

第7章 周波数コムを基準としたテラヘルツ周波数標準技術

安井武史*

1 はじめに

計量標準とは、計測の基準であり、経済・社会・科学技術の様々な分野で行われる計測の信頼性を保証する基盤として位置づけられる。したがって、計量標準は『国の力』を表す重要な技術基盤である。確かな信頼性に基づいた計量標準を確立することにより、応用産業を国内外に幅広く普及させていくことが可能になる。特に、周波数は電磁波において最も基本的な物理量であり、周波数標準が電磁波の計量標準の根幹をなしている。マイクロ波領域や光波領域の電磁波では、計測の基準が確立され、国家標準の整備が行われてきた。しかし、長らく未開拓な電磁波領域とされてきたテラヘルツ (THz) 帯では十分に成熟した光源技術および計測技術がなかったため、未だ『周波数標準のTHzギャップ』が存在している。この『周波数標準のTHzギャップ』を解消できれば、確かな信頼性に基づいたTHz周波数標準を確立でき、センシングや無線通信を始めとしたTHz応用産業を幅広く普及させていくことが可能になる。本章では、『周波数標準のTHzギャップ』を解消する手段として、光波領域において革命的進展をもたらした周波数コム技術に着目し、周波数コムを基準としたTHz周波数標準技術について解説する。

2 周波数コムを用いたコヒーレント周波数リンク¹⁾

コヒーレント周波数リンクに基づいたTHz周波数標準技術の概念図を図1に示す。現在、時間(周波数)の定義は、マイクロ波帯のセシウム原子時計に基づいている。一方、光波領域のフェムト秒モード同期レーザー光は、光周波数領域において多数の安定な光周波数モード列がモード同期周波数の間隔で櫛(コム)の歯状に並んだ超離散マルチ・スペクトル構造(光コム)を有している²⁾。この光コムを光伝導アンテナ(あるいは非線形光学結晶や電気光学結晶)に入射すると、同じ周波数間隔を保ったまま、光コムがTHz領域までダウンコンバートされ、THz領域の周波数コム(THzコム)が生成される³⁾。光コムやTHzコムは、広い周波数選択性・非常に高いスペクトル純度・絶対周波数校正・周波数通倍機能・単純性といった特徴を有しているので、現在の時

* Takeshi Yasui 徳島大学 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 教授

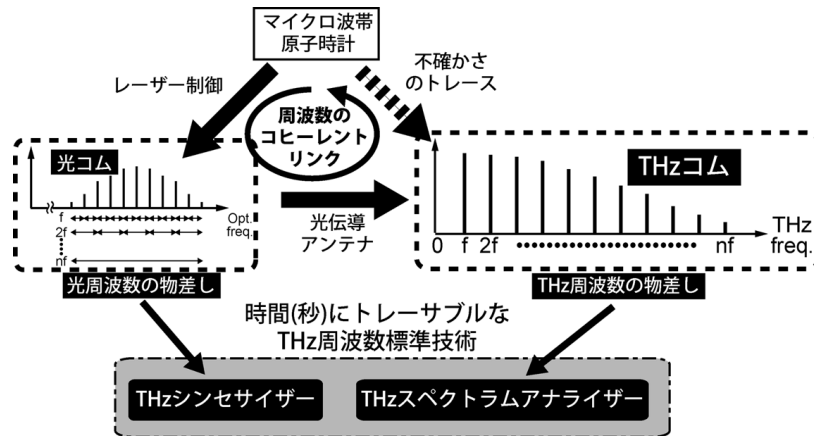


図1 コヒーレント周波数リンクに基づいたTHz周波数標準技術

間（周波数）標準であるマイクロ波原子時計を基準としてフェムト秒モード同期レーザーを安定化制御することにより、『周波数の超精密物差し』として利用できる。ここで重要なのは、レーザー制御や光伝導アンテナがコヒーレントな過程に基づいているため、光コムやTHzコムを『周波数リンカー』として利用でき、マイクロ波領域—光波領域—THz領域の周波数をコヒーレントにリンクすることが可能となることである。その結果、マイクロ波や光波領域における充実した周波数標準群の不確かさをTHz領域に分配でき、SI基本単位の1つである時間（秒）にトレーサブルなTHz周波数標準技術が構築できる。

3 THz帯スペクトラム・アナライザー（THzスペアナ）^{3~6)}

マイクロ波領域の高周波信号をRF帯までダウンコンバートする技術として、電気光学サンプリングに基づいた高調波ミキシングがよく使われてきた⁷⁾。THzスペアナでは、光伝導ミキシング法を用いることにより、高調波ミキシングをTHz領域まで拡張している。測定原理を図2(a)に示す。従来の電氣的ヘテロダイン法との主な違いは、被測定CW-THz波の検出器兼ミキサー（ヘテロダイン検出器）として光伝導アンテナ（PCA）を用いることにより、室温環境下で高感度かつ広帯域なスペクトル感度を実現している。もう1つの違いは、PCA中に生成したフォトキャリアのTHzコム（PC-THzコム）を、多周波の局部発振器として利用することにより、1台の局部発振器でTHz領域をフルカバーしている点である。その結果、室温環境下でTHz領域をフルカバー可能な高調波ミキシングが可能になる。

図2(b)は、光伝導ミキシング法における周波数スペクトル信号の振る舞いを示している。フェ

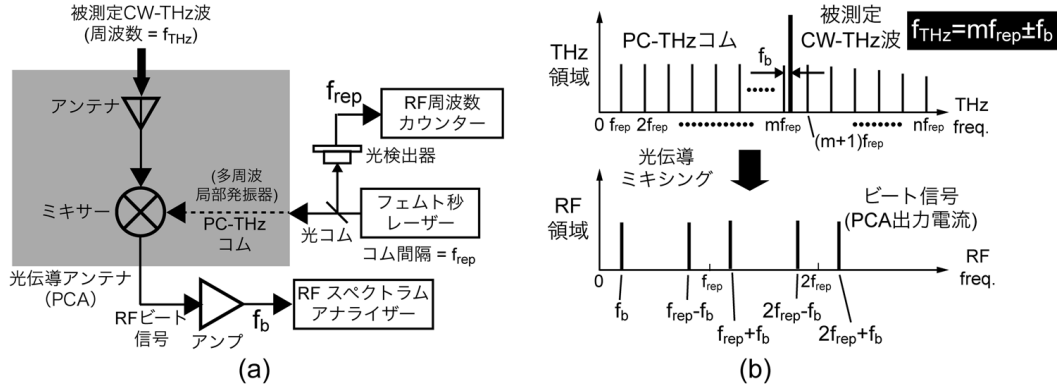


図2 (a)THzスペアナの測定原理と(b)光伝導ミキシング法における周波数スペクトル

ムト秒レーザー（モード同期周波数 = f_{rep} ）から出力された光コムをTHz検出用PCAのギャップに集光すると、光伝導過程を介した超広帯域復調により、PC-THzコム（周波数 = $f_{rep}, 2f_{rep}, \dots, nf_{rep}$ ）がPCA内に生成される。このような状況下で、被測定CW-THz波（周波数 = f_{THz} ）がPCA内に入射されると、光伝導ミキシング過程を経て、両者のビート信号成分（周波数 = $f_b, f_{rep} \pm f_b, 2f_{rep} \pm f_b, \dots, nf_{rep} \pm f_b$ ）がPCA出力電流信号としてRF帯に生成される。ここで、最も低周波のビート信号（ f_b ビート信号）は、被測定CW-THz波とそれに最隣接した m 次のコムモード（周波数 mf_{rep} ）のミキシングによって生成しているため、被測定CW-THz波の絶対周波数 f_{THz} は以下のように与えられる。

$$f_{THz} = mf_{rep} \pm f_b \tag{1}$$

f_{rep} および f_b は、RF帯周波数計測機器で直接測定可能である。 m と f_b 符号を決定するためには、モード同期周波数 f_{rep} を δf_{rep} だけ変化させた時のビート周波数 f_b の変化量 δf_b を計測する。この場合、 f_{THz} は以下のように与えられる。

$$f_{THz} = m(f_{rep} + \delta f_{rep}) \pm (f_b + \delta f_b) \tag{2}$$

式(1)と(2)の等号関係から、 m と f_b 符号が以下の式を用いて決定できる。

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f_{rep}|} \tag{3}$$

$$sign(f_b) = -sign\left(\frac{\delta f_b}{\delta f_{rep}}\right) \tag{4}$$

第7章 周波数コムを基準としたテラヘルツ周波数標準技術

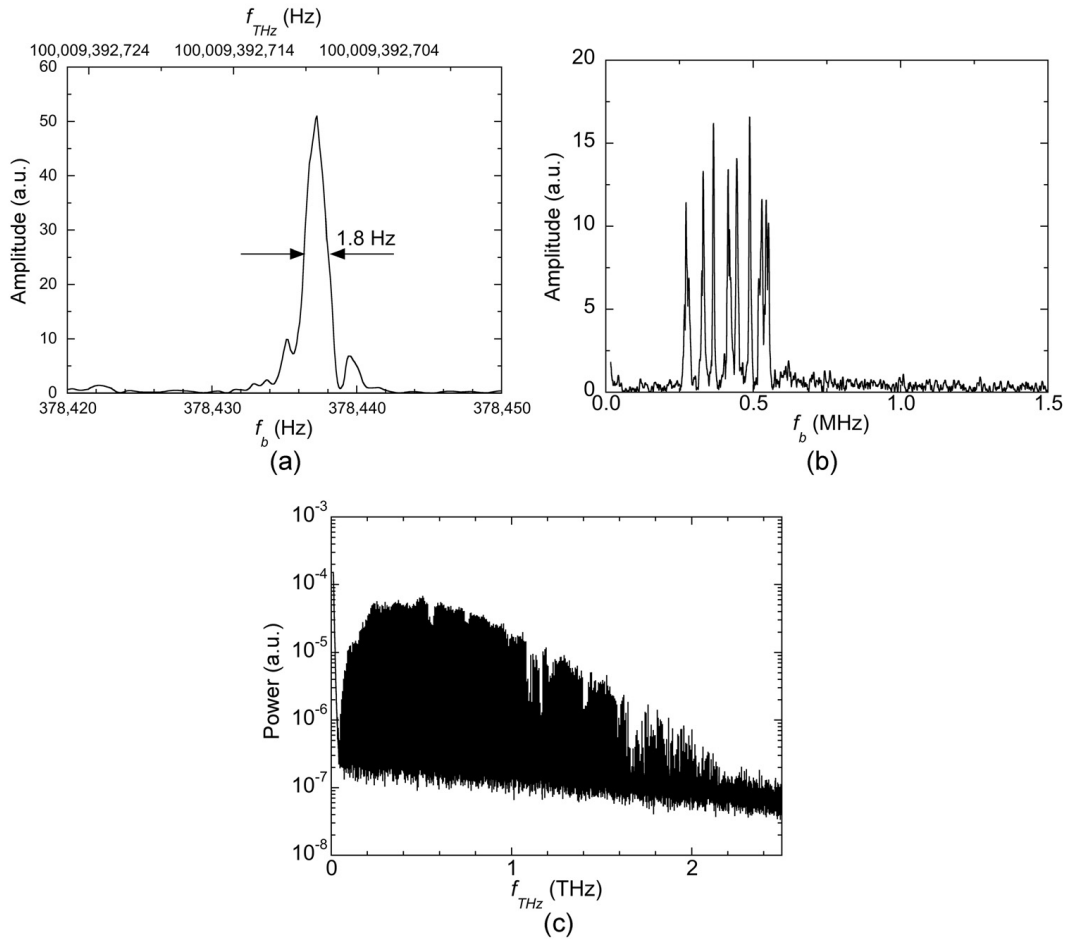


図3 THzスペアナで計測されたCW-THz波のスペクトル
 (a) 周波数通倍器, (b) UTC-PDフォトミキシングソース, (c) THz電磁波パルス

図3(a)は、マイクロ波周波数シンセサイザの出力を周波数通倍器で6通倍することによって得たCW-THz波（周波数=100 GHz、パワー=5 mW）の周波数スペクトルを示しており、下側と上側のスケールはビート周波数 f_b と絶対周波数 f_{THz} をそれぞれ示している。狭線幅のスペクトルが極めて高分解能に測定できている。また、周波数測定精度は 10^{-11} に達しており、これはレーザー制御用基準信号源に用いたルビジウム原子時計と同等である。図3(b)は、THz無線通信によく用いられるFバンド（周波数=90~140 GHz）単一走行キャリア・フォトダイオード（UTC-PD）型フォトミキシングCW-THz光源⁸⁾（周波数=120 GHz、パワー=100 μ W）を計測した例である。ビート信号が大きく揺らいでいる様子が確認できるが、これはフォトミキシングに用いた2台の近赤外CWレーザーがフリーランニング状態であるためである。図3(c)は、フェムト秒パルス光とTHz発生用PCAによって発生させたTHz電磁波パルスの周波数スペクトルを測定した

例である。従来のTHz-TDSでは、スペクトル分解能の制限のため、THzパルスは連続スペクトルとして計測されるが、実際には周波数コム状のTHzスペクトルを有していることがわかる。また、THzスペアナのスペクトル感度が少なくとも2 THzにおよんでいることも確認できる。さらに、電気光学サンプリングを用いたTHzスペアナで、28 THz帯CW炭酸ガスレーザーのスペクトルを計測したり⁹⁾、2.7 THz帯CW量子カスケードレーザーをTHzコム・モードに位相同期し高出力・狭線幅CW-THz波が実現されている¹⁰⁾。

4 THz帯周波数シンセサイザー (THzシンセ)^{11, 12)}

狭線幅で絶対周波数を広帯域に連続走査可能なTHzシンセは、精密THz分光用光源やヘテロダイン検出器用局部発振器として重要である。また、THz分光計の周波数校正やTHz無線通信キャリア信号のための基準周波数信号源としての利用も期待できる。これまでに、2台の近赤外レーザー光のフォトミキシング⁸⁾や光パラメトリック過程¹³⁾を用いた周波数可変CW-THz光源が報告されているが、これらの絶対周波数の不確かさは精密計測用途には必ずしも十分と言えなかった。一方、光の領域では、単一モードCWレーザー光を光コムに位相同期することにより、マイクロ波周波数標準にリンクされた光シンセが実現されている^{14, 15)}。もし、周波数差がTHzオーダーの2台の光シンセを準備し、両者をフォトミキシングしてCW-THz波を発生させれば、マイクロ波周波数標準に位相同期したTHzシンセが実現できるであろう。このような考えに基づいたTHzシンセの原理図を図4に示す。光シンセ1（周波数固定）の絶対周波数 f_{ofs1} は以下のように表せる。

$$f_{ofs1} = f_{ceo1} + m_1 f_{rep1} + f_{beat1} \quad (5)$$

ここで、 f_{ceo1} と f_{rep1} は光コム1のキャリア・エンベロープ・オフセット周波数とコム間隔、 m_1 はCWレーザー1が位相同期した光コム1のモード次数、 f_{beat1} はCWレーザー1と光コム・モード m_1 のビート周波数である。 f_{ceo1} 、 f_{rep1} 、 f_{beat1} をレーザー制御によってマイクロ波周波数標準に位相同期し、 m_1 を波長計で決定すれば、 f_{ofs1} をマイクロ波周波数標準の不確かさで決定できる。一方、光シンセ2（周波数可変）の絶対周波数 f_{ofs2} は以下ようになる。

$$f_{ofs2} = f_{ceo2} + m_2 f_{rep2} + f_{beat2} \quad (6)$$

ここで、 f_{ceo2} と f_{rep2} は光コム2のキャリア・エンベロープ・オフセット周波数とコム間隔、 m_2 はCWレーザー2が位相同期した光コム2のモード次数、 f_{beat2} はCWレーザー2と光コム・モード m_2 のビート周波数である。したがって、光シンセ1と光シンセ2のフォトミキシングによって発生

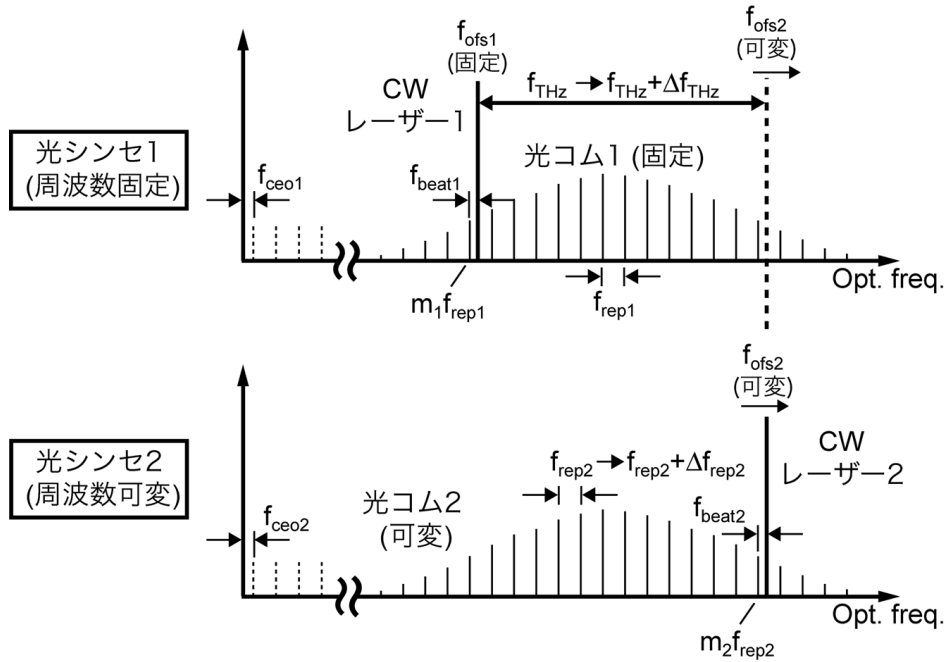


図4 2台の光シンセのフォトミキシングに基づいたTHzシンセ

させたCW-THz波の絶対周波数 f_{THz} は、以下ようになる。

$$f_{THz} = |f_{ofs2} - f_{ofs1}| = |(f_{ceo2} - f_{ceo1}) + (m_2 f_{rep2} - m_1 f_{rep1}) + (f_{beat2} - f_{beat1})| \quad (7)$$

光シンセ同様、 f_{THz} もマイクロ波周波数標準の不確かさで決定できる。ここで、 f_{rep2} を Δf_{rep2} だけ変化させると、 f_{THz} を $m_2 \Delta f_{rep2}$ だけ連続チューニングすることができる。例えば、中心周波数194 THz (中心波長1,550 nm) のファイバー光コムにおいて、コム間隔 f_{rep2} (= 50 MHz) の1%が可変であるとすると ($\Delta f_{rep2} = 500$ kHz), f_{THz} の連続チューニング範囲は約2 THzに達し、ブロードバンドなTHzシンセとしても利用可能である。

原理確認実験として、水素メーザーに位相同期した2台の光シンセ ($f_{ceo1} = 10,683,000$ Hz, $f_{rep1} = 49,985,225$ Hz, $f_{beat1} = 21,384,000$ Hz, $f_{ofs1} = 194.4$ THz, $f_{ceo2} = 10,683,000$ Hz, $f_{rep2} = 50,971,733$ Hz, $f_{beat2} = 69,960,000$ Hz, $f_{ofs2} = 194.5$ THz, $\Delta f_{ofs2} = 990$ GHz) を準備し、両者の光周波数差をFバンド範囲内 (90~140 GHz) に設定した。そして、FバンドUTC-PDを用いたフォトミキシングにより、CW-THz波 (平均パワー = 250 μ W) を発生させた。図5は、Fバンド内でTHzシンセの出力周波数をチューニングした時のスペクトル波形を示している。スペクトル波形の観測には、上述のTHzスペアナ^{4,5)}を用いた。CW-THz波がFバンド内でチューニングできている様子が確認できる。線幅が1 MHz程度と若干広いものの、その中心周波数は水素メーザーと同等の不確かさ

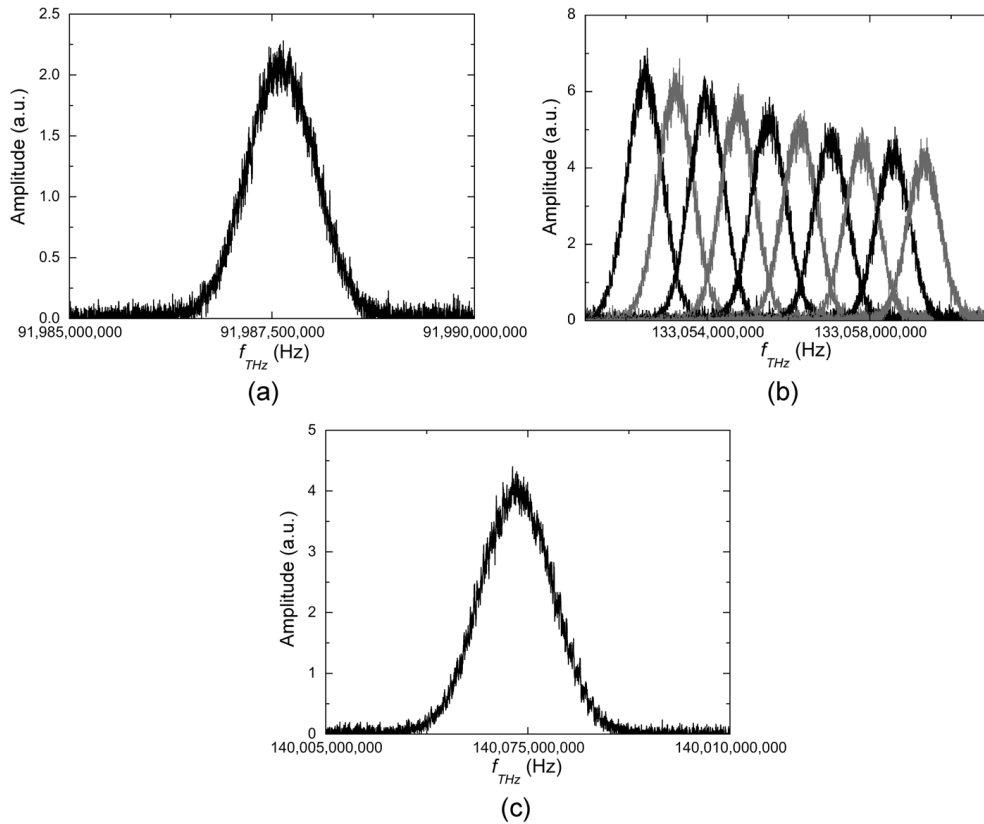


図5 THzシンセのスペクトル波形
 (a) 92 GHz付近, (b) 133 GHz付近, (c) 140 GHz付近

である。今回の実験では、フォトミキサーとしてFバンドUTC-PDを用いたので出力周波数が90～140 GHzに制限されているが、もしPCAのような高周波フォトミキサーを用いれば¹⁶⁾、1 THz以上の周波数帯で利用可能なTHzシンセも実現できる。

文 献

- 1) T. Yasui *et al.*, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **17**, in press (2011)
- 2) Th. Udem *et al.*, *Nature*, **416**, 233 (2002)
- 3) T. Yasui *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 241104 (2006)
- 4) S. Yokoyama *et al.*, *Opt. Express*, **16**, 13052 (2008)

- 5) T. Yasui *et al.*, *Opt. Express*, **17**, 17034 (2009)
- 6) T. Yasui *et al.*, *Opt. Lett.*, **35**, 1689 (2010)
- 7) G. K. Gopalakrishnan *et al.*, *IEEE-MTT*, **41**, 2383 (1993)
- 8) T. Nagatsuma *et al.*, *Laser, Photon. Rev.*, **3**, 123 (2009)
- 9) P. Gaal *et al.*, *Nature Photon.*, **1**, 577 (2007)
- 10) S. Barbieri *et al.*, *Nature Photon.*, **4**(9), 636 (2010)
- 11) T. Yasui *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **107**, 033111 (2010)
- 12) T. Yasui *et al.*, *Opt. Express*, to be submitted
- 13) K. Kawase *et al.*, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **35**, R1 (2002)
- 14) H. Takahashi *et al.*, Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics 2009, CTuK4 (2009)
- 15) 高橋永齊ほか, Optics & Photonics Japan 2009 講演予稿集, 25 aD5 (2009)
- 16) S. Matsuura *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 559 (1997)