

# マイクロ波を用いた金属表面傷検出に関する研究

日大生産工（院） 志久間 仁

日大生産工 黒岩 孝

日大生産工 坂口 浩一

日大生産工 松原 三人

## 1. はじめに

現在，金属表面傷を検出する非破壊検査技術は種々あるがマイクロ波を用いたものは少ない<sup>[1]</sup>．これは，金属表面傷が散乱電磁波へ及ぼす影響を検出するとき，金属表面でマイクロ波がほぼ完全反射されるため，小さな傷を検出するのが困難なためである．しかしマイクロ波を用いることにより，金属表面傷が塗装等で見えない状態での検出や，被検査物に非接触状態で検出できるという利点がある．そこで我々は，先に市販のX帯同軸導波管変換器を用い金属表面傷を非接触状態で検出できることを実験より示した<sup>[2][3]</sup>．しかしこのときは，傷検出原理が明確となっていなかった．そこで，傷と金属表面上電流および散乱電界との関係を，実験結果を基にその関連性について検討を行ったので結果を報告する．

## 2. 検討方法

本研究では X 帯の同軸導波管変換器を用いて金属表面傷検出の検討を行った．図 1 に解析モデルを示す．解析には FDTD 法を用い，周波数は 9[GHz]とした．金属表面上の傷として幅  $w$ ，深さ  $d$  の導波管開口部に対して十分に長い溝を設けた．使用した導波管の開口部の寸法は電界方向が 10[mm]，磁界方向が 23[mm]である．開口部と金属表面との距離を  $h$  とした．また，導波管の開口部中心を原点として磁界方向を  $x$  軸，電界方向を  $z$  軸と座標を定め，

溝が開口部の中心となるように同軸導波管変換器を配置した．このときの金属表面上電流分布や開口部上電界強度等を求め，実験結果との関連性について検討する．

## 3. 結果

はじめに導波管開口部の電界方向と溝を平行にし， $x$ 方向に導波管を移動させて溝の有無による $S_{11}$ 振幅差を調べた実験結果<sup>[2]</sup>を図 2 に示す．図は溝幅 $w$ を  $1/33$ ，深さ $d$ を  $1/66$ ，距離  $h$  を  $1/33$ にしたときの開口部中心からの

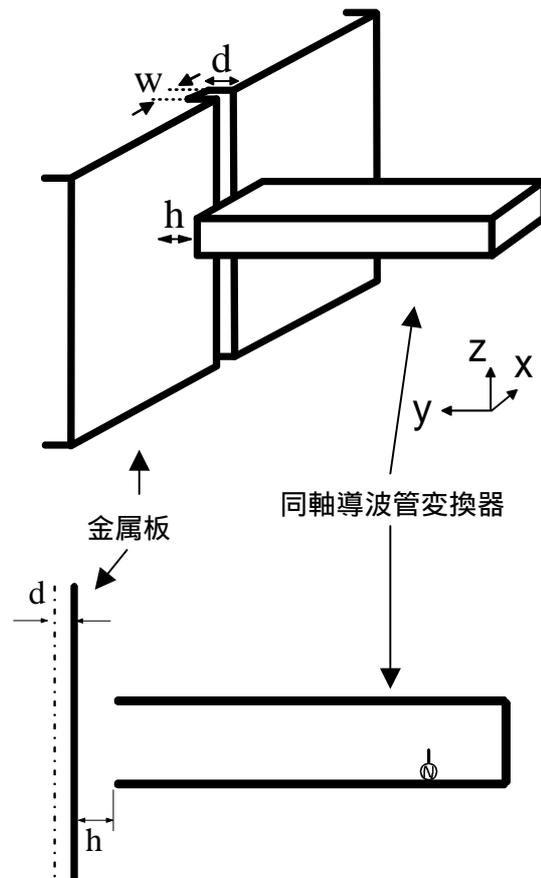


図 1 解析モデル

溝の位置に対する $S_{11}$ 変化量を示す。 $S_{11}$ 変化量とは金属表面溝の有無による $S_{11}$ 振幅の差である。溝が開口部より離れているとその変化はほとんどないが、開口部に溝が来ると変化量が大きくなっていき開口部中央で最大となる。この $S_{11}$ 変化量より、マイクロ波を用いた非接触での金属表面溝検出が可能であることがわかる。また、導波管開口部の磁界方向と溝を平行にした場合では、溝が電界方向と平行の場合に検出できていた溝幅 $w = \lambda/33$ の検出が困難となった。以上の結果より傷検出原理は、マイクロ波を照射することにより金属表面上に電流が発生し、それが傷により変化することで散乱電界が傷情報を持つためと考えられる。そこで、数値解析より金属表面上電流や開口面上電界強度を求め実験結果との関連性について検討する。

図1に示す解析モデルを制作しFDTD法により数値解析を行い、金属表面上の電流値を求めた。溝寸法は図2に示した実験と同様に、溝幅 $w = \lambda/33$ 、深さ $d = \lambda/66$ 、距離 $h = \lambda/33$ としている。図3に溝と平行であるz軸方向の電流振幅の差を示す。この電流振幅の差というのは、溝が開口部中心前方にあるときの表面電流と、溝の無いとき同位置に流れる電流値との差としている。結果より溝の縁であるエッジ部(図中)には強く電流が流れているが、それ以外では溝の有無による差は僅かしかないとわかる。これより金属表面傷検出には、エッジ部の電流が強く影響していると考えられる。

次に溝幅や開口部からの距離、溝の長さなどを変化させ解析を行った。まず、溝幅に対するエッジ部の電流の関係を調べた。図4に開口部中心前方に配置した溝幅に対するエッジ部の電流振幅の差を示す。これより、溝幅を狭くするにつれエッジ部の電流振幅が小さくなり、特にこの場合、 $\lambda/33$ より狭い溝幅になると急激に小さくなることわかる。こ

の結果は先の報告<sup>[2]</sup>で溝幅 $\lambda/66$ の溝が検出できなかったことと関係すると考えられる。距離 $h$ に関する検討として、距離変化に対するエッジ部電流 $I_e$ を解析より求めた。図5に

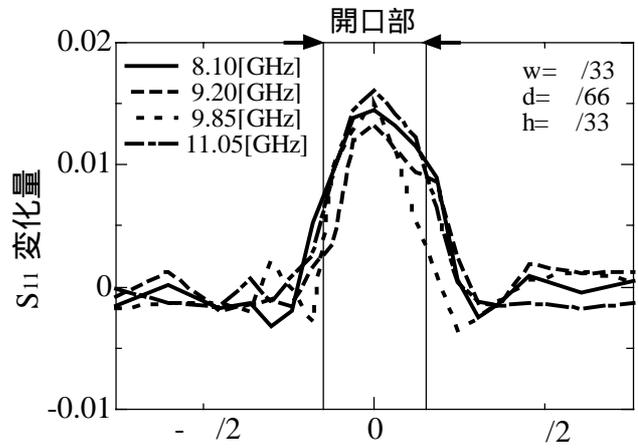


図2 開口部中心からの溝の位置に対する $S_{11}$ 変化量特性(実験値)

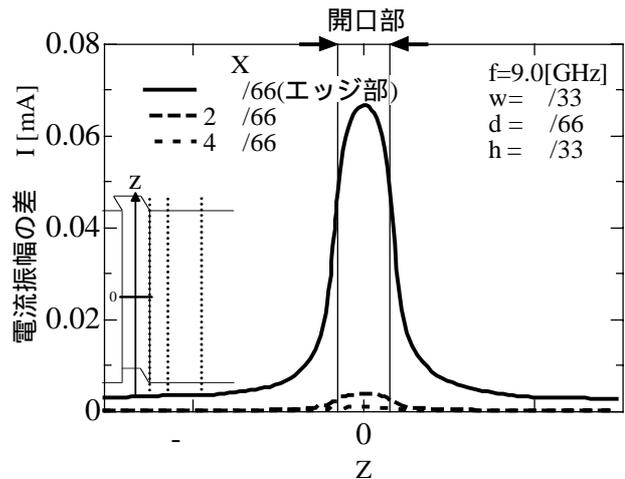


図3 z軸方向の電流振幅の差

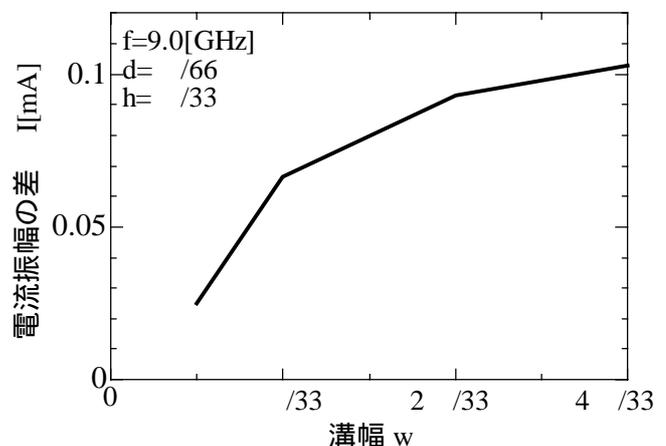


図4 溝幅変化に対する電流振幅の差

距離変化に対する電流振幅の差を示す．これより，距離を離すにつれて振幅の差は小さくなり金属表面溝が検出しにくくなることがわかる．これは，実験結果と同様な傾向であり，現在の装置では距離は大きく取れないことが分かる．

実際に金属表面傷検出を行う際に傷が開口部より長いとは限らない．そこで，溝の長さについての検討を行った．図6に各溝の長さに対するz軸方向のエッジ部電流  $I_e$  を示す．開口部正面エッジ部電流の大きさは溝の長さに影響されないが，エッジ部長が短いためその影響の仕方は開口部に対し狭い範囲となる．これより，溝の長さが短くなると傷は検出しにくくなると考えられる．

次に実験では検出が困難となった，溝を導波管開口部磁界方向と平行にした場合の解析を行った．結果は示さないが，金属表面電流は溝エッジ部が流れを横切るため切られ，電流値変化は大きいエッジ部のみである．実験では傷検出は困難となっている．このことから溝検出の検討は電流値変化だけではなく，溝の影響を受けた電界からも行った．図7にz軸方向に対する開口部中央での電界を示す．電界が左右対称となっていないのは同軸導波管変換器の変換部の影響である．これより，金属表面溝の有無による電界の差を見る  $z=0$  付近で僅かだが見ることができる．実験より金属表面溝が開口部の磁界方向と平行の場合に溝検出が困難なのは，この金属表面溝による電界の差が現在の実験系では検出できていないためだと考えられる．

溝の形状による検討もあわせて行った．比較に用いた三角溝を図8に示す．図9より溝の形状について比較すると，三角溝とした場合には溝内がテーパ状となっているため電流の最大値が矩形溝より小さくなっていることがわかる．しかし，共に開口部中央で溝の有無による電流振幅の差は大きいことから，

溝エッジ部が溝検出の大きな要因の一つであることが確認できる．

実験では金属表面を塗装したことを想定して金属表面を誘電体膜で覆っての検討も行った

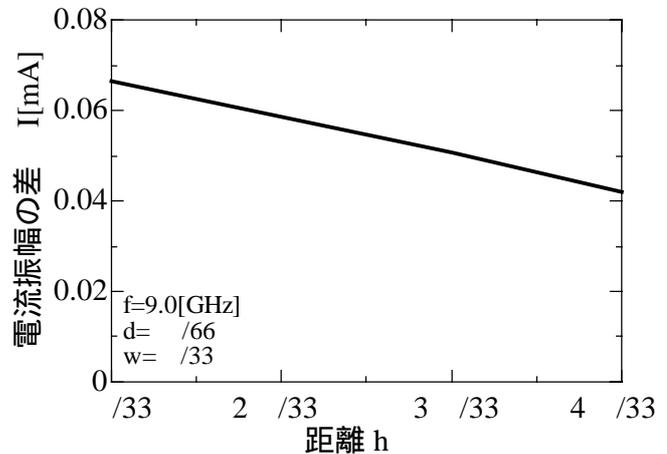


図5 距離変化に対する電流振幅の差

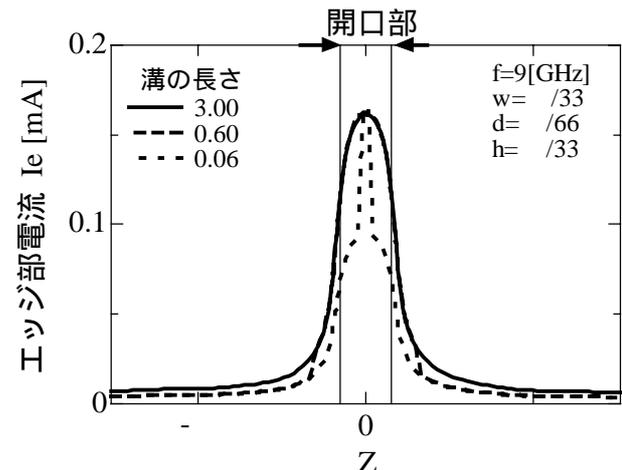


図6 溝の長さの検討

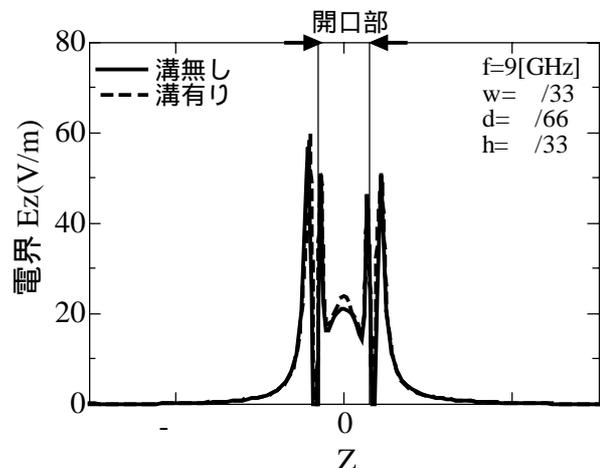


図7 開口部中央におけるz軸上の電界強度（溝が磁界と平行）

た．その結果，溝が誘電体で埋まっていない場合には金属表面溝を開口部の電界方向と平行にした場合でも $S_{11}$ の変化量が少なく傷検出が困難であったが，溝を誘電体で埋めることにより $S_{11}$ の変化量が僅かであるが現れ傷検出ができた．このことを調べるため，図 10 に示す解析モデルを制作し金属表面上の電流分布を求めたが，実験結果を裏付けるような特性を見ることができなかった．そこで，誘電体により開口部中央の電界が変化すると考え電界強度より検討を行うこととした．図 11 に $z$ 軸方向に対する電界 $E_z$ 特性を示す．図中の溝無しは金属表面上に溝が無く誘電体膜も張っていない場合，誘電体膜有りは溝の有る金属表面を誘電体で覆った場合，誘電体膜+溝は誘電体膜で覆いかつ溝も誘電体で埋めた場合を示している．これより，溝無しと誘電体膜有りには差が無いが，溝無しと誘電体膜+溝には差が出ていることがわかる．これは，溝内誘電体が散乱電界に影響しているためと考えられ，実験結果の裏付けとなる．

マイクロ波を用いた金属表面傷検出について数値解析より金属表面上電流等を求め，実験結果との関連性について検討を行った．その結果，傷エッジ部電流や散乱電界の変化より実験結果を裏付けることができた．

### まとめ

マイクロ波を用いた金属表面傷検出について数値解析より検討を行い，傷エッジ部電流や散乱電界の変化と実験結果との関係を明らかにした．今後の課題として，解析結果を基に同軸導波管変換器を改良する必要がある．

### 参考文献

- [1] C.Y.Yeh and R.Zoughi : IEEE, IM Vol.43, No.5, pp.719-725 (1994)
- [2] 服部, 志久間, 坂口, 黒岩, 松原:2004 年信学ソ大, C-2-109
- [3] 志久間, 坂口, 黒岩, 松原:2005 年信学総大, C-2-132

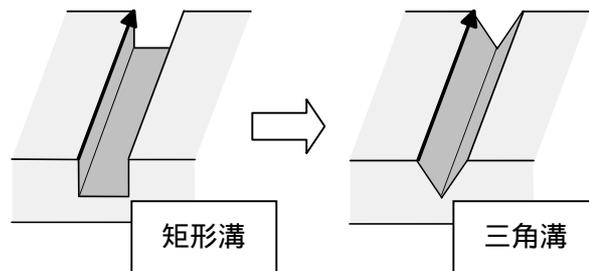


図 8 溝形状

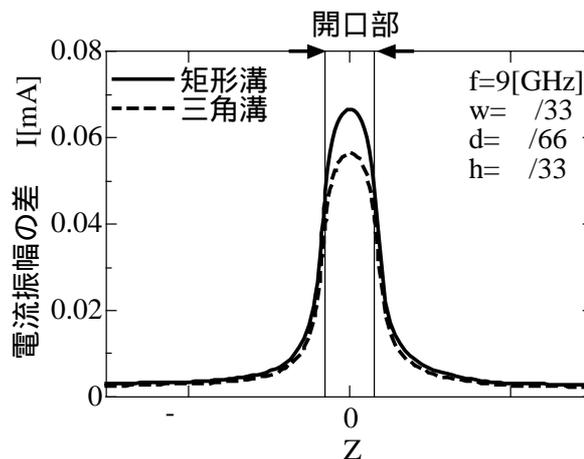


図 9 溝形状変化による特性変化

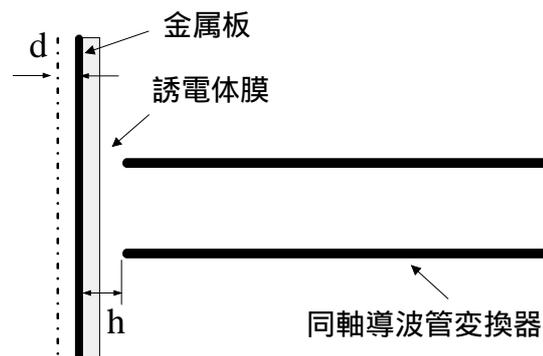


図 10 金属表面上に誘電体膜を配置

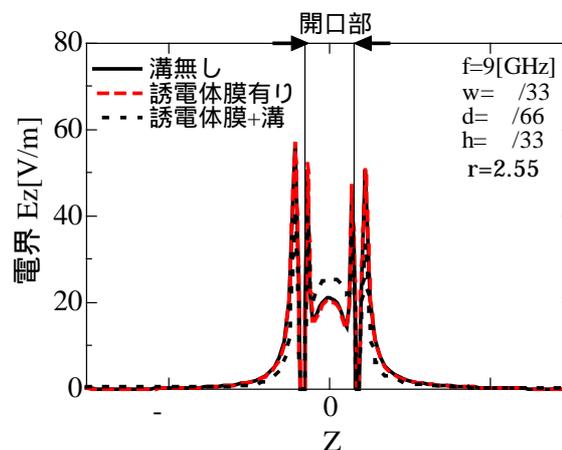


図 11 開口部中央における $z$ 軸上の電界強度 (誘電体膜)