

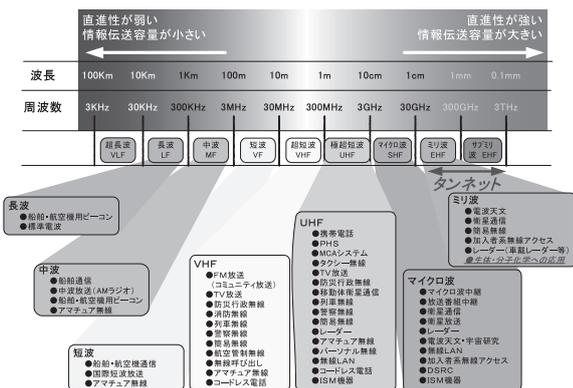
「テラヘルツ波に関する基礎研究」研究報告

～電子デバイス(TUNNETT)を用いたイメージング技術～

財団法人 半導体研究振興会 半導体研究所 名誉所長 西澤 潤一 氏
 所長 須藤 建 氏
 主任研究員 倉林 徹 氏

1. タンネットダイオードの開発

電波の領域は非常に広く、なじみのあるところではVHFやUHF等がありますが、一番高い周波数帯にタンネットがあり、ミリ波やサブミリ波という領域になります。まだまだあまり開拓されていないこの領域で生体分子化学への応用や今回の研究にある非破壊検査のようなものができるかということで研究に取り組んでいます。



タンネットダイオードの開発 TUNNETT: Tunnel Injection Transit Time

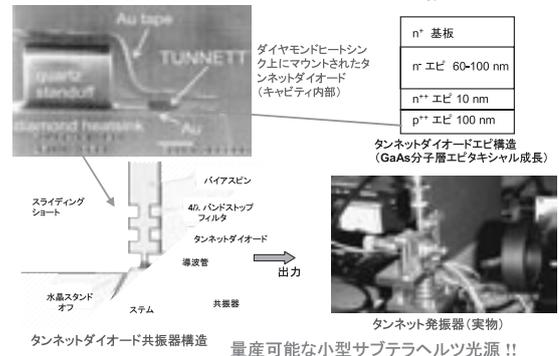
タンネットダイオードとは、トンネル注入走行時間効果(Tunnel injection Transit Time) 負性抵抗ダイオードのことです。トンネル効果により電流を注入するので、雑音が少なく高い周波数での発振が可能です。

- 1958年、西澤により世界で初めて提案
 - 1968年、200GHzパルス発振実現
 - 1979年、338GHzパルス発振実現
 - 393GHz(2003年), 510GHz(2004), 650GHz(2005), 708GHz(2006)の連続発振実現
- 【特徴】50～708GHz(実績)室温連続発振、量産可能な小型サブテラヘルツ光源

簡単にタンネット発振器内部の構造を説明します。次の図にあるのは10nmや60nmといったナノ構造の半導体素子です。このようなものをダイヤモンドヒートシンク上に設置します。ダイヤモンドは非常に硬いので、熱伝導率が非常に良くなっています。また電流を流すために、金(Au)のテープを使っています。タンネットのチップは0.1mm以下の素子で、顕微鏡の下で組み立てを行い導波管構造の中にセットするとこのような小形の発振装置ができます。

タンネットダイオードの優れた特徴に「トンネル注入走行時間効果」というものがあり、これは英語で”Tunnel injection Transit Time”になりますが、ここからTUNNETTというネーミングになっています。もともと1958年に西澤先生が提案されたもので、1968年には200ギガのパルス発振であったのが、昨年は連続発振で708ギガまで最高周波数の記録を伸ばしたという素子です。一つの素子で広帯域に発振することは難しいのですが、それぞれ素子をうまく作ると、欲しい周波数のところで発振させることができます。一つの素子でありながら50ギガヘルツで発振するものから700ギガヘルツを超えるものまで作り分けることができます。これらは室温で連続発振し、小さなダイオードですので量産可能な素子であると言えます。

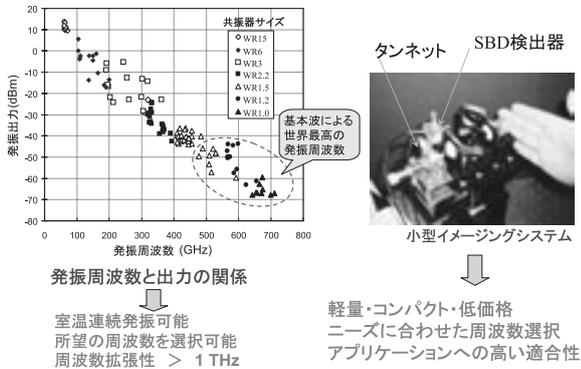
小型電子デバイス(タンネット)の構造



これまでに試作したタンネットダイオードの周波数と出力の関係を示します。色分けしたのは共振器のサイズの違いです。室温連続発振で所望の周波数を選択可能で、周波数拡張性が1テラヘルツを超えるという特徴があるので、それを生かすと軽量・コンパクト・低価格といったニーズに合うこと、および周波数選択による

アプリケーションへの高い適合性を引き出すことができます。ちなみに破線で囲った付近の周波数は基本波による世界最高の発振周波数となっています。

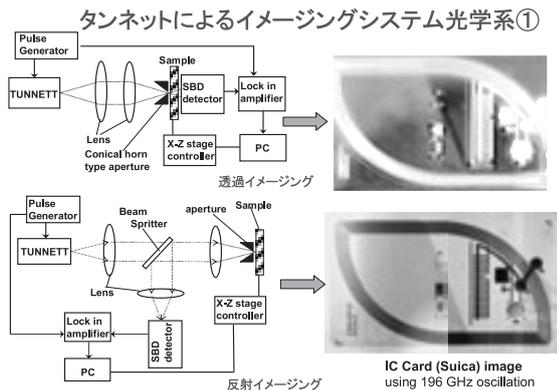
タンネットダイオードの特性



2. サブテラヘルツイメージングの鉄道分野への応用

サブテラヘルツとはテラヘルツよりも少し周波数が低い領域を指します。このサブテラヘルツイメージングの鉄道分野への応用例をいくつか紹介します。

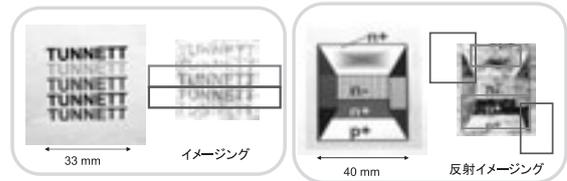
次の図に示したのは透過イメージングと反射イメージングの光学系です。わかりやすい例としてSuicaをイメージングしてみると図の右側ようになります。200GHz程度の電磁波を使っているのですが非常に高い分解能が得られます。



次の図のように、我々が使っているカラープリンタでTUNNETTという文字を、色を変えてプリントアウトしました。またタンネットのデバイス構造を模式的に色を変えて作ってみました。これを反射イメージングしてみると色の違いによってイメージングに違いが出ます。例えばTUNNETTの文字だとグラデーションを付けたところは出ていて、メッシュのところはメッシュで出ることがわかります。同じプリンタを使ってもインクの成分によって反射強度が違くとイメージング状況が変

わります。このようにサブテラヘルツのイメージングを活用することで、特殊塗料の識別、また多重印刷で外から見えない内にある印刷の識別、あるいはICカード内部構造の識別などにより、偽造物の識別・排除を容易にすることが期待できます。

イメージング応用(切符・印刷物の偽造防止)



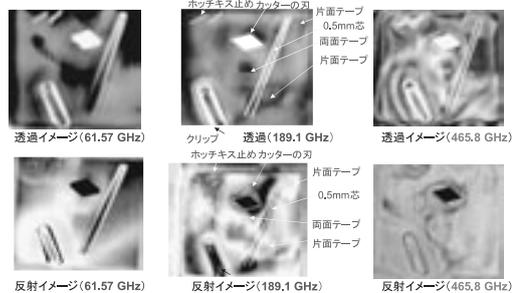
印刷(色)の違いによるテラヘルツ波イメージング

サブテラヘルツ波イメージングを活用することで

- ・特殊塗料の識別
 - ・多重印刷の識別
 - ・ICカード内部構造識別
- などにより偽造物の識別・排除が容易になることが期待できる。

次の図は封筒の中へ0.5mmのシャープペンシルの芯やカッターの刃など色々なものを入れて、封筒の中を透視した例です。例えば60ギガ帯を使うと小さいカッターの刃や1mm以下の芯の識別は難しく分解能不足といえます。190ギガ帯は波長1.6mmに相当しますがここでは透過性能を保ちつつ分解能が向上しているのがわかります。逆に460ギガ帯を使うと波長が短くなるので分解能はよくなるのですが、反射によりその書類の内部まで見ることは難しくなります。図よりシャープペンの芯や裏側に貼り付けたものが見づらくなっていることがわかります。この実験によって紙類・木材・コンクリートなどの色々な材料にとって最適な周波数を探してそれぞれの検査に適用すべきだということがわかってきました。

封筒中の梱包物の透過、反射イメージング

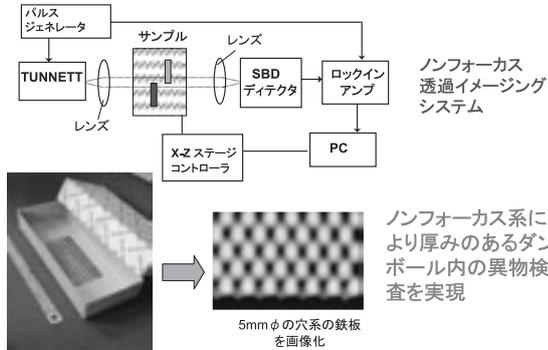


- 60GHz (波長5mm) 分解能不足
- 190GHz (波長1.6mm) 透過性能を保ちつつ分解能が向上
- 460GHz (波長0.65mm) では分解能は向上するが、透過性能不足

次の図はノンフォーカスの透過イメージングといって、ビームを細い状態で厚みのあるサンプルに透過させて中の状態を透視して見るという方法です。ダンボール箱の中に入っているのは5mmの穴の開いた金属板です。これ

を透過イメージングで見ると、未開封で穴があいている状態が再現され、内部透視ができることがわかります。

タンネットによるイメージングシステム光学系②



次の図にあるのは、JR東日本研究開発センターから頂いたコンクリートの試料で、応力がかかってひびが入っています。試料の表面が塗装されていると想定して0.4mmの厚みのゴムで覆い、このゴムを通して内部の反射イメージングをしてみると、ゴムの皮膜に関係なく中のひび割れが明確にイメージングされることがわかりました。

被覆面のひび割れコンクリート反射イメージング

(2006年2月 JR東日本研究開発センター試料提供)

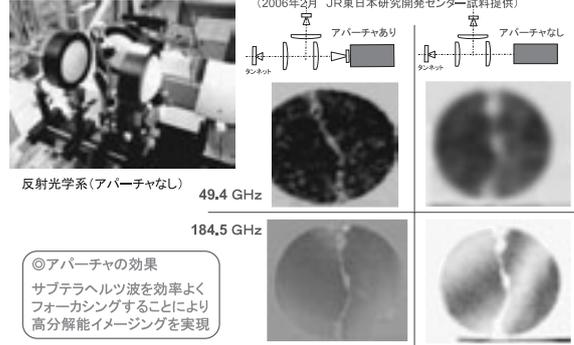


49 GHz反射イメージ(アパーチャ使用)

ひび割れコンクリートの反射イメージングに関しては次の図のような装置で行っています。先程の試料を50GHz付近と180GHz付近を使ってイメージングし両画像を比べて見ると、波長が短い180ギガヘルツ付近のほうが解像度がよくなります。またフォーカスポイントの付近にアパーチャーという円錐型の金属を付けると分解能が格段に上がる現象がありました。アパーチャーの効果としてサブテラヘルツ波を効率的にフォーカシングすることにより高分解能イメージングを実現できることがわかりましたが、サンプルの近くにこのような金属構造体を置かなければならないということで、測定できるものに色々な制限がでてきます。

ひび割れコンクリートの反射イメージング

(2006年2月 JR東日本研究開発センター試料提供)



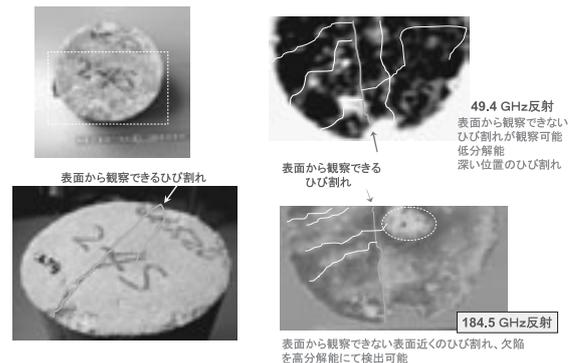
同様の測定を行い、円筒形の試料について横に入った傷がどのように見えるかということも確認しました。次の図に低い周波数と高い周波数でイメージングした結果を示します。よく見るとどちらの周波数でもひび割れが入っていることがわかります。今後はどの深さまでひび割れが検出できるかということをも明らかにしなければいけないと考えています。

ひび割れコンクリートの反射イメージング



高い周波数を使うと表面付近のひび割れに関してかなり色々なものが見えてきます。その例を次の図に示します。低い周波数では表面から観察されない深い位置のひび割れがわかるのですが、高い周波数では表面からは観察できない表面付近のひび割れが見えることがわかります。

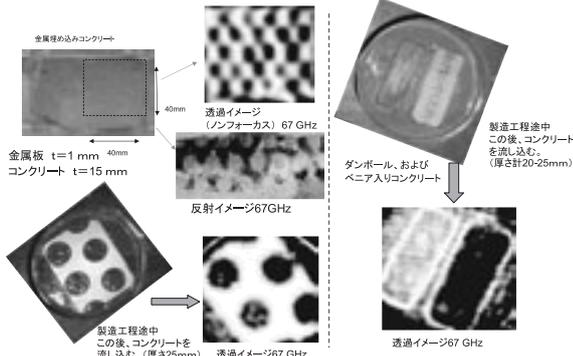
ひび割れコンクリート 反射イメージング(アパーチャあり)



次の図のようなコンクリート内部の異物検査に関して、金属の構造物が入ったもので15mmから25mmの程度の厚さであれば、透過測定が可能です。

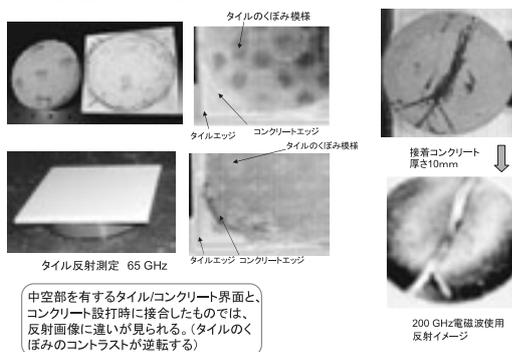
またコンクリートの内部にベニヤ板やダンボールの紙を入れて実験したところ、外部からその混入が確認できることがわかりました。

コンクリート中の異物検査 (透過・反射イメージング)



よく建物からタイルが落下することが問題になっており、対象物を叩いて検査しているという状況があります。次の図は、タイルとコンクリートが密着したものを一度はがして接着剤を使って再度張り合わせた試料を用意し、もともと設打時にタイルがコンクリートへ密着したものとイメージングの比較を行ったものです。タイルを一度はがすとタイルとコンクリートの間に微小な隙間ができるので、タイルを通してその界面に電磁波が入って反射してきたときのタイルの模様ははっきりと見え、隙間空間に相当する模様が画像化されることがわかります。ところがもともと密着したものについてはこういった模様が見えません。これにより中空部を有するタイルとコンクリートの界面等を反射測定により非破壊で確認できることがわかります。

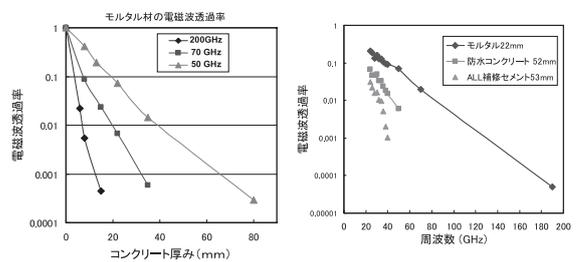
欠陥(空洞、ひび割れ)コンクリートのイメージング



コンクリートでどこまで電磁波が透過するかという基礎的な性質についても調べてみました。一番シンプルな材質としてモルタルを使い、そのほかに防水コンクリート

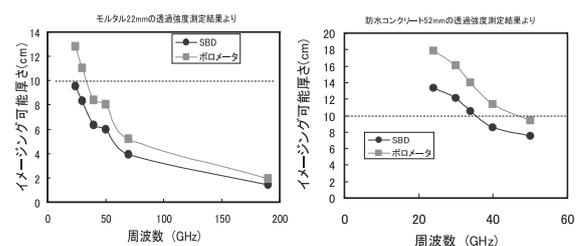
トを使ってみました。50GHzの場合コンクリートでは8cm程度まで透過します。ところが200GHzだと2cm以下となり、それぞれの周波数で透過する限界が決まってきます。また材質による違いが顕著で、例えば防水用のコンクリートについて周波数依存性を見ると、高い周波数では透過しにくいのですが低い周波数では透過しやすいことがわかりました。ただし低い周波数になると分解能が悪くなるので内部の細かい状況は見えなくなります。

コンクリート材料の電磁波透過特性



今回のイメージングシステムで使っている検出器については、ショットキーバリアダイオードという室温で使える非常に小形の検出器がありますが、そのほかにポロメーターという検出器があります。ポロメーターというのは、試料を液体ヘリウムレベルの温度まで冷やし、微弱な電磁波を熱エネルギーとして検出するものです。それぞれの検出器を使用した際のイメージング可能な試料の厚さについて、測定結果から導き出したデータを次の図に示します。例えば右側のグラフは防水コンクリートという種類の材料ですが、ショットキーバリアダイオードでは10cmをこえるのが約40GHzということになり、ポロメーターを使うと可能な厚さがさらに数cm増えます。

コンクリート材料のイメージング可能厚さ(透過)

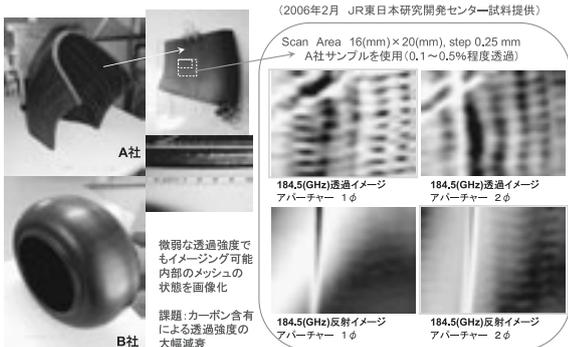


SBD:ショットキーバリアダイオード検出器
ポロメータの値は測定の限界値を示している。

JR東日本研究開発センターからサンプルとしていただいた空気バネについて、タンネットダイオードを用いた

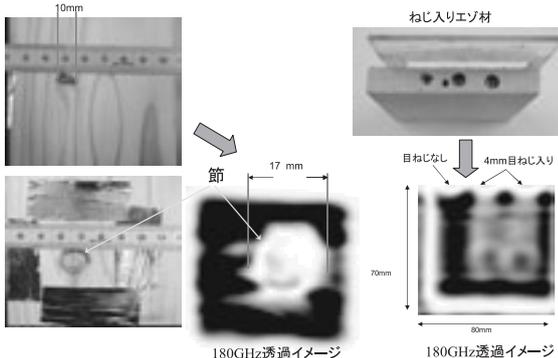
透過と反射イメージングの実験を行いました。材料を切って透過イメージングを行うと、ゴムを電磁波がすり抜けて、中に入っているメッシュ状の繊維の状態が画像化できます。その反射イメージングの際にアパーチャー開口を2mm程度の大きいものにすると、ゴム材の中のメッシュ付近にまで電磁波が到達して戻ってくる成分があるので、メッシュの形状に方向を反映した画像が見えるようです。これらのゴム材についてはカーボンの含有による透過強度の大幅減衰があるため、比較的波長の長いサブテラヘルツ波を使えば反射でここまで見ることができます。例えばタイヤがバーストする寸前に中のメッシュの状態が変わるのであればこういった方法で劣化を検出できる可能性もあると思われます。

ゴム材(新品)のタンネットによるイメージング



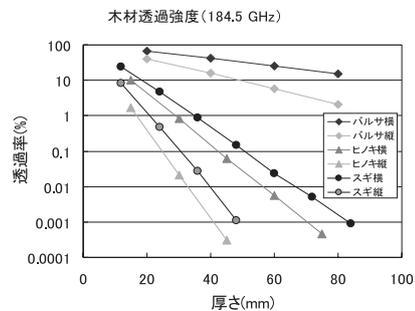
もう一つ材料として木材があります。例えば木材の中には色々な節があり、構造的に問題となる節や、完全に構造欠陥となる「死節」と呼ばれる節があります。これを透過イメージングすると内部にある節の形をそのまま画像化することができます。節というのは電磁波を通しにくいために白く見え、他の部分はかなり電磁波を通すので黒く見えます。また木材の中にねじを埋め込んでイメージングすると、埋め込まれた部分だけ電磁波の透過が違うのでどこにねじが入っているのかがわかります。

木材の透過イメージング (ノンフォーカシング)



木材の木目は方向性を持っており、タンネットから発せられる電磁波は偏光特性を持っています。木材を測定する場合、木目を縦に置か横に置かかで電磁波の通りやすさが顕著に違います。例えばヒノキだと、次の図において縦に置いたものと横に置いたものとで顕著な透過特性の違いが出ます。これが何に使えるかというのですが、木材のカットにおいて木目がどちらの方向に走っているかを瞬時に知ることは非常に重要だと聞いていますので、この方法を利用したカッティングマシンを作れば木目の方向を識別してどちらの方向にカットすべきかを判別することができると考えられます。

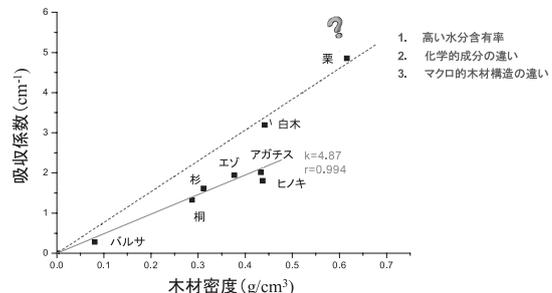
木材に対する電磁波の透過率



木材の木目方向に依存した透過特性の異方性(タンネットの偏光特性に起因)

横軸を木材の密度にして透過特性をグラフ化したのが次の図です。ある領域までは木材の密度に対する電磁波の通りやすさの線形性が確認できましたが、特に栗や白木はこの特性から外れており吸収特性が違うことがわかりました。これについては高い水分含有率、化学的成分の違い、マクロ的木材構造の違い等が考えられます。

木材の種類と電磁波の吸収特性の関係(190GHz)



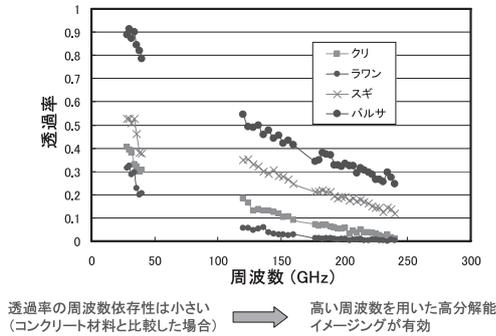
1. 高い水分含有率
2. 化学的成分の違い
3. マクロ的木材構造の違い

木材の比重と吸収係数にはある範囲で高い線形性がある。木材の材質を特定可能

また木材に対しても透過特性の周波数依存性を調べました。木材はコンクリートとは違って周波数依存性が非常に弱く、数十ギガから240ギガ程度まで調べましたが、高い周波数ほど減衰するものの、透過率が桁で変化するような特性は得られませんでした。このことから木材に関しては比較的高い周

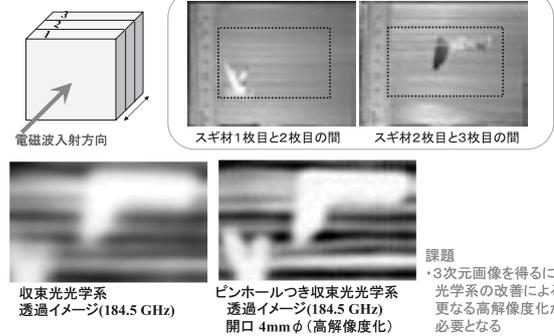
波数を使った高分解能イメージングが可能であると言えます。

木材の電磁波吸収(周波数依存性)



の分解能がよく、木材を重ねた内部の物質を選択的に観察できることがわかりました。

3次元透過イメージング(光学系の違い)

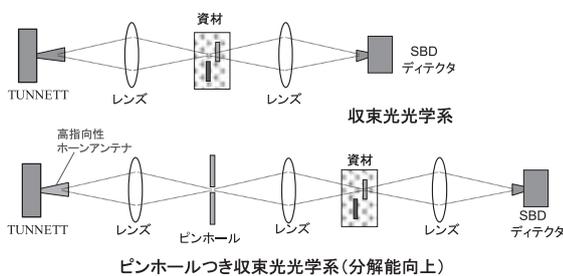


3. 3次元イメージング

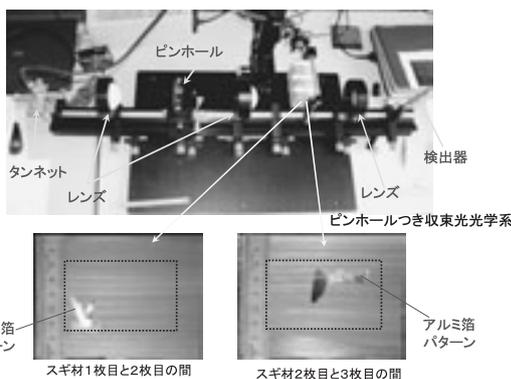
今回新たに行った3次元イメージングという方法は、フォーカスポイントに限定した画像を得るという方法です。

次の図の上の部分から従来用いていた収束光学系で、通常のレンズを用いて絞りを行うものですが、それでは十分な分解能が得られないため、途中にピンホールを用いて小さいフォーカスポイントを作るという方法を試しました。

3次元高分解能イメージングの構成



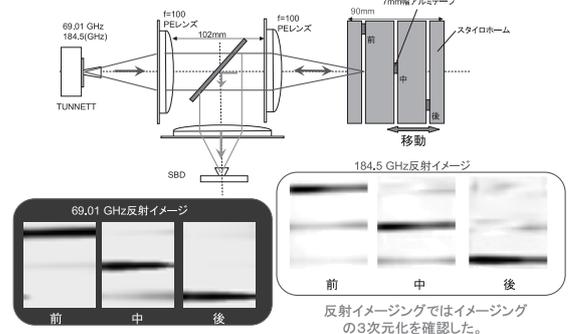
次の図に収束光学系の装置を示します。スギの表面にアルミ箔を張ってこれをイメージングしてみました。



次の図のようにスギ材を3枚重ねその間にアルミ箔を入れました。改良した光学系で行ったところアルミ箔部分

もう一つ3次元イメージングの例を次の図に示します。かなり厚手ですが電磁波を非常に通しやすいスタイロホームという材料があり、この間にそれぞれアルミのテープを張り、それを移動させてフォーカスポイントを変えて画像を撮りました。フォーカスを前・中・後と変えることによって、上下位置をずらしてそれぞれのアルミテープが選択的に画像化されていることがわかり、3次元イメージングの入り口に足を踏み入れることができたのではと考えています。

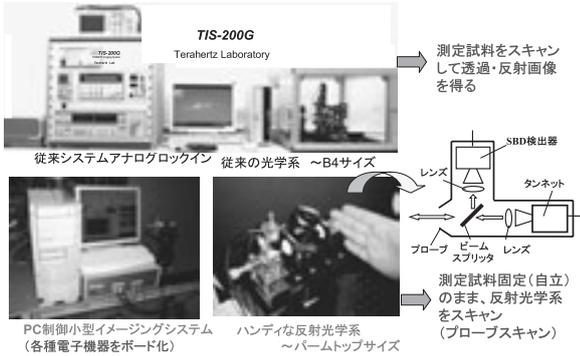
3次元反射イメージング



4. コンパクトイメージングシステムの構築

次の図において上に示したのが、従来我々が用いていたアナログロックインを使ったシステムです。下に示したのが今回試作したもので、制御機能を全てパソコン内でボード化しています。またハンディな反射光学系を採用しています。この光学系はタンネットダイオードとディテクターを用いています。今回試作した装置では、測定試料を固定もしくは自立させたまま光学系自体を動かしてスキャンしますので、例えば車両など大きな構造物の壁面を測ることも可能になります。

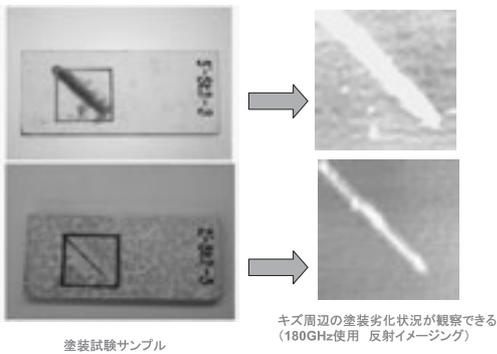
PC制御小型イメージングシステム構築



2007年1月にこのシステムをJR東日本研究開発センターへ持ち込み測定を行いました。

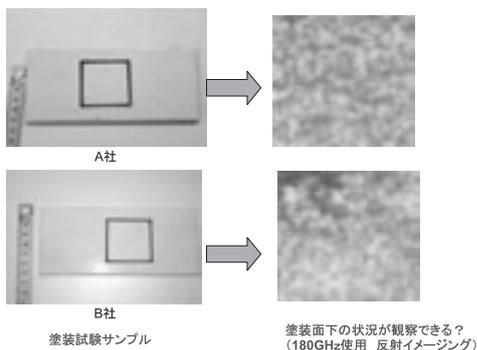
測定したサンプルは、塗装した試料の表面に傷を付けて屋外に置いていたもので、傷の付近に錆が発生しています。これを反射イメージングしたところ、錆が広範囲に広がっているサンプルは錆の部分が広がって見え、広がっていないサンプルはかなり狭い範囲に見え、ほぼ見た目に対応しています。このことから塗装が浮いて塗装下の状態がどうなっているかわからないようなサンプルがあればこのシステムの有効性が発揮できるのではないかと考えます。

タンネットイメージングシステム持込試験(プローブスキャン)



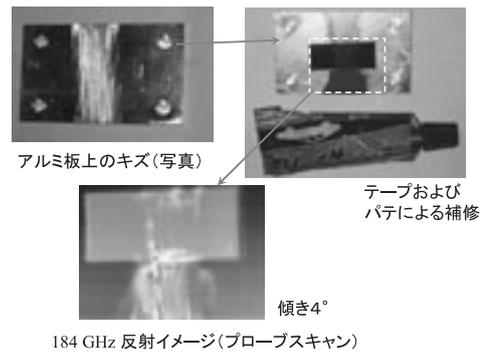
次の図は、それぞれ違う塗装会社の塗装試験サンプルについて測定を行ったものです。画像を見るとそれぞれ違った模様が出ているのがわかります。これはおそらく

タンネットイメージングシステム持込試験(プローブスキャン)



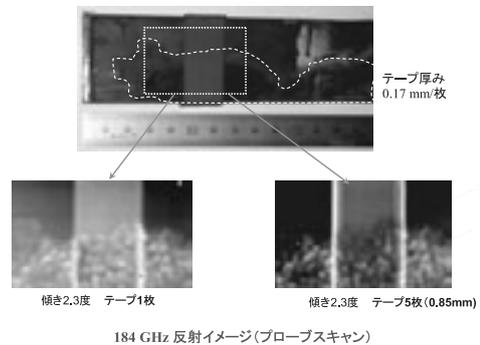
塗料と下地の金属との関係を反映していると思われます。次の図ですが、アルミの板に傷を付け、テープと車用のパテで補修し、これをプローブスキャンシステムで画像化したところ、補修した部分の下の傷が見えたというものです。

プローブスキャンによる反射測定 金属のキズ検出



次の図において点線の部分は錆の領域ですが、そこへテープを5,6枚重ねて補修した場合でも、測定を行うと錆の部分とそうでない部分の違いが顕著に表れることがわかりました。

プローブスキャンによる反射測定 金属の錆検出



最後にまとめさせていただいたものを下の図に示します。今後はタンネットダイオードの性能向上により実用化に向けた研究開発に取り組んでいきたいと思ひます。

まとめ

- ・高安定サブテラヘルツ帯CW光源を、電子デバイスであるTUNNETTによって実現し、テラヘルツ帯までの基本波発振を確認した。
- ・TUNNETTには更なる性能向上が要求されるが、試作素子を用いた鉄道応用に関するイメージング技術の検討を行った。

評価対象	適用技術	結果	今後の課題
印刷物・ICカード他	高分解能サブテラヘルツ透過・反射イメージング	波長となる0.4mm程度の分解能を実現し、インクの濃いなど高いコントラストを得た	素材に適した周波数のさらなる探索と、実用に近い検査システムへの適用
コンクリートおよび木材内部のイメージング	3次元透過・反射イメージング	コンクリート80mm程度、木材では100mm程度まで観察可能	・3次元イメージングの高分解能化 ・素子の高出力化および周波数選択による厚い資材への適用
補修箇所および塗装下探傷	プローブスキャンによる反射イメージング	周波数選択により、補修箇所や塗装膜下の探傷が可能	・分解能の向上と高速測定 ・非平面資材への適用

・次の段階では、タンネットの性能向上により実用化に向けた開発を行う。