

煙の向こうをテラヘルツで見る？ －災害現場応用に向けて－



特 集

国立研究開発法人 情報通信研究機構 未来ICT研究所 フロンティア創造総合研究室
研究マネージャー 関根 徳彦氏

● はじめに

情報通信研究機構の関根です。これから災害現場の応用に向けてどのような取り組みを行っているかをご紹介します。

本日はお話しする内容は災害に向けたもので、イントロダクションでテラヘルツのリアルタイムイメージングをどういう思いで始めたのかをお話したいと思います。次にイメージングするには、照明と光源が必要であるという話をしまして、我々が光源として開発している量子カスケードレーザーを紹介いたします。そして、我々が検出器として採用している非冷却のボロメータなどのイメージャーの話をして、そして最後にテラヘルツ波のイメージング例を紹介いたします。

● テラヘルツカメラ：研究開発の動機

研究の動機としては、霧、砂嵐など多量の埃が発生している場所で、その先を見たい、例えば災害であれば、その先に倒れている人がいるかどうかを自分が入る前に知りたいというところにあります。車を運転する際に霧や砂嵐などで先が見えずに運転するのも危険です。また、砂嵐のところでヘリコプターが安全に着陸できるようにしたいなどもあるかと思います。可視では全く見えないため、電波を用いる試みはされてきたのですが、周波数が低いと分解能が下がってしまうので、そこを改善したいということがありました。高分解能で、災害などであれば可搬のほうが良く、短時間でイメージングできるのが理想です。そこで着目したのが、テラヘルツ帯の電波を使ってイメージングすることです。

● テラヘルツイメージングの課題

図1は、黒体輻射という、真っ黒な物体がある温度になったときに、どういうスペクトル分布の光を放射するか、というのを示しています。室温(300K)では、中赤外の光を一番強く放射します。テラヘルツ帯においては、例えば100 μm という波長は、周

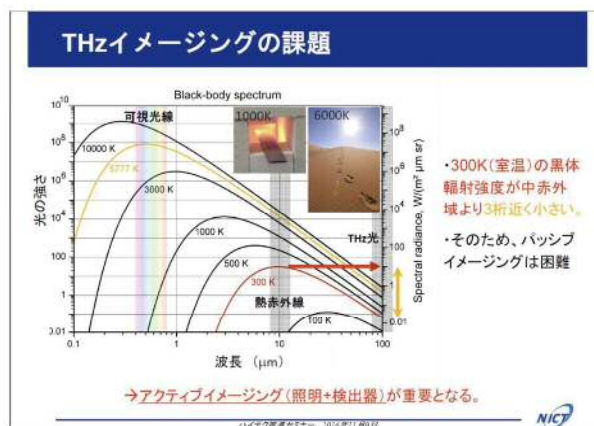


図1 黒体輻射

波数に直すと3 THzとなりますが、強度が中赤外と比べて3桁ほど下がってしまいます。もしテラヘルツ帯のカメラがうまくできたとしても、人に向けた場合、おそらく何も映りません。そのため、画像を撮れるようにするためには、照明が必要となります。照明ありきのイメージングは実は普通で、サーマルイメージャーという、物体が自ら発しているものを検出器で撮るものを皆さんよくご存じだと思うのですが、普段我々が目にしているのはアクティブイメージングです。我々が目にしているアクティブイメ



講師 関根 徳彦氏

ージングの照明が何かというと太陽でして、太陽が当たって物体から散乱したものを目やデジタルカメラでとらえています。こういうことがテラヘルツ帯でもできれば良いのではないかと考えています。空港の検査場では、今でもX線で検査していますが、更にアメリカではミリ波のイメージングも用いた検査場があり、最近だと必ず通ると思います。ミリ波の光を発して反対側で受け、それがラインセンサーになっていて、一周回ると、全方位で撮れるようになっていきます。

● テラヘルツ帯の照明

照明について、テラヘルツ帯の照明用光源は何でもいいのですが、強い光がなかなか出てこないというのがあります。図2は川瀬先生も最初にお見せ頂いたかと思うのですが、基本的に電子デバイス、つまり電子のトランスポートを利用したデバイスというのは、電子をどれだけ揺らせるかでパワーが決まってきます。早く揺らせば揺らすほど、揺らせる振幅が小さくなるためパワーが落ちてしまいます。一方、光デバイスの一つであるレーザーは、周波数が200 THz程度で、これは量子力学的に離れた2つのエネルギー準位の間を電子が光を発しながら落ちるということを利用して光を得ていますので、この間隔を狭めればどんどん中赤外からテラヘルツ帯に近づけるのですが、こうすると非発光過程が増えてきてしまい、どうしてもレーザー発振できず、パワーが落ちてしまいます。

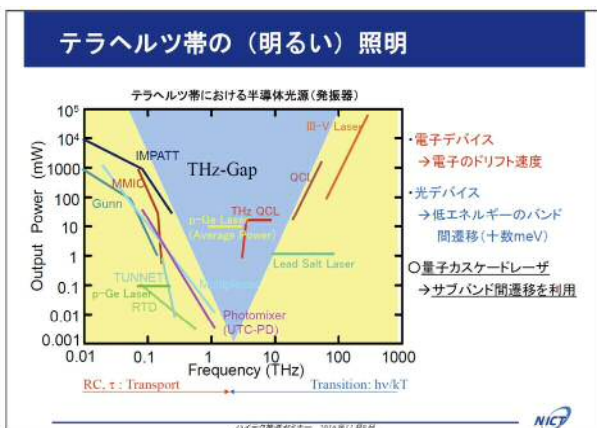


図2 テラヘルツ帯における半導体光源 (発振器)

● THz-QCL : 素子特性

しかし、10～20年ほど前に量子カスケードレー

ザー (Quantum Cascade Laser: QCL) が開発されました。これは通常の半導体レーザーと違い、例えば光通信に使われているレーザーは電子と正孔の発光再結合を利用しているのですが、QCL (図3) は、電子のみが異なるエネルギー準位間を落ちるだけで発光するという原理的に違うものを利用しており、これだと比較的狭い準位間で光を発生することができるので、2～5 THzのようなテラヘルツ光が得られるようになっていきます。QCLは、半導体の膜厚を制御することによってテラヘルツ帯の周波数帯をいくらかでも設定できるということで注目されているデバイスです。また、一回の遷移では光が弱いので、何度も重ねるという意味でカスケードという名前がついています。実際に作ったものはnmオーダーの厚みのものを10μmほど積まなければならないのですが、この1つのセットを少なくとも200回くらい繰り返さなければなりません。実際に発振させてみると、我々のところではパルス動作のピーク出力で20 mW以上、平均では、10数μWが得られています。発振周波数については、3.1 THzで比較的好いものができているので、これを光源として使います。

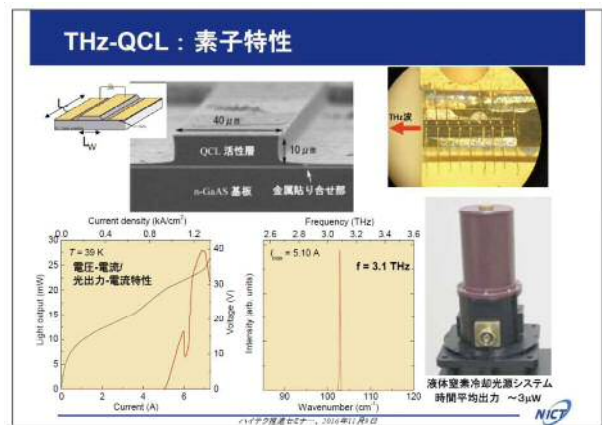


図3 THz-QCL

● 非冷却マイクロボロメータ (THz 検出器)

先ほど言いましたように、アクティブイメージングを考えているので、照明とディテクターのセットがあります。照明は量子カスケードレーザーができたので、あとは受け側なのですが、ここではボロメータにしました。ボロメータはどのような検出器かと言いますと、電波を素子に吸収させていったん熱に変換し、熱によって変わった抵抗を電圧や電流で

読みだすということをしています。そしてこれを並べることでイメージャーとして用いることにしました。ポロメータは真空にしないと熱が逃げってしまうので、封止窓として中赤外だとゲルマニウムを使うのですが、テラヘルツ帯では高抵抗のシリコンを用います。

● 熱い煙を通した THz 遠隔イメージング

実際使うときには、透過配置よりも、反射配置のほうが扱いやすいことがあります。そこで、金属を用いて反射をとってみると、金属なので絶対反射するのですが、中国の硬貨を用いて行ったとき、しっかりと1という数字が見えました。理研の方と一緒に行った実験では、黒体炉を持ってきてその中に Suica や千円札を置くとしっかりと像が見えるということをチェックしました。これを使って、実際に災害に使えるのかという話をこれからします。

実証したかったことは、災害の状況でイメージングできるのか、言い換えると、熱い煙を通してイメージングできるかということです。ものを燃やして煙が充満している中で、可視や中赤外、テラヘルツがどのような見え方をするのかというのを行いました。煙が蔓延しているところに人がいるかないか分からないのに助けに行くと二次災害が起きることは避けたいということから、助けに行く前にチェックすることができるかどうか重要になってきます。

実証実験は東京理科大学の火災科学研究センターをお借りして実験しました。人が入れるほど大きなテストチャンバーがありまして、さらに外側にセンターの建物があり、とても大きい設備なのですが、このような設備を用いて実験を行いました(図4)。ここでは、ものを燃やして煙が充満しているところにテラヘルツ波を出して、戻ってきたものを見るということをして煙の有り、無しで行いました。普段実験では、レーザーのパワーが欲しいので液体ヘリウムで冷やすのですが、今回は携行性の観点から液体窒素冷却で QCL を動作させ、戻ってきた光をカメラで撮影することを行いました。

チャンバーの中には反射板を置きました。比較のためにテラヘルツカメラ、可視カメラ、赤外カメラの3つを用いて撮影を行いました(図5)。煙が発生するにつれて、可視カメラでは見えなくなりました。赤外カメラも最初は反射板が見えていたのです

が、温度が上がると煙や土台など部屋の中にあるものが発光をはじめ、反射板との区別がつかなくなってしまいました。テラヘルツカメラの場合、温度が上がっても急にバックグラウンドは上がらないため、温度の影響を受けずにしっかりと反射板を判別できることが分かりました。テラヘルツを人命救助の技術にするためには、まだ改善すべき点もありますが、今回の実験により火災現場で人を救う技術の一つにはなるという可能性を示すことができました。

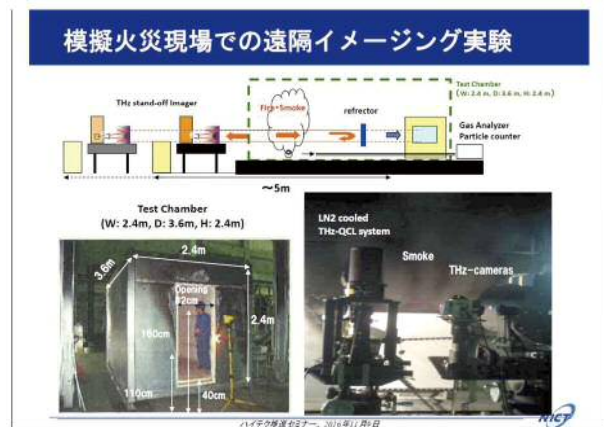


図4 模擬火災現場での遠隔イメージング実験



図5 模擬火災現場での遠隔イメージング実験結果

● 低周波 THz 帯 (~数百 GHz)

図6は大気の透過スペクトルを表しているのですが、3 THzだとほとんど透過しないことが分かります。しかし、低周波側を見てみると大気透過率が上がります。災害現場では距離をとる必要があるため、大気透過の点において低周波数の方が有利であると考えました。そのため、次にテラヘルツカメラの低周波化を行いました。

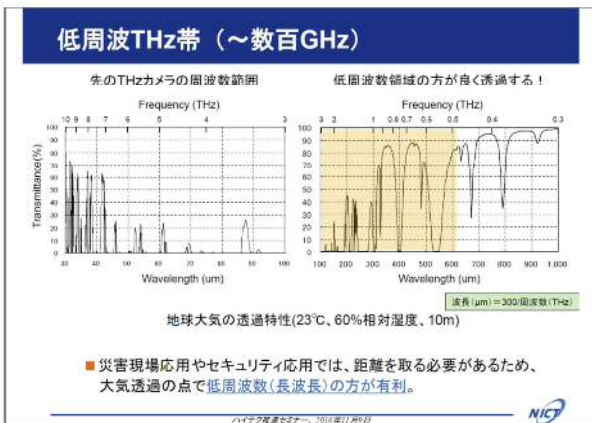


図6 テラヘルツ帯の透過スペクトル

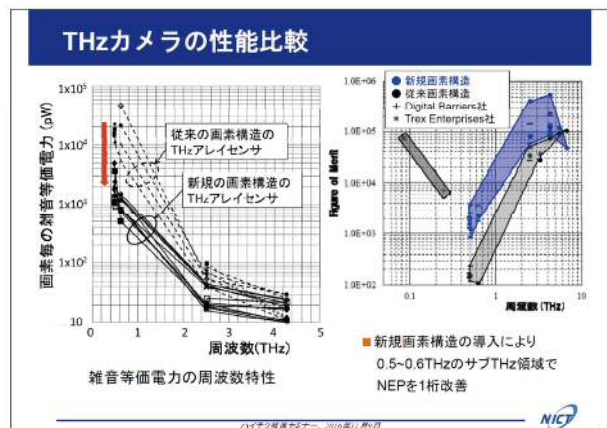


図7 THz カメラの性能比較

● THz カメラの低周波化

低周波のイメージャーは電波の検出器を使ったものがあります。このようなイメージャーは現在、250 GHz くらいまでのものができており、性能も良いのですが、どうしても装置が大きくなってしまいます。我々がこれまで作ってきたテラヘルツイメージャーの装置はそれに比べ小さいのですが、1 THz を下回ると感度が下がってしまうため、1 THz よりも低いところで感度を上げることを目的に開発を進めました。

ポロメーター素子の底面には読み出し回路など配線がいろいろあり、反射膜のようになっています。この部分でうまく共振するような形にして、波長をテラヘルツよりも少し下の部分で合うようにすれば感度が上がるのではないかと考えました。一番簡単には底の高さを上げればよいのですが、空間で上げると機械的強度が弱くなるので、実際に行ったのは、下地に誘電体を挟み実質的な光路長を $\lambda/2$ に持っていました。素子ができれば、カメラにするのは、3 THz 帯のもので作ることはできているので、それと同様に作りました。

このカメラ雑音等価電力が図7になっており、小さければ小さいほど良いのですが、従来のものより1桁ほど改善することができました。性能指数をみると、先ほど述べた250 GHz くらいのところで、電波のものとそれほど変わらない値のところまで改善することができました。

● 模擬セキュリティ下でのイメージング

この低周波帯を改善したテラヘルツカメラを用い

て、ダンボールや封書の中身が見えるかという実験を行いました。今回の実験では、透過と反射のイメージが両方撮れるようにしました。ダンボールにセラミックナイフを挟み込み実験をしたのですが、なぜセラミックスかと言いますと、金属ナイフだとの波長でも反射するのですが、テラヘルツ帯の特徴を示すためセラミックスを選びました。現状では撮像の範囲が狭いため、ナイフ全体を見るためには位置を動かさなければならないため、図8のようになっています。カメラが移動する分だけ時間はかかるのですが、一画面としてはほとんどリアルタイムで処理することができます。反射は光源のコヒーレンスにより干渉縞ができて少し見え難くなっていますが、しっかり撮れることが分かりました。この実験は、金属ではなくセラミックスで良好な画像を取得できたことに意味があり、もちろん、剃刀やカッターのような金属でも良好な画像を撮ることが出来ます。

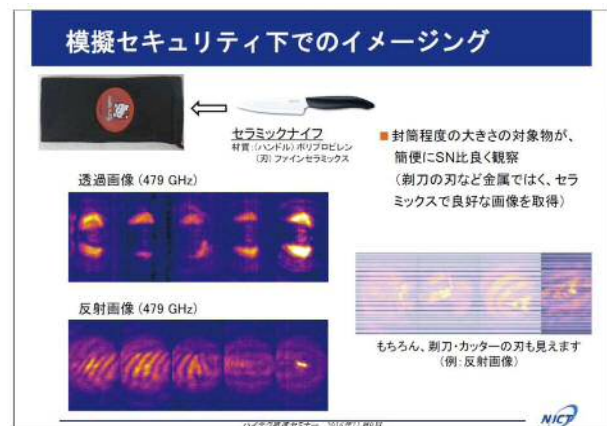


図8 模擬セキュリティ下でのイメージング

● 増幅器の開発

一つの画像を取得するのは速いのですが、全体を撮るのが遅いのは、光源が弱く一度に大面積が照射できないためです。カメラは室温で動くという条件付きのものの中では高感度のものができていると我々は思っているのですが、照明となる光源が弱いということで、次に増幅器に着目しました。まずは100 GHzで始めました。使っているのは真空管の増幅器です。真空管と言いますとかなり大きなものを作らなければならないというイメージがありますが、100 GHzや数百 GHzだと波長が短くなるため、全体の大きさもコンパクトになります。もちろんパワーは低周波のときに比べて下がるのですが、そもそも真空管の増幅器は何百 W も出しているのです。そこから下がったとしても数 W 以上出すことができます。そのため、QCLなどに比べると大きくパワーを上げることができます。真空管を用いて実際に作ったのを見ると、88～93 GHzの帯域で5 W以上出すことができました。真空管増幅器内部は真空中で、電波が波型に進んでおり、電子ビームはまっすぐ出ています。相互作用長を長く取るために、電波と電子で異なる通し方をしているのですが、このように通すことによって、電子のエネルギーが電波に移って電波のパワーが増幅されます。

● W帯イメージング測定

先ほどのテラヘルツカメラは、パワーが弱かったため面積を絞り、少しずつしか撮影できなかったのですが、真空管増幅器を用いることで、一度で撮れるようになります。80～90 GHzのカメラがなかったため、100 GHzのイメージングを撮れる装置を作っている TeraSense というロシアの会社からイメージャーを借りて実験を行いました。光源は光技術を使って、フォトミキサで電波に変えたところで88 GHz くらいの電波が出るようにしています。試しに行った実験ですので可搬性は無視し、図9のように上から下に照射するようにしております。台がイメージャーになっています。セラミックナイフを台の上に置いたり、ダンボールに挟んだ場合のイメージング結果が図10のようになっています。

● 高周波の増幅器

100 GHzの話をしました。やはり高周波のもの

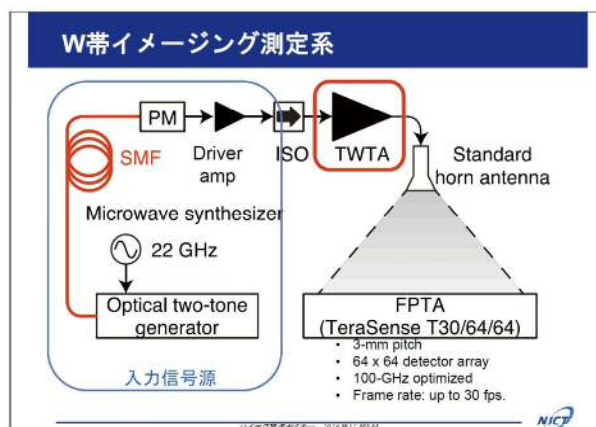


図9 W帯イメージング測定系

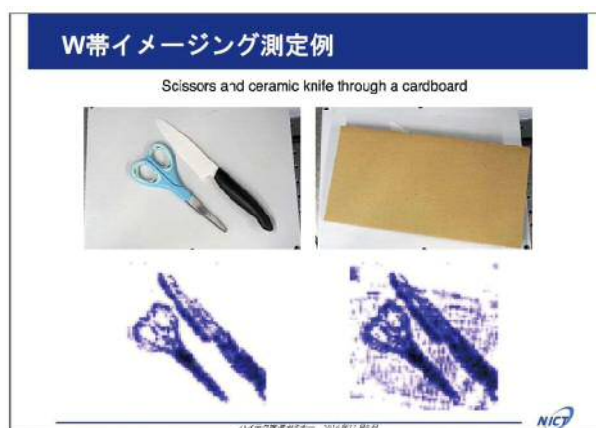


図10 W帯イメージング測定例

が欲しいということもあり、総務省のプログラムで300 GHz帯で1 W くらい出せる増幅器を現在開発しています。もともとの動機は、300 GHz帯の無線通信距離の延伸であり、1 W くらい出せると、伝搬距離がこれまでの数十 cm のものが、天気が悪くても100 m ほど飛ぶようになります。来年までのプログラムですので、来年までには増幅器が出来ていると思います。

● 将来のテラヘルツ技術

高周波であることの利点として、広帯域を利用できるというのがあります。広帯域を使えると、例えばレーダー応用では奥行き分解能を上げることができ、細かい距離の差が分かります。例えば1 GHzのバンド幅の信号を送ると、奥行き分解能が15 cm となります。中心周波数を100以上300 GHz くらいとし、10 GHzのバンド幅を取ることができれば、1 cm 強の分解能を得ることができます。面内の分

解能は波長が短い方が回折限界などの関係で細かく見えるので、高周波で帯域を取れるテラヘルツ帯が便利だと考えています。

これまでのカメラの開発を応用して、将来は災害現場での状況把握で用いたり、隠匿物の検査をリアルタイムで行えればと考えています。その他には、バイオメディカルや品質管理、非破壊検査に用いることが可能になるのではないかと思います。

<質問>

- ✓ 300 GHzというお話があったと思うのですが、600 GHzのものを作ろうと思うとどれくらい難しいのでしょうか。
 - 現状だと日本にはその技術がないため、かなり難しいと思います。海外ではやっているところもありますが、無線通信のために
- ✓ 300 GHzをやっていますので、まずは300 GHzでの技術を確立させたいと思います。
 - ✓ 非冷却のマイクロバロメータの読み取り速度と消費電力はどれくらいでしょうか。
 - 速度はイメージャーの一般的な値で動かし、30 Hzのフレームレートで動きます。消費電力については基本的には100 Vのコンセントからアダプタを通して使える程度です。
 - ✓ 品質管理への応用はすぐできるのではないのでしょうか。
 - ベルトコンベアの速度との兼ね合いですが、カメラの読み取り速度と光源を改善する必要がまだあると思います。

