

超高周波領域センシング技術に関する基礎的研究

宮崎 俊之

A Basic Study on Technology using Super High Frequency Electromagnetic Wave

Toshiyuki MIYAZAKI

抄 録

電磁波の一つであるテラヘルツ波は、簡便な発生方法や安価な受信方法が無かったため、長く未利用の領域であった。近年、レーザー光源やセラミックヒータを用いた発振方法が確立され、また光学デバイスの長波長側への急速な発展があったことから、センシングへ利用するための研究が盛んに行われるようになった。本研究では、主に食品中の成分を対象とし、テラヘルツ波を用いたセンシング技術に関する基礎的研究を行った。

キーワード：テラヘルツ波、センシング、FT-IR、食品計測

1. はじめに

0.1~10THzの非常に高い周波数の電磁波はテラヘルツ波と呼ばれ、電波と光の中間の性質を持っている。赤外線やマイクロ波などの電磁波を用いたセンシング（物質計測）では、対象となる原子や分子の吸収現象を利用して、物質の有無や含有量を推定する。センシングの視点で見た場合、テラヘルツ波は非常に興味深い性質を持っている。図1は水分子を例に、各種電磁波と分子との吸収作用を示す。

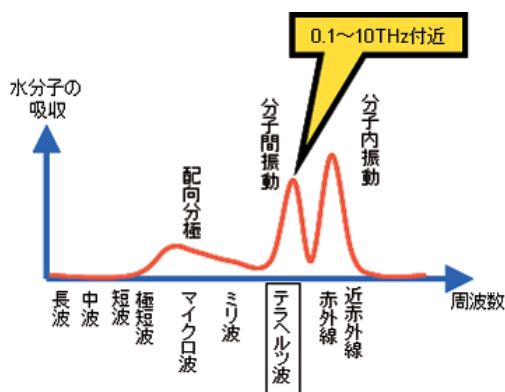


図1 水分子による電磁波吸収現象

電磁波をセンシングに用いる場合、「どの吸収現象を利用するか」、「どの程度の深さまで電磁波を浸透させるか」、「対象の大きさはどの程度か」等により最適な周波数帯を見いだす必要がある。テラヘルツ波を用いたセンシングは、下記のような特徴を持っている。

- テラヘルツ波の周波数帯では、分子同士の結合ネットワーク（水素結合等やファンデルワールス力などによる相互作用）による共振現象が発生する。テラヘルツ波を照射することで複数分子が互いに連携しながら振動するため、この吸収量を測定することで物質全体の特徴を捉えることができる。
- 水分子同士の結びつきとの相互作用が大きいため、対象物の温度変化に敏感である。また対象物を冷凍させることで物質内部の計測ができる。
- 波長が 10^{-5} ~ 10^{-4} (10~100 μm)と細胞サイズと同程度であり、細胞全体の特性（特定の細胞の有無など）をセンシングできる可能性がある。

この様にテラヘルツ波は食品の品質に関わりの深い水分への感度の高さと、適度な内部浸透性を持つことから、冷凍状態の把握や水溶性物質の即時計測など、様々な活用が期待されている。しかしながら、形状や特性が多岐に渡り個体差が大きい食品に対するテラヘルツセンシングの研究事例はほとんどなく、安定した計測方法の開発が望まれている。

事業名：経常研究

課題名：超高周波領域センシング技術に関する基礎的検討
(平成20~21年度)

2. テラヘルツ波計測装置の概要と研究目的

本研究で使用したテラヘルツ波帯のフーリエ変換赤外分光光度計（以下、FT-IR）の仕様を表1に示す。

表1 テラヘルツ波FT-IRの仕様

メーカー・型番	日本分光製 FT-IR-6300FV
構成	光源、干渉計、試料室、検出器の一体構成
光源	セラミック光源 水銀高圧ランプ
検出器	PE 窓 DLαGS
実用測定波長	30～650 カイザー（透過測定時）
最小波長 分解能	4 カイザー
測定ユニット	透過、反射、1回ATR、3回MATR

テラヘルツ波の計測系としては、照射する光強度が高く、また位相情報も同時に計測できる時間領域分光装置（THz-TDS）が主流であり、医療分野やセキュリティ分野を中心に使用されている。しかし、照射光の励起に高価なフェムト秒レーザーを使用することから、商品単価が安い食品向けの装置としては、装置コストが高いことが難点となっている。赤外線計測装置を流用するテラヘルツ波FT-IRは比較的安価で、現場向け装置への展開が見込まれるが、セラミック光源の光量を大きくできないため、検出感度を表わす信号雑音比（S/N）が低くなる。したがって、安定した計測を行うためには測定対象に応じた測定ノウハウの蓄積が必要となる。

本研究では、工業試験場に導入したFT-IRを用い、食品等に含まれる成分を安定して計測するための基礎技術の開発を行った。

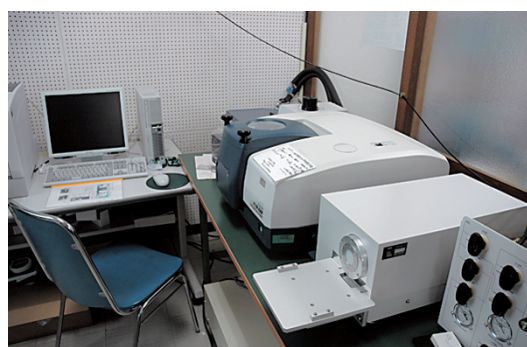


図2 遠赤外線領域FT-IR計測器

3. テラヘルツ波による計測

FT-IRを用いた計測においては、サンプルの形態や予想される吸光度の大きさに応じて、最適な計測法を選択する必要がある。本研究では、下記の2方式で測定法開発を行った。

- ATR（減衰全反射）法
……………高吸光度のサンプル全般用
- 透過法（液膜透過法）
……………低吸光度の液体計測用

FT-IRを用いた測定の流れは下記の通りである。

- ① テラヘルツ光強度の基準となる、サンプル無し状態での測定値（エアリファレンス値）を計測
- ② サンプルをセットし、信号強度を計測（シングルビーム値）
- ③ サンプルを複数回測定
- ④ サンプル測定終了後、再度、エアリファレンス値の計測
- ⑤ サンプルシングルビーム値をエアリファレンス値で除算し、試料の透過率計算
- ⑥ （ATR法の場合）プリズム透過率を考慮したATR補正の実施
- ⑦ ノイズ低減処理
- ⑧ 吸光度算出
（※測定時には試料室の真空引きを行う必要がある）

3.1 ATR法による計測

ATR法はシリコン等のプリズム上に試料を載せ、プリズムへ入射したテラヘルツ光が試料とプリズムの境界面で全反射する際に、エバネッセント波と呼ばれる電磁界の「しみだし」が発生し、試料による吸収が生じることを利用した計測法で、液体、固体、気体など幅広い試料に対応できる（図3）。ATRプリズム中の多重反射回数により1回ATR、3回ATR等に区別される。

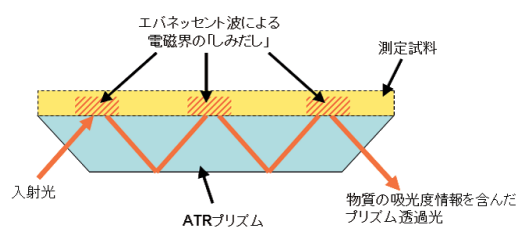


図3 ATR法測定原理

ATR法により食品計測を行う場合、測定試料とプリズムの密着が重要となり、特にゲル状物質では密着状態を適切に保つことが難しい。本研究ではサンプル量の最適化を行い、プリズム上に均質に塗布する方法を開発することで、高粘度のゲル状試料でも安定した計測が可能となった。一例として、ゲル状のアルギン酸水溶液の濃度を0.2%、1%、10%と変えた際の吸光度を図4に示す。濃度に応じて吸光度が変化していることが分かる。また同一濃度のサンプルに対して、安定した計測が実現できている（図の濃度10%①、②）。

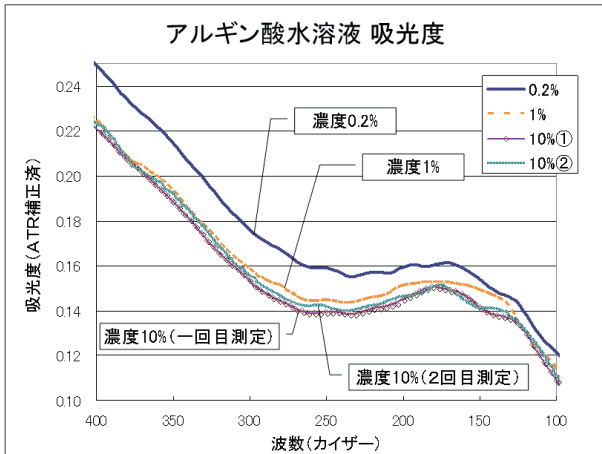


図4 ATR法によるアルギン酸水溶液吸光度測定

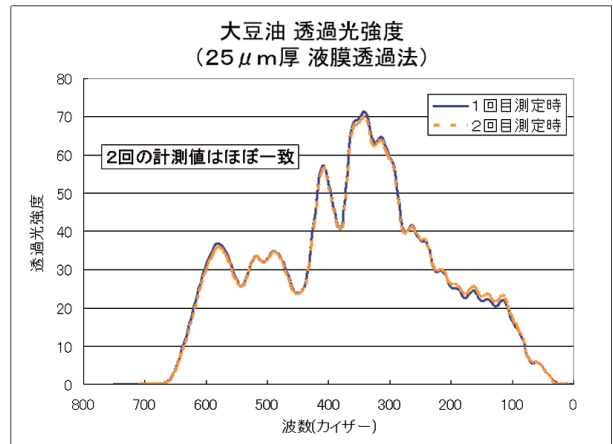


図6 大豆油 (試薬) の透過光強度

3.2 透過法による計測

ATR法による吸光度計測は、測定対象物を幅広く選ぶことができるが、プリズムの入射面の面積が小さいことと、電磁界のしみ出し現象を利用する原理的な問題から測定のス/Nが小さくなり、油脂など吸光度が小さい物質に対しては測定誤差が非常に大きくなる。このような物質を計測するには、サンプルにテラヘルツ波を直接照射し、透過光により吸光度を計測する方法（透過法）が有効となる。透過法ではサンプルの厚さが不均一であると測定結果が大きく変動するため、図5の様に板（セル窓）で液体を挟み込み、スペーサにより液膜の厚さを調整し、一定厚の液膜を形成する手法が有効である（液膜透過法）。

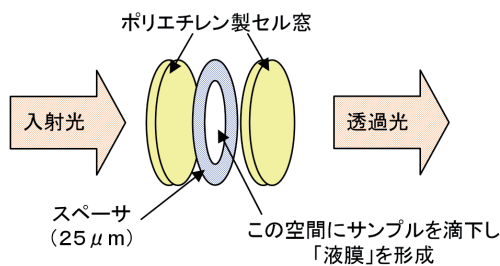


図5 液膜透過法の測定原理

液膜透過法は表面張力が大きい水溶液に対しては適切な測定が可能であるが、液体油脂など表面張力が小さく、浸透性が強い液体では、セル窓とスペーサ間にサンプルが浸出するため液膜厚を均質に保つのが難しくなり、不向きとされてきた。本研究ではサンプル滴下方法を改良し、2つのセル窓に別々に少量サンプルを滴下後、速やかに一定圧で挟み込むことにより、液体油脂に対しても安定して液膜を形成する手法を開発した。この手法を用いて大豆油試薬の透過光強度を計測した例を図6に示す。日時を置いて計測した2つの結果はほぼ一致しており、高い計測安定性が達成できていることが分かる。

また、図6と同じ大豆油試薬を、ATR法と透過液膜法で比較計測した結果を図7に示す。ATR法ではS/Nが低いいため、吸光度値は非常に誤差が大きく、全帯域で計測不能となっている。液膜透過法では40~650cm⁻¹の全域に渡り、安定した計測結果が得られている。

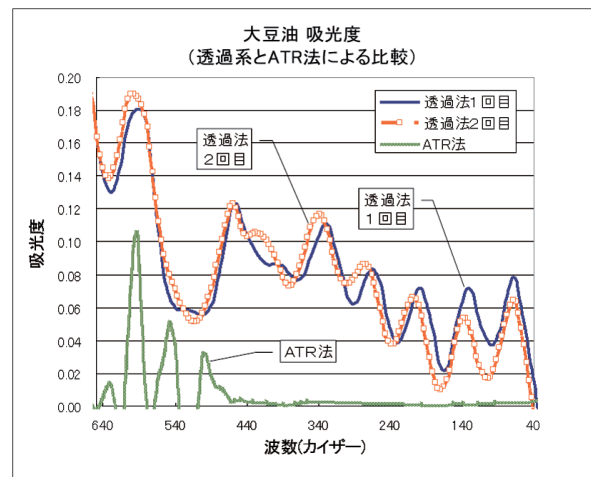


図7 大豆油 (試薬) の吸光度

4 まとめ

本研究では、テラヘルツ波の比較的安価な計測器であるFT-IRを用い、食品内成分を安定して計測する技術を開発した。テラヘルツ波領域では分子全体の振動状態を捉えることができることから、タンパク質などの高分子構造や、生体における水分子との相互作用など、これまで計測できなかった現象をセンシングできる可能性があり、食品計測への適用が期待されている。

食料基地としての北海道において、生産性や付加価値の向上、品質安定化のために、新たな計測技術の開発が求められている。この需要に応えられる可能性を持つテラヘルツ計測技術の開発は、我々にとって重要な課題であり、今後も計測

精度の向上，および実用化に向けて研究開発を継続する予定である。

謝辞

テラヘルツ計測技術の開発にあたり，ご指導を頂いた京都大学大学院農学研究科 小川雄一先生に，深く御礼を申し上げます。

またサンプルのご提供ならびに測定にあたり多大なご尽力を頂いた北海道大学大学院水産科学研究院 高橋是太郎先生，長崎諒氏に，心より感謝致します。