

## テラヘルツ波センシングの社会実装を目指して



企業レポート

深澤 亮一\*

Toward the societal implementation of terahertz-wave sensing

Key Words : terahertz wave, time-domain spectroscopy, 3D imaging, non-destructive evaluation

### 1. はじめに

テラヘルツ領域の電磁波の研究開発は、立ち遅れており未開拓の電磁波と呼ばれてきた。簡便に使える発生源、検出器、計測装置の開発が困難であったことから、応用も限られていた。最近になって、この領域の電磁波の発生・検出技術の研究開発が国内外で急速に進展している<sup>1)</sup>。それに伴い、応用研究も盛んになっている。テラヘルツ波は、その電磁波の持つ透過性と物質固有のスペクトルが得られるという特長を生かして、化学分析や非破壊検査に利用されつつある<sup>2)</sup>。その応用の広がりや、工業材料の評価、医薬品の評価、美術品・文化財の調査、製造ラインにおける品質管理、建築物の診断、危険物の検知、生体分子分光、バイオセンシング、社会インフラの非破壊検査など、多岐の分野にわたると考えられ、今後の発展が期待されている。本稿では、弊社((有)スペクトルデザイン)がこれまでに取り組んできたテラヘルツ波技術開発について紹介したい。弊社は、近年急速に発展しているパルス状のテラヘルツ波(以下、テラヘルツパルス波と呼ぶ)を利用した新しい計測技術の非破壊検査への展開を2004年の会社設立以来実施してきた。

### 2. パルスエコー法による三次元イメージング

テラヘルツ波を用いた計測は、物質に対する透過性を有し、また、物質固有のスペクトルが得られるという特徴がある。これを利用すると、他の計測手段ではできなかった分析や非破壊検査に応用することができる。テラヘルツ波を用いた分光やイメージングの応用分野はきわめて広範囲にわたる。テラヘルツ波の主な性質として、金属以外のさまざまな物質に対して比較的透過しやすいことがわかってきている。身近なものでは、プラスチック、セラミックス、半導体シリコン、衣類、木材、紙、タイルなどを比較的良く透過する。

近年、フェムト秒レーザーの発展や非線形光学の進展によって、テラヘルツ波を発生させる技術が急速に進歩した。半導体にフェムト秒( $10^{-15}$ 秒)の光パルスを照射して、テラヘルツパルス波の発生・検出を行う研究が世界中で精力的に行なわれた結果、ピコ秒( $10^{-12}$ 秒)程度の時間幅を持つテラヘルツパルス波の発生・検出が可能になった<sup>3)</sup>。弊社では、テラヘルツパルス波を用いた非破壊検査装置の開発を推進するとともに、社会実装を目指し、事業を行ってきた。我々が開発を行ってきたパルスエコー法による三次元イメージングは、テラヘルツパルス波を測定物に入射させ、透過または反射した後のパルス波のエコーを時系列の波形として計測し、測定物の内部構造や化学組成に関する情報を得るものである。パルスエコー法は、超音波エコー法と類似しているが、電磁波を利用することから見えるものが異なる。図1(a)にパルスエコー法の測定原理を示す。例えば、3層からなる測定物にパルス波を照射すると、各層の界面から反射したパルスは遅れて戻ってくるので時系列の波形として観測される。時系列の波形には、測定物の誘電率(屈折率)や厚みに関する情



\* Ryoichi FUKASAWA

1961年11月生  
新潟大学大学院自然科学研究科生産科学専攻博士後期課程修了  
現在、有限会社スペクトルデザイン  
代表取締役 学術博士 赤外分光、ラマン分光、テラヘルツ分光、超高速分光、イメージング  
TEL : 0287-98-3066  
FAX : 0287-98-3067  
E-mail : r.fukasawa@spectra-dsn.co.jp

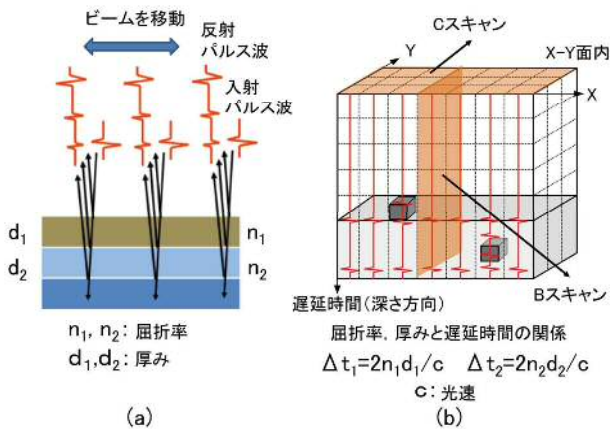


図1 パルスエコー法の原理と測定されるデータキューブ

報が含まれている。パルス波を照射する位置をX-Y面内で移動させると最終的には図1(b)に示すようなパルスエコー波形による三次元データキューブが得られる。データキューブは、X-Y面内方向と深さ方向の構造情報を持っている。このデータキューブを4章で述べるような波形解析法を用いて解析すると、測定物の構造情報を得ることができる。図2(a)及び(b)にメモリースティックの写真(可視画像)とパルス波の照射によって得られた画像を示す。パルス波の照射によって得られた画像では、メモリー

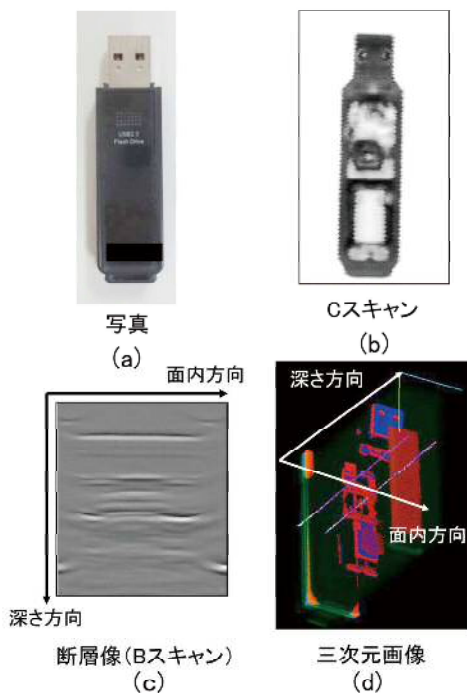


図2 パルスエコー法により計測されたメモリースティックの画像

スティックの内部の様子が見えている。図2(c)にデータキューブから断層構造を再構成した画像を示す。図2(c)のような断層像は、超音波検査の断層像と類似していることからBスキャンと呼ばれる。また、図2(d)にデータキューブから三次元構造を再構成した画像を示す。メモリースティックの内部構造が可視化されていることがわかる。

### 3. テラヘルツセンサーエンジン

2009年頃から我々は、テラヘルツパルス波を用いた産業用途の分光・イメージングシステムを提供してきている<sup>4)</sup>。研究から産業現場の用途に合わせ、多様なシステムを提供しているが、それらの最も基本となるシステムを図3に示す。このシステムは、テラヘルツパルス波発生素子(Tx)、テラヘルツパルス波検出素子(Rx)、主制御ユニット、パーソナルコンピュータから構成される。テラヘルツパルス波発生・検出素子と主制御ユニットは、光ファイバを用いて結合されているので、用途に合わせて自由に切り回すことができる。主制御ユニットは、テラヘルツパルス波を発生させるためのフェムト秒レーザー、光学系、電気系から構成される。フェムト秒レーザーから放射された光パルス光をビームスプリッターなどの光学系により分割し、光ファイバを通してTx及びRxへ伝送する。Rxからの時系列波形の信号は、接続されたケーブルを経て主制御ユニット内にあるアナログデジタル変換器によってデジタルデータに変換され、コンピュータに取り込まれる。

以上のような基本システムを用いてイメージングを行う場合には、図4に示したように、テラヘルツパルス波発生・検出素子をX-Y駆動ステージに搭載し、それを移動させながら計測を行う。その際の計



図3 計測システムの基本構成

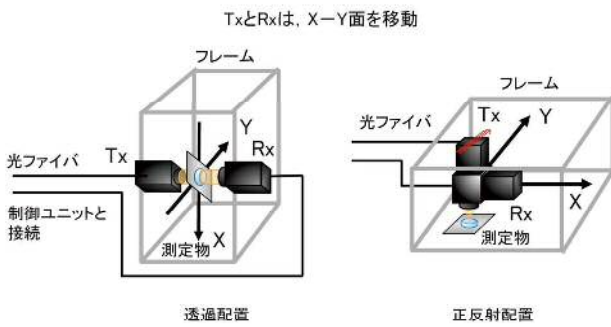


図4 計測システムの基本構成

測データは図1(b)に示したデータキューブとなり、1つの画素は、1つの時系列波形から構成されている。基本システムは、700、320ピコ秒の時間幅の時系列波形を取得できるモデルを用意しており、1つの波形の取得時間は10ミリ秒である。また、160、80ピコ秒の時間幅の時系列波形を取得できるモデルも用意しており、1つの波形の取得時間は1ミリ秒である。市販の装置としては世界で最速クラスである。また、このシステムでは、テラヘルツパルス波の信号と雑音のダイナミックレンジが10秒積算で100dBにも達する。テラヘルツ波に対する測定物の透過性によって、図4に示したような透過配置や同軸光学系を用いた正反射配置を選択することができる。以上、テラヘルツパルス波発生・検出素子を移動させながらイメージングする方式について紹介した。

一方、高速でイメージングを実現する方式として、図5に示したようなテラヘルツパルス波のビームそのものを、ガルバノ鏡を用いて走査する方式がある。ガルバノ鏡によるX軸方向とリニアステージによるY軸方向の走査を併用することでX-Y面内の高速走査を実現できる。センサヘッドの光学系には、画

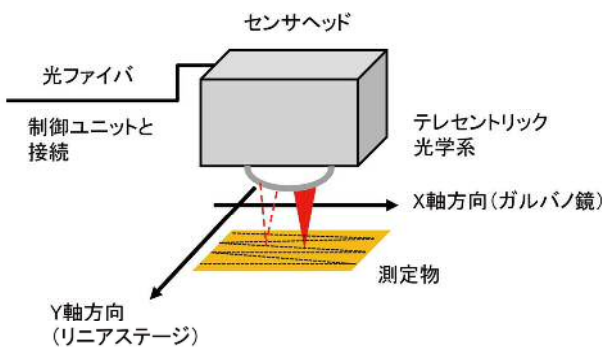


図5 高速イメージングの方式

像の歪みを補正するためにテレセントリック光学系を採用している。ガルバノ鏡のような走査機構を用いると、10000画素のデータ取得時間は10秒となり、大幅な高速化を達成している。初期のイメージング装置<sup>5)</sup>の性能では、データ取得時間は81.3時間であることから、装置技術の飛躍的な進歩を窺うことができる。

#### 4. 産業用検査装置への展開

2章で述べたパルスエコー法を用いて計測されたデータキューブから測定物の構造や化学組成に関する情報を引き出すために、フーリエ変換による周波数解析や、ウェーブレット変換による時間一周波数解析を用いた波形処理<sup>6)</sup>が試みられている。さらにパターン認識やデータマイニングを用いた高度情報処理も導入されつつある。パルスエコー法では、物体内部からのパルス波が時系列波形となって計測される。パルス波の遅延時間、振幅、周波数などを詳細に解析することで物体内部の構造情報を抽出することができる。一般的な波形解析法であるフーリエ変換を用いると、パルス波にどのような周波数の波が含まれているかを知ることができないが、遅延時間、すなわち、物体内部の構造情報を完全に失ってしまう。時間経過とともに周波数に変化していくパルス波に対してフーリエ変換を施しても、ある時間にどのような周波数の波が含まれるかといった情報を得ることはできない。パルス波の波形から構造に関する変化を的確に抽出するためには、時間と周波数を同時に扱える時間一周波数解析が必要となる。時間一周波数解析の手法として連続ウェーブレット変換が有効である。この手法は時間波形の時間情報を保持したまま周波数情報を同時に表現することができる。

#### 5. 社会実装の事例

パルスエコー法は、テラヘルツパルス波を用いた新たな計測手法であり、非破壊検査の観点から極めて有効なツールとなる。ここでは、産業応用の観点から興味ある事例をあげる。弊社の取り組んできた社会実装の事例として、医薬品粉体中の異物検査、建築物のタイル壁の内部診断、医療用製品の出荷前

の品質検査などへの社会実装を展開してきている。その他、米国では、テラヘルツセンサーエンジンを用いた工場でのインライン監視が実現されており、紙の製造工程における水分量や塗工量の監視、建材プラスチックシートの製造工程における厚みの監視、タイヤ生産工程管理における実績がある。今後、パルスエコー法の非破壊検査への応用は拡大するものと期待される。

## 6. 参考文献

- 1) 萩行正憲: テラヘルツ波技術の歩みと展望, 応用物理, vol. 81, no. 4, (2012) 271.
- 2) 深澤亮一: 分析・センシングのためのテラヘルツ波技術, 日刊工業新聞社, 東京, (2013).
- 3) 深澤亮一: テラヘルツパルス波の発生と検出, 電子情報通信学会誌, vol. 89, no. 6, (2006) 467.
- 4) (有)スペクトルデザイン HP, <http://www.spectradsn.com/>
- 5) M. Herrmann, M. Tani, and K. Sakai: Display modes in time-resolved terahertz imaging, Jpn. J. Appl. Phys., vol.39, Part1. No.11, (2000) 6254.
- 6) 深澤亮一, 碓智文, 高橋功将: 高速テラヘルツ波イメージングによる粉体中の異物検査, 検査技術, vol. 20, no. 9, (2015) 27.

