

# 実時間 2次元テラヘルツ・トモグラフィーを用いた 移動物体の 2次元断層イメージング

## Two-dimensional cross-sectional imaging of moving objects using real-time two-dimensional terahertz tomography

○安井武史, 安田敬史, 澤中健一, 荒木勉

○Takeshi Yasui, Takashi Yasuda, Ken-ichi Sawanaka and Tsutomu Araki

大阪大学大学院基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

E-mail: t-yasui@me.es.osaka-u.ac.jp, <http://sml.me.es.osaka-u.ac.jp/>

Real-time two-dimensional (2D) terahertz (THz) tomography is proposed for 2D cross-sectional imaging of moving objects. For this purpose, a 2D spatiotemporal THz image of a moving sample is acquired at a frame rate of 10 frame/s by a combination of temporal-to-spatial conversion using non-collinear 2D free-space electro-optic sampling and line focusing of a THz beam. The proposed method provides a powerful tool in the fields of nondestructive testing and biomedical diagnostics.

### 1. はじめに

最近、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国家基幹技術 10 大戦略が発表され、その 1 つとして「テラヘルツ波による計測・分析技術」があげられている。また、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。この電磁波領域では安定な光源と高感度検出器の開発が遅れていたため、本格的な産業や計測分野への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。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いる。このような THz パルスの特徴を活かした新しい内部透視手法がテラヘルツ断層イメージング法 (THz トモグラフィー) [1] であり、最近ではライン製品の非破壊検査や生体診断といった動体の計測手段としても期待されている。しかし従来の THz トモグラフィーは点計測であるため、2次元断層イメージを得るためには 2 軸 (時間遅延走査、サンプル走査) の走査機構が必要となり計測に時間がかかるという問題点がある。前回、我々は電気光学的時間-空間変換と THz ビームの線集光を利用することにより、時間遅延走査及びサンプル走査が不要な実時間 2次元 THz トモグラフィーを報告した[2]。今回は、本手法を用いた移動物体の 2次元断層イメージングについて報告する。

### 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レーザービームの空間強度分布に変換する手法である [3]。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 [4]。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 1 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 $\times$ 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。

### 3. 測定結果

THz 塗膜計 [5, 6] は自動車ボディ等に施された塗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たながら（移動速度 5mm/s）、2次元断層イメージを連続取得した。図 2 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 2(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 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図上部の水平軸に示されている。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 2(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。

#### 4. まとめ

本講演では、THz パルスを用いたリアルタイム 2次元断層画像撮影技術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や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。

#### 参考文献

- 1) D. M. Mittleman et al, "T-ray tomography", Opt. Lett. **22**, pp. 904-906 (1997).
- 2) 安田他, "時空間変換を用いたシングルショット・テラヘルツ・トモグラフィーの基礎研究", Optics Japan 2004 講演予稿集, pp. 374-375.
- 3) Q. Wu et al, "Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams", Appl. Phys. Lett. **69**, pp. 1026-1028 (1996).
- 4) J. Shan et al, "Single-shot measurement of terahertz electromagnetic pulses by use of electro-optic sampling", Opt. Lett. **25**, pp. 426-428 (2000).
- 5) 安井他, "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).
- 6) T. Yasui et al, "A terahertz paintmeter for non-contact monitoring of thickness and drying progress in paint film", Appl. Opt., (in accept).

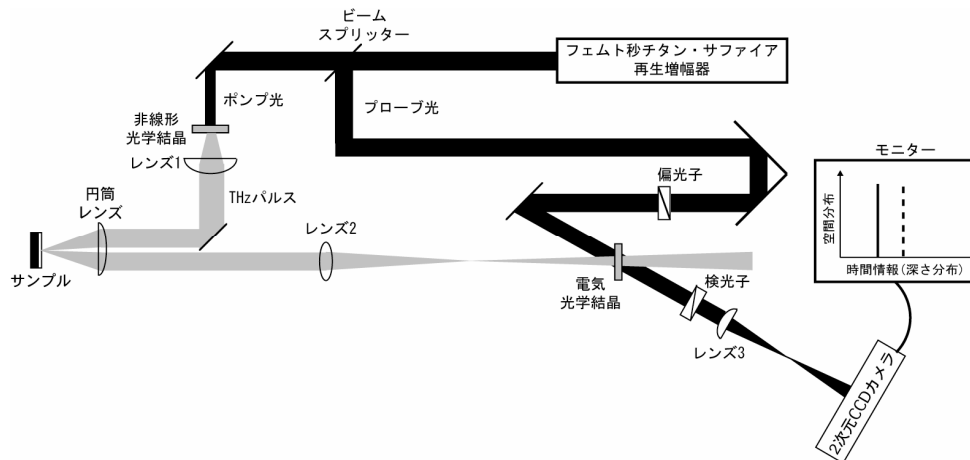


図 1 実験装置

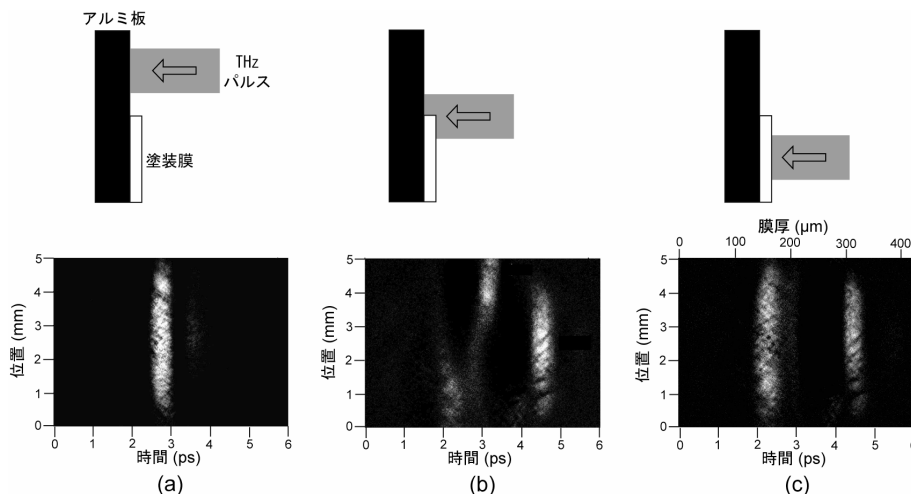


図 2 実験結果