

テラヘルツイメージングシステムの開発

Development of Terahertz Imaging Systems

山口 淳

Atsushi Yamaguchi

要旨 我々はテラヘルツ波を用いた、2つの方式のイメージングシステムを開発した。一方はテラヘルツ波送受信素子として光伝導アンテナを用いた光励起方式で、テラヘルツ時間領域分光法を利用して3次元イメージングを行うことができる。もう一方は共鳴トンネルダイオードを用いた電子デバイス方式で、システムの小型軽量化を図りつつ、2次元イメージングを行うことができる。これらのシステムを用いて様々なサンプルについてイメージングを行うことにより、非破壊イメージングの実現可能性を示すことができた。なお、本稿で用いた共鳴トンネルダイオード素子は、ローム株式会社様にご提供いただいた。

Summary We developed two types of terahertz (THz) imaging systems. One is the photo-excitation based system using photo conductive antennas as a THz emitter and detector. It is available for 3D imaging by THz time-domain spectroscopy. The other is the system using semiconductor devices called resonant tunneling diodes (RTDs). It can perform 2D imaging and has the advantage of miniaturization and weight reduction of the system. The feasibility of non-destructive imaging was confirmed by applying these systems to various samples. RTD devices were supplied by Rohm Co., Ltd.

キーワード: テラヘルツ, 光伝導アンテナ, 時間領域分光法, 共鳴トンネルダイオード

1. はじめに

周波数0.1~10THz付近の電磁波はテラヘルツ波と呼ばれ(図1), これまで発生や検出が難しかったために, ほとんど利用されてこなかった。しかし近年, この周波数帯における光源や検出器の研究が進み, 急速に注目度が高まってきている。テラヘルツ波は電波と光の間の周波数帯に位置することから, 電波の特性(透過性など)と光の特性(集束性など)の両方の特性を合わせ持ち, これらの特徴を活かした無線伝送技術やイメージング技術への応用が期待されている。さらにテラヘルツ波を物質に照射すると, その物質特有なスペクトル(指紋スペクトル)を有する透過/反射波が得られることが知られており, 分光分析技術への応用を見据えたデータベース化なども進められている⁽¹⁾。

その中でもイメージング技術については, “非破壊”で観測が可能である点を利用して, 異物検査, セキュリティシステム, 文化財診断等, 幅広い分野への応用が見込まれ, 非常に有望と考えられている⁽²⁾。そこで本稿では, 我々が開発を行ったテラヘルツイメージングシステムの概要やイメージング例を紹介するとともに, 適用分野や今後の展望について述べる。



図1 テラヘルツ帯

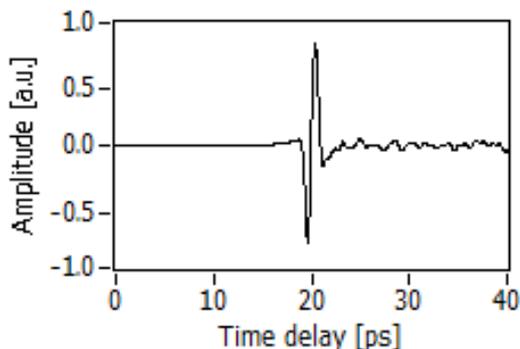
2. テラヘルツ波の発生・検出

テラヘルツイメージングシステムの構築にあたり, 我々はテラヘルツ波の発生・検出方法として2種類の方式を採用した。一方は最も一般的とも言える光伝導アンテナ(Photo Conductive antenna ; PCA)を用いた光励起方式である(図2)。PCAにフェムト秒レーザーによる超短パルスレーザー光をポンプ光として照射し, テラヘルツ波を発生させる。検出素子にもPCAを用い, 同様に超短パルスレーザー光をプローブ光として照射することでテラヘルツ波を検出する。この場合のテラヘルツ波の時間波形は, 1ps程度の幅を持つモノサイクルパルス形状をしており, これを直接観測できるよう

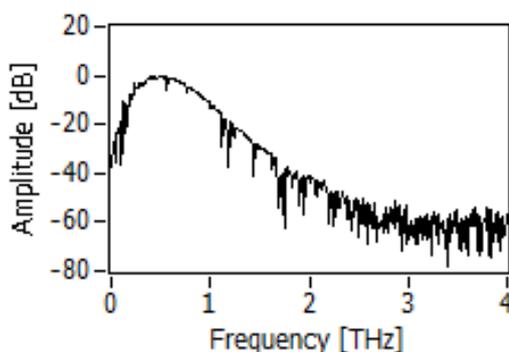
な高速の測定器は存在しない。そのため、光学遅延装置を用いたテラヘルツ光領域分光法(Terahertz Time Domain Spectroscopy ; THz-TDS)により、波形検出を行う⁽³⁾。

このパルス発振のテラヘルツ波をレンズ等で絞ってサンプルに照射し、照射部の透過率/反射率に対応したパルスの振幅変化を検出するのはもちろん、その時間遅れを検出することで、タイム・オブ・フライト法を利用した3次元イメージングを行うことができる。図3に、光励起方式により検出したテラヘルツ波の時間波形例、およびそのフーリエ変換スペクトルを示す。このモノサイクルパルスは~2THz程度の広帯域な周波数成分を含んでいるため、後述する周波数分解イメージングに活用することができる。

方式とは異なり、基本的に2次元のみのイメージング方式となる。



(a) 時間波形



(b) フーリエ変換スペクトル

図3 光励起方式による取得波形例

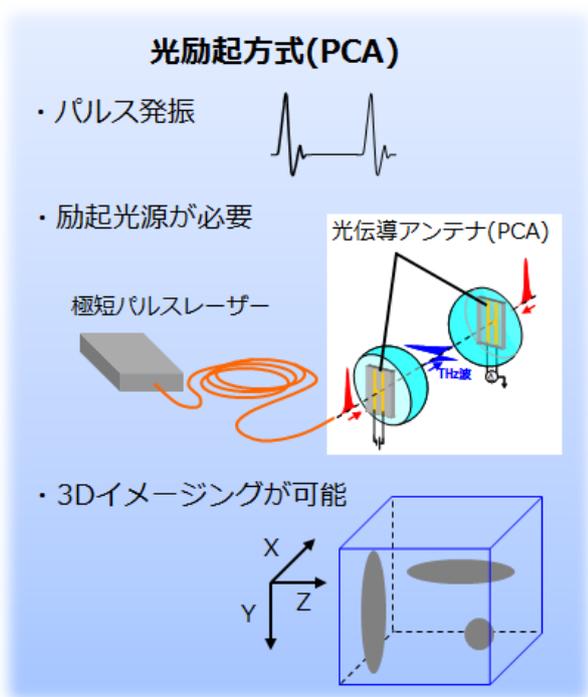
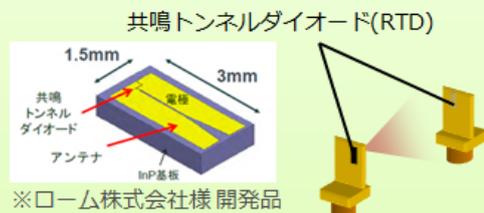


図2 光励起方式

我々が採用したもう一方の方式は、共鳴トンネルダイオード(Resonant Tunneling Diode ; RTD)を用いた電子デバイス方式である(図4)。RTDは単体で直接テラヘルツ波を発生する半導体デバイスの1つであり、近年、活発に研究が行われ、その進展が著しい⁽⁴⁾。RTDはその電流-電圧特性において、ある印加電圧の範囲で負性抵抗を示し、このとき単一周波数にてテラヘルツ波をCW発振する(図5)。今回使用した素子の発振周波数は0.3THzである。また電流-電圧特性の非線形性を利用して、テラヘルツ波の検出にも用いることができる。したがってRTDによるテラヘルツ波の発生・検出においてはフェムト秒レーザー等の励起光源や光学遅延装置が不要であるため、システムの小型化や省電力化に有利である。ただし、パルス発振の光励起

電子デバイス方式(RTD)

- ・ CW発振 
- ・ 小型, 低消費電力



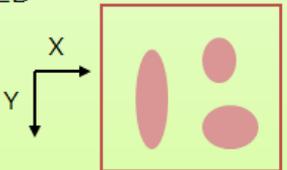
- ・ イメージングは2D 

図4 電子デバイス方式

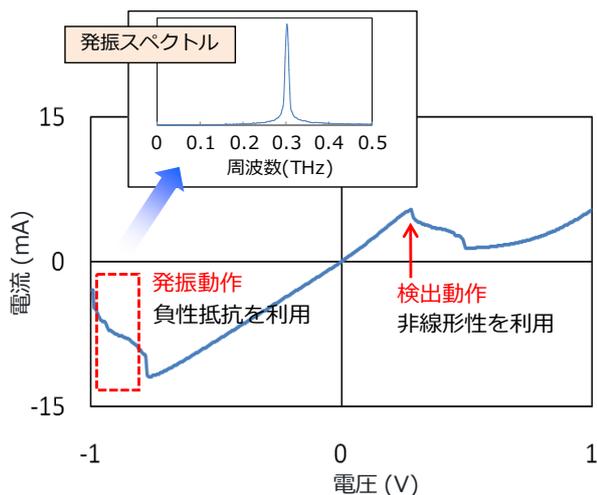


図5 RTDのI-V特性

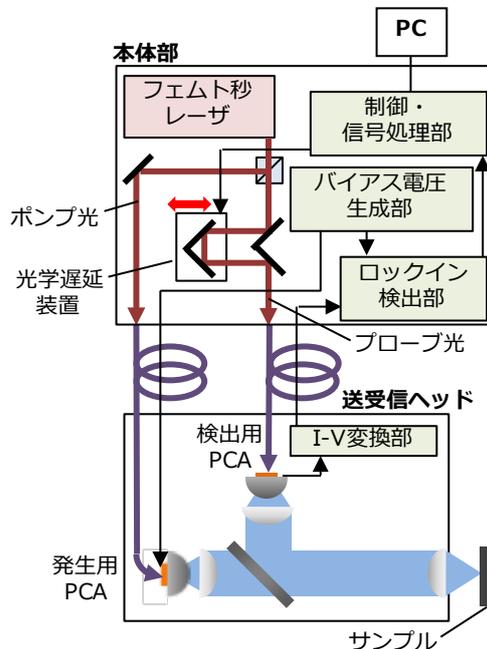
3. 光励起方式イメージングシステム

3.1 システム概要

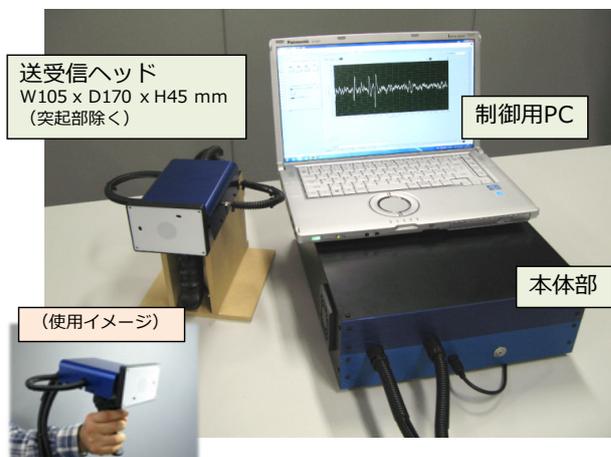
今回紹介するテラヘルツイメージングシステムの1つ目の方式として、送受信素子にPCAを用いた光励起方式のシステム概要および外観を図6に示す。本体部にはフェムト秒レーザー、光学遅延装置および制御・信号処理部等が内蔵され、送受信ヘッドには光ファイバにより超短パルスレーザー光が伝送される。送受信ヘッド内にはテラヘルツ波発生用/検出用PCA素子をはじめ、テラヘルツ波を効率よく取り出し/検出するための基板レンズとしてのシリコンレンズや、テラヘルツ波用コリメータ/対物レンズおよびビームスプリッタなどが設置され、反射型光学系が構築されている。対物レンズを通ったテラヘルツ波はヘッド外部でサンプルに集光・照射され、その反射成分が再度ヘッドに取り込まれる。テラヘルツ波の検出には上述のとおりTHz-TDSを用いるが、その動作に関してここで簡単に説明する。

図6(a)において、フェムト秒レーザーによる励起レーザー光はまずポンプ光とプローブ光に分岐され、ポンプ光はテラヘルツ波発生用PCAに導かれる。PCAでは超短パルスレーザー光の照射により自由電子が励起され、印加されたバイアス電圧によって加速される際にテラヘルツ波を発生する。一方、分岐後のプローブ光は光学遅延装置に入射する。光学遅延装置は移動ステージ上の反射ミラーにより構成されており、プローブ光の光路長を変化させることができる。光学遅延を受けたプローブ光は検出用PCAに導かれる。検出用PCAでも超短パルスレーザー光の照射により自由電子が励起され、受信したテラヘルツ波の電場により加速されて電流が流れるため、これを検出する。この電流は非常に微弱なため、テラヘルツ波発生用PCAに印加するバイアス電圧を変調することにより、ロックイン検出を用いる。ポンプ/プローブ光分岐から検出用PCAに至る、2系統の光

路長をほぼ合わせたくうえで、ポンプ光に対するプローブ光の時間遅れを光学遅延装置によりわずかに走査することで、極めて狭いパルス幅を有するテラヘルツ波の振幅を時間的に分割して取得し、最終的には図3(a)のような時間波形を得ることができる。



(a) システム概要



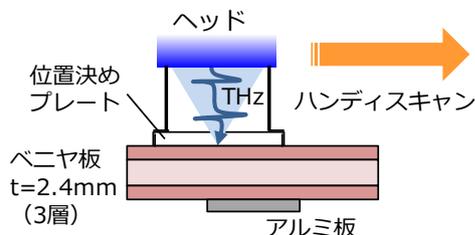
(b) システム外観

図6 光励起方式イメージングシステム

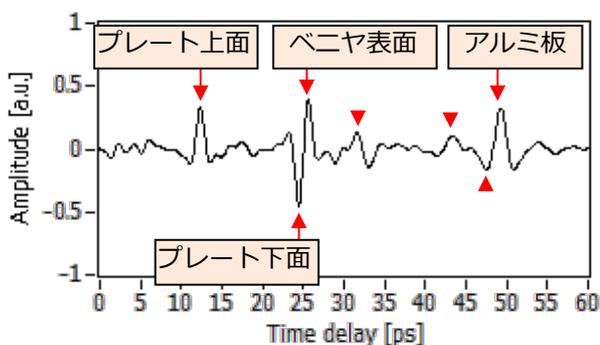
3.2 撮像例

このようにして得られた時間波形には、分析対象サンプルの層構造を反映したパルスが現れるため、光励起方式ではこれをイメージングに利用する。ここでは図7(a)のように、ベニヤ板の裏にアルミ板を設置したサンプルに対してハンディスキャンを行った例を挙げる。スキャン時にサンプルが集光点に維持されるように、ヘッドには位置決めプレートを設置している。各ヘッド位置における時間波形には、

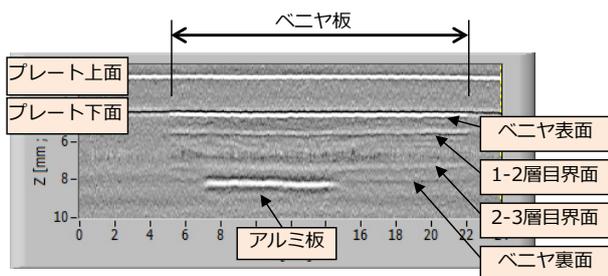
図7(b)のように各界面に対応したピークが現れる。これを順次取得していくことにより、最終的には図7(c)のような断面像が得られる。図7(c)では位置決めプレートの上下面に続き、3層構造のベニヤ板の各界面、および高反射率のアルミ板が判別できていることがわかる。この結果から、例えば建材の裏の状態を非破壊で確認するような用途への応用が期待される。



(a) 撮像状況



(b) 時間波形



(c) 断面像

図7 断面イメージング

さらに、送受信ヘッドのテラヘルツ波集光位置にサンプルを設置して、サンプルあるいはヘッドを2次元スキャンすることにより、3次元イメージングを行うことが可能である。図8に、カード型リモコンのイメージング結果を示す。2次元スキャン時に一定のピッチで時間波形を取得していくため、走査面方向の各画素に一つの時間波形が対応する。したがって適当な時間位置を選ぶことで、図8(c)のように表面のボタン付近(断層像A)と奥の基板付近(断層像B)を明確に切り分けて表示することができる。

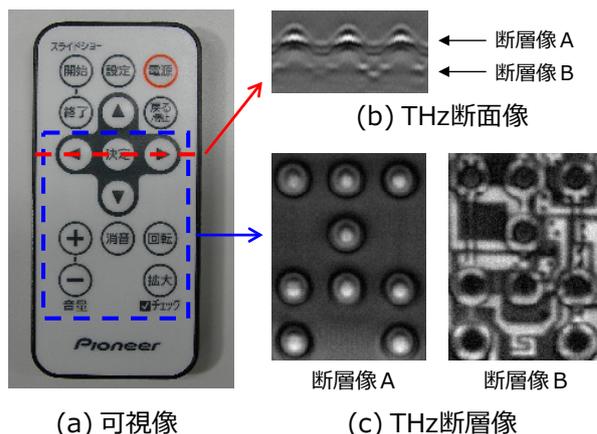


図8 カード型リモコンのイメージング像

3.3 周波数分解イメージング

光励起方式では、上述したように広帯域の成分を含んだモノサイクルパルスの時間波形が得られる。この点を利用した周波数分解イメージングについて紹介する。図9(a)は、封筒内に配置した十円硬貨をサンプルスキャンして得られたイメージング結果について、硬貨表面付近における時間波形のピーク値を輝度値として描画した結果である。一方図9(b)~図9(f)は、同時間領域において短時間フーリエ変換により求めた各周波数成分を輝度値として描画した結果である。周波数が高くなるほど(=波長が短くなるほど)、得られる画像の解像度が向上しており、図9(d)以降で処理前の図9(a)を上回る解像度が得られている。図9(f)ではかなりノイズが目立つ結果となっているが、どこまで実用に耐えるかはシステムの基本性能だけでなく、サンプルの状況(厚さや透過率の波長依存性など)によって変わる。このように光励起方式イメージングシステムでは、必要に応じて解像度を向上させることが可能であり、先に示した図8(c)も周波数分解(1.0THz)処理後の画像である。

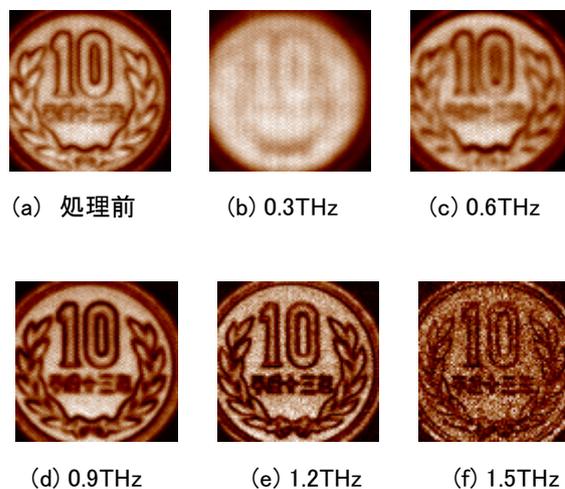
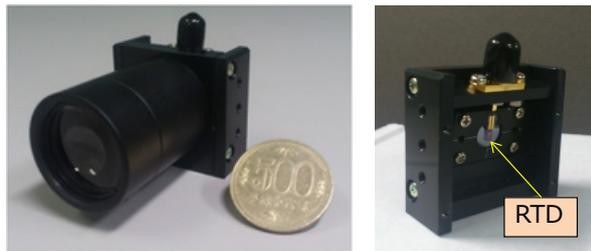


図9 周波数分解イメージング

4. 電子デバイス方式イメージングシステム

4.1 システム概要

2つ目の方式である、RTDを送受信素子に用いた電子デバイス方式のシステムについて、素子実装後のモジュール外観を図10に示す。このモジュールにはRTD素子の他に、基板レンズとしてのシリコン超半球レンズ、テラヘルツ用コリメートレンズおよび対物レンズが組み込まれており、適切なバイアス電圧を印加するだけでテラヘルツ波を発生/検出することができる。光励起方式と同様、高感度にテラヘルツ波を検出するため、発振用RTDには変調したバイアス電圧を印加することにより、ロックイン検出を用いる。

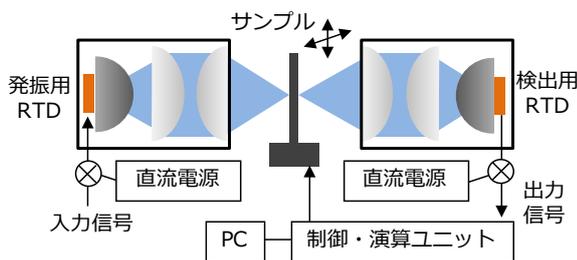


(a) 前面 (b) 後面

図10 RTDモジュール

4.2 撮像例

上記モジュールを対向配置し、集光位置に設置したサンプルを2次元スキャンすることで、透過イメージングを行うことができる。各サンプル位置にて検出された信号強度が、対応する画素における輝度値となり2次元イメージング像が構築される。図11(a)にシステム概要、図11(b)にサンプル(ABS樹脂ケース内に五円硬貨、クリップ等を配置)写真、および図11(c)に取得した透過イメージング像をそれぞれ示す。テラヘルツ波は樹脂ケースを良好に透過する一方、金属部分等では透過しないため、その像が明瞭に確認できる⁽⁵⁾。



(a) システム概要



(b) サンプル可視像(フタ:開) (c) THz透過像

図11 透過イメージング

さらに図12には、反射型光学系によるイメージング例を示す⁽⁶⁾。RTDによるテラヘルツ発生はPCAとは異なり単一周波数発振(0.3THz=波長1mm)であるため、波長板の作製が比較的容易である。そこでRTDから出射されたテラヘルツ波が直線偏光であることを利用して、図12(a)のように1/4波長板とポラライザを組み合わせることで、偏光ビームスプリッタを構成した。この偏光光学系の導入により、ビームスプリッタでの不要反射成分低減によるテラヘルツ波利用効率の向上と、サンプルからの戻り光のアイソレーションによるテラヘルツ波の干渉の抑制を図っている。

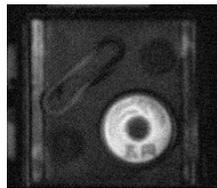
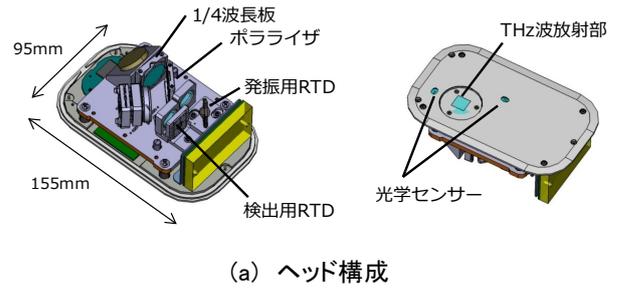
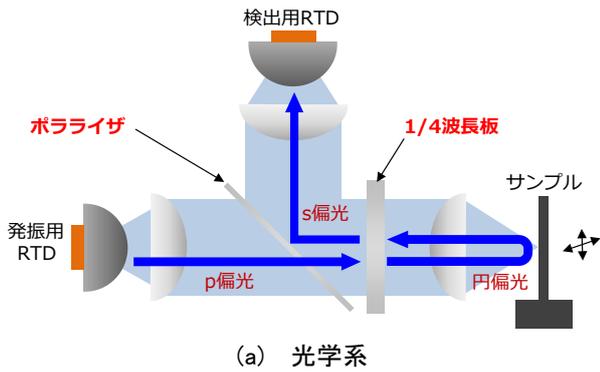
図12(b)は、図11(b)と同様のサンプルについての反射イメージング像である。図11(c)と比較すると、ほぼ明暗が反転した画像が得られており、五円硬貨の表面も確認することができる。

図12(c)は封筒内のカミソリ刃についてのイメージング例である。紙はテラヘルツ波を比較的通しやすい物質とされており、封筒内部のカミソリ刃がその形状まで明瞭に観察できる。これは例えば郵便物内の危険物検出などへの応用が期待できる結果と考えられる。

図12(d)はカード型リモコンについての例である。表面側からのイメージング像は、図8(c)に示した光励起方式による断層像をちょうど重ね合わせたような画像になっている。

4.3 応用例

最後に、電子デバイス方式がシステムの小型軽量化に有利な点を活かして、マウス型ハンディスキャナへの応用例について紹介する。マウス形状の送受信ヘッド部は、図13(a)に示すように、偏光光学系を搭載したうえで位置検出のための光学センサを内蔵している。テラヘルツ波はヘッド底面部に集光され、封筒などのサンプルに押しつけてハンディスキャンすることで、反射イメージングにより内部を可視化することを想定している。システムは図13(b)のように、ヘッドの他に電源/信号処理回路ボックスとPCのみで構成される。封筒の裏面に金属テープを貼ったサンプルについてのイメージング結果を図13(c)に示す。ヘッドの位置検出センサの精度不足が影響しているものの、封筒裏の金属部のイメージングに成功している。



(b) 樹脂ケース内五円硬貨等のTHz像

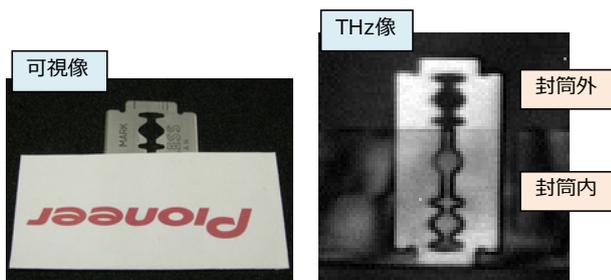
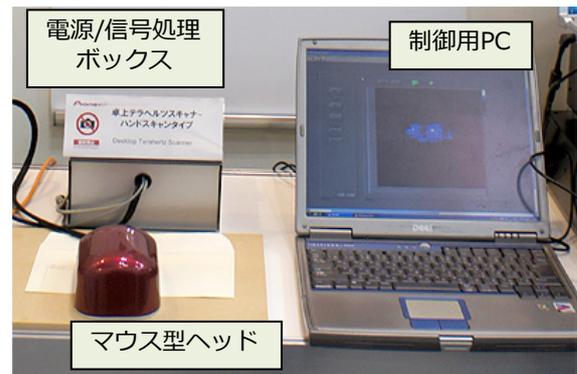


図13 マウス型ハンディスキャナ

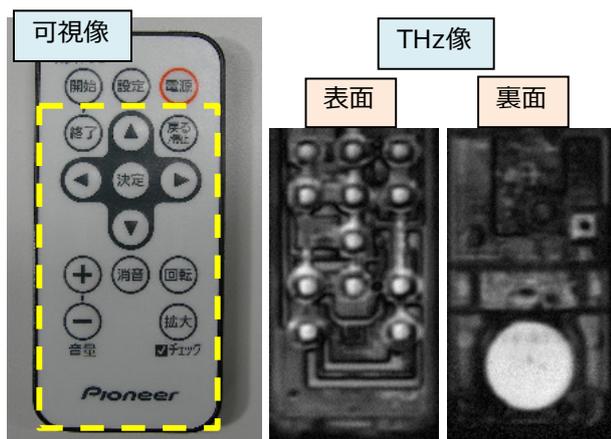


図12 反射イメージング

5. まとめ

今回開発を行った光励起方式および電子デバイス方式のテラヘルツイメージングシステムにより、各種サンプルに対するイメージングに成功した。今後はシステムの基本性能向上を図るだけでなく、非破壊検査などの広範囲な応用に向けて、送受信ヘッドの小型モジュール化や特定の分析対象に特化したシステム形態の検討などを進めていく予定である。

6. 適用分野と今後の展望

光励起方式および電子デバイス方式の適用分野のイメージを図14に示す。両システムともX線等を用いずに安全・簡便に非破壊イメージングが行える点で共通しており、分野によってはいずれも利用可能と思われるケースもあるが、基本的にはそれぞれの特徴を活かしてすみ分けることを想定している。例えば光励起方式では、コーティング検

査や建材，文化財の観測など，断面情報が要求される分野への応用が期待される。またICカードや回路の検査等，やや分解能が必要な分野にも向いているであろう。一方電子デバイス方式は，将来的に素子のアレイ化が実現すれば，秘匿物検出のためのセキュリティシステムや製造ラインにおける異物検査等，高速イメージングが要求される分野での応用が期待される。

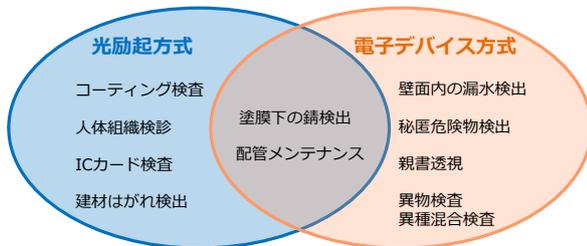


図14 適用分野イメージ

参考文献

- (1) テラヘルツデータベース, URL: thzdb.org
- (2) W. L. Chan, *et al.*: “Imaging with terahertz radiation”, *Rep. Prog. Phys.*, 70, 1325 (2007).
- (3) 阪井清美: “テラヘルツ時間領域分光法”, *分光研究* 50, 261 (2001)
- (4) 浅田雅洋: “共鳴トンネルダイオード”, *応用物理* 83, 565 (2014)
- (5) 宮本知幸, 向井俊和: 第60回応用物理学会春季学術講演会 29a-D1-2 (2013)
- (6) 山口淳, 向井俊和: 第61回応用物理学会春季学術講演会 18a-E17-2 (2014)

著者紹介

山口 淳(やまぐち あつし)

研究開発部 第六研究部 研究二課に所属。

記録型光ディスクの研究開発を経て，現在テラヘルツスキャナの開発に従事。