

4-3 広帯域ミリ波イメージングシステム

4-3 Broadband Millimeter Wave Imaging System

水野麻弥

MIZUNO Maya

要旨

近年、ミリ波を使って安全に非破壊で物体の中を可視化するイメージング技術が、セキュリティ、土木工学、医学など様々な分野で期待を集めている。我々はこのイメージング技術を応用して、工業材料や生体材料の誘電特性の評価や、ミリ波の新たな産業応用について検討を行っている。試料中の物質の違いや分布を正確に判別するために、本研究では、様々な周波数で画像化し、物質の違いをより鮮明にイメージできる周波数を探し出せるよう広帯域ミリ波イメージングシステムの構築を試みている。本稿では、試作した 30 GHz から 70 GHz の広帯域イメージングシステムの基礎特性と、その装置を用いて取得したイメージング例として IC カードのイメージングや水と氷の判別結果について紹介する。

We developed a system for imaging the dielectric properties of materials in the millimeter range from 30 GHz to 70 GHz. It can observe the distribution of dielectric properties of materials including composites at various frequencies. Experimental results proved that the system clearly observes metal distribution at 35, 45, 55 and 65 GHz, by transmission imaging as well as by reflection imaging. One of the important features in practice is its ability to distinguish water and ice in other materials. The new imaging system can be used to evaluate distribution of dielectric properties of materials in various fields such as engineering and medicine.

[キーワード]

ミリ波, イメージング, 非破壊検査

Millimeter wave, Imaging, Non-destructive inspection

1 まえがき

近年、ミリ波と呼ばれる電磁波が私たちの生活の中で役立てられるようになってきた。ミリ波とは、波長が 1 から 10 mm の電波のことで、周波数でいえば 30 から 300 GHz に相当する。電波の中では波長が短く、周波数が高いという特徴を生かすことで、走行中の車間距離を測定して衝突を防ぐための車載レーダーや、ギガビットの伝送速度を持つ高速無線通信が実現されている^[1]。更には、ミリ波の発生、検出技術が向上してきたことにより、ミリ波を用いたイメージングに関する研究も活発になってきた。

ミリ波は、非金属材料であるプラスチック、壁、衣服、煙、霧を透過しやすいなど、テラヘルツ波とよく似た透過特性を持ち、また、空間分解能は

マイクロ波とテラヘルツ波の間(数ミリ)であることから、様々な物体をイメージの対象にすることができる。現在、物体そのものから発生する電磁波を、ミリ波アンテナ、増幅器、ショットキーダイオード検波器などを組み合わせて検出し画像化する受動型(パッシブ)イメージングによって炎の奥にいる人の姿を映し出す技術^[2]や、ミリ波を物体に照射し、その透過波あるいは反射波を検出して画像化する能動型(アクティブ)イメージングによって着ている衣服に隠された拳銃やナイフを感度良く映し出すことができる技術^[3]などが検討され、鉄道駅や空港の監視システムなどセキュリティ分野で試験運用が始まっている。一方、ミリ波は液相の水に敏感であり、水分量や水溶液の凍結状態などを感度良く識別可能であるという特徴から、農作物の水分モニタリングや食品、繊維の

水分含有量検査、生体サンプルや冷凍食品の凍結解凍サイクル観察^[4]などへも利用が期待されている。

上記のような様々なイメージングに用いる周波数は、対象とする物質固有の誘電特性や各用途に必要な分解能などに応じて選択されている。しかし、生体組織の様に特性に個体差がある試料を画像化する場合、物質の違いを判別しやすい周波数はその都度異なる可能性がある。また、プリント基板のように周波数依存性を知りたいケースもあるため、周波数可変な広帯域イメージング装置が必要となる。そこで本研究グループでは、30 GHz から 70 GHz の広帯域ミリ波イメージングシステムの作製を試みた。本稿では、試作した広帯域ミリ波透過・反射イメージングシステムの特徴について紹介し、そのイメージング例として IC カードのイメージや水と氷の判別結果について報告する。

2 ミリ波イメージング装置

2.1 ミリ波イメージング装置の構成

図 1 にミリ波イメージング装置の概略図を示す。本イメージング装置では、ネットワークアナライザ (Agilent E8363B, 10 MHz-70 GHz) を光源及び検出器として使用した。ミリ波を空間へ放出する際、システムの小型化及び分解能の向上を目的としてホーンアンテナを用いず、ネットワークアナライザに接続した同軸ケーブル (Agilent 85133E) の 2.4 mm コネクタ (オス) と、焦点距離 6.3 mm のシリコン半球レンズ (屈折率 3.4, 直径

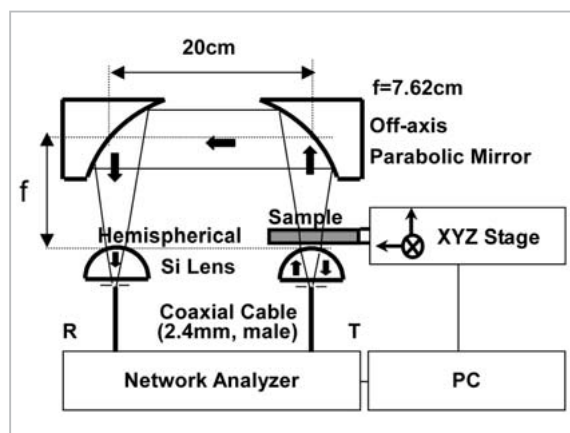


図 1 ミリ波イメージングシステムの概略図

30 mm) を使用し、ミリ波の広がりを抑えて試料へ照射した。コネクタとレンズとの距離は 6.3 mm とした。試料からの反射波は送信ポートと同じポートから、透過波は放物面鏡及びシリコン半球レンズで集光し、受信ポートからネットワークアナライザに入力した。このとき、検出側の同軸ケーブルの 2.4 mm コネクタ (オス) も、シリコン半球レンズから 6.3 mm 離れた位置に設置した。また、本研究では XZ ステージを用いて試料を 2 次元的に走査し、反射量、透過量をパソコン上で処理して画像とした。

2.2 ミリ波イメージング装置の出力特性

本イメージング装置の信号強度及びビーム形状について確認を行った。まず、試料を設置しないときの透過率 100% 及び反射率 0% の信号強度と、試料として電磁波をカットするアルミニウム板を設置したときの透過率 0%、反射率約 100%

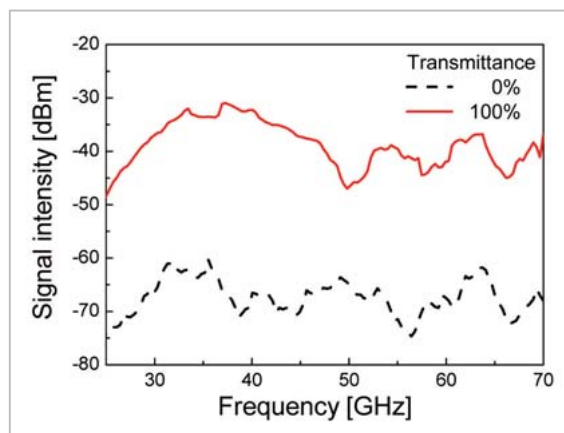


図 2 透過イメージングにおける信号強度

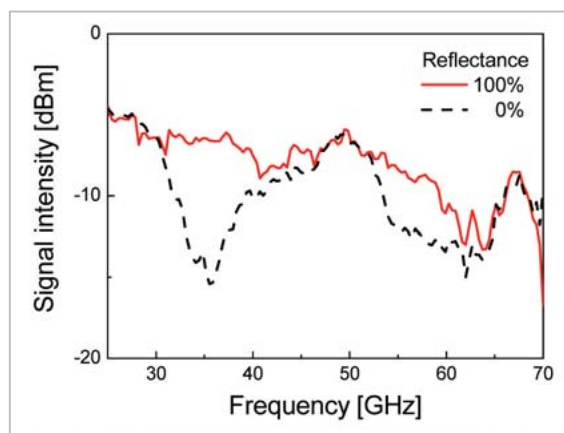


図 3 反射イメージングにおける信号強度

の信号強度をそれぞれ測定した。図2は透過波の測定結果であり、図中の直線は透過率100%、点線は透過率0%のときの信号強度を示している。アルミニウム板を設置することにより、25 GHzから70 GHzの範囲において信号強度が20 dB以上小さくなることが分かった。ネットワークアナライザのIFバンド幅を狭くすることによって、S/Nを上げることは可能であるが、スイープ時間を長くする必要があり、データを取得する時間が長くなってしまふことを確認した。反射波の測定では、35 GHz、55 GHz付近において比較的S/Nが良く、最大10 dBであった(図3)。50 GHz付近では同軸ケーブルからの取り出し効率が悪く、他の周波数に比べて試料からの反射信号の変化を検出することが困難であることが分かった。

次に、試料に照射されるミリ波のビーム形状について確認を行った。シリコン半球レンズの端面から約1 mm離れた位置において、35、45、55、65 GHzのビームの近視野像を観測した(図4)。円形(内径約6.2 mm)の2.4 mmコネクタから放出しているため、円形の干渉パターンを生じてい

ることが分かった。また、高周波側ではコネクタ中を伝搬する際、複数のモードが存在するため、ビーム形状が乱れていることが確認できた。これらの0次回折波の直径は、測定データよりそれぞれ約7.8 mm, 12.2 mm, 7.2 mm, 8 mmと見積もることができた。ただし、45 GHzについては、干渉パターンの暗縞が鮮明でなかったため、実際より大きく見積もった可能性がある。

2.3 イメージングテスト

実際に、本装置を用いてイメージングを行った。テスト試料として、アルミテープを2辺の長さ20 mmの直角二等辺三角形に切り取ったものを、2.4 mm厚の発泡ポリエチレンシートに貼り付けて使用した(図5写真)。また、テスト周波数は35、45、55、65 GHzとし、それぞれの周波数で、40×30 mm(ステップ数1 mm)の透過及び反射画像を取得した。図より、透過の場合、回り込み等の影響が大きく、三角形の頂点をイメージすることは困難であるが、様々な周波数でアルミテープの存在を判別できることが確認できた。それに対して反射では、回り込みの影響が少なく、また、強度の揺らぎが小さいため2 dB以下のわずかな変化が検出でき、S/Nの低い周波数においてもイメージング可能であることが分かった。分解能については、金属試料をイメージする場合、回り込みが少ない高い周波数ほど分解能が良いイメージを得ることができるという一般的な結果が得られ

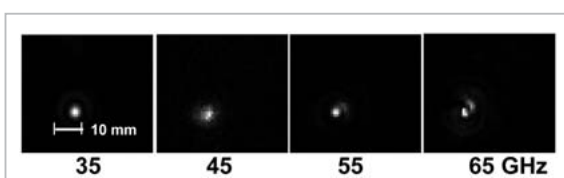


図4 各周波数におけるビームの近視野像

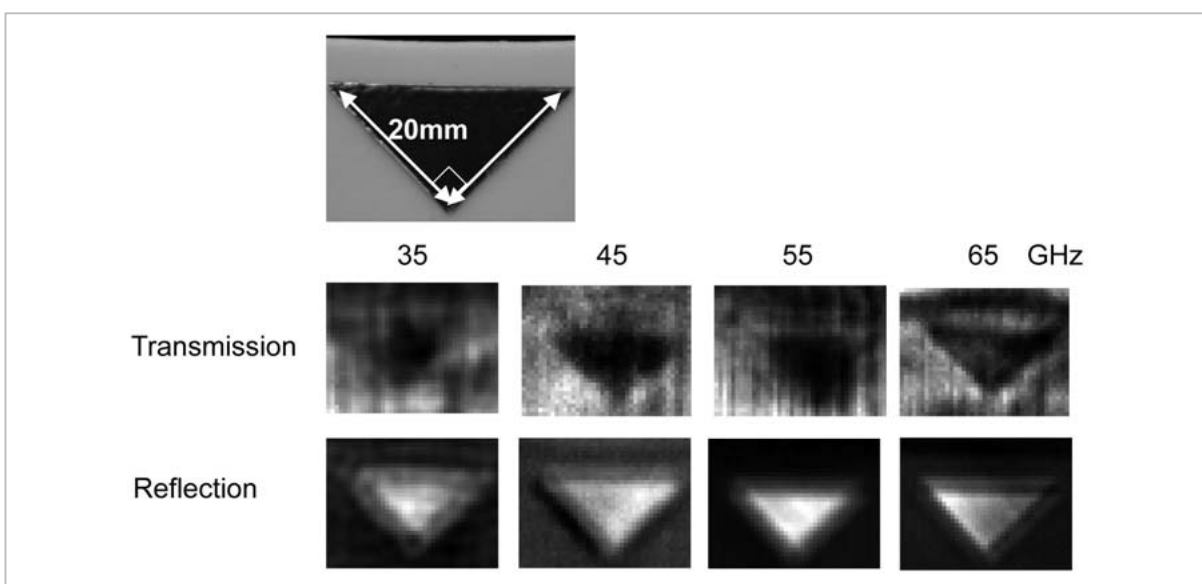


図5 アルミテープ試料の透過・反射イメージ

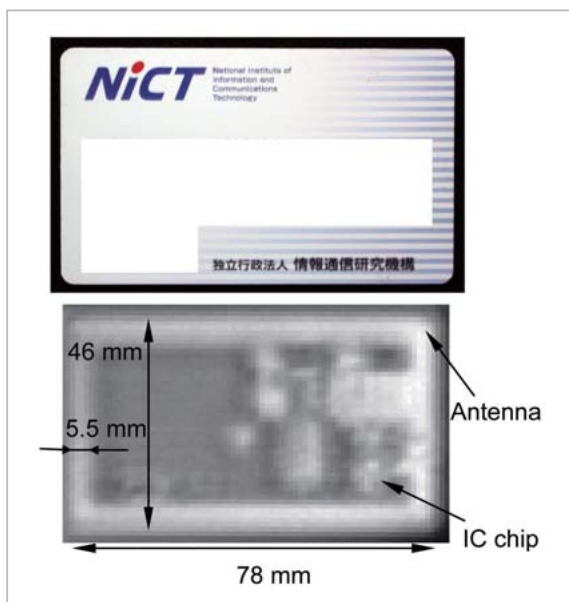


図6 ICカードの反射イメージ例(70 GHz)

た。この結果を踏まえて、本装置で一番高い周波数 70 GHz で NICT の IC カードを反射イメージした例を図 6 に示す。カード内にあるループアンテナや IC チップなどをミリ波によってイメージできることが確認できた。以上の結果より、本イメージング装置を用いることによって、広い範囲で異なる周波数のイメージを得ることができ、回り込み干渉や透過量、反射量などの比較を行えることが確認できた。

3 隠された IC カードのイメージング

ここでは、発泡スチロールの中に隠した IC カードを画像化し、発泡スチロールの散乱の影響について確認した。試料として、テラヘルツ波イメージング^[5]等によって内部のアンテナ構造が既知の JR 東日本の Suica カードを用い、そのカードを発泡スチロール板で挟み込んだ状態でイメージングを行った(図 7)。実験で用いた発泡スチロール板 1 枚あたりの厚さは約 5 mm であった。35 GHz と 60 GHz でそれぞれイメージした結果を図 8 と図 9 に示す。画像サイズは 55 mm × 80 mm であり、ステップ数 1 mm の画像を 1 枚取得するために約 60 分を要した。これらの図から、まず、ミリ波は発泡スチロールなどの不透明な物質を透過し、内部のアンテナの存在を透過型と反射型、それぞれの方法で判別できることが分



図7 イメージング試料の写真

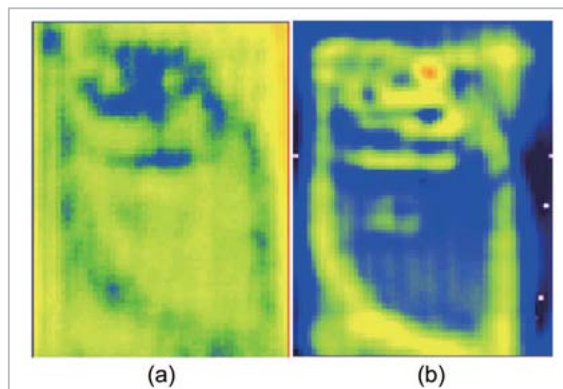


図8 35 GHz による Suica の (a) 透過 (b) 反射イメージング結果

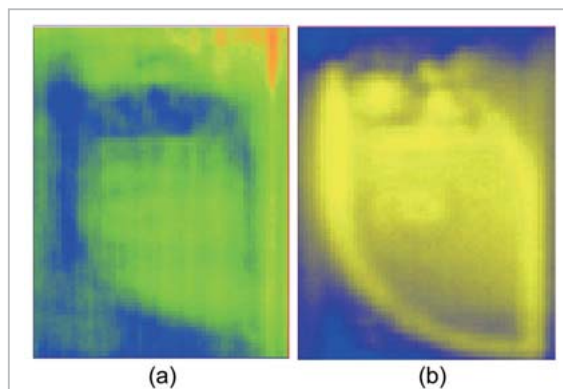


図9 60 GHz による Suica の (a) 透過 (b) 反射イメージング結果

かった。中でも、反射型イメージングで取得した 35 GHz の画像が最も鮮明であるということが確認できた。ただし、カード内の金属のようにビームに対して垂直に設置できない試料に関しては、反射型でイメージすることが困難なケースもある。60 GHz で取得したイメージでは、35 GHz に比べて全体的にループアンテナ等が鮮明ではなく、さらにイメージ画像の上部において、像に乱れが生じていたことが分かった。これは、試料上部に発泡スチロール板の数 mm の傷が多く存在

し、その散乱を受けたためであった。この結果から、異なる周波数のイメージを取得することによって、60 GHz に比べて 35 GHz では散乱等の影響を受け難く、不均一な発泡スチロール内の試料の特性を確認しやすいということが分かった。

4 水溶液の凍結イメージング

前節の結果を踏まえ、ここでは 35 GHz を用いて、発泡スチロール内にある水の固相の状態と液相へ相転移したときの状態をそれぞれ透過型でイメージングし、物質の状態による誘電特性の違いを識別できることを確認した。液体試料は、厚さ 1 cm の発泡スチロールに奥行約 1 mm の穴を開け、そこに注入した。また同時に、水に凍結保護剤である DMSO (Dimethyl sulfoxide) を 10% 混合したもの (融点: 約 -4.8°C) についても同様にイメージングを行い、液相の水と DMSO 溶液の誘電特性の違いを識別することを試みた。

図 10 ①は、冷凍庫 (-20°C) で試料を凍結し、凍結状態の試料をイメージした結果である。このとき、温度上昇によって透過量はわずかに変化するが、相転移による透過量変化 (20 dB 以上) に比べて十分に小さいため、本実験では凍結時の温度変化は無視した。また、この試料を室温 (25°C) に 2 時間以上放置した後、再度イメージングを行った結果を図 10 ②に示す。それぞれ、点線で囲まれた部分に水溶液が存在しており、図から水溶液が融けると透過量が低くなる様子が観察できた。さらに、液相と固相の透過量の差 (絶対値) を計算して得た画像 (図 10 (下)) から、DMSO 溶液に比べ、水の液相と固相の差の方が大きくなることが分かった。凍結時、解凍時のそれぞれのイメージからでは、注入穴のサイズ (サンプル厚) や形状の違いが原因でわずかな水と DMSO 溶液の透過量の差を検出できなかったが、液相と固相の差をとることで水と DMSO 溶液を識別することができた。これは、液相と固相の透過量の差が、DMSO を加えることによって小さくなることを利用することにより得られた結果である。

以上の実験から、各種液体の状態の違いを 35 GHz 透過型イメージングによって識別することが可能であることが確認できた。さらに、試料やケースの形状が異なることで透過量に違いが生

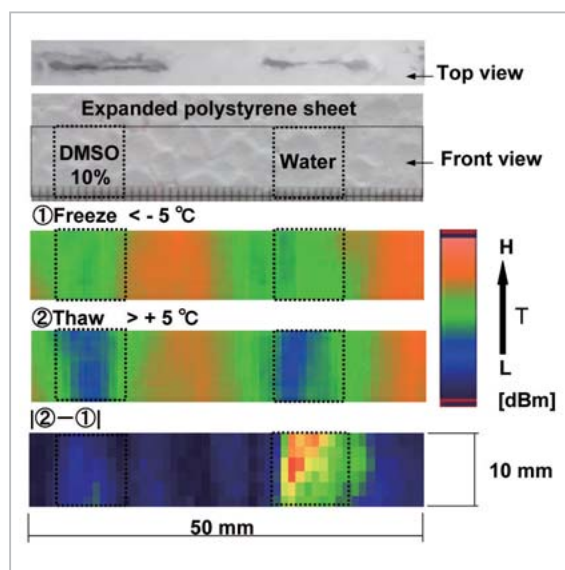


図 10 水と DMSO 溶液のイメージング結果

ずるが、水溶液の各状態における透過量の差をとることによって試料の違いを非接触で識別することも分かった。これらの結果は、本ミリ波イメージング装置を用いて、様々な物質の誘電特性の違いをイメージすることができる可能性を示している。

5 むすび

本研究では、広帯域ミリ波イメージングシステムを試作し、その広帯域性や信号強度などの基礎特性について確認した。また、2 枚の発泡スチロール板で挟み込んだ JR 東日本の Suica カード内のアンテナをミリ波によってイメージした結果から、透過型と反射型イメージング系それぞれによって、可視光では不透明な物質の内部にある金属を探知できることや、イメージングに使用する周波数によって散乱や回り込み干渉などの影響が異なる様子をミリ波イメージングから確認できることが分かった。

さらに、応用として水と氷、水と凍結保護溶液 DMSO の誘電特性の違いを、35 GHz の透過型イメージングによって識別できる可能性について調べた。水と氷の場合は、大きな透過量の違いから容易に識別することができたが、液相の水と DMSO では透過量の差が小さく、透過量を比較するだけでは識別することが困難であった。しかし、液相と固相の透過量の差を画像化することに

よって、そのわずかな違いもイメージ画像から識別することが可能になるということが分かった。

これらの結果より、本装置を使用することによって、様々な周波数で不透明な物質中の試料をイメージすることができ、回り込み干渉や散乱、

物質の誘電特性などを総合的に評価できる可能性を示すことができた。今後は、更なる広帯域化やイメージング精度の向上を図り、工業材料の欠陥検出など非破壊検査装置の開発なども行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1 H. H. Meinel, "Commercial Applications of Millimeterwaves History, Present Status, and Future Trends", IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 43, 1639-1653, 1995.
- 2 K. Mizuno, Y. Wagatsuma, H. Warashina, K. Sawaya, H. Sato, S. Miyanaga, and Y. Yamanaka, "Millimeter-wave imaging technologies and their application", proceedings of IVEC, pp.1-2, 2007.
- 3 D. M. Sheen, D. L. McMakin, and T. E. Hall, "Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 49, 1581-1592, 2001.
- 4 M. Mizuno, C. Otani, K. Kawase, Y. Kurihara, K. Shindo, Y. Ogawa, and H. Matsuki, "Monitoring the frozen state of freezing media by using millimeter waves", Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 20, pp.341-349, 2006.
- 5 K. Kawase, "THz-imaging for drug detection and LSI inspection", Optics & Photonics News, 15, 34-39, 2004.

みずの まや
水野麻弥

電磁波計測研究センター EMC グループ
専攻研究員 博士（工学）
電磁波応用