

SEMINAR REPORT

電波の伝搬を目視できる電界カメラ



独立行政法人情報通信研究機構
光ネットワーク研究所
上席研究員
土屋 昌弘氏

私どもは、「電波自体をその場で見るができる電界カメラ」という技術を研究開発の対象としています。この電界カメラは、私どもがオリジナルに研究開発したもので、独創性の高い技術です。国内は言うに及ばず、外国にもまだありません。大きな技術領域になっていく可能性があり、その方向を目指して注力しておりますので、皆さんにも是非関心を持っていただければと考えています。

イントロダクション

「百聞は一見にしかず」、「火を見るよりも明らか」、「火のない所に煙は立たない」といった諺や言い回しがありますが、これらのいずれもが「最後は目で見て判断する」という目視の重要性を我々の日常生活で意識した結果として発生したものだと思います。

また、目視の効力として理解を促す説得力を挙げることができます。最近、よくビジネスの場面で「見える化」という言葉を聞きますが、それは理解を促す説得力に依拠しています。

東日本大震災の現場のように非常に高い緊急性を要求される場面でも、最優先されるのは目視ないしはかつて目視した体験に基く判断です。一般に、火急の場合には、目で見たことを頼りに避難の判断を下すことが重要になります。

これらから判るのは、映像技術をうまく使うことは相手に納得を迫る場合や緊急性の高い場合に特に効力があるということかと思えます。

ところが電波や電気信号が伝搬する様子は目で見ることはできません。これまでは、想像力や理論に従った数値計算でこれを扱うのが一般的です。これができるのは熟練者に限られます。

電波や電気信号には波としての性質があります。水面に石を放り投げると波紋ができて、それが波として伝わっていくように、絵として見れば多くの人にも波は理解できます。が、絵として出てこない波を想像で理解するには相当な程度の頭のトレーニング、すなわち教育と訓練とが必要です。

ところが、映像化により、判り難い電波や電気信号の振る舞いが専門家でなくとも一目で判るようになるはずですが。

この電波や電気信号を目視する技術が成熟すれば、さまざまな恩恵が社会や産業に与えられることになると期待されます。例えば、周波数の高い電波資源を開発して行く上で、MMICモジュールやスマートフォンなどの実装をさらに高度化し、格段の機能と性能を備えた小型軽量機器が実現されるかもしれません。また、従来とは全く異なった電波の振る舞いを実現するメタマテリアルや、コイルの中にいる人があかも見えなくなる透明マントなど、斬新な機能を実現したりする基礎研究を加速することが可能になります。

また、電気自動車のワイヤレス充電時やインバータなどから漏れる不要な電波の問題が今後増えていくと考えられます。それをどの様に制御するか、取り締まるかといった問題は恐らく社会の重要な課題になります。その時、電波が目視できれば役立つ場面が多いと期待されます。

電界カメラとは

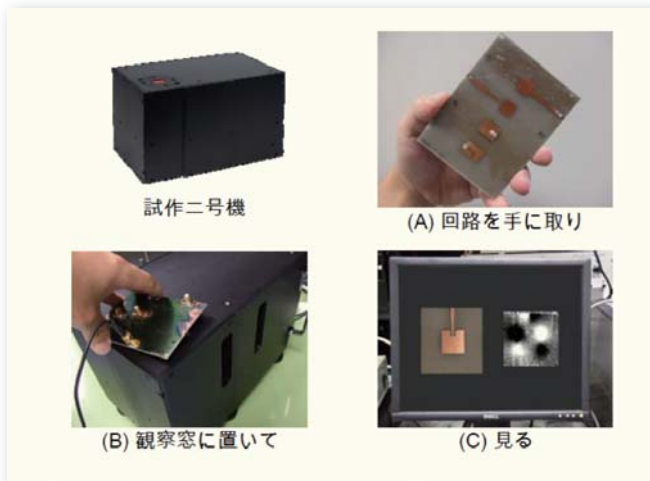
1) 特色・手順・技術など

電界カメラ技術のポイントは、見えない電波・信号を手軽に、長い時間と労力をかけることなく、手軽にその場で見ることができるところです。

また、電界カメラは新しい技術であり、現在、研究開発の播種期にあると考えられます。この技術が有する潜在的なスペックや性能も、まだ明らかになっていません。技術領域の拡大や波及の見当もこれからです。逆に、今後の開拓が順調であれば、このプレゼンテーションで皆様にお示した予測をはるかに上回る貢献が期待されます。

ここでは、電界カメラ試作機の実際を紹介します。

まず、図1に「観測手順」を示します。



〈図1〉観測手順

図1に示されるのは試作二号機とそれを用いた撮像・観察の様子です。プリント基板のアンテナから電波が出る様子を観察する場合を例にします。上部の1インチ四方の観察窓にかざすと瞬時にディスプレイに CCD カメラの光学映像と電界の映像が同時に現れます。アンテナを手にしてから目視までほんの数秒です。

現時点で、CCD 映像と電界映像は個別に表示させていますが、将来的には両者が重なった映像を実時間表示し、普段我々が見慣れている映像の上に電波・信号の伝搬や挙動が重なって現れるような機能を目指しています。

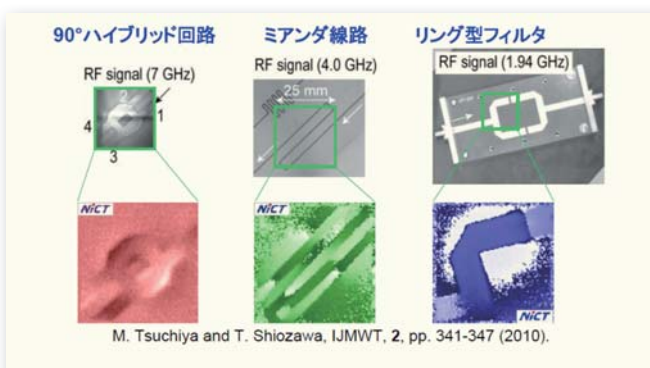
電界カメラ技術の核心は、「超高速×超並列」の実現にあります。100GHzの信号を測定するのは相当に速い計測器が必要です。一般に、これは単チャンネル計測です。その結果を実時間で映像化するためには、高い並列度で測定を一気に行う必要があります。この高速性と並列性の掛け算を実現するために、光技術を活用しました。

試作二号機では装置設置面積を A4 紙程度としました。このデスクトップ装置は、高速性と並列性の掛け算だけを比べると、アメリカのカリフォルニアにあるレーダー基地の非常に巨大なアレイ型レーダーと同程度のスケールになります。光技術の活用で極端なダウンサイジングが可能となりました。

電界カメラ技術の最初の発表は2007年です。最初の兆しの部分を案内したところで多くのメディアに取り上げていただきました。その時を端緒として実用化を目指す道のりを踏み出しました。

2) 何が見えるのか？

図2は「平面回路の信号の観察」の例を示しています。



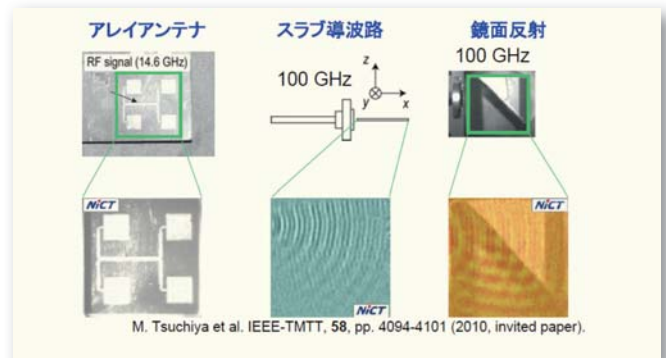
〈図2〉平面回路の信号の観察

左側の例は、90°ハイブリッド回路と言われる4端子回路網における信号伝搬を観察した結果です。信号伝搬の様子は、専門を終えた大学生が想像できるかどうかというレベルだと大学の先生から伺ったことがあります。右上から入ってきた信号が2つに分かれて出ていく様子が「見え」ています。

中央の例は、ミアンダ線路です。緑で囲った部分を観察しています。現在の観察領域は、残念ながら、25mm 四方に限られています。これを拡張するともっといろいろなものが見え始めると期待しています。

右側の例は、リング型の共振器の一部を観察したものです。リングの中で共振現象が生じていることがはっきりと判ります。

図3には「アンテナや空間の電波伝搬の観察」の例がまとめられています。



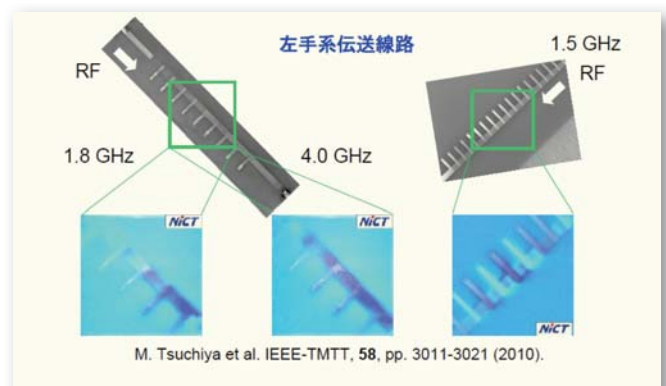
〈図3〉アンテナや空間の電波伝搬の観察

左側の例は、小さなパッチを4つ並べたアレイアンテナに中央付近から信号を入力したサンプルを観察したものです。線路を伝わって正方形のパッチのそれぞれに信号が伝搬している様子が判ります。4つのパッチを均等に作ったつもりですが、それぞれのパッチにおける信号の振る舞いが微妙に異なっているのが判ります。このあたりきちんと制御しないとアンテナの設計・製作としては不十分です。

中央の例は、半導体スラブ導波路の中を100GHzの信号が伝搬している様子を観察した結果です。波長1mm程の信号が同心円状の波紋となって内部を伝搬している様子が判ります。このような波を点波源の波といい、中高生が学ぶ物理の教科書にでている例と同じです。

右側の例は、空間に放出された球面波が銅箔の表面で45°反射される様子が撮像されたものです。銅箔への入射波と銅箔からの反射波、そしてそれらが互いに干渉している様子も見えます。

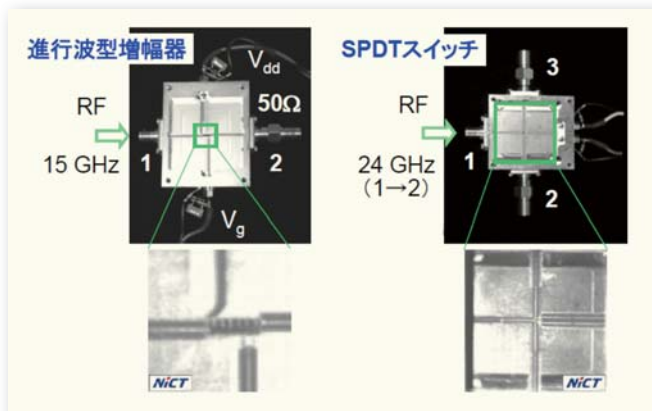
図4は「メタマテリアル線路上の信号伝搬の観察」の代表例です。



〈図4〉メタマテリアル線路上の信号伝搬の観察

メタ材料は最近の学会等でかなり注目されている技術です。それは電波や光に対して従来は困難とされた性質「負の誘電率・負の透磁率」を実現する可能性があるからです。ここでは平面回路として試作したサンプルが対象です。左側の例では、左上から4GHzの信号を入れると予想どおり左上から右下に向かって信号が流れます。ところが1.8GHzでは、左上から信号を入れているにもかかわらず右下から左上に信号が伝搬しています。これが左手系と呼ばれるシステムの特徴で、信号を入れた方向とは逆の方向に伝搬する後退波という現象です。右側の例では、後退波がスキップしているように見えます。これは、後から考えてみれば、特定の条件下のメタ材料では生じる挙動と解釈されましたが、想像力だけでは理解されないものです。このような特異で珍しい現象を非常に簡単に見ることができるのがこの装置の最大の特徴です。

図5では、すこし実用に寄った観察例として、「モジュール内の信号や結合・共振の観察」を取り上げています。



〈図5〉モジュール内の信号や結合・共振の観察

左側の例では、進行波型アンプのチップが実装されているモジュールを対象としています。15GHzの信号が左側から信号が入って右側に抜けていく様子が撮像されています。

注目すべき点は信号が電源線とカップリングしてあらぬ方向に誘導されている部分です。本来は望まれないカップリングが生じていることが判りますので、モジュールの性能が出ない理由としてこの部分をまず疑ってみることになります。

右側の例では、三端子スイッチのチップを実装したモジュールを観察例としています。24GHz信号が、左側の端子1から入ってきて端子2に出ていくスイッチの動作を観察しています。確かに、信号経路が90度下方に折り曲げられる動作も観察されますが、同時に変なパターンが生じていることも判ります。これはケースが共振器になり、そこに信号が溢れ出ていることを反映しています。このような共振器効果を避けないとモジュールの性能が設計どおりに出ません。絵を見ながら共振器効果を抑える方法を実演していますが(ここでは明示していません)、そのような非常に効率的なトライ & エラーを実施できる便利さがもたらされます。

図6が示すのは「パケット(波束)伝搬の観測」の例です。

線路の断絶(ギャップ)の部分で波が反射している様子が見えます。ゴムのような弾力性のある波に見えているのがパケットです。複数の周波数の映像を合成すると、波束としての映像化ができるという例です。ちなみに、パケット化しないと定在波(止まった波)が見えるだけで反射の実態は判りにくいものとなります。

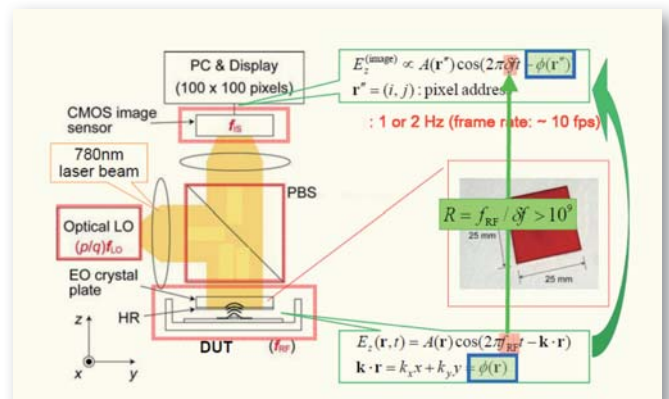


〈図6〉パケット(波束)伝搬の観測

3) 電界カメラの外観とシステム構成

電界カメラの試作一号機は底面積1m×2m程の大きなものでした。これは、原理を証明するところから始めたため、小型軽量化までの設計を省略したためです。図1に示す二号機ではA4サイズまで小さくしました。デスクトップで使える大きさを目標とした結果です。現在、三号機を検討中ですが、手で持ち運べる大きさにできないかという要望を多々頂いていますので、それを目指したいと考えています。

図7には電界カメラの「システム構成の概要」を示します。



〈図7〉システム構成の概要

これは試作一号機の光学的な構成を図示しています。レーザー光をハーフミラーで反射して下側に照射し、照射したところに測りたい信号を位置させます。その近くに、電界が加わると光に対する屈折率が変化する素材を板状にして置きます。その屈折率の変化は、対象となる信号の瞬時の空間分布を写し取ったものになります。そこにレーザーを照射し反射ビームを面的に受光し、解析することで、この電気信号の空間情報を読み取るという原理を用いています。

光学システムの最後ではイメージセンサーにより撮像します。ここで用いるイメージセンサーでは、観察したい信号が100GHzの場合に100GHzより少しずれた信号との周波数ミキシングにより発生する差の周波数成分を検出しています。観察したい信号の周波数に比べ、 $1/10^9$ 程の周波数に変換されます。これが波動的映像化のポイントとなります。

さらに、最初の信号の位相関係が最後に得られる電界映像の中でもきちんと保存される点が重要です。これは、電波のスローモーション映像をこのカメラでは撮り表示することになります。

スローモーションの度合いは 10^9 以上に及びます。このような極端なスローモーション化を実時間でいきますので、電波が進行している様子がその場で目に見えることになります。

4) 想定される応用の例

一般に、携帯電話やアンテナなどのRF機器が市場に出されるまでには試作・試作・検査のプロセスを経ますが、これが何度も繰り返されるのが実情です。

新しい携帯機器の市場投入の遅れは大きなビジネス好機に悪い影響を与えますので、製造現場ですばやい問題解決が求められます。問題解決の方法を見つけるためには、まず、問題の発生場所を明確にするのが定法です。問題がある場所が判れば対策も打ちやすくなりますが、一般に、目に見えないものではそれがなかなかうまくいきません。名人・達人と呼ばれる熟練者はこれをすばやく行うそうです。熟練者から初心者まで、それぞれが問題解決の時間短縮を図ることができる。これを実現するのが電界カメラではないかと考えています。迅速な問題解決が、競争力を高めたり、省エネ・省資源に結びついたり、というのが電界カメラ技術のシナリオの一つです。

電波・信号の挙動を把握したい場合、数理に強い人は数式を使った考察をしますが、それができる人が限られてしまうという欠点があります。我々の技術は考える前に見て概要を把握しようという技術です。この新たな選択肢は、技術の裾野を広げ、さらには頂上も高くするのではないかと考えています。「考えますか、それとも見てしまえますか」というオルタナティブな選択肢を提供する技術、それが電界カメラであると言えるのではないのでしょうか。

ハイブリッド車や電気自動車、太陽光発電などは今日のエネルギー問題を語る上で重要な要素です。その普及も大変に急激です。ところが、先ほども申しましたが、電気自動車およびそれに対するワイヤレス給電、ハイブリッド車や電気自動車などの駆動用インバータや電圧変換のためのコンバータ、太陽光発電パワーコンディショナーなどのインバータ、これらから不要な電磁波が漏洩する可能性があります。これらは電力機器のため漏れ出る電磁波のパワーも大きなものに成り得ます。このように、現在の火急のエネルギー問題は、場合によっては電磁環境問題に直結する可能性があるのは以上の理由によります。

このような電力機器には保守や整備が求められます。しかしながら、電力機器や自動車の保守・整備と電波管理の両方に専門を有する技術者は多くありません。自動車整備の例を考えてみましょう。電波に不慣れな自動車エンジニアも、映像化することで電波として問題のある場所が判る。そういうケースでの電界カメラが大変に役立つ場面が多々あるのではないかと考えています。

5) 技術の将来像

電界カメラには色々な将来像があると思っています。光学的カメラの歴史を参考にそれを想像してみましょう。

いわゆる普通のカメラの始まりは17世紀だといわれています。そこで発明されたカメラの原型は、レンズを使って遠くの映像を曇りガラスに映し出し、映し出した絵を手で書きとるというものでした。これに対して、今や非常に高性能なデジタルカメラがあります。カメラの原型からここに至るまでには、19世紀に写真技術が大きく進展した結果が寄与しています。最初は非常にプリ

ミティブであっても進展によって大変使い易いものとして普及していくのが映像技術の進歩のパターンといえるのではないのでしょうか？

電界カメラによる電界映像についても同様のことが期待できないのでしょうか？現在の機能や性能はプリミティブなものかもしれませんが、何らかの進歩があった時に大きく化ける可能性はあると思います。私の大きな夢は、電界カメラが各家庭に1つ常備され、何時でも誰でも電波環境を絵として見るができる、そのような状況が実現することです。

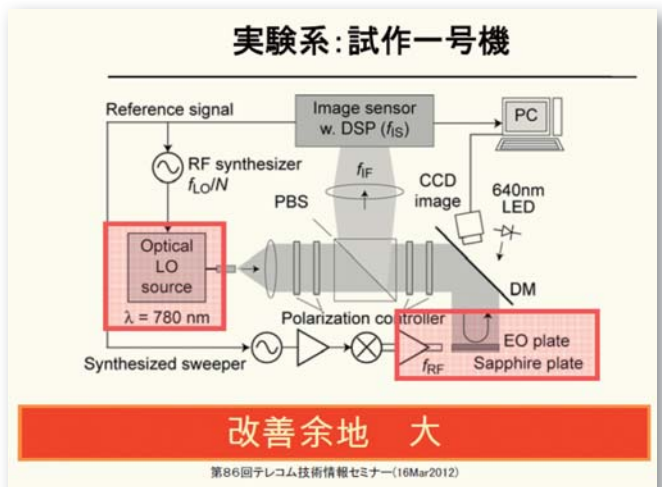
並列にRF計測をすることが電界カメラの技術ポイントの一つと申しましたが、これを焦点として技術を論じてみます。光はかつて単チャンネルで受光していたものが、超並列になった結果、現代的なカメラになり、多くの方が映像技術を身近に感じるようになりました。2009年のノーベル物理学賞はこの技術的(および文化的)な進展への寄与に対して与えられました。電波も従来は1チャンネル、2チャンネルという技術でしたが、電界カメラは、主に受信が主体ですが1万並列を実現しました。電界カメラも将来、大きく発展してもらいたいと思っています(補足:最近の技術展示会場では、従来の1チャンネル計測から10チャンネル計測への展開した装置の製品化が紹介されていました)。

超高周波(ミリ波)電波信号の映像観察

ここでは、電界カメラ適用範囲のひとつの究極例としてミリ波帯電波信号の観察例を紹介します。より具体的なイメージを技術に対して抱いて頂くためです。

1) 実験系

ここで用いた電界カメラの具体的なシステム構成を、図8「実験系:試作一号機」に示します。先の図7では光学系のみを概略を示しましたが、ここではマイクロ波回路の概要も含まれています。



〈図8〉実験系:試作一号機

電界カメラシステムは、レーザー光源、電気光学の結晶、イメージセンサーなどで構成されています。電気光学の結晶の付近に電波を持ってきて映像化する仕組みです。ここで紹介するのは試作一号機のものであり、非常にプリミティブな構成に留まっ

ている点に留意頂きたいと思います。今後の改善の余地は非常に大きいと考えています。

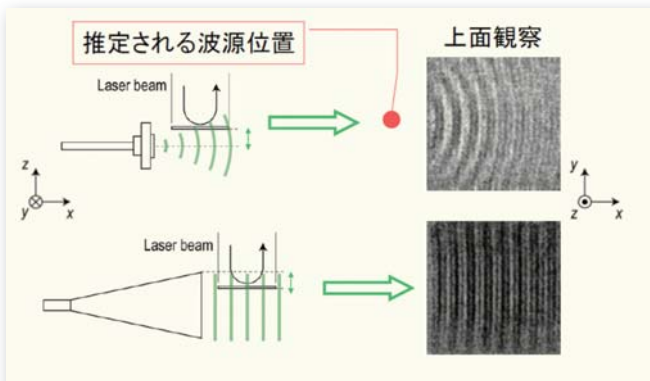
100GHzの電波を見るに当たっては、電波と電気光学結晶の関係およびレーザー光源の扱いがポイントになります。

電波の観察のためのセンサの配置は、従来、回路の上の信号を見る時のそれと若干異なります。回路上の信号観察では、DUTと呼ばれる回路に対して電気光学結晶(EO crystal)を近接させ、その上からレーザー光を当てて信号を読み取るという配置でした。これに対して、導波管に空いた小さな穴から出てくる電波に対しては、その配置に多様性が生じます。即ち、薄い電気光学結晶の板を横に置いたり、縦に置いたり、少し離して置いたりすることで電波の観察ができます。導波管の代わりにホーンアンテナを使うと、少し電波の様子が変わり、平面波としての電波を垣間見ることができます。これは次節でより詳細に説明します。

ここで、レーザー光源ほかでは、1550nm高速フォトニクスを活用しています。これはより高速な素子がこの波長帯で入手しやすいという現実的な理由によるためです。

2) 基本的な映像観察

図9「球面波と平面波の観察」は、実際にどのような映像が見えるかを示しています。



〈図9〉球面波と平面波の観察

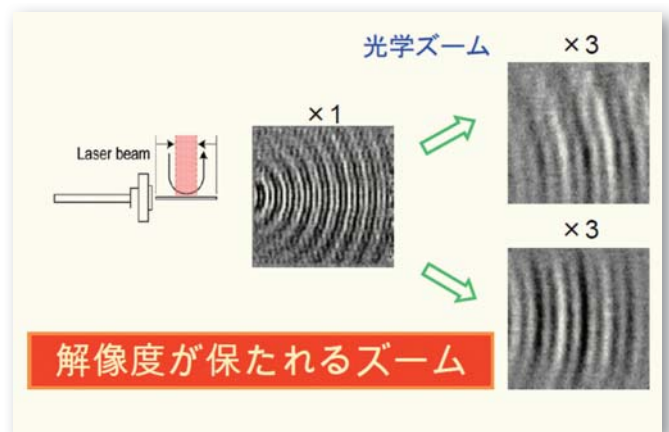
導波管の電波源は点とみなせますから、そこから出てきた波は球面波です。他方、ホーンアンテナからは殆ど平らな波が出てきます。球面波の場合、その波面の曲がり具合をうまく解析すれば電波の発生源(赤点)を推定できます。この例では、誰が見ても波源位置は赤点です。ここでも「映像の有する説得力」が垣間見られます。

映像のダイナミックレンジは、100GHzと結構厳しい条件でも20dB以上は十分に取れています。

次に、電波を電気光学結晶に閉じ込めて伝搬させた場合を観察しました。それが図10「スラブ導波管モードの観察」に示されています。

先ほどとは異なり、細かい波が沢山生じています。また、右端の結晶端面で逆方向に反射した波が逆方向に伝搬している様子も見えています。

電界カメラには光学ズームの機能もあり、一部を拡大して見ることができます。その例も図10に示されています。拡大機能は電気光学結晶に当たるレーザー光の幅を変えることによって実現できます。イメージセンサーで使っている1万画素はそのまま使えますので、解像度を劣化させることなくズームができます。

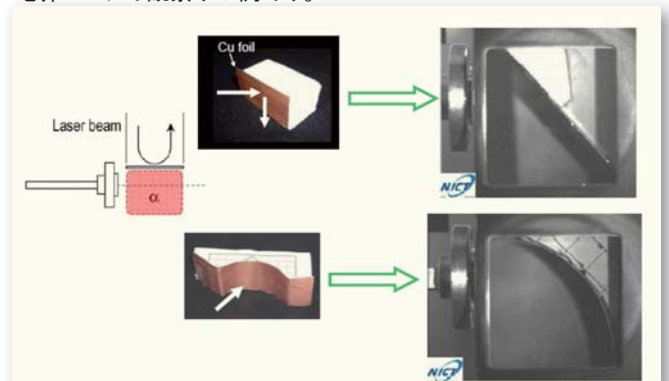


〈図10〉スラブ導波管モードの観察

3) 電波の代表的挙動の観察

以降では、電波が実際に目視されることをより深く体験して頂くために、電波の代表的な挙動を観察した結果を紹介します。これらは、高校以降の物理の教科書に出てくる内容ですが、映像として観察された前例は、もちろん、ありません。世界で初めての「撮像・観察」ということになります。

図11では「銅箔面での反射・フォーカス」を観察した結果を示しています。導波管の点波源から出てくる波より少し上目に電気光学結晶を置いた時、 α と書いた領域で何かが起こることを電界カメラで観察する例です。

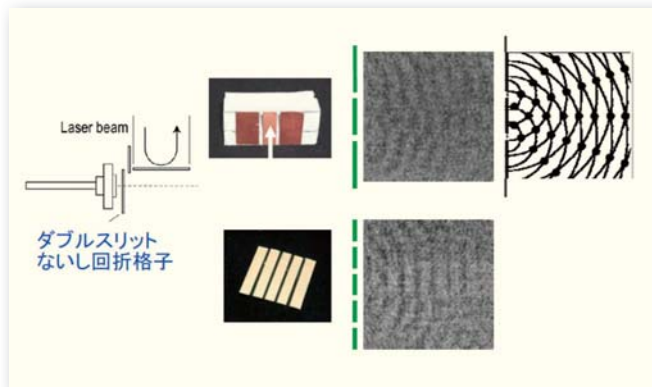


〈図11〉銅箔面での反射・フォーカス

発泡スチロールに銅箔を張ったものを置いて、電界カメラで電波の流れを見ると45度で反射されて下の方へ流れていくのが判ります。現在は事後の合成でCCD映像と重ねていますが、将来的にはCCD映像に電波が重畳する形で実時間表示したいと考えています。

また、発泡スチロールを楕円面にして、そこに銅箔を張りつげると反射された電波が楕円面の焦点にフォーカスできることが確認できます。これは、電波望遠鏡などで用いられる原理の可視化に違いありません。もっと身近な例では、衛星放送のパラボラアンテナを上げることができます。

図12には「ヤングの実験&回折格子」を実際に行い、そこにおける電波の挙動を撮像した結果を示します。これらは、高校以降の物理の教科書に出てくることは皆さんご存知のところかと思えます。ヤングの実験というのはダブルスリットを抜けてくる波動に対するものです。教科書に出てくる例は光に対するものです。また、回折格子というのはスリットが(周期的に)沢山ある場合に対応します。



〈図12〉ヤングの実験&回折格子

ヤングの実験では、上側の図のような波動が見えます。右側には幾何学的に強調される波面を作図したもので、干渉効果が生ずるとしたらここにできるだろうというのが黒い点で示されています。観察結果との一致の度合いが良いことが明示されています。

ここで用いた回折格子ではスリットが4つしかないのですが、それでも回折格子として機能していることが判ります。撮像した映像を見ると0時、+1時、-1時の三方向に回折波がきちんと生じていることが判ります。

もう少し複雑な周期構造にもトライしています。銅のパイプを幾何学的に並べて、そこに電波を当てると、電波の跳ねかえりが見られます。平面波を当てた場合は、モヤモヤとした状態が見えます。

まとめ

「電界カメラを用いると、電波や信号の伝搬、あるいは挙動がひと目で見て判る」ということを様々な側面から説明してきました。この技術は現時点で世界唯一であり、学会等では大きな関心呼び起こしつつあります。技術のキーポイントは、超高速と超並列の掛け算で実現したところです。

この技術は、既に大きな飛躍を実現した形になっていますが、改善余地はまだ沢山残っている新米技術でもあります。この技術は多様な技術の組み合わせでもあるので、それぞれの技術分野で改善すべき点を挙げてみます。

フォトニクス分野では、観察領域の拡大が目下の急です。現在の25mm四方の観察領域から大面積化されたらさらに見えるものが増えるはずで、大面積化だけではなく、高感度化や軽量可搬化は光技術を前進させることによって実現できると私は考えています。

映像技術分野での改良にも大きな期待を寄せています。波動を映像技術として解析する技術を使えば、波動の様々なパラメータを映像から読み取ることができるようになります。これを是非実現したいと思っています。

電波・回路技術分野では、得られたパラメータを回路の実装に生かしていくことが重要かと思えます。私自身がその分野の専門家ではないので、ここは電波や回路に強い方々と手を組ませていただきたいと考えています。

最後に、電界カメラの実用化について、電界カメラを実用化を進める上で、電界カメラを使ってみたい方、試作してみたい方、持っているサンプルの映像を取ってみたい方、電界カメラの要素技術について改善のアイデアをお持ちの方などとの交流は重要と考えています。電界カメラ技術に関心のある方は是非声をかけてください。

電界カメラのホームページ (<http://lei-camera.nict.go.jp/>) には本日紹介した映像もありますので、こちらもご参照頂けると幸いです。