

# 「実時間 2 次元テラヘルツ断層イメージング法の開発と 塗装膜計測への応用」

安井 武史（大阪大学大学院基礎工学研究科）

E-mail: t-yasui@me.es.osaka-u.ac.jp

## 1. はじめに

今年の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、遠赤外線とも呼ばれている。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、良質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非金属材料に対する良好な透過特性、③コヒーレントビーム、④超短パルス、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<sup>1,2)</sup>、生体計測<sup>3,4)</sup>といった実用計測への応用も積極的に行われている。特に最近では逼迫した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おり、その一環としていくつかの報告がなされている<sup>5,6)</sup>。これらの他にも様々な応用が考えられ<sup>7)</sup>、今後もテラヘルツ電磁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は極めて有効であり、X線 CT や超音波 CT が実用化されているが、これらの手法では高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。そこであらためて THz 領域について断層画像取得の方法を考えると、THz パルスを利用すれば超音波エコーと同様にパルスエコー法が適用できるはずである (THz トモグラフィー<sup>8)</sup>)。我々はこのような方法を、塗装膜厚<sup>9)</sup>やヒト皮膚断層<sup>10)</sup>の非接触リモート測定に応用してきた。しかしながら、現状では THz パルスの時間波形を直接的に実時間測定可能な検出器が存在しないため、機械式時間遅延を利用した相互相関法 (ポンプ・プローブ法) に基づいて間接的に時間波形を取得しなければならない。すなわち、ピコ秒オーダーの THz パルスエコー時間波形を1つ取得するのに数分前後の測定時間が必要となるわけである。2次元断層イメージを取得するためには、さらにビーム照射位置を1次的に走査しなければならない。このように、従来の THz トモグラフィーは基本的に点計測に基づいているため、2次元断層イメージを取得するためには2次元の機械走査 (時間遅延及びサンプル移動) が必要となる。その結果、画像取得に膨大な時間 (数分~数時間) がかかり、本手法の応用性を著しく制限してきた。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 トモグラフィー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

学サンプリング法)<sup>(11)</sup>と線集光 THz 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<sup>(12)</sup>。本講演ではこのような実時間2次元THzトモグラフィーの原理と塗装膜厚計測への応用について紹介する。

## 2. 実験装置

2次元自由空間電気光学サンプリング法(2D-FSEOS)とは、THzビームとプローブビーム(レーザービーム)を電気光学結晶に対して共軸に入射することにより、電気光学ポッケルス効果を介して、THzビームの空間電場分布をプローブビームの空間強度分布に変換する手法である。一方、非共軸2D-FSEOSでは、THzビームとプローブビームを非共軸入射配置とすることにより、THzパルスの電場時間波形をプローブビームの空間強度分布に変換することが可能になる。測定原理を図1に示す。ここで、THzビームはある時間遅延を有する2つのパルスエコー信号とする。THzビームとプローブビームはTHz波検出用の電気光学結晶にある交叉角で非共軸に入射される。THzパルスエコーの2つの波面(実線及び波線)とプローブビーム波面は、プローブビーム断面の空間的に異なる位置で重なる。ここで、THzビームとプローブビームの伝搬速度がプローブビーム伝搬方向に関して等しいとすると、その波面の重なりは空間的に同じ位置を保ったまま電気光学結晶中を伝搬していくことになる。その結果、THzパルスの時間波形がプローブビーム断面の空間複屈折量分布に変換されることになる。偏光子ペアによって空間複屈折量分布から空間強度分布に変換されたTHzパルス波形情報は、結像レンズを介して1次元光検出素子によって検出される。

このような非共軸2D-FSEOSによる電気光学的時間-空間変換を用いると、サンプルのある点における断層奥行情報(THzエコー波形)がラインセンサー上の位置信号として取得できる。ここで光学系に改良を加え、ラインビーム状に形成されたTHzパルスを測定対象に照射し、2次元光検出素子で検出すれば、そのラインビームに沿った2次元断層分布情報が短時間で得られる。このような考えに基づいて開発した実時間2次元THzトモグラフィーの装置図を図2に示す。THzパルス発生及び検出用レーザー光源には、フェムト秒チタン・サファイア再生増幅器(パルスエネルギー1mJ、パルス幅100fs、中心波長800nm、繰返周波数1kHz)を用いる。非線形光学結晶によって発生させた高強度THzパルスはレンズ1によってコリメートされた後、円筒レンズによってサンプルに線集光される。サンプルから反射されたTHzエコービームは、レンズ2によって電気光学結晶上に結像される。一方、プローブビームは電気光学結晶に非共軸入射される。直交配置された偏光子ペア(偏光子、検光子)によってプローブビーム断面強度分布情報に変換された2次元断層分布情報は、レンズ3によって2次元冷却CCDカメラ(640×480ピクセル、毎秒10フレーム)に結像される。最終的に、THzエコー時間情報が水平軸に、ラインビームに沿った1次元空間情報が垂直軸に展開された、2次元時空間THzイメージが取得される。

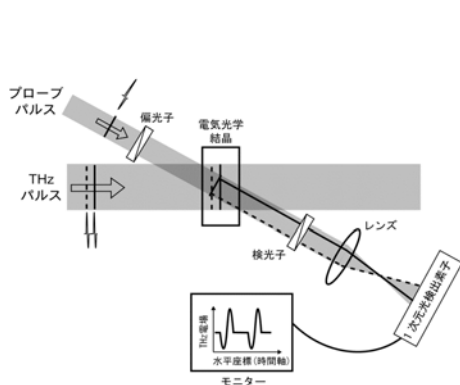


図1 電気光学的時間-空間変換の原理

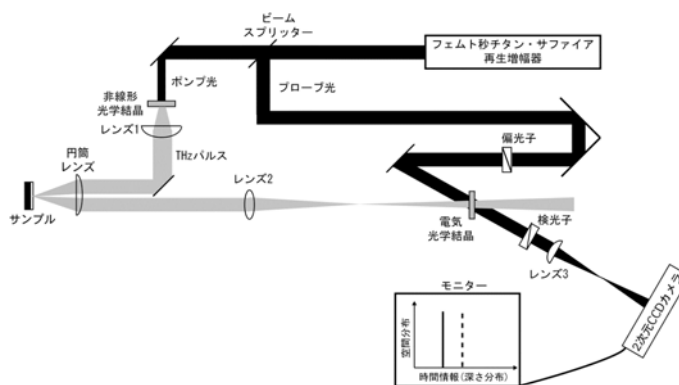


図2 実験装置

### 3. 測定結果

図3(a)は、ミラーをサンプルとした場合に取得された2次元時空間THzイメージ(イメージ領域:9ps×5mm、測定時間100ms)を示しており、水平軸が深さ分布、垂直軸がラインビームに沿った1次元空間分布に対応している。イメージのグレースケールはTHz電場の正負強度を示している。THzエコー信号は4.1psの位置に現れており、ミラー表面が平らで内部構造を有しないため1本の垂直ライン状となっている。図3(b)は図3(a)の水平線(1)に沿ったTHz電場の強度分布を示しており、パルス幅0.5psのTHzエコー時間波形が実時間測定できていることが確認できる。

THz塗膜計<sup>8,9)</sup>は自動車ボディ等に施された塗装膜の膜厚や乾燥状態の非接触リモート計測に有用であるが、塗装工程におけるインプロセス・モニタリングへの拡張を考慮した場合、計測の実時間性が強く望まれる。このようなインプロセスTHz塗膜計に対して、実時間2次元THzトモグラフィーが有効であると考えられる。そこで、ここでは塗装膜厚計測への応用例を紹介する。まずベルト・コンベヤー上の塗装製品を想定し、動体サンプルへの適用性を評価した。サンプルはアルミ板上の半分の領域に白アルキド塗装(膜厚175 $\mu\text{m}$ )を施したものをを用いた。この塗装膜サンプルを、THzビームの集光ライン方向に沿って連続的に移動させたながら(移動速度5mm/s)、2次元断層ムービーを取得した<sup>(13)</sup>。図4は3つのTHzビーム照射位置における測定結果を示している。非塗装部分では、アルミ板表面からのTHzエコー信号が2.8psの位置で観測されている[図4(a)]。次に塗装部分では、塗膜表面及び塗膜-アルミ板境界からのTHzエコー信号が時間的に分離(2.3ps及び4.5ps)されているのが確認できる[図4(c)]。また、白アルキド塗装の群屈折率(2.14)と時間遅延から算出した膜厚スケールは図上部の水平軸に示されている。例えば、測定領域1~4mmにおける膜厚ムラ分布は162 $\pm$ 21 $\mu\text{m}$ (平均値 $\pm$ 標準偏差)であった。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ことが確認できる[図4(b)]。このように、動体サンプルの2次元断層分布の実時間モニタリングが本手法によって可能であることが分かる。

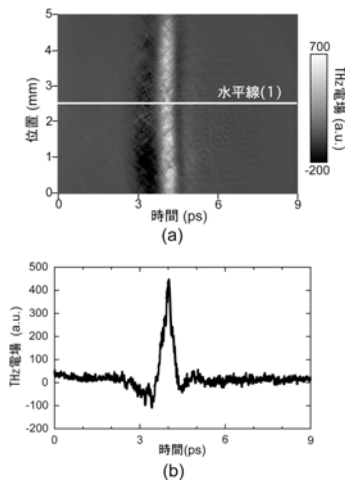


図3 (a) 2次元時空間THzイメージ(9ps×5mm)と(b)THzパルスの電場時間波形

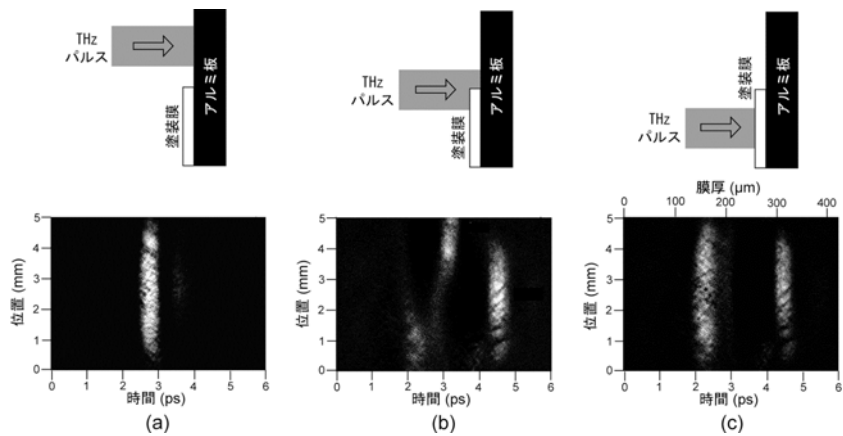


図4 移動塗装膜サンプルの実時間2次元THzトモグラフィー。(a)非塗装部分、(b)非塗装部分と塗装部分の境界、(c)塗装部分。

一方、本手法の非接触リモート特性と実時間性を利用すると、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次元断層ムービーを測定した<sup>(13)</sup>。図5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次元断層イメージが変化している様

子が確認できる。ここで、左側のエコー信号は塗装膜表面からのものであり、この変化は幾何学的厚さの変化に対応している。一方、右側のエコーは塗装膜アルミ板境界のエコーであるので、左右の両エコー信号の時間差は光学的厚さに対応している。図6は、2次元断層イメージから得られた塗装膜の幾何学的厚さ及び光学的厚さの時間的変化を示している。これらの変化から、ウェット膜の乾燥過程に伴い塗装膜が幾何学的及び光学的に収縮していることが分かる。また、そのような塗膜収縮が面内で一様に進行している様子も確認できる。幾何学的及び光学的収縮は約10分でほぼ終了しており、この時点で乾燥が完了していることを示している。これらの乾燥に伴う時間的変化は、ウェット膜の乾燥状態を示すパラメーターとして有用であると思われる。

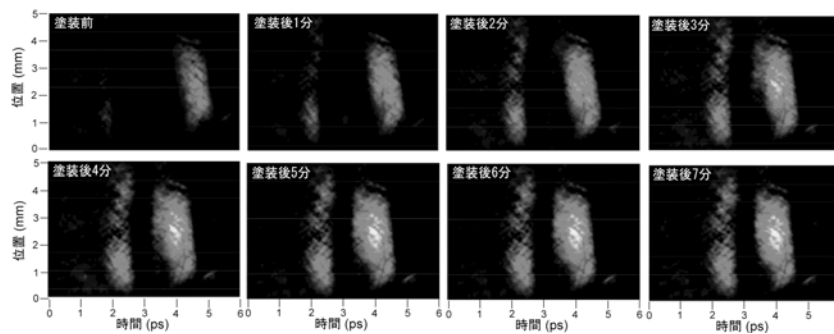


図5 移動塗装膜サンプルの実時間2次元THzトモグラフィ。 (a)非塗装部分、(b)非塗装部分と塗装部分の境界、(c)塗装部分。

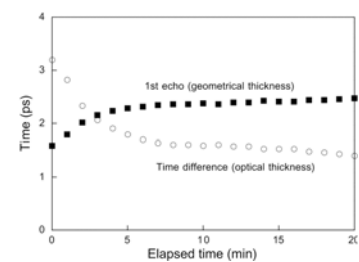


図6 塗装乾燥過程における2次元断層分布の時間的変化

#### 4. まとめ

本講演では、THzパルスを用いた実時間2次元テラヘルツ断層イメージング法及び塗装膜測定への応用を紹介した。非接触リモート特性、非侵襲性及び実時間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。現状の測定フレームレートは毎秒10フレームであるが、本手法は原理的に単一ショット測定が可能のため、レーザー繰返周波数(1kHz)まで測定フレームレートを向上させることが可能である。このような高速化が実現できれば、さらにTHzラインビームを高速に振らせることで面に対応した照射ができ、リアルタイムで3次元THz断層画像を取得することが可能となる。

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及び総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)より援助を受けた。また、実験でご協力頂いた大阪大学大学院基礎工学研究科大学院生(現 浜松ホトニクス)・安田敬史君に感謝いたします。

#### 参考文献

- (1) D. M. Mittleman, R. H. Jacobsen, and M. C. Nuss, "T-ray imaging", IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron. **2**, pp. 679-692 (1996).
- (2) A. J. Fitzgerald, B. E. Cole, and P. F. Taday, "Nondestructive analysis of tablet coating thicknesses using terahertz pulsed imaging", J. Pharm. Sci. **94**, pp. 177-183 (2005).
- (3) Löffler, T. Bauer, K. Siebert, H. Roskos, A. Fitzgerald, and S. Czasch, "Terahertz dark-field imaging of biomedical tissue", Opt. Express **9**, pp. 616-621 (2001).
- (4) R. M. Woodward, B. E. Cole, V. P. Wallace, R. J. Pye, D. D. Arnone, E. H. Linfield and M. Pepper, "Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue", Phys. Med. Biol. **47**, pp. 3853-3863 (2002).
- (5) K. Yamamoto, M. Yamaguchi, F. Miyamaru, M. Tani, M. Hangyo, T. Ikeda, A. Matsushita, K. Koide, M. Tatsuno and Y. Minami, "Noninvasive inspection of C-4 explosive in mails by terahertz time-domain spectroscopy", Jpn. J. Appl. Phys. **43**, L414-L417 (2004).

- (6) Y. C. Shen, T. Lo, P. F. Taday, B. E. Cole, W. R. Tribe and M. C. Kemp, "Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging", *Appl. Phys. Lett.* **86**, 241116 (2005).
- (7) 大森豊明監修, "テラヘルツテクノロジー", エヌ・ティー・エス出版 (2005年7月) .
- (8) 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).
- (9) 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).
- (10) 安井武史、東野義之、荒木勉, "テラヘルツ電磁波パルスを用いた非接触・局所皮膚水分量測定の開発", *生体医工学* **42**, pp.190-194 (2004).
- (11) 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**, pp. 426-428 (2000).
- (12) T. Yasuda, T. Yasui and T. Araki and E. Abraham, "Real-time two-dimensional terahertz tomography of moving objects", *Opt. Comm.*, (in reviewing).
- (13) [http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki\\_lab/research/thz/](http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki_lab/research/thz/)