電磁超音波-渦電流マルチセンサを用いた疲労き裂に対する定量的評価

Quantitative Evaluation of Fatigue Cracks Using EMAT-EC Multi-sensor

○ 高橋 史寛 (東北大学大学院)
フェロー 高木 敏行 (東北大学流体研)

正 内一 哲哉 (東北大学流体研)
市原 敏晶 (株式会社 IFG)

Fumihiro TAKAHASHI, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Katahira2-1-1, Aoba-ku, Sendai, Miyagi
Tetsuya UCHIMOTO, Institute of Fluid Science, Tohoku University
Toshiyuki TAKAGI, Institute of Fluid Science, Tohoku University
Toshiaki ICHIHARA, IFG Co., Ltd

Key Words: EMAT, ECT, Fatigue crack, Austenite stainless steel

1. まえがき

超音波探傷法と渦電流探傷法は、き裂や減肉のサイジングに関して相補的關係にあることが知られており、これらを複合させることで幅広い深さの欠陥に対して高精度なサイジングが実現されることが考えられる[1]。本研究では超音波を探傷面に対して斜め方向に発生させることが可能な電磁超音波-渦電流マルチセンサを提案する。さらに本センサを試作し疲労き裂に対する深さ評価を行う。具体的にはオーステナイト系ステンレス鋼に設けた疲労き裂に対し、電磁超音波-渦電流マルチセンサを用いて超音波探傷と渦電流探傷を行い、得られた超音波信号と渦電流信号について検討する。

2. 電磁超音波-渦電流マルチセンサの概要

超音波を探傷面に対し、斜め方向に発生させることが可能な電磁超音波-渦電流マルチセンサ概念図を図1に示す。このマルチセンサは、ミアンダ型コイルとレーストラック型コイル、そしてNd系磁石により構成される。ミアンダ型コイルに励磁電流を流した際に、試験体表面に発生する渦電流の向きは図2に示されるようにピッチ(巻線間隔) l で反転する。磁石による磁界とコイルによる渦電流との相互作用により、試験体表面に水平方向の力が発生する。この力によりピッチ l で位相が反転する超音波が発生する。このため、これらの点で発生した超音波は位相が一致する方向が存在し、図2に示す角度 θ の斜角方向に伝播する波面が形成される。角度 θ は次式で与えられる。

$$\sin \theta = \frac{c}{2lf} \quad (1)$$

ここで、 l は巻線間隔、 c は導体中の横波の音速、 f は中心周波数を示している。このようにして横波の一種である SV 波 が発生する[2,3]。

図1に示すように、ミアンダ型コイルの長さは49 mm、幅は22 mm、巻線間隔 l は2.5 mm であり、レーストラック型コイルの長さは46 mm、幅は25 mm である。本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L 試験片を用い、センサに印加されるパルス電流の中心周波数は1.0 MHz である。従って、横波の音速 c が3.1 km/s、巻線間隔 l が2.5 mm、周波数 f が1.0 MHz であるので、センサから超音波が発生する角度 θ は、式(1)より、およそ $\theta = 39^\circ$ となる。

今回製作したマルチセンサから放射するビームの反射の様子を図3に示す。マルチセンサの中心からき裂までの距離を x とすると $x = 25.5$ mm の位置で評価可能な深さが最も大きくなる。 $x = 25.5$ mm はマルチセンサの中心から発せられた超音波がき裂の開口部に到達する距離を示している。実験で使用する試験片の厚さが19.8 mm であり、ミアンダ型コイルの幅が22 mm であるので、およそ13.6 mm の深さのき裂まで探傷可能となる。

マルチセンサを用いた超音波探傷ではコイル1のみを超音波の送受信コイルとして用い探傷を行う。渦電流探傷ではコイル1を励磁コイル、コイル2を検出コイルとして用いる。

Fig.1 Overview of EMAT-EC multi-sensor.

Fig.2 Analyzing the radiation of the EMAT.

Fig.3 Schematic drawing of incident and reflected beams.

3. 超音波探傷試験

3.1 使用する試験片と実験法穂

本研究では、深さの異なる3種類の疲労き裂に対して探傷を行う。試験片の材料は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L である。各試験片の中央に深さが3.2 mm、8.2 mm、12.9 mm の疲労き裂が導入されている。疲労き裂深さの測定には水浸式超音波探傷法を用いた。

センサを疲労き裂開口面に対し反対側に配置し、超音波パルサーレーザーによってセンサにパルス電流を印加する。センサの中心からき裂までの距離 x を 16 mm から 36 mm まで 1 mm 間隔で走査し、き裂によるエコーの振幅値をオシロスコープにより観察した。そして、き裂の深さとエコーの振幅値との関係に着目して検討を行った。

3.2 超音波探傷試験結果

図4に各疲労き裂の超音波波形を示す。いずれのき裂もき裂によるエコーが最大値を示した位置 $x=25$ mm における波形であり、上から順に深さ 3.2 mm、8.2 mm、12.9 mm の疲労き裂に対する波形を示している。矢印で示す箇所がき裂によるエコーを示している。図4から分かるように、明確にき裂によるエコーを確認することができる。

図5に $x=25$ mm の位置における振幅とき裂の深さの関係を示す。この図より、き裂の深さがおよそ 13 mm までのき裂に対して、き裂の深さを振幅により評価することが可能であることが分かる。2 節で考察した議論のとおり、本センサにより評価可能なき裂深さの最大値は、13.6 mm であり、13 mm 以上の疲労き裂による信号は飽和するものと考えられる。

以上より深さ 13 mm までのき裂に対して振幅値の変化により、き裂の深さを予測することが可能であることを示している。

Fig.4 Echo signals due to fatigue cracks.

Fig.5 Relationship between depth and amplitude.

4. 渦電流探傷試験

4.1 実験方法

低周波用の渦電流探傷装置を用い、試験周波数を 5 kHz として渦電流探傷試験を行った。超音波探傷を行った時と同じように、センサをき裂の開口面に対して裏面に配置し、 $x = -25$ mm から $x = 25$ mm までの範囲を X-Y ステージを用い 0.5 mm 刻みで走査した。

4.2 渦電流探傷結果

それぞれの深さのき裂に対する、渦電流探傷結果を図6に示す。この結果より、深さ 12.9 mm と 8.2 mm の疲労き裂に対して渦電流探傷が可能であることが示され、き裂が深いほど信号振幅も大きくなり、位相も変化していることが確認できた。しかし、深さ 3.2 mm の疲労き裂に対して信号の変化を確認できなかった。

Fig.6 ECT signals of fatigue cracks.

4. まとめ

本研究では、超音波を試験体表面に対して斜め方向に発することが可能な電磁超音波-渦電流マルチセンサを疲労き裂開口面に対して反対側に配置し、深さの異なる3種類の疲労き裂に対して超音波探傷と渦電流探傷を行った。超音波探傷ではき裂が深くなるに従い、き裂によるエコー振幅も大きくなることを確認し、エコーの振幅値により深さ 13 mm までき裂に対し、深さを評価することが可能であることを示した。一方、本センサを用いた渦電流探傷では、き裂が深い場合には探傷が可能であるが、き裂が浅い場合には探傷は困難であった。

以上の結果より、本センサを用いてき裂の深さが浅い場合には電磁超音波探傷機能を、深い場合には渦電流探傷機能を用いることで、様々な深さ領域に存在するき裂に対して評価可能であることが示せた。

謝辞

本研究は科学研究費補助金[若手研究(B)17360045]の一部として実施された。試験片準備は東北大学佐藤武志氏の支援に基づくものである。

参考文献

- [1] D. Horn and W.R. Mayo : NDE Reliability Gains From Combining Eddy-Current And Ultrasonic Testing, NDT&E International, Vol.33 (2000), pp.351-362.
- [2] H. Ogi, M. Hirao : Line-focusing of ultrasonic SV wave by electromagnetic acoustic transducer, Acoustic Society of America, Vol.103, No. 5 (1998), pp.2411-2415.
- [3] 北原弘道, 笹島洋幸, 森本一夫 : 電磁超音波を用いた検査装置 [EMAT], 高圧ガス, Vol.33, No.8 (1996), pp.646-651.