

テラヘルツ・カラスキャナー

安井 武史

Terahertz Color Scanner

Takeshi YASUI

Terahertz (THz) spectroscopic imaging is an interesting new tool for nondestructive testing, security screening, biological imaging, and other applications because of good material penetration of the terahertz radiation and material identification based on terahertz spectral fingerprint. However, the current speed of image acquisition is relatively low, making it difficult to use for moving objects. In this article, I reviewed a fast terahertz color scanner based on electro-optical time-to-space conversion and line focusing of a terahertz beam. This system functions as a color scanner in the terahertz spectral region with real-time line-scanning and has been successfully used to image objects, which are moved on a translation stage. The achieved imaging rate is four orders of magnitude higher than that of a conventional point-scanning terahertz time-domain spectroscopic imaging. This terahertz color scanner has the potential to become a powerful tool for monitoring moving objects in various real-world applications.

Key words: terahertz, spectroscopy, imaging, spectral fingerprint, time-to-space conversion

われわれはカラスキャナー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（周波数 0.1~10 THz, 波長 30~3000 μm ）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（テラヘルツ指紋スペクトル）を利用して「どこに」「なにが」あるかを識別できる。このようなテラヘルツ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¹⁾、バイオ分野²⁾、製薬分野³⁾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テラヘルツ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、テラヘルツ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テラヘルツ時間波形計測と線集光テラヘルツ結像光学系による実時間テラヘルツライン・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⁴⁾。われわれは、テラヘルツビームをサンプルに対してライン状に集光し、一般のカラスキャナー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⁵⁾。その結果、世界で初めて動体サンプルのテラヘルツ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テラヘルツカラスキャナーとその応用計測例を紹介する。

1. テラヘルツ波

図1に、電磁波の周波数（波長）マップを示す。テラヘルツ領域は、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に、唯一残された未開拓電磁波領域であった。しかし、近年、近赤外フェムト秒パルスレーザー光を用いるこ

電磁波 周波数(波長)マップ

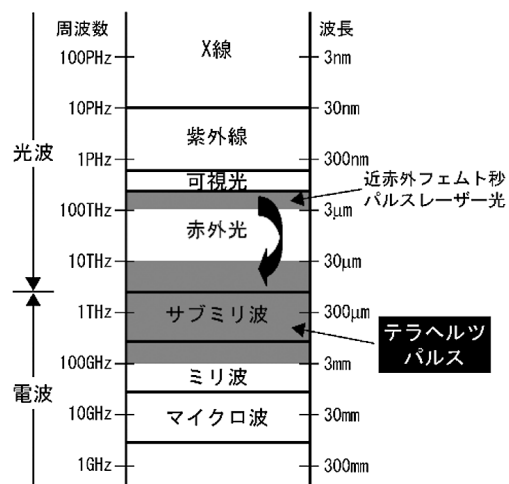


図1 電磁波の周波数(波長)マップ。

とにより、パルス状テラヘルツ波(テラヘルツパルス)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「テラヘルツテクノロジー」が加速している。

テラヘルツパルスは、光波と電波の境界に位置することから、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きわめて長いので、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、きわめて低エネルギー・低侵襲で安心安全な電磁波でもある。また、テラヘルツパルスは、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0.1~10 THzに及ぶ広帯域スペクトルを示す。テラヘルツ領域では、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テラヘルツ分光法が期待されている。

2. 実験装置

まず、可視光を用いた一般的なカラスキャナーの測定原理を考えてみる。空間二次元と波長(色)一次元の三次元情報(カラーイメージ)を取得するカラスキャナーでは、まずカラーCCDラインセンサーで空間一次元と波長一次元(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一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テラヘルツカラスキャナーを実現するためには、実時間でテラヘルツ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テラヘルツ時間波形計測と線集光テラヘルツ結像光学系による実時間テラヘルツライン・イメージングを複合することにより達成した。実験装置を図2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、高強度テラヘルツパルスを発生させる。サンプルを透過したテラヘルツパルスとプローブ光をテラヘルツ検出用電気光学結晶に非共軸入射することにより、テラヘルツ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)⁶⁾。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テラヘルツ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一次元イメージングに利用可能であるので、円筒テラヘルツレンズ1を用いてテラヘルツビームをサンプルに線集光し、それをテラヘルツレンズペア(平凸テラヘルツレンズおよび円筒テラヘルツレンズ2)で電気光学結晶に結像することにより、サンプルの一次元テラヘルツイメージを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二次元時空間テラヘルツイメージを、高速ロックイメージング検出する(500 fps)⁷⁾。二次元時空間テラヘルツイメージの時間軸(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、テラヘルツ分光ラインイメージを得る。最終的に、測定サンプルをテラヘルツ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、通常のカラスキャナー同様、その移動に合わせて、順次、テラヘルツ分光イメージが生成されていくことになる。

3. 測定結果

まず、テストサンプルとしてメタルホールアレイ(MHA)⁸⁾を用いて基本特性評価を行った。MHAはテラヘルツ帯フォトニック結晶のひとつであり、空孔率を調節することにより透過周波数が選択可能なテラヘルツ帯バンドパスフィルターとして利用できる。今回は、図3(a)に示すような空間的に異なる透過特性を有する4分割MHA(透過周波数=0.2 THz, 0.4 THz, 0.8 THz, 1.6 THz)を作成し、ステージで一方向に連続移動(1 mm/s)させながら測定を行った(測定領域20 mm×20 mm)。測定時間は20秒で、その間に0~3.288 THzを29 GHzごとに分割した114枚

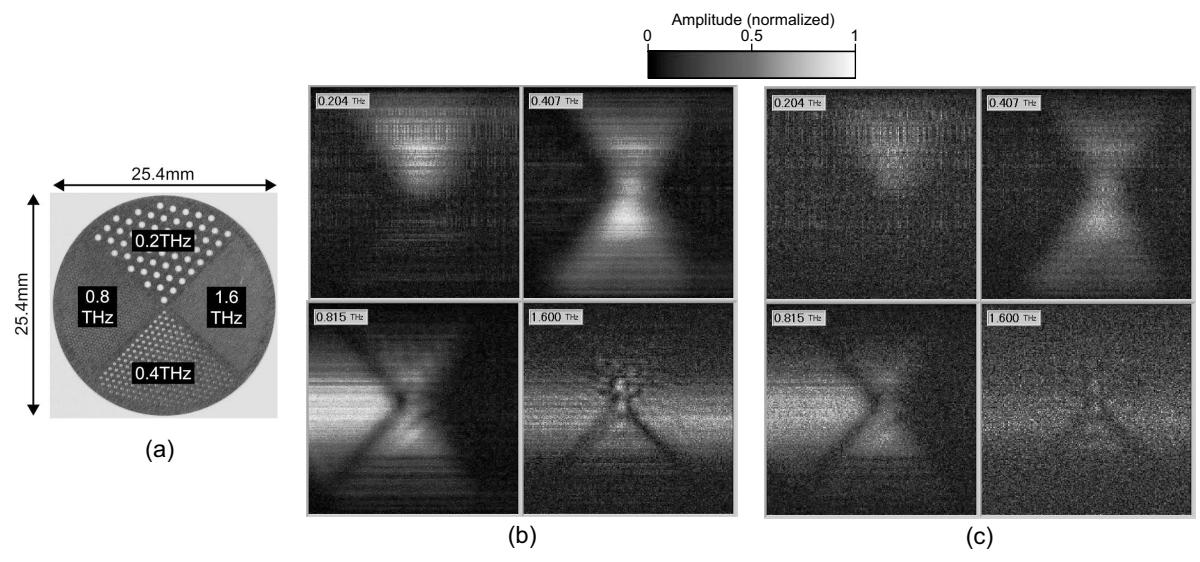
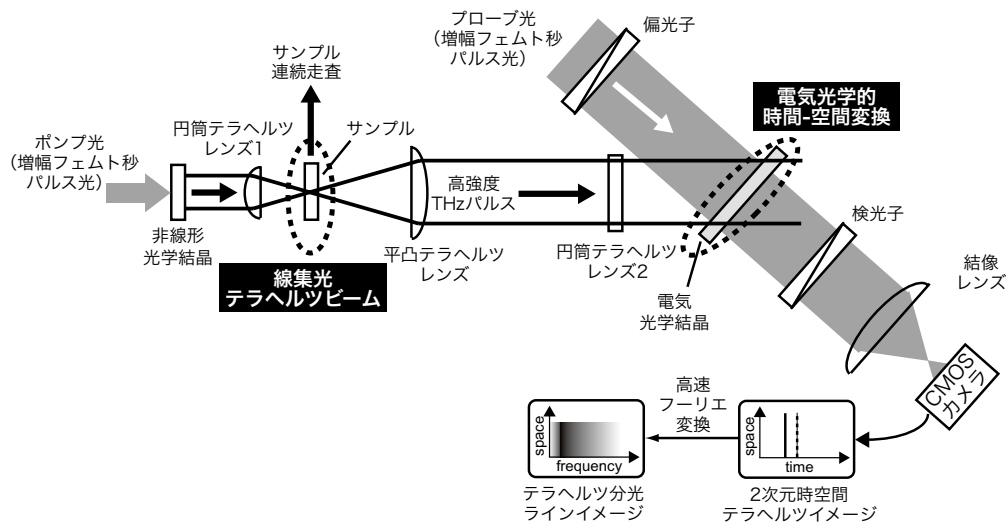


図3 4分割メタルホールアレイの計測。(a) 測定サンプル，(b) テラヘルツ分光イメージ (サンプル移動速度=1 mm/s)，(c) テラヘルツ分光イメージ (サンプル移動速度=10 mm/s)。

の分光画像を得た。図3 (b) は、4分割 MHA の4つの透過周波数に対応したテラヘルツ分光画像 (232 pixel×200 pixel) を示しており、4分割 MHA のスペクトル特性を反映した結果が得られているのがわかる。イメージのクロストークは4分割 MHA 自体の透過スペクトル特性によるもので、各 MHA の透過スペクトル特性に基づいた主成分分析⁹⁾により除去できる。従来の点計測型テラヘルツ時間領域分光イメージング装置とピクセルレート (=総ピクセル数 / 測定時間) を比較すると、テラヘルツカラーキャナが10,000倍近く高いことになる⁵⁾。図3 (c) は移動速度を10 mm/sに増加した場合の測定結果 (測定時間2秒) を示している。測定 S/N 比は低下しているものの、同様な結果が得られていることがわかる。

テラヘルツ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、医薬品や農薬の多くが各種の結晶構造に由来する特徴的なテラヘルツ指紋スペクトルを示す上に、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³⁾。ここでは、4種類の錠剤サンプル (サンプル①: ラクトース 50 mg とポリエチレン粉末 50 mg, サンプル②: D-マルトース 25 mg とポリエチレン粉末 75 mg, サンプル③: ポリエチレン粉末 100 mg, サンプル④: D-グルコース 25 mg とポリエチレン粉末 75 mg, いずれも直径 10 mm) の識別に応用した例を示す。図4 (a) は、非同期光サンプリング式テラヘルツ時間領域分光装置¹⁰⁾で取得したサンプル①②④の吸収スペクトルを示しており、ラクトース、

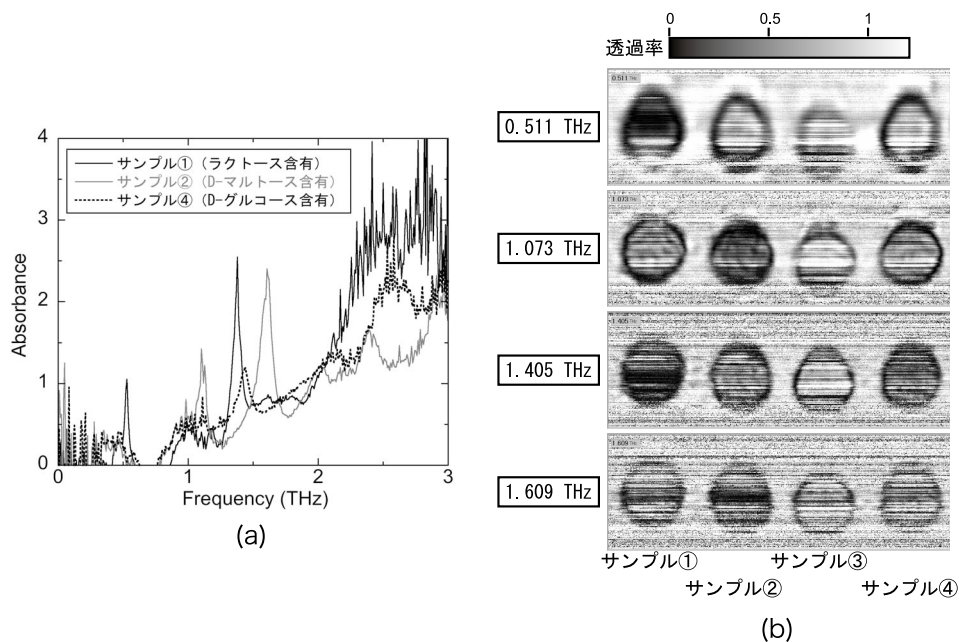


図4 錠剤サンプルの計測。(a) テラヘルツ吸収スペクトル, (b) テラヘルツ分光イメージ。

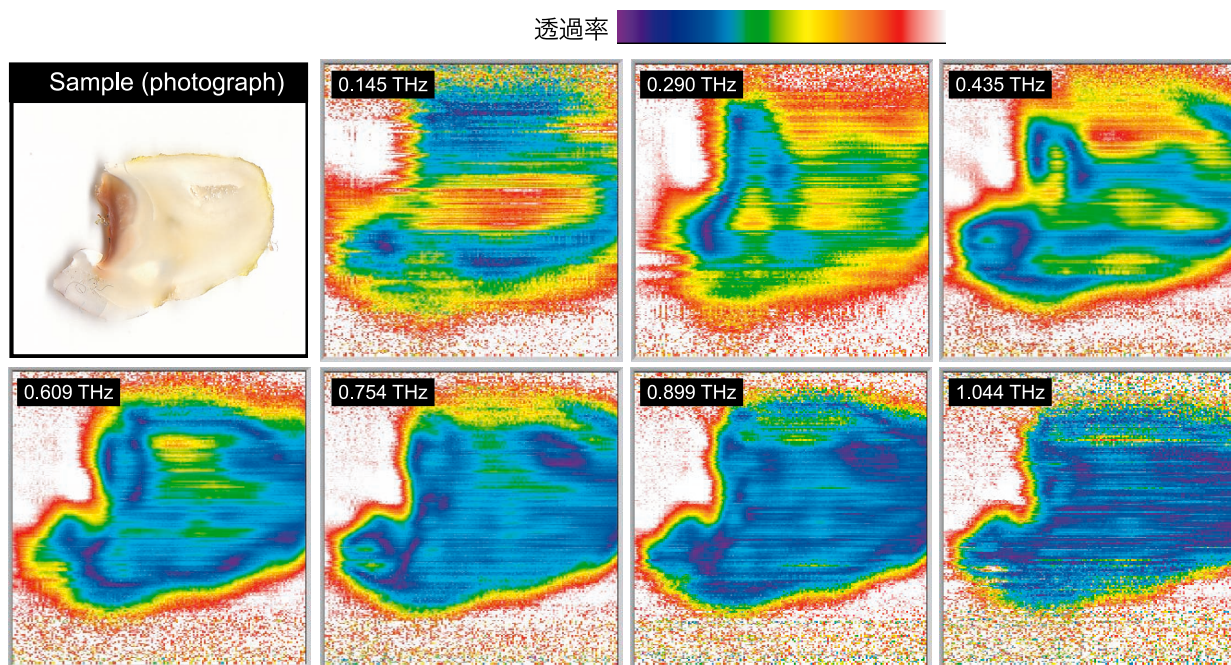


図5 ヒト歯牙切片サンプルの計測。

D-グルコースおよびD-マルトース特有のテラヘルツ指紋スペクトルがそれぞれ確認できる。そこで、これらのテラヘルツ指紋スペクトル付近の周波数 (0.511 THz, 1.073 THz, 1.405 THz および 1.609 THz) での透過率イメージをテラヘルツカラーレスキャナーで取得した結果が図4 (b) である。イメージコントラストの差異は小さいものの、これらの分光イメージの比較から、テラヘルツ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。

がん診断をはじめとしたバイオ応用での利用も期待されている。ただし、テラヘルツ波は水の吸収がきわめて大きいため、水分を多く含んだ生体軟組織に対してその利用が大きく制限され、例えば皮膚以外のがん診断の場合は、手術中に摘出した組織を染色せず手術オンサイトで迅速に病理診断する手段としての利用が期待されている。一方、歯や骨のような生体硬組織に対しては、比較的良好な透過性が得られる。そこで、テラヘルツカラーレスキャナーを用い

てヒト歯牙切片の計測を行った。図5はサンプル写真および7つの異なる周波数におけるテラヘルツ分光イメージを示しており、各周波数において特徴的なテラヘルツ分光画像が得られていることがわかる。歯はエナメル質と象牙質から成り、その主要成分は無機質のハイドロキシアパタイト (HOA) である。エナメル質の96%はHOAであるが、象牙質には20%ほど有機質が含まれている。また、象牙質とエナメル質の境界には球間区 (石灰化の不十分な部分) がある。このように局在化したHOAの結晶構造とテラヘルツ波の相互作用により、特徴的なテラヘルツ透過率分布が表れたと考えられる。したがって、これらの分光イメージから生体硬組織の結晶性に関する情報を抽出できれば、初期虫歯や骨粗鬆症のメカニズム解明のツールとして有用であると考えられる。

読者の中には、「X線じゃなくて、なぜテラヘルツ波?」と疑問に思う方もおられるかもしれない。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上に、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る。一方、テラヘルツ波は「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テラヘルツ周波数ごとの色付きカラー画像として取得し、テラヘルツ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、テラヘルツ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。このようなテラヘルツキラーアプリケーションの探索において、動体サンプルにも拡張可能なテラヘルツカラーカメラは有用なツールになると

期待される。

本研究の一部は、科学研究費補助金 (課題番号18686008 および 21650111) より援助を受けた。錠剤サンプルを提供いただいた大塚電子・北岸恵子博士および泉谷悠介博士に謝意を示します。

文 献

- 1) K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe and H. Inoue: "Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints," *Opt. Express*, **11** (2003) 2549-2554.
- 2) T. Löffler, T. Bauer, K. Siebert, H. Roskos, A. Fitzgerald and S. Czasch: "Terahertz dark-field imaging of biomedical tissue," *Opt. Express*, **9** (2001) 616-621.
- 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.*, **14** (2008) 407-415.
- 4) T. Yasuda, T. Yasui, T. Araki and E. Abraham: "Real-time two-dimensional terahertz tomography of moving objects," *Opt. Comm.*, **267** (2006) 128-136.
- 5) T. Yasui, K. Sawanaka, A. Ihara, E. Abraham, M. Hashimoto and T. Araki: "Real-time terahertz color scanner for moving objects," *Opt. Express*, **16** (2008) 1208-1221.
- 6) 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.*, **25** (2000) 426-428.
- 7) 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.*, **43** (2004) L489-L491.
- 8) F. Miyamaru and M. Hangyo: "Finite size effect of transmission property for metal hole arrays in subterahertz region," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 2742-2746.
- 9) Y. Watanabe, K. Kawase, T. Ikari, H. Ito, Y. Ishikawa and H. Minamide: "Component spatial pattern analysis of chemicals using terahertz spectroscopic imaging," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 800-802.
- 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.*, **87** (2005) 061101.

(2010年2月5日受理)