

平成 29 年 4 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13834

研究課題名(和文)超高分解能焦点型電磁超音波センサの開発

研究課題名(英文)Development of point-focusing EMAT with ultra-high resolution

研究代表者

平尾 雅彦(Hirao, Masahiko)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：80112027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではステンレス鋼の溶接部近傍に発生する応力腐食割れを高感度かつ再現性よく検出することのできる点収束型電磁超音波センサ(PF-EMAT)を開発した。このセンサでは、SV波と呼ばれる横波を用いており、複数の音源から送信されたSV波を焦点において同位相にて収束させることで空間分解を高め、微小な割れの検出を可能にした。このセンサを用いて、深さ0.05mmのスリット欠陥や、深さ0.5mmの応力腐食割れを検出することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We developed the point-focusing electromagnetic acoustic transducer (PF-EMAT) that can detect the stress-corrosion cracking near the weld with high sensitivity and high reproducibility. The PF-EMAT uses shear vertical (SV) waves. It is designed so that SV waves excited from a few sound sources arrive at a focal point in phase, which improved the spatial resolution and enabled us to detect small cracks. By using the PF-EMAT, we detected the slit defect with 0.05-mm depth and the stress-corrosion crack with 0.5-mm depth.

研究分野：材料力学

キーワード：超音波探傷

1. 研究開始当初の背景

近年インフラ設備の高齢化が深刻な問題となっており、内閣府が推進する国土強靱化基本計画においても、効率的・効果的なインフラ設備の維持管理を実現する非破壊検査技術等の新技術の開発・普及、さらには分野横断的な活用・共有化の推進が挙げられている。

各種検査技術の中で超音波探傷は構造物内部の検査ができる点で渦流探傷や磁粉探傷などに比べて優れており、配管内部のき裂検査などで既に使用されている。一般的な超音波探傷ではき裂からの反射エコーを測定し、エコー位置や高さからき裂の位置や大きさを同定する。しかし、圧電センサを使った従来の検査法ではセンサと試験体の接触状況によってエコー高さが容易に変化するため再現性の高い計測が難しく、また、微小なき裂からは十分な強度の反射エコーが得られず、き裂成長の経年観察のように高い測定精度を必要とする検査では精度向上が切望されている。

2. 研究の目的

本研究では、ステンレス鋼の溶接部近傍に発生する応力腐食割れを、高感度かつ高精度に検出することのできる超音波センサを開発することを目的とする。ステンレス鋼は発電プラントや化学プラントをはじめ、多くの設備で使用されているが、溶接部付近に発生する応力腐食割れが深刻な問題となっている。現在、応力腐食割れの検出には圧電センサが使われているが、十分な精度で計測されているとは言い難い。そこで本研究ではステンレス鋼に発生する微小な割れを検出することができ、なおかつ検査の再現性が高い新たな超音波センサを開発する。

3. 研究の方法

開発するセンサのキーワードは、電磁超音波センサ (Electromagnetic acoustic transducer: EMAT)、SV (Shear vertical) 波、点集束の3つである。

従来の圧電センサでは超音波がセンサ内で励起されるため、センサを試験体に押し付けることで超音波を試験体に送信・受信する。この時、超音波の送受信効率はセンサを試験体に押し付ける力の大きさに依存する。また、送受信効率を高めるためにセンサと試験体の間には音響結合剤と呼ばれる材質を塗布するが、その量によっても受信信号の強度が変化してしまう。圧電センサではこれらの要因が検査の再現性向上の妨げとなっていた。これらの問題を解決するために、本研究では電磁超音波センサを用いる。電磁超音波センサとは、ローレンツ力や磁歪力を利用して超音波を送受信するセンサである。このセンサは試験体の表面に直接音源を作り出すため、センサを試験体に押し付ける必要がない。また電磁気的な作用を利用するため、センサと

試験体が離れていても使用可能であり、音響結合剤が不要である。そのため、圧電センサに比べて再現性の高い検査が可能になる。

開発するセンサはSV波と呼ばれる横波の一種を用いる。電磁超音波センサを用いてSV波を送信すると、試験体表面に鉛直な向きからおよそ30°の方向に強い指向性(振幅が大きい)を示すことが知られている。指向性を持たない超音波を利用すると、センサに対してあらゆる方向から超音波が反射してくるため、欠陥の位置同定が困難になる。これに対してSV波を用いると、特定の方向(場所)のみを検査できるようになる。このような指向性は従来の圧電センサを使った場合は現れず、電磁超音波センサを使わなければ現れない。

微小な割れを検出するためには、センサの空間分解能を高める必要がある。空間分解能を高めるためには高周波(短波長)の超音波を利用することが一般的である。しかしながら波長が短くなると結晶粒径の大きいステンレス鋼では、粒界散乱の影響が強くなり、材料内での減衰が大きくなる。そこで、本研究では複数の超音波を試験体内部に設定した焦点において同位相で重ね合わせ(集束させ)、空間分解能と同時に信号強度を高める手法を用いる。

以上のように、3つの特徴を組み合わせ、従来の圧電センサに替わる、高い再現性と空間分解能を有する電磁超音波センサを開発する。

4. 研究成果

(1) 点集束型電磁超音波センサの設計

開発した電磁超音波センサは、同心円弧形状の蛇行コイルと永久磁石で構成されている。試験体の上にコイルと磁石を置き、コイルに交流電流を流すと、試験体表面に渦電流が発生し、その渦電流と磁石のつくる静磁場によってローレンツ力(音源)が発生する。このセンサではコイルの直下に音源が発生するため、コイルの形状を変えることで音源の位置を任意に設計することができる。蛇行コイルを使うと、複数の線音源からSV波を送信することができる。そこで、材料内の焦点において各音源から送信されるSV波が同位相になるように蛇行コイルの間隔を設計した(図1参照)。この間隔は焦点の位置とSV波の周波数によって変化する。これまでに同様の原理に基づく線集束型の電磁超音波センサが開発されているが、本研究では同心円弧形状のコイルを用いることで点集束を実現し、空間分解能を高めた。図2に開発したセンサの一例を示す。

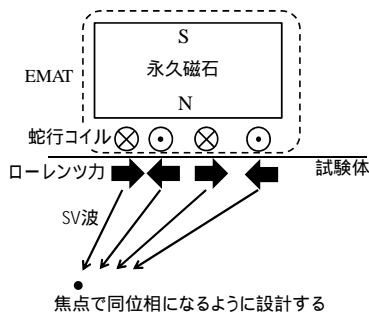


図 1 点集束型電磁超音波センサの概念図 (断面図)



図 2 開発した点集束型電磁超音波センサの一例。中央のオレンジ色の領域がセンサ部。センサ部が試験体と接するように設置して使用する。

(2)スリット欠陥を使った性能評価

開発したセンサの性能評価のために、ステンレス鋼板にスリット形状の人工欠陥を作成し、その検出の可否を調べた。その結果、板厚 20mm の板材に対して、0.05mm 深さのスリット欠陥が検出できることを確認した。2.0MHz の SV 波を使った場合、その波長はおよそ 1.5mm であること考えると、開発したセンサは波長よりも十分に小さな欠陥も検出できることが分かる。

溶接部を有するステンレス鋼板においても、溶接部近傍に同様にスリット欠陥を作成して検出実験を行ったところ、スリット欠陥を溶接部とは区別して検出できることが確認された。

駆動周波数が異なるセンサを複数製作し、空間分解能と SN 比、ダイナミックレンジを評価した。その結果を総合的に判断し、2MHz のセンサが探傷に適していることを確認した。また、センサと試験体の距離、欠陥に対してセンサが斜めに設置されたときの受信信号の変化など、実用に際して必要なセンサ特性評価も行った。

(3)応力腐食割れの検出

溶接部近傍に人工的に応力腐食割れを導入したステンレス配管試験体に対して、開発したセンサが適用可能かどうかを評価した。試験体の検査部の肉厚は 35mm である。

図 3 に測定結果の一例を示す。溶接線に対

して垂直方向に電磁超音波センサを走査したときの、受信信号のプロファイルである。割れのない健全部に対する結果を上段に示す。横軸の 5mm 付近で受信信号が大きくなっているが、これは溶接部で SV 波が反射し、センサで受信されたことを示している。一方、割れが存在する場合 (図 3 の下段) は、溶接部からの信号とは別に、割れからの信号が明確に確認できる (横軸の 15mm 付近)。同様の走査実験を溶接線に沿って複数個所で実施したところ、溶接部金に複数の割れが存在することが確認された。この試験片に対しては、事前に透過試験とアレイセンサを使った探傷を実施していたが、これらの検査で確認された応力腐食割れは、今回開発したセンサでも全て検出できた。このことから、開発した点集束型電磁超音波センサは他の検査手法に比べて遜色ないものであることが示された。

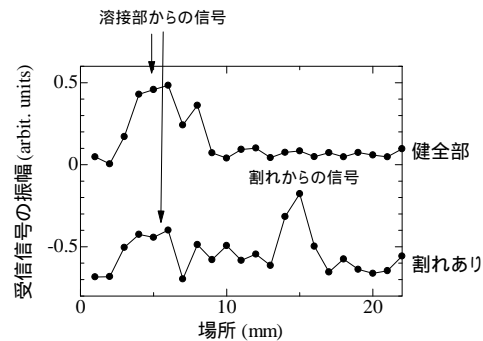


図 3 溶接部近傍に導入した応力腐食割れの検査結果の例。上段は割れのない健全部での検査結果。下段は割れがある領域での検査結果。電磁超音波センサを溶接線に対して垂直に走査した。

(4)有限要素法による欠陥検出能力の解析

実験を進める中で、開発したセンサを使った場合は、欠陥の大きさが変化したときに、受信信号が単調には変化せず、振動するように変化する現象が観測された。この現象が発生する理由を調査するために、有限要素法を用いてスリット欠陥での SV 波の反射挙動を解析した。その結果、有限要素法の解析においても、点集束型電磁超音波センサで受信される信号強度は、スリット欠陥の深さが変化したときに、振動するように変化することが確認された。そこでスリット周りに生じている変形を詳細に調べたところ、電磁超音波センサでの受信信号が小さくなる時は、スリット近傍の振動変位が大きくなること (局所的に強く振動すること) が分かった。これは、入射した SV 波のエネルギーがスリット近傍の変形に使われるため、反射波の振幅が小さくなることを示している。さらに、スリットの深さによって局所振動が発生する周波数は変化し、この周波数と SV 波の周波数が一致したときに、受信振幅の低下が生じること

が分かった。本センサの受信信号から欠陥形状を推定する際には、これらの点に注意しなければならないことが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

N. Nakamura, K. Ashida, T. Takishita, H. Ogi, and M. Hirao, Inspection of stress corrosion cracking in welded stainless steel pipe using point-focusing electromagnetic-acoustic transducer, NDT & E International, 83, 2016, 88-93.

芦田 一弘、滝下 峰史、中村 暢伴、荻 博次、平尾 雅彦、点集束型電磁超音波センサの SUS304 鋼におけるスリット検出性能の評価、非破壊検査、65、2016、79-84

〔学会発表〕(計5件)

坪井 誠也、芦田 一弘、滝下 峰史、中村 暢伴、荻 博次、平尾 雅彦、半円形状コイルを用いた点集束型電磁超音波センサのスリット欠陥検出能の評価、2016 年度日本機械学会年次大会、2016 年 9 月 14 日、九州大学

N. Nakamura, K. Ashida, T. Takishita, H. Ogi, and M. Hirao, Point-focusing Electromagnetic-Acoustic Transducer for Crack Inspection, 43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2016/07/20, Georgia Tech Hotel and Conference Center, Georgia, USA

芦田 一弘、滝下 峰史、中村 暢伴、荻 博次、平尾 雅彦、点集束型電磁超音波センサによる SUS304 鋼溶接試験片の探傷、日本非破壊検査協会平成 27 年度周期公園退会、2015 年 11 月 15 日、北海道立道民活動センター

T. Takishita, K. Ashida, N. Nakamura, H. Ogi, and M. Hirao, Detection of cracking near welding of SUS316 pipe by shear-vertical-wave point-focusing-electromagnetic acoustic transducer, The 36th symposium of ultrasonic electronics, 2015 年 11 月 5 日、Epocha Tsukuba

滝下 峰史、芦田 一弘、中村 暢伴、荻 博次、平尾 雅彦、SV 波点集束型電磁超音波センサの駆動周波数が欠陥検出のダイナミックレンジに及ぼす影響、2015 年度日本機械学会年次大会、2015 年 9 月 13 日、北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平尾 雅彦 (HIRAO, Masahiko)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：80112027

(2) 研究分担者

中村 暢伴 (NAKAMURA, Nobutomo)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号：50452404

荻 博次 (OGI, Hirotosugu)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号：90252626