テラヘルツ波コンピュータ断層撮影法

今村 元規, 西名 繁樹

(株)アドバンテスト 新企画商品開発室 (〒989-3124 宮城県仙台市青葉区上愛子字松原48-2 アドバンテスト研究所内)

Terahertz Wave Computed Tomography

Motoki IMAMURA and Shigeki NISHINA

ADVANTEST Corporation, New Concept Product Initiative, 48-2 Matsubara, Kamiyashiki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 989-3124

(Received March 9, 2012)

Characterization of the interaction path of terahertz (THz) waves transmitted through a specific material can be applied to non-destructive imaging and testing. The Advantest TAS7000 3D imaging system employs non-destructive imaging technology using computed tomography (CT). This system performs analysis and imaging in both two and three dimensions; enabling identification of specific individual materials in a target sample. One important and unique feature of this technology is the non-destructive nature of terahertz spectrum analysis, (non-ionic) thus differing from traditional X-ray CT.

Key Words: Terahertz, Computed tomography, 3D imaging, Non-destructive analysis

1. はじめに

赤外線とミリ波帯の間の周波数帯に位置するテラヘルツ(THz)波の特徴は、吸収スペクトル(また、指紋スペクトルと呼ばれる)が得られ、視覚的に不透明な材料を貫通することが挙げられる。川瀬らは、このTHz波の特徴を用いて、2次元(2D)分光イメージングにより封筒に隠された違法薬物の同定を行うことで、THz波による非破壊解析の高い有用性を示した¹⁾。THz計測の空間分解能は、実用的なイメージングに適していることから、材料、バイオテクノロジー、セキュリティなどの分野での発展が期待されている²⁾。

一方、現在の非破壊解析技術で代表的なものは、THz波と同じく電磁波であるX線を用いたものであり、X線を使用したコンピュータ断層撮影法(CT)は、医療診断のための非破壊断層検査法として1972年にHounsfieldらにより開発された。CT法とは測定で得た投影データから逆ラドン変換を行って再構成した断面像を得る解析法である^{3,4)}。創成期のX線CTについては、Beckmannの記事⁵⁾が詳しい。

THz波を用いたCT測定は、Quantum Cascade Laser (QCL)を使用した報告⁶⁾や、Fergusonらによる時間領域分光法(Time Domain Spectroscopy, 以下TDS法と略記)による報告⁷⁾がある。TDS法によるTHz波CT(以下THz CT)は、分光情報から成分濃度の分布解析が可能⁸⁾であり、これは、一般に分光情報を使用しないX線CTに対する、THz CTの特徴の一つである。

THz CTによる非破壊解析が特に有効な対象としては、自動車用セラミック部品が挙げられ、触媒コーティング濃度や内部に堆積するスス濃度を3D分布解析することが可能であり、部品品質向上やエンジン制御の改善ツールとして有用である⁹⁾。

我々は、この新しい非破壊解析技術を実用化した「TAS7000 3Dイメージング解析システム」(Fig. 1)を既に製品化している。本稿では、世界最初のTHz CTの商用機であるTAS7000の技術の概要、特にイメージングのための高速測定技術とレーザー制御技術について述べる。また、TAS7000の測定例について紹介し、THz CTによる非破壊解析への応用について解説する。

Fig. 1 TAS7000 3D Imaging Analysis System.

2. THz波CTの技術

2.1 TAS7000の概要

THz CTは、測定対象物の内部形状・特性を非破壊のまま2次元・3次元画像として可視化・解析し、結果を立体的に表示可能である。構造変化はもちろんのこと、分光情報を使うことでその成分の特定や物質質量まで解析することができる。以下に、TAS7000の主な仕様を示す。

主な仕様[†]：

- 解析項目
2D/3D CT濃度分布解析 及び、THz波の透過分光特性測定
- 解析周波数
高ダイナミック・レンジ・モジュール：0.02 THz～0.6 THz
広帯域モジュール：0.05 THz～3 THz
- CT測定空間分解能
≤3 mm(ワイヤファントムにて、MTF 10%)
- スループット
最高波形取得レート：250 Hz(分光測定モード)
CT断面像取得時間：≤15分(CT像1断面測定)
- 試料サイズ/試料質量
≤Φ310 mm(12.2 inch)×H310 mm(12.2 inch), ≤20 kg

TAS7000の構成を示したブロック図をFig. 2に示す。基本的な分光原理はTDS法^{10,11)}であり、超短光パルスファイバレーザをTHz波発生・検出器であるPhoto Conductive Switch(PCS)にそれぞれ照射して、THz領域の時間波形をサンプリングにて取得する。発生したパルスはTHz帯までのブロードなスペクトル成分を含んでおり、被測定物を透過したTHz波形を高速フーリエ変換(FFT)することで被測定物の透過特性(スペクトル)が得られる。このデータには、振幅だけでなく位相情報も同時に含まれるので、材料の複素屈折率なども求められる。

さらに、被測定物を空間的にスキャンして、CT法に

より再構成した断面像を得ることができる。本装置で使用する超短光パルスファイバレーザ、光サンプリング、CT法の技術について、以降にそれぞれ詳しく述べる。

2.2 THz光サンプリング法による高速分光測定

CT法によるイメージングには、多くの測定データが必要であり、測定の高速度が実用化の課題となる。

従来のTDS法によるTHzパルスの時間波形取得は、トランスレーションステージによる機械的な光遅延量の変化により得られていた。しかし、この方法は1波形を測定するのにおよそ数分間かかるため、これをCT測定に適用すると、物体の3D内部画像を得るのに数日の測定時間を必要とする計算になる。

そこで我々は、高スループットの波形測定を機械的光遅延方式によらず、電気的な制御で行う光サンプリングオシロスコープの原理を用いた。これは、2台のフェムト秒パルスレーザの繰返し周波数に僅かな差 Δf を与えることで、その逆数 $1/\Delta f$ の時間間隔で波形取得が可能な光サンプリング法^{12,13)}をTHzパルスの波形測定に応用¹⁴⁾するTHz光サンプリング法である。従来のTHz光サンプリング法では、2台のパルスレーザ間のタイミングのズレにより測定ジッタが発生していたが、我々は、新たにその要因を改善するジッタ低減回路を搭載することで、高スループットでかつ広帯域測定を実現した。Fig. 3に本機のサンプリングの原理¹⁵⁾とTable 1にその特徴をそれぞれ示す。

Table 1 Features of THz optical sampling method.

	Conventional technology	TAS7000
Method	Terahertz TDS (Time-Domain Spectroscopy)	Terahertz optical sampling
Time sweep	Mechanical optical delay	Electrical control sweep
Light source	Branches by one light source	Two light sources
Throughput	1 minute/sweep 68 hour/image	Min. 4 ms/sweep 15 minute/image
Influence by jitta of light source	Not Affect	Affect → We overcame with the method of low jitta light source

Fig. 2 Schematic diagram of TAS7000 3D imaging analysis system.

[†] URL: <http://www.advantest.co.jp/products/3DIAS/index.shtml>

Fig. 3 Methods of THz spectroscopy: (a) THz TDS (b) THz optical sampling.

本方式により、1秒間に最大250回のTHz波パルス波形が取得可能となり、CT法による断面像取得時間は15分以内、サンプル全体での3D像の取得も5時間以内に短縮され、THz CT装置の実用化が可能になった。

2.3 高出力超短パルスファイバレーザ技術

THz波の時間波形を測定するには、測定対象のTHz波のパルス幅が約300 fsと非常に短く、パルス幅以下の時間の不確かさでの測定が求められる。光サンプリングにおいては、その不確かさの要因となる2つのファイバレーザ間の位相関係の変動(ジッタ)を極めて低く抑えた低位相ノイズのパルス発振を行うレーザの制御が必要であり、それには共振器長を制御して、発振周波数を外部信号にPLLで同期させることが有効である¹⁶⁾。

そこで、本装置に用いられている低位相ノイズの超短パルスファイバレーザ技術について説明する(Fig. 4)。

光源として用いられているのは、半導体可飽和吸収ミラー(SESAM: Semiconductor Saturable Absorber Mirror)を用いて受動モード同期を行い¹⁷⁾リング型共振器構造を持つファイバレーザ¹⁸⁾であり、1.55 μm にてパルス幅80 fs以下、平均パワー200 mW、繰返し周波数50 MHzのセルフスタートな発振が得られている。ファイバレーザからの出力は、分岐カプラによって一部を取り出し、共振器長を変化させる制御で繰返し周波数の安定化を行った。

Fig. 5に本ファイバレーザの位相雑音スペクトルを示す。共振器長のPLL制御により、低域の位相雑音が抑制されていることがわかる。この位相雑音スペクトルを積分することで算出されるRMSジッタは、(a)のフリー

Fig. 4 Passive mode-lock fiber laser.

Fig. 5 Phase noise spectrum.

ランニング471 fsに対して(b)のPLL制御時は55 fsであり、位相ノイズ(ジッタ)が十分小さく抑えられている。

THz光サンプリング方式においては、本手法を用い、THzパルス発生側の光源の発振位相を規準として、検出側光源の位相関係を一定の周波数差となるように制御を行い、ジッタの影響を排除している。

次に、THz光サンプリング法を用いて測定したTHzパルスの時間波形測定例とそのFFTによるパワースペクトルをFig. 6にそれぞれ示す。この結果から、4 THz超にわ

Fig. 6 (a) THz waveform of sampled signal (b) FFT power spectrum.

たり広帯域なTHz波スペクトルが観測できていることがわかる。

2.4 CT法の原理

CT法は物体の内部特性を知るためのイメージング法として優れた方式である。内部が未知の物体に対し、様々な方向からTHz波を照射して、透過するTHz波をFig. 7のように投影データとして測定する。その値に対し、以下に示す逆投影演算処理を行うことで、物体の断面画像が求められる^{3-4,19)}。

THz波が伝搬する際には、媒質の吸収により減衰が生じる。その伝搬の単位長当たりの減衰率[dB]が空間分布 $f(x, y)$ を持つ物体に電磁波を透過させる。すると、その電磁波の減衰量の投影データは、以下の様に表される。

$$\begin{aligned} p(r, \theta) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) ds \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(r \cos \theta - s \sin \theta, r \sin \theta + s \cos \theta) ds \end{aligned} \quad (1)$$

これをラドン変換という。

ここで、 $f(x, y)$ の2次元フーリエ変換 $F(X, Y)$ は、

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-i(xX+yY)} dx dy \quad (2)$$

で表わされ、 $X = R \cos \theta$, $Y = R \sin \theta$ のように極座標表示し、 $r = x \cos \theta + y \sin \theta$, $dx dy = dr ds$ から、

$$\begin{aligned} F(R \cos \theta, R \sin \theta) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-iRr} dr ds \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) ds \right] e^{-iRr} dr = \int_{-\infty}^{+\infty} p(r, \theta) e^{-iRr} dr \end{aligned} \quad (3)$$

と表すことができる。すなわち、 $p(r, \theta)$ を得ることにより、 $f(x, y)$ のフーリエ変換 $F(X, Y)$ は、完全に定まり、減衰係数の分布 $f(x, y)$ は、 $F(X, Y)$ の2次元フーリエ変換である以下の式

Fig. 7 Projection data $p(r, \theta)$.

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(X, Y) e^{-2\pi i(xX+yY)} dX dY \quad (4)$$

により求められる。

全ての r, θ についての $f(x, y)$ のラドン変換値である投影データは、サイノグラムと呼ばれ、サイノグラムに逆投影演算を施すことで元の減衰係数の分布 $f(x, y)$ である断面像の再構成が可能である。

実際の測定データの取得においては、 x, y 軸に対して垂直な軸を z として、ある z 位置で被測定物を r, θ 方向に空間的に走査することで一つの $f(x, y)$ 断面が測定される。また、さらに別の z 位置においても空間走査を行い、それらの断面を重ねることで3D断面像が得られる。

3. THz CT(TAS7000)の測定例

3.1 疑似試薬サンプル

測定サンプルには、試薬として糖のラクトースとアミノ酸のチロシンとをそれぞれポリエチレン粉末で重量比5%に希釈したものを使用した。それらを $\phi 32$ ポリエチレン円筒の $\phi 8, \phi 10$ の穴を開けた部分に、それぞれ詰め込んだ(Fig. 8 (a))。

Fig. 8 (b)に、使用した試薬ラクトースとチロシンのサンプル単体の分光透過スペクトルを示す。ラクトースは0.53 THz、チロシンは0.96 THzに急峻な吸収スペクトルを持っていることが分かる。これらは、指紋スペクトルと呼ばれる物質固有のスペクトル¹⁾とみられ、成分の同定に利用することができる。

THz CTは、サイノグラムを求める周波数帯域を変えて、断面像の各画素にスペクトル由来の情報を持たせることができるので、以下の様に、被測定物の成分を分離した解析が可能である。

Fig. 9 (a)と(b)はそれぞれ、チロシン吸収周波数0.96 THzで取得したサイノグラムとその再構成断面像であり、Fig. 9 (c)と(d)はそれぞれ、ラクトースの吸収周波数0.53 THzで取得したサイノグラムと再構成断面像である。ラクトースとチロシンが区別して検出されている。

さらにFig. 10に各2D断面を積み重ねて構成した3D立体画像を示す。(a)は、特定の吸収周波数を使用せず全帯域の積分画像であり、その構造を観察することができる。

Fig. 8 Analysis of powders: (a) Photograph of test sample (b) Transmission spectra of tyrosine and lactose.⁸⁾

ている。(b)は、各々の吸収周波数の像を重ねたものであり、成分が分離して表示されている。

3.2 DPF内に堆積するPM分布の解析

次に、実用的な解析例として、ディーゼル・エンジン用セラミックフィルタの非破壊イメージング解析について紹介する。

ディーゼル・エンジンの排気ガスには、健康に対して有害な粒子状物質(Particulate Matter, 以下PMと略記)が含まれており、近年PMに対する規制強化が進んでいる²¹⁾。排気ガスの浄化に用いられる主要部品は、Diesel engine Particulate Filter(DPF)と呼ばれ、両端が交互に塞がれた多孔質ハニカムセラミックス構造となっている(Fig. 11 (a))。DPFに排ガスを通すことで、側壁がフィルタとして作用し、排気ガス中の99%以上のPMを捕集でき²²⁾排出ガスは浄化される。但し、走行距離に応じて

Fig. 9 Sinogram and reconstructed cross sections of test sample: (a) Sinogram for 0.96 THz (tyrosine), (b) Reconstructed cross section calculated from (a), (c) Sinogram for 0.53 THz (lactose) and (d) Reconstructed cross section calculated from (c).⁸⁾

Fig. 10 Reconstructed 3D spectroscopic images of test sample: (a) 3D image for integrated transmission data over the whole spectral range (b) Superimposed 3D images of each powder constituent.⁸⁾

DPF内にPMが堆積されていき、燃費悪化を招くので、間欠的にエンジンによる強制再生制御を行うことでPMを燃焼除去する仕組みとなっている。

信頼性の高い強制再生を行うには、DPFに堆積するPMの分布状態を把握することが必要であるが、従来はDPFの切断による重量測定が主な解析手法であった。THz CTによる解析では、DPF内に堆積するPMの3D濃度分布を非破壊かつ容易に可視化・解析が可能⁹⁾であるため、不良の要因を効率良く検証することができる。

DPFの解析例として、トラックに搭載され約7万キロを走行し、強制再生が繰り返されたと推定されるDPF (Fig. 11 (b))の解析結果を示す。

3Dの解析結果Fig. 12では、DPFの上部から下部方向に排気ガスが流れてDPF内部に捕集されたPM成分の分布が可視化されている。この解析結果から、いくつかの特徴的な情報が読み取れる。①DPF下部に強制再生で燃焼せずに残ったアッシュ(灰成分)層がある。アッシュは、通常走行距離に応じて徐々に溜まり、出力低下や燃費悪化を招く。②強制再生時に受けたDPFの熱的変性によるものと考えられるPM濃度ムラが上下方向に伸びている。X線による非破壊検査では、軽元素である炭素の吸収率が非常に低いため炭素を主成分とするPMではほとんどコントラストが得られない²³⁾が、THz波による解析

Fig. 11 Analysis sample: (a) Structure of DPF (b) Photo of DPF (70,000 km Run, $\phi 190 \times H203$).

Fig. 12 3D image of sample DPF.²⁰⁾

Fig. 13 2D visualization of PM analysis²⁰⁾

では、明瞭な分布形状で、濃度分布が解析されている。
③特異的にPM濃度が低い部分が存在している。これは、Fig. 13の2DイメージからDPF基材の一部が熱によって溶けた溶損部と推定され、DPF内部の構造的不良を確認することができている。

4. むすび

THz CTは、従来のX線CT装置には無かったスペクトル情報を基に3Dで可視化する新しい技術に基づいている。本稿では、糖とアミノ酸の吸収スペクトル情報をCT測定することで、それらを識別した分布測定が行えることを例にその有効性の一端を示した。また、既に活用されている実用的な解析例として、ディーゼル・エンジン用セラミックフィルタ内のPM分布解析を示した。

THz波によるイメージングは、医薬品の結晶形などの製剤分析²⁴⁾やバイオ関連²⁵⁾などへの応用も期待され、我々は、これらのアプリケーションに対しても、THz Time of Flight方式によるイメージングの要素技術を開発し、既にTAS7500 THz分光イメージング・システムとして製品化を果たしている[†]。今後、THz技術の発展と共に、THz波イメージングが様々な分野で活躍することを願っている。

謝 辞

本装置のTHz CT技術については、名古屋大学川瀬晃道教授より御指導頂きました。この場を借りて深く感

謝申し上げます。

参考文献

- 1) K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue: Opt. Express **11** (2003) 2549.
- 2) A. Dobroiu, C. Otani, and K. Kawase: Meas. Sci. Technol. **17** (2006) 161.
- 3) J. Radon: Berichte Saechsische Akademie der Wissenschaften **69** (1917) 262.
- 4) A. C. Kak and M. Slaney: *Principles of computerized tomographic imaging* (IEEE Press, New York, 1988).
- 5) E. C. Beckmann: British J. Radiology **79** (2006) 5.
- 6) K. L. Nguyen, M. L. Johns, and L. F. Gladden: Opt. Express **14** (2006) 2123.
- 7) B. S. Ferguson, S. Wang, D. Gray, D. Abbot, and Xi. Zhang: Opt. Lett. **27** (2002) 1312.
- 8) M. Imamura, S. Nishina, A. Irisawa, T. Yamashita, and E. Kato: Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2010 35th Int. Conf., p.1-3.
- 9) S. Nishina, K. Takeuchi, M. Shinohara, M. Imamura, M. Shibata, Y. Hashimoto, and F. Watanabe: SAE Paper 2011-01-2064 (JSAE 201119333), 2011 PF&L Conf. (Kyoto).
- 10) D. H. Auston, K. P. Cheung, J. A. Valdmanis, and D. A. Kleinman: Phys. Rev. Lett. **53** (1984) 1555.
- 11) Ch. Fattinger and D. Grischkowsky: Appl. Phys. Lett. **53** (1988) 1480.
- 12) P. A. Elzinga, R. J. Kneisler, F. E. Lytle, Y. Jiang, G. B. King, and N. M. Laurendeau: Appl. Opt. **26** (1987) 4303.
- 13) H. Takara, S. Kawanishi, A. Yokoo, S. Tomaru, T. Kitoh, and M. Saruwatari: Electron. Lett. **32** (1996) 2256.
- 14) C. Janke, M. Forst, M. Nagel, H. Kurz, and A. Bartels: Opt. Lett. **30** (2005) 1405.
- 15) 山下 友勇, 入澤 昭好: 日本特許第4782889号 (2011).
- 16) J. B. Schlager, R. P. Mirin, and N. A. Sanford: IEEE Photon. Technol. Lett. **14** (2002) 1351.
- 17) E. A. De Souza, C. E. Soccolich, W. Pleibel, R. H. Stolen, J. R. Simpson, and D. J. DiGiovanni: Electron. Lett. **29** (1993) 447.
- 18) S. Masuda, S. Niki, and M. Nakazawa: Opt. Express **17** (2009) 6613.
- 19) 橋本 雄幸, 篠原 広行: C言語による画像再構成の基礎, 医療科学社 (2006).
- 20) 橋本 昌一, 加藤 英志, 高柳 史一, 西名 繁樹, 入澤 昭好, 今村 元規: MWE2011 (Microwave workshop & Exhibition), yokohama, 2011, workshop11.
- 21) 自動車NOx・PM法(自動車から排出される窒素酸化物び粒子状物質の特定地域総における総量の削減等に関する特別措置法), 2002.
- 22) J. Andersson: AECC (Aberdeen Exhibition & Conference Centre) Technical Seminar, Brussels, 2007.
- 23) A. Strzelec, H. Bilheux, C. Finney, C. Daw, D. Foster, C. Rutland, B. Schillinger, and M. Schulz: SAE Paper 2009-01-2735.
- 24) S. Byrn, R. Pfeiffer, M. Ganey, C. Hoiberg, and G. Poochikian: Pharm. Res. **12** (1995) 945.
- 25) S. Mickan, A. Menikh, H. Liu, C. Mannella, R. MacColl, D. Abbott, J. Munch, and Xi. Zhang: Phys. Med. Biol. **47** (2002) 3789.