

テラヘルツ市場の開拓 ～理化学機器から産業装置への展開～



特 集

(株)アドバンテスト 新企画商品開発室
シニアエンジニア 加藤 英志氏

● はじめに

私は10月末までアメリカに赴任しており、テラヘルツのビジネスと開拓、アプリケーションの開発を担当していましたが、11月から日本でテラヘルツ関連のビジネスを担当することになりました。本日の内容は、最初にアドバンテストの会社概要、テラヘルツのビジネス、これまで開発してきたテラヘルツのシステムの要素技術、産業応用システム市場の開拓の取り組みについてお話しします。

● 会社概要

株式会社アドバンテストは1954年に設立され、現在の主な事業内容は、半導体・部品テストシステム事業、メカトロニクス関連やサービス等です。社員数は全世界で4,638名です。主力製品は半導体検査装置で、半導体工場の最終工程において各種ICの全数検査するための装置です。現在半導体システムの主な市場は、アメリカ、韓国、中国、台湾、東南アジアなどで、それに伴い海外の売上比率は90%を超えており、ビジネスの展開をグローバルに行わなければならない状況になっています。

● アドバンテスト・テラヘルツ事業の歩み

アドバンテストがどのような技術を開発してきたかをこれから簡単に説明いたします。先端技術を先端で支えるというのが経営理念なのですが、会社の設立当初はDC計測技術や高速信号処理技術をもとに、スペクトラム・アナライザやネットワーク・アナライザを開発してきました。半導体の開発がトランジスタから、IC、LSIに移ってきたタイミングでは、そのICのテスト技術、それに関連するシステムのソフトウェアやメカトロニクス技術を開発して、現在の主力製品であるICテストシステムを製品化してきました。

光通信が立ち上がってきた1980年代ごろからこれらのデバイスの評価や試験に使われる光スペクトラム・アナライザなどの光計測技術を開発して、光

デバイスの評価、試験等に使っていただけるような光計測器というものを製品化してきました。本日紹介するテラヘルツの応用システムは、主にこれまで開発してきた光計測技術や電子計測技術を取り込んで新たに製品化したシステムとなります。

● テラヘルツシステム事業部の主な製品と事業分野

テラヘルツ事業自体がいつから開始したかと言いますと、2004年ごろから基礎研究に着手し、その開始当時のスタッフは3名でその中の一人が私です。その後基礎研究のフェーズを経て、テラヘルツの応用システムに必要な要素技術がどのようなものかを検討した上で、その要素技術を開発してプロトタイプを開発しました。実際に製品化してビジネスを開始したのは2009年頃からで、最初は自動車部品に使われるセラミック部品の検査用にテラヘルツのイメージングシステムを販売開始しました。その後、医薬品の市場を狙い、錠剤等を分光・イメージングする解析装置を製品化し、さらにその後産業応用に向けたフレキシブルなテラヘルツ測定システム、2014年には特定のアプリケーションのターゲット



講師 加藤 英志氏

を絞った専用システムを開発して製品化しました。

● テラヘルツの特徴

テラヘルツ波は医薬品等の有機物結晶等の分子間振動や結晶構造にかかわる指紋スペクトルを得られることや、他の波長に比べると適度な透過性、可視・赤外光より深部まで到達し、人体に対しても安全性が高いなどの特徴があります。テラヘルツと光の波長を比較すると、テラヘルツの方が100～1000倍長いことから測定対象物を広い領域で評価することができます。

● テラヘルツ市場の展望

我々はテラヘルツの技術を開発してビジネスにしようとしているので、テラヘルツの関連市場がどのように動いているかをマーケティングしました。BCCリサーチという会社のレポートでは、テラヘルツ関連事業は成長期の入り口の段階であるとされ、この5～10年の間に年率30%を超えるような成長率で伸びていくと予測されています。このレポートが注目している分野として非破壊試験、セキュリティ、バイオチップ、通信用のデバイスの市場が見込まれています。

新しい製品がどのように市場に受け入れられていくかというのを理解するためのモデルであるテクノロジーライフサイクルを用いて、我々のテラヘルツ事業がどのような位置にあるかを考察しました。市販のテラヘルツ分光装置はおよそ2000年頃に出てきたのですが、そういったシステムは先端の研究者や企業の中でも先端の研究分野でのみ取り入れられました。2010年頃にはテラヘルツの測定や分析等のビジネスは一つの壁に直面しており、その壁を乗



り越えることができれば、ビジネスが大きく広がっていくと考えられます。壁を乗り越えるためには、これまでの先端技術を積極的に取り込むユーザーだけではなく、それ以外の新たなユーザーにも広めていかなければなりません。新たなユーザーは、生産している製品のテストコストが価格に見合うかということに対してシビアになるため、製品の機能や性能だけを追い求めるという考え方を変えなければならず、そのため我々は現在どのようにビジネスを進めていくか検討しているところです。

● テラヘルツ波に期待されるニーズ

テラヘルツ波に期待されるニーズとしては、川瀬先生のお話の中にもあったような郵便物内の違法薬物の検査などの見えなかったものが見えることがあります。ボディチェックなどセキュリティに関しても有望視されていて、ビジネスの市場としても非常に大きなものになるのではないかと思います。

弊社が注目している産業応用分野は、短期・中期・長期と分けてターゲットを絞っています。ここ1～2年ですと、アカデミア分野など基礎研究に対するアプリケーションの開発や、比較的産業応用が進んでいると思われる半導体分野にも注目して、製品開発を進めていこうと考えています。その後産業応用の中でも特に量産ラインと言われるようなところでテラヘルツの導入が進んでいくと考えられていまして、例えば自動車の塗装膜の検査などに使われていくのではないかと思います。長期的には医療やバイオ系の応用が立ち上がってくるのではないかと考えています。

● 要素技術の開発

テラヘルツ関連のシステムを製品化する前にそのシステムに必要なコアとなる技術は何かということを検討し、戦略的にコア技術を開発しました。将来的に産業応用に利用されることを視野に入れて、システムに必要な機能は何であるかということを考え、これらを満たす技術を要素技術として開発しました。

▶ 要素技術1：超短パルスファイバレーザ

最初は超短パルスファイバレーザなのですが、アドバンテスト以外にもいくつかのメーカーからテラヘルツ時間領域分光システムが市販されていますが、それらのメーカーはファイバレーザ自体を販売して

いるメーカーであったり、それができないメーカーは外部からファイバレーザを買ってシステムを組んでいたりします。産業応用に向けたシステムを将来的にはビジネスにするということを考えると、テラヘルツを発生・検出するためのファイバレーザは非常に重要なコンポーネントであり、自前で制御できなければならない、コストも抑えなければならないということで自社開発することにしました。

基本構成は受動モードロックファイバレーザでして、50 fs以下の非常に短いパルス幅で低ジッタを実現しています。光伝導素子や我々が開発した広帯域のテラヘルツの発生器を励起するのに十分なパワーが得られています。開発したファイバレーザのモジュールは、コンパクトPCIに収まるほど小型です。

➤ 要素技術2：高速測定技術

産業応用を考えると高速にテラヘルツをサンプリングできることが重要になります。従来のテラヘルツTDS方式では、1台のパルスレーザと機械式遅延が用いられていましたが、弊社では、先ほど紹介したパルス光源を2台使い、繰り返し周波数を電気的に制御することでサンプリングを行います。このサンプリングの速さは、それぞれの繰り返し周波数の差周波の逆数で決まりまして、最高でmsオーダーで波形を取得できるようになりました。

➤ 要素技術3：広帯域テラヘルツ波発生技術

広帯域テラヘルツ波光源は共同研究で開発された技術をモジュール化しまして、実際のテラヘルツのシステムに搭載しています。自社開発のレーザと組み合わせ実際に得られたテラヘルツスペクトルは、従来の光伝導アンテナがおよそ4THzの帯域を持っているのに対し、LiNbO₃導波路を用いた広帯域テラヘルツ波光源は約7THzまでスペクトルが伸びています。

● テラヘルツ分光システムと光サンプリングシステム

このように我々が開発した要素技術を組み込んで、テラヘルツ分光システムや将来産業用に用いることができるような光サンプリングシステムを製品化しました。これらの装置はキースイッチを入れればレーザが自動的にウォームアップされ、安定したテラヘルツ測定ができるようになっています。光学系はほとんど光ファイバで構成されているので、堅牢な

システムであると言えます。

● 産業応用システム市場の開拓

次に産業応用システム市場の開拓に関して、弊社の活動をいくつか紹介いたします。

➤ 自動車部品開発におけるTHz-CTの応用

自動車部品であるディーゼルエンジンフィルタのイメージングシステムを開発しました。近年環境規制等によりディーゼルエンジンは排ガスを浄化するシステムが搭載されています。そこにはセラミック製のディーゼルエンジンフィルタが使用されています。トラックなどになると直径が200～300mmの大きさになります。多孔質のセラミックでハニカム構造になっており、ガスが入っていくところと出ていくところでそれぞれの穴が入れ子にふたがされているような状態になっています。この部分にエンジンからの排ガスが入ってくると、多孔質のセラミックの壁を抜け、その際にスス等の粒子状物質がトラップされ排出されます。長い間利用しているとススが堆積するのでそれを取り除かなければならないのですが、取り除くためにエンジンを強制燃焼させてススを高温にして燃やすことで再利用する仕組みになっています。このような後処理システムを開発するうえで、どのようにフィルタにススが溜まり、どのように再生されるかということの評価しなければなりません。これまではフィルタを実際にカットして重さを測り、重さがどのように変化するかを調べて評価していました。しかし、これだと手間や時間がかかり、さらにこの一つのフィルタを用いて別の評価をすることができなくなるという問題があります。そこで非破壊でイメージングする手法がないかと要求があり、我々はディーゼルエンジン



フィルタを3次元でイメージングする装置を開発しました。キーとなる技術はテラヘルツ波を用いたCT技術で、これは既にX線で実用化されているX線CTと似た技術を採用しています。ラドン変換により、サンプルの回転角ごとに得られたラインスキャンデータから2D断面画像を再構成し、高さごとの断層像を重ね合わせ3次元表示させています。市場回収したディーゼルエンジンフィルタを実際に解析したのですが、ディーゼルエンジンフィルタ内のススの堆積具合や灰分が底面に堆積していることが分かりました。

▶ 医薬品錠剤開発における溶出性評価とテラヘルツ応用

医薬品が人の飲める形になるには、製剤研究というフェーズを経て錠剤等が作られるわけですが、人に有効な成分が見つかったとしても、それが適切に体内に取り込まれなければ意味がありません。医薬品が体内で適切に取り込まれるためには、溶出を制御しなければならず、溶出性に影響する因子としては結晶多形や、錠剤のコーティングがあります。結晶多形は、分子式が同じ医薬品であっても結晶構造が異なる物で、この違いが溶出性に影響を与えます。テラヘルツはこのような結晶多形を見分けたり、錠剤のコーティングの厚さを非破壊で解析したりすることに関して有効であると言われています。

3つの結晶多形を持つトリブタミドという医薬品を用いてテラヘルツ分光を行った結果、それぞれの多形に応じて異なるスペクトルを得ることができました。従来法である粉末X回折法で結晶形を見分けることができますが、実際の製造現場の近くで例えばアットラインで評価することを考えたときには、前処理がどれだけ簡単にできるかということが重要になってきます。テラヘルツ分光は比較的簡単な前処理で分光ができるため期待されています。

錠剤コーティングの膜厚イメージング例なのですが、錠剤の溶出性を制御するために、錠剤にコーティングを施されることがあります。溶出性はその厚さを変えることで制御ができます。これまでは膜厚コーティングのプロセスでどれだけ膜厚が成長したか、あるいはコーティングの均一性を調べるために実際に錠剤を割って顕微鏡で調べていました。この方法だとより多くのサンプルを効率よく調べられないため、非破壊でより多くの膜厚を調べたいという



要求がありました。そこでマニピュレータで錠剤をつかんで全体をスキャンして膜厚を解析するテラヘルツイメージングシステムを開発しました。膜厚を解析する方法としてはTime of Flight (TOF) 方式を用いています。この装置は錠剤の膜厚をカラーマップで見ることができます。

● 半導体市場向け応用システム開発

近年ではスマートフォンやタブレットのようなモバイル機器やIoT関連製品が非常に市場で広がってきています。それに伴い、それらに用いられる半導体パッケージは小さく薄く高密度になって複雑化してきており、パッケージ品質のコントロールが難しくなっています。このような問題に対して我々は、パッケージのモールド厚の測定や配線故障検出にテラヘルツ技術が有効であると考え、それに特化したシステムの開発を行ってきました。

▶ 半導体応用1：半導体モールド厚測定

まず、半導体モールド厚測定に関してなのですが、従来の半導体パッケージングプロセスでどのように膜厚が調べられていたかと言いますと、最後のプロセスのところでカッティングして顕微鏡で実際に見るといった破壊検査を行っていました。この方法だと実際に評価できるサンプルの数は限られてきます。また、プロセスの最後で評価されるため、即時にプロセスにフィードバックして最適化することができないという問題がありました。理想とされるパッケージングプロセスは、プロセスの初期段階でモールドの厚さを非破壊・非接触で測定して、測定したサンプルも次の工程に回すことができるプロセスです。この方法では、より多くの測定を行うことができるため、信頼性の高いプロセスを確立することができ

ます。非破壊でモールド厚を測定することは、テラヘルツを用いれば容易に行うことができます。半導体のパッケージはプラスチックのような高分子材料でできているので、テラヘルツ波は容易に透過し、Si ダイや基板で反射してきます。モールド表面から返ってきたパルスとSi ダイで反射されたパルスの時間差と屈折率を考慮することで厚さを求めることができます。この原理を用いて、モールド厚を解析する専用のシステムを開発しました。「TS9000 シリーズモールド厚解析オプション」というシステムなのですが、半導体のモールド厚を非破壊で測定します。ストリップのような半導体サンプルだと複数個のチップが乗っているため、それを複数個測定することが可能です。一つのチップの中でも複数の点を測定することができます。実際の使い方としては、ユーザーが測定するポイントを座標等で指定し測定のレシピを作成し、システムにサンプルをロードして測定をスタートさせます。するとシステムはレシピ通りに膜厚を測定していきます。測定結果はエクセルのシートに出力され、ある膜厚の閾値を設けておくと、パスしたポイントと不良のポイントを見ることができます。

▶ 半導体応用2：テラヘルツ TDR 解析の原理

次に半導体の配線不良解析についてなのですが、近年半導体線幅が10 nmほどになってきており、業界では限界が近づいてきていると言われています。これを打ち破る一つの方法としては3D パッケージというものがあまして、この市場が拡大しています。それに伴い、特にインターコネクションの部分が高密度化して複雑化しています。

実際にある先端の半導体パッケージの不良解析のニーズですが、パッケージ内の不良や、インターポーターの実装部分の不良解析、積層メモリの中での配線不良の解析などのニーズがあります。それらを行うために、従来はオシロスコープなどにオプションでついていたTDRの機能が用いられており、このTDRは方形波をベースとした入力信号で立ち上がりの速さに限界がありました。しかし、テラヘルツの発生検出技術を用いることで非常に短いパルスを発生させ、それを被測定物に入力して反射してきた信号を検出することで、高分解能なTDR測定が

可能となりました。パルスの立ち上がりが非常に速く、12 psを達成しており、ジッタも40 fsと非常に小さく、これまでのTDRと比較すると桁ほど性能が良くなっています。

● まとめ

アドバンテストは新規事業としてテラヘルツ分光システムを開発して、これまでは主に研究分野で使用されてきました。今後は産業応用に向けたシステムを開発していきたいと考えています。

<質問>

- ✓ テラヘルツ波に期待されるニーズの一つとして建造物、インフラ診断という話がありましたが、現在取り組んでいることはあるのでしょうか。
 - ▶ 我々は実際には取り組んでいません。お話ししたのは一般的な情報を集めたものだったのですが、実際に取り組むかどうかはビジネスとして考えなければならぬため、どれだけのビジネスとしての価値があるかを慎重に考える必要があります。現段階では優先順位としては低いと考えています。
- ✓ 水素社会に向けた応用や、がん診断など健康の診断に応用される可能性はありますか。
 - ▶ 水素を用いた分野に直接テラヘルツが関わることがあるかどうかは、私の中では思いつかないのですが、特に発電の分野ですとガスタービンの耐熱性を上げるためにセラミックを加工しており、これらに対しテラヘルツを用いて非破壊で構造を分析するような評価を行ったことはあります。がん診断などに使用される見込みでは、この研究は韓国、中国でよく研究されており、生体のイメージングが良くされています。手術の時などにサンプルを取って組織を診断するような応用に関しては可能性があると思いますが、健康診断に使えるレベルではまだないと思っております。5～10年ほどはかかると考えています。