

テラヘルツを知って、 テラヘルツを使う

新しい波でみる「物質の指紋」 —世界トップレベル IHI のテラヘルツ 分光分析技術が拓く安全・安心な社会—

物質をすり抜ける透過の力と、物質の成分や種類を見分ける透視の力を併せもつテラヘルツ波は、発生と検出が困難で、最後の未開拓の電磁波とも言われていた。超短パルスレーザーを活用し IHI が開発したテラヘルツ分光分析技術により、テラヘルツ波の利用が夢ではなくなった。

株式会社 IHI 技術開発本部
基盤技術研究所 応用理学研究部 福富 誠二



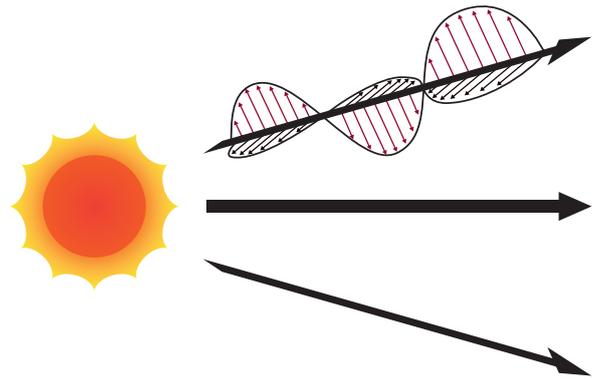
テラヘルツ分光分析装置

テラヘルツ波とは

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で活躍する目に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。何が違うのか？ そもそも電磁波とは何なのか？

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動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になる。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（ $=10^{12}$ Hz、テラヘルツ）の電磁波である。



太陽から放出される電磁波

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のである。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。電波塔や太陽などからはこの電磁波が放出されている。電波は目に見えないが、通信用に広く一般に普及し我々の生活の利便性を大きく向上させている。建物の中でも携帯電話が通じることから分かるように、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、こちらも広く我々の生活に活用されている、という以前に光は生命・環境の基礎である。光には透過性があまりなく、直進性があることは物の影を見れば明らかだろう。

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もっている。

電波										光波				
電磁波														
超長波	長波	中波	短波	超短波	極超短波	センチ波	ミリ波	サブミリ波	テラヘルツ波	赤外線	可視光線	紫外線	X線	γ線
	船舶・航空機用通信	AMラジオ	短波ラジオ	FMラジオ	電子レンジ 地デジTV・携帯電話	衛星放送	衝突防止車載レーダー	電波望遠鏡		赤外線リモコン	照明	殺菌器	レントゲン検査	医療・材料検査
キロ 10^3		メガ 10^6			ギガ 10^9			テラ 10^{12}			ペタ 10^{15}	エクサ 10^{18}		

低い ← 周波数 → 高い
電磁波表

しかしながら、技術的な課題が多く利用されずにいた。そのため、この周波数帯は最後の未開拓の電磁波と言われており、“テラヘルツ波”と呼ばれている。

テラヘルツ波の特徴

パソコンの CPU に代表されるように電気の動作周波数は年々高くなっているが、周波数としてはたかだか数 GHz である。テラヘルツ波の周波数はおよそ 0.1 (100 GHz) ~ 10 THz と定義されていることが多い。このテラヘルツの領域は周波数が高すぎて電氣的に発生させることができない。

一方で光波は周波数が高く（例えば赤い光は 450 THz 前後）、レーザーを用いればさまざまな周波数で強い光を発生させることが可能であるが、周波数を下げていってテラヘルツの領域となるとやはり発生が難しくなる。また光として最も周波数の低い遠赤外線領域になると検出も困難になってくる。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、遠赤外線分野の一部の研究者が利用するにとどまっていた。このように、従来テラヘルツ波は発生と検出が困難であった。

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特性をもつ。
- などがある。

これらの特徴や性質を利用すれば、従来の技術ではできなかった工業、医療やバイオを含むライフサイエンス、農業、セキュリティー、情報通信などさまざまな分野への応用が期待できる。

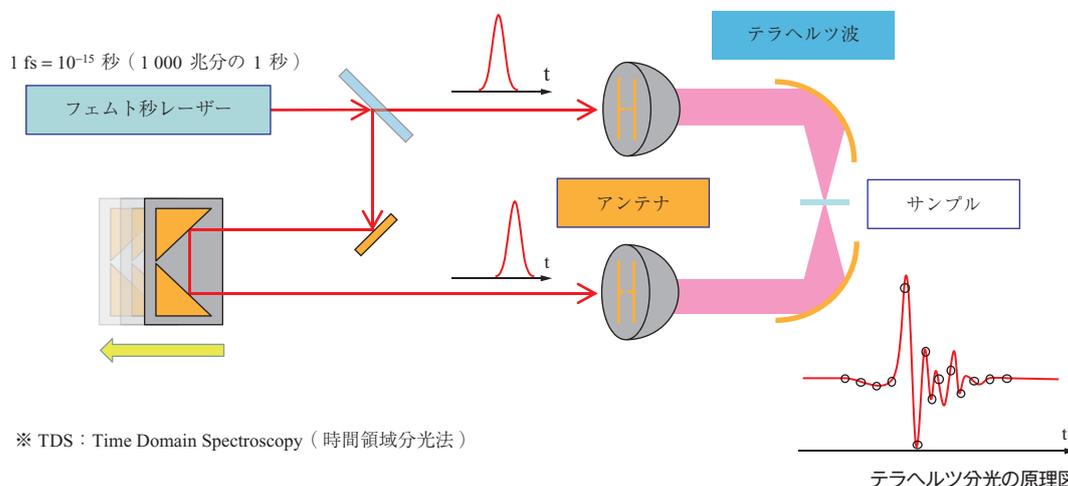
例えば、工場で加工される食品の異物検査で髪の毛やプラスチック片などを識別することや、錠剤薬が体内で溶ける時間をコントロールするために錠剤をコーティングしているその厚みの計測、あるいは紙やプラスチックシートの厚みを製造中に瞬時に計測することもできる。また、郵便物中の麻薬などの禁止物質検査や空港やビルのゲートにおける爆発物やセラミックナイフなど危険物検査に威力を発揮する。

テラヘルツ時間領域分光法

テラヘルツ波の発生と検出は困難であると先に述べたが、常温でもテラヘルツの発生と検出を可能とした方法が、以下に紹介するテラヘルツ時間領域分光法である。

この方法は、超短パルスレーザーの安定化と入手容易性の向上により、実現可能になった。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る。このレーザー光を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とにより、こ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、受信アンテナにより検出される。このテラヘルツ波は非常に短い時間のみ発生するため、そのままの波形を検出す



ることができない。そこで時間を遅延させるステージを用いて検出のタイミングを少しずつずらして検出する方法を用いる。この方法が時間領域分光法である。ステージが1回スイープ（微小な移動）すると一つの波形が取得される。この波形をフーリエ変換することで帯域特性を得る。こうして得られた帯域はテラヘルツの周波数帯域（光でいえば色の広がり）となる。

テラヘルツ波を発生するアンテナと受信するアンテナの間に測定対象であるサンプルを置くと、テラヘルツ波はサンプルにより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の信号強度の比が、サンプルの吸収率となる。このような計算を行うことで結果としてサンプルの吸収スペクトルを知ることができる。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がある。

IHI のテラヘルツ分光分析技術の特徴

IHI の技術は上記のテラヘルツ時間領域分光法をベースとしているが、高感度で広帯域な分光技術として、以下の工夫を施している。

測定されるテラヘルツ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。そこで我々は独自のレシピでアンテナを作製し、これを装置に搭載することで高感度を実現している。さらに、性能の高いフェムト秒レーザーを組み込むことで、広帯域なテラヘルツ波スペクトルの発生を実現した。また光学遅延機構は精密動作する可動ステージを用いている。この可動ステージには数十ナノメートル（ $\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ ）という光の波長オーダーの位置精度が要求されるため、周波数が安定な He-Ne（ヘリウム-ネオン）レーザーを使用して干渉計を構築している。この構成により精密な位置精度が確保され、正確な電場波形の取得が可能となっている。

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。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。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な装置となっている。それに伴い、試料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。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 0.03 cm^{-1} （ 0.9 GHz ）、測定時間は波数分解能 1 cm^{-1} において 4 s/scan である。固体測定光束断面は、長波長（ 10 cm^{-1} 帯域）で 5.0 mm 径以下、短波長（ 100 cm^{-1} 帯域）で 0.7 mm 径以下となっている。また、累積平均が可能な 10 時間以上に及ぶ時間安定性を有している。

適用とこれからの展開

テラヘルツ分光分析装置を用いてこれまでに、産業製品（半導体、強誘電体、光学結晶など）の非破壊非接触による性能検査、医薬品、錠剤などの品質管理、気体分子の分光分析などに試験的に適用し、テラヘルツ波ならではの結果が得られている。

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であり、さまざまな応用分野に適用されていく可能性を秘めた新技術分野である。ライフサイエンス、セキュリティの研究例も多く、今後の発展が期待されている。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。

問い合わせ先

株式会社 IHI

技術開発本部 基盤技術研究所 応用理学研究部

電話（045）759-2819

URL：www.ihico.jp/