

## 実時間 2次元テラヘルツ断層イメージング法

### Real-time Two-dimensional Terahertz Tomography

安井 武史

TAKESHI YASUI

大阪大学大学院基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

#### 概 要

近年、X線や超音波に替わる新しい非破壊検査手段として、テラヘルツ (THz) 断層イメージングが注目されている。THz 断層イメージングでは、パルス状 THz 波独自の特徴を利用することにより、非侵襲・非接触リモート・深部プローブ可能な断層イメージング法が実現できる。本講演では、点走査型 THz 断層イメージング、実時間 2次元 THz 断層イメージング、および塗装膜測定への応用に関する研究を紹介する。

キーワード テラヘルツ、非破壊検査、フェムト秒レーザー、塗装膜

#### 1. 緒言

2005年1月9日付け全国紙朝刊に国家基幹技術10大戦略が掲載された。そこには、科学技術立国再生に向けた国際競争力強化のため日本が取り組むべき課題として世界最高の「スパコン」や「ナノテク装置」などに加え、「テラヘルツ波による計測・分析技術」があげられているのをご覧になった方が多いと思う。10年後のテラヘルツ波応用に関する市場規模は2兆円に達するとも言われており、これからの技術動向に目を離せない。

テラヘルツ (THz) 波とは光と電波の境界にある周波数領域 (周波数 100GHz~10THz、波長 30 $\mu$ m~3mm) に位置する電磁波のことで、古くから遠赤外線と呼ばれていた領域である。遠赤外線は体内深部まで浸透する熱線であることから健康産業や医療によく利用されてきた。「遠赤外線ホームこたつ」や「遠赤外肌着」などを愛用されている読者もおられると思う。一方、産業や計測分野への応用について見れば、安定なレーザー光源と高感度検出器の開発が遅れていたため、本格的な応用は未開拓であった。しかし近年の超短パルスレーザーや超高速デバイス技術の発展により、パルス状の THz 波 (以下 THz パルスと略す) が比較的容易に生成・検出できるようになってきたため、以下に示す特徴と相まって新たな応用展開が活発になっている。

THz パルスは、①自由空間伝播、②非金属物質に対する良好な透過特性、③コヒーレントビーム、④サブピコ秒パルス、⑤非侵襲、⑥低散乱、⑦分光やイメージングが可能などの特徴を有しており、基礎科学以外にも、非破壊検査、生体計測といった実用計測への応用も積極的に行われている。特に最近は逼迫した国際情勢に関連してセキュリティ対策としての THz パルスの重要性が注目を浴びている。それ以外にも様々な応用が考えられ、今後も THz 波は幅広い分野の発展に寄与すると予想される。

物体の非破壊検査では、内部の様子を階層的に検査できる断層画像撮影技術 (トモグラ

フィ)は極めて有効であり、X線コンピュータトモグラフィ(X線CT)や超音波エコーが各分野で実用化されている。一方で、これらの従来法では高い侵襲性や接触測定が測定対象に対する制限となっていた。ここで、THzパルスの特徴を利用すると、超音波エコーと同様な原理に基づいて、極低侵襲・非接触リモート測定が可能な断層画像撮影が実現できる。ここでは、THz領域の代表的断層画像撮影技術として、反射THzパルスを用いた点測定型THzトモグラフィ[1-3]及び実時間2次元THzトモグラフィ[4, 5]を紹介する。

## 2. 測定原理

超短パルスレーザーによって発生させたパルス状THz波(THzパルス)の超短パルス特性を利用すると、超音波エコーと同様なパルスエコー法がTHz領域で可能である(THzトモグラフィ)[6, 7]。例えば、図1(a)に示すような層状の内部構造を有する測定対象に対してTHzパルスを垂直入

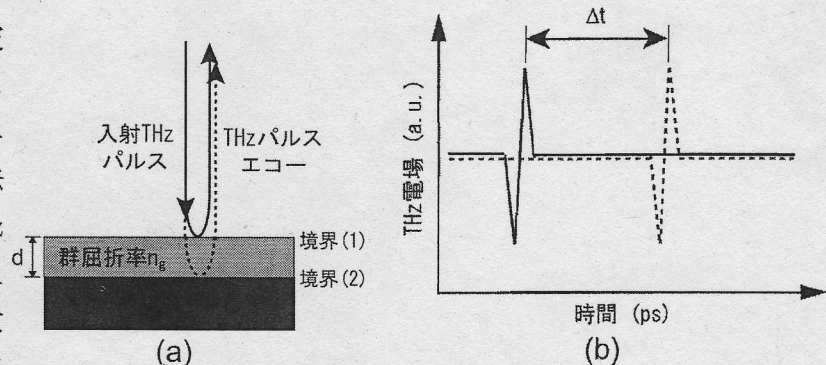


図1 THzトモグラフィの測定原理。(a)サンプルと(b)THzパルスエコー波形。

射する場合を考える。各層の境界は一般に屈折率不連続面であるで、THzパルスの一部はそのまま透過し、残りはTHzパルスエコーとして反射される。図1(a)の測定対象の場合、境界(1)及び(2)からTHzパルスエコーが反射される。このTHzパルスエコーの時間波形を測定すると図1(b)のようになり、異なる境界からのエコーは時間的に分離されて観測される。ここで、測定対象の群屈折率を  $n_g$ 、境界深さ位置を  $d$ 、真空中の光速を  $c$  とすると、2つのパルスエコーの時間遅延  $\Delta t$  は以下の式で与えられる。

$$\Delta t = (2n_g d)/c \quad (1)$$

したがって、測定対象の群屈折率  $n_g$  が既知であるならば、時間遅延  $\Delta t$  から境界深さ位置  $d$  を知ることができる。この場合の深さ分解能は、パルス幅を  $\Delta T$  とすると、以下の式で与えられる。

$$d_{\min} = (c\Delta T)/(2n_g) \quad (2)$$

一方、面内空間分解能は利用するTHzパルスの波長(回折限界)によって制限される。

## 3. 点測定型THzトモグラフィ

点走査型THzトモグラフィ装置を図2に示す。ここでは、モード同期チタン・サファイアレーザー発振器を光源として用い、THz発生及びTHz検出には光伝導アンテナ(PCAI、PCA2)を用いている。ポンプ光をTHz発生用PCAIに入射することにより、THzパルスが超半球シリコンレンズ(Si-L)を経て自由空間に放射される。自由空間を伝搬するTHzパルスのコリメート及び集光には、3つの軸外し放物面鏡(OAP1、OAP2、OAP3)を用いる。THzパルスはOAP1でコリメートされた後、シリコン・ビームスプリッター(Si-BS)で反射され、OAP2でサンプルに集光される。サンプルから反射されたTHzパルスエコーは、同じ光路を経てSi-BSを透過し、OAP3でTHz検出用PCA2に入射される。一方、プローブ光は、

機械式時間遅延走査ステージを経た後、PCA2に集光される。時間遅延走査ステージを用いることによってTHzパルスとプローブ光がPCA2で時間的に重なるタイミングを調節できるので、時間遅延走査ステージを連続的に変化させながらPCA2の電流値をロックイン増幅器で高感度検出することにより、THzパルスエコーの電場時間波形を取得する。またイメージング測定では、サンプルを2次元的に走査する。

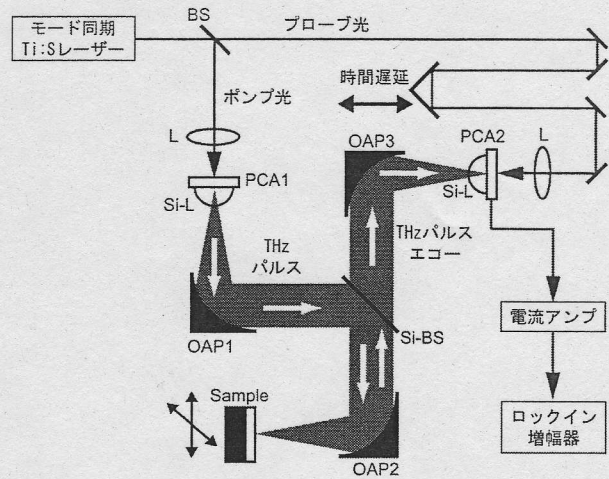


図2 点走査型THzトモグラフィ装置

THz トモグラフィの応用計測例として、フロッピーディスク[7]、錠剤コーティング

[8]、皮膚火傷[6]、皮膚ガン[9]、歯牙[10]などがこれまでに報告されているが、ここでは塗装膜計測への応用例[1-3]を紹介する。一般の工業製品では素地材料の防腐・防錆・防水・色彩効果の目的から表面塗装が施されていることから、塗装膜評価は塗装製品の重要な品質管理項目の1つである。従来は接触式膜厚計が使われてきたが、これに替わる非接触リモートな高機能膜厚計としてTHzトモグラフィの利用が提案されている。図3(a)は、THzトモグラフィによって得られた2層塗装膜の膜厚分布を示しており、従来法では困難であった各層の膜厚分布が詳細に可視化されている。図3(b)は、塗装製品における重大な品質欠陥である塗装膜剥離を計測した結果である。非剥離部では塗膜表面(空気-塗膜境界)及び塗膜-素地境界からの2つのエコーが観測されるが、剥離部では塗膜表面・塗膜裏面(塗膜-空気境界)・素地表面(空気-素地境界)の3カ所でエコーが発生するので、エコーの数より剥離を判断することができる。イメージング結果より、剥離部の詳細な分布が可視化されているのが分かる。さらに、塗料の乾燥状態(ドライ膜)と未乾燥状態(ウェット膜)のTHz分光特性の違いを利用すると、塗装膜の乾燥状態モニタリングも可能である[1-3]。

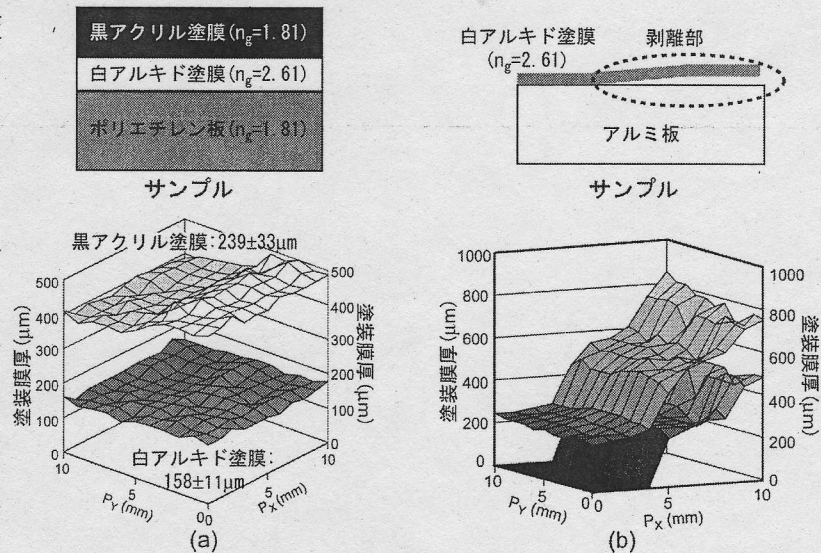


図3 塗装膜の膜厚分布の測定結果<sup>6)</sup>。(a)2層塗装膜、(b)剥離塗装膜

#### 4. 実時間2次元THzトモグラフィ

THz トモグラフィの産業応用化に向けて解決すべき課題の1つが長い測定時間である。図2に示すようなフェムト秒レーザー発振器を光源に用いたTHzトモグラフィ装置は点計測に基づいているため、2次元断面イメージを取得するためには2次元的な機械走査(時間遅延及びサンプル移動)が必要となる。このような複数の機械的走査機構を利用すると

画像取得に膨大な時間（数分～数時間）がかかるため、測定対象が静止物体のみに制限され、THz トモグラフィの応用性を著しく制限してきた。これまでは、機械式時間遅延走査機構の高速化によって測定時間の短縮化が試みられてきたが、機械的機構に依存する限りは

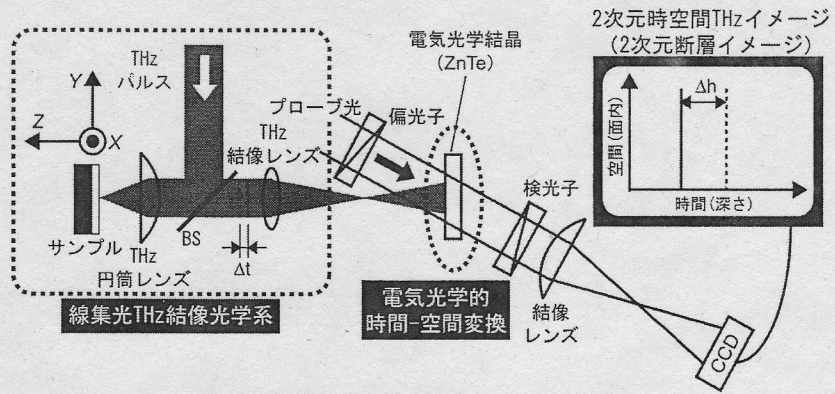


図4 実時間2次元THz トモグラフィ装置

高速化に限界がある。このような機械的な走査を無くし、リアルタイムで2次元断層像が取得できれば移動物体にも適用でき、THz トモグラフィの応用性は飛躍的に高まるはずである。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（非共軸2次元自由空間電気光学サンプリング）[11]と線集光 THz 結像光学系を利用すれば、機械的走査機構を必要とすることなく、2次元断層分布の取得が可能になる[4, 5]。このような原理に基づいた実時間2次元 THz トモグラフィの実験装置を図4に示す。増幅フェムト秒レーザー光と非線形光学結晶（テルル化亜鉛結晶）を用いて発生させた THz パルスは、シリコン・ビームスプリッター（Si-BS）で反射された後、THz 円筒レンズを用いてサンプルに線集光される。ここで線集光の方向はサンプルの X 軸方向とする。サンプルが2層の内部構造を有しているとする、時間遅延  $\Delta t$  を有する2つの THz パルスエコーが反射される。サンプルで反射されたライン状 THz ビームは、THz 結像レンズによって電気光学結晶（ZnTe）に結像される。プローブビームを THz ビームと非共軸で ZnTe に入射し、面として空間的にオーバーラップさせる。その結果、時間-空間変換と電気光学サンプリングが起こり（電気光学的時間-空間変換）、THz パルスエコーの時間遅延  $\Delta t$  は、以下の式に従い、プローブビーム断面の水平方向に沿った空間複屈折量分布  $\Delta h$  に変換されることになる。

$$\Delta t = (\Delta h \cdot \tan\theta) / c \quad (3)$$

ここで、 $c$  は真空中の光速、 $\theta$  は両ビームの交差角である。一方、プローブビーム断面の垂直方向には、サンプル上の THz 線集光ライン（X 軸方向）に沿った空間分布が展開される。偏光子・検光子ペアによって2次元空間複屈折量分布から2次元空間強度分布に変換した後、結像レンズを介して CCD カメラでイメージング計測する。その結果、水平座標方向に THz パルスエコーの時間情報、垂直座標方向にサンプル上の THz 線集光ライン（X 軸方向）に沿った空間情報が展開された2次元時空間 THz イメージが CCD カメラから読み出される。この2次元時空間 THz イメージが、サンプルの X-Z 断面すなわち2次元断層イメージに対応している。本手法では、機械的走査機構を必要とすることなく、2次元断層イメージを実時間測定できる。

本手法を用いることにより、動体サンプルの THz 断層ムービー（毎秒10フレーム）を実際に取得した。測定に用いたサンプルは、アルミ板上の半分の領域に塗装膜（膜厚175 $\mu\text{m}$ ）を施したもので、線集光された THz ビームと平行方向に秒速5mmで連続移動させた（図5上段）。各照射位置における THz 断層ムービーのスナップショットを図5下段に示す。線集光 THz ビームの照射位置の移動に伴い、非塗装部、非塗装部-塗装部境界、塗装部と2次

元断層イメージが変化している様子が確認できる。非塗装部では平らなアルミ板表面からの THz エコー信号が、垂直方向の 1 本のライン信号として確認できる [図 5(a)]。塗装部では、塗装膜表面及び塗装膜-アルミ板境界からの 2 つのエコー信号が時間的に分離されている [図 5(c)]。この時間間隔は塗装膜の光学的

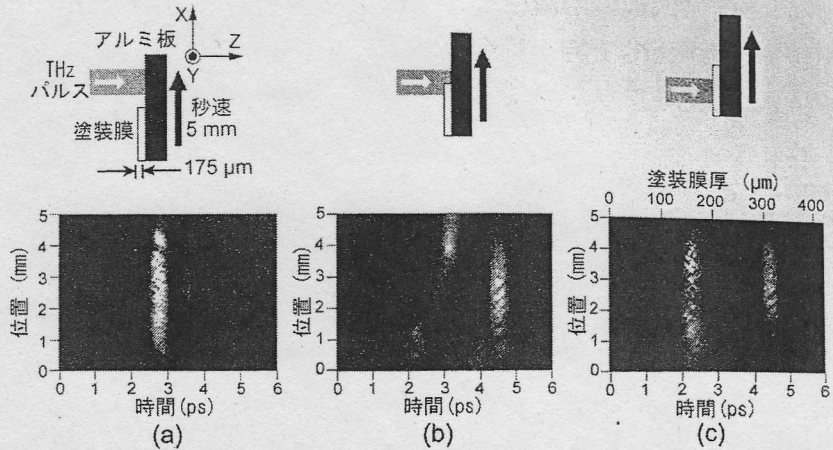


図 5 移動塗装膜の実時間断層イメージ<sup>7)</sup>。(a)非塗装部、(b)非塗装部-塗装部境界、(c)塗装部。

厚さに対応しているので、塗料の群屈折率 (=2.14) を用いて膜厚にスケーリングしなおすと、上部水平軸のようになる。接触式膜厚計の値 (=175 $\mu\text{m}$ ) とよく一致しているのが確認できる。非塗装部分と塗装部分の境界では、1 つの THz エコー信号と 2 つの THz エコー信号が混在している様子が確認できる [図 5(b)]。また、境界部分のエッジがクリアでないのは面内空間分解能が不十分なためである。

一方、本手法の非接触リモート特性と実時間測定を利用すると、従来は測定困難とされた未乾燥状態の塗装膜 (ウェット膜) の測定も可能となる。そこで、ウェット膜の乾燥に伴う膜厚変化を本手法によって実時間測定した。サンプルは速乾性黒アクリル塗装をアルミ板に施したもので、塗装前後の 2 次元断層イメージを測定した。図 6 は、1 分毎の 2 次元断層 THz イメージを示している。塗装前は剥き出しのアルミ板上からの THz エコー信号のみが観測されているが、塗装後は塗膜表面及び塗膜-アルミ板境界からの 2 つの THz エコー信号が時間的に分離されている。乾燥の進行に伴い、2 つの THz エコー信号の時間的位置が変化している

様子が確認できる。ここで、左側の THz エコー信号の時間的位置は塗装膜の幾何学的な膜厚変化 (塗装膜表面位置の変化) に対応しているのに対し、2 つの THz エコー信号の時間間隔が光学的膜厚に対応している。これらの時間的位置変化から、乾燥に伴う収縮により塗装

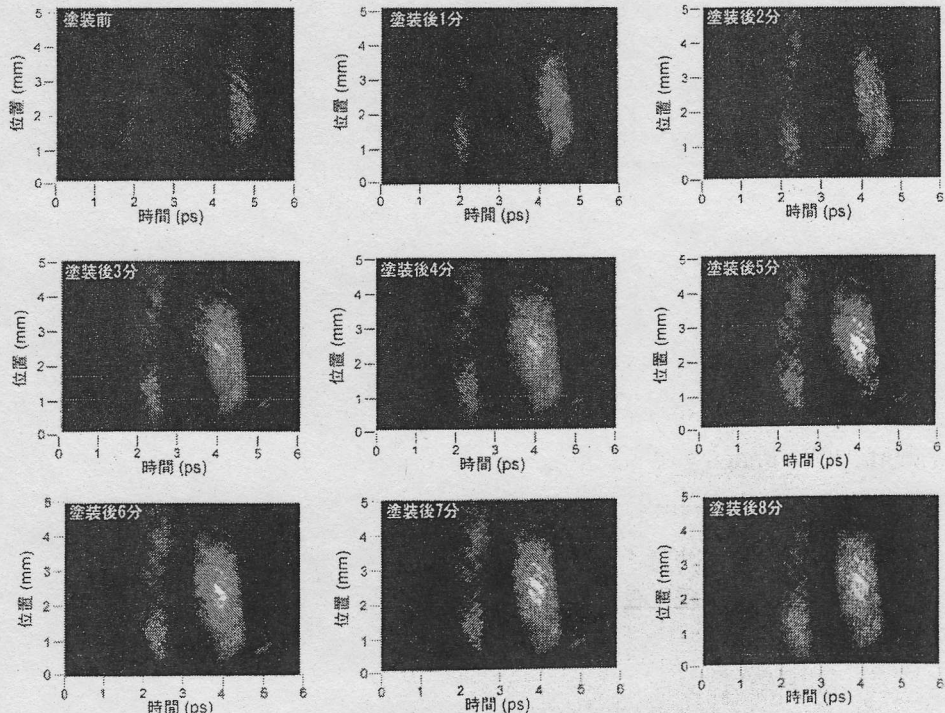


図 6 ウェット塗装膜の実時間断層イメージ

膜の幾何学的膜厚が減少し、それに伴い光学的膜厚も減少することが分かる。また、塗装膜の収縮が面内で均一に進行している様子も確認できる。これらの時間的変化から乾燥状態のモニタリングが可能である。

## 5. まとめ

THz パルスを用いた点走査型 THz トモグラフィー、実時間 2 次元 THz トモグラフィー、及び塗装膜厚検査への応用を紹介した。非接触リモート特性と非侵襲性を有する本手法は、従来法の制限を解消した新しい内部診断法として、移動物体の非破壊検査や生体診断を始めとした各応用分野で有用であると考えられる。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 産業技術研究助成事業より援助を受けた

## 参考文献

- [1] 安井武史、荒木勉、『テラヘルツパルス光を用いた高機能塗装膜モニタリング法の開発』、光アライアンス 14, pp. 18-23 (2003).
- [2] T. Yasui, T. Yasuda, K. Sawanaka, and T. Araki, "A terahertz paintmeter for non-contact monitoring of thickness and drying progress in paint film", *Appl. Opt.*, Vol. 44, pp. 6849-6856 (2005).
- [3] T. Yasuda, T. Iwata, T. Araki, and T. Yasui, "Improvement of minimum paint film thickness for THz paintmeters by multiple regression analysis", *Appl. Opt.* 46, pp.7518-7526 (2007).
- [4] T. Yasuda, T. Yasui, T. Araki, and E. Abraham, "Real-time two-dimensional terahertz tomography of moving objects", *Opt. Comm.* 267, pp. 128-136 (2006).
- [5] 荒木勉、安井武史、『テラヘルツ電磁波パルスによるリアルタイム 2 次元断層画像撮影技術～非侵襲・非接触リモートな実時間断層画像撮影法の開発～』、検査技術 11, pp. 41-46 (2006).
- [6] D. M. Mittleman, R. H. Jacobsen, and M. C. Nuss, "T-ray imaging," *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron.* 2, pp. 679-692 (1996).
- [7] D. M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin, and M. C. Nuss, "T-ray tomography," *Opt. Lett.* 22, pp. 904-906 (1997).
- [8] A. J. Fitzgerald, B. E. Cole, P. F. Taday, "Nondestructive analysis of tablet coating thicknesses using terahertz pulsed imaging", *J. Pharm. Sci.* 94, pp. 177-183 (2005).
- [9] R. M. Woodward, B. E. Cole, V. P. Wallace, R. J. Pye, D. D. Arnone, E. H. Linfield, M. Pepper, "Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue", *Phys. Med. Biol.* 47, pp. 3853-3863 (2002).
- [10] D. Crawley, C. Longbottom, V. P. Wallace, B. Cole, D. Arnoe, M. Pipper, "Three-dimensional terahertz pulse imaging of dental tissue", *J. Biomed. Opt.* 8, 303-307 (2003).
- [11] J. Shan, A. S. Weling, E. Knoesel, L. Bartels, M. Bonn, A. Nahata, G. A. Reider, T. F. Heinz, "Single-shot measurement of terahertz electromagnetic pulses by use of electro-optic sampling", *Opt. Lett.* 25, pp. 426-428 (2000).