

GMR を用いた矩形励磁渦電流探傷プローブによる欠陥検出に関する研究

日大生産工（院）

○住田 裕基

日大生産工

小山 潔、星川 洋

1. はじめに

非破壊検査の方法の一つである渦電流探傷試験は電磁誘導を利用した探傷方法であり、欠陥検出を行うプローブの磁界検出部にはコイルが使用され、欠陥により変化した渦電流から発生する磁界を検出部のコイルで読み取ることによって信号化し、欠陥の有無を知ることができる。渦電流探傷試験は主に表面探傷に用いられており、対象物に対して励磁する場合に使用される周波数域は高周波数域である。しかし、渦電流の浸透深さは周波数に依存する部分が大きく、高周波数を使用すると表皮効果により渦電流の浸透深さは浅くなり、欠陥の深層部まで渦電流が浸透しにくくなる。また、浸透深さを深くするため低周波数を使用すると、発生する渦電流の強さが弱くなり、渦電流から発生する磁界も弱くなるため、磁界検出部のコイルによる誘導起電力が低下することにつながり、欠陥検出が難しくなる。このように磁界検出部にコイルを用いると周波数による影響を大きく受けることになる。

そこで周波数から受ける影響を軽減するために、磁界検出部に巨大磁気抵抗効果素子（GMR）を用いた渦電流探傷プローブを検討した。¹⁾²⁾GMR は外部磁界により電気抵抗が変化する巨大磁気抵抗効果を生じ、また DC から数 MHz 帯の周波数による磁界に対して検出感度がほぼ一定であり、高感度であるという特徴がある。

本研究ではプローブの磁界検出部に GMR を用いた場合とコイルを用いた場合で、高周波数から低周波数における欠陥検出信号を比較して、周波数が検出信号に与える影響について検討を行った。

2. 巨大磁気抵抗効果素子（GMR）

2. 1. GMR の構造

図 1 に GMR の積層構造を示す。GMR は強磁性層（NiFeCo）と非磁性層（Cu）との人工格子多層膜である。ポリイミドフィルム基板上に Ti を 5.0nm、NiFeCo を 5nm で成膜し、膜上に Cu 層を 2.0 nm、NiFeCo 層を 1.5nm とした 20 層交互に積層されている。強磁性層に存在する磁化ベクトルはあらかじめ方向が定められており、各層の磁化ベクトルの方向は交互に反対を向き、反平行状態となっている。そのため、GMR は磁化ベクトルの向いている方向である図 1 の y 方向の磁界に対して反応するようになっている。

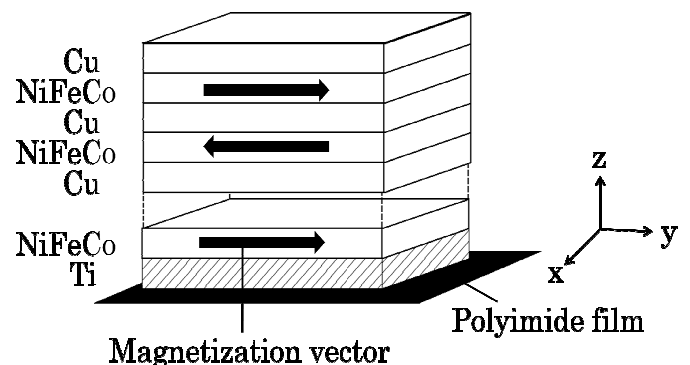


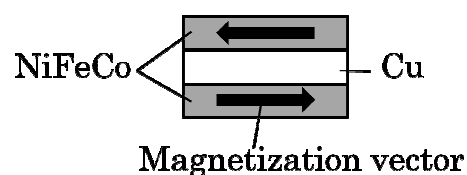
図 1. GMR の積層構造

Flaw Detection by Rectangle Exciting Eddy Current Testing Probe with GMR

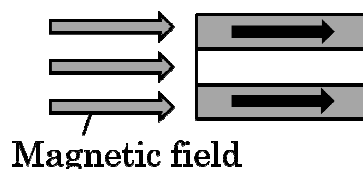
Yuki SUMIDA, Kiyoshi KOYAMA and Hiroshi HOSHIKAWA

2.2. 巨大磁気抵抗効果

図2に外部磁界による磁化ベクトルの向きの変化を示す。図2(a)のように通常では強磁性層の磁化ベクトルの方向は各層ごとに反対に向いており反平行状態であるが、図2(b)のように外部から磁界が印加されると、磁化ベクトルは磁界が印加された方向に向きをそろえ平行状態になる。平行状態になるとGMR中の電子の散乱が弱まり、電気抵抗の変化が起こる。このように外部磁界により電気抵抗が変化する現象を巨大磁気抵抗効果という。



(a) 外部磁界がない場合



(b) 外部磁界を印加した場合

図2.磁化ベクトルの向きの変化

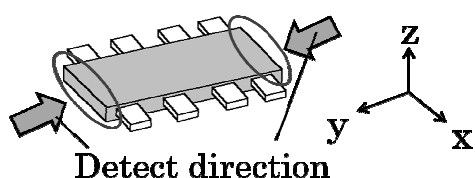


図3.パッケージ型のGMR

2.3. GMRによる信号の出力

本研究で使用したGMRはパッケージされた素子を用いた。図3はパッケージ型のGMRを示し、図4はパッケージ中の回路図を示す。図3よりパッケージされたGMRはy方向の磁界を検出するようになっている。図4よりパッケージ中の回路はブリッジ回路構成になっており、GMRに磁界が印加されると巨大磁気抵抗効果により電気抵抗が変化する。GMRの電気抵抗が変化すると、ブリッジ回路中の平衡状態が崩れ、電圧を生じる。本実験ではこの電圧を検出信号として得ることにした。また、GMRは直流磁界および交流磁界に対して正符号の直流電圧を出力する。

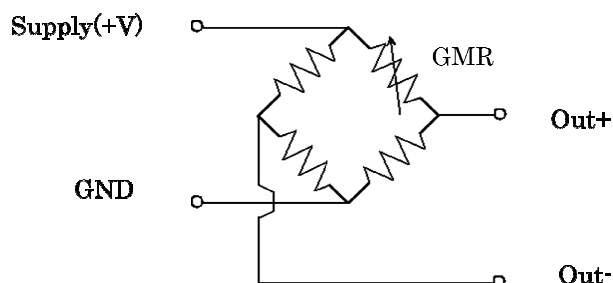


図4.パッケージ中の回路図

3. GMRを用いた矩形励磁プローブ

3.1. 構造

図5にGMRを用いた矩形励磁渦電流探傷プローブの構造を示す。二つの縦置き矩形励磁コイルの間にGMRを励磁コイルに流れる電流の方向と磁界の検出方向が同じになるように配置する。また、励磁コイルにはそれぞれ逆向きの電流を流す。

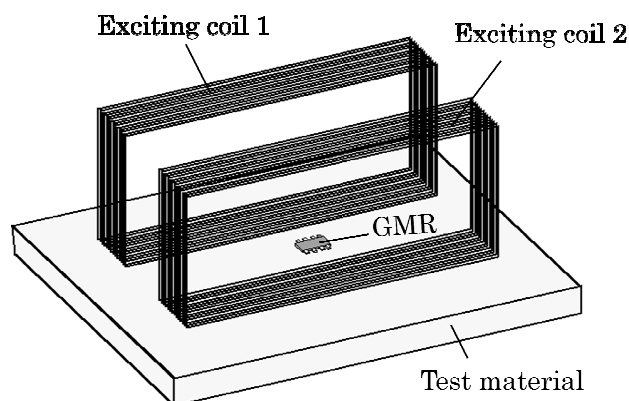


図5.矩形励磁渦電流探傷プローブの構造

3.2. 欠陥検出の原理

図 6 に欠陥検出の原理を示す。プローブの励磁コイルにはそれぞれ逆向きの電流を流しているため、試験体上に流れる渦電流の向きも逆向きで発生する。そのためプローブが欠陥に近づくと、渦電流は欠陥に沿って流れて閉ループを形成するようになる。欠陥に沿って流れる渦電流から発生する磁界は GMR の磁界検出方向と同じ方向に発生するため、巨大磁気抵抗効果により GMR は電圧を出力し、信号を得ることができる。また、欠陥の真上にくると欠陥の両側に流れる渦電流から発生する磁界の向きが逆向きとなり、お互いに打ち消しあうため GMR は磁界を検出せず電圧は発生しない。そして、欠陥の右側に位置すると、欠陥の右側で欠陥に沿って流れる渦電流の流量が増え、GMR は渦電流から発生する磁界を検出し電圧を発生させる。このように、GMR の検出信号は、欠陥の両側で電圧が発生する形となる。

4. 実験の条件及び方法

実験で使用した GMR は型番 AAH002-02 で、パッケージの寸法は長さ 5mm、幅 4mm、高さ 1mm である。また、直流電圧を 5V 加えた。励磁コイルの寸法は、長さ 40mm、幅 8mm、高さ 30mm である。比較に用いた検出コイルの寸法は、長さ 8mm、幅 1mm、高さ 7mm である。試験体は SUS316L で厚さは 25mm である。試験体には放電加工したスリット状の欠陥があり、寸法は長さ 40mm、幅 0.5mm で深さは 5mm、10mm、15mm、20mm である。試験周波数は 500Hz、2kHz、20kHz を使用し、励磁電流を 300mA 一定に設定した。

磁界検出部が GMR の場合とコイルの場合で、プローブの検出方向に対して欠陥が 90° になるようにプローブを走査させた。

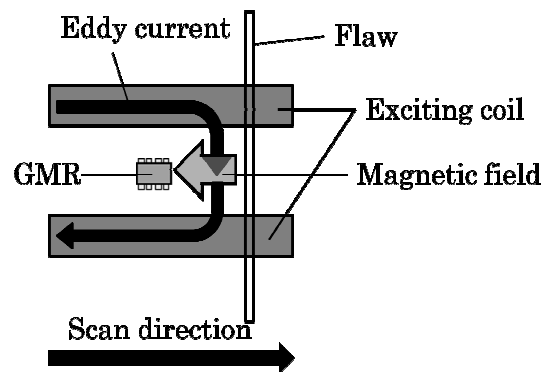


図 6. 欠陥検出原理

5. 実験結果

図 7 に磁界検出部が GMR の場合の信号を示し、図 8 はコイルの場合の信号の実数成分を示す。図 7 と図 8 を比較すると、周波数が 20kHz から 500Hz になると、GMR では信号の最大値の減少はおよそ 1/10 であるが、コイルではおよそ 1/100 となり、GMR に比べて大きく減少していることがわかる。そこで、図 9 に 2kHz の場合を含めた周波数に対する正規化信号振幅を示す。図 9 より欠陥深さが 20mm の場合では、GMR はコイルに比べて周波数の変化による信号振幅の変化が小さく、GMR とコイルではおよそ 10 倍程度の振幅の差がみられた。これは、GMR の場合では、周波数が低くなると渦電流の強度の低下によって出力電圧が減少するが、コイルの場合では渦電流の強度の低下と誘導起電力の低下が起これ、周波数の影響を二重に受けることになるので、GMR はコイルよりも周波数の影響を受け難いことがわかる。

図 10 に 2kHz の場合を含めた欠陥の深さに対する正規化信号振幅を示す。周波数が 500Hz のとき、コイルの場合では深さ 10mm までは比例的に変化するが、GMR の場合ではかなり深い欠陥深さの 15mm まで比例的に変化する。すなわち、低周波数でも GMR はコイルに比べて検出信号振幅が大きく、かつ深さ情報を得やすい。

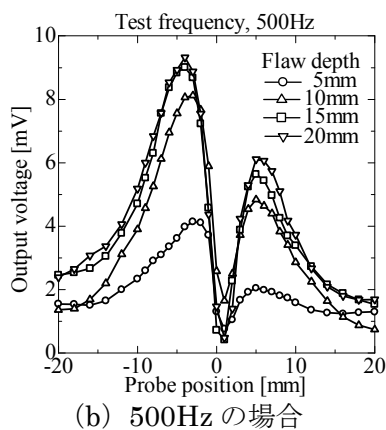
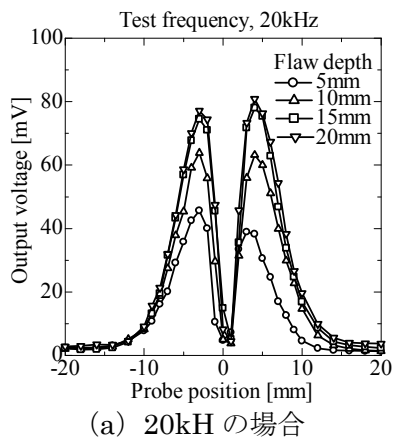


図 7. GMR の場合の検出信号

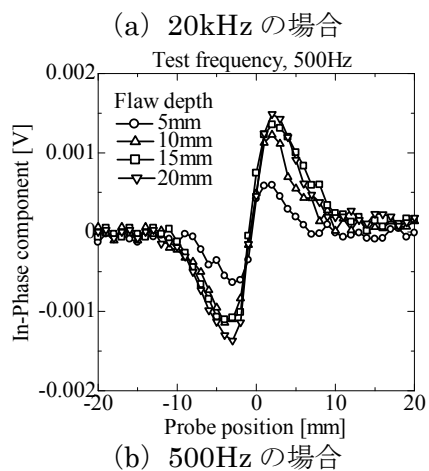
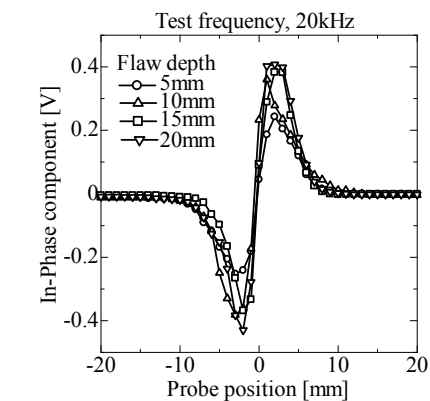


図 8. コイルの場合の検出信号 (実数成分)

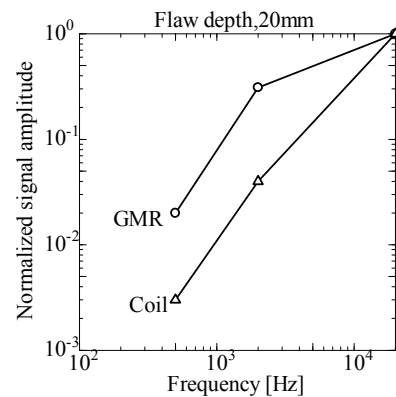


図 9. 周波数に対する正規化信号振幅

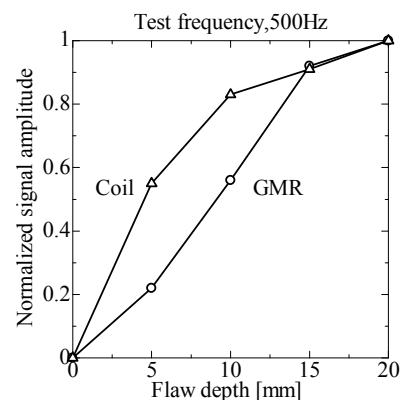


図 10. 欠陥深さに対する正規化信号振幅

6. まとめ

今回、磁界検出部が GMR の場合とコイルの場合での欠陥検出信号を比較し、周波数が信号に与える影響について検討を行った。結果より GMR はコイルに比べて周波数による影響を受け難く、低周波数においても深い欠陥の情報を得やすいことがわかった。

【参考文献】

- 1) 住田裕基、小山潔、星川洋：「GMR を用いた渦電流探傷プローブの基礎特性に関する研究」日本大学生産工学部第 41 回学術講演会 pp67-70(2008)
- 2) 住田裕基、小山潔、星川洋：「GMR を利用した渦電流探傷プローブに関する基礎的検討」第 12 回表面探傷シンポジウム講演会 pp11-14(2009)