

平成 22 年 5 月 19 日現在

研究種目： 基盤研究(A)  
研究期間： 2006 ～ 2009  
課題番号： 18206009  
研究課題名(和文) テラヘルツ波トモグラフィーの高度化に関する研究  
研究課題名(英文) Research on terahertz tomography

## 研究代表者

川瀬 晃道 (KAWASE KODO)  
名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授  
研究者番号：00296013

研究成果の概要(和文)：パルス圧縮を施した小型で堅牢なファイバレーザを励起光源として用い、超短パルスを生成することで、実用的かつ高分解能なテラヘルツトモグラフィシステムの開発を進めた。超短テラヘルツパルスを用い、世界最高の奥行き分解能  $5\mu\text{m}$  を有する飛行時間型の反射テラヘルツトモグラフィシステムの開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：High-resolution tomographic imaging is demonstrated using a reflection-type terahertz time-domain spectroscopy. To realize a practical system for general use, a robust all-fiber laser was used as the pump light source. The wideband spectrum of the generated terahertz waves provided high-axial resolution leading to successful imaging of a multilayered structure containing a 5- $\mu\text{m}$ -thin layer.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2007 年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2008 年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2009 年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
年度			
総計	37,000,000	11,100,000	48,100,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：テラヘルツ、トモグラフィー、非線形光学

## 1. 研究開始当初の背景

近年の超短パルスレーザ技術の発達により、ピコ秒 (ps)、フェムト秒 (fs) オーダーのパルス幅を持つ超短パルスが比較的容易に得られるようになった。また、光伝導素子や非線形結晶といった超高速デバイス技術の発達により、テラヘルツ (THz) 帯においても超短パルスの発生及び検出が可能になっている。

超短パルスは、その短パルス特性により、距離計測に用いることで空間的に極めて優れた分解能を実現することが可能である。加えて、THz 領域 (0.1~10 THz) の電磁波は、光波が持ち得なかった様々な興味深い特徴を有している。例えば、多くの物質に対して良好な透過特性を持ち、測定対象物の奥深くまでパルスが侵入できるため、THz パルスは奥行き断層画像を取得するトモグラフィに

適している。また、低エネルギーであるため、生体組織の非侵襲測定が可能である。さらに、水分に敏感であり、組織構造だけでなく水分含有量といった付加的な情報を同時に観測することができるため、人体皮膚角質層の観測などに有効であると考えられる。

## 2. 研究の目的

このような THz パルスを用いた THz トモグラフィは、今日までにいくつか報告されている。しかしながら、その分解能は数 10  $\mu\text{m}$  程度であり工業製品の多層膜や生体組織を観測するためにはまだまだ不十分である。また、THz パルスの発生・検出に Ti:Sapphire レーザを用いているため、大型・不安定で実用的なシステムとは言えないものであった。そこで本研究では、実用性に優れた超高分解能 THz トモグラフィの開発を目的として研究を行う。

## 3. 研究の方法

この目的を実現するために、本研究では励起光源として超短パルスファイバレーザを用いる。一般的に、THz パルスの発生・検出には Ti:Sapphire レーザが広く用いられている。しかしながら、Ti:Sapphire レーザのような固体レーザの使用は、装置の大型化や不安定化につながるために実用的なシステムという観点から問題である。これに対して、ファイバレーザは、ほぼ光ファイバのみから構成されるため、小型化が可能であり安定した出力を取り出すことができる。このため、ファイバレーザを THz パルス発生・検出に用いることで、非常に実用的な THz トモグラフィシステムの実現が期待できる。

ファイバレーザを用いる上で問題となるのが、固体レーザと比較して広いパルス幅と弱い光強度である。一般的に、光ファイバの有する非線形性と分散特性のために超短パルスファイバレーザの高強度化、短パルス化は困難であるとされている。しかし、パルス幅と光強度は、それぞれ分解能と計測感度に寄与する重要なパラメータであるため、これらの問題点は解決されなければならない。本研究では、様々な特性の光ファイバを組み合わせることで非線形効果・分散効果を厳密に制御し、10~20 fs 程度の極めて短いパルス幅を有する高強度超短パルスを生成する。さらに、生成パルスを励起光源として THz パルスの発生・検出を行うことで、イメージングの高分解能化、高感度化を目指した。

## 4. 研究成果

ファイバレーザは一般的にチタンサファイアレーザよりも超短パルスを発生さ

せるのが難しいとされてきたが、ファイバの非線形光学効果や分散効果を最適化することで、20 fsec 以下のパルス幅を出力可能なレーザが報告されてきている。我々は、このようなパルス圧縮の手法を用い、波長 1.56  $\mu\text{m}$ 、パルス幅 17 fsec の超短パルスを発生可能な全光ファイバシステムを構築し、これを励起光源とすることでおよそ 0.1~27 THz の周波数帯域を有する THz パルスを発生させることに成功した。

我々は 17 fsec 全光ファイバシステムを励起光源とした反射型 THz-TDS を用いて、高い奥行き分解能を有する Time-of-flight 方式 THz トモグラフィシステムの構築を行った。THz パルス発生部には短パルス化・広帯域化を実現するため有機非線形光学結晶である 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate (DAST) 結晶を用いた。また、得られた時間波形に対して逆畳み込み積分(デコンボリューション)等の信号処理を施すことで精度向上を図った。さらに、本システムにおける奥行き分解能の評価、及び実際の多層膜構造を用いて断層イメージングのデモンストレーションを行った。まず、実際に構築したシステムにおける奥行き分解能を評価した。評価にはテフロン薄膜を用いた。5, 12, 20, 25, 30  $\mu\text{m}$  のテフロン膜を用いて厚み測定を行った結果を図 1 に示す。

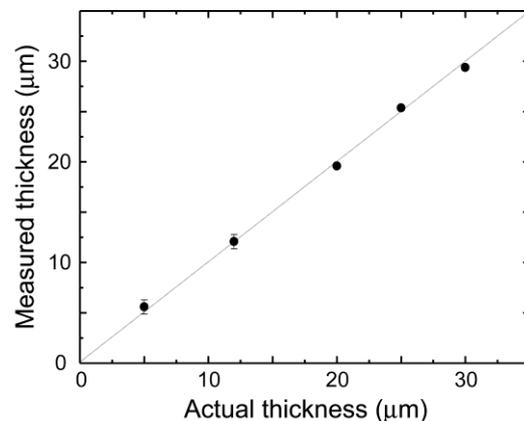


図 1 テフロンの膜厚計測

縦軸はマイクロメータで測定した厚み、横軸は今回の手法により測定・算出した厚みである。図 1 から、5  $\mu\text{m}$  の厚みまで比較的精度良く測定できていることがわかる。今回用いたテフロン膜の屈折率は 1.9 であるため、構築した装置の奥行き分解能は、サンプルの屈折率を  $n$  とするとおよそ  $10/n \mu\text{m}$  以下であるということがいえる。これは、我々の知る限りでは Time-of-flight 型 THz トモグラフィとしては世界最高の奥行き分解能である。

続いて、実際にいくつかのサンプルに対して THz 断層イメージングを行った。図 2 は 90

um 厚の紙を三枚重ねたものに対して行った三次元 THz 断層イメージング結果である。測定範囲は 100×100 ピクセル, 1 ピクセルは 0.1 mm 四方とした。三枚それぞれの紙の表面, 裏面からの反射パルスが判別できるだけでなく, 紙と紙の隙間も明瞭に見て取ることができた。

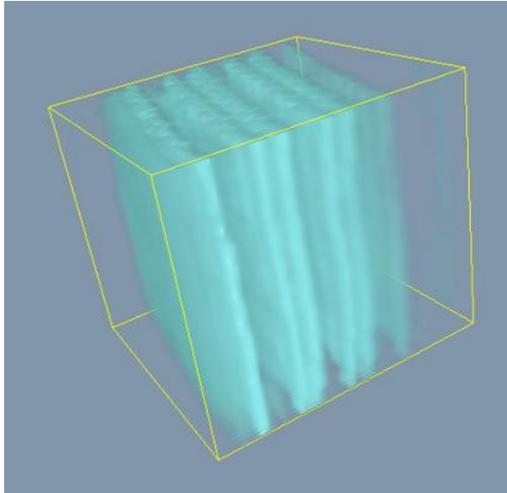


図2 3枚の紙の断層像

図3は果物のリンゴの表皮構造に対して断層イメージングを行った結果である。2つの反射パルスがエコーとして返ってきており, 表皮の表面と裏面の識別ができています。10×10 ピクセル, 1 ピクセル 0.5 mm 四方としてイメージングを行った結果である。表皮の膜構造が確認でき, ある程度曲率が有るサンプルでもイメージングが可能であることを確認した。

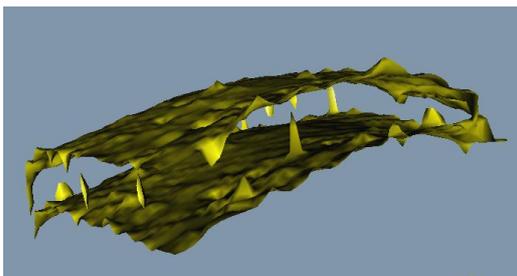


図3 リンゴの皮の断層像

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 45 件)

- ① K. Kawase, K. Suizu and T. Shibuya, "Time-of-flight terahertz tomography," American Laboratory (Aug. 2010), in print. 査読有
- ② K. Kawase, K. Suizu, S. Hayashi, and T.

Shibuya, "Nonlinear optical terahertz wave sources," Optics and Spectroscopy, Vol. 108, No. 6, pp. 841-845 (2010). 査読有

- ③ J. Takayanagi, H. Jinno, S. Ichino, K. Suizu, M. Yamashita, T. Ouchi, S. Kasai, H. Ohtake, H. Uchida, N. Nishizawa, and K. Kawase, "High-resolution time-of-flight terahertz tomography using a femtosecond fiber laser," Optics Express, vol. 17, no. 9, pp. 7533-7539 (2009). 査読有
- ④ S. Yoshida, E. Kato, Y. Nakagomi, K. Suizu, Y. Ogawa, K. Kawase, "Terahertz Sensing of Thin Polyethylene Terephthalate Film Thickness Using a Metallic Mesh" Applied Physics Express, vol. 2, no. 1, 012301 (2009). 査読有
- ⑤ T. Shibuya, T. Tsutsui, K. Suizu, T. Akiba, and K. Kawase, "Efficient Cherenkov-type phase-matched widely tunable THz-wave generation via an optimized pump beam shape," Applied Physics Express, vol. 2, no. 3, 032302 (2009). 査読有
- ⑥ 川瀬晃道, "テラヘルツイメージング技術," 画像ラボ, vol. 61, no. 1, pp. 12-16 (2009). 査読無
- ⑦ K. Kawase, K. Suizu, T. Shibuya, and S. Hayashi, "Terahertz wave generation and applications," Proceedings of 43rd Meeting on Lightwave Sensing Technology (2009). 査読無
- ⑧ 川瀬晃道, 澁谷孝幸, 林伸一郎, 水津光司, "テラヘルツ波の発生と応用可能性", Material Technology, vol. 27, no. 4, pp. 131-136 (2009). 査読有
- ⑨ 川瀬晃道, 林伸一郎, 澁谷孝幸, 水津光司, "テラヘルツ光の発生と応用可能性," 伝熱学会誌, vol.47, no. 200, pp. 19-23 (2008). 査読有
- ⑩ K. Suizu and K. Kawase, "Monochromatic tunable terahertz-wave sources based on nonlinear frequency conversion using lithium niobate crystal (Invited Review)," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 14, no. 2, pp. 295-306 (2008). 査読有

[学会発表] (計 57 件)

- ① K. Kawase, S. Hayashi, K. Suizu, and T. Shibuya "Real life applications of terahertz imaging (invited)," 2009 Eastern Analytical Symposium and Exposition, Garden State Exhibit Center, Somerset, USA (Nov. 16-19, 2009).
- ② K. Kawase, K. Suizu, T. Shibuya, and S. Hayashi, "Nonlinear optical THz-wave generations and imaging/sensing applications (invited)," IRMMW-THz 2009

Post-Conference Distinguished Lectures on THz Science and Technology, Seoul National University, Korea (Sep. 26-27, 2009).

- ③ K. Kawase, T. Shibuya, S. Hayashi, K. Suizu, "Terahertz light sources and imaging applications (invited)," 14th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (LAPD 14), Castelbrando, Italy (Sept. 21-24, 2009).
- ④ K. Kawase, T. Shibuya, S. Hayashi, K. Suizu, "Terahertz generation and sensing/imaging applications (invited)," The 8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Shanghai, China (Aug. 30-Sep. 3, 2009).
- ⑤ K. Kawase, S. Hayashi, T. Shibuya, K. Suizu, "THz wave generations and imaging applications (invited)," the topical conference on terahertz technologies "Terahertz Diagnostics and Treatment" (TDT-2009), Nizhny Novgorod, Russia (July 19-25, 2009).
- ⑥ K. Kawase, K. Suizu, S. Hayashi, T. Shibuya, "THz-wave generations and applications (invited)," International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009 (ISPD 2009), Beijing, China (June 17-19, 2009).
- ⑦ K. Kawase, K. Suizu, T. Shibuya, S. Hayashi, "THz-wave generations and imaging applications (invited)," The 1st International Joint Workshop for Advanced Materials, Devices and Convergence Technologies, Pusan, Korea (May 7-8, 2009).
- ⑧ K. Kawase, T. Shibuya, K. Suizu, S. Hayashi, "THz wave generation and imaging applications (invited)," The International Conference on Laser Applications in Life Sciences 2008 (LALS2008), Taipei International Conference Center, Taiwan (Dec. 4- 6, 2008).
- ⑨ K. Kawase, "THz wave generation and imaging applications (invited)," THz Sensing and Imaging Workshop, Northeastern University, Boston, USA (Oct. 29-30, 2008).
- ⑩ K. Kawase, S. Hayashi, and Y. Ogawa, "THz wave generation and imaging applications (plenary lecture)," 20th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy, Prague, Czech Republic (Sept. 2-6, 2008).

[図書] (計 5 件)

- ① 川瀬晃道, "テラヘルツ光の応用," *光科学研究の最前線 2*, 強光子場科学研究懇談会編, p. 53 (国際文献印刷社, 東京, 2010).
- ② S. Hayashi and K. Kawase, "Terahertz-wave

parametric sources," *Recent Optical and Photonic Technologies*, edited by Ki Young Kim, ISBN 978-953-7619-71-8, pp. 109 - 124, (INTECH, 2010).

- ③ K. Suizu, T. Shibuya, K. Kawase, "Cherenkov phase matched monochromatic tunable terahertz wave generation," *Recent Optical and Photonic Technologies*, edited by Ki Young Kim, ISBN 978-953-7619-71-8, pp. 125 - 142, (INTECH, 2010).
- ④ K. Kawase, A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. Sasaki, C. Otani, "THz rays to detect drugs of abuse," *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects*, Edited by R.E. Miles, X.-C. Zhang, H. Eisele, A. Krotkus, NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics, pp. 241-250 (Springer, 2007).
- ⑤ 川瀬晃道, *テラヘルツ技術総覧*, テラヘルツテクノロジーフォーラム編, pp. 144-150, 639-641 (NGT 社, 東京, 2007).

[その他]

ホームページ等

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/optlab/kawase/jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川瀬 晃道 (KAWASE KODO)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授  
研究者番号：00296013

### (2) 研究分担者

水津 光司 (SUIZU KOJI)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：20342800