

入門講座

計測・制御技術入門 計測技術-6

渦電流を利用した金属の非破壊試験

Eddy Current Nondestructive Testing of Metals

星川 洋

日本大学 生産工学部 教授

Hiroshi Hoshikawa

1 はじめに

材料の表面探傷法としては、微小な表面傷の部分に肉眼で容易に観察できる指示模様を作って検出する磁粉探傷と浸透探傷とがある。これらの方法は材料の表面探傷を確実にできる方法として広く用いられているが、人間の視覚に依存するために試験が低速度で、また原理的に傷の深さを検出することができないという問題がある。

渦流探傷は金属を対象とし、試験体に非接触で高速に表面探傷が可能であり、表面傷の深さに関する情報も与える非破壊試験法である¹⁾。本稿では、渦電流を利用した非破壊試験法である渦流探傷の概要と特徴などを紹介する。

2 渦流探傷とは

図1に示すようにコイルに交流を流すと磁束が発生する。交流磁束が金属を貫くと電磁誘導によって金属の表面近傍に渦電流が発生する。渦電流は金属の表面に傷があると流れが変わる。渦電流も磁束を発生するから、渦電流が変わるとコイルの磁束が変化して電圧が変わる。この電圧の変化を利用して金属の探傷が可能である。このような非破壊試験を渦流探傷という。

試験に際してコイルは金属に接触する必要がなく、またコイルの電圧は電気信号として処理できるから人間が介在する

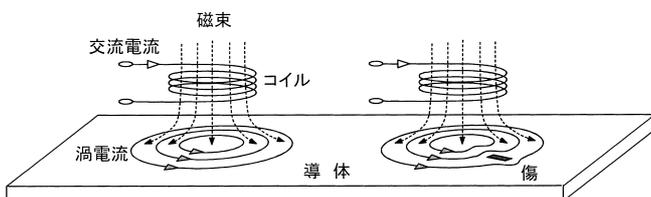


図1 渦流探傷

必要がない。すなわち渦流探傷は高速度で表面探傷が可能である。また評価は容易ではないものの、信号は傷の深さに関する情報を含むという特徴があるので、渦流探傷は棒、管、板などの一様な形状の金属の製造ラインに組み込んだ表面探傷法として適用されている。

3 渦電流と表皮効果

金属内に発生する渦電流は表皮効果のために図2に示すように表面からの距離 x に対して指数関数で減衰する。この減衰の割合は金属の導電率 σ 、透磁率 μ および交流の周波数 f の積によって決まる。特に、表面における渦電流に対して、振幅が $1/e$ に減衰する表面からの深さ δ は

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \text{ [m]}$$

である。上式で与えられる浸透深さ δ は試験体を鋼、交流の周波数を16 kHzとすると0.1 mm程度である。 δ は周波数が

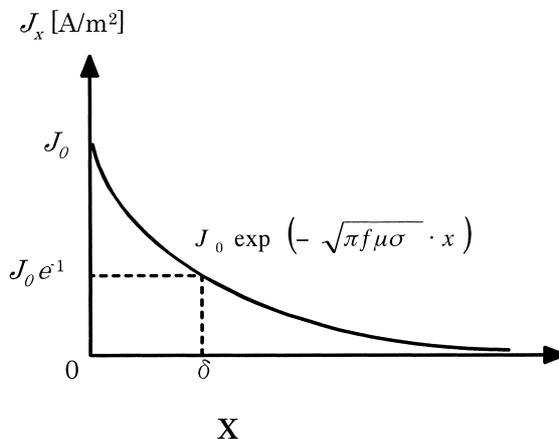


図2 表皮効果と浸透深さ
 J_x : 表面から距離 x [m] における渦電流密度
 J_0 : 表面 ($x=0$) における渦電流密度

高いほど小さくなり、渦電流は表面近傍に集中して誘導される。この表皮効果のために、渦流探傷は表面傷の検出に適するが、内部の傷を検出することは困難である。なお、渦電流は表面からの深さによって位相が遅れるという性質もある。

4 渦流探傷の実際

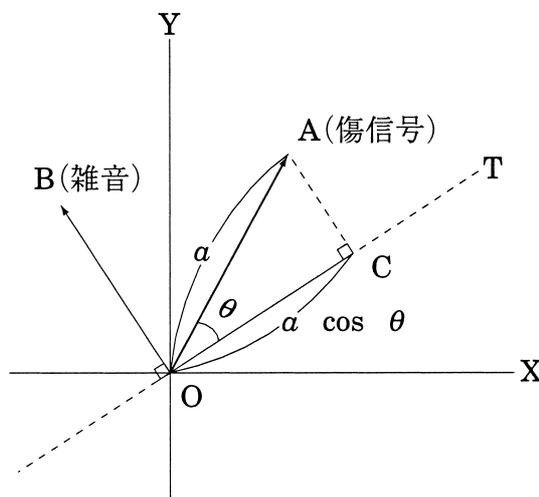
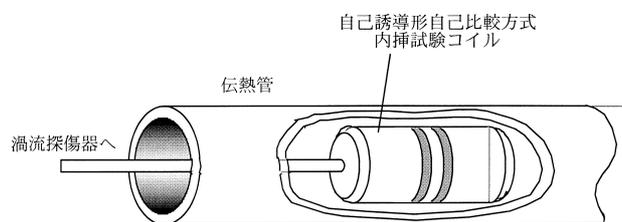
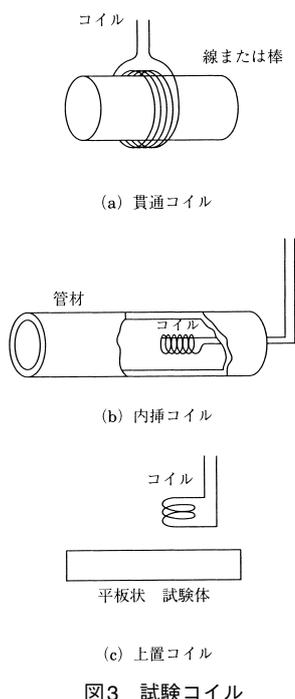
渦流探傷は形状寸法が一樣な金属である棒、線、管、板などの表面探傷に適用されている。棒、線、管の製造工程では図3 (a) に示す貫通コイルにより渦流探傷が行われている。試験体をコイルの中に通すだけで全表面を探傷できるので、製造ラインに組み込んだ高速度の探傷法として適用されている。発電所や化学プラントの熱交換器内の細管の保守検査には、構造的な制約のために管の内部から試験しなければならないので、図3 (b) に示す内挿コイルが用いられる。配管の中にエアガンで打ち込んだプローブを2 m/s程度の速度で引き抜きながら探傷が行われている。また、板状の金属の表面探傷には図3 (c) に示す上置コイルを試験体の上に走査しながら探傷する方法が用いられる。

コイルからの距離が変われば磁束の大きさが変わるから、金属内の渦電流も変化する。すなわち、コイルと金属の間の距離（リフトオフ）が変わると渦電流が変化して、コイルの信号が変化する。こうして発生するリフトオフ雑音は一般に傷信号よりも大きいので、確実に傷を検出するためには、リフトオフ雑音を小さくする工夫が必要である。リフトオフ雑音を小さくする方法として、図4に示すように2個のコイル

を併置し、試験体の隣接した2部分の差異を検出する自己比較方式の試験コイルが用いられる²⁾。2つのコイルに発生するリフトオフ雑音は同じであるから、差を取れば相殺されてなくなるので、SN比高く探傷できる。この種のコイルは長い傷を検出することは困難となるが、リフトオフ雑音を小さくして傷を確実に検出するプローブとして一般に用いられている。

図5に示すように、傷信号とリフトオフ雑音の位相（矢印の方向）が異なる場合には同期検波により雑音を抑制することができる³⁾。同期検波器の出力は方向を自由に定めることのできる軸Tへの投影の長さに比例するので、軸Tの方向を雑音Bに対して垂直となるように設定すれば、雑音の投影は無くなるから出力に雑音は現れないことになる。一方、傷信号Aと軸Tとの位相差を θ とすれば、投影は $a \cos \theta$ に比例して現れる。この結果、出力には傷信号が発生して雑音は現れないから、リフトオフ雑音の影響を抑制してSN比が高い探傷ができる。同期検波による信号処理はSN比を改善する方法として一般の渦流探傷に用いられている。

熱交換器における数千本の細管は穴の開いた金属板に差込まれて支えられている。これを図4に示した内挿コイルによって保守検査をした場合には、支持板による信号が発生するために、支持板近傍の細管の探傷が困難となる。このような



場合には2つの異なる周波数の交流をコイルに流して支持板による信号を消去する方法が採用される。すなわち、表皮効果のために傷信号と支持板信号の大きさは2つの周波数で異なるから、支持板信号の大きさが同じになるように調整した上で差引けば、支持板信号は相殺されて傷信号だけが残る、傷を検出できる。この方法は多重周波数による渦流探傷と呼ばれており、細管の保守検査に広く用いられている。

5 最近の渦流探傷プローブ

近年における新しい渦流探傷法の開発動向としては、2つの流れがある。一つは信頼性の高い渦流探傷を指向したプローブの開発であり、もう一つは多数の試験コイルを組み込んで一度の走査で二次元探傷を行い、探傷結果を画像に表示して傷の評価を行うというものである。

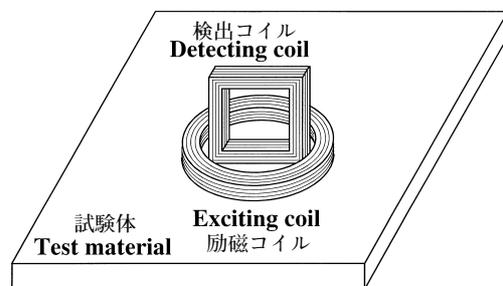
渦流探傷における大きな問題の一つはリフトオフ雑音のために微小なきずを信頼性高く検出することが困難なことである。この問題を解決するために、原理的にリフトオフ雑音が発生しないプローブが開発されている。従来の渦流探傷プローブではコイルが発生する渦電流の変化を検出していたために、リフトオフ雑音の発生は避けられなかった。そこで、発想を変えて、傷が無いときに発生する渦電流は検出せずに、傷によって発生する渦電流成分のみを検出することにより、原理的にリフトオフ雑音が発生しないプローブを実現できる。

図6(a)は原理的にリフトオフ雑音が発生しない渦流探傷プローブの一例を示す⁴⁾。円形の励磁コイルは渦電流をその巻線に沿って円周方向に発生させる。縦置の検出コイルはその巻線に沿って流れる渦電流成分だけを検出する。図6(b)に示されるように、試験体に傷が無いときには渦電流は円周方向に誘導されて、検出コイルに平行には流れないから、検出コイルに信号は発生しない。リフトオフが変わっても渦電流が円周方向に流れる限りにおいて、検出コイルに起電力が発生することはなく、原理的にリフトオフ雑音は発生しない。傷によって検出コイルの巻線に対して平衡に流れる渦電流成分が発生すると、検出コイルに起電力が発生して傷信号となる。

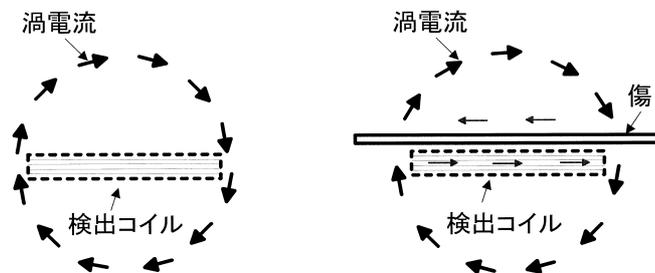
従来の渦流探傷プローブを用いた場合には信号の位相がリフトオフ雑音のために激しく変化するために傷の評価に信号の位相を利用できなかった。このために、一般に信号の振幅だけに基づいて傷の評価を行ってきた。しかし、信号の振幅は傷の長さや幅によっても変わるため、渦流探傷によって傷の深さを評価することはできないと考えられてきた。図6に示した渦流探傷プローブを用いた場合には、リフトオフ雑音が発生しないために安定した傷信号を得ることができ、試験

周波数を適切に設定すると傷信号の位相が傷の深さに対して変わるので、信号の位相に基づいて表面傷の深さを評価できる可能性がある。このように、図6に示したリフトオフ雑音が発生しないプローブは渦流探傷の信頼性を向上するものと期待されている。

従来の渦流探傷試験では、試験体の表面上をプローブによって走査したときに得られる一次元的信号に基づいて探傷が行われてきた。一次元的な信号波形から三次元的な傷の性状を評価することには自ずから限界があり、渦流探傷試験の信頼性が低い原因となっていた。そこで、多数のコイルを併置したプローブにより一回の走査探傷により二次元的な探傷データを取得し、画像として表示して傷の評価を行うプローブが開発されている。図7には2列に並べた小さな多数のコイ



(a) 巻線の構造



(b) 渦電流の流れ

図6 リフトオフ雑音が発生しない渦流探傷プローブ

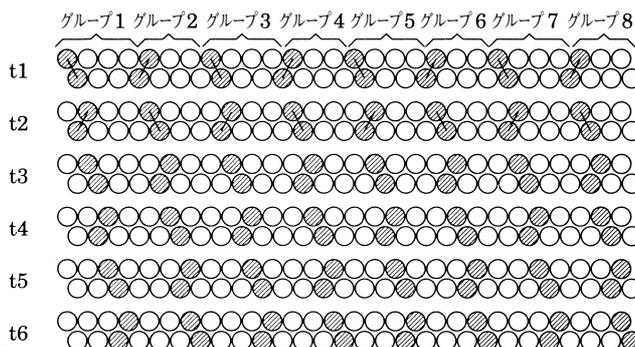


図7 アレイプローブ

ルで構成されたアレイプローブを示す⁵⁾。隣接した2個のコイルをペアとして組み合わせ、一方は渦電流を発生する励磁コイル、他方は渦電流の変化を検出するための検出コイルとして用いる。同時に多数のコイルに電流を流すと発生する渦電流が互いに干渉するので、これを避けるためにデジタル技術を利用し、ペアのコイルをt1からt6まで時分割で切替えて動作させる。このプローブを用いれば、一度の走査探傷により傷信号を画像として表示することができ、高速度の特徴を生かしつつ傷の評価精度を高めることが可能である。

米国では航空機の機体におけるボルトホールの亀裂を検査するために、磁気光学効果を利用して渦電流の変化を画像として観察する方法が開発されている⁶⁾。このように得られる情報量を多くすることにより渦電流探傷の信頼性を高めることが可能となると考える。

6 おわりに

工業製品や構造物の非破壊試験は人間の健康診断に相当する。しかし、健康診断に比べると非破壊試験に大きな費用をかけることは現実的でない。そこで非破壊試験を安価に実施することを考えることが必要である。

渦電流探傷は現状では傷の定量的な評価に適した方法とは言

えないが、金属の表面を非接触で高速に探傷が可能な特徴がある。渦電流探傷だけで十分な非破壊試験を実施することはできないが、渦電流探傷によって試験体の全数を探傷して破壊に繋がる可能性のある個所を特定し、他の評価の定量性が高い非破壊試験法によって詳細な試験を行うことによって重大な事故を未然に防止し安全性を確保することが可能となるものと考えられる。将来は、渦電流探傷を含めた複数の方法を併用することにより安全性が確保されるようになると期待する。

参考文献

- 1) 渦電流探傷試験Ⅰ, 日本非破壊検査協会編, 日本非破壊検査協会, (1995), 17.
- 2) 渦電流探傷試験Ⅱ, 日本非破壊検査協会編, 日本非破壊検査協会, (1995), 51.
- 3) 渦電流探傷試験Ⅲ, 日本非破壊検査協会編, 日本非破壊検査協会, (2003), 66.
- 4) 星川洋, 小山潔, 前田雅史, 非破壊検査, 50, (2001) 11, 736.
- 5) 参考文献3), 182.
- 6) 参考文献3), 240.

(2003年11月27日受付)

ブックレビュー

金属物理博物館

藤田 英一 著

2004年2月 アグネ技術センター発行(Tel. 03-3409-5329)

A5判 294頁 定価2,940円(消費税込)

技術者や研究者が身につけねばならない知識や考え方は、科学技術の発達と共に急速に増大してしまった。大学等で材料科学を効率良く学ぶためには、よく整理された教科書を選ぶ必要がある。しかしながら、整った技術体系を淡々と学ぶだけではもの足らなさを感じることもある。知識として記憶することはできても、どこことなくよそよそしいものが残る。実際にはさまざまな仮説の提唱と検証という紆余曲折によって現在の姿があるはずである。講義では材料にあまり興味をもてなかった学生が、卒業研究によって材料の研究や開発に目覚めたという話はよく聞く。紆余曲折を自分自身で体験できたからであろう。

紆余曲折をすべて追体験することは非現実的であるが、現代材料科学の成り立ちの経緯にまつわる様々のエピソードを知ると言うことは、教科書で学んだ知識を実感することにつながる。本書はまさにそのような目的に最適な書である。金属物理の歴史と人物を活写し、原理と基本を平易に解説してある。人類文明の始まりから、鉄精錬の歴史、量子論と金属物理学の発展の絡み合い、各種物理的研究手段や概念(状態図、転位論等)の発展の経緯と、極めて多彩な話題(著者自身が直接見聞きしたエピソードも豊富に含む)が紹介されている。

また、本書を読めば、現代化学が冶金学を、現代物理学が金属学を、それぞれ揺籃としていることを強く実感するであろう。すなわち、金属物理学成立の経緯のみならず、化学や物理の成り立ちに関するエピソードも含んでいる。材料科学を学ぼうとする方のみならず、物理、化学を志す方にもお薦めしたい一書である。

(新日本製鐵(株)鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 山崎修一)