

# 渦電流探傷 プロープによる鉄鋼材料の表面検査に関する研究

日大生産工(院) 田中 雄基  
日大生産工 小山 潔 星川 洋

## 1. はじめに

鉄鋼材料は、高品質のものが要求されており、材料の製造工程における検査には、数々の非破壊試験法が採用される。その中の表面検査においては非破壊試験法の1つである電磁誘導を利用した渦電流探傷試験が適用される。鉄鋼材料は、試験体の表面状態の変化や圧延工程での試験体の振動により、試験体とコイルとの相対距離(以下、リフトオフ)が変化する。また、材料の電磁気特性にばらつきがある場合がある。これらの事象は大きな雑音の原因となり、従来の渦電流探傷プロープである上置コイルにとっては非常に大きな問題であった。前回は鉄鋼材料の表面検査において、従来の上置コイルに比べプロープ<sup>1)</sup>は雑音の影響を受けにくく、高いSN比を得ることができるので、より小さいきずの検出も可能になることを報告した<sup>2)</sup>。

鉄鋼材料をより高品質にするため、きずの検出だけでなくきずの評価も行うことが求められる。今までの鉄鋼材料の渦電流探傷に関する報告ではきずの検出を目的としていたが、今回は出力信号からきずの深さを推定することを検討する。プロープのきず信号は8字パターンを描き、位相情報を含有する<sup>1)</sup>。非磁性材料の検査の場合、プロープを用いると、きず深さによって位相角が変化する。これは表皮効果による影響で、渦電流は試験体内部に浸透するにつれて指数関数的に減少し、その位相も遅れるからである。よって、きず信号の位相角からきず深さを推定することができる<sup>3)</sup>。鉄鋼材料はそのほとんどが磁性体であるが、同様の方法できず深さを推定を目指し、実験を行った。また、渦電流探傷試験において重要であるSN比についての実験結果も併せて報告する。

## 2. プロープの構造及び探傷原理

プロープは、円形の励磁コイルと矩形縦置きを検出コイルを組み合わせた図1のような構造である。プロープの励磁コイルは、コイルの円周に沿った渦電流を試験体表面に誘導する。試験体表面にきずがない場合、渦電流の流れは図2(a)のようになる。検出コイルはそれ自身と平行な渦電流成分を起電力として検出する。よって、リフトオフが変化しても渦電流の流れは図2(b)のように広がるだけであり、検出コイル方向の渦電流成分は発生しないため、結果図2(a)と(b)ともに信号が発生しない。試験体表面にきずがある場合、渦電流の流れは図3(a)、(b)、(c)のようになる。右側のグラフは出力信号で、横軸が入力との同相成分、縦軸が90°進相成分を表している。図3(b)のようにきずが検出コイルの直下にあるとき、きずを避けて流れる渦電流は検出コイルの両側で逆向きなので相殺して零となる。図3(a)、(c)のようにきずが検出コイルに対して図の紙面の下方と上方に位置した場合、検出コイル直下の渦電流成分は互いに逆向きなので、検出コイルの起電力は逆極性に発生する。図4はプロープのきず信号であり、図中θを位相角とする。

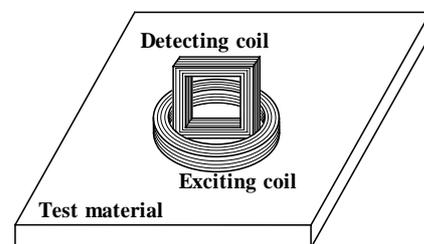


図1 プロープの構造

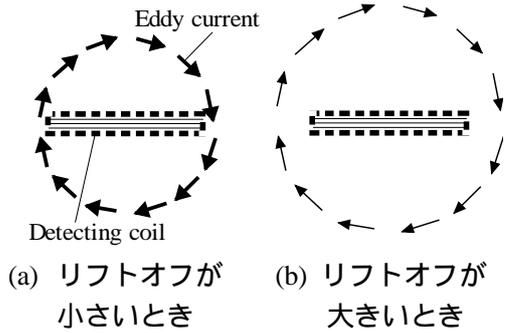


図2 試験体にきずがないときの渦電流

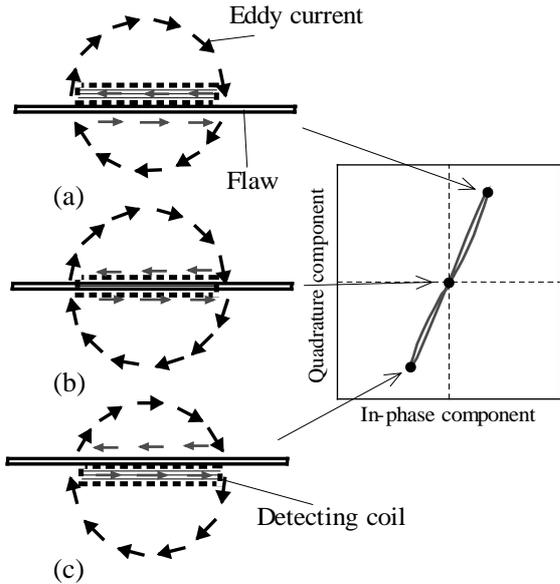


図3 試験体にきずがあるときの渦電流とその出力信号

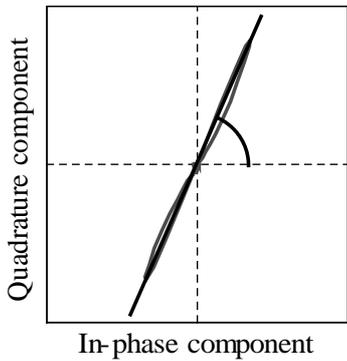


図4 きず信号とその位相角

### 3. 実験条件

プローブのコイル寸法は、励磁コイルは外径 9mm、内径 7mm、巻線断面積  $1 \times 1\text{mm}^2$ 、検出コイルは長さ 7mm、高さ 9mm、巻線断面積  $1 \times 1\text{mm}^2$  である。試験周波数は 2k、5k、10k、20k、50k、100k、200kHz とし、リフトオフは 2mm とした。試験体は、鉄鋼材料である SS400、SM、SCM の 3 種類を用意し、すでに研究の進んでいる非磁性体の結果と比

較するため、黄銅板も用意した。これらに放電加工により長さ 15mm、深さ 0.25、0.5、1.0、1.5mm のきずをつけた。ただし試験体の都合上、SCM に関しては 0.25、1.5mm の 2 種類、黄銅板に関しては 0.3、0.6、0.9、1.2mm となっている。走査方向は図 5 に示したとおり、スリット状のきずに対して  $90^\circ$  にプローブを走査した。プローブは検出コイルが走査方向に対して  $90^\circ$  になるよう配置する。

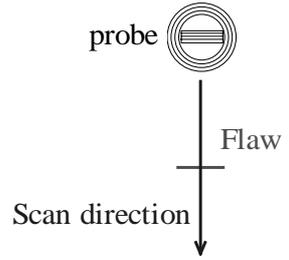


図5 走査方向

### 4. 実験手順

先程も述べたように、きず信号の位相角変化は表皮効果の影響によるものであり、渦電流の浸透深さと深く関係している。渦電流の浸透深さは(1)式で表される。

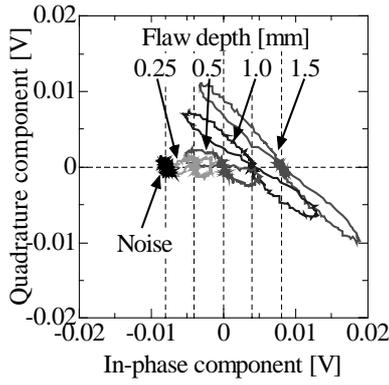
$$\text{浸透深さ}(\delta) = 1 / (\pi f \mu \sigma)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $f$  : 試験周波数、 $\mu$  : 透磁率、 $\sigma$  : 導電率を指す。

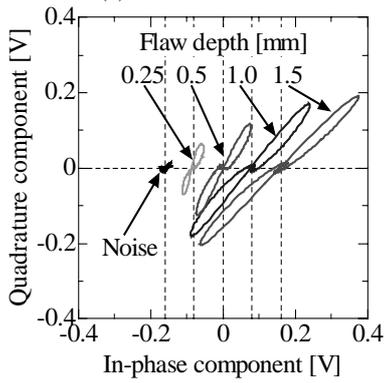
この式から、試験周波数は位相角の変化に関して重要なパラメータであることがわかる。そこで、試験周波数を変化させて実験を行う。ここで、SMに関しては、プローブを用いて周波数を変化させる実験を行った場合、SN比に大きな影響を与えることが既に確認されているので、渦電流探傷の最重要課題であるきず検出をし易くするため、周波数を変化させた場合のSN比についても検討する。ここで、雑音はきずのない場所を走査したときの出力とする。

### 5. 実験結果

まず、各試験体に対し 2k ~ 200kHz の試験周波数を使いきず信号と雑音を得た。図 6 は SS400、図 7 は SM、図 8 は SCM、図 9 は黄銅板のきず信号と雑音のパターンである。図 6、7 の(a)、(b)の周波数は、それぞれ 2kHz、20kHz で、図 8、9 の(a)、(b)の周波数はそれぞれ 20kHz、200kHz である。実際にはどの試験体も 2kHz、5kHz、10kHz、50kHz、100kHz、200kHz の実験も行っているが、ここでは割愛する。

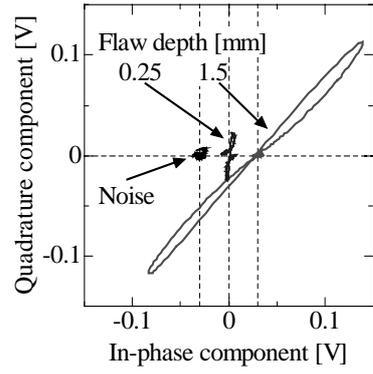


(a) 試験周波数 2kHz

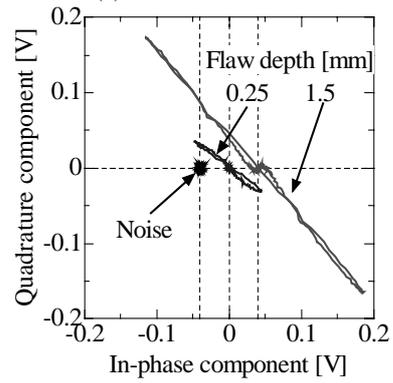


(b) 試験周波数 20kHz

図6 SS400 のきず信号及び雑音

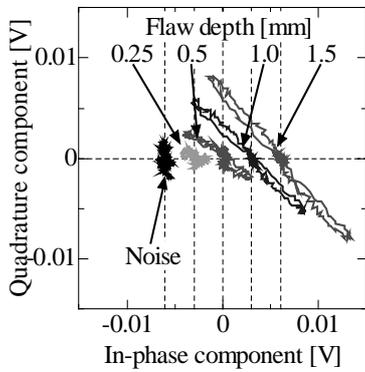


(a) 試験周波数 20kHz

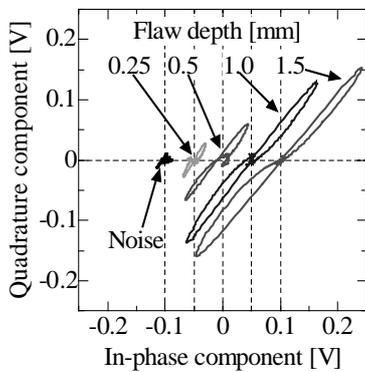


(b) 試験周波数 200kHz

図8 SCM のきず信号及び雑音

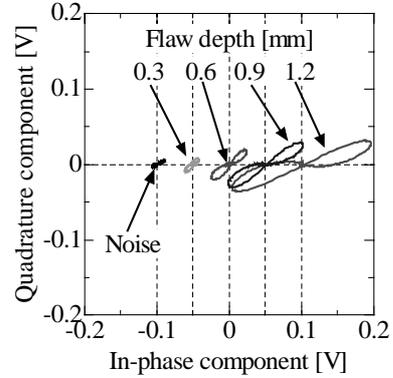


(a) 試験周波数 2kHz

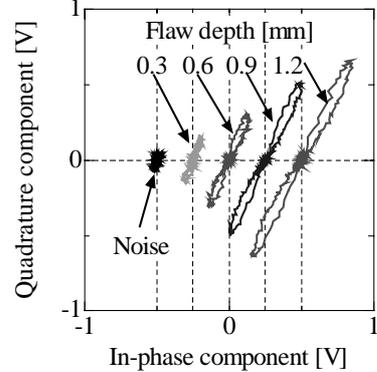


(b) 試験周波数 20kHz

図7 SM のきず信号及び雑音



(a) 試験周波数 20kHz



(b) 試験周波数 200kHz

図9 黄銅板のきず信号及び雑音

まず、図 6 ~ 9 のきず深さ 1.5mm(黄銅板は 1.2mm)のきず信号を S、ノイズを N として振幅から S/N 比を算出した。図 10 に周波数に対する S/N 比を示す。どの試験体に関しても、概ね周波数が高くなると S/N 比は高くなる。よって、高い周波数できず検出を行うのが望ましい。

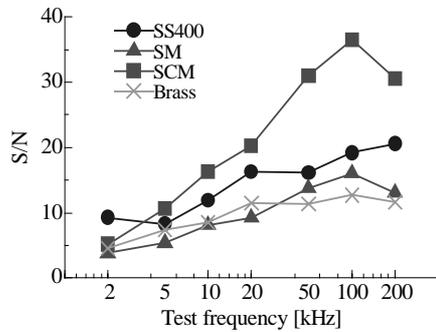


図 10 周波数に対する S/N 比

次に図 6、7 を見ると、(a)2kHz のときのほうがきずによる位相角変化が大きい。また、図 8、9 を見ると、(a)20kHz のときのほうがきずによる位相角変化が大きい。このように、試験体ごとに位相角変化の大きい周波数があることがわかる。そこで図 6 ~ 9 より各信号の位相角を求め、きず深さ 0.25mm のときと 1.5mm のとき (黄銅板は 0.3mm と 1.2mm) の位相角差を  $\Delta\theta$  として周波数に対する位相角差  $\Delta\theta/f$  を図 11 に示す。  $\Delta\theta/f$  が大きければ大きいほどきず深さ変化による位相角の変化が大きいので、  $\Delta\theta/f$  の最も大きい周波数がその材料にとって、位相角からきず深さを評価する際の最適な周波数であると言える。

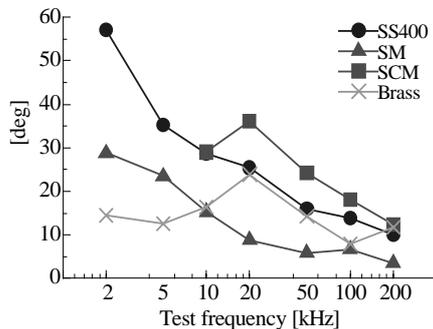


図 11 周波数に対する位相角差

図 11 から、  $\Delta\theta/f$  の最も大きい周波数は SS400 と SM では 2kHz で、SCM と黄銅板では 20kHz であるのがわかる。この周波数を用いて、きず深さに対する位相角を図 12 に表す。このグラフでは、線の傾斜が大きいほど

きず深さ変化による位相角変化が大きいということなので、きず深さ評価がし易いということを示す。

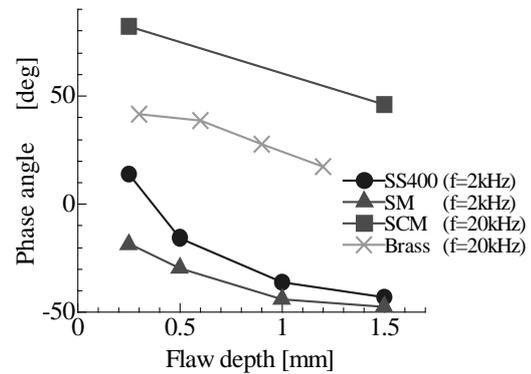


図 12 きず深さに対する位相角

図 12 を見ると、非磁性体である黄銅板に比べて SM の傾斜は同等であり、SS400 と SCM については黄銅板より大きな傾斜が得られた。このことから、今回使った試験体に関しては非磁性体と同等の精度でのきず深さ評価ができると言える。

## 6. まとめ

鉄鋼材料に対し、プローブを用いて、S/N 比を測定するとともに、きず深さ評価ができるか検討を行った。S/N 比に関しては、高い周波数できず検出を行うのが良い。次にきず深さ評価に関しては、どの試験体も黄銅板と同程度かそれ以上の位相角変化を得られているので、今回使った試験体に関しては非磁性体と同程度の精度できず深さ評価ができることがわかった。実際の試験手順では、まず高い周波数を用いて S/N 高くきず検出を行い、次に試験体ごとの最適周波数でのきず深さ評価を行うと良い。

## 参考文献

- 1) 星川洋、小山潔、柄澤英之:「リフトオフ雑音が発生しない渦流探傷用新型上置プローブに関する研究」、非破壊検査、第 50 巻 11 号、pp.736-742 (2001)
- 2) 田中雄基、小山潔、星川洋:「鉄鋼材料の渦電流探傷試験に関する研究」、第 37 回 日本大学生産工学部 学術講演会 電気電子部会 講演概要、pp.57-60(2004)
- 3) 小松慶亮、小山潔、星川洋:「検出コイルをマルチ化した渦電流 プローブに関する研究」、第 37 回 日本大学生産工学部 学術講演会 電気電子部会 講演概要、pp.65-68(2004)