



テラヘルツ帯周波数コムの発生と応用

安井 武 史

光周波数コムは、電波領域と光波領域の周波数を高精度にリンクすることを可能にしたため、超精密分光や光周波数標準をはじめとした分野で革命的進展をもたらし、2005年ノーベル物理学賞につながった。一方、周波数コムをテラヘルツ (THz) 領域まで拡張できると、電波~THz波~光波というきわめてワイドレンジな電磁波領域に共通した「周波数」という物理量を、コヒーレントにリンクできる。その結果、各電磁波領域の境界を越えて、周波数を同一精度で論じることが可能になる。本稿では、周波数コムによるコヒーレント周波数リンクとそれに基づいたTHz周波数標準技術について解説する。

Keywords : terahertz, frequency comb, frequency metrology, femtosecond laser, laser stabilization, photoconductive antenna

1. ま え が き

近年のテラヘルツ (THz) テクノロジーに関する研究開発の加速に伴い、超高速・大容量無線通信や高機能センシング (非破壊検査, セキュリティ, レーダなど) といった産業分野での利活用が具体化し始め, THz 波に関連した計量標準の整備が世界的に望まれている。しかしながら, 長らく未開拓な電磁波領域とされてきた THz 帯では十分に成熟した技術がなかったため, 光波領域と電波領域の境界にはいまだ「計量標準の THz ギャップ」が存在している。この THz ギャップを解消できれば, 確かな信頼性に基づいた THz 計量標準を構築でき, THz 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。

周波数は, 電磁波の最も基本的な物理量であると同時に最も高精度に発生・計測可能な物理量でもあり, 電磁波における計量標準の根幹をなす技術として周波数標準技術がある。例えば, 電波領域では, セシウム原子時計が周波数標準として確立されている。我々は, 電波や光波領域と同等の周波数不確かさを有する THz 周波数標準技術を確立するため, 電波・光波・THz 波という三つの異なる電磁波の周波数を周波数コムによってコヒーレントにリンクすることを提案している¹⁾。このコヒーレント周波数リンクによって, 電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 領域に分配し, SI 基本単位の一つである時間 (秒) の国家標準にトレーサブルな THz 周波数標準技術の構築が可能になる。本稿では, コヒーレント周波数リンクについて述べた後, とくに THz 帯の周波数コム (THz コム) を基準とした THz コム参照型スペクトラムアナライザ^{2,3)} および THz コム分光法^{4,5)} を紹介する。

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 (comb) 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。この光コムを THz 発生用光伝導アンテナ (PCA エミッタ) に入射すると, THz 領域の電磁波コム (EM-THz コム) が自由空間に放射される。一方, 光コムを THz 検出用光伝導アンテナ (PCA ディテクタ) に入射すると, アンテナギャップ部の光伝導膜に光励起キャリア (フォトキャリア) の THz コム (PC-THz コム) が生成される。これらの過程では, 光コムのオフセット周波数成分がカットされ, 光コムが同じモード間隔を保ったまま低周波数側へダウコンバートさ

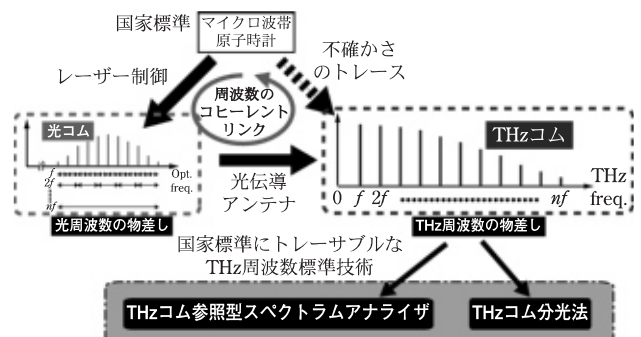


図1 コヒーレント周波数リンクに基づいた THz 周波数標準技術。

徳島大学 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1.
e-mail: yasui@me.tokushima-u.ac.jp

分類番号 7.8, 7.10

Generation and application of frequency comb in terahertz region. Takeshi YASUI.

Institute of Technology and Science, The University of Tokushima (2-1 Minami-Josanjima, Tokushima 770-8506)

れることになる。その結果、モード同期周波数の基本波成分 ($=f$) と多数の高調波成分 ($=2f, 3f, \dots, nf$) が等間隔で立ち並んだ高調波コムが THz 領域に生成される。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。さらに、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、現在の周波数標準であるマイクロ波原子時計にフェムト秒モード同期レーザーを位相同期することにより、光コムや THz コムが「周波数の超精密物差し」として利用できる。すなわち、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り、SI 基本単位の一つである時間 (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 コム参照型スペクトラムアナライザ (THz スペアナ)^{2,3)}

各種光源の絶対周波数やスペクトル形状を計測するスペクトラムアナライザは、最も基本的な周波数計測技術の一つである。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、マイクロ波領域では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。THz スペアナでは、PCA ディテクタ内での光伝導ミキシング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。

光伝導アンテナは、図 2(a) に示すように、光伝導膜上に平面アンテナ形状をもつ金属電極をつけた構造となっており、光伝導膜のバンドギャップエネルギーを超えるレーザー光 (光コム) がアンテナギャップ部の光伝導膜に入射されると、フォトキャリアが瞬時的に生成される。ここで、アンテナギャップ間にバイアス電圧を印加すると、瞬時電流の双極子放射により、THz 波 (EM-THz コム) が自由空間に放射される (PCA エミッタ)。一方、アンテナギャップ間に電流計を接続すると、PCA ディテクタとして動作し、PC-THz コムがアンテナギャップ部の光伝導膜に生成される。

光伝導ミキシング法の原理を図 2(b) 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 (ヘテロダイン検出器) として PCA ディテクタ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点である。もう一つの違いは、PCA ディテクタ中に生成した 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 領域を広くカバーしている点である。THz 時間領域分光法 (THz-TDS) を用いた先行研究で、PCA ディテクタ (光伝導膜: 低温成長 GaAs 薄膜) の検出スペクトル感度が 200 THz に達していることが報告されており⁶⁾、本手法により室温環境下で THz 領域をフルカバー可能な高調波ミキシングが可能であると考えられる。

図 2(c) 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。モード同期周波数 ($=f=56$ MHz) がルビジウム原子時計に位相同期されたフェムト秒ファイバレーザー (中心波長 1550 nm, パルス幅 50 fs, 平均パワー 100 mW) から出力された光コムは、PCA ディテクタ光伝導膜 (低温成長 GaAs 薄膜) のバンドギャップ (約 1.5 eV) を励起するため、非線形光学結晶で 2 倍波 (波長 775 nm) に波長変換された後、PCA ディテクタに集光される。これにより、PCA ディテクタ内に PC-THz コム (周波数 $=0, f, 2f, \dots, nf$) が生成される。このような状況下で、被測定 CW-THz 波 (周波数 $=f_{\text{THz}}$) 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 $=f_b, f \pm f_b, 2f \pm f_b, \dots, nf \pm f_b$) が PCA ディテクタ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) のミキシングによって生成しているので、被測定 CW-THz 波の絶対周波数 f_{THz} は以下のよう

$$f_{\text{THz}} = mf \pm f_b \quad (1)$$

に与えられる。 f 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 を δf だけ変化させたときのビート周波数 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

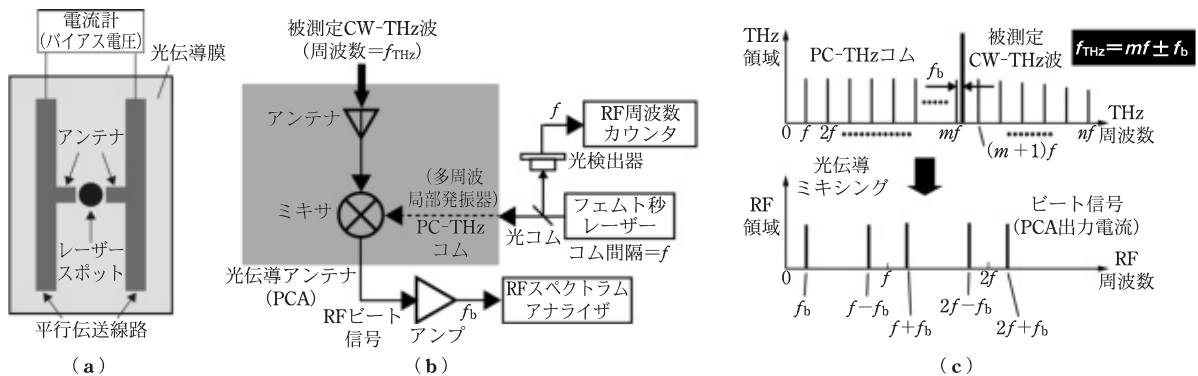


図 2 THz スペアナの測定原理。

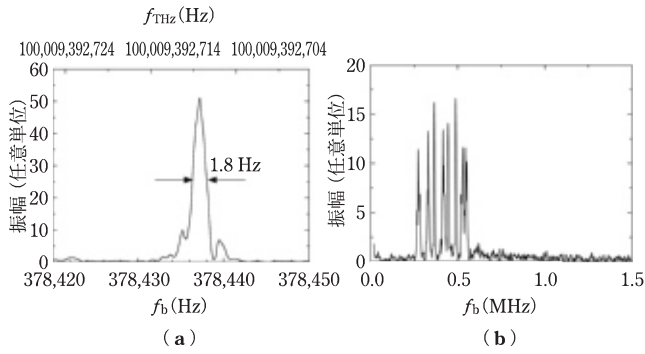


図3 THzスペアナで計測されたCW-THz波のスペクトル。(a)周波数通倍器と(b)UTC-PDフォトミキシングソース。

$$f_{\text{THz}} = m(f + \delta f) \pm (f_b + \delta f_b) \quad (2)$$

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

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f_{\text{rep}}|} \quad (3)$$

$$\text{sign}(f_b) = -\text{sign}\left[\frac{\delta f_b}{\delta f_{\text{rep}}}\right] \quad (4)$$

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狭線幅CW-THz波(周波数=100 GHz, パワー=5 mW, 線幅<0.6 Hz)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形状がきわめて高分解能に測定できている。CW-THz波のパワーレベルとビート信号の測定SN比から、最低検出限界パワーレベルは11 nWと見積もられる³⁾。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(周波数=120 GHz, パワー=100 μ W)をリアルタイム計測した例である。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。

4. THzコム分光法^{4,5)}

THz分光に基づいたセンシングは、THzテクノロジーの中核技術である。常に普遍的な分析能力を発揮するためには、取得スペクトルの周波数スケールが国家周波数標準にトレーサブルであることが必要とされるが、現状はこのようなトレーサビリティ体制が整備されていない。もし、EM-THzコムをTHz分光測定の周波数スケールとして利用できれば、そのスケールの不確かさがマイクロ波原子時計で担保されることになり、きわめて高精度かつ高精度なTHz分光測定が可能になる。では、EM-THzコムの超

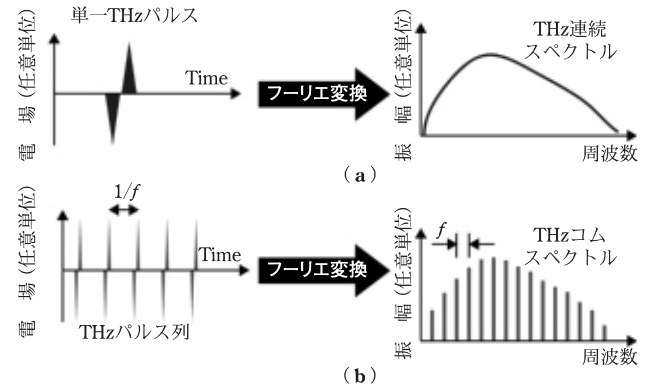


図4 (a)単一THzパルスおよび(b)THzパルス列の電場時間波形と振幅スペクトル。

微細構造スペクトルをどのようにして取得するか? EM-THzコムスペクトルの観測手段として、PC-THzコムとの多周波ヘテロダイン光伝導検出がこれまでに報告されているが^{4,5)}、信号取得効率が低く、良好な測定SN比を得ることが困難であった⁵⁾。一方、THzパルスを用いた代表的なTHz分光法であるTHz-TDSでは、時間遅延走査用機械ステージの移動ストロークの制限から、通常、単一のTHzパルスの電場時間波形を取得する(図4(a)左側)。この電場時間波形をフーリエ変換することにより、振幅および位相のフーリエスペクトルを取得するが、単一パルス現象のフーリエ変換によって取得されたスペクトルは連続スペクトルとなり、周波数コム構造は観測されない(図4(a)右側)。一方、もしTHz電場時間波形の測定時間窓がパルス周期よりも十分に大きくすることができれば、複数のTHzパルスから構成されたTHzパルス列の電場時間波形が観測されるであろう(図4(b)左側)。THzパルス列のような繰り返し現象のフーリエ変換では、周波数領域ではパルス周期の逆数、すなわちレーザーモード同期周波数の間隔でスペクトル変調がかかり、THzパルス列を構成するパルス数が増えるにつれて変調が深くなる(図4(b)右側)。その結果、THzコムの超微細構造スペクトルの観測が可能になる。しかし、従来のTHz-TDSでTHzパルス列の電場時間波形を取得するためには、数mから数十mの機械ステージを用いた時間遅延走査が必要となり、現実的に実現不可能であった。

そこで、我々が着目したのが非同期光サンプリング法(ASOPS法)である^{7,8)}。ASOPS法では、モード同期周波数がわずかに異なるように制御された2台の独立したフェムト秒レーザーを用いる(モード同期周波数差= $\Delta f = f_1 - f_2$) (図5(a))。各々のレーザー光をTHz発生用ポンプ光とTHz検出用プローブ光に用いると、パルス周期がわずかに異なるので、THzパルス(モード同期周波数 f_1)とプローブ光(モード同期周波数 f_2)がTHz検出素子で重なるタイミングがパルスごとに自動的にずれていき、高速サンプリングされる(図5(b))。その結果、サブピコ秒オーダのTHzパルス電場時間波形の時間スケールを、任意の時

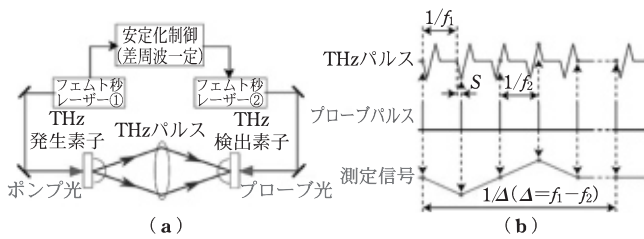


図5 非同期光サンプリング法の原理。(a)セットアップと(b)タイミングチャート。

間スケール拡大率($=f_1/\Delta$)で拡大できる。RF帯まで時間スケールが拡大された時間波形は、汎用オシロスコープで実時間測定できるので、もはや機械式時間遅延ステージが不要となる。その結果、測定時間窓に関する制限が解消され、任意の数のTHzパルス列の電場時間波形が取得できる。

原理確認のため、デュアル・フェムト秒ファイバレーザー(平均パワー500 mW, 中心波長1550 nm, モード同期周波数250 MHz, パルス幅50 fs), PCAエミッタ, およびPCAディテクタを用いてASOPS-THz-TDS装置を構築した。ASOPS法の原理に基づいて、時間スケールがRF領域まで拡大された電流信号がPCAディテクタから出力されるので、増幅後、その時間波形を高速デジタルで取得した。図6(a)は、10連のTHzパルス列(周期4 ns)の電場時間波形(測定時間窓=40 ns)をフーリエ変換することにより得られたTHzコムの振幅スペクトルである。スペクトル波形の内部がベタに塗り潰されているのは、実際には1万本にも及ぶ周波数モード列がモード同期周波数間隔で整然と分布しているからである。比較のため、単一THzパルスの電場時間波形をフーリエ変換することによって得られたTHz連続スペクトルも図6(a)に示す。THzコムのスペクトル包絡線とTHz連続スペクトルの形状はよく一致しており、このことはレーザータイミングジッタの影響なくTHzパルス列の時間波形を精度よく測定できていることを示している。また、スペクトルに幾つか観測されているディップは、大気中水蒸気回転遷移に伴う吸収スペクトル群であり、本手法によるTHz分光の単純な例であるといえる。吸収スペクトルの中心周波数は、NASAデータベースの値とよく一致しているが、大気圧下での圧力拡がりにより、スペクトル幅は10 GHz程度まで広がっている。次に、THzコムスペクトルの内部構造を確認するため、0.4 THz付近の周波数レンジを拡大して示したのが図6(b)である。線幅25 MHzの周波数モード列が、250 MHzの周波数間隔で分布している様子が確認できる。周波数間隔はレーザーモード同期周波数によって決定されており、線幅は測定時間窓の逆数によって決まっている。

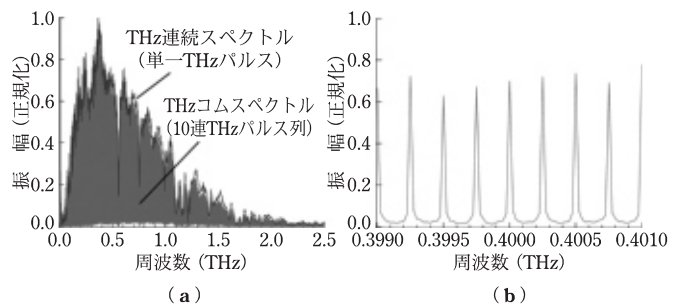


図6 (a)THzコムスペクトルとTHz連続スペクトルの比較。(b)拡大されたTHzコムスペクトル。

5. お 結 語

THzコムは、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を併せもつ。さらに、レーザー制御技術により、マイクロ波原子時計と同等の周波数不確かさや周波数可変性を付与することができるので、THz周波数標準技術や超精密THz分光をはじめとした各種THz周波数計測において重要なツールとなるであろう。

本研究の一部は、(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業(産学共創基礎基盤研究プログラム)、日本学術振興会の科学研究費補助金(No.23656265)、および大阪大学科学教育機器リノベーションセンターの革新的研究教育基盤機器開発整備事業の支援によって行われた。

文 献

- 1) T. Yasui, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki: IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. **17**, 191 (2011).
- 2) S. Yokoyama, R. Nakamura, M. Nose, T. Araki, and T. Yasui: Opt. Express **16**, 13052 (2008).
- 3) T. Yasui, R. Nakamura, K. Kawamoto, A. Ihara, Y. Fujimoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki: Opt. Express **17**, 17034 (2009).
- 4) T. Yasui, Y. Kabetani, E. Saneyoshi, S. Yokoyama, and T. Araki: Appl. Phys. Lett. **88**, 241104 (2006).
- 5) T. Yasui, M. Nose, A. Ihara, K. Kawamoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki: Opt. Lett. **35**, 1689 (2010).
- 6) I. Katayama, R. Akai, M. Bito, H. Shimosato, K. Miyamoto, H. Ito, and M. Ashida: Appl. Phys. Lett. **97**, 021105 (2010).
- 7) C. Janke, M. Först, M. Nagel, H. Kurz, and A. Bartels: Opt. Lett. **30**, 1405 (2005).
- 8) T. Yasui, E. Saneyoshi and T. Araki: Appl. Phys. Lett. **87**, 061101 (2005).

(2011年12月5日 受理)



やすい たけし
安井 武史

1997年徳島大学大学院工学研究科修了, 博士(工学)。同年計量研究所・博士研究員, 99年大阪大学大学院基礎工学研究科助手, 10年徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授。09年応用物理学会光学論文賞。専門分野は、知的THz計測, 非線形光学顕微鏡, レーザー制御など。