

ミリ波を用いた非破壊検査の基礎研究*

小田 誠*¹・肥後 一彦*¹

Fundamental Study on Non-destructive Inspection Using Millimeter Waves

Makoto ODA and Kazuhiko HIGO

本研究では、ミリ波を用いた非破壊検査装置実現に必要な要素技術として、2次元的なイメージング（可視化）を行う手法と、イメージングのためのシステム実現に必要なレンズ設計を行う手法の検討を行った。まず、レンズ設計手法については、シュミレーション解析によりレンズ設計を行い、その設計の妥当性を評価するために、焦点距離の実測との比較を行った結果、解析と実測とに差が生じ、焦点深度の影響を加味した設計方法を検討する必要があることが判った。また、2次元のイメージング手法については、2軸の自動ステージにアクティブ型ミリ波装置を搭載したシステムを構築し、模擬的に穴を作ったゴム材でイメージング実験を行った結果、ゴム材内部の穴の可視化が可能であることを確認した。

キーワード：ミリ波、レンズ設計、イメージング

1 はじめに

ミリ波とは光と電波の中間の性質を持つ電磁波である。近年、ミリ波を使った多くの研究が行われ、ミリ波を利用した製品が実用化されてきている。ミリ波は光、赤外に比べて物質の透過性がよく、衣服、炎、粉塵、雲、ダンボールなどを通してのイメージング、あるいは食品、生体、農林畜産物等の非破壊（非侵襲）検査・診断の分野に応用可能である。当センターでは、各種計測のうちでも対象物自身からのミリ波放射（黒体放射）を検出するパッシブ型（ミリ波放射計）、およびミリ波を対象物に照射しその透過波あるいは反射波を計測するアクティブ型の両方式による非破壊検査装置の研究開発を進めている。

今回は、ミリ波の非破壊検査装置実現に必要な要素技術として、レンズ設計手法と2次元的なイメージングを行う手法の検討を行った。

2 方法

2-1 レンズ設計（シュミレーション解析）

イメージングを行う際にレンズは大変重要な役

割を果たす。空間分解能が小さければ細かい部分まではっきりと区別することが出来る。また、レンズの開口分の電力を受信できるため、感度が高くなる。そこで、イメージングに用いるためのレンズの設計方法を検討した。今回は焦点距離150mmのレンズの開発方法を検討した。

レンズの設計にはレンズ設計ソフトZEMAXを使用し、レンズの種類は”偶数次”球面・非球面レンズとした。

”偶数次”球面・非球面レンズは次式によって定義される。

$$z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2h^2}} + A \cdot h^4 + B \cdot h^6 + C \cdot h^8 + D \cdot h^{10}$$

c =面の頂点曲率[mm⁻¹], つまり曲率半径[mm]の逆数

K =コーニック係数

A, B, C, D =非球面係数

$h^2 = x^2 + y^2$ [mm]

x, y =面上の座標[mm]

レンズの材料には、高密度ポリエチレンを使用した。材料の比誘電率をネットワークアナライザ

*ミリ波による非破壊検査装置に関する研究（第2報）

*1 機械電子部

伝送ライン法を用いて測定した。伝送ライン法では、密閉された伝送ラインの一部に材料を入れ、反射信号(S_{11})と伝送信号(S_{21})の測定値から比誘電率 ϵ_r を求めることができる。

2-2 レンズ焦点距離の測定

レンズ設計のためのシュミレーション解析結果の妥当性を評価するために、電波暗室において設計したレンズの焦点距離を測定した。測定にはネットワークアナライザを使用した。

2-3 イメージングシステム

今回、2次元のイメージング手法について検討するために、2軸の自動ステージにアクティブ型ミリ波装置を搭載して、イメージングを行う実験システムを構築した。

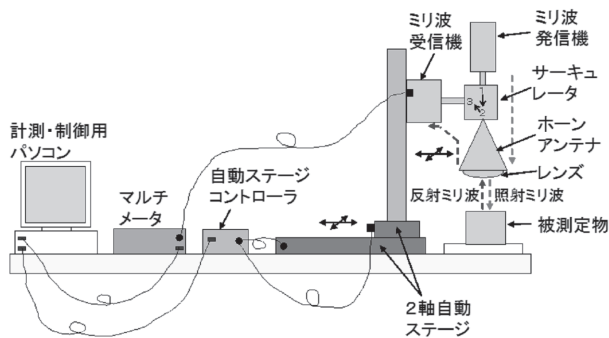


図1 イメージングの実験システム

図1に構築したイメージングの実験システムの構成を示す。本システムでは、2軸の自動ステージにKa帯のミリ波発信器、ミリ波受信機、およびサーキュレータ、ホーンアンテナから構成されるアクティブ型ミリ波装置を取り付け、自動ステージを2軸で動かすことにより、2次元のミリ波による可視化画像が得られるようになっている。ミリ波発信器で発信したミリ波はサーキュレータにより、レンズを取り付けたホーンアンテナに導波される。ホーンアンテナから射出されたミリ波のうち、被測定物の表面あるいは内部で反射したミリ波は同じホーンアンテナで集められ、再びサーキュレータに入るが、その作用により、ミリ波受信機側に導波されて、ミリ波受信機まで到達する。ミリ波受信機はマルチメータにつながっており、その出力データがAD変換された後、計測・制御用パソコンに取り込まれる。

2軸の自動ステージも自動ステージコントローラ

ラを介して、計測・制御用パソコンに接続されており、Visual Basicで作成した自作のプログラムにより、自動ステージの制御およびマルチメータからのミリ波受信出力データの自動取り込みを行っている。

2-4 イメージング実験

構築したイメージングを行う実験システムを用いて、比較的均質な材料であるゴム材を対象として、イメージング実験を行った。図2に実験に使用したゴム材を示す。ゴム材(1辺が50mmの直方体)の側面から穴(穴の大きさ:10mmφ、深さ:30mm、穴の中心:上面から10mm)を空け、ゴム材の上面からミリ波を照射した。イメージング範囲は60mm×60mmで、自動ステージの駆動ピッチは、2.5mmとした。

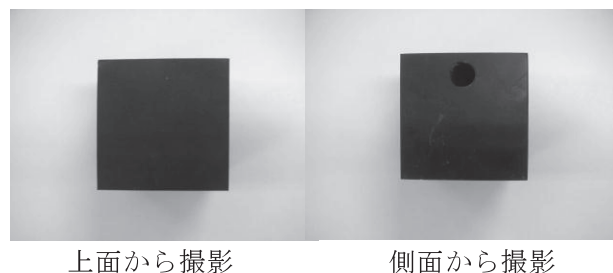


図2 実験に使用したゴム材

3 結果

3-1 レンズのシミュレーション解析・実測結果

比誘電率の測定結果は $\epsilon_r = 2.965$ であった。この値を用い、焦点距離が150mmになるようにシミュレーション解析を行った結果、コーニック係数を2.724、面の頂点曲率を0.010994とすることにより、焦点距離が目標値に最も近づくことが分かった。シミュレーション解析結果を図3に示す。また、この曲率を持つレンズの焦点距離を測定した結果を図4に示す。

実測とシミュレーション解析の結果の違いが生じているが、これは焦点深度¹⁾の影響によるものと考えられる。今後は焦点深度の影響を加味した設計方法を検討する必要がある。

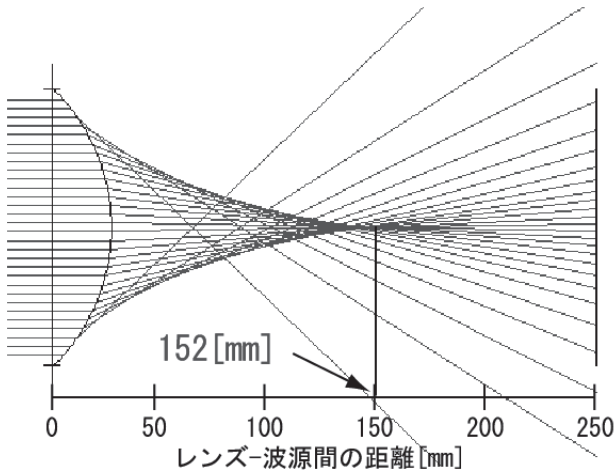


図3 ZEMAXによる解析結果

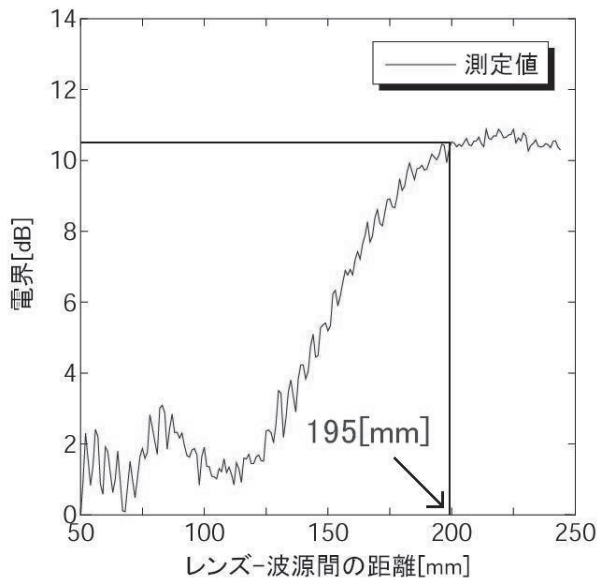


図4 焦点距離測定結果

3-2 イメージング結果

イメージング実験の結果を、図5に示す。濃淡の濃い方が、ミリ波の反射強度が小さい箇所、逆に淡い方が、ミリ波の反射強度が大きい箇所である。図によると、ゴム材の外形が可視化できており、さらに、穴の部分と思われる反射強度が弱くなっている箇所があるのが判る。これは、穴の部分とそうでないところの境界部分で乱反射が起こり、穴周辺に比べれば、穴部分の反射強度が下がっているからであると思われる。

ただし、可視化画像の精度としては不足しているため、今後は、精度向上の検討が必要である。

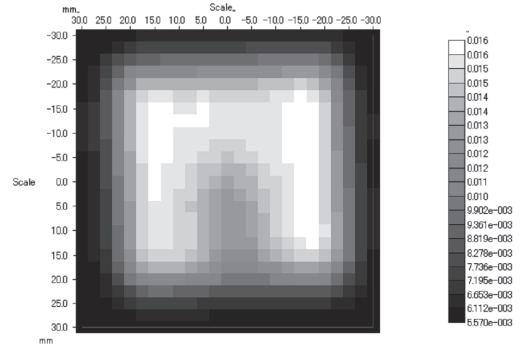


図5 ゴム材のイメージング結果

4 まとめ

- 1) レンズ設計手法の検討のために、焦点距離150mmのレンズについて、シミュレーション解析による設計と、焦点距離の実測による比較を行ったところ、実測とシミュレーション解析の結果に違いが生じており、焦点深度の影響を加味した設計方法を検討する必要があることが判った。
- 2) 2軸の自動ステージを用いたアクティブ型のイメージングシステムを構築し、均質なゴム材に模擬的に穴を作ったもので実験を行ったところ、ゴム材内部の穴の可視化が可能であることが判った。しかし、さらなる精度向上が必要であることも判明した。

5 参考文献

- 1) 永田信一, ”図解レンズがわかる本”, 日本実業出版社(2002)