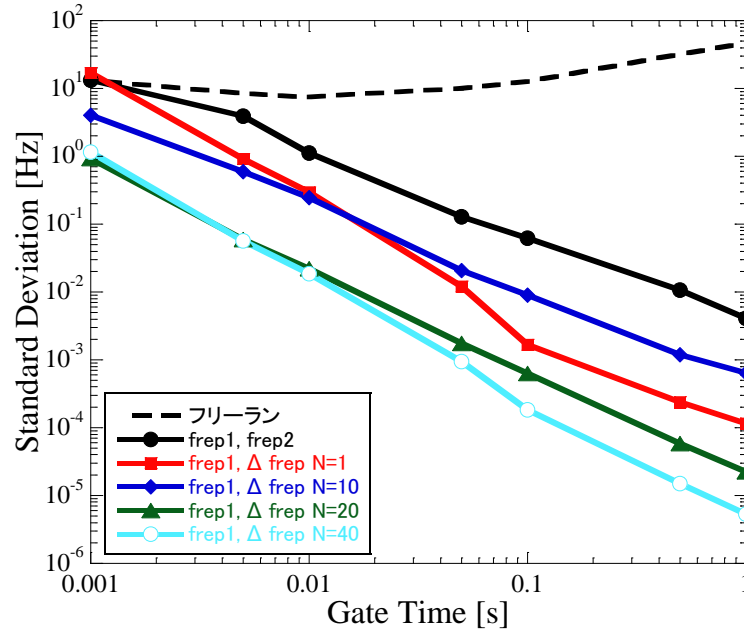


図 5-3 1057 次のコム間ビート信号の周波数安定性

### 5.3 時間領域におけるジッターの影響の評価

時間遅延走査型ダブルパルス光学系を用いて、時間領域におけるジッターの影響を評価した。図 5-4 に時間遅延走査型ダブルパルス光学系を示す。まず、結晶を用いてレーザーAのパルス光 1 と、レーザーB のパルス光との相互相関信号を生成し、アバランシェフォトダイオード (APD) で検出を行う。また、レーザーA のビームスプリッター (BS) ではじかれたパルス光 2 は、時間遅延ステージを経て再びレーザーB との相互相関信号を生成する。観測する相互相関信号は、レーザーA のパルス 1 とパルス 2 の間隔を時間スケール拡大したものとなる。そこで今回評価に用いたのは、レーザーA のパルス光 2 に、時間遅延を与えた場合に、観測した相互相関信号のパルス間の揺らぎである。実験結果を図 5-5 に示す。横軸に時間遅延、縦軸にパルス間の揺らぎの標準偏差をとっている。この結果から、今回用いた手法により、従来の  $f_{\text{rep1}}$ 、 $f_{\text{rep2}}$  制御よりも、ジッターの影響を一桁抑えていることが確認できる。

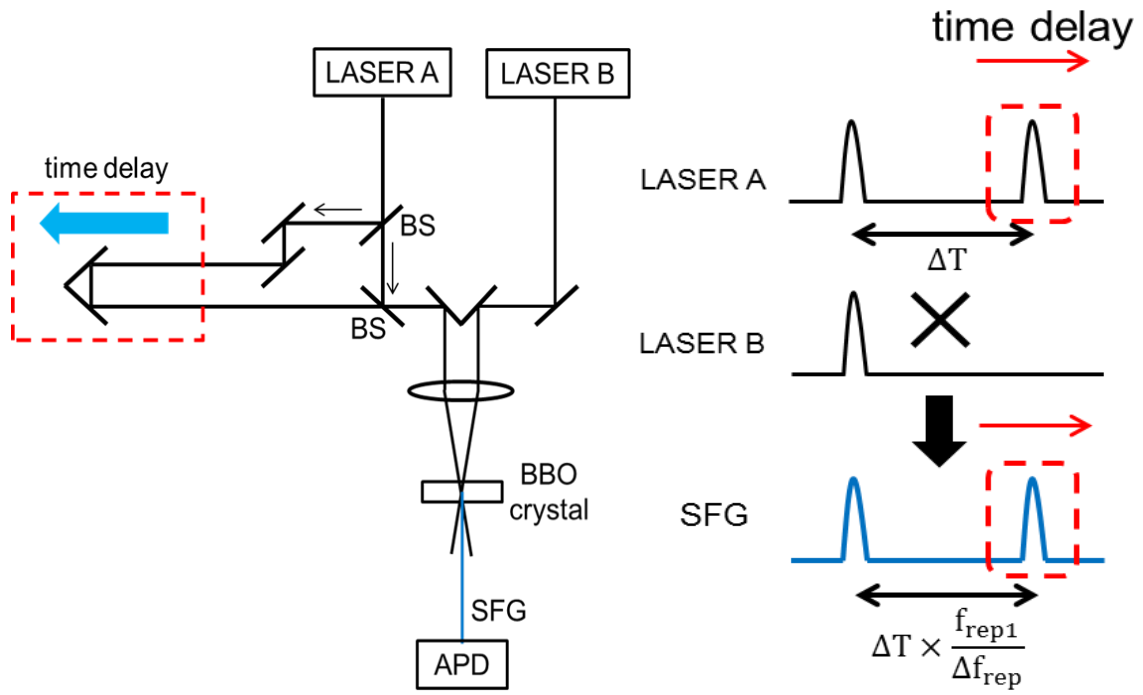


図 5-4 時間遅延型ダブルパルス光学系

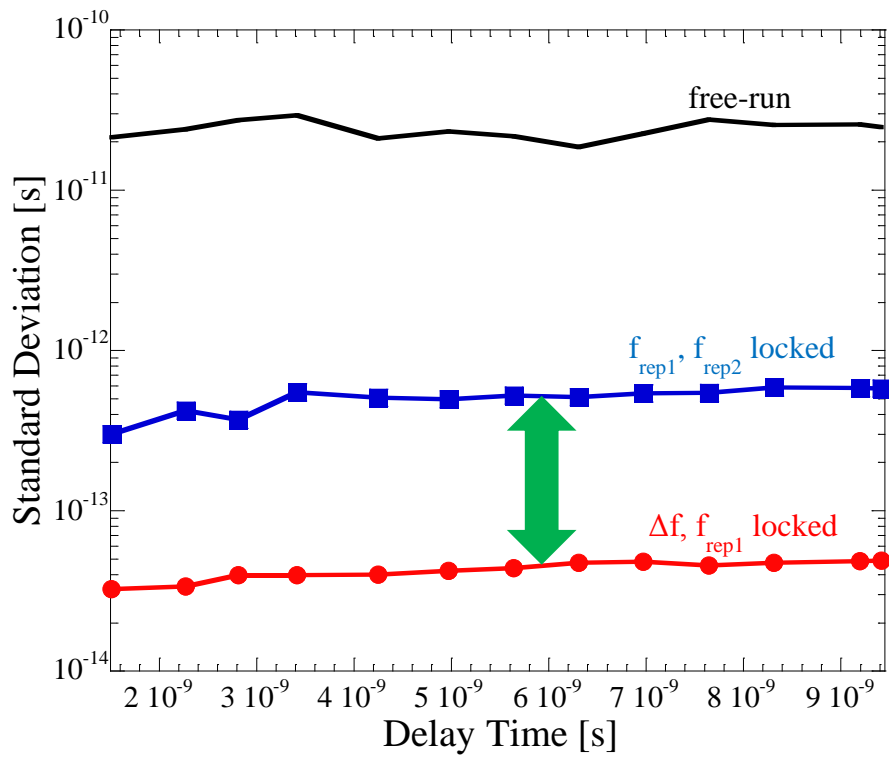


図 5-5 時間領域におけるジッターの影響

#### 5.4 低圧ガス分光による分解能評価

周波数領域におけるジッターの影響を、デュアルコム分光法により水蒸気の吸収線を用いて評価を行った。図 5-6 に実験光学系を示す。THz 発生・検出に用いた PCA はダイポール型 PCA である。発生した THz パルスは直径 50mm、長さ 400mm のガスセルを通過し、検出側の PCA に入射する。出力信号は帯域 1MHz、ゲイン 1MV/A カレントプリアンプにより増幅され、デジタイザによってサンプリングレート  $2 \times 10^6$  で取得される。トリガー信号には、相互相関信号を用いている。また、大気中の水蒸気の影響を防ぐために、PCA からガスセルまでの THz パルスの光路をアクリル板で囲い、窒素パージを行った。サンプルには、理論圧力広がり線幅が 100MPa となるように水蒸気 50Pa と窒素 1350Pa の混合ガスを用い、0.5569THz の吸収線の線幅の評価を行った。また、吸収線のピークをサンプリングするように、 $f_{\text{rep}1}$  は 100.0244253MHz とした。

図 5-に、測定時間 100s で、 $\Delta f_{\text{rep}}$  を 5, 10, 20Hz と変化させていったときの水蒸気の吸収線幅を示す。 $\Delta f_{\text{rep}} = 5\text{Hz}$  において、従来法である  $f_{\text{rep}1}$ 、 $f_{\text{rep}2}$  をそれぞれ安定化制御した場合では、ジッターの影響により線幅が広がっていることが確認できる。しかし、今回の制御手法では、ジッターの影響を抑え理論吸収線幅に近いことが分かる。また、 $\Delta f_{\text{rep}} = 0\text{Hz}$  にした場合は違いがほぼ見られない。これは  $\Delta f_{\text{rep}}$  が高くなることにより  $\Delta f_{\text{rep}}$  安定性が向上したため、顕著な違いがあまり出なくなったものと思われる。

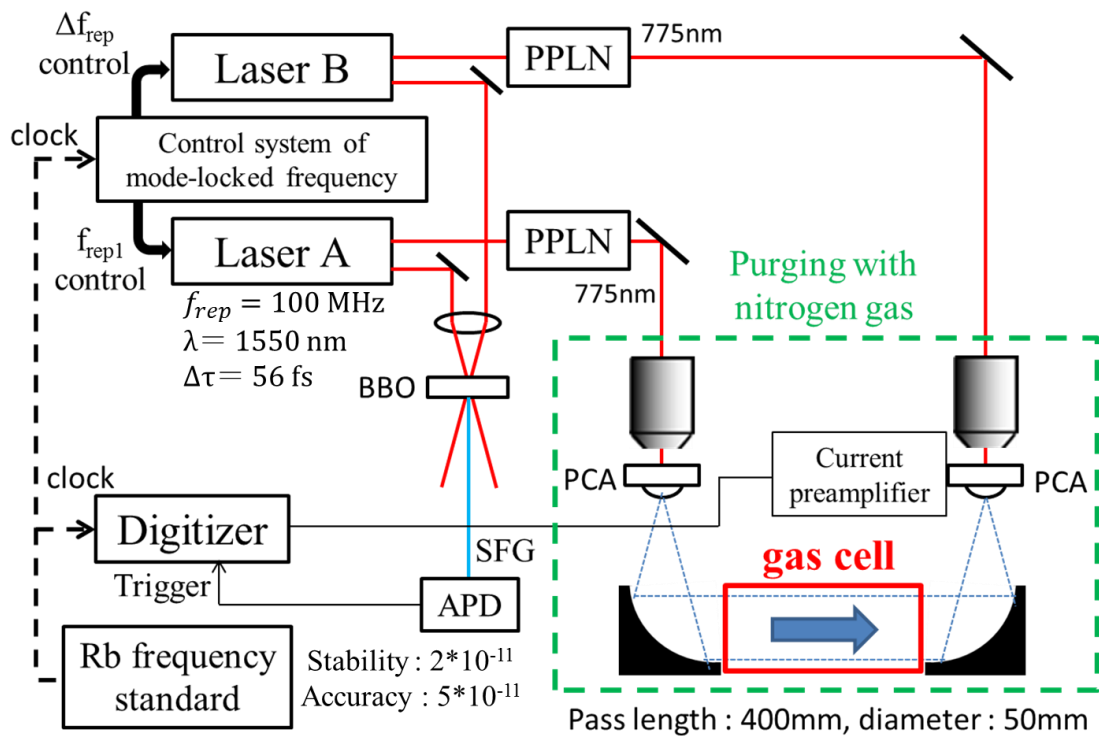


図 5-6 デュアル THz コム分光法の実験光学系

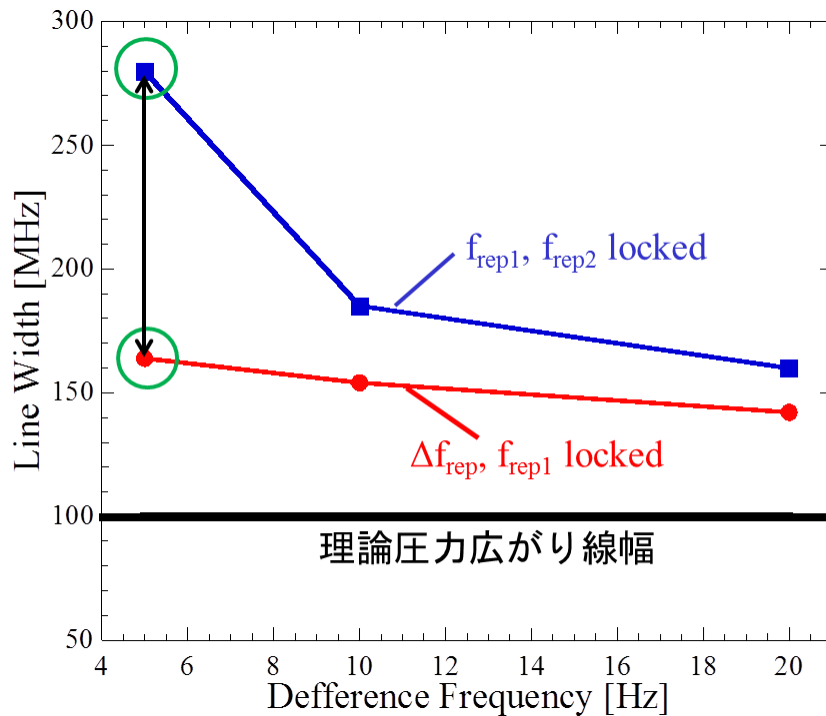


図 5-7 周波数領域におけるジッターの影響

## 6. まとめ・今後の課題

今回用いた  $\Delta f_{\text{rep}} \cdot f_{\text{rep1}}$  制御は、従来の  $f_{\text{rep1}}$ 、 $f_{\text{rep2}}$  制御に対し、コム間ビートの周波数安定性が 2 桁向上、ジッターの影響を 1 桁抑制、という結果が得られた。また、周波数領域におけるジッターの評価では、 $\Delta f_{\text{rep}} = 5\text{Hz}$  において、ジッターの影響を抑えていることが確認できた。しかし、理論吸収線幅にはまだ届いていないため、測定方法の改善を行う必要があると考えている。

今後は、 $\Delta f_{\text{rep}}$  のみを制御した場合のジッターの影響を、ガス分光により評価し追加する。さらに、アダプティブサンプリングについて知識を習得し、光学系の改善を進めていく。

### 参考文献

- [1] IEEE-JSTQE **17**, 191-201 (2011).
- [2] Appl. Phys. Lett. **88**, 241104 (2006).
- [3] IEEE-TST **3**, 322-330 (2013).
- [4] arXiv:1303.5799 (2013).
- [5] Opt. Express, **14**, 430-437 (2006)
- [6] Opt. Lett., **35**, 1689-1691 (2010).