

# 上置コイルによるリモートフィールド渦電流探傷法の改良

## Improvement of remote field eddy current testing using pancake coils

東北大学流体科学研究所	山本 敏弘	Toshihiro YAMAMOTO	Member
東北大学流体科学研究所	高木 敏行	Toshiyuki TAKAGI	Member
東北大学流体科学研究所	内一 哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member

We are developing remote field eddy current testing (RFECT) method using pancake coils for evaluating local wall thinning of large diameter pipes. This paper shows a study to improve the detectability and sizing capability of this RFECT method. The study was performed by numerical calculations and laboratory experiments. The results show that introducing differential pick-up coils makes detection signals more stable and improves the detectability of our RFECT method.

**Keywords:** Remote field, Eddy current testing, Pancake coil, Local wall thinning

### 1. はじめに

渦電流探傷試験(ECT)では、交流電流を流した励磁コイルを試験対象である導体に近づけたとき、励磁コイルが作る直接磁場により導体に渦電流が誘導され、その渦電流がさらに間接磁場を生じる電磁現象を利用する。導体内に欠陥が存在するときには渦電流の流れが変化し、その結果、間接磁場も変化することから検出コイルを通る磁場の変化により欠陥の検出を行う。通常の ECT では、励磁コイル自身を検出コイルとするか、励磁コイルの近傍に検出コイルを設け、間接磁場が直接磁場に与える影響を検出コイルによって計測する。これに対し、リモートフィールド渦電流探傷試験(RFECT)では、励磁コイルが作る直接磁場の影響が少ない位置まで検出コイルを離して設置する。これにより、検出コイルは渦電流が作る間接磁場からのみ強い影響を受ける。図 1 に一般的な内挿コイルを使った RFECT のコイルと磁場の関係を示す。直接磁場は管内で急激に減衰するが、間接磁場は励磁コイル周辺から管外に出て、検出コイル周辺で管内に戻る。検出コイルは、管壁を 2 回通過する間接磁場を検出するため、管の内外面の欠陥が共に検出信号に影響を与えることになる。また、RFECT では管外を伝わってきた間接磁場を検出するため、表皮効果による制限を受けず、管の材料が磁性体でも非磁性体でも、管の内外面の欠陥を見つけることができる[1]。

RFECT は一般に内挿コイルを使った配管の検査に用いられているが、その一方で、YuShi Sun らにより、上置コイルを使った RFECT による平板の探傷法が発表され[2]、多層の金属板にも適用できる特長を生かし、多層構造を持つ航空機の外壁の検査に用いる研究が行われた[3,4]。上置コイルによる RFECT の原理について詳細な研究は発表されていないが、内挿コイルを使った場合の原理との類似より、図 1 に対して図 2 のようなコイルと磁場の関係が予想される。

著者らは、文献[5]において、このような上置コイルを使った RFECT を原子力発電設備の配管減肉の評価に適用した場合の検査能力に関する基礎検討を行った。基本特性を調べるために、プローブを励磁コイル 1 個と検出コイル 1 個のみの単純な構造としたが、このようなプローブでも検出信号よりある程度の欠陥形状の推定が可能であることを示し、また、リフトオフが大

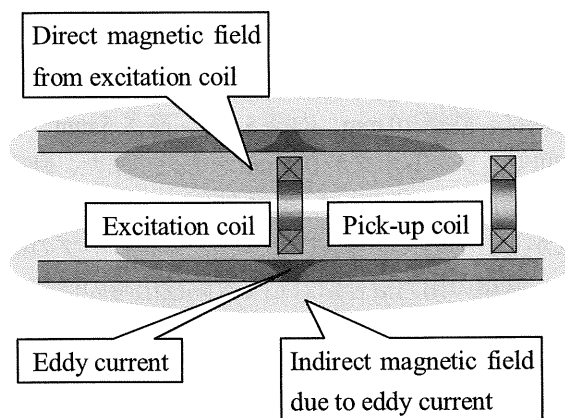


Fig. 1 Magnetic fields with inner coils

連絡先: 山本敏弘 〒980-8577 仙台市青葉区片平  
2-1-1 東北大学流体科学研究所 電話: 022-217-5298  
e-mail: yamamoto@wert.ifs.tohoku.ac.jp

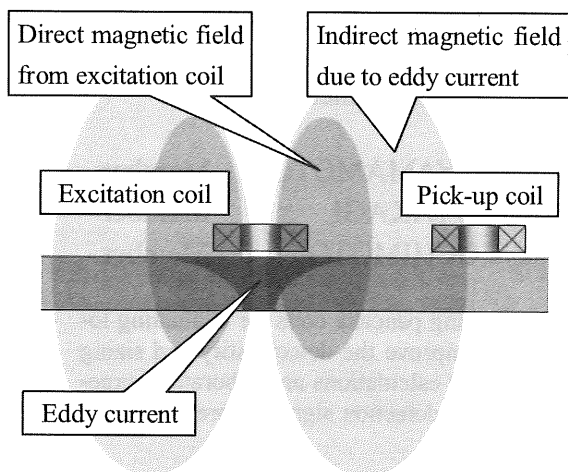


Fig. 2 Magnetic fields with pancake coils

きな場合や、二重の金属板の裏面にある欠陥でも検出が可能であることを確認した。

本研究は、この上置コイルを使った RFECT のプローブ構造を改善し、欠陥の評価能力を向上させることを目標とする。

## 2. プローブ構造の検討

ここでは、プローブ構造について検討した結果を紹介する。

### 2.1 プローブ構造に起因する問題

図3に、上置コイルを利用した RFECT の検査能力を評価するために行った試験方法を示す。裏面に模擬欠陥のある平板上において励磁コイルと検出コイルの組を移動させ、このとき検出コイルから得られる検出信号を調べた。文献[5]では、プローブの基本特性を調べるために、プローブの構造は励磁コイル1個と検出コイル1個のみを持つ単純なものとし、コイル寸法は両者共に、外径10mm、内径5mm、高さ5mm、巻数300回で、リフトオフが0.2mmとした。また、励磁コイルと検出コイルのコイル中心間隔は50mmとした。

しかし、その後の調査により、このプローブの構成では、基準の出力信号に対して欠陥検出時の信号変化が小さく、この変化量として得られる欠陥信号を十分に増幅する前に、計測装置内で元の信号自体が飽和してしまうという問題が確認された。よって、本研究では、プローブ構造を改善し、この問題を解決することにより、プローブの検出感度を上げることを試みた。

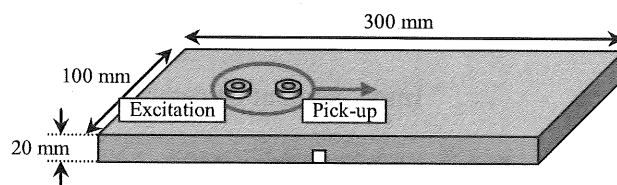


Fig. 3 Inspection procedure



Fig. 4 Pick-up coils of differential probes

### 2.2 差動コイルの導入

この研究では、基準信号に対して欠陥検出時の信号変化を大きくするために、出力信号として2個の検出コイルの差動信号を利用することを考えた。互いに近傍に配置した2個の検出コイルから得られる信号の差を取ることによって欠陥のない位置での信号値は0に近くなり、基準信号に対して欠陥信号を相対的に大きくすることができ、安定した欠陥信号を得ることができる。ここでは、2種類の差動信号の取り方を考え、上下のコイルから得られる信号の差を取る方式(a)と、このような上下の差を取るコイルの組を2組前後に並べ、さらにそれらの信号の差を取る方式(b)について検討する(図4)。

まず、方式(a)を使った場合の欠陥信号の特性を調べるために、図3で示した欠陥検出試験において、検出コイルとして下の段または上の段のコイルのみを使用した場合に得られる信号と、2個のコイルから得られる差動信号を数値計算により求め、これらを比較する。このとき、試験体表面においてプローブの移動方向を長さ、これに垂直な方向を幅、また板厚方向を深さとし、欠陥寸法を長さ10mm、幅100mm、深さ10mmとする。

図5は、プローブ中心位置に対する信号の振幅と位相の関係を表すグラフで、図6は、これらに対応するリサージュ波形である。また、図5、図6ともに、左から、下側コイルの信号、上側コイルの信号、2個のコイルの差動信号となっている。検出コイル以外のプローブ構造については、2.1節に示す通りで、検出コイルについては、外径5mm、内径2.5mm、高さ5mm、巻数300回の2個のコイルを上下に重ねている。上側

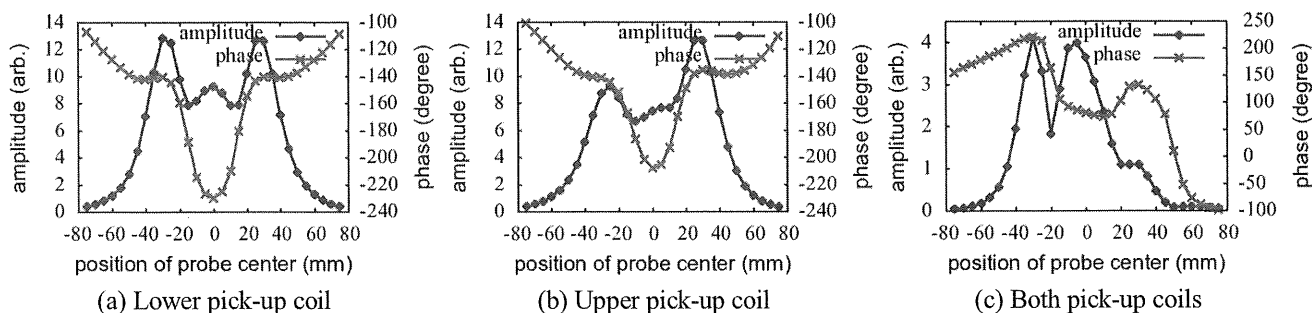


Fig. 5 Amplitude and phase of detection signals (one-stage)

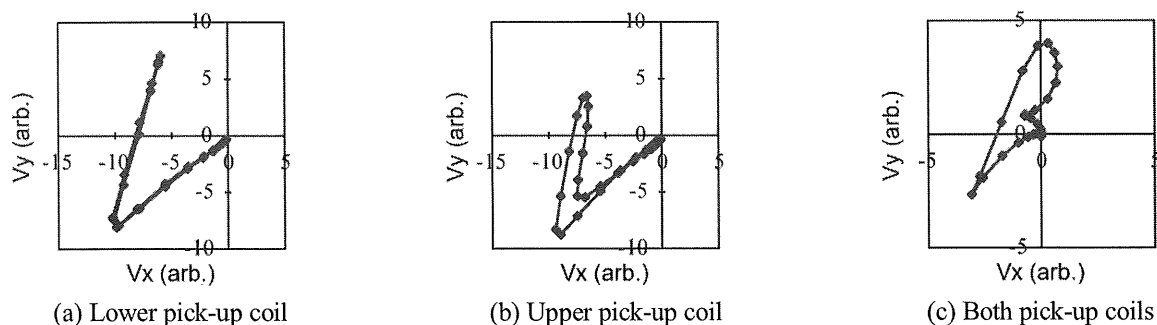


Fig. 6 Lissajous curves of detection signals (one-stage)

コイルは、試験体表面に対してリフトオフが 5.2 mm であることになる。励磁周波数は 1 kHz とする。

図 3 において、プローブを左から右に移動させたとき、最初に検出コイルが欠陥直上を通り、その後、励磁コイルが欠陥直上を通る。図 5 に示される振幅値の変化では、それぞれにおいて、左から検出側、プローブ中心、励磁側の順で反応があらわれている。下側コイルの信号(a)に対して、上側コイルの信号(b)は、励磁側では大きな差がないのに対し、検出側と中央で信号変化が小さくなっている。よって、これらの差である差動信号(c)では、検出側と中央で相対的に大きな変化があらわれ、励磁側の反応は小さい。

図 7 は、このような 2 段のコイルを図 4 (b) のように前後に 2 組並べ、さらにそれらの差動信号をとった方式(b)を使った場合の図 3 に示した試験の結果である。このとき、それぞれの 2 段の検出コイルは前述の図 4 (a) の場合と同様にし、2 組を隙間なく並べ、この 2 組の中心と励磁コイルの中心の距離が 50 mm になるようにする。励磁コイルと検出コイルの距離が大きくなると、検出信号は全体的に弱くなり、また、図 3 において検出コイルの位置が右にずれることにより欠陥に対する検出側の反応がより早い位置で出るようになる。結果として、図 5 (c)、図 6 (c) と比べ、検出側の反応が

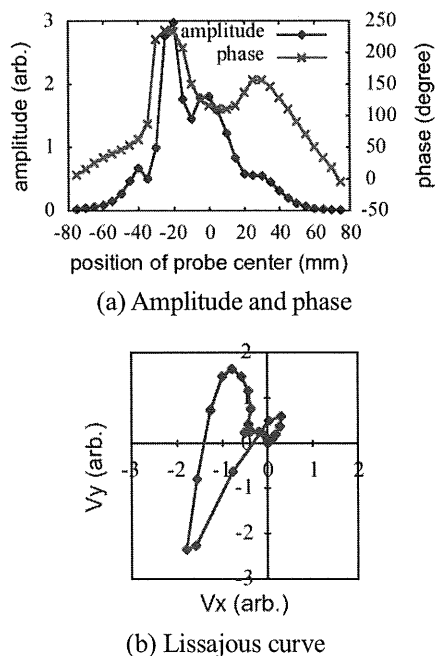


Fig. 7 Detection signals (two-stage)

さらに強調される信号が得られた。

図 8 と図 9 は、方式(a)について、図 3 に示した試験で欠陥の長さや深さのうち一方をある値に固定し、残った方を変化させ、欠陥の長さや深さに対する欠陥信号の依存性を数値計算により調べた結果である。また、

図 10 と図 11 は、方式(b)について同じ計算を行ったものである。方式(a)、方式(b)のどちらについても、欠陥深さが大きくなると、振幅と位相の変化が大きくなり、欠陥長さが大きくなると、振幅が大きくなりつつ、振

幅と位相の変化位置が外に広がることを確認できる。よって、これらの欠陥形状と欠陥信号の相関関係より、欠陥形状の推定が可能であることが分かる。

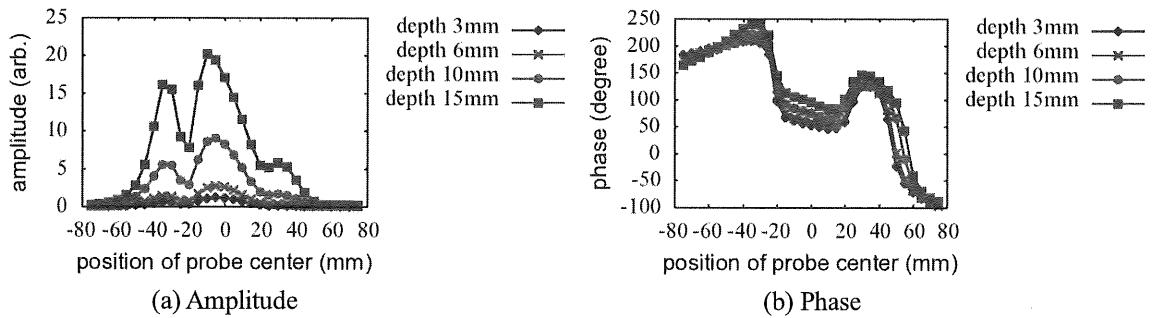


Fig. 8 Detection signals when the defect length is 20 mm (one-stage)

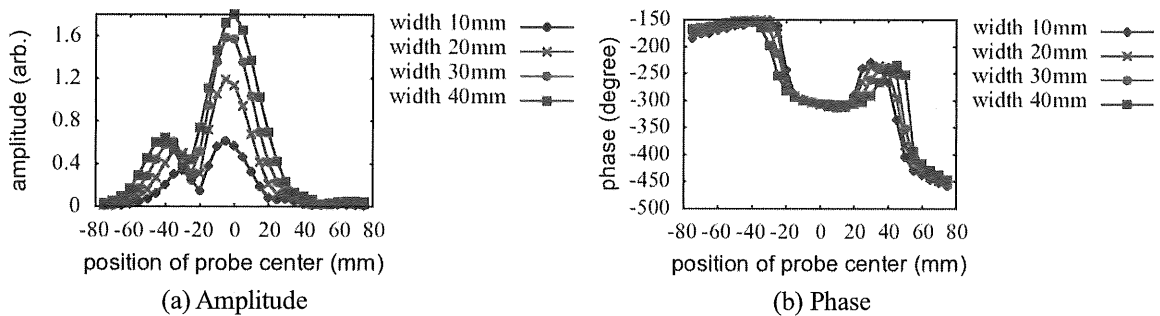


Fig. 9 Detection signals when the defect depth is 3 mm (one-stage)

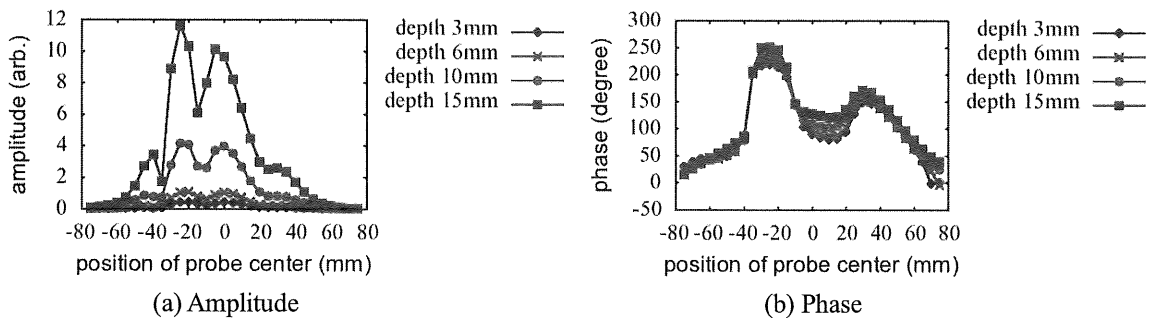


Fig. 10 Detection signals when the defect width is 20 mm (two-stage)

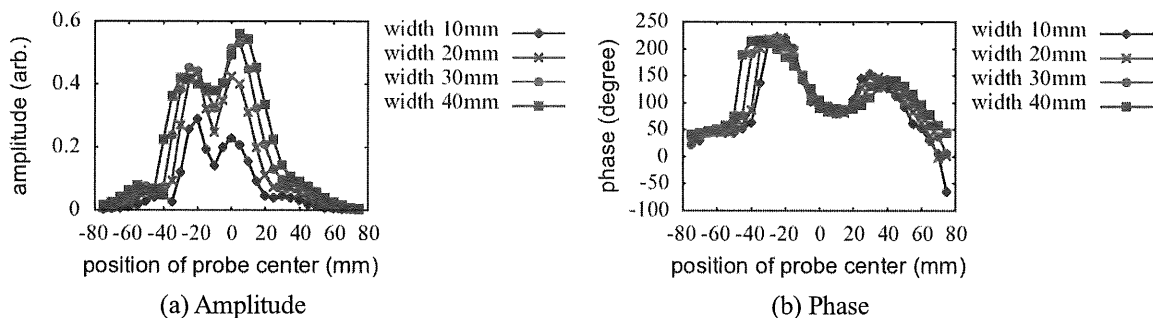


Fig. 11 Detection signals when the defect depth is 3 mm (two-stage)

### 3. 実験による検証

ここでは、2.2 節で提案したプローブの性能を実際の装置を使って検証する。

#### 3.1 プローブ構造

測定では、探傷装置にアスワン電子（株）製の ASSORT-RFT を使用し、プローブ構造をこれに合わせて調整する。励磁コイルは外径 10.0 mm、内径 6.0 mm、高さ 10.0 mm、1548 回巻とし、検出コイルは検出コイル同士の間隔を狭めるために矩形コイルとし、内周については長さ 2.6 mm、幅 6.0 mm、外周については長さ 6.0 mm、幅 10.0 mm とし、高さ 5 mm、1836 回巻とする。このような 4 個の検出コイルを間隔 1.0 mm で 2 個ずつ重ね、2 組を長さ方向に隙間なく並べる。

2 段の検出コイルは、巻き方向を逆にして繋げることにより 2 つのコイルに誘導される電圧の差を取っており、また、2 つのコイルの接続点で接地している (図 12)。そして、2 組のこのような 2 段コイルの出力の差を差動アンプにより得る。

励磁コイルの中心と検出コイル群の中心の距離を 50 mm としており、検出信号は、励磁コイルに近い方の 2 段コイルのみの信号と 2 組の 2 段コイルの差動信号の 2 種類を計測する。

#### 3.2 検出能力の評価

3.1 節に記したプローブを用いて図 3 と同様の試験を行った。このとき、欠陥寸法を長さ 10 mm、深さ 10 mm とした。単体の 2 段コイルからは、図 13 (a) に示すように図 6 (c) とよく似たリサージュ波形が得られたが、2 組の 2 段コイルの差動信号は、図 13 (b) のようになり図 7 (b) とは少し異なりプローブ中心での反応が強調された波形となった。これは、検出コイルを矩形コイルにした影響と考えられる。

また、長さ 10 mm × 深さ 5 mm、長さ 10 mm × 深さ 10 mm、長さ 20 mm × 深さ 10 mm の 3 種類の異なる大きさの模擬欠陥に対する検出信号を比較した。図 14 は単体の 2 段コイルの出力で、図 15 は 2 組の 2 段コイルの差動信号である。これにより、2.2 節の計算結果と同様な欠陥の大きさに対する信号変化が確認できる。ただし、検出信号の振幅が小さい領域において、位相の値が不安定である。

図 3 に示した試験において、全幅の矩形欠陥の代わ

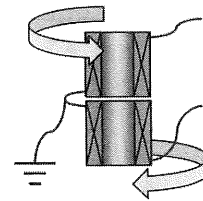


Fig. 12 Structure of differential coils

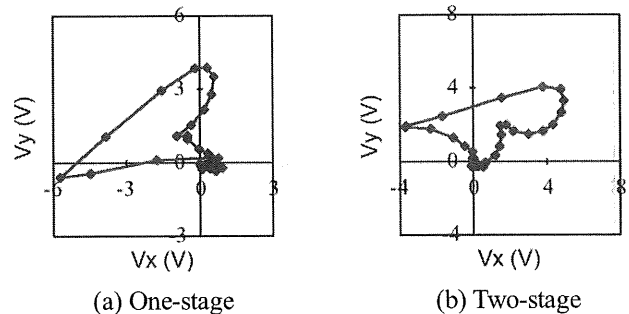


Fig. 13 Detection signals from experiments

りに、試験体の裏面中央に円錐欠陥を入れた場合の検出信号についても測定を行った。円錐欠陥は、直径 20.0 mm、高さ 7.2 mm のものと直径 10.0 mm、高さ 3.6 mm のものの 2 種類を使用した。図 16 は、これらのうち、直径 20.0 mm の円錐欠陥から得られた検出信号である。どちらの信号でも振幅と位相で欠陥に対する反応が出ていることが確認できる。また、振幅が小さい領域では、2 組の 2 段コイルの差動信号の方が、信号が安定している。これに対して、直径 10.0 mm の円錐欠陥に対しては、どちらの信号でも有意な欠陥指示が得られなかった。

### 5. まとめ

本研究では、上置コイルを利用した RFECT において、検出コイルに差動式コイルを利用することにより、その欠陥評価能力を向上させることを考え、ここで提案した差動式の検出コイルにより、欠陥形状の差に対する検出信号の変化の特徴を以前のものから大きく変えずに、より信号を安定させることができた。ここでは、紙数の関係上、省略したが、この RFECT では、10 mm 程度のリフトオフがある場合や多重の金属板に対しても同様の欠陥検出が可能であることが確認されている。しかしながら、今回の結果からも、欠陥検出の解像度に関しては、今後、改善する必要があり、実際の応用に適用するには、解像度向上のためのプローブ構造の改良が必要である。

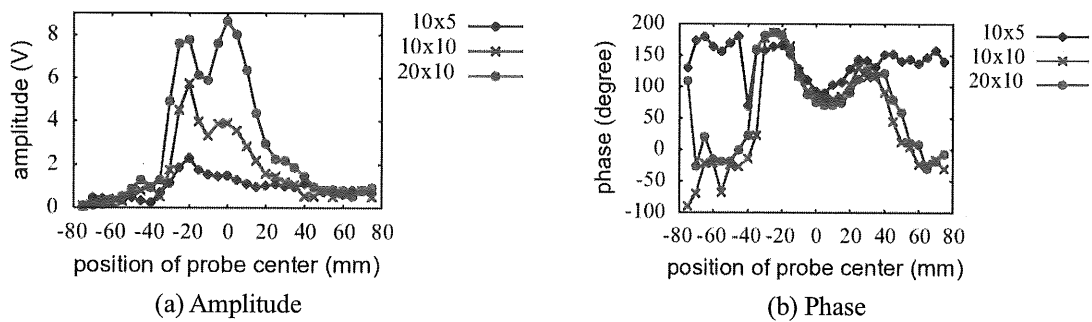


Fig. 14 Comparison of detection signals from experiments (one-stage)

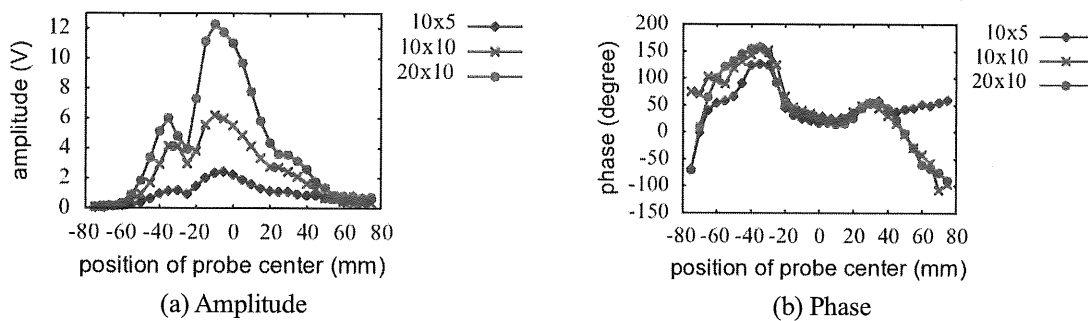


Fig. 15 Comparison of detection signals from experiments (two-stage)

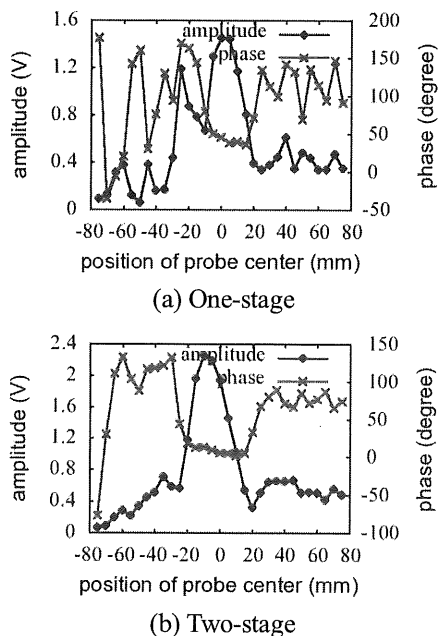


Fig. 16 Detection signals for a cone-shaped defect

## 謝辞

本研究は、原子力安全・保安院の高経年化対策強化基盤整備事業において「経年劣化事象の解明等」の一部として行われた。

## 参考文献

- [1] 日本非破壊検査協会, 非破壊検査技術シリーズ 渦流探傷試験 III, 日本非破壊検査協会, 2003
- [2] Y.S. Sun, S. Udpa, W. Lord and D. Cooley, A remote field eddy current NDT probe for the inspection of metallic plates, *Materials Evaluation*, Vol. 54, No. 4, pp. 510-512, 1996
- [3] Y.S. Sun, W. Lord, L. Udpa, S. Udpa, S.K. Lua and K.H. Ng, Expanding the remote field eddy current techniques to thick-walled aluminum plate inspection, T. Takagi et al. (Eds.), *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, pp. 145-152, IOS Press, 1997
- [4] Y.S. Sun, T. Ouang and S. Udpa, Remote field eddy current testing: one of the potential solutions for detecting deeply embedded discontinuities in thick and multiplayer metallic structures, *Materials Evaluation*, Vol. 59, No. 5, pp. 632-637, 2000
- [5] 山本敏弘, 高木敏行, 内一哲哉, 平板用リモートフィールド渦電流探傷法による局部減肉の評価, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol. 75, No. 751, pp. 431-433, 2009