

テラヘルツ分光分析技術の紹介

伝 昌明^{*1} 福富 誠二^{*2}
Den Masaaki Fukutomi Seiji

0.1 ~ 10THz 程度の周波数領域であるテラヘルツ波は、X線のような物質を透過する力を持つとともに物質の成分や種類を見分ける能力を秘めていながら、その発生と検出が困難なため利用が進んでいなかった。しかし超短パルスレーザーを活用したテラヘルツ分光分析技術が開発されたことにより、テラヘルツ波の利用の道が開かれようとしている。

テラヘルツ分光分析装置の試作機が完成し試験的運用が始まってきた今、テラヘルツ分光分析技術の原理とその動向を紹介する。

キーワード：テラヘルツ波、時間領域分光法、超短パルスレーザー

1. はじめに

テレビやラジオ、携帯電話・スマートフォン、GPS・カーナビゲーションなどで利用されている電波、防犯や自動ドアセンサーで活躍する見えない光である赤外線、生活空間を明るく照らす可視光、医療でおなじみのX線、これらは皆同じ電磁波の仲間である。

電磁波は電波的側面と光波的側面を持ち、その性質は各々の周波数で変わってくるが、近年、今まで利用されてこなかったテラヘルツ (THz) 領域の電磁波の利用技術が開発されてきている。

2. テラヘルツ波とは何か

サッカーの試合などでスタジアムに描かれるウェーブは、一人ひとりはその場で上下しているだけであるが、上下動のタイミングが隣人と少しずつずれていることで波となる。同じように電磁波は、電場と呼ばれる空間の電気的状態の強さと、

磁場と呼ばれる空間の磁気的状態の強さとが決まった周期で強くなったり弱くなったりして進行する波である。

強弱する周期が1sなら周波数1Hzの電磁波で、周期が 1×10^{-12} s(ピコ秒)なら周波数1THz(=10¹²Hz、テラヘルツ)の電磁波となる。

電波、赤外線、可視光、X線は、それぞれ周波数が異なっている。電波は周波数がkHz ~ THzの電磁波である。赤外線や可視光の周波数は電波より高く、X線はさらに高い。電波は目に見えないが、建物の中で携帯電話が通じることからもわかるように電波には透過性がある。一方、太陽の光や照明などの目に見える光や、赤外線・紫外線などの目に見えない光は光波とも呼ばれる。物に影ができることを見ればわかるように、光には直進性はあるが透過性はあまりない。

これらの電波と光波の境界領域に分類される0.1 ~ 10THz程度の電磁波は、目に見えない電磁波で、電波の透過性と光波の直進性の特徴を併せ

*1：制御システム事業部 宇宙システム部 課長

*2：株式会社 IHI 基盤技術研究所 応用理学研究部 主査

もっているが、技術的な課題が多く利用されずにいた。そのため、この“テラヘルツ波”と呼ばれる周波数帯は最後の未開拓の電磁波と言われてきた（図1参照）。

3. テラヘルツ波の特徴

テラヘルツ波の一般的な特徴として、

- (1) 物質を破壊せず、人体を傷つけないので安全性が高い。
- (2) 紙や布、プラスチックは透過する。
- (3) 水に強く吸収される。
- (4) 物質ごとに固有の吸収領域をもつ。

などがあげられる。

テラヘルツ波は電波の一種とみなすこともできるが、周波数が高すぎて電波と同様の方法では発生させることができない。

一方、光波の一種とみなした場合、周波数が低すぎてレーザー光と同様の方法では発生させることが困難である。またテラヘルツ波を光波として検出するには、液体ヘリウムで冷却した検出器を使用する特殊な実験装置が必要であり、一部の研究者が利用するにとどまっていた。

このように、従来の技術ではテラヘルツ波の発生と検出は困難であった。

4. テラヘルツ時間領域分光法

このテラヘルツ波を常温において利用可能とした方法が、テラヘルツ時間領域分光法である。

超短パルスレーザーから発光されたレーザー光をビームスプリッターによりポンプ光とプローブ光に分け、1組の光伝導アンテナと呼ばれる特殊な半導体素子に照射する。このことにより、ポンプ光側のアンテナからテラヘルツ波が発生する。発生したテラヘルツ波は、空間を伝搬した後にプローブ光側のアンテナにより検出される。しかしテラヘルツ波は非常に短い時間しか存在できないため、そのままでは波形を観測することができない。そこでテラヘルツ波を繰り返し発生させるとともに、プローブ光側に機械ステージを配置し光路長を変化させることで、プローブ光を時間遅延させ検出するタイミングを少しずつずらしていくことにより波形を観測する方法が用いられる。これが時間領域分光法と呼ばれる（図2および図3参照）。

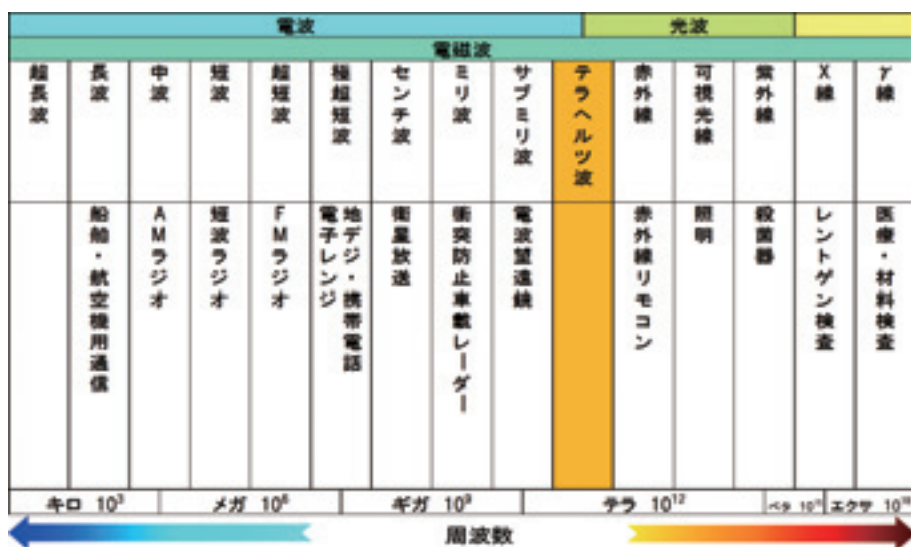


図1 電磁波の種類とテラヘルツ波の位置

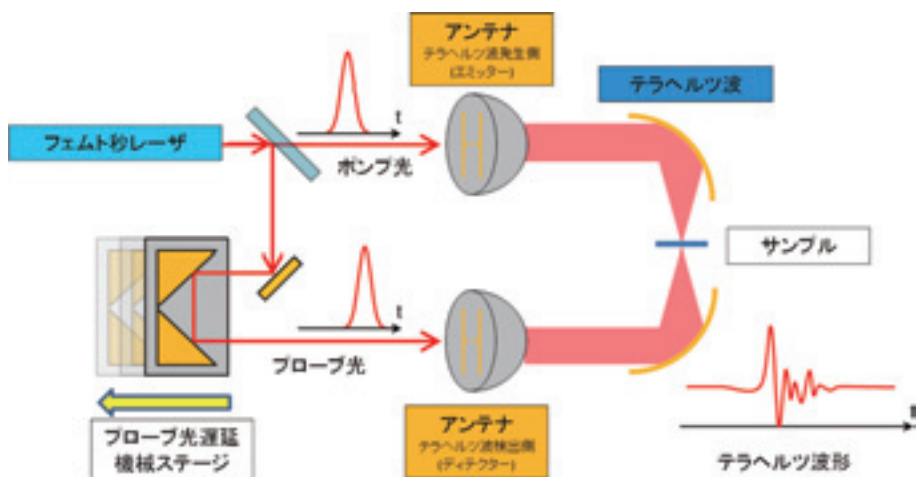


図2 分光分析装置によるテラヘルツ波形検出

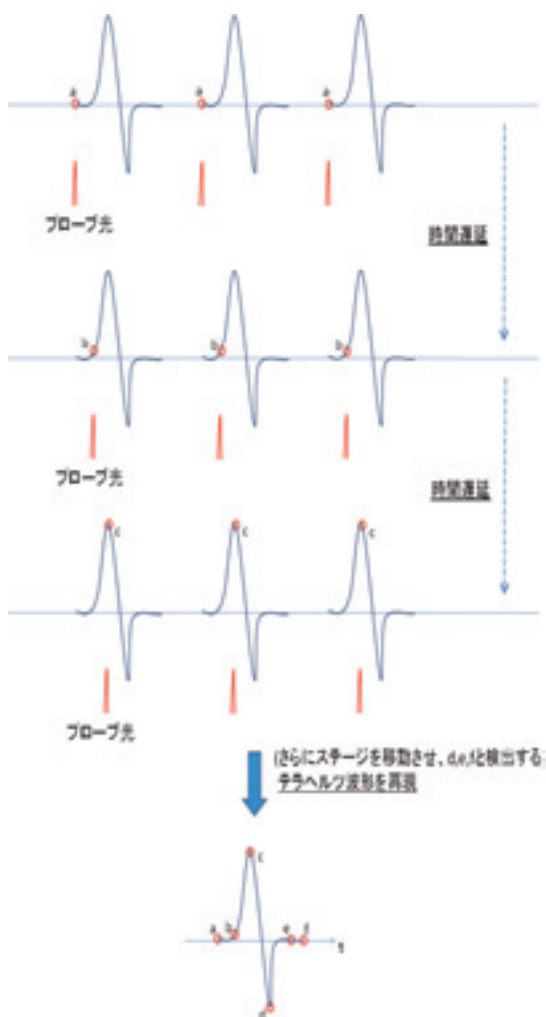


図3 時間領域分光法によるテラヘルツ波の検出

超短パルスレーザーとは非常に短い時間（フェムト秒=10⁻¹⁵秒のオーダー）のレーザー発光が得られるレーザー装置であり、この超短パルスレーザーの安定性と入手性が向上したことにより時間領域分光法によるテラヘルツ波検出が実現可能となった。

ステージを1回走査することで一つのテラヘルツ波形が取得され、この波形をフーリエ変換することでテラヘルツ帯域（光でいえば色の広がり）における周波数スペクトルを得ることができる（図4参照）。

テラヘルツ波を発生するアンテナと検知するアンテナの間にサンプルを置くと、テラヘルツ波はサンプルに吸収されて減衰する。サンプルを置いた場合と置かない場合との信号強度の比から、吸収率の周波数分布を計算することで、サンプルの吸収スペクトルを知ることができる。

たとえばショ糖や麦芽糖の名でなじみ深いスクロースやマルトースなどの二糖類は、一般的には似たような外見の白い粉末状である。これらをテラヘルツ分光分析装置にかけるとテラヘルツ領域にそれぞれ特有の吸収スペクトルがあることがわかる（図5参照）。

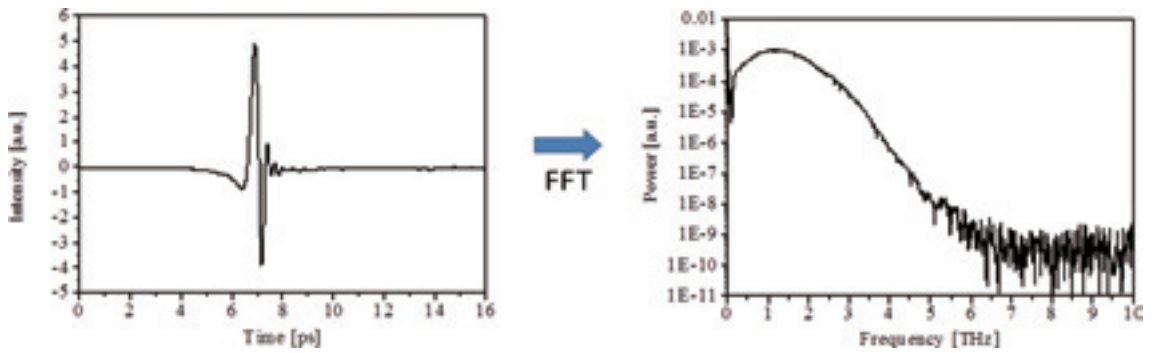
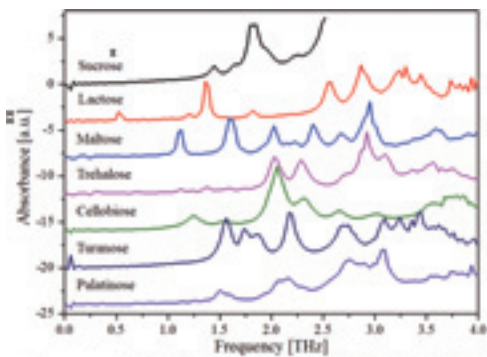


図4 検出されたテラヘルツ波（左）とそれをフーリエ変換して得られた周波数特性（右）



* Sucrose は 2.5THz 以上の領域では吸収が非常に強いため
 スペクトル表示していない
 **縦軸は各試料の0点を一致させずに各スペクトルを分けて
 表示している。(値は参考のみ)

図5 IHI のテラヘルツ分光分析装置で得られた
 7種類の二糖類の吸収スペクトル

物質に固有なスペクトルは、物質を特定できる
 ことから指紋スペクトルと呼ばれ、テラヘルツ波
 の領域にこの指紋スペクトルが存在する物質をテ
 ラヘルツ分光分析装置は識別することができる。

5. テラヘルツ分光分析装置の構成

図6にIHIのテラヘルツ分光分析装置（試作機）
 の全体像を示す。

テラヘルツ分光分析装置は、以下の各部分に分
 類される。

- (1) レーザーと光学系および時間遅延機構を持
 ちテラヘルツ波を発生・検出する部分。
- (2) 電源や制御基板などの電気部品から構成さ
 れるコントロールラック。
- (3) 上記(1)、(2)の制御とテラヘルツ波形の
 演算処理を行うコンピュータ（コントロー
 ルラックに内蔵）。



図6 IHI のテラヘルツ分光分析装置

分光分析装置はテラヘルツ発生・検出部や遅延機構などを階層的に配置しスペース効率を上げている（図7参照）。

テラヘルツ波は雰囲気中の水分で減衰される。この影響を排除するため、テラヘルツ発生・検出部は真空チャンバとし真空引きを可能としている（図8参照）。

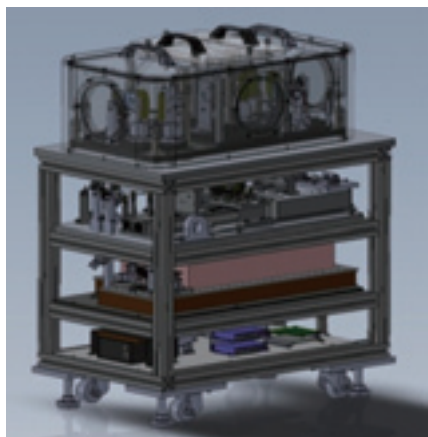


図7 3Dモデル（透視図）

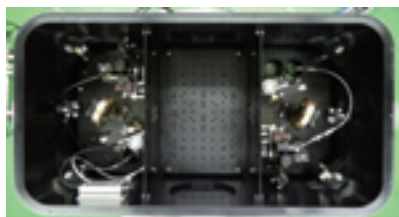


図8 テラヘルツ発生・検出部（真空チャンバ内に配置する）

6. IHIのテラヘルツ分光分析技術の特徴

観測される周波数スペクトルはアンテナ素子とフェムト秒レーザーの性能に強く依存することから、テラヘルツ時間領域分光法をベースにしながらIHIのテラヘルツ分光分析装置においては以下のような工夫を施している。

- ・ 独自レシピのアンテナにより高感度を実現
- ・ 高性能フェムト秒レーザーにより広帯域なテラヘルツ波の発生を実現

また光学遅延機構には精密作動する可動ステージを使用し、周波数が安定したHe-Ne（ヘリウム-ネオン）レーザーを使用した干渉計を構築することにより数十ナノメートル（ $\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ ）という高い計測分解能を実現し、正確なテラヘルツ波形の取得が可能になっている。

このような技術に基づいたテラヘルツ分光分析装置は以下のような特徴、性能を備えている。

- (1) ソフトウェアは装置作動制御プログラム、および測光検出信号取得、高速フーリエ変換処理、スペクトル変換処理、演算処理の各プログラムから成る。
- (2) 測定光学配置は透過測定光学配置を標準としているが、各種アタッチメントを接続することにより、反射測定、液セル、気体用長光路セル、減衰全反射（ATR：Attenuated Total Reflection）などさまざまな測定光学配置に拡張可能である。
- (3) 試料の形態もベースの固体以外に、気体、液体への拡張が可能である。
- (4) 測定波数帯域は $1.3 \sim 230\text{cm}^{-1}$ ($0.04 \sim 7\text{THz}$)、最小波数分解能 0.03cm^{-1} (0.9GHz)、測定時間は波数分解能 1cm^{-1} において $4\text{s}/\text{scan}$ である。固体測定光束断面は、長波長（ 10cm^{-1} 帯域）で 5.0mm 径以下、短波長（ 100cm^{-1} 帯域）で 0.7mm 径以下となっている。

7. 適用とこれからの展開

テラヘルツ分光分析装置は、これまでに半導体・強誘電体・光学結晶といった産業製品の試験的な計測、医薬品・錠剤などの分析、また気体分子の分析などに試験的に適用している。

今後はライフサイエンス、セキュリティー方面にも展開が期待されており、さらなる性能の向上と利用技術の開発により適用先の開拓を進めていく。

8. まとめ

テラヘルツ分光分析装置試作機は、IHI 基盤技術研究所からの委託を受けて IIC 制御システム事業部が電気・制御・機構の装置全体の詳細設計に携わり、光学系・電気系の調整を含めた製造・組立と、制御系との組合せ試験を通して試作機の完成に協力してきた。

テラヘルツ分光分析技術、ならびにテラヘルツ波の本格的な利用拡大はこれからの課題であり、IHI と IIC はこの新技術分野の利用拡大を目指していきたい。

参考文献

- (1) 福富誠二：「テラヘルツを知ってテラヘルツを使う」、IHI 技報、2014、Vol.54 No.1



制御システム事業部
宇宙システム部
課長

伝 昌明

TEL. 042-523-8319
FAX. 042-523-8320



株式会社 IHI
基盤技術研究所 応用理学研究部
主査

福富 誠二

TEL. 045-759-2819
FAX. 045-759-2207