

【学術賞受賞者講演】

内挿コイルを用いたパルス渦電流試験による 強磁性伝熱管の探傷

[平成24年度論文賞(一般社団法人日本非破壊検査協会)「受賞論文題目 内挿コイルを用いたパルス渦電流試験による強磁性伝熱管の探傷」平成25年6月4日受賞]

日大生産工 ○小井戸 純司

1 はじめに

火力発電プラントや各種化学プラント等においては多くの熱交換器が用いられており、定期的な保守検査が行われている。熱交換器に用いられる伝熱管は鋼管が多いが、これに対して通常の渦電流試験を適用すると、強磁性材料に特有の磁気ノイズによって探傷信号のSN比が著しく低下し、きずの検出が困難となる。そこで、筆者はパルス状の励磁電流を用いるパルス渦電流試験によって鋼管に強い磁気を与え、磁気ノイズを抑制して探傷を可能とすることについて提案し、一定の効果を示した。また、受賞論文では、さらにSN比を向上させるため、試験コイルにネオジム磁石を併設してパルス渦電流試験に用いることを提案し、この方法によって信号のSN比が大幅に向上することを示した。

なお、本論文で提案したパルス渦電流試験法の優位性を示すため、ネオジム磁石を併用した場合としない場合の通常の渦電流試験についても実験を行い、探傷信号を比較・検討した。

本報告では、受賞論文の概要について報告する。

2 磁気ノイズとパルス渦電流試験

強磁性材料である鉄の比透磁率は非磁性材料の数百倍であるため、電磁誘導現象に与える影響が強く、しかも、材料の場所によって透磁率や磁化特性が異なっている。これにより、正弦波交流を用いる通常の渦電流試験を適用すると、磁気特性の差異による雑音が非常に大きいためきず信号のSN比が低く、探傷が困難

となる。この雑音を磁気ノイズという。一方、これに強い直流磁界を併用すると磁気特性の差異が圧縮され、雑音が低下してSN比が向上することが知られている。しかし、伝熱管の渦電流試験では内挿コイルに依らざるを得ないために、発熱を伴う電磁石の利用は困難である。そこで、間歇的な励磁電流を用いるパルス渦電流試験によれば、瞬間的ではあるが大電流を流すことが出来るため、十分な磁気を試験体を与えると共に、渦電流も発生するので同時に探傷試験も可能である。

3 試験コイルと試験体

Fig. 1に、パルス渦電流試験で用いた相互誘導形差動方式の試験コイルを示す。試験コイルをスキャンしたときに発生するアンバランス

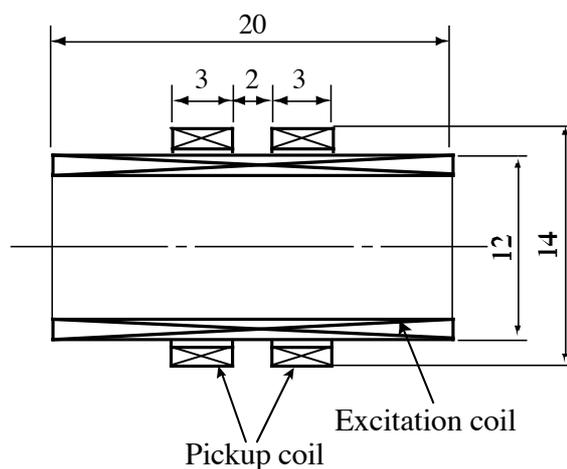


Fig. 1 Test coil for Pulsed ECT

Pulsed Eddy Current Test of Ferromagnetic Heat Exchanger Tubes
using Inner Probe Coil

Junji KOIDO

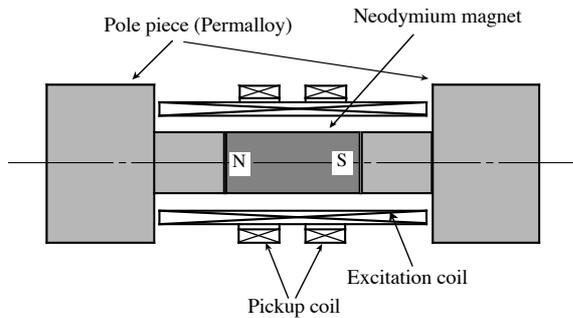


Fig. 2 Test coil with Neodymium magnet

電圧を抑制するため、励磁コイルは比較的長くしてある。検出コイルは偏心による雑音を抑制するために、差動方式とした。

Fig. 2はネオジウム磁石をコアに用いたパルス渦電流試験用の試験コイルである。これは、パルス渦電流試験のみではSN比が十分に向上できないため、永久磁石による直流磁界を併用してSN比を向上することの可能性を確認するために作製し、実験を行った。なお、磁路の磁気抵抗を軽減するために、パーマロイを用いた。

Fig. 3は、探傷試験に用いた試験体の断面図である。材質は強磁性伝熱管であるSTB340であり、これに、外面きずが減肉率10%から80%までの8種類、内面きずが減肉率50%、貫通ドリル孔が1つで、合計10個の人工きずが加工してある。なお、内外面きずとも幅1.5mmの全

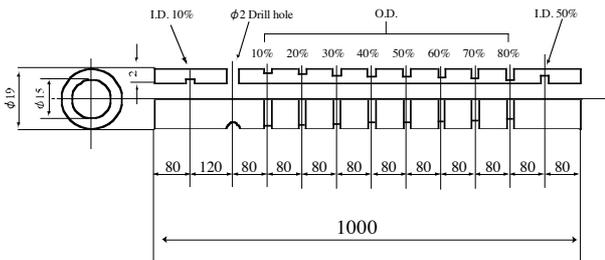


Fig. 3 Ferromagnetic tube as test sample (STB340)

周減肉きずである。

4 パルス渦電流試験装置

Fig. 4は、試験体と試験コイル、およびパルス渦電流試験装置のブロック図である。試験コイルは試験体の内部に設置され、スキャンされる。励磁コイルにはパルス発生回路からパルス状の電流が加えられる。励磁コイルのパルス状の磁束によって試験体は強く磁化され、渦電流が発生し、2つ検出コイルに信号が発生する。2つの検出コイルの信号はブリッジ回路によって試験体の健全部において平衡が取られ、スキャンによってきずの付近を通過することによって平衡が崩れ、信号が発生する。この信号は歪み波であるので同調増幅器によって特定の周波数成分を抽出し、同期検波回路によって

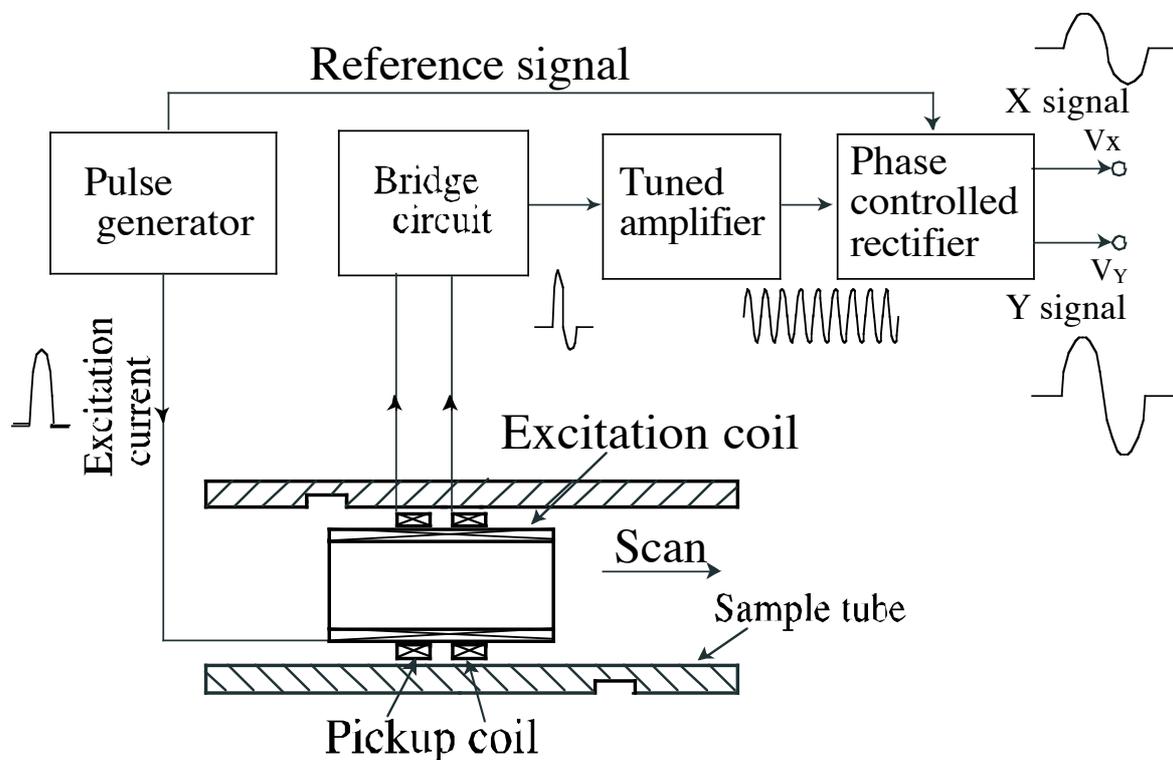


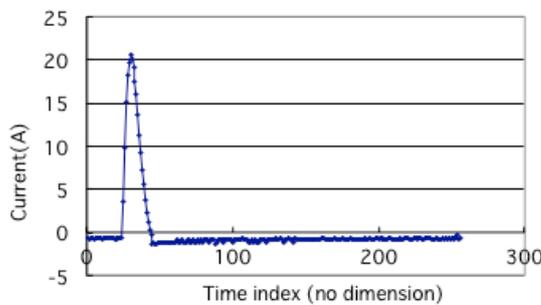
Fig. 4 Test apparatus for pulsed ECT

基準信号の同相成分と1/4周期進相成分とに分解され、これが探傷信号となる。本研究において、パルス電流の繰り返し間隔は1msとした。したがって、探傷信号の基本周波数は1kHzとなる。パルス電流の幅は $100\mu\text{s}$ 、パルス電流のピーク値は20 Aである。同調増幅器の同調周波数は8 kHzとした。なお、パルス渦電流試験と比較検討するために、直流励磁を併用した通常の渦電流試験も行ったが、その装置の図は省略する。

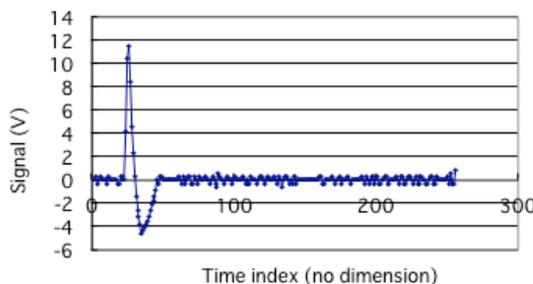
5 実験結果

Fig. 5(a)に、励磁コイルに流れる電流を示す。パルス電流は、試験コイルとコンデンサからなる直列共振回路にサイリスタスイッチを入れておき、コンデンサを任意の電圧まで充電した後にスイッチを閉じると減衰振動電流が流れるが、逆方向の電流はサイリスタによって阻止されるために、同図のような直流のパルス電流が得られる。一方、このようなパルス励磁電流によって検出コイルに発生する起電力を、Fig. 5(b)に示す。パルス電流の半波に対し、電磁誘導によって同図(b)のような微分的な起電力が発生する。これを同調増幅し、同期検波によって分解した複素信号を探傷信号とする。

Fig. 6は、正弦波を用いた通常の渦電流試験



(a) Pulsed excitation current

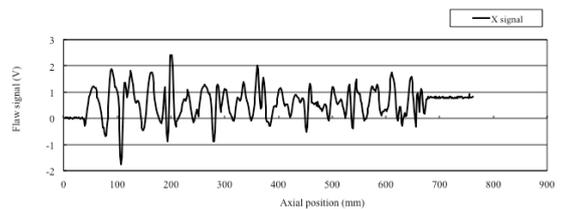


(b) Detected signal

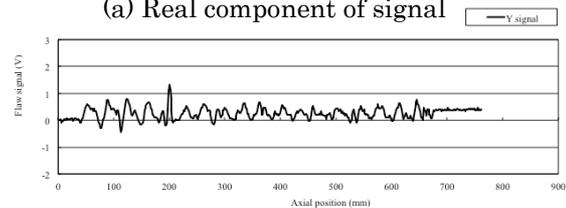
Fig.5 Waveform of pulsed ECT

によって、Fig. 3に示した鋼管の試験体を探傷して得られた探傷信号である。同図のように、実数成分も虚数成分も大きな雑音が観測されるが、これが磁気ノイズであると考えている。このように、通常の渦電流試験で鋼管を探傷しきずを検出することは困難である。

一方、Fig. 7に示したのは、大きな電磁石を用いて外部から試験体を直流磁化し、その状態で内部に試験コイルをセットして試験体をスキャンして通常渦電流試験装置によって得た探傷信号である。同図に示すとおり、減肉率80%の深い外面きずはもとより、20%の浅いきずまでも識別できる程度にSN比が高い。このように、試験体を十分に磁化することができれば、通常の渦電流試験によっても十分に鋼管を

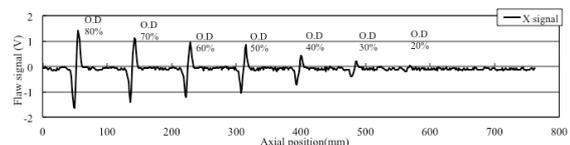


(a) Real component of signal

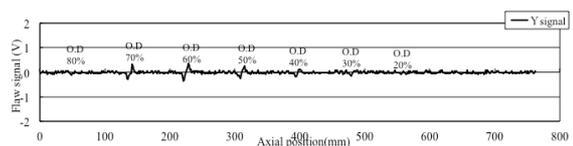


(b) Imaginary component of signal

Fig.6 Conventional ECT signal with no magnetic saturation ($I_{de} = 0\text{A}$, Gain=60dB)



(a) Real component of signal

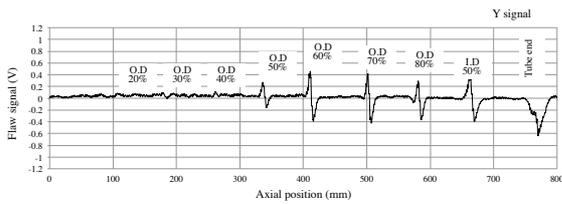


(b) Imaginary component of signal

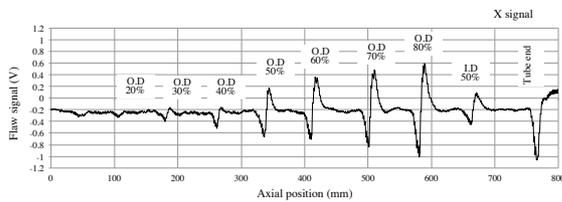
Fig. 7 Conventional ECT signal with magnetic saturation ($I_{de} = 0.1\text{A}$, Gain=32dB)

探傷することが可能なことが分かった。

次に、Fig. 2に示した、パルス渦電流試験にネオジウム磁石を併用した試験コイルによる探傷信号を、Fig. 8 に示す。同図に示すとおり、磁気ノイズは良く抑制されてSN比は良好であり、減肉率30%の浅い外面きずまで識別できている。この結果は、Fig. 7に示した、磁気飽和を併用した通常渦電流試験による結果と遜色がない。ただ、きず信号がすこし鈍っているのが見受けられるが、その原因は不明である。

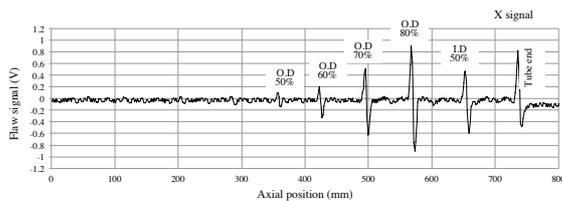


(a) Real component of signal

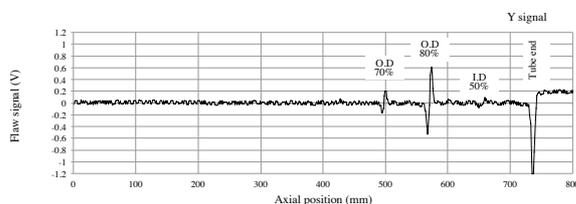


(b) Imaginary component of signal

Fig. 8 Flaw signal of pulsed ECT employed neodymium magnet
(I_p -p = 20A, τ_p = 90 μ s, Gain = 38dB)



(a) Real component of signal



(b) Imaginary component of signal

Fig. 9 Flaw signal of conventional ECT employed neodymium magnet

Fig. 9に示したのは、ネオジウム磁石による直流磁気を併用した通常渦電流試験による探傷信号である。すなわち、Fig.2に示したネオジウム磁石を用いたコイルと同じ磁気コアの構造を有し、それに自己誘導形差動コイル方式のコイルを構成したものをを用いて得た探傷信号である。同図に示したとおり、磁気ノイズはある程度抑制されており、きず信号もクリアに検出されている。しかし、外面きず50%までは検出されているが、それより浅いきずが全く検出されていない。Fig. 10は、パルス渦電流試験と通常の渦電流試験によって得た信号から、きず深さに対するきず信号の大きさを描いたものである。同図は、それぞれの方式による信号において、内面きず50%の信号で正規化したものであるが、外面80%のきずに対する検出感度については、パルス渦電流試験の方が優れていることが分かった。

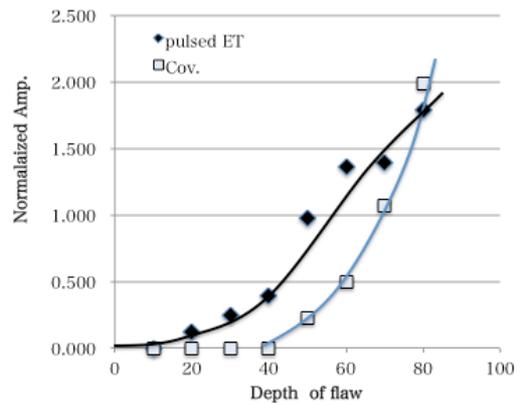


Fig. 10 Flaw depth(%) vs. signal amplitude

6 おわりに

ネオジウム磁石を併用することにより、パルス渦電流試験による強磁性伝熱管の探傷信号のSN比を大幅に向上できることを示した。

[参考文献]

- 1) 柴田俊夫, 腐食事故に学ぶ, 日本非破壊検査協会平成17年度第4回保守検査シンポジウム論文概要集(2005), pp.33-42
- 2) 坂本隆秀, 藤原弘次, 有田芳夫: 強磁性伝熱管の内挿コイル渦流探傷試験, 非破壊検査, (1992), 41(12), pp. 685-693
- 5) 小井戸純司, 加藤修一, 内挿コイルを用いたパルス渦電流試験による強磁性伝熱管の探傷, 非破壊検査, vol. 61 (2012), pp. 331-340