

# 磁束漏洩法の補強板下配管減肉評価への適用性の基礎検討

Nondestructive evaluation of wall thinning  
occurred under reinforced plate by MFL method

岩手大学工学部	菊池 弘昭	Hiroaki KIKUCHI	Member
岩手大学工学部	佐藤 界斗	Kaito SATO	Non-member
岩手大学工学部	清水 勇	Isamu SHIMIZU	Non-member

## Abstract

Basic study on applying magnetic flux leakage (MFL) method using ac excitation to a nondestructive evaluation of wall thinning occurred under reinforcing plates in nuclear power plants were performed. Frequently, MFL method by means of dc field for exciting specimens is adopted, and only intensity of magnetic flux density is evaluated. On the other hand, MFL with alternating current enable us to utilize not only amplitude of magnetic flux density but also phase difference, which contributes to evaluation with higher accuracy. Here, specimens with slit and pipe with imitated wall thinning are prepared and magnetized using magnetic yoke with ac field, and then the leakage magnetic flux density and the phase difference on the specimen surface are investigated. Additionally, specimens imitated wall thinning occurred under reinforcing plates were investigated by MFL with ac excitation.

**Keywords:** wall thinning, magnetic flux leakage (MFL), ac excitation

## 1. 緒言

東日本大震災による福島第一原発の事故から、脱原発が議論されているが、電力供給不足の懸念や電力安定供給および地球温暖化問題を考慮した場合、即時全原発廃止は現実的には困難と考える。一方、新規炉の建設については当面非現実的であり、現在稼動可能な炉を継続使用することになる。よって、高経年化した発電プラントの健全性評価はこれまで以上に確実性を要求される。高経年化問題の一つとして配管減肉がある。特にT字管部などの補強板が用いられている箇所（二重板部分）で発生する減肉を評価する手法は未だ確立されていない。その評価手法として磁束漏洩法(MFL)が候補として挙げられている。MFLは磁気ヨーク等の磁化器を用い、試料を磁化し表面からの漏れ磁束密度から減肉を評価する手法である[1]-[3]。一般的にはMFLでは直流が用いられるが、本研究ではMFLの高度化という点から測定試料の励磁に交流を用いた。直流での測定では漏れ磁束密度のみで評価するが、交流を用いることで振幅と位相差のパラメータが得られ情報量が多くなることでより高精度な評価が期待される。本研究では交流励磁による磁束漏洩法を用いた配管減肉評価の可能性、さらに補強板下の減肉評価の可能性について検討した。

連絡先: 菊池弘昭, 〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5,  
岩手大学, 電話: 019-621-6890, E-mail:  
hkiku@iwate-u.ac.jp

## 2. 実験方法

### 2.1 磁気ヨーク及び試料

Fig. 1 に本研究で用いた磁気ヨークの形状・寸法および測定系を示す。磁気ヨークの材質はケイ素鋼板で、励磁コイルの巻数は150ターンとした。磁気ヨークの中央部には2軸のホールセンサを固定し、試料の励磁方向と平行及び試料表面に垂直方向の磁界を計測する。測定試料は $200 \times 200 \text{ mm}^2$ のSS400鋼の板材で厚みは5mmとした。その中央に減肉を模擬したスリットを設けた。スリットの幅は10mm、スリットの深さは1.2mmとした。また、Fig. 2 に示した模擬減肉を有する直管試験体試料に対しても計測を行った。試験体は炭素鋼STPGであり、管の直径は114.3mm、肉厚は8.6mmである。図中 $a, b, \theta$ の値は $a = 4.4 \text{ mm}, b = 100 \text{ mm}, \theta = 130 \text{ deg.}$ である。このときの計測に用いた磁気ヨーク

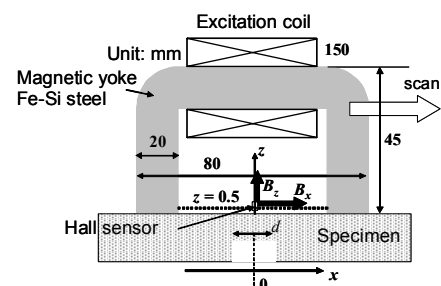


Fig.1 Dimension of magnetic yoke and measurement setup.

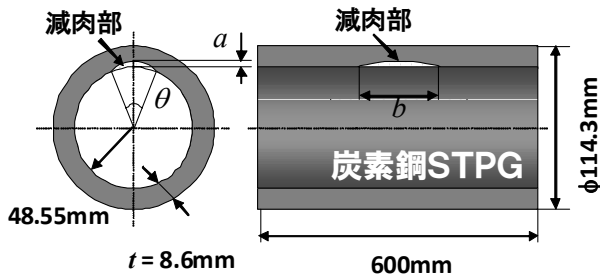


Fig. 2 Dimensions of specimen with wall thinning.

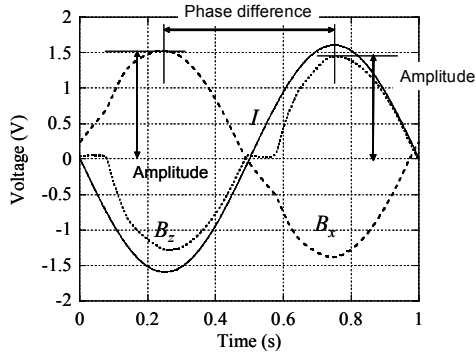
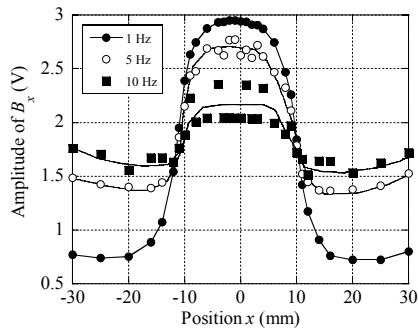
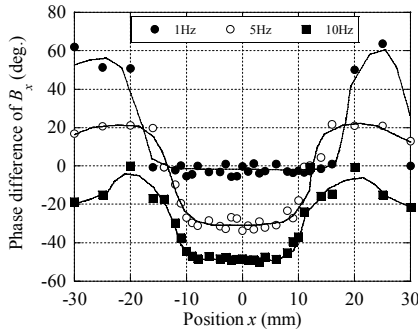


Fig. 3 Definition of amplitude and phase difference on MFL using ac magnetic field..



(a) Amplitude



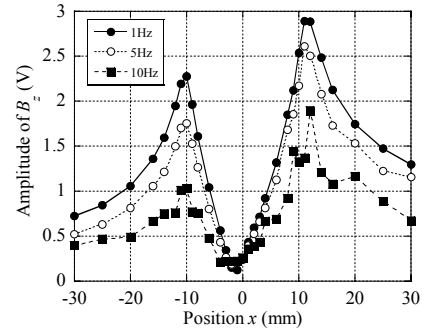
(b) Phase difference

Fig. 4 Distribution of amplitude and phase difference of  $B_x$  for specimen with slit of 10 mm width, 2 mm depth.

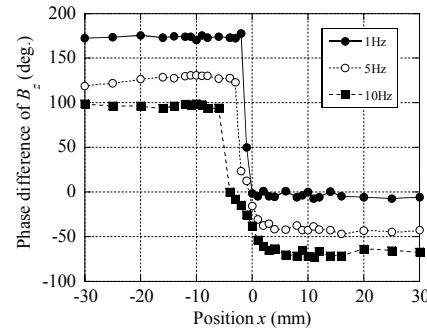
は配管と良好な接触が可能ないようにヨークの足を配管形状に合わせて加工している。

## 2.2 測定方法

ホール素子を伴った磁気ヨークは試料上に固定し、交流電圧を磁気ヨークに巻かれた励磁コイルに印加す



(a) Amplitude



(b) Phase difference

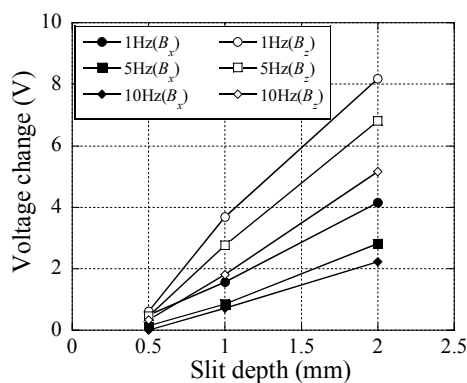
Fig. 5 Distribution of amplitude and phase difference of  $B_z$  for specimen with slit of 10 mm width, 2 mm depth.

ることで試料を励磁し、試料表面の磁界分布を計測する。印加する電流の振幅は、1.6 A とし、励磁周波数は 1 Hz から 10 Hz と変化させた。試料のスリット中央を  $x=0$ 、ヨークの移動方向を  $x$  方向とし、試料表面と垂直方向を  $z$  方向とした。磁界は  $x$  方向成分  $B_x$  および  $z$  方向成分  $B_z$  を計測した。評価では、Fig. 3 に示すようにホールセンサで得られた信号の振幅及び励磁波形と信号波形のピーク値間の位相差を用いた。

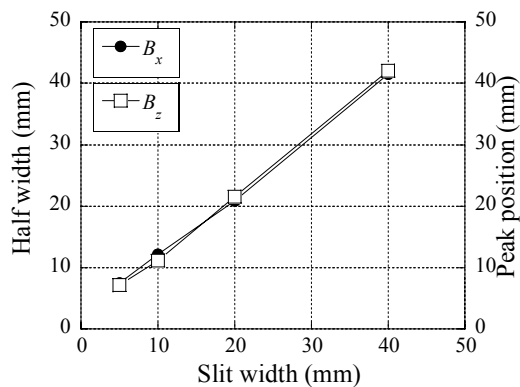
## 3. 実験結果

Fig. 4 は幅 10 mm、深さ 2 mm のスリットを有する試料に対して磁界の水平成分  $B_x$  の振幅及び位相差の位置分布を測定した結果を示している。励磁周波数は 1 Hz から 10 Hz まで変化させている。振幅においてはスリット中央、すなわち、 $x=0$  において強度がピーク値を取り、励磁周波数が増加するにつれてそのピーク値の減少が確認された。また、スリットの端部において磁界強度の減少がみられた。一方、位相成分については、スリットを有する付近で大きな変化が確認された。また、周波数が増加するにつれて、その変化領域は狭くシャープな形状に変化していることがわかる。

Fig. 5 は、幅 10 mm、深さ 2 mm のスリットを有する試料に対して磁界の垂直成分  $B_z$  の振幅及び位相の位置分布を測定した結果を示している。振幅においてはいずれの周波数でも 2 つのピークが確認されており、



(a) parameter vs. depth



(b) parameter vs. width

Fig. 6 Relations between defined parameters and depth/width of slit.

これらの位置はスリット端部に対応している。また、水平成分のときと同様に、周波数の増加に伴って、ピーク値の減少がみられる。一方、位相差に関してはスリット中央位置で急激な減少を示す。ここで、Fig. 4, 5のグラフにおいて評価パラメータを定義する。水平成分においては、出力の最大値と最小値の差を電圧変化と定義し、電圧変化の1/2の値におけるピーク幅を半値幅とする。垂直成分については、出力の最大値と最小値の差を電圧変化とし、ピーク値とピーク値の幅をピーク位置として定義する。

Fig. 6(a)は電圧変化のスリット深さ依存性を示した図である。水平成分、垂直成分ともにそれぞれの周波数において電圧変化はスリット深さに比例しており、スリットの深さ推定が可能であることを示している。Fig. 6(b)は半値幅とピーク位置のスリット幅依存性を示している。半値幅、ピーク位置はともにスリット幅と対応しておりスリットの幅の計測が可能である。また、同様に位相差のプロファイル上でもパラメータを定義し、それらを用いてスリット寸法評価が可能であることは確認している。

続いて直管試験体の計測結果について述べる。Fig. 7(a)は磁束密度の水平成分  $B_x$  の振幅の分布を2次元マッピングした図である。図中の円で示した領域は減肉部を示している。減肉中央部で振幅は増加し、端部で減少している。Fig. 7(b)は磁束密度の水平成分  $B_x$  の位相差の分布を2次元マッピングした図である。減肉範囲で位相差が減少しており、減肉部とよく対応しているのがわかる。

Fig. 8(a)は磁束密度の垂直成分  $B_z$  の振幅の分布を2次元マッピングした図である。減肉の端部位置付近で極値をとる。Fig. 8(b)は磁束密度の垂直成分  $B_z$  の位相差の分布を2次元マッピングした図である。スリット中央位置 ( $x=0$ ) 付近で急激な減少を示している。この

結果から減肉の検知への利用は可能であるが、垂直成分の振幅と同様に減肉形状の推定は困難と考えられる。

以上、交流励磁を用いた実機を模擬した試験体の計測より、振幅と位相差それぞれが減肉の有無により変化を示し交流励磁を用いた磁束漏洩法より減肉を検知可能であることを確認した。磁界垂直成分については振幅と位相差の2次元マップの結果から減肉形状を推定することは困難であるが、減肉の有無の判別には利用可能であると考えられる。一方で、磁界水平成分については振幅および位相差ともに減肉範囲と信号変化範囲が対応していることから、減肉形状の推定が可能である。特に位相差の結果が減肉範囲とよく対応している。

最後に、補強板下減肉評価の可能性の検討として、SS400鋼を2重にしてその下層にスリットを設け計測を行った。スリットの寸法は幅5mm、深さ2mmである。その際、1層目と2層目の間に空隙を設けた場合についても検討した。空隙は100 $\mu\text{m}$ までとした。Fig. 9は2重板試料における磁束密度の水平成分  $B_x$  の振幅及び位相差の位置分布を測定した結果を示している。振幅においては周波数1Hzで空隙の有無に関係なく減肉中央位置( $x=0$ )で最大値をとる。しかし空隙量が増加するに従い信号の変化量が減衰する。空隙量が100 $\mu\text{m}$ に達すると変化量は空隙がない場合と比較して半分ほどに減衰する。この変化量の減衰は空隙があることで上側の板に磁束が集中してしまい、下側のスリット部まで磁束が届いていないためと考えられる。一方で位相差において周波数1Hzでは減肉範囲で信号が最小値をとる。振幅とは対照的に空隙量が増加しても信号の変化量の減衰は非常に小さい。これは発生する渦電流の分布が空隙によらず一定であるため位相差の減衰はなかったためと考察される。

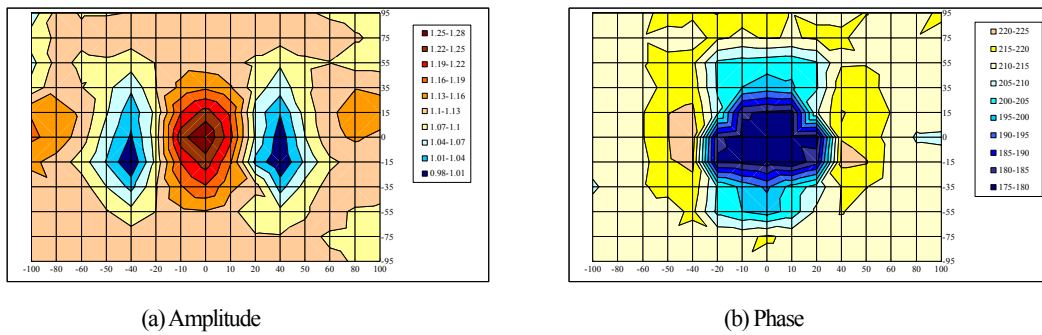


Fig. 7 Two dimensional mapping of  $B_x$  for pipe specimen.

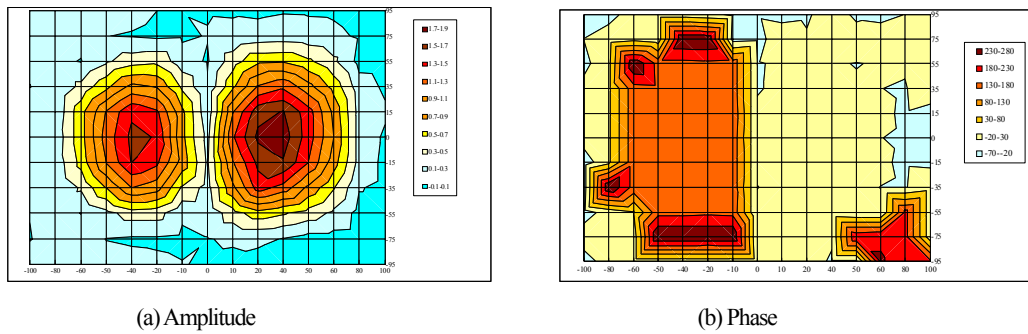


Fig. 8 Two dimensional mapping of  $B_z$  for pipe specimen.

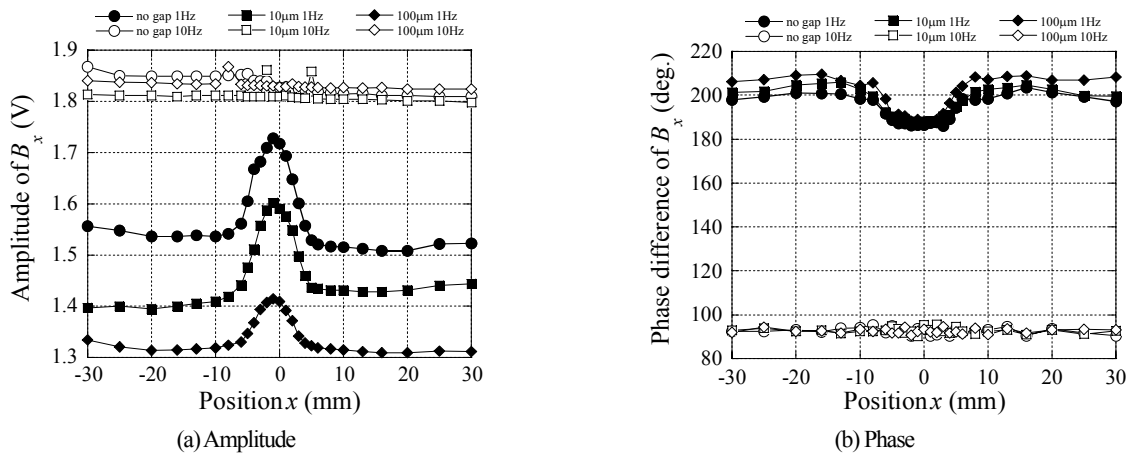


Fig. 9 Distribution of amplitude and phase difference of  $B_x$  for double layered specimen.

謝辞

本研究の一部は経済産業省原子力安全・保安院の「平成24年度高経年化技術評価高度化事業」によるものである。

参考文献

[1] H. Kikuchi, Y. Kurisawa, Y. Kamada, S. Kobayashi, K. Ara, "Feasibility Study of Magnetic Flux Leakage Method for Condition Monitoring of Wall Thinning on Tube", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 33, 2010, pp. 1087- 1094.

[2] H. Kikuchi, K. Sato, I. Shimizu, Y. Kamada and S. Kobayashi, "Feasibility Study of Application of MFL to Monitoring of Wall Thinning under Reinforcing Plates in Nuclear Power Plants", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, 2011, pp. 3963-3966.  
 [3] Y. Zhang, G. Yan, "Detection of Gas Pipe Wall Thickness Based on Electromagnetic Flux Leakage", Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 43, 2007, pp. 123-132.