

ECT による配管減肉率の評価

Evaluation of Tube Wastage by Eddy Current Testing

株式会社 IIU	黄 皓宇	Haoyu HUANG	Member
株式会社 IIU	遊佐訓孝	Noritaka YUSA	Member
株式会社 IIU	宮 健三	Kenzo MIYA	Member

This study proposes an investment for the evaluation of tube wastage by eddy current testing. ECT signals of differential and absolute type bobbin probes are presented by numerical simulation method. The relationships between percentage of wastage and ECT signals (amplitude and phase) are shown. Noise from ECT is considered and the percentage of wastage is estimated from safe side.

Keywords: Eddy Current Testing, Wastage, Amplitude, Phase

1. 緒言

原子炉炉心の中性子量を調べるため、センサーを挿入する細い配管がある。図1に示したように、配管を支持するため、管台や支持板などの構造が設けている。振動などの原因で摩擦が発生し、配管の外面に減肉が発生する。この減肉を渦電流探傷（ECT）を使って評価するため、数値解析により ECT 信号を分析した。

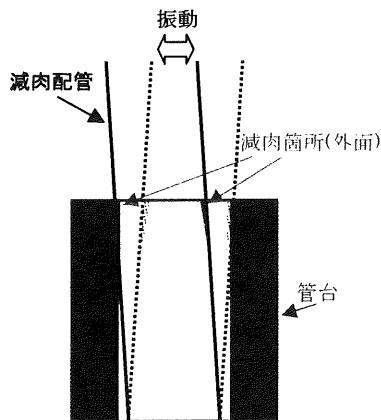


図1 配管の減肉状況

2. 配管減肉の ECT 信号

この配管の減肉状況を管内に ECT プローブを挿入し、減肉進展状況を調べる方法を検討する。数値解析手法を使って、ECT 信号を計算し、減肉率の評価方法を検討した。渦電流解析は、マクスウェルの方程式か

ら導かれる電磁界の支配方程式を解くことに帰着する。支配方程式の変数には、一般的にはポテンシャルが多く用いられている。本研究では、磁気ベクトルポテンシャルと電流ベクトルポテンシャルを用いた。離散化手法として、辺要素有限要素法を用いた[1][2]。

2.1 減肉形状と ECT プローブ

図1の配管の減肉状況を考慮し、3種類の減肉モデルが想定される。図2にこの3種類の減肉モデルを示し、それぞれ片減肉、両減肉、全周減肉モデルと呼ぶことにする。

有限要素法では、導体（管）、空気、欠陥領域を全てメッシュ分割する。この問題に対しては、減肉部分のメッシュはある程度複雑で、工夫する必要がある。両減肉モデルのメッシュを図3に示す。全領域では計57,024要素に分割され、経験上、このようなメッシュでは数値計算の計算精度を確保できる。

本試験では、絶対型と差動型のボビンタイプのプローブを使用した。どちらが減肉率の評価に優れているかを調査し、評価方法を検討した。

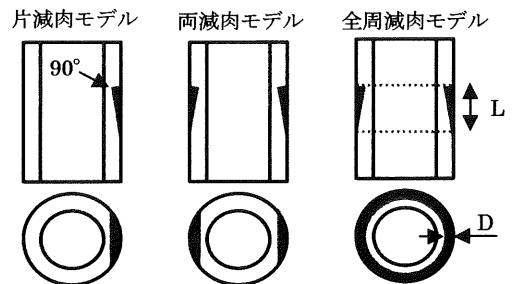


図2 配管の減肉モデル

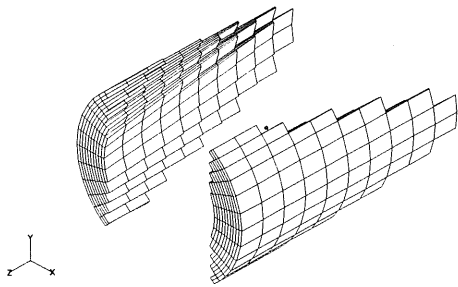


図3 両減肉モデルの減肉部分のメッシュ

配管及び減肉の条件を以下に列記する。

- ・配管材質 : SUS316
- ・配管導電率 : 1.4×10^6 S/m
- ・比透磁率 : 1.0
- ・配管内径 : 5.0 mm
- ・配管肉厚 : 1.3 mm
- ・減肉長さ : 10.0 mm
- ・減肉深さ : 管厚の 20%, 40%, 60%, 80%, 100%

また、コイルのサイズ及び試験条件を以下で示す。

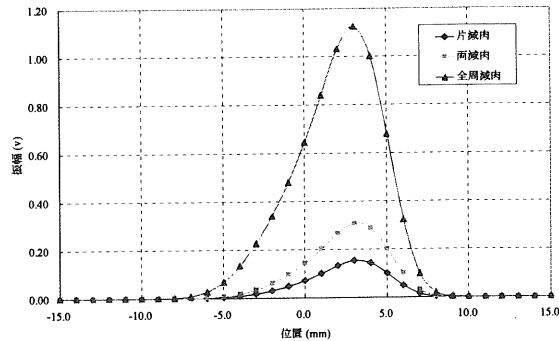
- ・試験周波数 : 400 kHz
- ・コイル外径 : 3.7 mm
- ・コイル内径 : 2.7 mm
- ・コイル長さ : 3.0 mm
- ・巻き線径 : 0.1 mm
- ・巻き数 : 100 t
- ・コイル間隔 : 6.0 mm (差動の場合)
- ・ノイズ : 考慮しない

2.2 振幅信号と位相信号

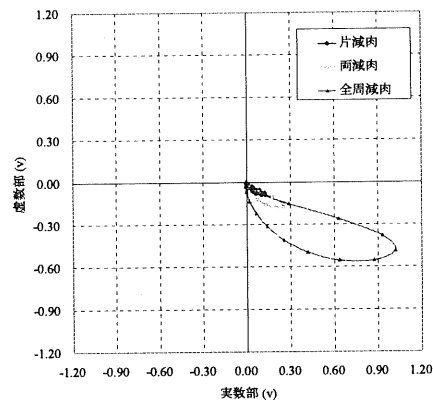
片減肉、両減肉及び全周減肉の三種類の減肉について、減肉率(最大の減肉深さ)が20%、40%、60%、80%、100%に変化した場合のECT信号を計算した。ここで、減肉率を最大減肉深さの管厚に対する割合として定義する。

図4に、減肉率60%の場合における絶対型のECTプローブによる解析結果を示す。プローブは減肉の浅い方から減肉の深い方へ走査するため、振幅-位置図には、信号の最大値は中央0位置ではなく、少し0位置を過ぎたところ(即ち減肉の体積の中心)で得られた。

また、同じ減肉率であっても、片減肉、両減肉及び全周減肉三種類の減肉の振幅信号が異なることが判った。減肉信号のリサージュ波形図によると、同じ減肉率の位相信号がほぼ等しい。また、減肉率が増加するにつれて、位相信号が反時計方向に回転することが判った。



(a) 信号の振幅



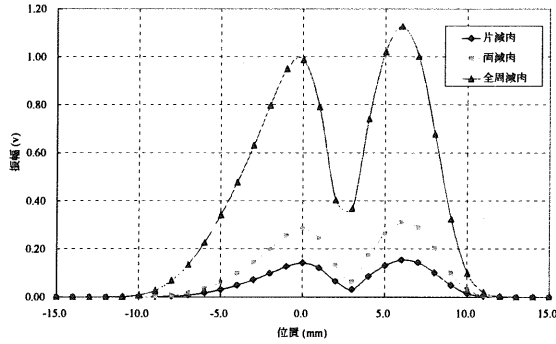
(b) 信号のリサージュ波形

図4 ECT信号(絶対型、減肉率60%、400kHz)

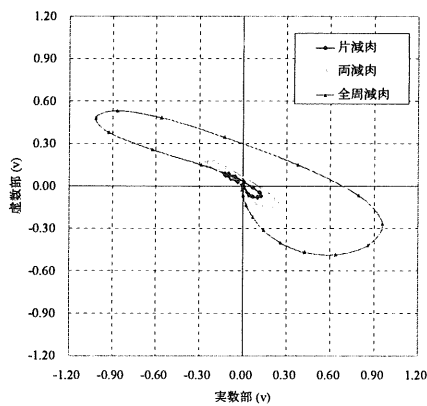
図5に、差動型のECTプローブによる解析結果を示す。差動型のプローブであるため、減肉中央で検出したECT信号が小さい。代わりに、プローブが減肉範囲に進入する時と離れる時に、信号のピークが得られた。絶対型のECTプローブと同様に、同じ減肉率の位相信号がほぼ等しいこと、減肉率が増加するにつれて、位相信号が反時計方向に回転することが判った。

理論上、減肉が上下対称の場合には、差動型のECTプローブの振幅信号は絶対型の2倍で、位相信号は絶対型と同じである。今回解析したような上下対称ではないモデルでも、ほぼ同じことが言える。絶対型と差動型のプローブの振幅と位相特性は、ほぼ同じである

ことが判った。



(a) 信号の振幅



(b) 信号のリサーチ波形

図5 ECT 信号 (差動型、減肉率 60%、400kHz)

2.3 ECT 信号と減肉率の関係

絶対型と差動型の ECT プローブに対して、減肉率を振幅信号及び位相信号による評価曲線を作成し、評価曲線による減肉率の評価誤差を検討した。

絶対型の ECT プローブを用いた場合には、振幅信号が多用されているが、位相信号を使うことも可能である。 $\Phi 0.8\text{mm}$ 貫通穴 $\times 3$ による ECT 信号を振幅の校正信号 (1.2V に) とし、内面深さ 0.5mm の全周デントによる ECT 信号を位相の校正信号 (180 度) とした。

図6に絶対型の ECT プローブを用いた場合の振幅信号と減肉率の関係を示す。同じ減肉率でも、両減肉の信号振幅は片減肉の2倍、全周減肉の信号振幅は片減肉の約5.5倍であることが判った。図7に絶対型の ECT プローブを用いた場合の位相信号と減肉率の関係を示す。全周減肉の曲線には若干ずれがあるが、ほぼ同じ曲線で表現できることが判った。

絶対型と差動型のポビンタイプ ECT プローブは、原

理的に大きい違いがなく、減肉率の評価には、位相信号が適していることが判った。測定現場の環境、プローブのノイズに対する性能を考慮すると、差動型の ECT プローブが減肉の評価に適していることが考えられる。

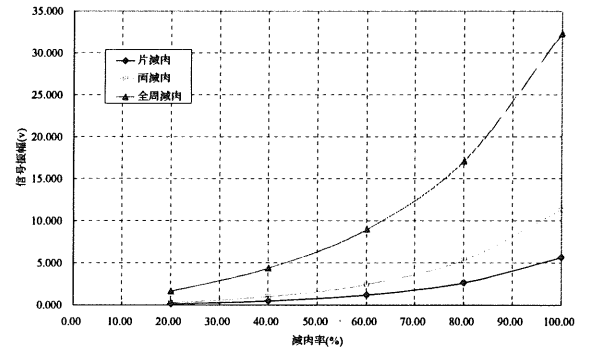


図6 振幅信号と減肉率の関係 (絶対型プローブ)

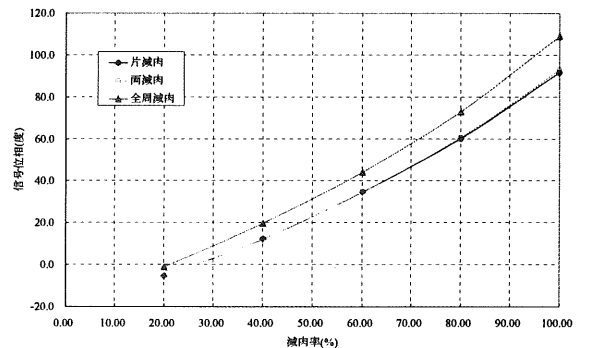


図7 位相信号と減肉率の関係 (絶対型プローブ)

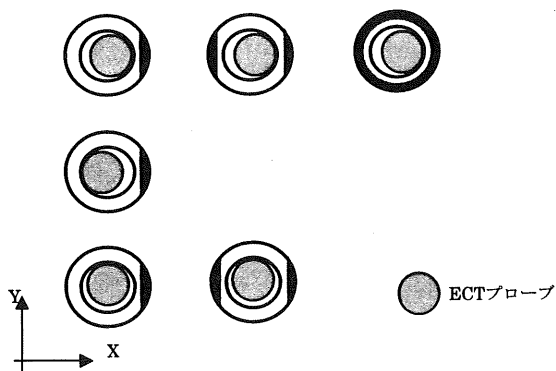
3. 配管減肉率の評価手法

3.1 ノイズの影響

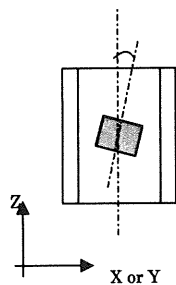
リフトオフノイズや傾斜ノイズをモデル化し、ノイズを付加した場合の減肉率評価への影響を検討した。励磁コイルを導体及びそれを囲む空間と独立に取り扱う変形磁気ベクトルポテンシャル法 Ar 法を適用することによって、コイルの位置の変化即ちリフトオフノイズや傾斜ノイズを考慮しても新たにメッシュ作成する必要がない。

コイルのサイズ及び試験条件は前節と同じである。但し、図8に示したように、減肉の種類とノイズの種類は以下の通り：リフトオフノイズ+片減肉

3、両減肉2、全周減肉1、傾斜ノイズ XZ 平面と角度を持ち3、YZ 平面と角度を持ち3、総計 12 ケース。リフトオフは 0.3mm、傾斜角度は 2 度に設定する。



(a) リフトオフノイズモデル

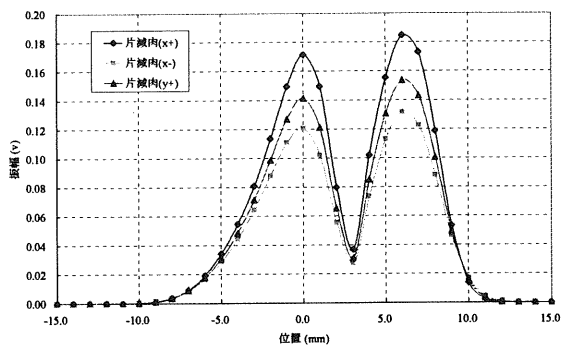


(b) 傾斜ノイズモデル

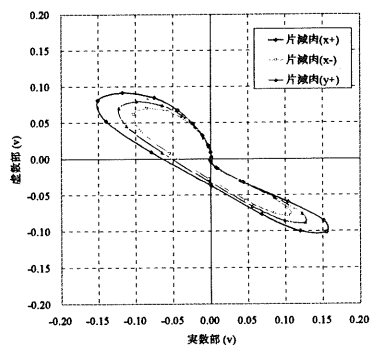
図 8 ノイズモデル

前節の結果により、ここでは差動型プローブだけを考慮することにした。図 9～図 12 に、減肉率 60% の場合における、差動型の ECT プロブによる減肉信号を示す。信号を見易くするため 12 ケースの結果を 4 枚の図にした。

リフトオフノイズや傾斜ノイズなどを計算する際、コイルの位置をシフト又は回転して計算する。この場合、検出信号に二つの成分が含まれている。一番目の成分は、欠陥なしの管に対して、コイルの軸の位置が管の中心軸からずれたことによって信号の変化分である。この信号は信号処理によって消去できる。二番目の成分は軸中心からずれたまま減肉を通過する時得られた減肉信号。この減肉信号は軸のずれによって異なるので、減肉率の評価に影響を与える。ここでは、この二番目の成分を計算し、リフトオフ及び傾斜の影響を検討する。

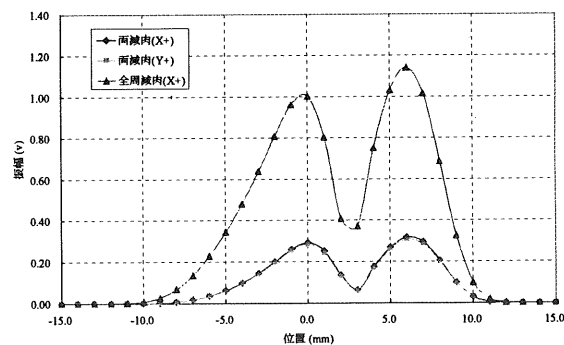


(a) 信号の振幅

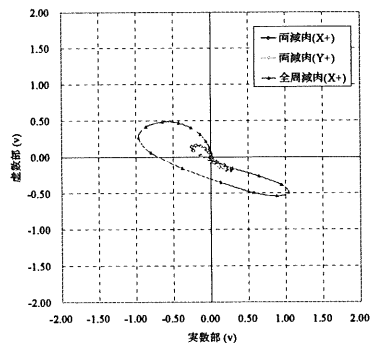


(b) 信号のリサージュ波形

図 9 ECT 信号の 1 (差動型、減肉率 60%、400kHz)

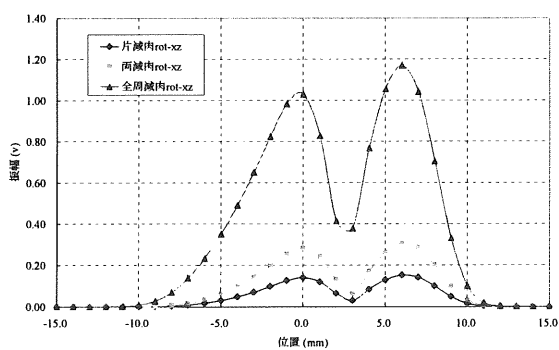


(a) 信号の振幅

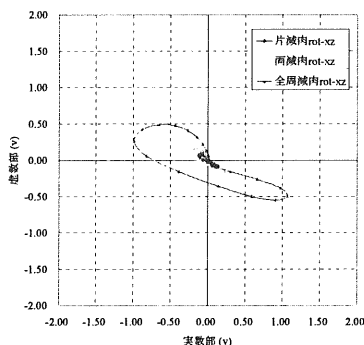


(b) 信号のリサージュ波形

図 10 ECT 信号の 2 (差動型、減肉率 60%、400kHz)

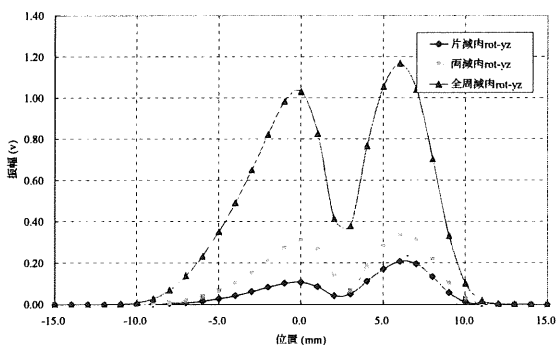


(a) 信号の振幅

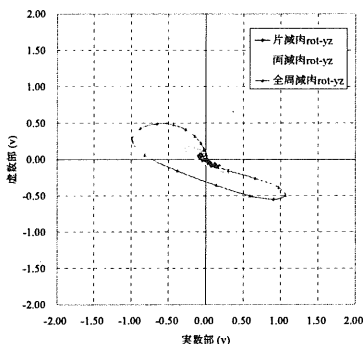


(b) 信号のリサージュ波形

図 11 ECT 信号の 3 (差動型、減肉率 60%、400kHz)



(a) 信号の振幅



(b) 信号のリサージュ波形

図 12 ECT 信号の 4 (差動型、減肉率 60%、400kHz)

信号の 1 と信号の 2 の図はリフトオフがある場合の信号、信号の 3 と信号の 4 の図は軸の傾斜がある場合の信号である。

差動型のプローブであるため、減肉中央で検出した ECT 信号が小さい。代わりに、プローブが減肉範囲に進入する時と離れる時に、信号のピークが得られた。減肉は上下対称ではないため、減肉信号のリサージュ波形が完全な“8”の字にはなっていない。

欠陥に近いほど信号振幅が大きくなり、また、減肉の体積が大きいほど信号振幅も大きい。リフトオフの影響に関しては、X 方向の変動の影響が大きく、Y 方向の変動は信号に余り影響しないことが判った。プローブの外径と管の内径はほぼ一致していて、傾斜の角度は極めて小さいので、傾斜の影響は小さいと判った。減肉信号のリサージュ波形図によると、同じ減肉率の位相信号がほぼ等しい。また、減肉率が増加するにつれて、位相信号が反時計方向に回転することが判った。

3.2 安全側からの評価手法

ノイズを付加した場合の減肉率への影響及び評価方法を検討した。差動型の ECT プローブに対して、減肉率を位相信号による評価曲線を作成した。

差動型の ECT プローブを用いた場合には、ピークツウピーク信号が多用されている。即ち、プローブが欠陥領域に進入する時のピーク信号と脱出する時のピーク信号を引算して、その大きさを振幅とし、その位相角を位相信号として使う。信号の校正は前節と同じ信号を使うことにした。

図 13～図 17 に差動型の ECT プローブを用いた場合の位相信号と減肉率の関係を示す。また、位相信号の最小値を評価曲線 (赤い破線) として示した。比較し易いため、ノイズなしとノイズありの結果を 3 ケースごとに図に示した。位相信号の場合では、同じ減肉率に対して位相はほぼ等しいことが判った。

図 13～図 17 をまとめて、XY 軸を交換すれば、位相信号の評価曲線が得られる。過小評価を回避し、安全側からの評価曲線を図 18 に示す。同図には推定誤差の下限も示した。誤差下限 1 と評価曲線が囲む範囲は実際の減肉率の可能範囲を示し、誤差下限 2 は全周減肉を除外した範囲を示す。位相信号で減肉率を推定する場合には、減肉の形式に関わらず過大評価の絶対値は 12% 以内に留まった。

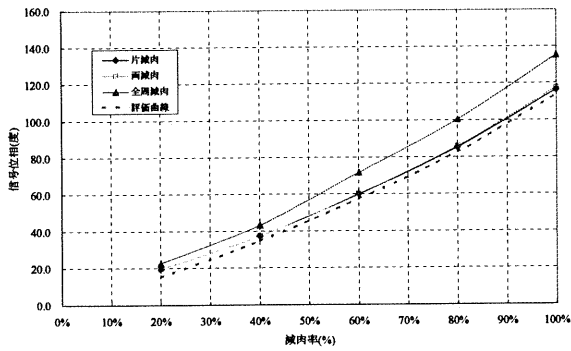


図 13 位相信号と減肉率の関係 (ノイズなし)

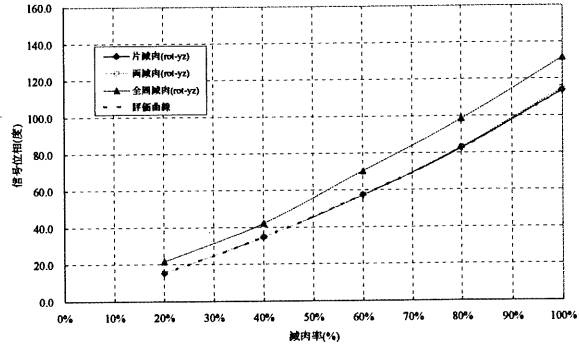


図 17 位相信号と減肉率の関係 (傾斜ノイズ 2)

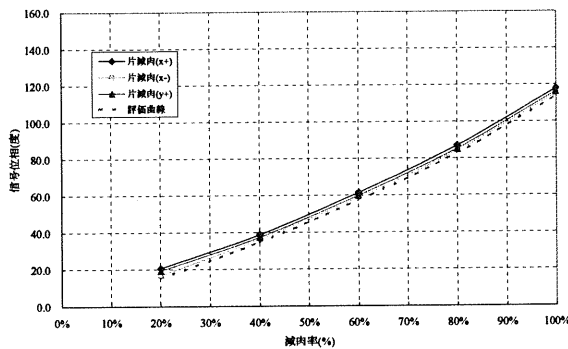


図 14 位相信号と減肉率の関係 (lift-off ノイズ 1)

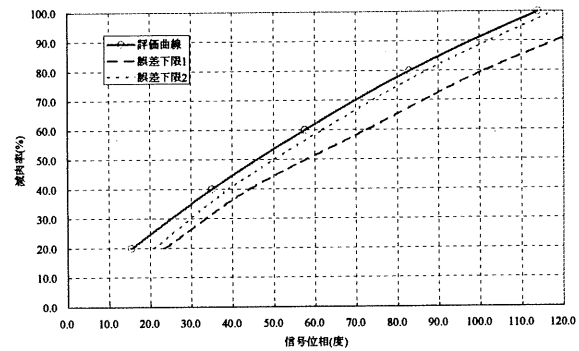


図 18 位相信号の評価曲線 (差動型プローブ)

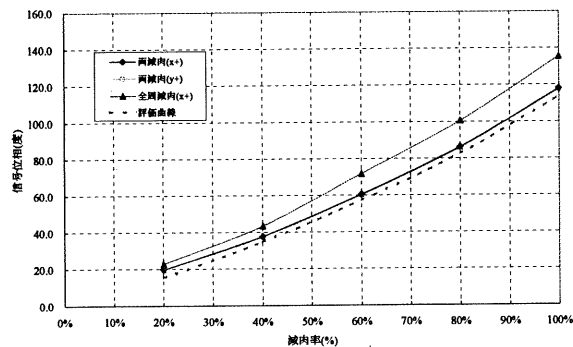


図 15 位相信号と減肉率の関係 (lift-off ノイズ 2)

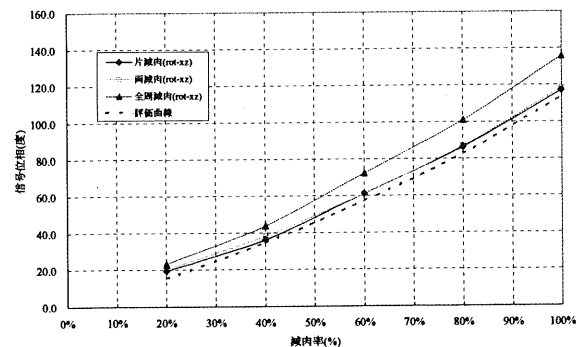


図 16 位相信号と減肉率の関係 (傾斜ノイズ 1)

4. 結言

- 1) ECT 信号の位相を用いて配管の減肉率を評価することが可能であった。
- 2) ノイズの軽減等を考えると、差動型の ECT プローブが減肉の評価に適していることが考えられる。
- 3) 差動型の ECT プローブの場合では、位相信号を用いて減肉率を絶対誤差+12%以内で推定することが可能であることが示された。

謝辞

本研究は株式会社四国総合研究所の受託研究「ECT による配管減肉率評価方法調査」の成果の一部である。

参考文献

- [1] H. Fukutomi, T. Takagi, J. Tani, M. Hashimoto, T. Shimone and Y. Harada, "Numerical evaluation of ECT impedance signal due to minute cracks," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, no. 2, pp.2123-2126, 1997.
- [2] A. Kameari, "Solution of asymmetric conductor with a hole by FEM using edge-element," COMPEL, vol. 9, pp.230-232, 1990.