

徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 安井研究室

YASUI Lab, Institute of Technology and Science, Tokushima University

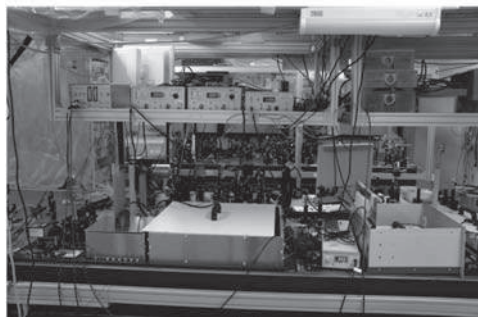
安井 武史 Takeshi Yasui

はじめに

筆者が、2010年8月に大阪大学大学院基礎工学研究科から徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部（徳島大学工学部機械工学科）に異動して、5年の月日が流れた。5年前は光学定盤の上がさら地であった実験室も（図1a）、今では様々な光学セットアップが所狭しと光学定盤上に展開されている（図1b）。また、筆者と学部生4名からスタートした研究室も、現在では、筆者以外に、特任講師1名、特任研究員2名、秘書2名、博士後期課程2名、博士前期課程5名、学



(a)



(b)

図1 実験室の風景
(a) 5年前と (b) 現在

部生4名と、賑やかになってきた（図2）。

さて、計測は「科学技術の母」と呼ばれ、測れないものは作れないと言われる。また、光科学技術は「産業の塩」として、日本産業に競争力を与えるとされている。このように、光計測技術の進歩は、科学技術を支えると同時に、イノベーションを創出する。ややもすると既知の技術の応用展開と安易に解釈されがちであるが、新しい光計測機器開発の創出にこそ、イノベーションの本質がある。しかし、そのような機器開発の創出に意味を見出している研究室は意外と多くない。当研究室では、工学の基本は『モノ作り（装置開発）』にありという考えに基づき、『モノ作り』にこだわり、世界に『ONLY ONE』の装置を開発することを目指している。これは、ノーベル賞の例からも明らかのように、『新しい発見』は、市販装置よりもむしろ、『手作りの誰も持ってない装置』によって実現されることが多いからである。具体的には、筆者自身の研究バックグラウンド（フェムト秒レーザー計測、レーザー制御、生体光計測など）を活かし、『テラヘルツ（THz）計測』と『非線形光学顕微鏡』、さらには最近では『光コム計測』に関する研究も行っている。本稿では、周波数コムのコヒーレントリンクに基づいたTHz周波数標準技術について紹介する。



図2 集合写真@新歓コンパ（2015.4.10）

THz 周波数標準技術

光波と電波の周波数境界に位置するテラヘルツ帯 (THz 帯: 周波数 = 0.1 ~ 10THz, 波長 = 30 μm ~ 3,000 μm) は, これまで良質なレーザー光源や高感度検出器がなかったため, 唯一残された未開拓電磁波領域とされてきた. しかしながら, 各種 THz 要素技術の進展により, この領域の研究開発『THz テクノロジー』が加速している. THz テクノロジーに関する研究開発の加速に伴い, 未開拓周波数帯通信 (超高速・大容量無線通信ほか) や高機能センシング (非破壊検査, セキュリティ, レーダー等) 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 (特に, 周波数標準) 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未だ『周波数の THz ギャップ』が存在している. この『周波数の THz ギャップ』を解消できれば, THz 周波数標準技術が構築できる.

我々は, 光波領域において革命的進展をもたらした周波数コムに注目し, これに基づいた THz 周波数標準技術の構築を提案している (図 3)¹⁾. 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. 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. 光コムや THz コムは, 数千~数万本に及ぶ狭線幅シングルモード CW レーザー光が等間隔で並んだ集合体と見なすことができるので, 広い周波数選択性・非常に高いスペクトル純度・

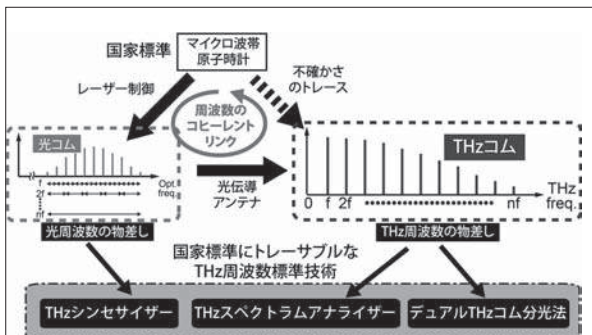


図 3 周波数コムのコヒーレント周波数リンクに基づいた THz 周波数標準技術

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. したがって, 現在の時間 (周波数) 標準であるマイクロ波原子時計を基準として, 周波数コム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, 周波数精度を損なうことなく, 電波 ~ THz 波 ~ 光波というきわめてワイドレンジな電磁波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. 我々はこれまでに, THz コムを基準としたデュアル THz コム分光法および THz コム参照型スペクトラム・アナライザーを, またデュアル光コムに基づいた THz シンセサイザーを開発している. 図 4 は実際に観測された THz コムのスペクトルとその拡大図を示しており, 8,000 本にも及ぶコム・モードが等間隔で規則的に分布している様子が確認できる. ここで各コム・モードを『THz スペクトルの周波数目盛り』として利用すれば, 高精度・高分解・広帯域を併せ持つ THz 分光計測が可能になる²³⁾. また, 図 5 はステップ状に周波数チューニングした CW-THz 波の絶対周波数を, THz コム参照型スペクトラム・アナライザーで実時間モニタリングした結果を示しており, モードホップのような大きな周波数変化に対しても対応が可能であることがわかる⁴⁾. さらに, 図 6 は, 星間分子や VOC ガスとして重要な低圧アセトニトリル・ガスの回転遷移スペクトルを, THz シンセサイザーで取得した結果を示しており, 対称コマ型分子に特徴的なスペクトル構造が確認できる⁵⁾.

これらの THz 周波数標準技術を用いると, 『誰でも』『何処でも』『いつでも』 普遍かつ正確に THz 周波数計測が可能になり, 確かな信頼性に基づいて, 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と期待される.

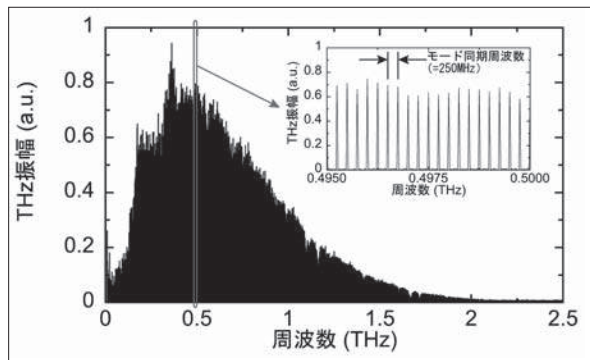


図 4 デュアル THz コム分光法によって取得したモード分解 THz コム・スペクトル

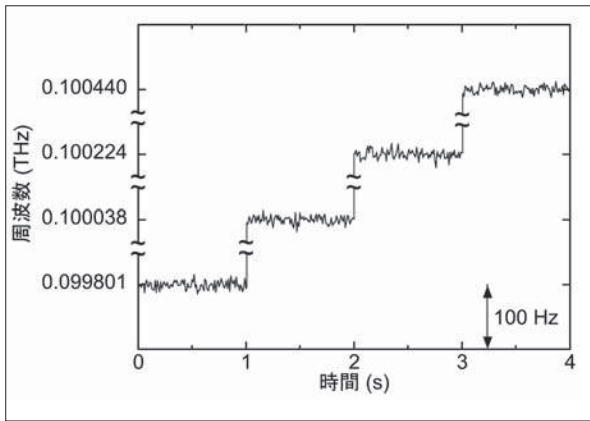


図5 THzコム参照型THzスペクトラム・アナライザを用いたCW-THz波の周波数モニタリング

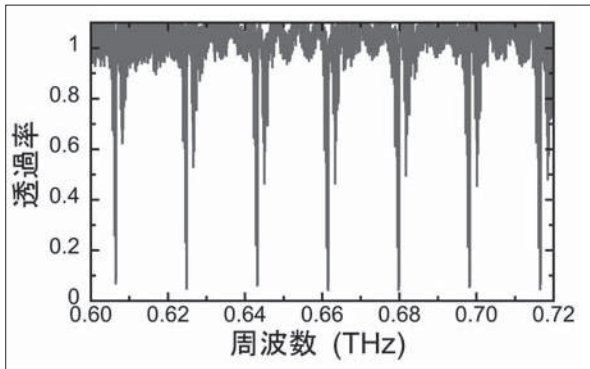


図6 THzシンセサイザによって取得した低圧アセトリル・ガスの透過スペクトル

さいごに

我々が研究を行っている『THz計測』、『非線形光学顕微鏡』、『光コム計測』は、まだまだ未熟な研究分野である一方で、将来的に未知数の伸びしろを有しているとも言える。このような若い研究分野を開拓していくため、従来概念にとらわれることなく、自由な発想に基づいた研究を、研究室メンバーとともに展開していきたいと思う。

一方で、我々が受け入れる機械工学科の学生にとっての『モノ作り』のイメージは、ロボットや自動車であり、残念ながら光計測機器はイメージとしてないようである。したがって、配属時の学生に我々の研究をアピールしても、いまひとつ響かないことが歯痒いところである。そこで、最近では、研究力と並んで、『福利厚生』が充実した研究室をアピールすべく、各種の研究室イベント(図7)や学生サポート(新人研修、英語レッスン、院試模試、国際会議発表補助など)を前面に押し出し、『よく学び、よく遊ぶ、メリハリのある学生』をハンティング中である。

研究室 Web サイト : <http://femto.me.tokushima-u.ac.jp/>



(a)



(b)

図7 研究室イベントの一例

(a) 四国放送『ゴジカル』出演(2014.11.17)と(b)女子W杯 LabViewing(2015.6.28)

【参考文献】

- 1) Yasui T, Yokoyama S, Inaba H, Minoshima K, Nagatsuma T, and Araki T: "Terahertz frequency metrology based on frequency comb," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. 17 (2011) 191-201.
- 2) Hsieh Y D, Iyonaga Y, Sakaguchi Y, Yokoyama S, Inaba H, Minoshima K, Hindle F, Takahashi Y, Yoshimura M, Mori Y, Araki T, and Yasui T: "Terahertz comb spectroscopy traceable to microwave frequency standard," IEEE Tran. THz Sci. Tech. 3 (2013) 322-330.
- 3) Hsieh Y D, Iyonaga Y, Sakaguchi Y, Yokoyama S, Inaba H, Minoshima K, Hindle F, Araki T, and Yasui T: "Spectrally interleaved, comb-mode-resolved spectroscopy using swept dual terahertz combs," Sci. Reports 4 (2014) 3816.
- 4) Yasui T, Hayashi K, Ichikawa R, Cahyadi H, Hsieh Y D, Mizutani Y, Yamamoto H, Iwata T, Inaba H, and Minoshima K: "Real-time absolute frequency measurement of continuous-wave terahertz radiation based on dual terahertz combs of photocarriers with different frequency spacings," Opt. Express 23 (2015) 11367-11377.
- 5) Hsieh Y D, Kimura H, Inaba H, Minoshima K, Araki T, and Yasui T: "Low-pressure gas spectroscopy using terahertz frequency synthesizer traceable to microwave frequency standard via dual optical combs," CLEO: Science & Innovations 2014, San Jose, USA, June 8-13, Technical Digest (CD) (2014) STh1N.8.