

渦電流探傷試験における光学系を用いたリフトオフ計測手法の検討

Methodology of Lift-off Measurement Using Optical System in Eddy Current Testing

東北大学大学院 松川 淳 Jun MATSUKAWA
 東北大学流体研 遠藤 久 Hisashi ENDO Member
 東北大学流体研 阿部 利彦 Toshihiko ABE
 東北大学流体研 内一 哲哉 Tetsuya UCHIMOTO Member
 東北大学流体研 高木 敏行 Toshiyuki TAKAGI Member

This paper proposes a methodology of lift-off measurement using optical system embedded in Eddy Current Testing (ECT) system. Firstly, the influence of lift-off on ECT signal was evaluated. Secondly, both ECT signal with lift-off shifting and the lift-off signal were acquired by means of an ECT probe with an optical displacement sensor. Then two cases of the crack shapes reconstructions were carried out using inverse analysis code. One was computed with taking the measured lift-off into account and the other was calculated with lift-off same length as initial condition of experiment. The maximum error between actual crack depth and reconstructed one is decreased from 45% to 12% when the measured lift-off was taken into consideration to the calculation. Finally, the lift-off measurement using an optical system composed of objective lens and photodiode which can be applied to ECT system is performed. The results suggested that the optical system has feasibility of lift-off measurement when optimum lens is selected.

Keywords: Eddy Current Testing, Lift-off Measurement, Crack Sizing, Nondestructive Inspection.

1. 緒言

渦電流探傷試験法(Eddy Current Testing: ECT)は、励磁コイルに交流電流を流すことで発生した交流磁束を、試験対象となる導体に印加することで渦電流を誘起させ、材料物性やき裂の存在に依存する渦電流分布の情報を、コイルのインピーダンスとして評価する手法である。特に、探傷に関しては、き裂の有無による渦電流分布の変化を検出する。

ECTの特長として、表面き裂に対する検出能力や探傷速度の高さなどが挙げられる^[1]。一方で、渦電流密度は被検査体の深さ方向に対して指数関数的に減衰する現象である表皮効果を示す。表皮効果により、渦電流探傷試験による被検査体深部の探傷は困難である。

◆連絡先：内一 哲哉

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
 東北大学流体科学研究所
 E-mail: uchimoto@ifs.tohoku.ac.jp

以上の特徴から、加圧水型原子力発電プラントの蒸気発生器(Steam Generator: SG)伝熱管における供用期間中検査において、ECTは適用されている^[2]。

探傷試験によって得られたECT信号を基に、被検査体の材質やき裂形状を数値計算によって定量的に評価する手法は逆問題解析の一つとして位置付けられる。近年のECTに関する数値シミュレーション技術の大幅な進展により、SG管等の薄肉部材に発生したき裂に対して、高いサイジング精度を有することが確認されている^[3-6]。き裂のサイジングを行う際に、精度低下の主な因子の一つとして、被検査体-ECTセンサ間の距離、すなわちリフトオフがある。ECT信号はリフトオフの影響を大きく受ける。リフトオフ変化は複雑形状の構造物ほど顕著であり、ECTによるき裂サイジング精度を向上し、その適用範囲を拡大するためには、リフトオフを厳密に評価する必要がある。リフトオフを計測し、結果を数値解析に反映させることにより、リフトオフの影響によるき裂のサイジング誤差を低減することが可能となる。

以上を背景に、本研究では、ECT に組み込み可能なリフトオフ計測手法について検討し、ECT におけるき裂形状の再構築精度の向上に資することを目的とする。このために、初めに、リフトオフが ECT 信号に対してどの程度の影響を及ぼすのかを評価する。次に、リフトオフによる ECT 試験信号の変化が、き裂を推定する際にどの程度の誤差を生じさせるのかを検討する。また、リフトオフを計測することによってき裂のサイジング誤差が減少することも加えて確認する。以上の評価によってリフトオフ計測の有用性を検証した上で、ECT に適用可能なリフトオフ計測手法について検討する。ECT が電磁誘導現象に基づくこと、コイルの寸法等を考慮し、磁場を妨げないと考えられる光学系を用いた手法について、その有用性を検証する。

2. リフトオフが ECT 信号に及ぼす影響

リフトオフ計測について議論する上で、リフトオフ変化がどの程度 ECT 信号に影響を及ぼすかを確認する必要がある。本章では、異なるリフトオフ条件をもとに数値計算した ECT 信号をそれぞれ比較することにより、ECT 信号に及ぼすリフトオフの影響を評価した。

今回の数値計算においては、幅 0.3mm、長さ 10mm、深さ 0.5mm の EDM スリットを有するオーステナイト系ステンレス鋼をモデルとした。モデルの全体長はスリット周辺の信号を計算する上で影響がない程度に十分大きく設定した。プローブは、Fig.1 に示すように、1 個の励磁コイルと、2 個の検出コイルを有する差動型プローブを模擬した。差動をとることによりスリット傷に起因する信号変化のみを検出することが可能である。コイルの仕様を Table1 に示す。ここで、ID および OD は内径および外径を表す。

Fig.2 に示すように、スリットの幅方向、長さ方向を x 方向、y 方向とし、スリット中心を原点とした。信号は y 方向に -15mm~15mm まで 1mm 間隔に計 31 点で計測した。x 方向の各コイルの位置関係は Fig.2 に示すように配置し、計測中は一定とした。2 つの検出コイルのリフトオフは互いに同値とし、0.5mm、0.55mm、0.8mm の 3 つの場合について周波数は 300kHz に設定し計算した。

以上のように設定した解析モデルと条件を用いて辺要素変形磁気ベクトルポテンシャル法による三次元渦

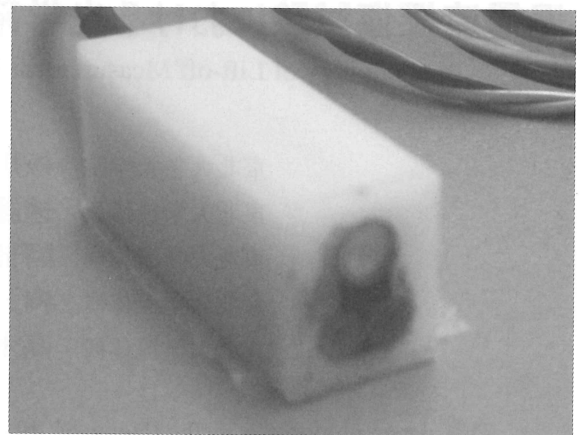


Fig.1 Differential TR probe

Table1 Specification of probe

	ID	OD	Height	Number of Turn
Exciting coil	1mm	4mm	1mm	420
Pick-up coil	1mm	3mm	1mm	285

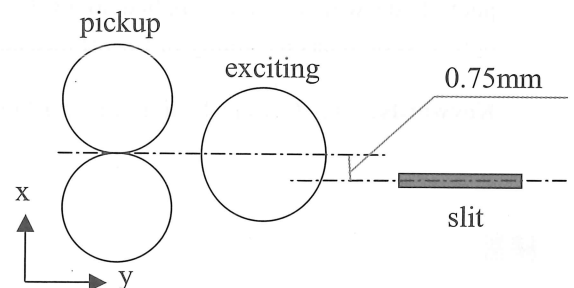


Fig.2 Relationship of position between a probe and a slit

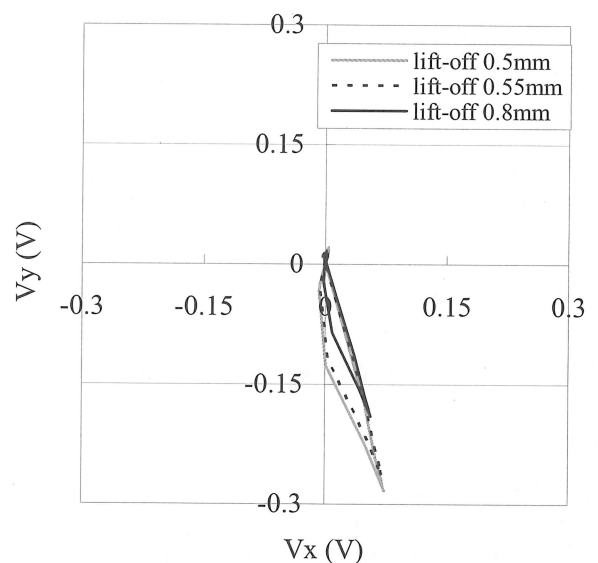


Fig.3 ECT signals with different lift-off

電流解析プログラムにより計算した⁷⁾。

数値計算して得られた ECT 信号を Fig.3 に示す。各信号を比較すると、位相には大きな相違は生じていないが、リフトオフが 0.8mm の場合の ECT 信号は 0.5mm、0.55mm の場合よりも信号の最大値が小さいことが確認できる。これは、プローブのリフトオフが増加することで、被検査体を貫通する磁束が減少し、それに伴って誘起する渦電流の密度が減少するためである。リフトオフが 0.5mm の場合と比較すると、0.55mm、0.8mm では信号が最大となる位置において信号感度の低下はそれぞれ 6%、32%であった。

3. リフトオフ情報を利用したき裂の推定

3-1) 概要

試験の際にリフトオフが変化する場合に、得られる ECT 信号は変化する。逆問題解析では、試験信号と計算信号を比較する。そのため、試験信号に影響を与える因子は、逆問題の結果として得られるき裂寸法にも影響を及ぼす。すなわち、リフトオフが逆問題の解の精度に影響を与えることを意味する。本章では、実験の際のリフトオフ情報を反映した場合としない場合の 2 つの逆問題の結果を比較することで、リフトオフ計測の重要性を検討する。

光学系を用いたリフトオフ計測の有用性を検証するために、今回のリフトオフ計測には、市販の光学系変位センサ(米国 MTI 社)を用いた。この変位センサは、ファイバから受光した光の強度に応じてフォトダイオードの光起電力が変化する。

3-2) 探傷試験

探傷試験では、前章のモデルと同様のスリットを持つオーステナイト系ステンレス鋼を被検査体として用いた。プローブについても前章のモデルと同様のプローブを使用した。被検査体に対してプローブは傾斜していないものとし、試験周波数はスリットの深さを考慮し 300kHz に設定した。

溶接部では、溶接後にグラインダによる処理を行ったとしても、母材と比較するとうねりが生じる場合がある。今回はその状況を考慮し、プローブのリフトオフは、Fig.4 に示すように、マイクロメータを用いて初めにプローブに 0.5mm のリフトオフを与えて探傷を行い、探傷中に L_{mm} に変化させた。リフトオフが L_{mm}

のときのリフトオフ信号は、Fig.5 に示すように ECT プローブに取り付けた光学系変位センサによって電圧として取得した。得られた電圧から、試験に先立って取得したリフトオフと変位センサの出力電圧の関係をを用いてリフトオフに換算した。試験中に 0.5mm から L_{mm} に変化する前後では、リフトオフは一定であると仮定した。

探傷を行うに先立ち、スリットが ECT 信号に影響しない程度に十分離れた位置で ECT 信号が 0V になるように校正した。校正はリフトオフを 0.5mm に設定して行い、その後に試験を行った。

変位センサを用いて、50 μ m 間隔でリフトオフを与えて得られたリフトオフと出力電圧の関係を Fig.6 に示す。曲線がなめらかであるため、変位センサで計測した点と点の間は直線で補完した。

マイクロメータで与えたリフトオフが L_{mm} の時に

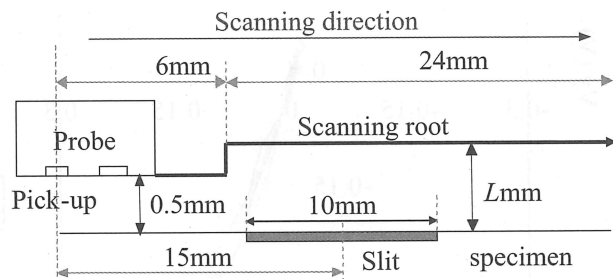


Fig.4 Lift-off condition of Case2



Fig.5 ECT probe with optical displacement sensor

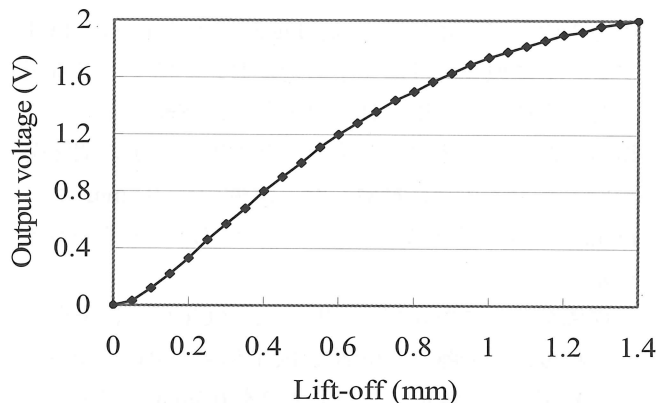


Fig.6 Relationship between lift-off and output voltage of displacement sensor

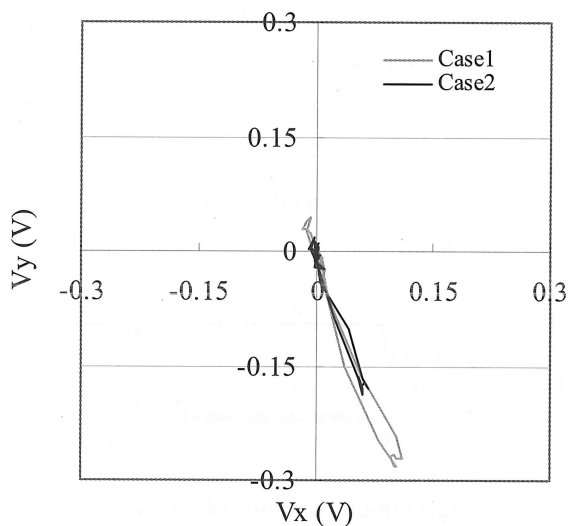


Fig.7 Comparison between the signal of Case1 and Case2

変位センサで計測した出力電圧は 0.73V であった。この値をもとに、Fig.6 よりリフトオフに算出した結果は 0.78mm であった。一方で、マイクロメータで与えた実際の変位は 0.76mm であった。光学系を用いたリフトオフ計測は、良好な精度でリフトオフを計測することが可能であることがわかる。

リフトオフを 0.5mm で一定に設定し探傷を行い (Case1) 得られた ECT 信号と、試験中にリフトオフを 0.5mm から 0.78mm に変化させて行った探傷 (Case2) により得られた信号を Fig.7 に示す。位相に関しては、大きな相違は確認できない。一方、Case2 の信号では、スリット傷による信号変化が検出される前に、リフトオフが 0.5mm から 0.78mm に変化している。そのため、スリット傷による信号変化は小さくなっている。

3-3) 逆問題解析

き裂の再構築は Fig. 8 に示すような流れで行った。まず、解析モデルにき裂形状を与え、高速順問題解析を用いて ECT 信号を求める^{[7][8]}。ここで用いる高速順問題解析法は Ar 法および辺要素 FEM に基づくものである。次に、数値解析によって得られた信号を実験信号と比較する。数値計算による信号が実験信号と異なる場合には、

$$J(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^{N_m} |Y_i(\mathbf{q}) - Y_{obs,i}|^2 \quad (1)$$

に示す計算値 Y と実験値 Y_{obs} の二乗誤差 J が許容値以下に収まるように最急降下法により $\bar{\mathbf{q}}$ を求める。ここで、 $\bar{\mathbf{q}}$ はき裂形状を特徴付けるパラメータ (例えば、長さや深さ) であり、 N_m は計測点数である。このようにき裂形状の修正を行った後、ECT 信号を再計算する。上記の作業を繰り返すことにより、き裂形状の再構築を行う。

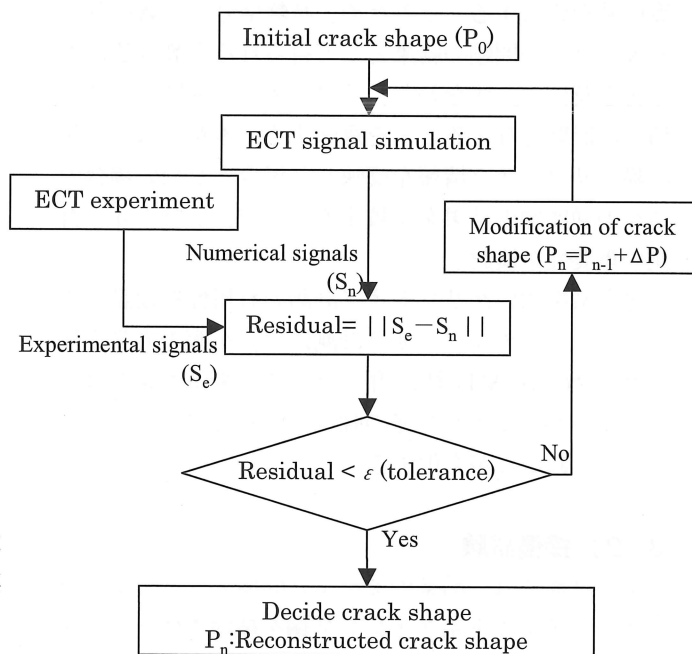


Fig.8 Flow of reconstructing crack shape.

3-4) 逆問題解析によるき裂の推定

Case2 の信号を基に、逆問題解析を用いて被検査体のスリットの深さおよび長さを定量的に評価した。非検査体およびプローブのモデルは実験と同じ形状を模擬した。解析条件はリフトオフ情報を除いて実験条件と同様とし、被検査体モデル上のコイルの走査位置も実験の走査位置と同様に設定した。今回の解析では、数

値計算のリフトオフ情報を Case1 と同様にして計算した場合と、Case2 のリフトオフ情報を数値計算のリフトオフ条件に加味する場合の、2 つの逆問題の結果と Case2 の試験信号とを比較した。

Fig.9 の(a)および(b)は、計算により得られたスリットの再構築結果である。白抜き及び破線枠の領域は、それぞれ推定したスリット形状及び実際のスリット形状を表している。Case2 の信号とスリット形状を再構築した際の信号を比較した結果を(c)および(d)に合わせて示す。Case2 の信号とスリット形状を推測した際の信号に良好な一致が見られることから、スリットの再構築が厳密に行われたことが確認できる。試験のリフトオフ情報を反映した場合は、再構築したスリット深さの最大誤差は 12%であった。一方で、リフトオフ情報を反映しない場合は、形状推定精度は低下し、深さの最

大誤差は 45%であった。

リフトオフ計測によって得られたリフトオフ情報を逆問題に反映させることで、き裂の再構築をより高精度に行うことが可能であることを確認した。このことから、光学系を用いたリフトオフ計測が ECT において有用であることがわかる。

4. リフトオフ計測手法の検討

前章のリフトオフ計測で用いた光学系変位センサは市販の電圧計を使用して $50\mu\text{m}$ の変位差を良好な精度で計測することが可能であった。また、リフトオフ計測の結果を逆問題解析に反映させることによって、き裂のサイジング誤差が低減された。以上の知見に基づき、フォトダイオードを用いた光学系について、リフ

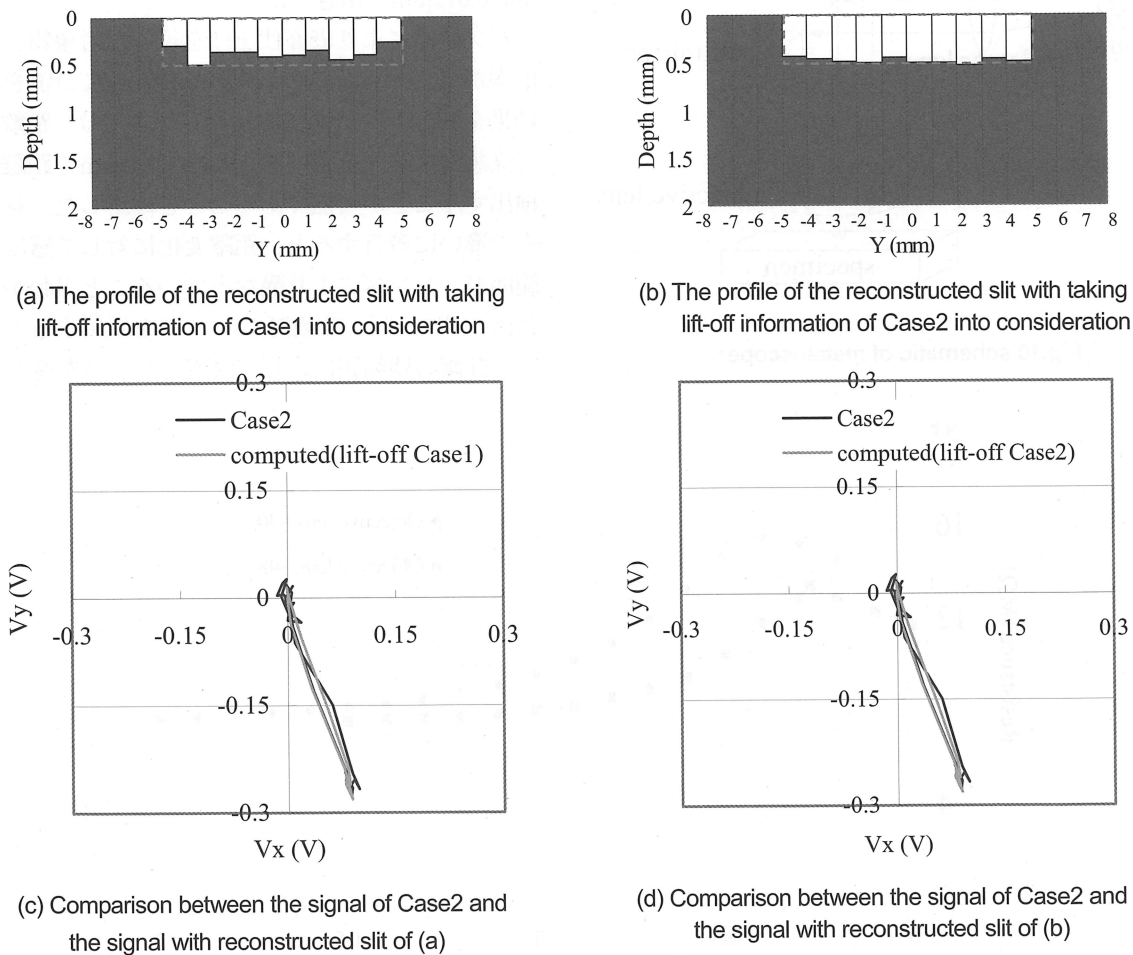


Fig.9 The results of slit reconstructions and comparison between the signal of Case2 and the signals with reconstructed slit

トオフ計測を行いその有用性を検証した。

ECTの適用範囲の拡大を視野に入れたときに複雑構造物への適用はまず検討すべき点である。被検査体の表面形状による影響を低減するためには、光のスポットを絞る必要がある。この条件を踏まえ、フォトダイオード及びレンズを用いたリフトオフ計測手法を検討した。プローブの可動性を考慮すると、光ファイバを光の伝送路として使用することが望ましい。しかし、今回は手法の有用性を検討するという観点から、簡単のために光学顕微鏡を用いて検証した。

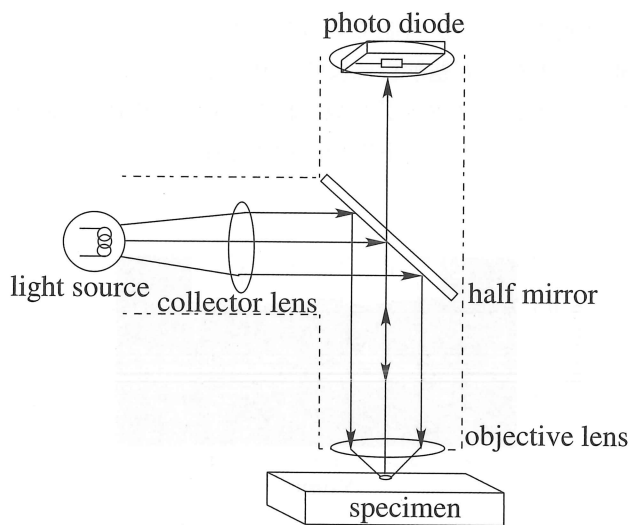


Fig.10 schematic of metaloscope

光学系の概要を Fig.10 に示す。光源から発せられた光の一部は、顕微鏡内のハーフミラーにより反射する。反射光は対物レンズを通過する際に集光し、対象物に照射する。照射光はスポット径が最小になる位置(焦点)で光強度が最大となる。すなわち、対象物が焦点から遠ざかる程、反射光の光強度は低下する。フォトダイオードは受光強度に応じて電気抵抗を変化するため距離が計測できる。換言すれば、非接触でリフトオフの計測が可能である。

対象物及びフォトダイオードにはそれぞれオーステナイト系ステンレス鋼板、シリコンダイオードを用いた。対物レンズは倍率の異なる3種類のレンズを用いた。受光強度の粗さによる影響を評価するために、ステンレス鋼板はサンドペーパーで表面処理をしたもの (R_a (算術平均粗さ)= $0.154\mu\text{m}$, $0.090\mu\text{m}$, $0.030\mu\text{m}$, $0.023\mu\text{m}$) と、バフ研磨により仕上げ処理を行ったもの ($R_a=0.015\mu\text{m}$) を用意した。

バフ研磨により表面仕上げを行った対象物を用い、倍率が40倍、48倍のレンズを使用して計測を行った結果を Fig.11 に示す。40倍のレンズでは、距離に対して高感度な範囲を用いることで、 0.1mm の距離変化を検出することが可能であることを確認した。レンズ倍率の違いに着目すると、距離変化に対して感度の良い範囲が、レンズにより異なっていることがわかる。これは、リフトオフ計測系にレンズを使用することにより、計測必要範囲に応じて最適なレンズを選択するこ

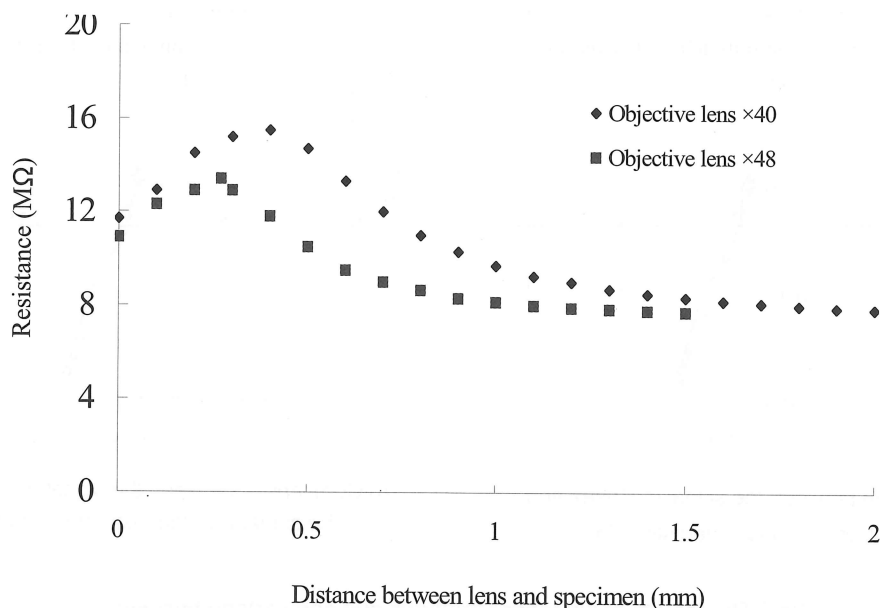


Fig.11 Characteristics of resistance vs. distance between lens and object

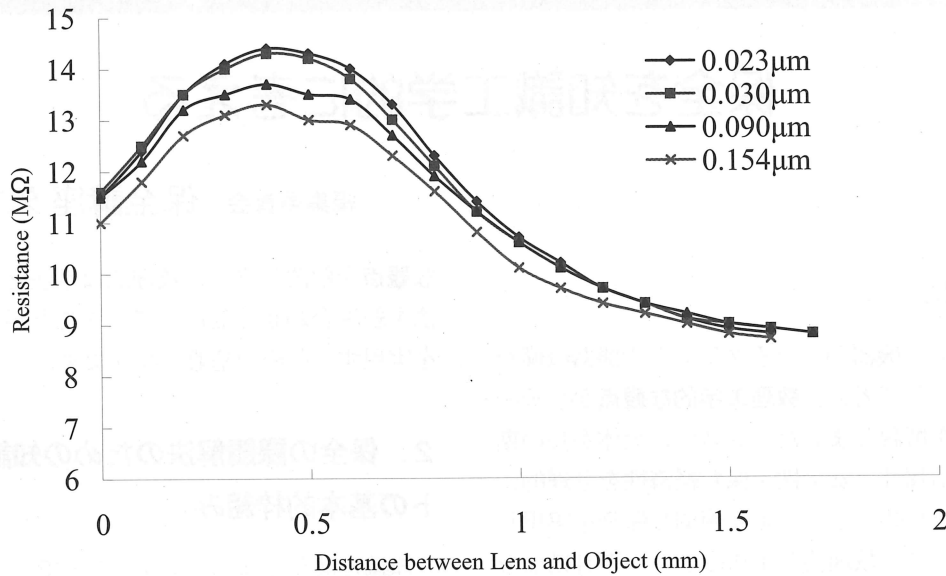


Fig.12 Characteristics of resistance vs. surface roughness of the specimen

とで、高精度な計測が可能であることを意味する。

Fig.12 は 40 倍のレンズを用い、サンドペーパーによる処理のみの 4 種類の対象物に対して計測した結果である。レンズ倍率が大きくなるほど表面粗さによる影響は小さくなるのが計測により確認できる。

5. まとめ

本研究では、まず、リフトオフが ECT 信号に及ぼす影響について数値計算を用いて評価した。

次に、市販の光学系変位センサを使用してリフトオフを計測し、結果を逆問題解析に反映させることによって、スリット深さ寸法を再構築する際の最大誤差を 45% から 12% に低減することができた。また、ECT における光学系を用いたリフトオフ計測の有用性を確認した。

最後に、実際にフォトダイオードとレンズを用いたリフトオフ計測系を、光学顕微鏡を使用して検討した。その結果として、計測範囲に応じて適切なレンズを用いることで、精度良くリフトオフの変化を検出することが可能であることを示した。表面粗さとリフトオフ情報を分離することにより、更なるリフトオフ計測精度の向上が可能である。

謝辞

本研究で使用した計測装置の一部は、東北大学流体科学研究所の裘教授に提供していただきました。ここ

に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] “渦流探傷試験Ⅲ”、(社)日本非破壊検査協会 (1990)
- [2] 高松洋、宮健三、陳振茂、“加圧水型原子力発電所における電磁非破壊検査技術開発の経緯”、日本 AEM 学会誌、Vol.8、No.1、(2000)、pp.95-101.
- [3] 高木敏行、福富広幸、“電磁解析技術による渦流探傷試験”非破壊検査、Vol.47、No.2、(1998)、pp.85-91.
- [4] T.Takagi, K.Miya,“ECT round-robin test for steam generator tubes.”, Japan Soc. Applied Electromagnetics Mech, Vol.8, No.5, (2000), pp.121-128.
- [5] H.Huang, T.Takagi,“Inverse analyses for natural and multi-cracks using signals from a differential transmit-recvie ECT probe.”, IEEE Transaction of Magnetics, Vol.38, No.2, (2002), pp.1009-1012.
- [6] S.Bakhtiari, D.S.Kupperman,“Modeling of eddy current probe response for steam generator tubes.” Nuclear Engineering and Design, Vol.194, (1999), pp.57-71.
- [7] T.Takagi, H.Huang, H.Fukutomi, J.Tani.,“Numerical Evaluation of Correlation between Crack Size and Eddy Current Testing Signal by a Very Fast Simulator”, IEEE Trans. Magnetics, Vol.34, No.5, (1998), pp.2581-2584.
- [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”、日本機械学会誌、Vol.68、A(2002)、pp.1801-1808.

(平成 18 年 10 月 19 日)