

テラヘルツ波の新産業展開



特 集

大阪大学大学院基礎工学研究科
教授 永妻 忠夫

はじめに

斗内先生が体調を崩され講演できなくなったため、私が急きょ引き継ぐかたちで講演をすることになりました。斗内先生からいただいた資料に、少しでも追加した内容で講演をさせていただきます。役不足のところはご容赦ください。私は2007年4月に大阪大学に赴任しましたが、それまでは主にサブテラヘルツ波を使った通信についての研究をしておりました。テラヘルツ波が日本で注目され始めて5~6年が経過しようとしています。ようやく産業応用へ向けての芽が出てきたと感じています。

テラヘルツ波は、周波数で言いますと100 GHzからおよそ10 THzまでの電磁波と定義されています。私たちがこれまでに開発してきたマイクロ波の領域と光波領域との境界に位置する未開拓の電磁波領域です。20世紀に始まった電磁波開拓の歴史において電磁波の発生など技術的に最も取り扱いが難しい領域で、テラヘルツギャップとも呼ばれています。テラヘルツ波は大気中の水分や酸素分子などに吸収されるためマイクロ波のように遠くまで届きません。宇宙からも降り注いでいる電波ですが、大気減衰の少ない山の上でないと受信できません。また、太陽光のスペクトル成分もこの周波数領域になると大きく減衰します。そういった意味で、これまでテラヘルツ波はこの地球上では暗黒のとても静かな波の領域だったと言えるのではないのでしょうか。

なぜテラヘルツなのか

1 THzの周波数は、時間で言えば1 ps、波長では300 μm 、エネルギーでは4 meV、温度で50 Kに相当します。私たちの体温や環境は300 K内外ですから、テラヘルツ波のエネルギーは私たちの世界では「ゆらぎ」ほどの大きさということになります。

テラヘルツ波に対する興味をかき立てるものは何か。テラヘルツ波に何が期待されているのでしょうか。まず、私たち生体を構成している有機分子を始め、多くの分子がテラヘルツ帯で特有の共鳴吸収を

有していることが理由に挙げられます。すなわち、テラヘルツ波を使って分子レベルの物質識別ができるのではないかとということです。同時にX線のよう物質を透過する能力があるということも見逃せません。テラヘルツ波のエネルギーは上記のゆらぎの程度ですからX線に比べると安全な電磁波です。テラヘルツ波はこのようなセンシング技術への応用に加えて、情報通信への応用も重要です。マルチに始まる無線通信の歴史は、電波のキャリア周波数を高くすることで情報伝送量を増やしていくものでした。テラヘルツ波を使うことで、これまでよりも2~3桁高い10 Gb/s~100 Gb/sもの伝送容量が期待されています。もちろん、基礎科学の分野においても、未知の物理現象がこのテラヘルツ領域に潜んでいるのではないかと期待があります。テラヘルツ電磁波領域の開拓は21世紀の人類に託された大いなるチャレンジです。

テラヘルツ技術の展望

テラヘルツ技術の将来展望の中で、斗内先生は次の3つの技術分野を柱として挙げられています。1



講師 永妻 忠夫 氏

つめは、「テラヘルツ電磁波」と称される、現在のテラヘルツブームの契機となった技術分野。2つめは「テラヘルツフォトニクス」で、これは光波領域で培ってきた技術をテラヘルツ領域に生かしていくためのもの。3つめが「テラヘルツエレクトロニクス」で、従来の電子デバイス技術をどんどん高周波化することでテラヘルツ領域にアプローチする技術分野です。まずテラヘルツ電磁波の分野では、レーザー光によるテラヘルツ電磁波（主にパルス電磁波）の発生・検出技術が、テラヘルツ波の産業応用のブレークスルーをもたらしました。フォトニクス分野では、テラヘルツ帯で動作するガスレーザ、量子カスケードレーザ、フォトミキサといった技術が発展の担い手になっています。そしてエレクトロニクス分野では、半導体ダイオードやトランジスタを使った発振器、検出器などが挙げられます。これらの3つの分野が柱となって、お互いに融合しながら、テラヘルツ技術の発展を支えています。

ここで少し重複しますが、現在のテラヘルツ研究のブームを作り上げた重要技術を4つほど挙げてみたいと思います。まず筆頭は、「テラヘルツ時間領域分光法(Terahertz Time-Domain Spectroscopy: TDS)」と呼ばれる技術です。詳しくは後述しますが、これが契機となり1990年代、テラヘルツ電磁波がセンシングや分光に利用できるということが実証されました。次に2002年になって、テラヘルツ帯で動作する半導体レーザとして「量子カスケードレーザ」が出現し、テラヘルツ帯の連続(CW)波の発生が可能になりました。加えて、テラヘルツ帯で周波数を連続的に変えることのできる発生源がいくつか提案されています。本日講演される川瀬先生が開発されたパラメトリック発振器は非常に優れた技術ですが、その他にもこうした「周波数可変テラヘルツ波発生技術とその高出力化」が進展しています。「テラヘルツ帯半導体電子デバイス」も1THzに近い領域まで動作するようになってきました。これらがテラヘルツ技術の実用化・産業化に大きな期待感を抱かせており、基盤技術として私たちが手にしている技術だと思えます。

テラヘルツ技術の応用

日本だけでなく欧米においてもテラヘルツ技術の研究開発プロジェクトが進行していますが、その中

でテラヘルツ波の産業応用として期待されている分野としては、まず、製薬・バイオ・医療分野が挙げられます。具体的には、薬・タブレットの品質検査（内部やコーティング）、医薬品などの結晶多形のモニタ、皮膚・口腔がんのイメージング（正常細胞との正確な区別）、DNAのラベルフリー分析、バイオセンサーチップなどへの応用が有望視されています。



次に、安心・安全のための検査技術にも注目が集まっています。テラヘルツ波は、衣服やプラスチック板など（特に乾燥した水分を含まないもの）への透過性が良いので、X線に近いようなイメージングやカメラに利用できます。また、多くの材料ではテラヘルツ帯に材料固有の吸収周波数が存在するため、禁止薬物や爆発物の同定などで単に物体のイメージを見るだけでなく、その材料が何なのかを知ることができます。具体的には危険物質の非接触・非開封探知（パッケージ、手荷物、靴や衣服内の検査）、遠隔での危険ガス、バイオハザード分子の検出などが注目されています。

テラヘルツ波は、いずれにしても広い意味での非破壊検査技術の分野で早期に実用化されると思われます。X線との違いは安全性以外にもあります。例えば薄いプラスチック材料は、適度な透過性を有するテラヘルツ波の方がX線よりも鮮明に見ることができます。これまでに、スペースシャトルの断熱材検査、半導体基板材料の評価（移動度、キャリア濃度など）、ゴム・樹脂製品の欠陥検査・劣化診断、車体などの塗装膜の検査、衣服類の体へのフィッティングの検査、乾燥食品中の異物の探知、LSI部品

の内部欠陥・故障診断、それから文化財（絵画など）の分析・診断などに利用できることが報告されています。

以下では、それぞれの応用についてさらに詳しく説明していきたいと思えます。

情報通信分野では

情報通信分野ですが、ご存知のように情報通信の高速化の進展は今も留まることはありません。通信技術の高速化（ビットレート）の年代推移をプロットしてみると、光ファイバ基幹ネットワーク、メトロ・アクセス系を中心とするイーサネット、そして無線技術のいずれも右肩上がりのトレンドにあり、特に近年の無線の高速化の進展度は有線を凌ぐ勢いです。その結果、2010～2020年頃には有線と無線が同じビットレートに収斂していくような気配さえ感じられます。光ファイバ通信と無線通信とが同等の伝送スピードで繋がるというのが理想的なネットワークです。こうした光ファイバネットワークの補完やバックアップ、アクセスネットワークの補完以外にも高速無線に対するニーズが顕在化しています。それは、高精細画像（ハイビジョン）データを始めとする大容量のデータ伝送が、映像機器やストレージデバイスを扱う分野で必要になってきたことが背景にあります。放送現場やイベント会場では、光ファイバよりもテンポラリかつ低コストで敷設できる無線に大きな期待が寄せられています。今やコンシューマ向けのハイビジョンカメラも巷に溢れている時代ですから、私たちもカメラやストレージデバイスに蓄えられたデータをテラヘルツ無線で簡単に瞬時転送できるようになるかもしれません。こうした流れの中、米国IEEEがテラヘルツ波を通信に使うための標準化検討部会を2007年12月に発足しました。2～3カ月に1回のペースで米国を中心に会合が開催されています。

宇宙・環境計測

科学者や天文学者たちは、テラヘルツ波がブームになるずっと以前から宇宙・環境計測の分野で、テラヘルツ波を使って空から大気観測を行ったり、宇宙の果てからやってくる電波を観測してきました。

例えば星の一生と電磁波の発生には密接な関係があります。星ができる前の星間分子雲や原始星の頃

は、ミリ波やテラヘルツ波を発生します。やがて、それらは私たちが目にする（可視光から赤外光を発生する）発光星雲や若い星へと成長し、年老いた後、最後は超新星、ブラックホール、パルサーとしてX線を発生しながらその一生を終えます。テラヘルツ波には、星や宇宙の形成において最も重要な初期過程、すなわち星が生まれる所の情報が豊かに含まれているということになります。地球上ではこれまで簡単に発生できなかった電波が宇宙からやってきていた、考えてみれば非常に不思議な事実とも言えるでしょう。



テラヘルツ時間領域分光法とは何か

ここで「テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS)」について、もう少し詳しく説明しましょう。これを可能にした基盤技術のひとつは、1980年代に研究開発されたフェムト秒パルスレーザー技術、すなわち時間幅でフェムト秒オーダの光パルスを作る技術です。このフェムト秒光パルスを、非線形光学結晶や光伝導素子（通常はアンテナを付加）に照射すると、100フェムト秒オーダの電磁波パルス（多くはモノパルスに近い）が発生します。これを「テラヘルツ・エミッタ」と呼びます。一方、同じ非線形光学結晶（電気光学結晶）や光伝導素子は、発生させたテラヘルツ電磁波パルスを計測するための「ディテクタ（検出器）」としても用いることができます。フェムト秒光パルスを分岐させて、相対的な時間遅延を与えディテクタに照射することで、エミッタで発生させたテラヘルツ電磁波パルスの波形を時間領域で正確に計測することができます。この時間波形をフーリエ変換してみると、テラヘルツ帯の周波数スペ

クトルを持っていることが分かります。言い換えれば、100 GHz から数 THz までの広い周波数スペクトルを持った電磁波パルスを空中に飛ばし、それを計測する技術です。

ごく最近では、DAST と呼ばれる有機電気光学結晶を使ったエミッタと GaAs 光伝導素子を使ったディテクタを用い、これを5フェムト秒の光パルスにより動作させることで、100 THz ~ 150 THz もの周波数成分を有する電磁波を発生できることが報告されています。これは何を意味しているかと言えば、発生させた電磁波がテラヘルツ波を超えて近赤外光の領域にまで達していることです。すなわち電波と光波の境界周波数領域をまんべんなく覆うことが可能になったこととなります。

このエミッタとディテクタとの間に測定したい試料を挿入することにより分光計測が可能となります。まず、試料の挿入の有無での時間波形を計測します。それぞれの時間波形をフーリエ変換して周波数スペクトルを求め、試料が無い時のデータで規格化すると、試料そのものの吸収スペクトルが求められます。さらに重要なことは、時間波形における位相の変化にも着目すると屈折率の実部も求まるということです。すなわち、複素屈折率(複素誘電率)の実部と虚部を同時に計測することが可能となります。チタン酸ストロンチウムやバリウムといった誘電体薄膜を例に取りますと、テラヘルツ帯での共鳴吸収は、分子の格子振動が起源になっています。実際にチタン酸ストロンチウムの測定結果では、低周波数帯で変化の無かった複素誘電率が、テラヘルツ帯になると周波数に対して大きく変化することが分かります。

THz-TDSの産業展開

THz-TDS は、産業応用として電子材料や工業材料の評価はもちろんのこと、最近、欧米で注目されている応用に、医薬品の分析があります。「結晶多形」といわれる現象があり、同一分子でありながら結晶中での分子の配列の仕方が異なるものを言います。成分は一緒でも分子構造により溶解性や効力が違うことから、医薬品を始めとするファインケミカル分野で重要な研究課題として注目されているものです。これをどのように見分けるのか。カルバマゼピンの例では、熱処理前後で結晶構造が変わるという現象をテラヘルツ帯で分光してみると、吸収ピー

クが1 THz 付近から数100 GHz までシフトする。これは異なる結晶構造に変化したということを示しています。中赤外では判別がつかず、従来までX線解析で行われていました。THz-TDS で簡便に見分けることができるようになったのは大きな進歩だと言えます。



イメージング技術

今までの応用の話は、どちらかといえば物質の材料が何なのかに興味があったのですが、それをさらに発展させたのがイメージング技術です。THz-TDS の光学系において、試料を動かしてテラヘルツ波の当たっている場所を変え、全体的な(不均一な)像の変化を2次元プロットしてみたのが、テラヘルツイメージングの始まりです。テラヘルツイメージングより低い周波数である30 GHz ~ 90 GHz のミリ波を使ったカメラが、すでに欧米を中心に実用化されています。カメラの解像度を上げるとともに、カメラ(レンズ)の大きさを小さくするには、周波数を高くしてテラヘルツ波帯に持って行くことが不可欠です。さらにテラヘルツカメラは、像だけでなくその物体材料が何かを同定することができるということもミリ波カメラには無い特長です。

研究室での取り組み

次の話題は斗内研究室での取り組みです。私がお話してよいのか迷っておりますが、少しでも簡単に触れてみたいと思います。THz-TDS を支えているのは、すでにご説明しましたようにフェムト秒パルスレーザ光源です。1980年代にパルスレーザ技術が一挙に進展するのですが、当時は非常に大型の装

置で高度な調整技術が必要なものでした。1日に30分～60分くらいしか連続して安定に動きませんでした。パルス幅は時代を経るとともに短くなり、最近ではファイバーレーザと呼ばれる非常にコンパクトな光源で10フェムト秒オーダーの光パルスが安定に出せるようになりました。斗内研では1.55 μm 帯のフェムト秒ファイバーレーザを用い、さらに光ファイバを光パルスの伝送に使ったコンパクトなTDSシステムが開発されています。そのほか各種非破壊検査や、LSIのテストシステムが開発されています。余談になりますが、私も1.55 μm 帯フォトニクス技術を利用したテラヘルツ無線通信の研究を行っています。

さて、この一覧表は斗内先生が編集・監修された「テラヘルツ技術」(オーム社)にある分光・分析技術のロードマップです。2004年にテラヘルツ技術動向調査委員会でもまとめたものなのですが、およそ5年が経過しました。その当時の予想は、現時点ではほぼ当たっているように思えます。詳しくは本書をご覧ください。

テラヘルツ領域の今後の課題と期待

テラヘルツ技術の産業応用のためには、これからさらに何に注力していく必要があるのか述べたいと思います。テラヘルツ波を発生する光源(エミッタ)のパワーはまだ十分ではありません。もっとパワーを出したい、そしてもっと高感度に検出したい、しかもそれを室温デバイスで行うことが重要です。システム面では光ファイバを使ったシステムが実用化の鍵なると思います。汎用分析技術という観点では、データベースの充実や標準化が重要です。

最近の明るいニュースのひとつとして、高輝度テラヘルツパルス波の発生において大きなブレイクスルーがありました。これまでのテラヘルツのパワーに比べて1,000倍から10万倍のピークパワーが出るようになりました。特に、分光システムの高感度化は火急です。発生技術と同様に、検出技術において桁を超える感度のブレイクスルーが必要です。通常の分析装置のように少なくともppmの域まで到

達できないか期待しているところです。

テラヘルツ波は、いずれにしても最初に非破壊検査分野で実用技術としての地位を確立すると思います。国内においても、いくつかのメーカからTDSやイメージング装置が開発され、実用技術へと磨かれてきています。こういう材料を測れないか、こういう応用に利用できないか、それにはどういう技術改良が必要か、などについて真剣に議論するフェーズにあると思います。私たち学や官の研究者・技術者が、メーカやユーザと連携する体制が益々重要になってきたと思います。

また、電子デバイス(エレクトロニクス)からのアプローチがもっと活発になって欲しいと思います。光通信やマイクロ波・ミリ波通信のための電子デバイス技術では、日本のメーカは高い技術力を持っていますが、テラヘルツ帯まで開拓しようとする動きが欧米に比べて遅いように感じます。低コスト化には高周波半導体技術が欠かせません。加えて、MEMS技術やシリコンフォトニクス技術はテラヘルツ技術に非常に相性の良いものだと思います。テラヘルツ帯機能IC、テラヘルツシステムオンチップという概念を議論する時期に来ていると思っています。

おわりに

テラヘルツ技術の研究開発が国内で本格的に動き出しておよそ5年が経過しましたが、昨今の国内外の進展を見ますと、あと10年後には今描いている夢のかなりの方が現実になっているだろうと思われます。しかし、個人的には日本の技術力を結集することにより、もっともっとテラヘルツ波の産業化を加速したいと思います。本日の私の説明ではまだ不十分だったと思いますので、詳しくは斗内先生がまとめられた「テラヘルツ技術の現状と展望」(応用物理学会誌)や「テラヘルツ技術」(オーム社)などの文献をぜひご覧ください。本日は代理での講演となりましたが、最後までご清聴いただきありがとうございました。