

# テラヘルツ・カラー scanner

徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部  
安井 武史

### 1. はじめに

われわれはカラー scanner を日常よく利用する。これは可視領域の分光画像を取得する機器であるといえる。しかし、可視光の物体浸透度の制限により表面近傍のみの情報しか得られないため、書類や写真の読み取りなどに利用が限定されていた。このような技術を物質透過性の良好なテラヘルツ領域 (THz 領域: 周波数 0.1~10THz, 波長 30 $\mu$ m~3000 $\mu$ m) まで拡張できると、物体内部の情報も取得可能になる。さらに、カラー (分光) 画像も取得できるので、各種物質固有の吸収スペクトル (THz 指紋スペクトル) を利用して「どこに」、「なにが」あるかを識別できる。このような THz 波を用いた成分分析型内部透視イメージング技術は、セキュリティ分野<sup>1)</sup>、バイオ分野<sup>2)</sup>、製薬分野<sup>3)</sup> 等における有力な検査ツールと期待されている。しかし、通常の点計測に基づいた THz 分光イメージング装置では、スペクトル取得 (時間遅延走査) およびイメージ取得のために複数の機械的走査機構が必要となり、長い測定時間 (数時間以上) を要する。その結果、測定対象が静止物体のみに限定され、実用を損ねてきた。

ここで、THz 波の光としての並列性に注目し、電気光学的時間-空間変換による実時間 THz 時間波形計測と線集光 THz 結像光学系による実時間 THz ラインイメージングを複合すれば、機械的走査機構が不要になり、大幅な時間短縮が実現できる<sup>4)</sup>。われわれは、THz ビームをサンプルに対してライン状に集光し、一般のカラー scanner と同じくラインの動き (または測定対象の動き) に合わせて実時間で分光ラインイメージを連続測定

することにより、従来法と比較して 10,000 倍以上の高速化を実現した<sup>5)</sup>。その結果、世界で初めて動体サンプルの THz 分光イメージングに成功した。本稿では、われわれが開発した THz カラー scanner<sup>5)</sup> とその応用計測例<sup>6)</sup> を紹介する。

### 2. THz 波

図 1 に、電磁波の周波数 (波長) マップを示す。THz 領域は、ちょうど光波と電波の境界に位置し、これまで良質なレーザー光源や高感度検出器の開発が遅れていたため、唯一残された未開拓電磁波領域であった。しかし、

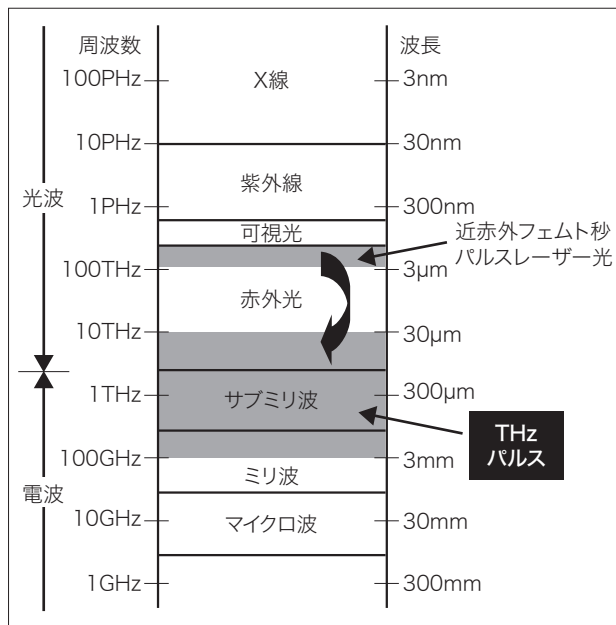


図 1 電磁波の周波数・波長マップ

やすい たけし

近年、近赤外フェムト秒パルスレーザー光を用いることにより、パルス状THz波（THzパルス）の発生および検出が室温環境で可能になり、この領域の研究開発『THzテクノロジー』が加速している。

THzパルスは、光波と電波の境界に位置するということから、その両者の性質を有するユニークな電磁波である。例えば、レーザー光のようにコヒーレントなビームとして自由空間を伝搬させることが可能である。また、光波と比較すると波長が極めて長いので、光波領域では散乱で不透明な物質に対してもほどほどの物質透過性を得ることができる。従来、物質透過性の良好な電磁波としてX線が広く用いられてきたが、X線と比較すると周

波数が桁違いに低いので、極めて低エネルギー・低侵襲で安全安心な電磁波でもある。また、THzパルスは、時間領域においてサブピコ秒オーダーの超短パルス特性を示す一方で、周波数領域においては0.1THz～10THzに及ぶ広帯域スペクトルを示す。THz領域では、骨格振動、ねじれ振動、格子振動、分子の回転、分子間の振動などによる吸収スペクトルが観測されることから、赤外・近赤外分光法とは異なる分子構造情報が取得可能な分析法として期待されている。

### 3. 実験装置

まず、可視光を用いた一般的なカラーキャナーの測定原理を考えてみる（図2）。空間2次元と波長（色）1次元の3次元情報（カラーイメージ）を取得するカラーキャナーでは、まずカラーCCDラインセンサーで空間1次元と波長1次元（分光ラインイメージ）を実時間測定し、さらに実時間取得した空間1次元と直交方向にラインセンサーを連続走査することにより、カラーイメージを取得している。この原理に基づいてTHzカラーキャナーを実現するためには、実時間でTHz分光ラインイメージを取得することが肝となるわけであるが、われわれは電気光学的時間-空間変換による実時間THz時間波形計測と、線集光THz結像光学系による実

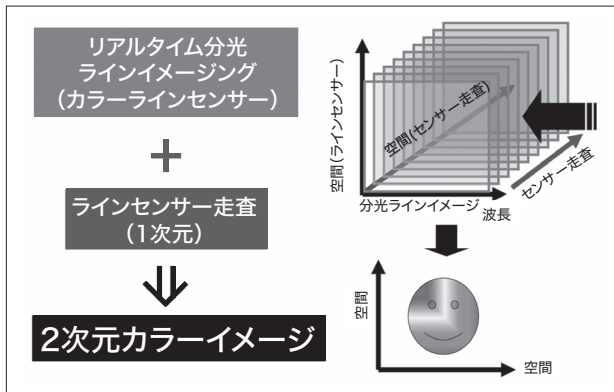


図2 カラーキャナーの測定原理

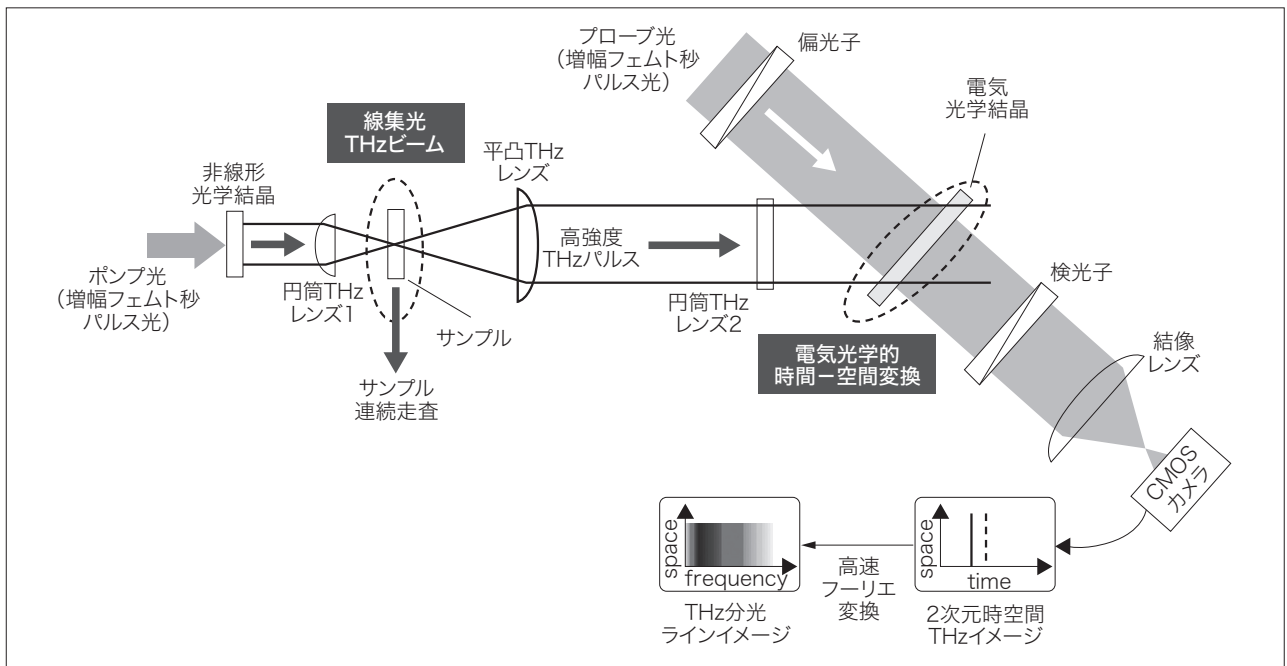


図3 実験装置

時間 THz ラインイメージを複合することにより達成した。実験装置を図 3 に示す。フェムト秒チタンサファイア再生増幅器からのレーザー光（ポンプ光）を非線形光学結晶に入射することにより、高強度 THz パルスを発生させる。サンプルを透過した THz パルスとプローブ光を THz 検出用電気光学結晶に非共軸入射することにより、THz パルス電場の時間波形がプローブ光の空間複屈折量分布に変換される（電気光学的時間-空間変換）<sup>7)</sup>。クロスニコル配置の偏光子・検光子ペアによってプローブ光の空間強度分布に変換された THz パルス電場時間波形は、結像レンズを介して高速 CMOS カメラの水平座標に展開される。一方、CMOS カメラの垂直座標は 1 次元イメージに利用可能であるので、円筒 THz レンズ 1 を用いて THz ビームをサンプルに線集光し、それを THz レンズペア（平凸 THz レンズおよび円筒 THz レンズ 1）で電気光学結晶に結像することにより、サンプルの 1 次元 THz イメージを CMOS カメラの垂直座標に展開する。このように、水平座標に時間軸、垂直座標に空間軸が展開された 2 次元時空間 THz イメージを、高速ロックイメージング検出する（500fps）<sup>8)</sup>。2 次元時空間 THz イメージの時間軸（水平座標）を高速フーリエ変換することにより周波数（色）情報とし、THz 分光ラインイメージを得る。したがって、測定サンプルを THz 集光ラインと直交する方向にベルトコンベヤー等

で連続走査すれば、通常のカラースキャナー同様、その移動に合わせて、順次、THz 分光イメージが生成されていくことになる。

#### 4. 測定結果

まず、THz 波の良好な物質透過性を生かした計測例として、半導体 IC の THz 分光イメージング計測を行った。図 4 は、4 つの異なる周波数における THz 分光イメージング結果を示している。半導体 IC のパッケージ樹脂材料を、THz 波が比較的よく透過することはこれまでに報告されているが<sup>9)</sup>、その透過具合が周波数によって異なっていることが確認できる。また、周波数によってイメージのボケ具合が異なるのは、各周波数によって空間分解能が異なるためである。したがって、THz 波の透過性と THz 分光イメージングの空間分解能を考慮して観測周波数を選択することにより、半導体 IC の内部検査手段としての利用が期待される。

THz 分光イメージングの有力な産業応用ターゲットとして考えられているのが、製薬分野である。これは、医薬品や農業の多くが各種の結晶構造に由来する特徴的な THz 指紋スペクトルを示すうえに、結晶多形のような結晶性変化もスペクトルに敏感に反映されるからである<sup>3)</sup>。ここでは、4 種類の錠剤サンプル（サンプル(1)：ラクトース 50mg とポリエチレン粉末 50mg、サンプル(2)：D-マルトース 25mg とポリエチレン粉末 75mg、サンプル(3)：ポリエチレン粉末 100mg、サンプル(4)：D-グルコース 25mg とポリエチレン粉末 75mg、いずれも直径 10mm）の識別に応用した例を示す。図 5(a) は、非同期光サンプリング式 THz 時間領域分光装置<sup>10),11)</sup>で取得したサンプル(1)、(2)、(4)の吸収スペクトルを示しており、ラクトース、D-グルコースおよび D-マルトース特有の THz 指紋スペクトル（※の部分）がそれぞれ確認できる。そこで、これらの THz 指紋スペクトル付近の周波数（0.511THz、1.073THz、1.405THz および 1.609THz）での透過率イメージを、THz カラースキャナーで取得した結果が図 5(b) である。イメージコントラストの差異は小さいものの、吸収スペクトルと分光イメージの比較から、THz 指紋スペクトルに基づいた錠剤サンプルの識別が可能である。例えば、左端のサンプルは 0.511THz および 1.405THz での吸収が強いことからサンプル(1)（ラクトース）、左から 2 番目のサンプル

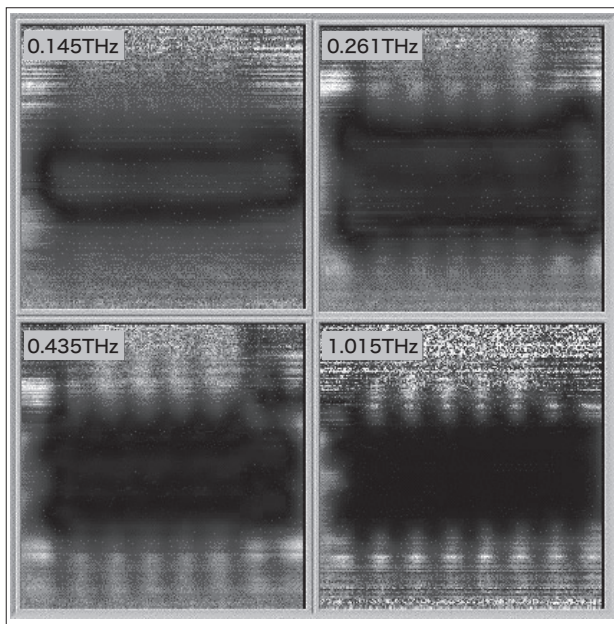


図 4 半導体 IC の THz 分光イメージ

は1.073THzおよび1.609THzの吸収が強いのでサンプル(2)(マルトース), 左から3番目のサンプルは各周波数における吸収が弱いのでサンプル(3)(ポリエチレン粉末のみ), そして右端のサンプルは1.4THzの吸収が強いのでサンプル(4)(グルコース)と識別できる。

### 5.まとめ

読者の中には、「X線ではなく、なぜTHz波？」と疑問に思う方もいらっしゃるかもしれない。確かに、X線を用いると物体内部の情報は取得できるわけであるが、生体に対する侵襲性が高いうえ、物質透過性があまりにも良すぎてイメージのコントラストがつきにくい測定対象も少なくない。さらに、モノクロ画像しか取得できないため、得られる情報は限られてくる。一方、THz波は極めて低エネルギー・低侵襲で安全安心な電磁波であるうえに、「ほどほど」の物質透過性を有しているので、X線では透過性が良すぎてイメージコントラストがつきにくい測定対象でも、良好に測定できる場合がある。さらに、内部透視イメージをTHz周波数ごとの色付きカ

ラー画像として取得し、THz指紋スペクトルによる分光学的成分分析を利用すれば、「どこに」、「なにが」あるかを識別できる可能性もある。このような特徴をうまく利用し、THz波でしか実現できない「キラーアプリケーション」の探索が今後重要になるであろう。このようなTHzキラーアプリの探索において、動体サンプルにも拡張可能なTHzカラーレスキャナーは有用なツールになると期待される。

錠剤サンプルを提供いただいた大塚電子(株)の北岸恵子博士および泉谷悠介博士に謝意を表します。

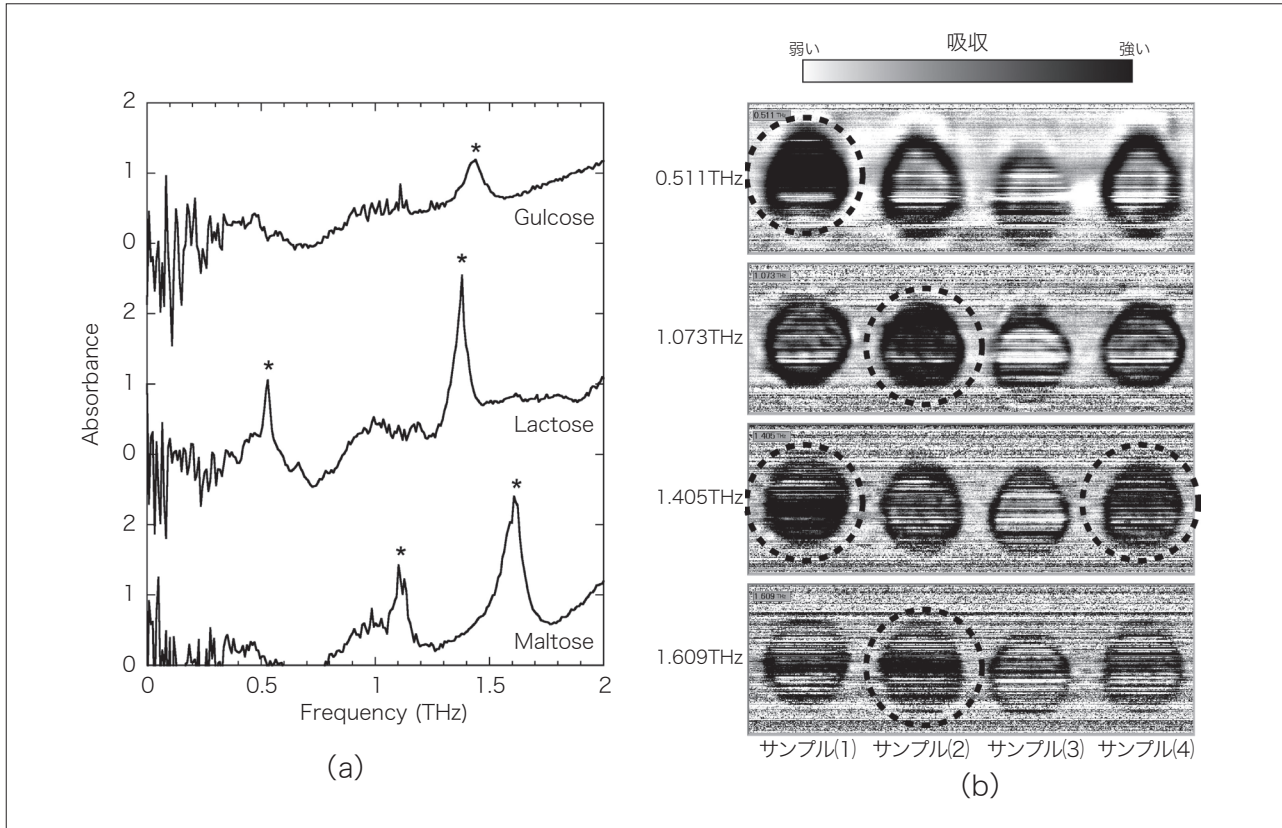


図5 錠剤サンプルの計測。(a) THz吸収スペクトル, (b) THz分光イメージ

参考文献

- 1) K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue: "Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints," *Opt. Express*, Vol.11, Issue 20, pp.2549~2554 (2003), <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?uri=oe-11-20-2549>
- 2) T. Löffler, T. Bauer, K. Siebert, H. Roskos, A. Fitzgerald, and S. Czasch: "Terahertz dark-field imaging of biomedical tissue," *Opt. Express*, Vol.9, Issue 12, pp.616~621 (2001), <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-9-12-616>
- 3) Y.-C. Shen and P. F. Taday: "Development and application of terahertz pulsed imaging for non destructive inspection of pharmaceutical tablet," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, Vol.14, Issue 2, pp.407~415 (2008)
- 4) T. Yasuda, T. Yasui, T. Araki, and E. Abraham: "Real-time two-dimensional terahertz tomography of moving objects," *Opt. Comm.*, Vol.267, Issue 1, pp.128~136 (2006)
- 5) T. Yasui, K. Sawanaka, A. Ihara, E. Abraham, M. Hashimoto, and T. Araki: "Real-time terahertz color scanner for moving objects," *Opt. Express*, Vol.16, Issue 2, pp.1208~1221 (2008), <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-16-2-1208>
- 6) M. Schirmer, M. Fujio, M. Minami, J. Miura, T. Araki, and T. Yasui: "Biomedical applications of a real-time terahertz color scanner," *Biomed. Opt. Express*, Vol.1, Issue 2, pp. 54~366 (2010), <http://www.opticsinfobase.org/boe/abstract.cfm?uri=boe-1-2-354>
- 7) J. Shan, A. S. Weling, E. Knoesel, L. Bartels, M. Bonn, A. Nahata, G. A. Reider, and T. F. Heinz: "Single-shot measurement of terahertz electromagnetic pulses by use of electro-optic sampling," *Opt. Lett.*, Vol.25, Issue 6, pp.426~428 (2000)
- 8) F. Miyamaru, T. Yonera, M. Tani, and M. Hangyo: "Terahertz two-dimensional electrooptic sampling using high speed complementary metal-oxide semiconductor camera," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.43, No.4A, pp.L489~L491 (2004)
- 9) B. B. Hu and M. C. Nuss: "Imaging with terahertz waves," *Opt. Lett.*, Vol.20, Issue 16, pp.1716~1718 (1995)
- 10) T. Yasui, E. Saneyoshi and T. Araki: "Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.87, Issue 6, p.061101 (2005)
- 11) T. Yasui, M. Nose, A. Ihara, K. Kawamoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, and T. Araki : "Fiber-based, hybrid terahertz spectrometer using dual fiber combs," *Opt. Lett.*, Vol.35, Issue 10, pp.1689~1691 (2010)