

## 厚板用渦電流探傷プローブによる溶接部の探傷

— Weld Inspection Using Eddy Current Testing Probe for Thick-walled Plates —

東北大学 内一 哲哉 Tetsuya UCHIMOTO Member  
東北大学 佐藤 一彦 Kazuhiko SATO \*

東北大学 高木 敏行 Toshiyuki TAKAGI Member  
東北大学 黄 皓宇 Haoyu HUANG Member

The authors have proposed a novel eddy current testing (ECT) probe for thick-walled plates. A basic concept of the probe is that a couple of differential pick-up coils is arranged between two exciting coils carrying currents opposite to each other. This arrangement allows strong eddy currents opposite to scan surfaces and the weak decay of eddy currents in the thickness direction. In this study, the present probe was applied to ECT of welding area. For the purpose, experiments were carried out using INCONEL718 specimen with thickness of 7.0mm and SUS304 specimen with thickness of 8.0mm. Both specimens have welded parts with beads. The present probe successfully detected the defect although a conventional pancake probe did not, which supports for the robustness of the probe against noises of welded parts.

**KeyWords** : Eddy current testing, Probe, Thick-walled plates, Welding area, Beads

### 1. 緒言

渦電流探傷試験は、表面感度が高い、高速かつ非接触な探傷が可能、センサの構造が簡単で設計が容易、という特長を持つ反面、渦電流の表皮効果により厚肉材の探傷に向かない、表面における材質や形状変化などの影響を受けやすい、といった短所を持合せる。従ってこれまで、表面探傷もしくは薄板の探傷に限定されて用いられて来た。

渦電流探傷試験の適用例の1つに加圧水型軽水炉発電プラントの蒸気発生器伝熱管の供用中検査が挙げられる。この蒸気発生器伝熱管への適用を通して、渦電流探傷試験はここ十年間で数値解析技術<sup>(1)~(4)</sup>や新型プローブの開発<sup>(5)~(8)</sup>において著しい進展を遂げている。現在板厚1.27mmの伝熱管の探傷では、外面10%

き裂を検出し、逆問題解析によりき裂形状を再構築することが可能となっている<sup>(8)</sup>。今後、これらの技術を他の検査対象に応用することが期待される。

原子力プラントなどの構造物では、欠陥許容基準に基づいて非破壊検査を行うのが望ましいという事情があり、高い欠陥検出能力と欠陥の形状評価が必要とされる。他方これらの構造物には、蒸気発生器の伝熱管のような薄板ではなく、厚肉材で構成されている部分が数多く存在する。特にオーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金溶接部など、従来用いられて来た超音波探傷試験法では探傷困難なき裂もあり、電磁応用非破壊検査の適用も検討されている<sup>(9)(10)</sup>。

以上を背景に、著者らは厚板用の渦電流探傷プローブを開発し、7mm厚のインコネル平板において裏側0.5mmき裂の定量的評価が可能であることを示している<sup>(11)</sup>。

本研究では、この厚板用渦電流探傷プローブを用いて、超音波探傷が難しいとされるオーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金溶接部等の探傷を試みる。以下、第2章では厚板用プローブの概要について、第3章では実験体系について示す。第4章では、得られた実験結果について議論し、第5章で結言を述べる。

◆連絡先：内一 哲哉

〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1  
東北大学流体科学研究所  
e-mail : uchimoto@ifstohoku.ac.jp

\* 現在、株式会社 日立製作所勤務

## 2. 厚板用渦電流探傷プローブの概要

厚板に渦電流探傷試験を適用しようとする際に問題となるのは渦電流の表皮効果である。具体的には次の2点によって裏面き裂の探傷が難しくなる。すなわち、1) 表皮効果による渦電流の板厚方向の減衰により、裏面き裂を検出するために必要な渦電流が得難いこと、2) 表皮効果の影響により、表面の渦電流が裏面の渦電流に比べ著しく大きくなり、裏面のき裂信号が表面形状あるいは材質の変化によるノイズの影響を受ける可能性があること、の2点である。

上記の問題を解決するために、著者らは図-1に示す厚板用渦電流探傷プローブを開発した<sup>(11)</sup>。本プローブは、強力な渦電流を裏面に発生させるため、互いに逆向きの電流が流れる2個の励磁コイルからなる。この構成により、励磁コイル間の領域において、それぞれのコイルによる渦電流が重ね合わされ、大きな渦電流を得ることが可能となる。また、励磁コイルの巨大化やそれに伴うリフトオフの増大を軽減できるという利点もある。裏面のき裂信号が表面のノイズに強く影響されないようにするため、渦電流を平坦に浸透させることのできる励磁コイルの配置を最適化している。両励磁コイルの間には、差動式（自己比較方式）の検出コイルが配置される。

励磁コイルの形状や配置を決定するために、変形磁気ベクトルポテンシャル法と辺要素有限要素法による3次元渦電流解析<sup>(12)(13)</sup>を用いた。具体的には、7mmのインコネル平板を解析対象とし、下記の流れにより最適化した。

- (1) 励磁コイルの裏側の参照点における渦電流強度を評価関数として、励磁コイルの巻幅、高さ、内径を決定
- (2) (1)にて決定した励磁コイルを2つ配置し、その中間点にて裏面の渦電流と表面の渦電流の比が大きくなるよう励磁コイル間の距離を決定

以上の過程の詳細については文献<sup>(11)</sup>を参照されたい。決定されたプローブの詳細を図-2に示す。巻数については、励磁コイル、検出コイルそれぞれ1995ターン、1300ターンである。

## 3. 実験の詳細

### 3-1) 渦電流探傷システム

本研究で用いた渦電流探傷システムの構成を図-3に示す。ここでは、試験片を載せた2次元電動ステージをGPIBボードを介してパソコンで制御する。プローブは定位置に固定する。検出コイルの電圧は探傷器で処理され、複素電圧の形でX, Y成分 ( $V_x, V_y$ ) に分けてA/D変換ボードによりパソコンに取り込まれる。探傷器はアスワン電子製のASSORT-PC2である。離散的なデータを取るためステージ制御用パソコンでステージを移動しながら、探傷信号や測定点の座標といったデータを同時に取り込む。

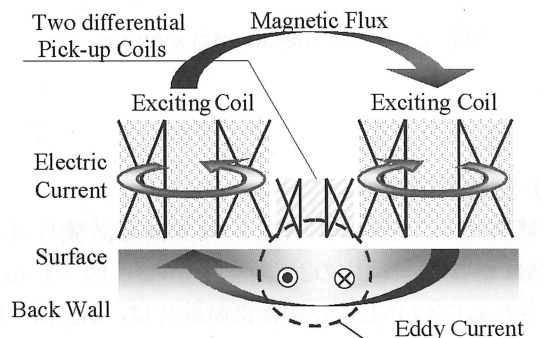


図-1 Schematic drawing of eddy current probe for thick-walled plates

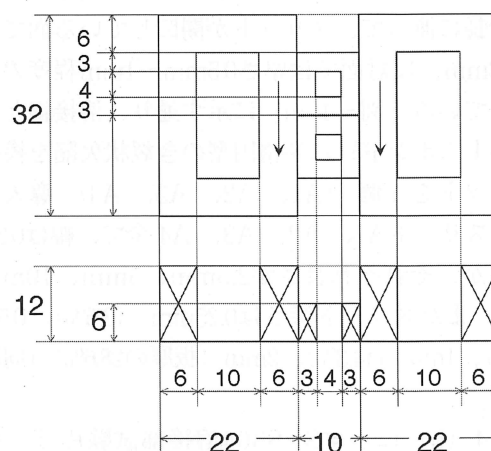


図-2 Dimensions of coils constituting the present probe

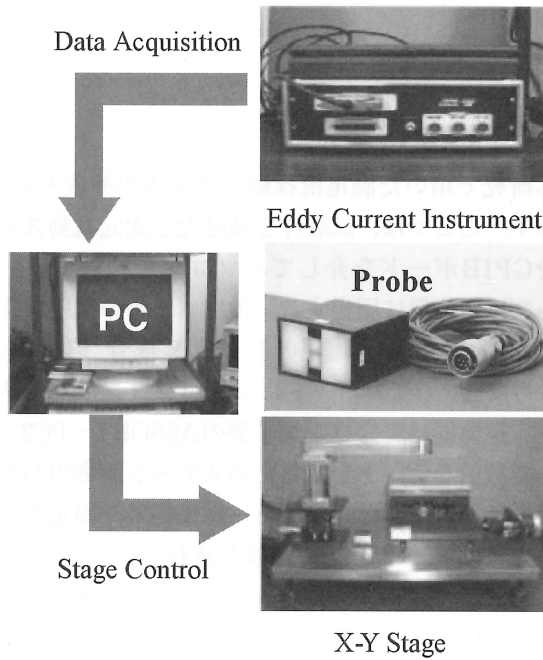


図-3 ECT experimental system.

### 3-2) 試験片の詳細

本研究では、INCONEL718溶接部試験片及びSUS304溶接部試験片の2種類を用いた。図-4(a)に示されるINCONEL718溶接部試験片は、純国産のH-II AロケットのLE7Aエンジン配管を模擬したものであり、板厚7mmの溶接部試験片である。材質はINCONEL718(導電 $\sigma=1.0 \times 10^6$  [S/m]、比透磁率1.001)である。試験片中央に長手方向の溶接線が存在するが、両面の余盛が除去されていない。溶接法はTIG溶接である。試験片の長手方向に溶接線が存在しその全長に渡って、スリットが開口している面では厚さ1~2mm、反対面では厚さ0.5mm~1mm程度の余盛が残っている。図-4(a)に示す通り、溶接線と母材の境界上(ボンド)に半楕円型のき裂状欠陥を模擬したスリットを4個(A1、A2、A3、A4)導入してある。スリットA1、A2、A3、A4全て、幅は0.2mmであるが、それぞれ長さが2.5mm、5mm、10mm、20mm、またスリット深さは0.25mm(3.6%)、0.5mm(7.1%)、1mm(14.3%)、2mm(板厚の28.6%)(同順)である。

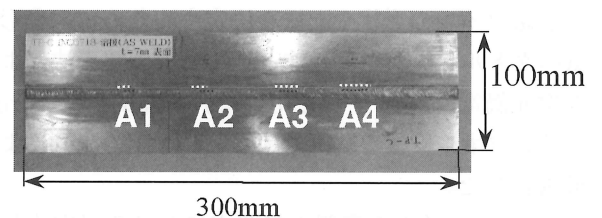
図-4(b)に示すSUS304溶接部試験片は、板厚8mmの厚肉溶接部試験片である。材質はSUS304(導電率 $\sigma=1.54 \times 10^6$  [S/m]、比透磁率1.26)である。同

様に試験片中央に溶接線が存在するが、スリットが開口している面では余盛が除去され、さらに平板加工されている。一方、反対面は厚さ0.5mm程度の余盛が溶接線の全長に渡って残っている。尚、この溶接線はINCONEL718試験片とは異なり磁性を帯びているため、探傷の大きな障害となることが予想される。図-4(b)に示すとおり、B1及びB2の2つのスリットが導入されている。いずれも矩形スリットであり、長さ10mm、幅0.2mmである。スリットB1は、ボンド上に導入されており、深さは、4mm(50%)である。スリットB2は、溶接線を垂直に横切るように存在し、深さは1.6mm(20%)である。

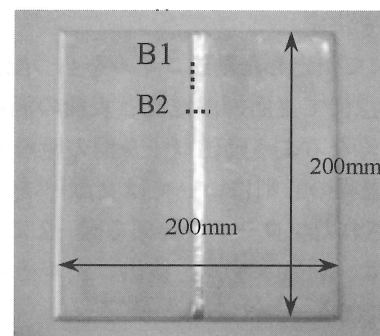
## 4. 実験結果

### 4-1) 絶対値型プローブによる溶接部の探傷

厚板用プローブの実験に先立ち比較のため、絶対値型コイルプローブ(自己誘導形単一方式)を用いて実験を行った。用いたコイルの寸法は内径1.0mm巻幅0.5mm高さ0.5mmである。板厚1.25mmのINCONEL600板におけるこの絶対値型コイルプローブのき裂検出能力は、外面き裂20%である(試験周波数:200kHz、位相:0degree)。この予備実験では、試験周波数として5kHz及び200kHzの2周波数を採用した。



(a) INCONEL718 Specimen



(b) SUS304 Specimen

図-4 Specimens used for the experiment

また、試験対象は裏面スリットのものに限定した。尚、簡単のため以下の信号の2次元表示において、母材をB (Base Metal)、非磁性非仕上げの溶接部をWE (Weld Zone with Excess Metal)、磁性非仕上げの溶接部をWEM (Weld Zone with Excess Metal and Magnetism) と略記する。

INCONEL718試験片の探傷では、スリットA3 (深さ1mm) を試験対象とした。リフトオフは、余盛を考慮して1.0mmに設定した。尚、論文中でのリフトオフは溶接部ではなく、母材からプローブ底面までの高さで定義する。一例として200kHzにおける実験結果を図-5 (a) に示す。図中には溶接線とスリットの位置を併せて示しているが、スリットは検出されていないことがわかる。周波数5kHzでの実験も行ったがスリットを確認できなかった。よって、この絶対値型コイルプローブは厚肉材の探傷に不向きであると言える。

SUS304試験片の探傷では、スリットB1 (深さ4mm) を試験対象とした。リフトオフは余盛を考慮して1.0mmに設定した。試験周波数が200kHzの場合の実験結果を図-5 (b) に示すがスリットを検出できていないことがわかる。5kHzの場合も同様であり、SUS304試験片でもスリットが検出できないことを確認した。また、SUS304試験片の溶接線上では、探傷信号に材質の変化によるノイズが介入してくることが分かる。

#### 4-2) 厚板用プローブによる溶接部の探傷

厚板用プローブによる探傷の様子を図-6に、INCONEL718溶接試験片の表面スリットおよび裏面スリットの探傷結果を図-7示す。試験周波数とリフトオフはそれぞれ、表面スリットでは1kHz、2.0mm、裏面スリットでは5kHz、1.0mmである。同図はスリットA3 (深さ1mm) に関して表側と裏側から2次元走査して得た $V_y$  信号の2次元表示である。図において、1個のスリットに対し4個のピークが存在するが、スリットを挟んでX方向に現れるピークの組は検出コイルの差動特性によるものである。一方、Y方向に現れるピークの組は2個の励磁コイルが反対称の配置となっているためである。裏面スリットの探傷に際し、溶接部の余盛のノイズがき裂信号の検出に大きな影響を与えるため、 $V_x$ 成分に余盛のノイズが顕著に表れるよう位相調整を行った。この結果、図-7の通

り、スリットA3については $V_y$ 成分でき裂信号を確認することができた。スリットA4 (深さ2mm) では、表側裏側からも共に検出はできたが、スリットA2 (深さ0.5mm)、A1 (深さ0.25mm) については表面裏面共に検出はできなかった。本試験片におけるき裂検出能力は、表面き裂については深さ1.0mm、裏面き裂についても1.0mmであると言える。

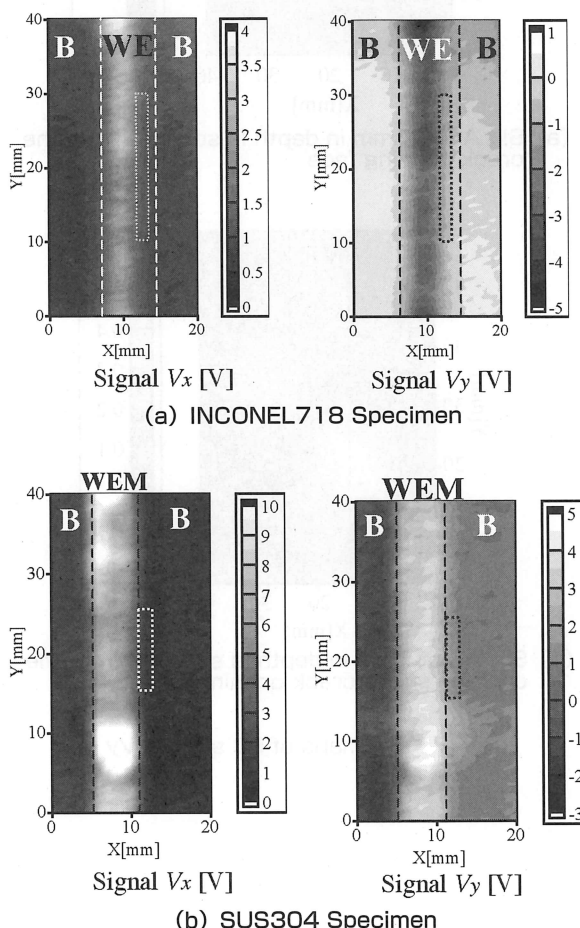


図-5 2-D maps of EC signals  $V_x$  and  $V_y$  at 200 kHz

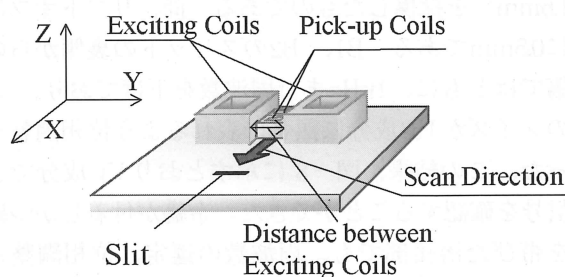
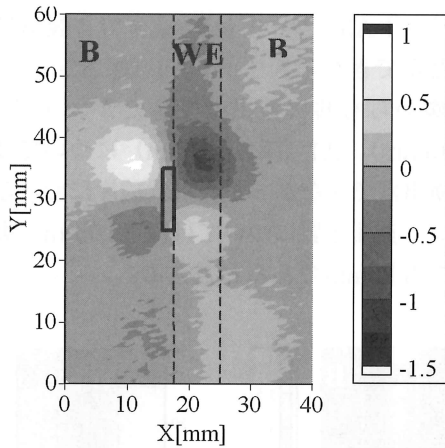
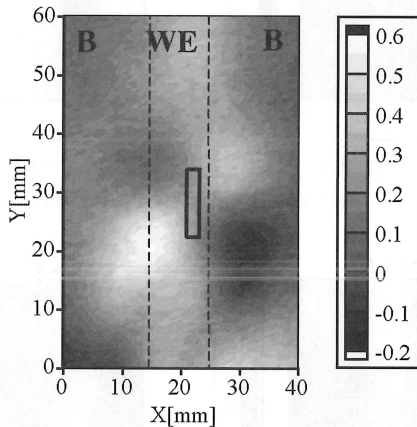


図-6 Overview of 2-D scans with the probe for thick-walled plates



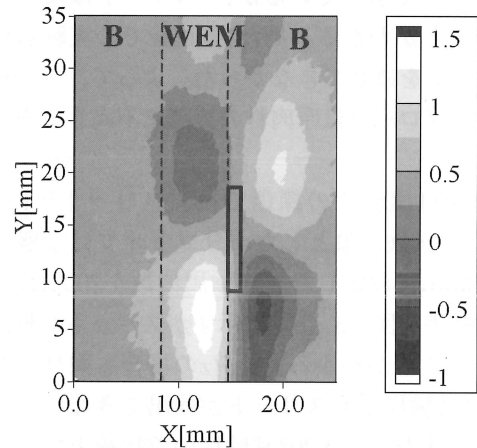
(a) Slit A3 of 1mm in depth is scanned from the crack opening face



(b) Slit A3 of 1mm in depth is scanned from the opposite side of crack opening face

## 5. 結言

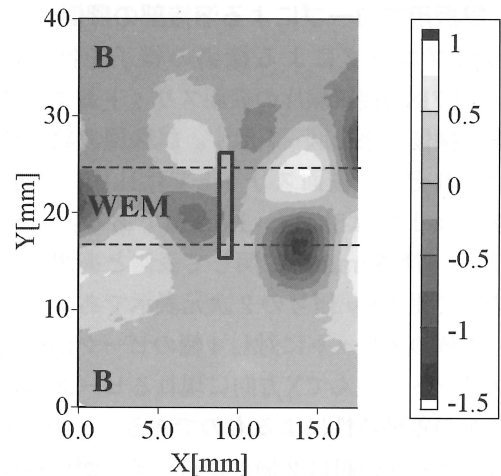
本論文では、著者らによって開発された厚板用渦電流探傷プローブを用いて、溶接部の探傷を試みた。余盛付の7mmINCONEL718厚板溶接部試験片、8mm SUS304厚板溶接部試験片を用いた実験を行った結果、位相調整などの基本的な操作により、それぞれ深さ1.0 mm、1.6 mmの裏面き裂が検出できることを確認した。従って、本プローブは、溶接余盛による探傷面のノイズや、溶接部における材質変化によるノイズ



(a) Slit B1 of 4mm in depth is scanned from the opposite side of the crack opening face

図-7 2-D maps of EC signals  $V_y$

厚板用プローブによるSUS304溶接試験片の裏面スリットの実験結果を図-8に示す。図-8(a)、図8(b)はそれぞれスリットB1(深さ4.0mm)、B2(深さ1.6mm)を探傷したものである。尚、リフトオフは共に0.5mmである。B1、B2のスリットの裏側からの探傷ではともに、1kHzまで周波数を下げており、余盛のノイズが $V_x$ 成分に顕著に表れるよう位相調整を行った。この結果、図-8に示すとおり $V_y$ 成分でき裂信号を確認することができた。余盛が付着しかつ磁性を帯びた溶接部でも、周波数の選定、位相調整といった渦電流探傷の基本的技術により、本プローブでき裂を検出することができると言える。



(a) Slit B2 of 1.6mm in depth is scanned from the opposite side of the crack opening face

図-8 2-D maps of EC signals  $V_y$

の影響を受けにくく、溶接部の探傷に適用できるとの結論を得た。

本研究により、溶接部という供用中検査の重要な検査部位への渦電流探傷法の適用可能性が検証されたといえてよい。今後、渦電流探傷法及び超音波探傷法を組合せた検査を前提にしたプラント設備の維持規格の議論がなされることが望まれる。

## 謝 辞

本研究は文部科学省科学研究費「特別推進研究(COE) (2)」(COE) (11CE2003) の成果の一部である。試験片は東北大学破壊制御システム研究施設及び株式会社普遍学国際研究所より提供して頂いた。また、プローブ製作は東北大学流体科学研究所佐藤武志技官の支援に基づくものである。

## 参考文献

1. 福富広幸、高木敏行、谷順二、渦電流探傷試験におけるコイルとき裂のメッシュレス有限要素解析法、日本機械学会論文集、第64巻、A編 (1998)、1541-1547頁
2. 福富広幸、高木敏行、谷順二、小島史男、辺要素有限要素法とTrust Region法を用いた渦流探傷試験におけるき裂深さの推定法、非破壊検査、第47巻、(1998)、754-762頁
3. H. Huang and T. Takagi, ECT Signals for Round-robin Test with Differential TR Probe and their Inverse Analysis, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V), (eds., J. Pavo, G. Vertesy, T. Takagi and S.S. Udpa), IOS Press, 2001, pp.218-225.
4. H. Fukutomi, T. Takagi, J. Tani and M. Hashimoto, Numerical Evaluation of ECT Impedance Signal due to Minute Cracks, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.33 (1997), pp.2123-2126.
5. T. Chady, M. Enokizono, T. Todaka, Y. Tsuchida and R. Sikora, Flaws Detection and Characterization Using the Multi-frequency Excitation and Spectrogram ECT Method, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IV), (eds., S.S. Udpa, T. Takagi, J. Pavo, and R. Albanese), IOS Press, 2000, pp.87-94.
6. H. Huang and T. Takagi, Shape Reconstruction of Natural Cracks with a Differential TR ECT probe, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.20A, (2001), pp.764-771.
7. M. Hashimoto and D. Kosaka, Development of Rotation ECT Probe Detecting Axial and Circumferential Cracks using Uniform Eddy Current Excitation Coil, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V), (eds., J. Pavo, G. Vertesy, T. Takagi and S.S. Udpa), IOS Press, 2001, pp.242-247.
8. 櫻井望、黄皓宇、高木敏行、内一哲哉、数値シミュレーション支援によるアレイマルチコイル型渦電流探傷プローブの開発、日本機械学会論文集 (A編)、掲載予定
9. H.Hoshikawa and K.Koyama, Non-Destructive Testing of Weld Zone with a Uniform Eddy Current Probe, INSIGHT, Vol.40, (1998), pp.269-271.
10. D.Bouden and L.Lemahieu, Use of Blind Deconvolution to Restore Eddy Current Data from Non-destructive Testing of Defects in Welds, Review progress of Quantitative Non-destructive Evaluation, Vol.18, (1998), pp.743-750.
11. 佐藤一彦、黄皓宇、内一哲哉、高木敏行、厚肉材用渦電流探傷プローブの開発とき裂の定量的評価、日本機械学会論文集 (A編)、掲載予定
12. A. Kameari, Solution of Asymmetric Conductor with a Hole by FEM Using Edge-element, COMPEL, Vol.9, (1990), pp.230-232.
13. A. Kameari, Three Dimensional Eddy Current Calculation Using Edge Element for Magnetic Vector Potential, Applied Electromagnetics in Materials, (ed., K. Miya), Pergamon Press, 1988, pp.225-236.