

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13826

研究課題名(和文) 超伝導電磁石を用いた大振幅電磁超音波プローブによる非線形超音波現象の定量的解明

研究課題名(英文) Evaluation of Nonlinear Ultrasonic Phenomena by Electromagnetic Acoustic Transducer with Large Amplitude Using Superconducting Magnet

研究代表者

内一 哲哉 (Uchimoto, Tetsuya)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：70313038

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)：非線形超音波の発生機構を解明するために本研究では、超伝導マグネットによる強磁場下において電磁的に超音波を送信する電磁超音波送信システム(超伝導EMAT)を構築した。構築した超伝導EMATの性能と定量性を確認するために、数値シミュレーションと実験との比較を行った。両者はよく一致しており、従来の超音波送信システムでは困難な音場を定量的に制御することが可能であることを確認した。超伝導EMATを用いて閉じた疲労亀裂に対する非線形応答について測定を行った。閉じた亀裂に対しては高調波成分が顕著に生ずることを確認するとともに、周波数依存性、音圧依存性について明らかにした。

研究成果の概要(英文)： In this study, superconducting electromagnetic acoustic transducer (EMAT) is developed to transmit strong ultrasound with controlled frequency and sound pressure of incident wave, which is expected as an effective experimental tool for mechanism study of nonlinear ultrasonic phenomena. Transmitted wave of this system was evaluated by laser Doppler vibrometer. The measured surface displacement was compared with numerical analysis of ultrasound by EMAT. The result of numerical analysis was in a good agreement with the experimental data, which indicate the developed superconducting EMAT can transmit a ultrasound with controlled sound pressure.

Nonlinear ultrasounds from fatigue crack specimens were measured by the superconducting EMAT. Generations of some higher harmonics from closed cracks are confirmed for and dependence of higher harmonics on input frequency is investigated.

研究分野：機械工学

キーワード：電磁超音波プローブ 非線形超音波現象 超伝導マグネット

1. 研究開始当初の背景

構造部材の超音波探傷試験では、溶接部残留応力やき裂内の充填酸化物によりき裂が閉口すると、超音波の透過によりき裂深さを過小評価する可能性がある。この課題を解決する手法として、非線形超音波法が挙げられる。閉じたき裂に入射した超音波と異なる周波数の超音波がき裂部で発生することを利用した計測法であり、非線形超音波法は超音波探傷試験の高信頼化につながる技術として、多くの研究者により研究がなされている。

特に分調波は閉じたき裂部のみから発生するため、これまでに多くの研究者により分調波の発生とき裂評価への適用が報告されている。一方で、定量的なモデル解析に基づく実験結果の再現に成功した例はまだない。10 nm 以上の大振幅超音波を閉じたき裂に入射することが不可欠であるが、このような大振幅の超音波を制御して入射することが困難であり、現象を観測することが限定的であるのが大きな要因である。

2. 研究の目的

本研究では、非線形超音波の発生条件を評価するため、電磁超音波探触子 (Electromagnetic acoustic transducer : EMAT) と超伝導マグネットを組み合わせた新たな大振幅超音波送信システム (以下、超伝導 EMAT) を構築し、振幅を評価するとともに、本システムを用いて亀裂に対する非線形超音波発生条件を実験的に評価する。EMAT は磁石とコイルから構成され誘導電流と磁場の相互作用により発生するローレンツ力が超音波として試験片内を伝搬する装置である。EMAT は接触媒質が不要であり、周波数の制御等が容易である利点がある。超音波探傷試験で従来用いられてきた PZT に比べ送信波の振幅が低い欠点を有するが、磁束密度の大幅な向上が可能である超伝導マグネットを組み合わせることで、非線形超音波発生に十分な振幅の超音波が送信可能かを評価する。さらに、本システムを用いて、4 点曲げ試験により導入した閉じた亀裂に対する非線形成分の発生条件の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 超伝導 EMAT による音場の評価

超伝導 EMAT の性能評価として、本システムにより発生する超音波の振幅を測定する。実験では図 1 のように超伝導 EMAT でパルス波を入射し、透過法によりレーザードップラー振動計で振幅の測定を行う。試験片はアルミニウム合金 A5052 (Mg2.52%含有) であり、寸法は $50 \times 50 \times 40 \text{ mm}^3$ である。EMAT コイルは直径 0.12mm の銅線を 80 回巻いた直径 20mm の円形コイルとする。送信部は、パルサーレーザー (RPR-4000, RITEC 社) を使用し、送信周波数 1MHz, 入力電圧 800V, サイクル数 10, 磁束密度 5T, 試験片の厚さは

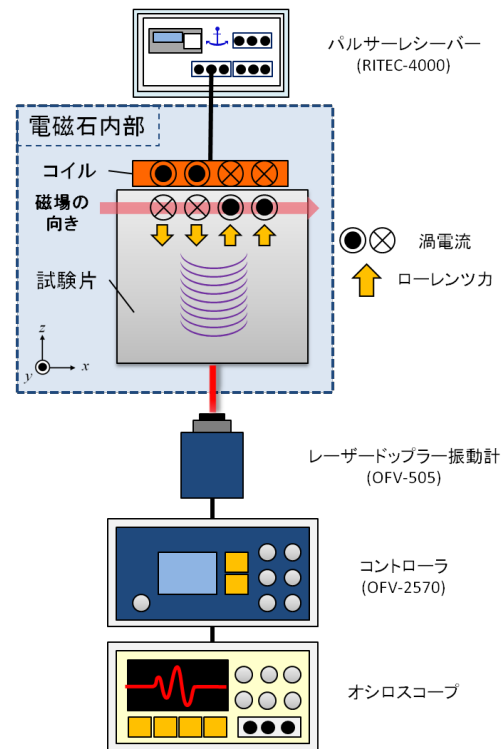


図 1. 超伝導 EMAT の概略図

50mm とする。受信部では、レーザードップラー振動計 (Polytec 社, OFV-505, DD-300) で試験片表面の変位を取得し、0-24MHz までの広域な振動周波数に対応している。また、超伝導 EMAT システムにより送信した超音波の伝搬挙動とそれによる試験片表面の振幅を定量的に評価するために数値解析を行う。まず電磁場解析 (GiD, 伊藤忠テクノソリューションズ) により静磁場の設定、A-φ法による渦電流場とローレンツ力の計算、続いて超音波伝搬解析 (ComWAVE, 同) で有限要素法により、超音波の振幅を測定する。尚、実験値との定量的評価のため、解析条件は実験と同様のモデルを構築する。

(2) 疲労試験片の作製と超伝導 EMAT を用いた評価

疲労試験機 (MTS 458.20) により、四点曲げ試験を行い、亀裂を進展させる。本試験では、応力比試験条件を変え、3 種類の試験片を作製した。作製した疲労亀裂試験片は、フェーズドアレイ探触子を用いた超音波試験により亀裂を映像化し、亀裂の開閉の有無を確かめる。

超伝導 EMAT を使用し、非線形超音波の発生条件を検証する。実験装置は図 1 の受信部を PZT (V106, OLYMPUS, 径 13mm, 中心周波数 2.25MHz) に変更したシステムとする。アルミ合金 A5052 に対し、四点曲げ疲労試験により亀裂を導入する。閉じた亀裂では、進展する亀裂に対して、応力拡大係数を制御する必要があるため、与える荷重を 30kN から 10kN へ次第に減少させる。亀裂の開閉は疲労試験中にフェーズドアレイ PZT による画

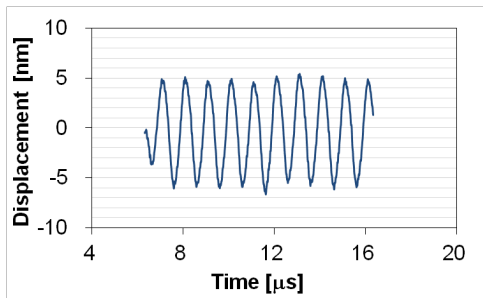


図2 レーザー変位計により測定した表面変位

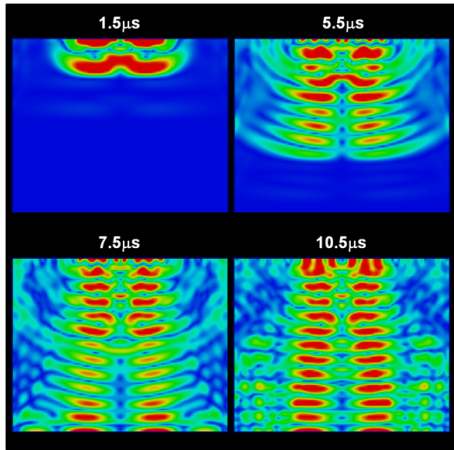


図3 数値シミュレーションによる超音波伝搬の様子

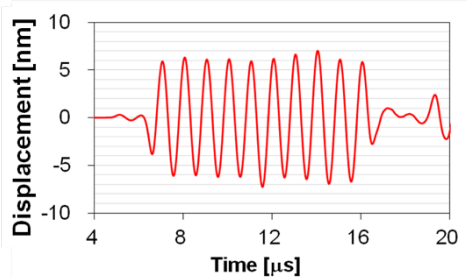


図4 数値シミュレーションにより計算した表面変位

像で確認し、無負荷状態で亀裂が検出されない状態を閉じた亀裂と定義する。送信条件は 1.5 MHz, サイクル数 100 とし、PZT により受信した透過波を高速フーリエ変換(FFT)することで周波数特性を分析する。

4. 研究成果

(1) 超伝導 EMAT による音場の評価

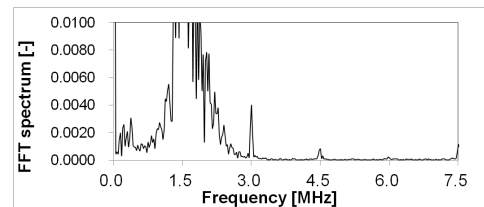
超伝導 EMAT を使用し、アルミ合金に対する透過波の振幅測定結果を図 2 に示す。なお、図中の振幅の値は透過波の試験片表面における変位振幅を示している。図 2 によると、得られた振幅値は 5.1 nm (peak-to-peak)であった。数値シミュレーションでは、超伝導電磁石による磁場と励磁コイルにより誘導された渦電流の相互作用によるローレンツ力分布を A-φ 法により計算し、これを入力とす

る超音波伝搬解析を行った。解析による試験片内の音圧分布の様子を図 3 に示す。また、数値解析による試験片表面での変位を図 4 に示す。この図より、振幅値は 6.20 nm となり、実験値と理論値の差は 1.1 nm となり、ほぼ一致していると言える。尚、数値解析の結果については、超音波の材料摩擦による減衰を回折補正により考慮した結果となる。このことから、超伝導 EMAT による試験片内の音場を定量的に制御できることが示された。

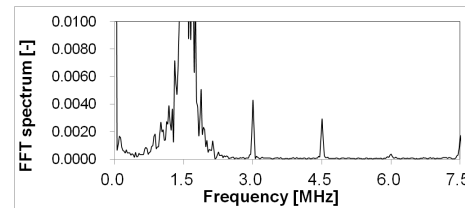
非線形超音波の発生を観察するためには亀裂界面の超音波によるひずみ量が 10^{-6} のオーダー以上が必要とされている。応力とひずみの関係式を用いて、今回実験で得られた変位振幅をひずみ量に変換すると、 3.15×10^{-6} となるため、本システムにより発生する超音波は、非線形超音波発生に必要な振幅を十分に満たしていると言える。

(2) 疲労試験片の作製と超伝導 EMAT を用いた非線形応答評価

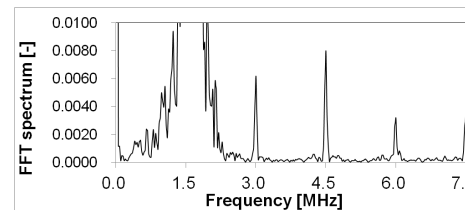
3 種類の疲労亀裂試験片 (No.1, No.2, No.3) を作製し、亀裂の開閉状態を確認するために、フェイズドアレイ PZT (5MHz, エレメント数 32, ピッチ 0.5mm) を用いて無負荷状態を映像化した。亀裂先端における信号強度の違いから、試験片 No.2 では亀裂が全体的に観察され (比較的開いた亀裂)、試験片 No.3 では亀裂の一部が観察しにくい (一部閉じた亀裂) ことを確認した。



(a) 試験片 No.1 (亀裂なし)

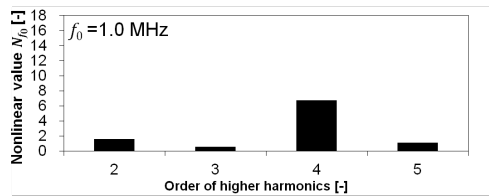


(b) 試験片 No.2 (亀裂なし)

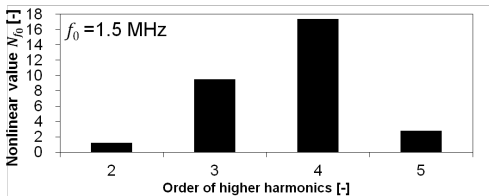


(c) 試験片 No.3 (亀裂なし)

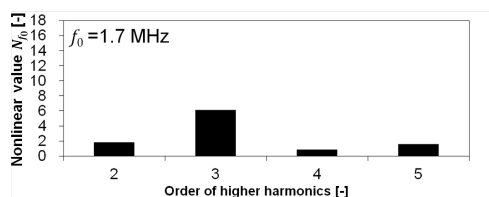
図5 1.5 MHz バースト波に対するエコーのスペクトル



(a) 1.0 MHz



(b) 1.5 MHz



(c) 1.7 MHz

図6 非線形指標の周波数依存性

超伝導 EMAT を用いて、4 点曲げ疲労試験により導入した疲労亀裂に対する透過波の信号を測定した。オシロスコープから取得した受信波形それぞれに対し FFT 処理を行った結果の例(1.5MHz)を図5に示す。尚、図中のスペクトルの値は、基本波における値を1として規格化した。

本研究では、閉じた亀裂による高調波の発生量を評価するために、亀裂の無い場合(No.1)と閉じた亀裂のある場合(No.3)の高調波の差異を考察する。No.1, No.3における各次高調波スペクトルのピーク値をそれぞれ P_{1,f_0} , P_{3,f_0} とする。ここで、 f_0 は送信周波数を示す。閉じた亀裂がある場合にどの程度高調波スペクトルが増加したかを定量化し、亀裂による非線形指標を評価する指標となるパラメータ $N_{f_0} = P_{3,f_0} / P_{1,f_0}$ を定義する。得られたスペクトルのデータを用いて、非線形指標 N_{f_0} を評価した結果を図6に示す。尚、図の横軸は、高調波の次数を示した値を示す。高調波における非線形指標は周波数依存性を有しており今後、更に送信周波数依存性や音圧依存性の検証が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 6 件)

1. 時田 祐樹, 内一 哲哉, 小原 良和, 高木 敏行, 超伝導マグネットを用いた大振幅電磁超音波送信システムによる非線形超音波発生メカニズム, 日本機械学会東北支部第53期総会・講演会, 2018年3月
2. Yuki Tokita, Tetsuya Uchimoto, Yoshikazu Ohara, Toshiyuki Takagi, Evaluation of Superconducting Electromagnetic Acoustic Transducer with Large Amplitude, Fourteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2017), 2017年11月2日
3. 時田祐樹, 内一哲哉, 高木敏行, 小原良和, 非線形超音波発生条件の評価のための大振幅電磁超音波送信システムの構築と評価, 先進的非破壊評価合同シンポジウム, 2017年7月13日
4. 時田祐樹, 内一哲哉, 高木敏行, 小原良和, 大振幅電磁超音波送信システムによる亀裂の非線形応答の評価, 安心・安全な社会を築く先進材料・非破壊計測シンポジウム, 2017年3月13日
5. Yuki Tokita, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Toshikazu Ohara, Development of Superconducting Electromagnetic Acoustic Transducer System and Quantitative Evaluation of Ultrasound Transmission by Numerical Analysis, Thirteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2016), 2016年10月11日
6. 時田祐樹, 内一哲哉, 高木敏行, 小原良和, 超伝導電磁超音波送信システムの構築と数値解析による超音波送信特性の定量的評価, 日本保全学会 第13回学術講演会, 2016年07月26日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内一 哲哉 (UCHIMOTO, Tetsuya)
 東北大学・流体科学研究所・教授
 研究者番号: 70313038

(2) 研究分担者

高木 敏行 (TAKAGI, Toshiyuki)
 東北大学・流体科学研究所・教授
 研究者番号: 20197065

三木 寛之 (MIKI, Hiroyuki)
 東北大学・学際科学フロンティア研究所・准教授
 研究者番号: 80325943