

鋼管のパルス渦電流試験における内挿コイルの最適化

日大生産工(院) ○加藤修一
日大生産工 小井戸 純司

1 はじめに

各種プラントの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単一周波数渦電流試験が適用されている。しかし、多くの伝熱管に使用されている強磁性体である鋼管には、磁性ノイズ¹⁾によってSN比が低下するため通常の渦電流試験は適用が困難である。一方、鋼材などの製造工程において試験を行うときは、磁性ノイズを低減させるために外部に磁気飽和用のコイル²⁾を併用して試験を行っている。しかし、磁気飽和用のコイルを内挿用に小型化するのは困難である。そこで、パルス電流を用いることで鋼管を磁気飽和させて磁性ノイズを低減し、鋼管内部から探傷することが可能となる³⁾。ところで、従来の差動型コイルでは、コイルを走査したときに大きな不平衡電圧が生じるために信号処理が正常に機能しなかった⁴⁾。これは、コイルを走査したときに、進行方向に対する前後の位置で鋼管の磁気状態に差があるためと考えられる。そこで、コイルの進行方向の前で励磁が一樣になるように軸方向に励磁コイルを長くし、中央に二つの検出コイルを配置した差動型コイルを採用することにし、検討を行った。

初めに、有限要素解析を用いて励磁コイルの長さを変えて最適な励磁コイルの長さを検討した。次に、解析結果に基づいて作製したコイルを用いて、鋼管の探傷試験を行ったところ、不平衡電圧が低減し、SN比の高い探傷信号が得られた。

2 パルス渦電流試験システムと試験コイル

(1) パルス渦電流試験システム

図1にパルス渦電流試験のシステムを示す。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取るとゼロになる。しかし、どちらか一方の検出コイルがきずくに接近すると、試験体中の渦電流が変化するため、2つの起電力に差が生じ、これがきず信号として検出される。また、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の情報が含まれている。そこで、同調増幅器を用いて、特定の周波数成分を取り出す⁵⁾。さらに、パルス発生回路からの基準信号に基づいて同期検波を行い、得られた探傷信号をデジタルオシロスコープに記録する。

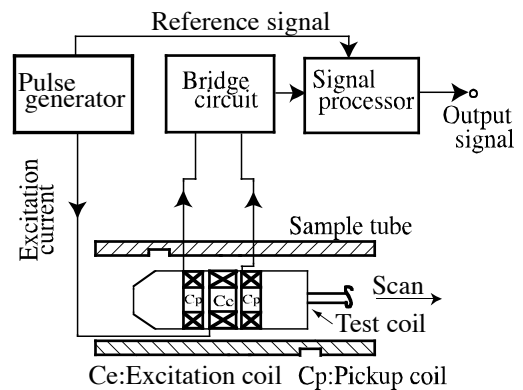


図1 パルス渦電流試験システム

(2) パルス渦電流試験用の内挿コイル

図2に、筆者らが従来パルス渦電流試験に用いていた差動型コイルを示す。このコイルは、励磁コイルの両側に検出コイルを配置してある。これを、鋼管の探傷試験に適用すると不平衡電圧が生じるという問題があった。そこで、図3に示すような軸方向に長い励磁コイルの中央に二つの検出コイルを配置した差動型コイルを採用する。このコイルを用いることで、パルス励磁が一樣となり鋼管の磁気状態の差が減少して不平衡電圧が低減できると考えられる。なお、励磁コイルの長さ

L を 10、20、30[mm]として試験コイルを作製し、最適な励磁コイルの長さを検討する。ここで、以後は従来の差動型コイルを L5 とし、励磁コイルの長さ 10、20、30[mm]のコイルを L10、L20、L30 と呼ぶこととする。

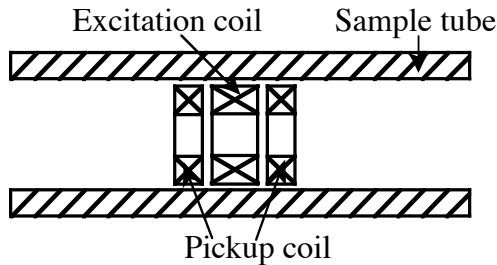


図2 従来の差動型コイル(L5)

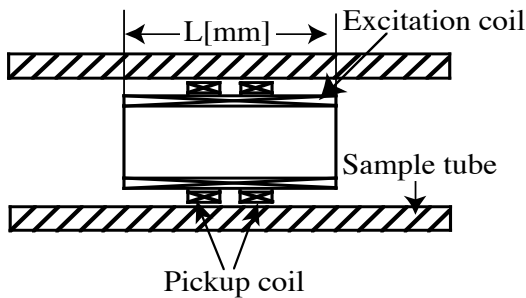


図3 励磁コイルを長くした差動型コイル (L10、L20、L30)

3 解析方法及び実験方法

(1) 有限要素法による解析

有限要素法によって試験コイル形状の検討を行う。励磁コイルの長さ L を 10、20、30[mm]と変えたときの、パルス励磁の状態を検討するために、鋼管肉厚部の磁束密度分布を求める。解析において、図 4 に示すように試験コイルと試験体は同軸に配置する。したがって、3次元軸対称⁶⁾として解析する。パルス電流のピーク値は 30[A]とし、試験体の材質はよく用いられている STB340 に近いものとするために、導電率を 5.92×10^6 (S/m) とする。また、透磁率はパルス励磁によって磁気飽和の状態に近づいているものと仮定して、比透磁率を 10 とする。ただし、実際はヒステリシス特性による非線形の現象であるが、解析では線形として取り扱うことにし、比透磁率は一定とする。

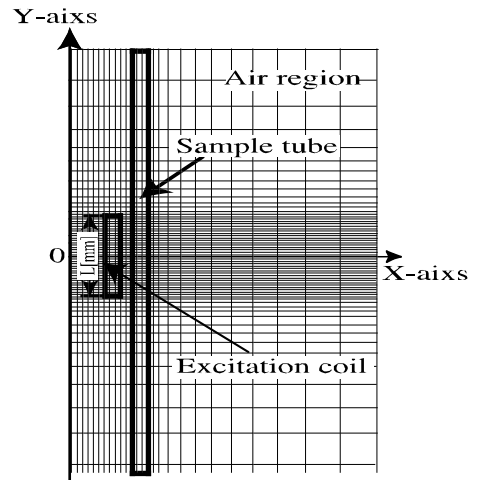


図4 3次元軸対称の解析領域(1/2領域)

(2) パルス渦電流探傷試験における鋼管の探傷

初めに L5、L10、L20、L30 を走査したときの不平衡電圧について検討する。そこで、各コイルを用いて鋼管の探傷試験を行い、コイルの走査する前と走査後の探傷信号のバランスの変化について調べる。図 5 に試験体を示す。試験体には、外径 19[mm]、肉厚 2[mm]、材質が STB340 の鋼管に全周減肉の人工きずを加工したものを用いる。きずの種類は、減肉率 10%と 50%の内面きず、減肉率 10%~80%の外表面きずとドリル孔とする。鋼管の探傷試験におけるパルス励磁電流のピーク値は 20[A]、パルス間隔 4[ms]、同調周波数 8[kHz]、探傷器の感度 40[dB]とする。次に、パルス間隔と同期検波出力の関係について確認を行う。L20 を用いてパルス間隔 0.5、8[ms]として鋼管の探傷を行う。パルス間隔を変えたときの探傷試験については、パルス電流のピーク値は 20[A]、パルス幅 92[μs]、同調周波数 8[kHz]、パルス間隔 8[ms]のときの探傷器の感度を 46[dB]、パルス間隔 0.5ms のときの探傷器の感度を 22[dB]とする。

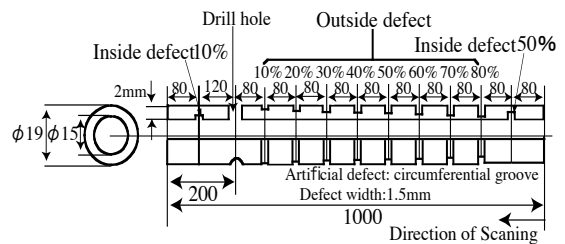


図5 試験体(STB340)

4 実験結果

(1) 有限要素法による解析結果

図 6 に L10、L20、L30 による鋼管肉厚内部の正規化した磁束密度分布を示す。y=0 がコイルの中心である。この図を見ると、励磁コイルの長さ 20[mm] から磁束密度一様の範囲が長いことが確認できる。このことから、励磁コイルを 20[mm] 以上長くすることにより鋼管の磁気の状態の差が減少して不平衡電圧が低減できると期待できる。

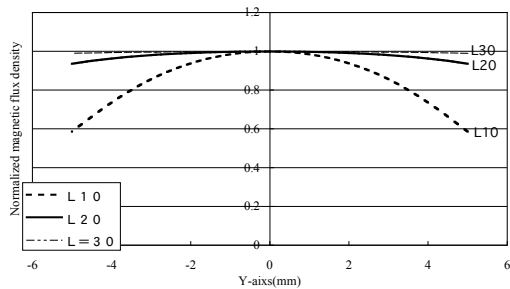
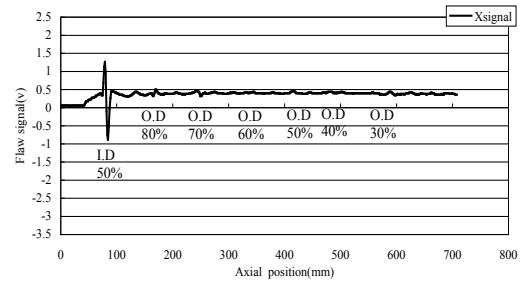


図 6 鋼管肉厚部の正規化した磁束密度分布

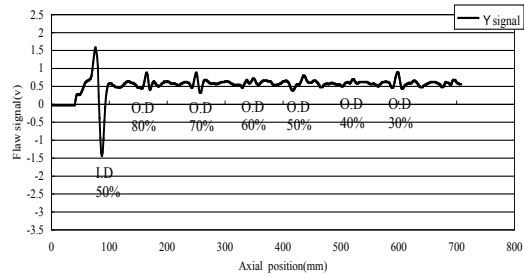
(2) パルス渦電流試験結果

図 7、8 に L5 と L20 の探傷波形を示し、図 9 に励磁コイルの長さによる不平衡電圧の変化を示す。図 7、8 を見ると L5 は、コイルの走査開始直後に探傷信号のバランスが崩れているが、L20 はコイルを走査し始めた後も探傷信号のバランスが保たれていることが確認できる。これは、不平衡電圧が低減したことによる効果であると推測できる。次に、図 9 を見ると励磁コイルの長さを 5、10、20[mm] と長くなるに伴い、より不平衡電圧が低減していることが確認できる。また、励磁コイルの長さが 20[mm] から不平衡電圧が一定となっていることから、励磁コイルの長さは、20[mm] 以上必要であることが確認できた。このことは、図 6 の解析結果と合致する。

次に、図 10、11 にパルス間隔 0.5、8[ms] の探傷波形を示す。これらの図と図 8 を見ると、パルス間隔 0.5、4、8[ms] とともに減肉率 30% の浅い外面きずまで確認することができる。また、パルス間隔が短くなるに伴って、探傷信号の SN 比が高くなり探傷波形が明確に得られている。これは、パルス間隔を短くすることにより、同期検波出力の平均値が高くなることによって、SN 比の高い探傷信号が得られるためと考えられる。

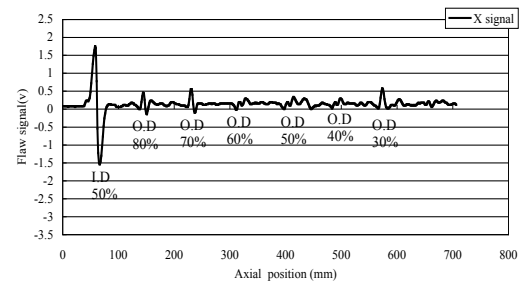


(a) X 成分信号

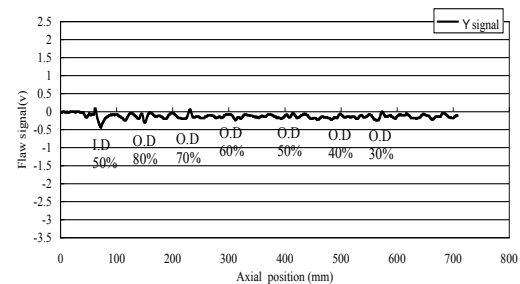


(b) Y 成分信号

図 7 L5 の探傷波形(パルス間隔 4ms)



(a) X 成分信号



(b) Y 成分信号

図 8 L20 の探傷信号(パルス間隔 4ms)

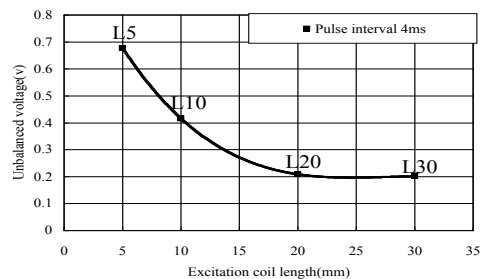
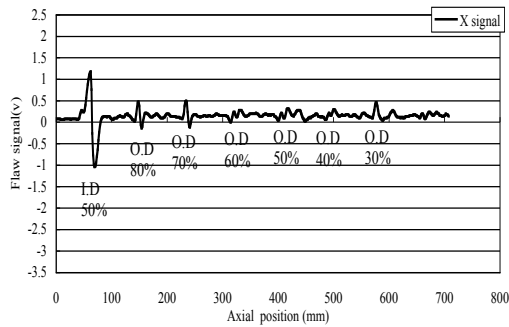
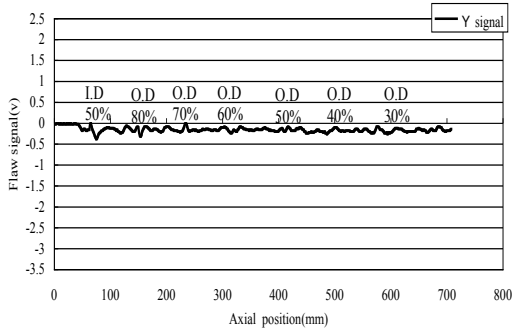


図 9 励磁コイルの長さ と 不平衡電圧

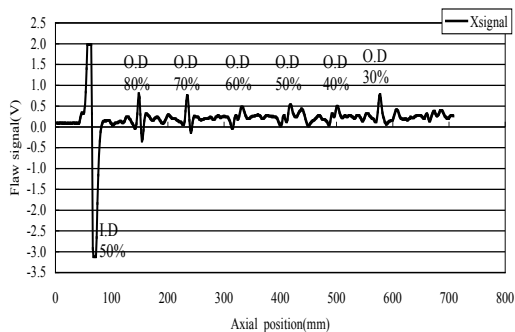


(a) X 成分信号

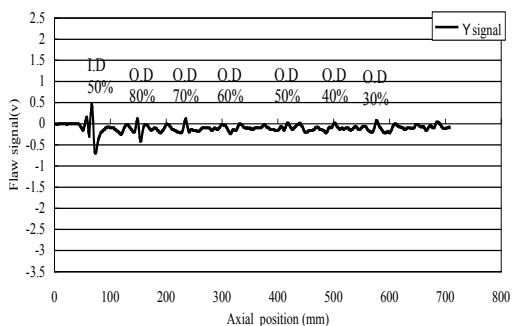


(b) Y 成分信号

図10 L20の探傷波形(パルス間隔8ms)



(a) X 成分信号



(b) Y 成分信号

図11 L20の探傷波形(パルス間隔0.5ms)

5 おわりに

鋼管のパルス渦電流試験において、従来の差動型コイルを適用した場合に大きな不平衡電圧が生じて信号処理が正常に機能しなかった。そこで、励磁コイルを長くして、中央部に検出コイルを配置した新しい差動型コイルを作製し、不平衡電圧の低減を試みた。

初めに三次元軸対称解析の有限要素法を用いて励磁コイルによる鋼管肉厚部の磁束密度分布を確認した。解析結果より、励磁コイルを20[mm]以上に長くすることによって磁束密度一様の範囲が長くなることが確認できた。次に、軸方向に長くした差動型コイルを用いて鋼管の探傷試験を行ったところ、従来の差動型コイルよりも不平衡電圧が低減していることが確認できた。さらに、励磁コイルの長さを変えたコイルを作製して不平衡電圧について検討した。励磁コイルの長さが20[mm]以上あれば不平衡電圧の変動を抑えることが可能であることを確認した。このことは、解析結果と合致した。

新しい差動型コイルを鋼管の探傷試験に適用することで、不平衡電圧が低減し、SN比の高い状態で減肉率30%の浅い外面きずまで探傷でき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,pp69-70(1995年)
- 2) (社)JSNDI,渦流探傷試験Ⅱ,(社)JSNDI,pp70-71(1995年)
- 3) C.V.dodd, W.E.Deeds, and L.D.Chitwood, Eddy Current Inspection of Ferromagnetic Materials Using Pulsed Magnetic Saturation, Materials Evaluation, 46(11), p.1592-1597 (1988)
- 4) 加藤修一,小井戸純司,星川洋, 内挿コイル渦流試験による強磁性管の探傷, H16年度非破壊検査協会秋季大会 p.p93-p.p94
- 5) 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 p.111
- 6) 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, pp.66—86