

平成 22 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360041
 研究課題名（和文）
 テラヘルツヘテロダイン干渉計を用いた透過型・反射型イメージングシステムの開発
 研究課題名（英文）
 Development of imaging system using heterodyne interferometer with terahertz waves
 研究代表者
 佐々木 芳彰 (Sasaki Yoshiaki)
 独立行政法人理化学研究所・テラヘルツイメージング研究チーム・基幹研究所研究員
 研究者番号：90419002

研究成果の概要（和文）：

本課題では、テラヘルツ波を用いた新たなイメージング法として、ヘテロダイン検出法の優れた特長を利用して、CTの技術とを組み合わせた透過型および反射型のTHzヘテロダインCT法の開発と実験的評価を進め、基盤技術の確立を目指してきた。さらに、イメージング像から奥行き情報の定量的評価を行なうため、疑似3次元イメージング法であるトモシンセシス法を導入するための予備実験を行ない、奥行き情報の抽出に有効であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

THz imaging techniques to image the internal structure and map the functional state of various targets are promising and desirable diagnostic tools because of their non-invasiveness under adequate incident power of a few mW. The advantages of THz imaging are that THz-wave radiation is non-ionizing and safe, the observed image has submillimeter-scale resolution, and many materials are relatively transparent to THz waves, including paper, plastics, and cardboard. In this research, we propose an imaging system with a heterodyne detection receiver for high sensitivity imaging. For a practical use, we developed a THz CT imaging system using heterodyne detection method. Furthermore, We demonstrated a depth-resolved 3D imaging based on absorption contrast using the tomosynthesis technique, which is similar to computed tomography except that the number of projections is much smaller. We applied the back-projection method suitable for the constructed detection configuration to an image reconstruction. Using the system, we imaged a paper phantom, and reproduced characters written by pencil.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・応用物理学一般

キーワード：テラヘルツ, イメージング, ヘテロダイン, CT(Computed Tomography)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ (THz) 波は、電波と赤外線の間位置する電磁波であり、両者の性質を兼ね備えている。すなわち、電波のように、紙、プラスチック、ビニール、セラミック、木材、骨、歯、脂肪、粉体、乾燥食品など様々な物質を透過するとともに、光波のようにレンズやミラーで空間を取り回すことが容易である。加えて、波長が数百 μm 程度と電波に比べて短く、多くのイメージング用途にとって必要十分な空間分解能が得られる。このため、近年、THz 波を用いたイメージング技術が非常に注目され、世界各国で精力的に研究・開発が行われている。一方、これまでの THz イメージングは、直接検波、位相情報、反射成分検出、特徴的な吸収スペクトル (指紋スペクトル) を用いる手法など様々な報告例があるものの、その多くは比較的厚みが薄い試料を対象とし、透過強度分布を観測するイメージング法である。このため、厚みのある対象物では、単に透過強度分布を見る手法では信号対雑音比 (SNR) が悪く、微弱な透過信号を検出できないといった問題点がある。

そこで本研究では、次世代の THz イメージング法として、ヘテロダイン検出法と CT (Computed Tomography) 技術を組み合わせた「THz ヘテロダイン CT 法」を開発し、高感度・高精度の透過型および反射型 THz イメージング技術の確立を目指す。ヘテロダイン検出法は、検出すべき信号光に所定の周波数だけずれた参照光 (局発光) を重ね合わせて、その差周波数に対応する中間周波数信号 (ビート信号) を選択的に検出する方式であり、広いダイナミックレンジ、ショットノイズ限界に達する検出感度、鋭い空間指向性、高い空間分解能や深達度など、極めて優れた特長を有する。レーザ光と比較して適度な物質透過性と空間分解能を有する THz 波にこれらの技術を導入することで、高感度・高分解能イメージング装置が実現すると期待される。本手法を適用することで、測定対象物 2 次元画像、2 次元断層画像、3 次元断層画像の取得が可能である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、このような優れた特徴を有するヘテロダイン検出法を用い、テラヘルツ領域における反射型および透過型イメージング装置の開発を行うことにある。特に小型で振動や環境変化の影響が少なく移動可能な実用的なシステムの実現を目指し、ミリ波通倍発振光源と常温検出器を用いたシステムを実際に構築して、その特性を実験的に評価するとともに、プラスチックやゴム製品内部の異物検査に適用して、テラヘルツ波によるイメージングの応用可能性について検証する。

しかし、これらのイメージングでは、測

定対象表面からの反射、内部での回折や屈折から生じるアーチファクト、測定対象内部の障害陰影により、画像の画質低下が生じ定量的評価を困難にしていることが基礎実験で明らかになった。そのため、画像からの定量的評価の実現を目的として、新たにトモシンセシス法による CT イメージング法を導入する。

3. 研究の方法

本課題を達成するにあたり、下記の5つの項目に分類して研究開発を進めてきた。

(1) 反射型イメージング装置の試作、基礎実験、性能評価

マイケルソン干渉計を基礎としたテラヘルツ反射型イメージングシステム装置の実現を目指すため、実際に光学系の試作を行ない干渉の強度信号を検出し光学系の性能評価を行なった。具体的には、テラヘルツ光源 (600-665 GHz 周波数可変光源) からの光を、レンズで平行ビームにした後、ビームスプリッタにより信号光と参照光に分ける。参照光の経路にはステージ上に反射ミラーがあり、ステージによって光路長を変えることができる。信号光はレンズによって集光されて試料に入射する。試料は3軸ステージに保持されており、スキャンを行なうことができる。試料から反射したテラヘルツ光は、再びビームスプリッタに到達し、参照光と混合され、レンズによって集光して検出器に入射する。このシステムを用いて、性能や分解能を評価しながら光学系の改良を進め、基礎的走査特性の評価を実施した。最終的に、さまざまな試料を用いてイメージングを行ない、試料の反射特性の評価をすることで、最適な試料の選択を行なった。また、これに並行して画像化アルゴリズム、最適な走査法の構築も進めてきた。

(2) 透過型イメージング装置の試作、基礎実験、性能評価

透過型イメージングシステムは、当初はマハツェンダ干渉系を想定して構築を進めてきた。しかし、光源の出力が低いこと、光学系によるテラヘルツ強度の損失が試作段階の見積より大きかったため、検出器に達するテラヘルツ波の強度が著しく低下することが判明した。

そのため、テラヘルツ光源を2台用意し、1台を信号光、もう1台を参照光として、ミキサにより周波数を混合する方法に改めた。具体的には、信号光 (周波数616.3GHz) からの光をミラーやレンズを用いて試料に集光する。試料は自動ステージに保持されており、自動ステージが移動することによってスキャンを行なう。次に、試料を透過してきた信号光は再びミラーやレンズを介してミキサに入射して、参照光 (周波数616GHz) とミキシングすることで、中心周波数が300 MHzにおけるビート信号を観測することができる。

本システムは、光学特性の評価を進めながら試作や改良を重ねたのち、撮像特性の評価を行なった。また、さまざまな試料を用いて透過性の評価やイメージングを行ない、最適な試料の選択を行なった。また、これに並行して画像化アルゴリズム、最適な走査法の構築も進めてきた。

(3) 測定対象の実験的検討

工業製品内部の空気や異物の混入など、欠陥を透視画像、断層画像、反射画像によって探知するような、品質管理や製品検査分野では、テラヘルツ波を用いたニーズが非常に高い。また、郵便物、

小包、宅急便などの内部に隠匿された危険物質・違法薬物など粉体検出の探知も可能である。テラヘルツ波を用いた評価方法は、近年注目されつつあるが、まだ実用化されるには至っていない。そのため、本技術が実用化されるよう、調査を進め応用可能性を追求してきた。

実験は項目(1)および(2)で構築したイメージング装置を用いて、まず初めに混入物の形状が既知のサンプル(プラスチックやゴム製品内部に、材質が異なる異物を混入したもの)を用いて透過性の評価と撮像特性の評価など、予備的な実験を行なった。

次に、応用の可能性として、工業製品を中心としたさまざまなサンプルを用いて、実験的に評価を進め、最適な測定対象物の検討を行なった。

(4) 高速撮像と走査方法の検討

透過イメージング、断層画像イメージングでは、高速で短時間の撮像が要求される。ここでは、ステージや周辺機器の高速制御とデータ取得方法について検討し、可能な限り長時間イメージングの実現に近づくようなアルゴリズムの構築を進めてきた。

(5) 画像化アルゴリズムの開発

テラヘルツを用いた透過型、反射型いずれのCTイメージングにおいては、X線やレーザー光を用いたイメージングと同様に、測定対象表面からの反射や内部での屈折・回折から生じるアーチファクトが画像の画質低下の原因となる。すなわち、これらが定量的評価を困難にしているということが分かっている。このことは、上記(1)～(3)の性能評価や予備実験においても明らかになった。そのため、試料表面や界面でのこのようなアーチファクトを補正し、除去するアルゴリズムの開発を実施した。

さらに、画像から奥行き情報の定量的評価を実現するため、トモシンセシス法による3次元疑似CTイメージング法の導入を検討した。まず、実験的にトモシンセシス法が実現可能か否かを検証するため、直接検波法により予備実験を行なった。この手法では、反射や回折によるアーチファクトが低減され、測定対象内部の障害陰影も除去可能であるため、コントラストの良い画像取得が可能となるばかりでなく、3次元画像取得も可能となる。さらに従来のCTのように全周回転走査が不要であるため、時間短縮などのメリットもある。ここでは、トモシンセシス法によるデータ取得法、最適な画像化法の検討を行ない、定量的な評価法の構築を実施してきた。

4. 研究成果

本課題を達成するにあたり、下記の5つの項目に分類して研究開発を進めてきた。

(1) 反射型イメージング装置の試作、基礎実験、性能評価

本課題で試作、開発を行なったイメージング装置は、試料への入射ビームスポットが概ね800 μ mである。試料に既知の形状の異物を混入したサンプルを用いて、試料の奥行き方向を走査して3次元イメージングを行なった結果、試料の種類にもよるが、紙、ゴム、プラスチック製品ではおおむね20mm、木製品では10mm内部にある異物などの反射成分を検出できることが確認された。

さらに、本装置を用いた定量的評価法として、位相シフト法の導入を試みた。本手法は、数枚のイメージング像の位相差から波長オーダー以下の高さの推定が可能である。この手法により波長の数分の一から数十分の一の深さ情報の評価が可能になることも確認された。この技術を導入することにより奥行き情報の定量評価が可能になるものと思われる。

(2) 透過型イメージング装置の試作、基礎実験、性能評価

本課題で構築したヘテロダイン方式の透過イメージング装置のダイナミックレンジは、65dBm@10kHzであった。一般に帯域幅が小さくなれば、ダイナミックレンジは広がるが、本システムでは帯域幅を10kHzより小さくした場合、ビート信号が非常に大きく揺らぎ不安定になることが判明した。これは、テラヘルツ光源で用いている電源の不安定さが原因であることが明らかとなった。これを改善することで、さらに広いダイナミックレンジが確保できると推察される。

まず初めに、この装置を用いて最適な測定対象を調査するため、さまざまな工業製品の透過性を調査した。その結果、ゴムやプラスチック製品では20mm、紙は30mm、陶器では10mm程度透過することが確認された。次に、試料に既知の形状の異物を混入したサンプルを用いて、2次元イメージングを行なった結果、概ね上記のサンプルでは、内部にある異物などを識別できることが確認された。

(3) 測定対象の実験的検討

本課題では、主として比較的透過性が良好なプラスチックやゴムなどの工業製品の品質管理や製品評価に関する技術の確立を目指して、実験的検討を重ねてきた。しかし、ニーズについて調査を行なったところ、木製品、紙類の検査についても要求が高いことが分かり、これらについても実験的に検討を進めてきた。

(4) 高速撮像と走査方法の検討

透過・反射イメージングおよびトモシンセシス法によるイメージングでは、ステージや周辺機器の高速制御、データ取り込み時間の短縮により、研究開始当初よりは、測定時間が大幅に短縮された。

(5) 画像化アルゴリズムの開発

まず、テラヘルツを用いた透過型CTイメージングにおいては、X線やレーザー光を用いたイメージングと同様に、測定対象表面からの反射や内部での屈折・回折から生じるアーチファクトを確認した。そのため、試料表面や界面でのこのようなアーチファクトを補正し、除去するアルゴリズムの開発を行なった。

次に、直接検波法による予備実験により、トモシンセシス法による3次元疑似CTイメージング法の導入を検討した。この手法では、反射や回折によるアーチファクトが低減され、測定対象内部の障害陰影も除去可能であることを実験的に確認した。さらに、トモシンセシス法によるデータ取得法、最適な画像化法の検討を行ない、定量的な評価法の構築を実施してきた。この結果、付箋紙内部の高さが異なる位置（付箋紙2枚目、25枚目、50枚目）に描かれた鉛筆の文字を、それぞれ抽出してイメージングすることに成功した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

(1) Naoki Sunaguchi, Yoshiaki Sasaki, Norihide Maikusa, Mina Kawai, Tetsuya Yuasa, Chiko Otani, "Depth-resolving THz imaging with tomosynthesis," *Optics Express*, Vol. 17, Issue 12, pp. 9558-9570 (2009). (査読あり)

(2) I. Nishidate, M. Goto, Y. Sasaki, T. Yuasa, B. Devaraj, Q. Niizeki, T. Akatsuka, "Near-infrared laser tomographic imaging with right-angled scattered coherent light using an optical heterodyne-detection-based confocal scanning system," *Applied Optics*, Vol. 46, No. 11, pp. 2123-2130(2007). (査読あり)

〔学会発表〕（計9件）

(1) 河合美奈, 佐々木芳彰, 砂口尚輝, 霍慶凱, 湯浅哲也, 大谷知行, 安藤正海, "平行ビームによるトモシンセシス再構成", 電子情報通信学会医用画像研究会, 演題番号 63, 沖縄県那覇市 (2010年1月28日~29日)

(2) Naoki Sunaguchi, Norihide Maikusa, Mina Kawai, Tetsuya Yuasa, Yoshiaki Sasaki, Chiko Otani, "THz tomography in digital tomosynthesis," 2nd International Workshop on Terahertz Technology (TeraTech 09), 2P-18, Osaka (Nov. 30-Dec. 3, 2009).

(3) 佐々木芳彰, 砂口尚輝, 河合美奈, 湯浅哲也, 大谷知行, "トモシンセシス法を用いたテラヘルツ波断層イメージング", エクストリームフォトニクスシンポジウム, 演題番号P41, 理化学研究所, 和光市, (2009年5月).

(4) C. Otani, Y. Sasaki, K. Maki, N. Sunaguchi, T. Yuasa, "Two topics on THz imaging : THz beam steering and tomosynthesis," RIEC& IEEE Sendai-Section 36th Nano-Spin Engineering Workshop-Terahertz Technology for Tomographic Applications-, RIEC, Sendai (16 April, 2009).

(5) 佐々木芳彰, 砂口尚輝, 河合美奈, 湯浅哲也, 大谷知行, "トモシンセシス法によるテラ

ヘルツ波断層イメージング", 2009年電子情報通信学会総合大会, C14-17, 愛媛大学, 松山市 (2009年3月).

(6) 砂口尚輝, 佐々木芳彰, 河合美奈, 湯浅哲也, 大谷知行, "限られた投影角からのテラヘルツ波断層イメージング", 第51回自動制御連合講演会, 山形大学, 米沢 (2008年11月22-23日).

(7) N. Sunaguchi, Y. Sasaki, M. Kawai, T. Yuasa, and C. Otani, "THz-wave tomographic imaging: An approach via CT reconstruction from limited projections", 33rd international conference on infrared, millimeter, and terahertz waves (IRMMW-THz 2008), Pasadena, California, USA, (Sep.15-19, 2008).

(8) 佐々木芳彰, 大谷知行, 砂口尚輝, 河合美奈, 湯浅哲也, "テラヘルツ波を用いたトモシンセシスイメージング法の開発", 第7回理研・分子研合同シンポジウム エクストリームフォトニクス研究, 和光 (May 15-16, 2008).

(9) 砂口尚輝, 佐々木芳彰, 小時田光永, 湯浅哲也, 大谷知行, "テラヘルツ波トモシンセシスによる奥行き情報取得", 応用物理学会2008年春季第55回学術講演会, 日本大学理工学部, 千葉 (March, 2008).

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ

独立行政法人理化学研究所 基幹研究所 先端光科学研究領域 テラヘルツ光研究グループ テラヘルツイメージング研究

<http://www.riken.jp/lab-www/THz-img/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 芳彰 (Sasaki Yoshiaki)

独立行政法人理化学研究所・テラヘルツイメージング研究チーム・基幹研究所研究員

研究者番号：90419002

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

牧 謙一郎 (Maki Kenichiro)

独立行政法人理化学研究所・テラヘルツイメージング研究チーム・基幹研究所研究員

研究者番号：50392121

保科 宏道 (Hoshina Hiromichi)

独立行政法人理化学研究所・テラヘルツイメージング研究チーム・基幹研究所研究員

研究者番号：10419004