

画像復元を利用した渦電流探傷信号のきず画像表示に関する研究

日大生産工(院) ○河手雄大
日大生産工 小山 潔、星川 洋

1.はじめに

渦電流探傷試験は導電性のある製品の加工工程や完成時の製品検査など多方面で活用されている。この試験において現在は、きずの深さ、位置、形状などを正確に評価する試験方法の開発が待望され、試験コイルの開発や信号処理の研究が行われている。

筆者らは 2 次元のきず形状を評価するために試験コイルを試験体表面に対し 2 次元に走査して探傷を行い、得られた 2 次元信号を画像として表示することで視覚的な判断が行え、きず評価が容易になると考えた。しかし、渦電流探傷試験では信号を画像として表示するとぼけた画像になってしまう。これは試験体に誘導される渦電流が試験コイルの径より広がりをもつため、試験コイル直下にきずが位置しなくても信号が発生してしまうからである。そこで、画像復元の手法を適用してきず画像の復元に関する研究が行われている^{1), 2)}。

非磁性体材料を信頼性高く検査するために従来から用いられている上置プローブでは試験体とプローブの相対距離（以下、リフトオフ）が変化すると、大きなノイズが発生する。画像復元の手法を適用してきず画像の復元を行うと、復元した時に生じるノイズが大きく、復元精度が低下する。そこで、筆者らは復元精度の改善をするため

に、上置コイルに比べてリフトオフノイズが小さく SN 比が高い Θ プローブを用いて探傷を行い、得られた探傷信号からきず画像の復元を行った。その結果、上置コイルによる探傷信号から復元されたきず画像に比べて、 Θ プローブの方が鮮明なきず画像が得られたので報告する。

2. Θ プローブを用いた渦電流探傷の原理

図 1 に Θ プローブの構造を示す。 Θ プローブは円形の励磁コイルと矩形の縦置検出コイルによって構成されている。このプローブの検出コイルは検出コイルの巻線方向と同方向に流れる渦電流を検出する。

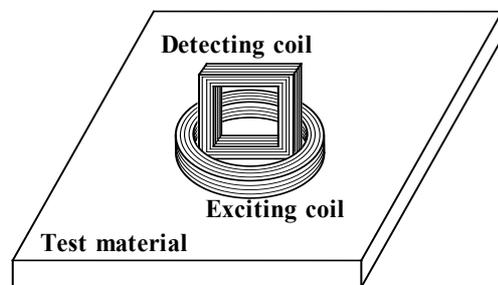


図 1. Θ プローブの構造

図 2 にリフトオフが変化した時の試験体に誘導される渦電流を示す。 Θ プローブの励磁コイルに電流を流すと、リフトオフがない場合試験体表面には図(a)に示すように、励磁コイルの巻線方向と同方向の渦電流が誘導される。この時、検出コイルの巻線方向に渦電流が流れな

いため信号は発生しない。リフトオフがある場合、図(b)に示すように同じく検出コイルの巻線方向に渦電流が流れないため信号は発生しない。これは、縦置検出コイルが検出コイルと同方向に流れる渦電流成分だけを検出するためである。すなわち、円形の励磁コイルで渦電流を誘導し、矩形の縦置検出コイルで渦電流を検出することにより、きずがある時だけ渦電流を検出する。

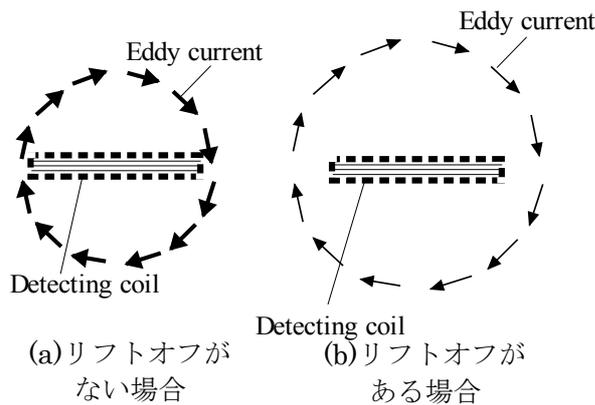


図 2. 試験体に誘導される渦電流

3. 画像復元の原理

3.1 画像の劣化

図 3 は、プローブを 2 次元に走査して渦電流探傷試験により得られる画像の劣化過程を表す。きず形状を表す原画像を $d(x,y)$ 、渦電流探傷を行って得られる探傷信号のぼけ画像を $b(x,y)$ 、ノイズを $n(x,y)$ とする。 (x,y) は共に座標値を示している。ここで測定システムが線形で位置に関して不変なシステム、すなわち線形不変システムである場合には、きずのぼけ画像 $b(x,y)$ は、きず形状を表す原画像 $d(x,y)$ と測定システム固有の点広がり関数 $p(x,y)$ とのたたみ込み積分によって与えられる。実際はこれに $n(x,y)$ が加わり、次式で表される。

$$b(x,y) = d(x,y) \otimes p(x,y) + n(x,y) \dots (1)$$

ただし、 \otimes はたたみ込み積分を表す。式(1)の両辺をフーリエ変換すると、たたみ込み定理により次式となる。

$$B(u,v) = D(u,v) \cdot P(u,v) + N(u,v) \dots (2)$$

大文字はフーリエ変換後を表し、 (u,v) は周波数成分を表す。

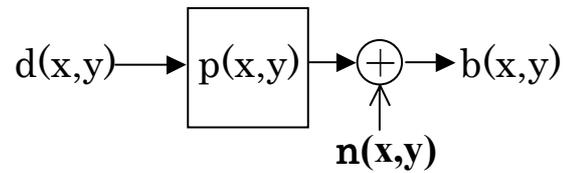


図 3. 画像の劣化過程

3.2 点広がり関数の決定

筆者らは画像復元の手法である逆フィルタを用いて、きず画像の復元を行った。形状が既知であるきずのぼけ画像を $B_0(u,v)$ とし、既知形状のきずを表す原画像を $D_0(u,v)$ とすると、線形不変システムにおける点広がり関数 $P(u,v)$ は次式より求まる。

$$P(u,v) = B_0(u,v) / D_0(u,v) \dots (3)$$

逆フィルタでは、画像の復元システムの伝達関数 $\Phi(u,v)$ は、点広がり関数のスペクトル $P(u,v)$ の逆数で表すことができ、次式で与えられる。

$$\Phi(u,v) = 1 / P(u,v) \dots (4)$$

3.3 画像の復元

図 4 は画像の復元過程を表す。伝達関数が $\Phi(u,v)$ である画像の復元システムによって復元画像スペクトル $R(u,v)$ は次式で与えられる。

$$R(u,v) = B(u,v) \cdot \Phi(u,v) \dots (5)$$

上式により得られた $R(u,v)$ を逆フーリエ変換すれば、復元画像 $r(u,v)$ が得られる。したがって、復元画像 $r(u,v)$ は、画像の復元システムにおける伝達関数 $\Phi(u,v)$ によって左右される。(5)式に(2)式と(4)式を代入し整理すると次式が得られる。

$$R(u,v) = D(u,v) + N(u,v) / P(u,v) \dots (6)$$

上式より明らかなように、ノイズが無い場合には、復元画像 $R(u,v)$ は、原画像 $D(u,v)$ に完全に一致する。しかし、一般的に上置プローブを用いた渦電流探傷ではぼけ画像に大きな雑音が含まれているため、復元画像には式(6)の第 2 項による誤差が含まれる。特に、点広がり関数 $P(u,v)$ の値が小さくなるような周波数領域では、誤差が極めて大きくなる。

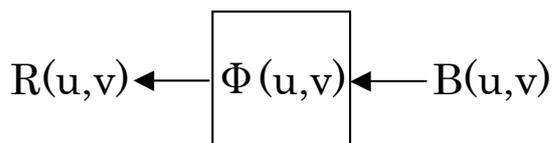


図 4.画像の復元過程

4.実験方法

試験体として一辺が 160 mm、厚さ 1.5 mm の黄銅板を用いた。この試験体の中央にきず幅 0.5 mm、きず長さ 2 mm、10 mm、15 mm、きず深さを板の肉厚に対し 80%、60%、40%のスリットを放電加工した。

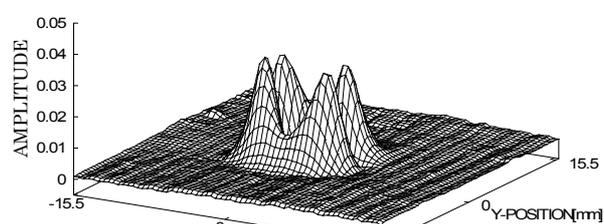
Θプローブは内径 7 mm、外形 9 mm、巻き線断面積 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ の励磁コイルと、幅 7 mm、高さ 7 mm、巻き線断面積 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ の検出コイルから構成されている。なお実験条件を同じにするために、上置プローブはΘプローブの励磁コイルのみを使用した。試験周波数は両者共に 32kHz とした。

測定範囲は、フーリエ変換する上で測定個数が 2 の乗数倍でなくてはならないため $-15.5 \sim 16.0$ の範囲を 0.5 mm 間隔で探傷を行った。従って、xy 方向に 32×32 個の探傷信号が得られる。

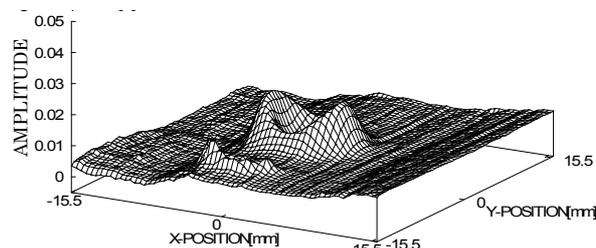
点広がり関数とは画像の分野で、入力信号を入れた時の出力信号がデルタ関数的な関数である必要がある。そこで、デルタ関数に一番近い長さ 2 mm 深さ 80% のきずを選定した。しかし、点広がり関数に長さ 2 mm 深さ 80% のきずを使用すると(5)式に(3)式を代入する事により、点広がり関数に用いた長さ 2 mm 深さ 80% きずの復元画像は原画像と同じになってしまう。よって長さ 2 mm 深さ 80% のきずについては 2 回ずつ測定した。

5.実験結果

種々のきず長さや深さに対して渦電流探傷を行って、種々の探傷信号を得る。図 5 は、長さ 2 mm、深さ 80% のスリットきずを 2 次元に探傷して得られた探傷信号を示す。図(a)はΘプローブを用いた信号、図(b)は上置プローブを用いた信号である。両者を比較すると、図(a)ではノイズが小さいが、図(b)ではきず以外の場所でノイズが大きいことが分かる。Θプローブではリフトオフノイズが小さいのに対し、上置プローブではリフトオフノイズが大きいからである。



(a) Θプローブ



(b) 上置プローブ

図 5. 2 mm 80% の測定信号

次に長さ 2 mm、深さ 80% のスリットきずについて復元し、原画像および測定画像と比較する。図 6 はΘプローブを用いた結果、図 7 は上置プローブを用いた結果を示す。各画像において、信号の大きさに比例して画素の黒さを濃くして表示する。各図の左から順に、きず形状を表す原画像、渦電流探傷試験によって得られたきず信号を画像表示したぼけ画像、ぼけ画像から逆フィルタによって復元したきず画像を示す。

図 6(b)と図 7(b)の測定画像を比較すると、Θプローブ、上置プローブともにぼけが生じていて、きず形状を判断する事が難しい。また、原

画像の形状にはほど遠い。これは渦電流の径が広がりをもつためである。

図 6(c)と図 7(c)の復元画像を比較すると、 Θ プローブではきずの形状を判断する事ができるが、上置プローブでは難しい。また Θ プローブでは原画像とほぼ同じ形状の画像を得られたが、上置プローブでは原画像の形状を判断できない。 Θ プローブではノイズが小さいので(6)式の第 2 項が小さな値を取り、復元画像スペクトルが原画像に近づく。しかし、上置プローブではノイズが大きいため(6)式の第 2 項が大きな値を取るため、大きくなった分のぼけが生じるからである。

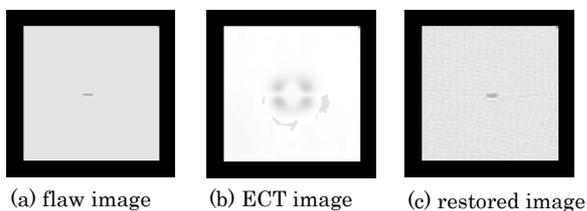


図 6. Θ プローブを用いた場合の結果
(きず長さ 2 mm)

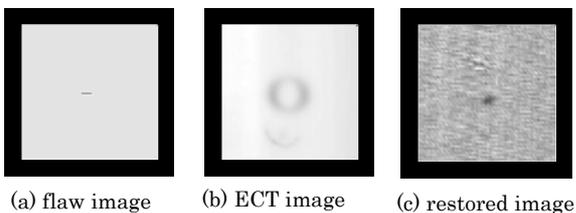


図 7. 上置プローブを用いた場合の結果
(きず長さ 2 mm)

次に、長さ 15 mm、深さ 80%のスリットきずの画像を図 8 と図 9 に示す。各図の左から順に、きず形状を表す原画像、渦電流探傷試験によって得られたきず信号を画像表示したぼけ画像、ぼけ画像から逆フィルタによって復元したきず画像を示す。

図 8(b)と図 9(b)の測定画像を比較すると、両者ともぼけが生じていて、きず形状を判断する事が難しい。また、 Θ プローブでは長さ 2 mm 深さ 80%のきず画像よりきず部分が濃く表示されている。これは長さ 2 mm 深さ 80%のきずより信号が大きく出力されたからである。

図 8(c)と図 9(c)の復元画像を比較すると、 Θ プローブではきず形状を確実に判断できる。し

かし、上置プローブではきず信号がぼけているため、きず形状の確実な判断が難しい。また原画像と復元画像を比較しても、 Θ プローブではスリットの形状がほぼ確実に判断できているのに対し、上置プローブでは形状の判断が難しい。というのは(6)式の Θ プローブのノイズ成分が、上置プローブに比べて小さいからである。

以上のことから、きず長さを変えても Θ プローブを用いた測定信号の復元画像の方が上置プローブを用いた測定信号の復元画像に比べて復元精度が高いことがわかる。

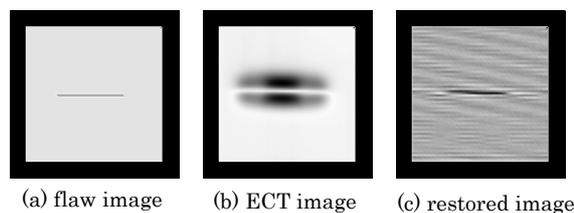


図 8. Θ プローブを用いた場合の結果
(きず長さ 15 mm)

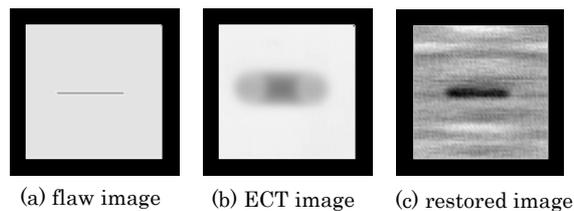


図 9. 上置プローブを用いた場合の結果
(きず長さ 15 mm)

6. おわりに

渦電流探傷試験において上置プローブよりノイズの小さい Θ プローブを画像復元に適用することにより、きず位置およびきず形状の視覚的な判断ができることを確認した。これは Θ プローブのノイズが上置プローブに比べて小さく、画像を復元した時のノイズ成分が小さくなるからである。

今後、きず画像の復元精度をさらに向上させる検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 小井戸他：渦電流試験におけるウィナーフィルタを用いたきず形状の再構成、非破壊検査、54(7)、pp.372-379
- 2) 小山他：渦流探傷におけるスリット状きずの画像復元に関する研究、非破壊検査、42(2)、pp.120-126