

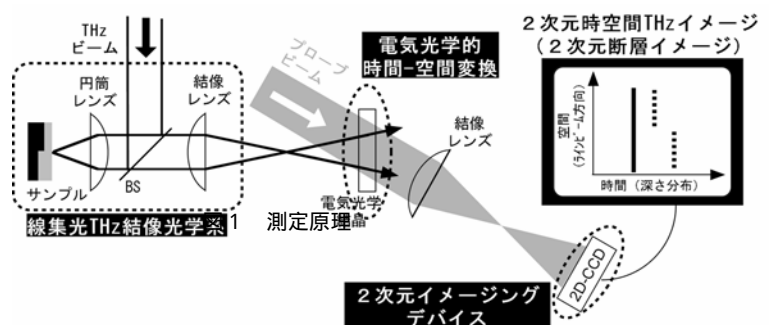
# 実時間 2次元テラヘルツ断層イメージング法の開発

大阪大学大学院基礎工学研究科 安井武史

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。低侵襲かつ非接触リモートな光学的手法として光コヒーレンス・トモグラフィーがあるが、測定対象が吸収や散乱で不透明な場合には、表面近傍のごく限られた測定深度の情報しか得られない。一方、近年の超短パルスレーザーや超高速光技術の発展により、パルス状のテラヘルツ波（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り、自由空間伝播・非金属材料に対する良好な透過特性・コヒーレントビーム・超短パルス・非侵襲・低散乱・分光やイメージングが可能といった特徴をいかした様々な応用計測が報告されている。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てみると、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）。我々はこのような方法を、塗装膜厚<sup>(1)</sup>やヒト皮膚断層<sup>(2)</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測定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次元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次元的な機械的走査機構（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）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。本手法の原理図を図1に示す。サンプルから反射された THz エコービームとプローブビームを電気光学結晶に非共軸入射し波面同士を面として重ねると、電気光学的時間—空間変換により、THz エコーパルスの時間情報がプローブビームの空間強度分布に変換される（図1では偏光子ペアを省略）。ここで2次元イメージング検出器（CCD カメラ）を用いた場合、時間波形情報は水平座標方向に展開されるので、残りの垂直座標をサンプルの1次元イメージングに利用できる。そこで、サンプルに対して円筒レンズを用いた線集光 THz 結像光学系を導入することにより、実時間で2次元時空間 THz イメージを取得する。このようにして得られたイメージの時間軸は深さ情報に対応していることから、THz 集光ラインビームに沿ったサンプルの2次元断層イメージを直接的に取得できる。本手法では、機械的走査機構が一切不要で、原理的にレーザーの単一ショットパルスでの計測が可能である。

本手法の有用性を確認するため、ここでは塗装膜厚計測への応用例を紹介する。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ながら（移動速度



5mm/s) 2次元断層 THz ムービー (イメージ領域: 6ps × 5mm、毎秒 10 フレーム) を取得した<sup>(3)</sup>。図 2 は 3 つの THz ビーム照射位置におけるスナップショットを示しており、水平軸が深さ分布、垂直軸が THz 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。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 の位置に現れており、アルミ板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 2(a) ] 同図上部は水平線 (A) に沿った THz 電場の強度分布を示しており、パルス幅 0.4ps 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。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 2(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同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 ± 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様子が確認できる [ 図 2(b) ] このように、THz ビーム照射位置の移動により 2 次元断層イメージが連続的に変化しており、本手法が動体サンプルの 2 次元断層分布の実時間モニタリングに有効であることが分かる。

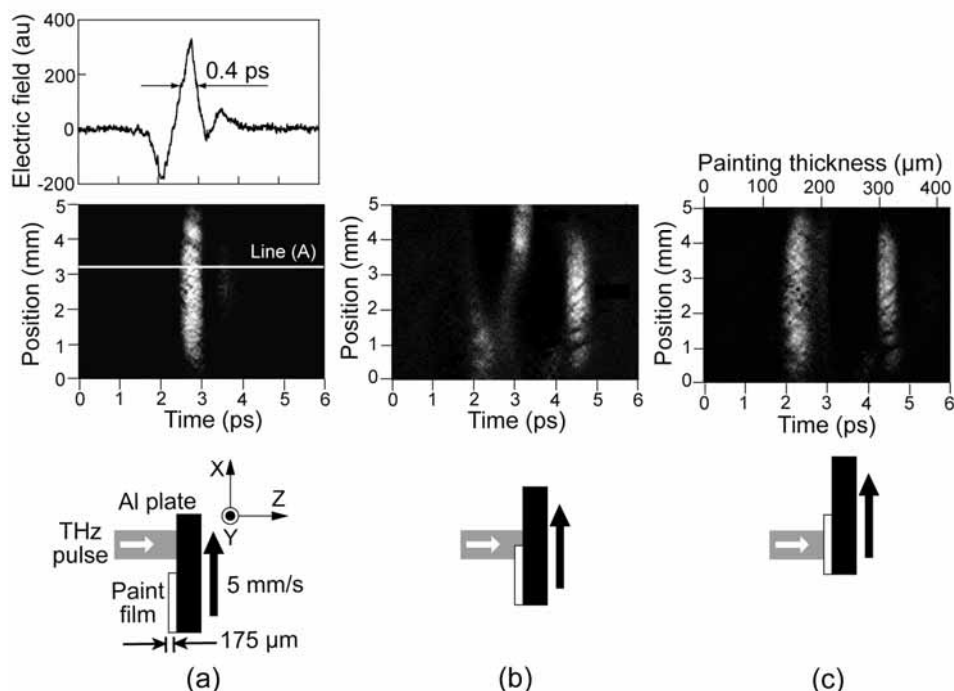


図 2 移動塗装膜サンプルの実時間 2 次元 THz トモグラフィー。(a)非塗装部分、(b)非塗装 塗装部分の境界、(c)塗装部分。

本稿では、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、生産ライン上の工業製品の非破壊検査や生体診断を始めとした各種応用分野で有用であると考えられる。

本研究は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) 及び新エネルギー・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) 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).
- (2) 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).
- (3) [http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki\\_lab/research/thz/](http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/araki_lab/research/thz/)