

内挿コイルを用いたパルス渦電流探傷による鋼管の探傷

日大生産工(院) ○加藤修一 日大生産工 小井戸 純司
日大生産工 星川 洋

1 はじめに

各種プラントで使用されている熱交換器用非磁性伝熱管の保守検査における探傷試験には、内挿コイルを用いた渦電流試験が使用されている。しかし、伝熱管の多くは強磁性体である鋼管が使用されているため、これに通常用いられている単一周波数渦電流試験を適用すると、磁気ノイズ¹⁾によってSN比が低下するため探傷が困難である。一方、通常の渦電流試験において強磁性材料の試験を行う場合には、磁気ノイズを低減させるために永久磁石などを用いて鋼材を磁気飽和させて試験を行う。しかし、これらの磁石を小型化して内挿用とすることは技術的に困難である。そこで、瞬時に大電流を流すことができるパルス電流を励磁に用いることで、磁界を飛躍的に大きくできるので、鋼管を磁気飽和させて磁気ノイズを低減し、鋼管の探傷が可能となる²⁾。しかし、筆者らが用いていた従来の方法では励磁が不足のため磁気ノイズが大きく、また浅い外面きずも検出できなかった。そこで、パルス渦電流の特徴を十分に生かすために、励磁コイルに磁気コアを入れて磁束を強め、鋼管の探傷を試みた。また、実験と合わせてパルス渦電流試験における強磁性体の複雑な磁気現象の解明のための一端として、有限要素法を用いて基礎的な解析を行った。

2 パルス渦電流試験の原理

図1にパルス渦電流試験の原理図を示す。励磁コイルにパルス電流を流すと、検出コイルにはパルス状の起電力が発生する。2つの検出コイルが健全部に置かれている状態では起電力が同一なため、2つの検出信号の差をとるとゼロになる。しかし、どちらか一方の検出コイルがきずに接近すると、試験体中の渦電流が変化するため2つの起電力には差が生じる。これがきず信号として検出される。

パルス渦電流試験では、得られる信号が歪み波となり、この歪み波の低次から高次までの周波数成分には多くが情報を含まれている。そこで、同調増幅器によって特定の周波数成分を取り出し、同期検波によって振幅と位相を取り出す位相解析法を用いた³⁾。

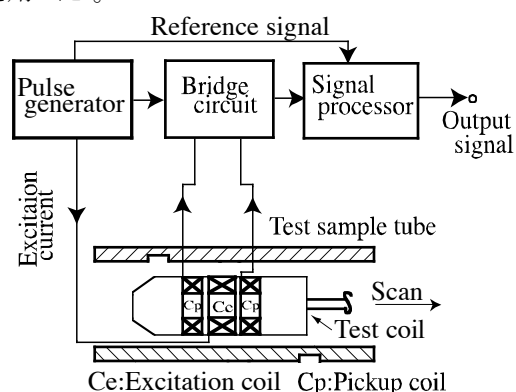


図1 実験原理図

ところで、時間的に非常に短いパルス電流を強磁性体に用いたとき、透磁率が非線形に、なおかつ時々刻々と変化すると考えられるため、複雑な磁気現象が起こっていると考えられる。このため、浅い外面きずを検出可能とするために、鋼管での磁気現象を解明する必要がある。

3 実験方法

(1) 鋼管の探傷試験法

パルス励磁による磁気飽和の効果と比較するために、通常の渦電流試験を行なった。試験周波数は20[KHz]とした。図2,3に試験コイルを示す。図2のコイルは、従来使用していた空心タイプのコイルである。図3のコイルは、励磁コイルに磁気コアを入れることにより磁気抵抗を低減させ、より強い磁束を鋼管に伝えられるように改良したコイルである。この2つのコイルを用いて、鋼管の探傷試験を試みた。

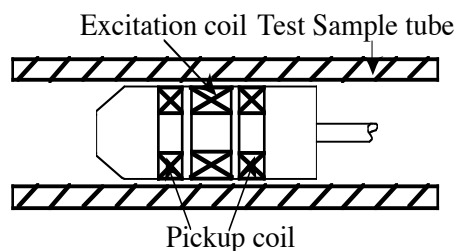


図2 パルス渦電流試験用空芯コイル

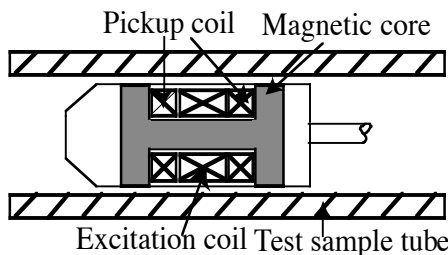


図3 パルス渦電流試験用磁気コア入りコイル
試験体には、図4に示した外径19[mm]、肉厚2[mm]の鋼管(STB35)に外面及び内面全周減肉と貫通ドリル孔を人工欠陥として加工したものを用いた。

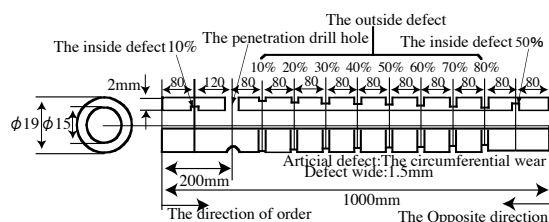


図4 試験体

また検出コイルから得られる信号は、同調増幅によってきず信号から1[kHz]成分を取り出して、デジタルオシロスコープに記録した。励磁コイルの電流の最大値は空芯コイルが40[A]、磁気コア入りコイルが58[A]とし、パルス幅88[μs]、繰り返し周期8(ms)とした。また励磁コイルに磁気コアを入れたことで空芯コイルよりも磁束がどの程度強まったかを知るために、鋼管の外部に検出コイルを置いて起電力を測定した。このときの試験条件は、パルス電流40[A]、パルス幅88[μs]とした。

(2) 有限要素法による解析方法

有限要素法では、三次元軸対称解析⁴⁾を用いた。図5に解析領域の一例を示す。解析条件としては、二つの検出コイルの一方の真上にきず要素を与えて解析を行い、きず信号を取り出した。励磁コイルは空芯コイルとし、きずの深さ及び形状は、全

周外面減肉80%、50%、10%とし、比透磁率は10、50、100、200、導電率 5.92×10^6 [s/m]とした。入力電流は、励磁コイルに励磁電流を流したときの波形をデジタルオシロスコープで記録したものをを用いた。このときのパルス電流は、60[A]、パルス幅88[μs]とした。また鋼管と比較するために非磁性体である黄銅管においても解析を行った。解析条件としては、きずは全周外面減肉、導電率 1.43×10^7 [s/m]、パルス電流120[A]、パルス幅88[μs]とした。なお、材質によって励磁電流波形に違いがあるため鋼管と黄銅管それぞれで、励磁電流を採取した。また今回の解析においては、透磁率を一定値で与える線形解析で行った。

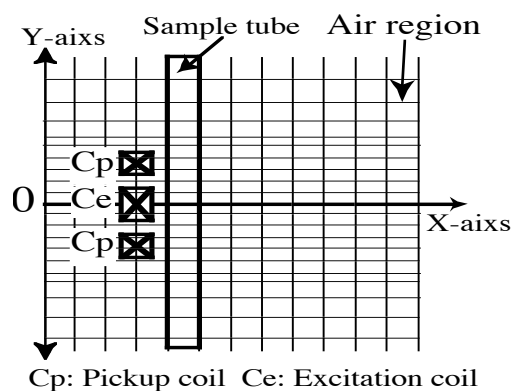


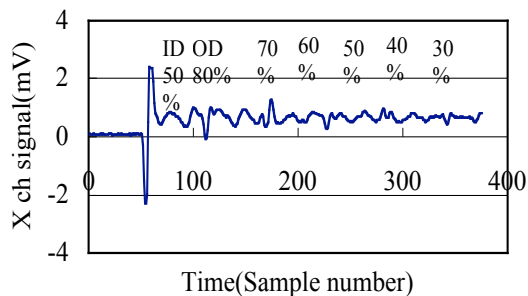
図5 解析領域

4 実験結果

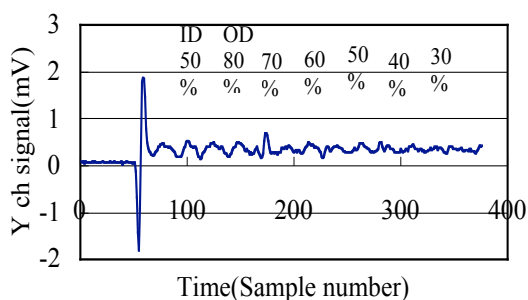
(1) パルス渦電流試験結果

探傷結果を図6、7、8に示した。図6に示した探傷結果は、通常の渦電流試験の結果である。波形を見ると磁気ノイズによって外面減肉率80%の深いきずも検出できなかったことを確認した。図7に示した探傷波形は、空芯コイルを用いて行ったパルス渦電流試験による探傷結果である。波形を見てみると内面減肉率50%、外面減肉率80%～30%までのきず信号が確認できた。また、パルス電流を用いたことで図6の通常渦電流試験に比べて磁気ノイズが低減し、きず検出もできることを確認した。このことから、励磁にパルス電流を用いることで磁気飽和効果が得られたことが分かった。図8の探傷波形は、磁気コア入りコイルを用いたときの探傷結果である。空芯コイルと比べて、パルス電流を大きくしたこともあり、試験体の磁気飽和が進んで磁気ノイズがより低減し、き

ず信号が明確に識別できたことを確認した。きず信号としては、内面減肉率 50%、外面減肉率 80%～30%までのきず信号が確認できた。

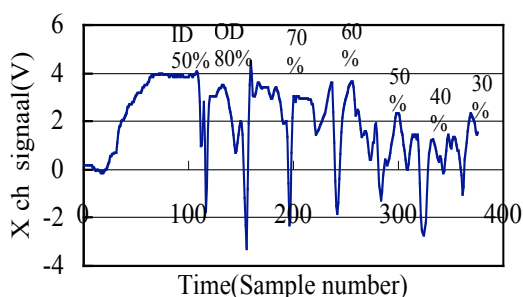


(a) X 成分信号

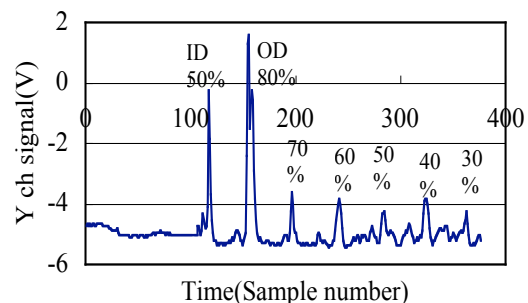


(b) Y 成分信号

図6 単一周波数渦電流試験による探傷波形

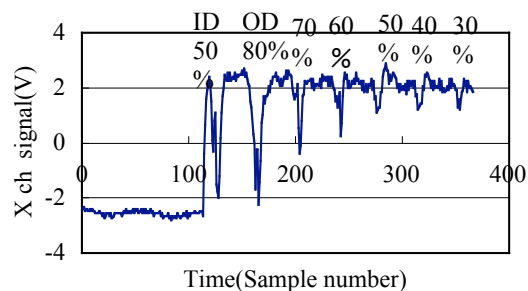


(a) X 成分信号

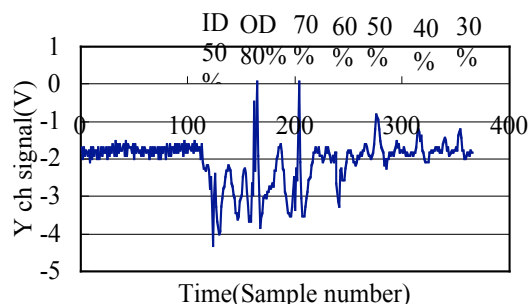


(b) Y 成分信号

図7 パルス渦電流試験による探傷波形(空心)



(a) X 成分信号



(b) Y 成分信号

図8 パルス渦電流試験による探傷波形
(磁気コア入り)

図9 は、空心コイルと磁気コア入りコイルにおける鋼管外部の検出コイルの起電力を比較した結果である。励磁コイルに磁気コアを入れたことで起電力が約3倍になった。このことから磁気コア入りコイルと空心コイルの信号の違いは、励磁電流を大きくしたことだけではなく磁気コアを入れたことにより磁束が強まったことによる効果であることが確認できた。

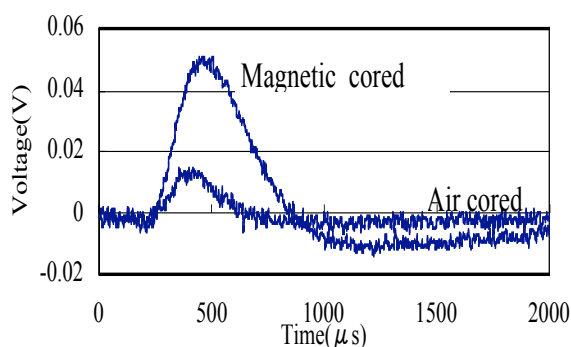


図9 外部コイル起電力

(2) 有限要素法による解析結果

図10、11 に黄銅管、鋼管の外面きずを変化させ、正規化したときの起電力波形を示した。

正規化の方法としては、各外面きず波形の最大値を基準にした。なお、鋼管は比透磁率 200 の例を示した。図 10 を見ると、非磁性材料は、きずが変化しても検出コイルに生じるきず信号の時間差が非常に小さいことを確認した。すなわち、磁束がきずに到達する時間がきずが変化しても非磁性体では、あまり変わらないことが分かった。一方、図 12 の正規化した図を見ると、鋼管の場合はきずが浅くなるに従ってきず信号波形に大きな時間差が生じていることが分かった。これは、図 10 と比較して分かるように非磁性体である黄銅では現れなかった現象であり、強磁性体である鋼管では、透磁率が高いために磁束の伝搬が遅れ、外面きずが浅くなるに従って磁束の伝搬が遅くなっているためであると考えられる。

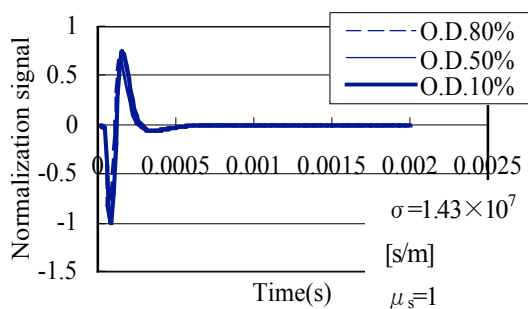


図 10 黄銅の正規化検出波形

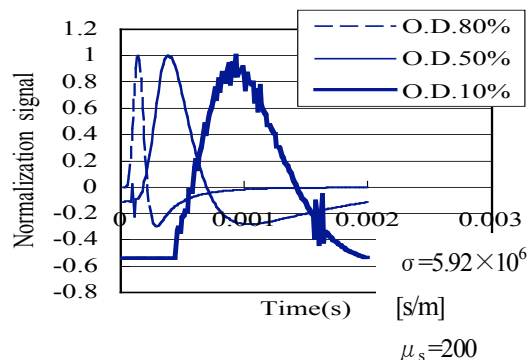


図 11 鋼管の正規化検出起電力波形

図 12 に、黄銅管と鋼管の各透磁率においてそれぞれの各減肉率の振幅の最大値を取り、減肉率 80% の値で信号の大きさを正規化した結果を示した。なお黄銅管は、 $\mu_s=1$ として、図に示した。同図のとおり、黄銅は線形的に変化しているのに対して、鋼管は、減肉率 50% 付近から急激に信号が大きくなり非線形的に変化していることを確認した。また、透磁率が高くなると非線形が強くなっ

ていることも確認できた。透磁率によってきず深さと正規化信号の関係が変化することが分かった。

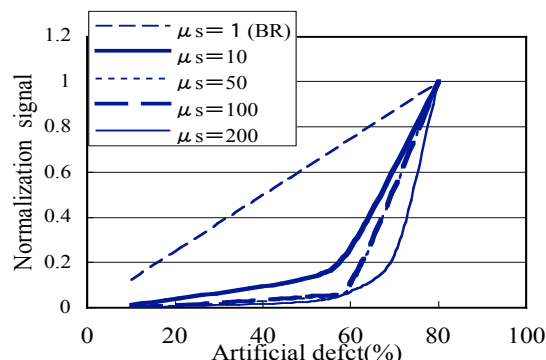


図 12 正規化信号対減肉率

5 おわりに

パルス渦電流を用いた内挿コイルによる鋼管の探傷試験を行った。探傷試験では、通常の渦電流試験とパルス渦電流試験を比較すると分かるように鋼管を磁気飽和させることにより磁気ノイズを低減できたことを確認した。このことから励磁にパルス電流を用いることで、磁気飽和効果が得られたことが分かった。また従来使用していた空心コイルに対し、励磁コイルに磁気コアを入れたことでさらに磁束が強まり、試験体の磁気飽和が進み磁気ノイズが低減してきず信号をより明確に識別できることを確認した。これらのことより、外面の浅いきずが検出できたことを確認した。一方、有限要素法の解析結果より、きずが浅くなるにつれてきず信号に時間差が生じていることを確認した。このきず信号の時間差は、透磁率が高い方が大きくなることが分かった。また減肉率と正規化信号の関係では、黄銅管では線形的に変化しているのに対して、鋼管は減肉率 50% 付近からきず信号が急激に大きくなり強い非線形となっていることが確認できた。

参考文献

- 1) (社)JSNDI、渦流探傷試験 II、(社)JSNDI、PP. 69-70 (1995 年)
- 2) C.V.dodd, W.E.Deeds and L.D.Chitwood, Eddy Current Inspection of Ferromagnetic Materials Using Pulsed Magnetic Saturation
- 3) 景浦宏一、小井戸純司、星川洋、パルス渦流試験による伝熱管の探傷における信号処理 H11 年度 NDI のための信号処理シンポジウム概要 P111
- 4) 例えば、中田 嵩義、高橋 則雄：電気工学の有限要素法、森北出版社、