渦電流探傷試験における光学系を用いたリフトオフ同時計測手法の検討

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

○ 松川 淳 (東北大学)
 阿部 利彦 (東北大流体研)
 正 高木 敏行 (東北大流体研)

遠藤 久 (東北大流体研)
 正 内一 哲哉 (東北大流体研)

Jun MATSUKAWA, School of Engineering, Tohoku University, Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577

Hisashi ENDO, Institute of Fluid Science, Tohoku University

Toshihiko ABE, Institute of Fluid Science, Tohoku University

Tetsuya UCHIMOTO, Institute of Fluid Science, Tohoku University

Toshiyuki TAKAGI, Institute of Fluid Science, Tohoku University

Key words : Eddy Current Testing, Lift-Off Measurement, Crack Sizing, Nondestructive Inspection

1. 緒論

原子力発電プラントなどの表面・表層欠陥の検査技術として、渦電流探傷試験(Eddy Current Testing: ECT)は、非接触で高速な検査が実施できる有力な手法の一つである。加圧水型原子力発電プラントの蒸気発生器伝熱管の検査では、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を背景に、数値非破壊評価による検査の迅速化・高精度化が達成されている[1]。

渦電流探傷試験信号(以下 ECT 信号)を入力データとして、渦電流場の支配方程式をベースにき裂形状を計算機上で再現し、き裂のサイジングをする際、試験対象物-ECT センサ間の距離、すなわちリフトオフは既知である。高精度なき裂のサイジングは、安全性、合理的な検査期間の設定、コスト削減に結びつく。試験の際に、振動等の外乱によりリフトオフが初期設定から変化することがあるため、高精度な計測が必要である。試験対象の電磁的特性が一定であることを前提に、ECT 信号から直接リフトオフ情報と欠陥情報を分離する方法 [2] が提案されている。しかし、検出性と欠陥サイジング評価精度が問題となっている溶接部における応力腐食割れでは、試験対象の電磁的特性が空間的に変化する場合があります、ECT とは異なる方法でリフトオフ計測を実施する必要がある。

本研究は、ECT における数値非破壊評価精度向上を目的として、リフトオフ同時計測に基づく低ノイズ ECT システムを提案する。ECT に対して電磁的に干渉しないことを考慮し、レンズ、フォトダイオードからなる光学系を用いたリフトオフ計測手法について、その機構を模擬した計測系を用いて実験を行い、計測精度及び組込み方法を検討する。

2. リフトオフが ECT 信号に及ぼす影響の評価

リフトオフ計測の必要精度を検討するために、リフトオフをパラメータとし、ECT に基づく順問題解析を行った。解析では、厚肉対応プローブ[3]を用いた。2つの励磁コイルは、コイル間距離が 25mm であり、互いに逆向きの励磁電流を印加した。励磁周波数は 1kHz、リフトオフは解析毎に 1mm~1.4mm まで 0.2mm ずつ変化させた。試験体として厚さ 20mm の SUS304(導電率 $1.45 \times 10^6 \text{ S/m}$) 平板を想定し、き裂の形状は、幅 0.3mm、長さ 20mm、深さは解析毎に 0mm~10mm まで 1mm ずつ変化させた。き裂の長さ方向と、励磁コイルと検出コイルの配列が平行な状態で、き裂の長さ方向に走査し、走査範囲はき裂の中心から両端に 20mm まで 1mm 間隔で行った。ECT 信号の計算には辺要素変形磁気ベクトルポテンシャル法

による三次元渦電流解析プログラムを用いた[4]。なお、解析と同条件で実験を行い、ECT 信号の実験値と解析値が高精度に一致することは予め確認した。解析によって得られた ECT 信号のうち最も信号変化が大きい点の絶対値をプロットした結果を Fig.1 に示す。各々のグラフを比較すると、リフトオフが増加するときき裂深さに対する信号感度が低下している。リフトオフが 1mm と 1.5mm の信号を比較すると、試験の際のリフトオフが 1.5mm であるとき、逆問題解析[4]を行う際に 1mm で解析を行った場合、実際のき裂の深さが 8mm であるとき、逆解析によるき裂のサイジングでは深さ 6mm になる。以上より、リフトオフを高精度に計測されることが望まれる。本研究では、0.1mm を高精度に計測することを目標とする。

また、検出コイルのリフトオフが変化しない場合であっても、検出コイルを中心にプローブが傾くことにより、励磁コイル-試験体間の距離が変化することがある。0.5° 以内の傾きで ECT 信号に影響を及ぼすことを順解析により確認した。逆問題解析の精度を向上させるためには、プローブの傾きも考慮することが不可欠である。

Fig.1 Lift-off dependency of calculated ECT signals

3. 光学系を用いたリフトオフ計測

高精度なリフトオフ計測手法を検討するために、金属顕微鏡とフォトダイオードで構成された光学系を用い、対物レンズ-対象物間の距離に対する光強度特性を評価した。光学系の概要を Fig.2 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。反射した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

Fig.2 Optical system using diode and objective lens

Fig.3 Characteristics of light intensity to distance

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。反射光はレンズにより屈折し、その一部はハーフミラーを透過し、フォトダイオードが受光する。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(Ra (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($Ra=0.015\mu\text{m}$)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.3に示す。40倍のレンズでは、必要計測精度である0.1mmのリフトオフをより高精度に計測している。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とで、より高精度な計測が可能であることを意味する。Fig.4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。表面粗さが粗くなる程ダイオードの電気抵抗が減少し、レンズ倍率が大きくなる程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。計測精度の向上のためにリフトオフ情報と対象物の表面粗さ情報を分離する手法が必要である。

4. リフトオフセンサ組込み型 ECT システム

本研究の目的であるリフトオフセンサ組込み型 ECT シス

Fig.4 Characteristics of light intensity to surface roughness

Fig.5 ECT system with lift-off sensor

テムの概要を Fig.5 に示す。Fig.5 において、光源からの光の伝播には光ファイバを使用し、先端にレンズを装着する。ファイバをコイルの周りに複数配置することにより、各々のファイバから受光した光の強度から、リフトオフ、コイルの傾き、試験体の表面粗さを定量的に評価するためである。計測したリフトオフ情報は、逆解析によりき裂の再構築を行う際に入力データとして反映され、より高精度な解析を実現する。

5. 結論

金属顕微鏡とダイオードからなる光学系を用いて、低ノイズリフトオフ計測システムの検討を行った。その結果、必要計測範囲である0.1mmのリフトオフを高精度に計測可能であることを示した。リフトオフ計測の際に出力に影響を及ぼす試験体の表面粗さについては、コイルの周りに装着した複数本の光ファイバを用いて計測を行うことにより、リフトオフ情報との分離が可能である。

参考文献

- [1] H. Huang and T. Takagi, Inverse Analyses for Natural and Multi-Cracks using Signals from a Differential Transmit-Receive ECT Probe, IEEE Trans. Magn., Vol. 38, No.2, 2002, pp.1009-1012.
- [2] V. Zilberstein, et al., MWM eddy current sensors for monitoring of crack initiation and growth during fatigue tests and in service, International Journal of Fatigue, Vol. 23, 2001, S477-S485.
- [3] 遠藤久, 他, 渦電流探傷に基づく厚肉材における深いき裂の定量的評価, 日本非破壊検査協会秋季大会講演概要集, 2003, pp.75-77.
- [4] T.Takagi, H.Huang, H.Fukutomi and 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.