テラヘルツ領域分光技術を応用した地質環境調査に関する基礎的研究

研究代表者　京都大学大学院エネルギー科学研究科　助教　陳友晴
研究協力者　関西大学総合情報学部　教授　伊藤俊秀
秋田大学国際資源学教育研究センター　准教授　別所昌彦

1. 緒言

近年、環境中に存在する汚染物質の簡便迅速でなおかつ安全な検出手法が求められている。本研究は、近年研究開発が進められ、進展の著しいテラヘルツ領域分光技術およびその技術を適用した装置を応用して、岩石や土壌などの地質環境中に存在する汚染物質の同定・定量手法を検討するための基礎的研究である。

これまで、テラヘルツ周波数領域は未踏光学領域とよばれ、他の周波数領域に比べて取得された分光スペクトルの情報が圧倒的に少なく、有効なデータベースも構築されていない。ところが、近年の材料工学、レーザー工学の長足の進歩により、テラヘルツ領域の電磁波を精度良く発生、検出することができるようになった [1-6]。このように、種々の問題の解決にむけて実用段階の直前まで進んできている当該技術について、より多くの基礎研究、適用事例が望まれている。

一方、持続可能で環境調和型の社会の実現のためには、環境モニタリングやアセスメント等において、現場でも適用できる安全かつ迅速簡便な物質の検出及び定量手法の開発が必要である。しかしながら、従来より行われている化学分析やエックス線を用いる物質同定・定量手法は、必ずしもこれらの条件を十分に満足しているとは言い難い。テラヘルツ波の分光技術は、これらの問題を解決する新しい技術として適用できる可能性を秘めている。とくに、テラヘルツ波はエックス線と異なり生体へのダメージがほとんどないことが示されており、その有用性は大きい。ところが、テラヘルツ領域分光技術を適用して、地質環境中の含有物の検出・定量を目指し、道筋をつけるような研究は今までのところほとんど見当たらない [7]。そこで、当該技術を環境汚染物質の検出及び定量に応用するため、代表的な物質の分光スペクトルの取得を行い、実用化するために必要な諸条件を検討することを目的として基礎的な研究を実施した。

2. テラヘルツ波技術

2.1 テラヘルツ波

テラヘルツ波（もしくはテラヘルツ光）とは、文字通り周波数がテラ（10^{12}）ヘルツオーダーの電磁波のことであり、研究の対象とする事象によって若干の違いはあるものの、

通常 0.1～100THz 程度の周波数（波長として 3～0.003mm）をもつ波を指す。実際は、「光」と「電波」の境界付近の波長の電磁波であり、光と電波の双方の特徴を有していると考えることができる。なお、本報告では、光学的な側面からも議論を展開するが、テラヘルツ光ではなく、テラヘルツ波と表記する。

テラヘルツ波の特性を考えるにあたり、光としての側面からみると、この帯域は概ね中赤外～遠赤外の領域を含む光であり、分光技術が利用できる。一方、電波としての特性から考えると、この帯域はミリ波よりもさらに周波数の高いサブミリ波と呼ばれる領域であり、通信技術の高密度化や集積回路の高性能化などを目的として技術開発が進められている。

本研究で目的としている物質の同定や定量に使われるテラヘルツ波の特性の一つは、この帯域における物質による吸収スペクトルの存在である。いくつかの物質について特徴的な「指紋スペクトル（吸収スペクトル帯)」の存在が判明しており、幅広いセンシング技術への応用が見込まれている [1-3]。テラヘルツ帯域でのスペクトルは、基本的に 0.1～10THz 程度までの分子間相互作用の振動による影響、2THz 程度までの分子の回転によるスペクトル、それよりも高周波数帯域である 20～200THz を中心とした分子内の局所的な振動に起因するスペクトルなどが考えられる。小さくて軽い分子の回転スペクトルと大きくて重い分子や高分子の振動スペクトルがよく観測される [4-6]。

テラヘルツ波の重要な特徴の１つとして、生体に有害な影響が少ないことが挙げられる [4,8]。テラヘルツ波より周波数の低いマイクロ波では、全身共振現象あるいは局所加熱などの可能性があるが、テラヘルツ帯域ではこれらの物理現象は生じない。また、テラヘルツ波は、生体への浸透深さが浅く、眼球組織、皮膚以外はほとんど影響を受けない。人体に関しては、皮膚の防護機能が働く帯域の電磁波である。さらに、テラヘルツ波は、エックス線やガンマ線などと異なり、照射エネルギーによる電離の考えられない非電離放射線である。また、テラヘルツ波が地質環境の調査に適すると考えられる点は、適度な物質透過能をもつことである。エックス線ほど強く透過するわけではなく、逆に可視光のようにほとんど透過しないわけでもない。調査に必要と考えられる表面及びその近傍の情報を効率的に取得できる可能性が高い。

2.2 テラヘルツ波技術の現状

テラヘルツ波技術とは, テラヘルツホトニクス, テラヘルツエレクトロニクスに加えて, テラヘルツ波の発生，検出技術などを中心とするテラヘルツ波工学を融合し，情報通信，医療，産業，環境などの分野に展開が期待される技術の総称である [4]。

これまでテラヘルツ周波数領域は未踏光学領域とよばれ、安価で良質な発生素子や検出素子がなかったことから、取得された分光スペクトルも数少なく、分光スペクトルや材料の物性との関連についての統合的なデータベースは構築されていない。この状況は、永ら

くテラヘルツギャップと呼ばれてきた。今後、テラヘルツ波技術を多くの産業応用へと発展させていくためには、理論的な考察は言うに及ばず、安定、廉価な発生・検出素子の開発、様々な物質の分光スペクトルの計測とデータベース化が必要である。

テラヘルツ波技術関連分野は、第 3 期科学技術基本計画（2006～2010 年度）における国家基幹技術の指定を受けるには至らなかったものの、科学技術・学術審議会「国として戦略的に推進すべき基幹技術に関する委員会」の 2004～2005 年における議論では、基幹技術の有力候補として調査され、2005 年には審議会内の研究計画・評価分科会中に、とくにリーディングプロジェクトである未踏光学開発創生プロジェクトの評価を行うための「未踏光学（テラヘルツ波学）開発・創生プロジェクト作業部会」が設置されており、その後様々な分野においても研究が加速している。現在、テラヘルツ波技術の応用研究として、薬物・危険物検知、農作物検査、DNA 分析、医療関連分野、医薬品検査、環境モニタリング、物性研究等の基礎科学分野など、幅広い分野で研究が進められている [4-6]。いずれの分野おいても、近年すすめられている高精度テラヘルツ発生源の開発と検出器の技術開発によって得られた成果を基礎として、2015 年までに多くの実用化技術の開発を目指している。社会ニーズ・産業ニーズの増大にともない、装置の量産化や高精度化、小型化が実現するものと推察され、他分野への波及効果も大きいと考えられている。

3. 計測機器の現状調査

はじめに、利用できる計測装置の調査を行った。日本国内においては、すでに数社が計測装置を市販しており、近年ますますの技術進展がみられていることが分かった。テラヘルツ領域のスペクトル計測は、従来の実験室内で研究用に組み上げる計測システムから、小型の室内計測装置を用いる調査へと実用化の段階を進んでいる。主に公開されている資料・情報を調査すると、海外における開発状況は、いわゆるセキュリティー分野（危険物の検知）に必要とする機器、物質検査すなわち分光器としての用途をなす機器なども開発の対象となっているが、国内においては、現時点は主として非破壊検査装置としての開発が進んでいるようである。テラヘルツ波を用いた 3 次元 CT システムも開発、市販されている。

ここ数年の特筆すべき点は、技術展望ではしばらく先と予想されていた可搬型の計測システムが販売開始されたことである。フィールドにおける地質環境調査には、可搬型の計測システムが有効な手段の一つになると考えられる。

4. テラヘルツ領域スペクトルの計測実験及び考察

4.1 計測機器

前章の調査を基に、本研究では JFE テクノリサーチ社より 2012 年に発売された小型可搬型のテラヘルツ帯スペクトル計測システム（TPS-15M）を利用することとした。本シ

ステムは、地質環境調査を行うために現場に搬入して計測を簡便に行うことができるシステムであるが、本報告では実験室内において行った計測結果を示す。装置の外観は図 1 に示す通りであり、従前のシステムと比べると持ち運びが容易にできるよう工夫がされている。

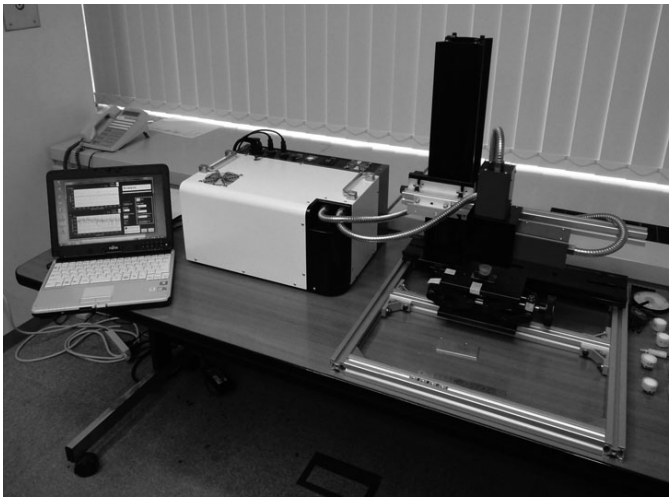

図 1　小型可搬型テラヘルツ帯スペクトル計測システム
（JFE テクノリサーチ社製 TPS-15M）

測定の概要は、テラヘルツパルス波の発振・受信それぞれを行うセンサーヘッドを測定対象物に対し、反射または透過測定を行えるように設置することで、テラヘルツ波時間領域波形を測定する。また、その波形を高速フーリエ変換処理することによって、テラヘルツ波領域の分光スペクトルを得る。主たる測定の仕様としては、発振周波数帯域 0.1～2THz、測定時間 0.2 秒／サンプル、時間遅延距離 280 ピコ秒、データ点数 2048 点である。この他、測定時間、データ点数が半数となる高速モードを選択することができる。

4.2 実験結果

4.2.1 鉱物試料

地質環境調査を行うための基礎的なデータを得るため、典型的な造岩鉱物、金属鉱物数種を測定した。鉱物塊をおよそ 2.5mm 厚にカットし、表面を鏡面研磨した計測用サンプルを用意し、室温、大気中で反射スペクトルを測定した。

代表的な鉱物、すなわち石英(a)、斜長石（曹灰長石）(b)、正長石(c)、石灰石(d)、黄銅鉱(e)、黄鉄鉱(f)の測定結果は図 2 に示す通りである。大気中（計測時の湿度はおよそ 44%）の測定であるので、主として H_2O のスペクトルの影響を受けているが、対象ごとに異なる反射スペクトルが得られていることがよく分かる。このように、計測の精度については更なる検討を必要とするが、地質環境中の物質同定の可能性が示唆された。

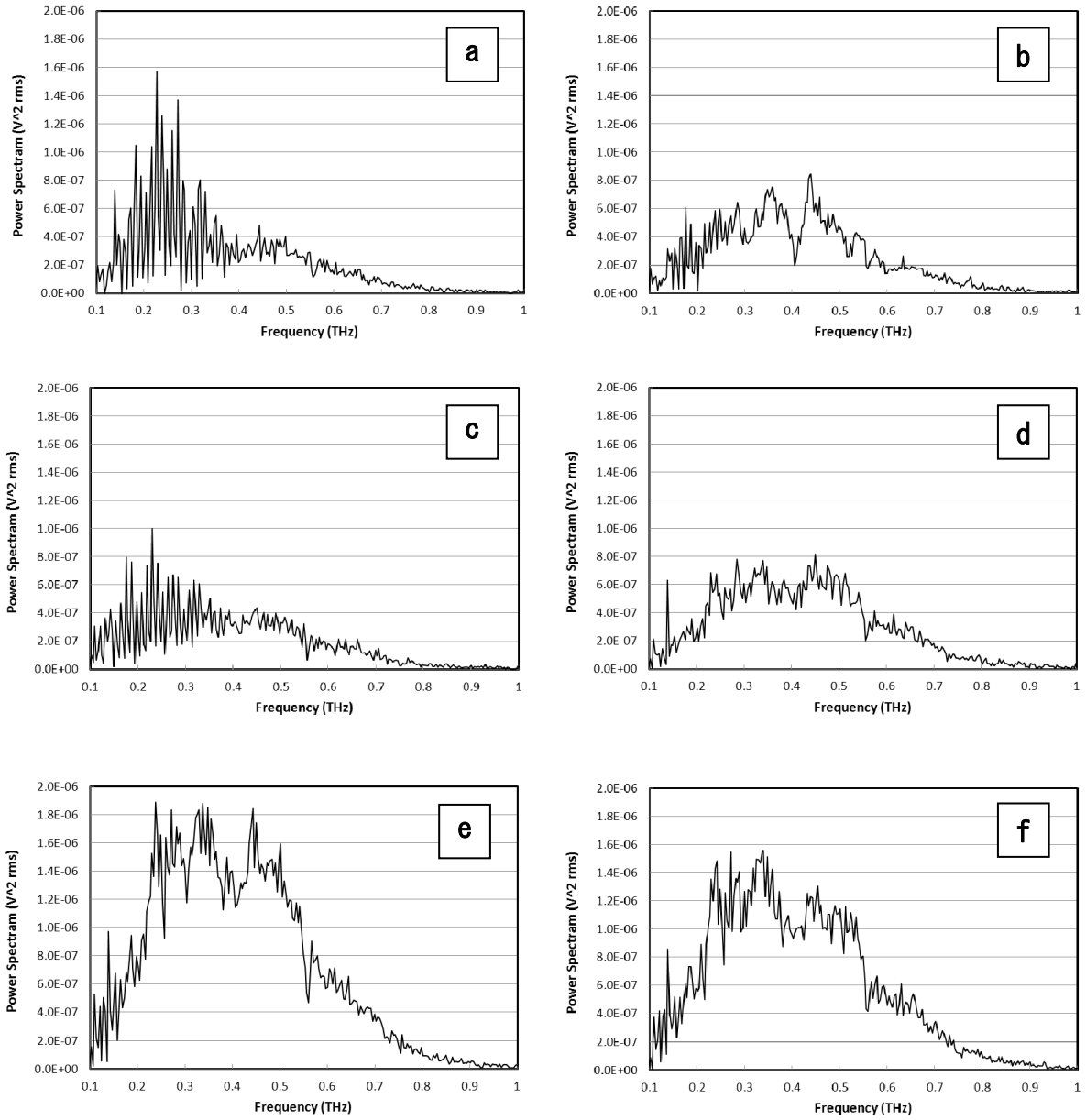

図 2　代表的な鉱物のテラヘルツ領域分光スペクトルの計測結果

(a) 石英、(b) 斜長石（曹灰長石）、(c) 正長石、(d) 石灰石、(e) 黄銅鉱、(f) 黄鉄鉱

4.2.2 包埋樹脂

地質環境調査において、計測条件を揃えるなどのために、サンプルを包埋・固定する必要が想定される。そこで、テラヘルツ領域において影響の少ない包埋樹脂について検討することとした。本報告では、評価の目安として、テラヘルツ波の樹脂への透過性能について、計測実験を行い検討した。

一般的に試料固定のために市販されている樹脂を用いて厚さの異なるテストピースを作成し、計測装置を透過設定（すなわちテラヘルツ波の発振子、受信子を対面に配置）とし、その光路にサンプルを入れて計測を行い、テラヘルツ波の透過による変化を評価した。ここでは、0.132THz におけるスペクトルの変化をレファレンス（サンプルを光路に入れない状態）値を１として正規化して比較した（図 3)。アクリル樹脂、エポキシ樹脂と比べて、ポリエチレンの減衰への影響が小さいことから、有効な包埋樹脂の候補となることが示唆された。

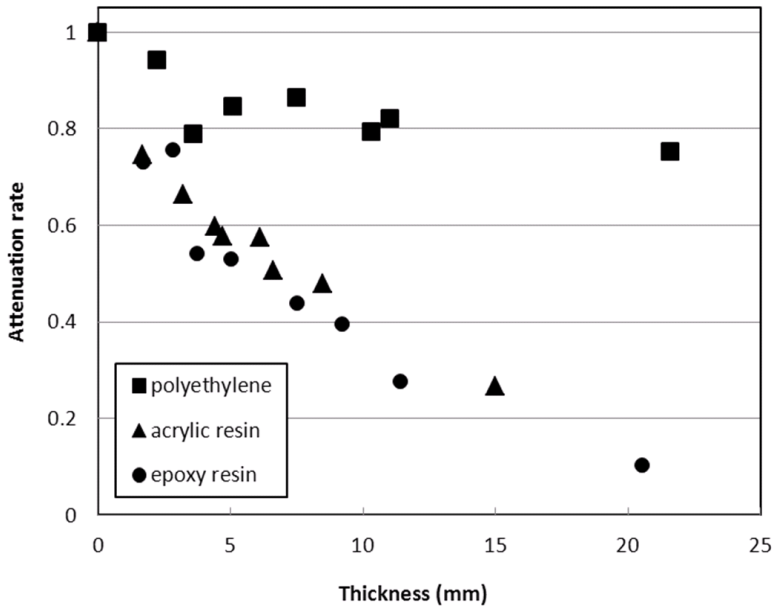

図 3　テラヘルツ波の各種包埋用樹脂による影響

５．結言

テラヘルツ波技術を適用して、環境中に存在する汚染物質の簡便迅速かつ安全な検出手法を確立することを目的として、基礎的な検討を行った。

まず、利用できる計測装置の調査を行った。日本国内においては、すでに数社が計測装置を市販しており、近年長足の勢いで技術進展がみられることが分かった。従来の実験室内で研究用に組み上げるスペクトル計測システムから、小型の室内計測装置を用いる調査へと、一部の計測対象にとっては実用化の段階に進んでいることがうかがえた。さらに、技術展望ではしばらく先と予想されていた可搬型の計測システムも販売された。そこで、本研究の計測は、これらの中から 2012 年に販売が開始された JFE テクノリサーチ社の小型可搬型の計測システム（TPS-15M）を用いて行うこととした。

つぎに、地質環境中の計測を行うために必要となる基礎的な計測データ取得のため、代表的な造岩鉱物のスペクトル計測を行った。0.1～2THz の領域においても、いくつかの鉱

物には特徴的な指紋スペクトルをもつものがあり、今後の計測技術の進歩によってこれらの計測、解析が簡便に行える可能性が示唆された。さらに、地質環境の現状から採取したサンプルを、より精度良く計測するために必要となるサンプル固定用の包埋材料を検討した。計測の結果、ポリエチレン樹脂がテラヘルツ帯域の波に対して透明度が高く、埋め込みサンプルの計測に利用できることが示唆された。

このように，基礎的なデータを蓄積すること、また今後行われる技術革新によって、将来的に十分適用可能な技術であることが明らかとなった。しかしながら、解決すべき課題も残されており、他の手法と相互補完的に利用することで、より効率的な地質環境調査を支援する技術であると考えられた。

謝辞

本研究は公益財団法人 JFE21 世紀財団の 2011 年度技術研究助成の支援によって行われました。また、テラヘルツ波スペクトルの計測および計測装置の情報収集については、JFE テクノリサーチ株式会社、株式会社アドバンテスト、大塚電子株式会社、有限会社スペクトルデザイン、古河機械金属株式会社の各社にご協力をいただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) P. H. Siegel: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **50**(2002), 910-928.
2) J. Nishizawa: Proc. Jpn. Acad., Ser.B, **80**(2004), 74-81.
3) J. Nishizawa: Proc. Jpn. Acad., Ser.B, **85**(2009), 454-465.
4) Teraherutsu Tekunorogi Doukoutyosa Iinkai: Teraherutsu Gijyutsu, (Ohmsha, Tokyo, 2006), 233p.
5) T. Ohmori: Teraherutsu Tekunorogi, (NTS, Tokyo, 2005), 454p.
6) J. Nishizawa: Teraherutsuha no Kiso to Ouyo, (Kougyo Tyosa Kai, Tokyo, 2005), 353p.
7) Y. Chen, M. Bessho, T. Ito, A. Hamano, and Y. Usuki: Journal of MMIJ, **127**(2011), 719-723.
8) G. P. Gallerano: Final Report of THz-BRIDGE, Quality of Life and Management of Living Resources, (2004), 72p.