

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03928

研究課題名（和文）Lamb波を用いた非線形超音波法によるボルト締結体の非破壊検査に関する研究

研究課題名（英文）Nondestructive testing of bolt fastened parts using nonlinear ultrasonic method of Lamb waves

研究代表者

福田 誠（Fukuda, Makoto）

秋田大学・理工学研究科・講師

研究者番号：50507671

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：超音波を用いた平板の締結体の非破壊検査法を目的として、高次のラメモードLamb波を用いた2次高調波の利用を検討した。高次のラメモードが伝搬し、2次高調波を検出できることを確認した。このモードのLamb波は理論的には伝搬中で2次高調波が生じないこととされており、従来の基本モードのLamb波と比べて、不要な2次高調波成分を10dB低下できた。この他に、ボルト締結のための平板中に穴を開けたことによる縁部の塑性変形から生じる2次高調波成分の検出を試みた。さらに、非線形成分の一つであるサイドバンドを用いる方法も検討するために、サイドバンド検出用の同軸型探触子について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ボルト締結法は、簡易で精度良く、かつ、全数検査を可能とすることを目標としており、ボルトの緩みや破断による事故を未然に防ぐことが重要である。橋梁などでは、検査者のアクセスのしにくい箇所や、高所での作業など危険を伴う箇所の締結状態を検査するため、検査員の安全を考慮する必要がある。本研究では、離れた位置から締結部に向けてLamb波を送受波する方法を提案するものである。特に、非線形超音波法は初期段階のき裂や接触面の状態を検査できる可能性があり、多くの研究が進められている分野である。本研究の成果このようなボルトの検査の一助に繋がると考えている。

研究成果の概要（英文）：The use of second harmonics using higher-order Lamb waves in the Lamb mode was investigated for the purpose of a nondestructive inspection method for fastening parts of plates using ultrasonic waves. It was confirmed that higher-order Lamb modes could be propagated and the second harmonics components were detected. This mode of Lamb wave is theoretically assumed not to generate second harmonics during propagation, and the unwanted second harmonic components were reduced by 10 dB compared to the conventional fundamental mode Lamb wave. In addition, we carried out to detect second harmonic components generated by plastic deformation of the edges caused by drilling holes in the plate for bolt fastening and to design a coaxial probe for detecting sidebands.

研究分野：超音波工学

キーワード：超音波 非破壊検査 Lamb波 2次高調波 非線形超音波

1. 研究開始当初の背景

機械構造物の組み立てにボルト締結が多用されている。過剰の締め付けや緩みは、ボルトの破損や脱落などの事故につながる恐れがあり、ボルトの保守点検が必要となる。ボルト軸力の測定法としては、超音波法、ひずみゲージ法などが知られている[1]。しかし、超音波を用いるほとんどの手法において温度による影響を受けるため、補正が必要となる。また、ひずみゲージ法は、特殊なボルトやワッシャを用いるため、全てのボルトに適用するにはコストパフォーマンスが悪く、サンプル検査となる問題がある。特に、ボルト締結部が構造体内部に存在し、直接検査ができない場合もあり、様々な状況において検査できることが要求される。このような理由から、補正が必要なく、全てのボルトを簡易に検査できる、新しいボルト-ナットの締結状態の検査法を提案してきた[2-4]。

金属などの固体の接触面に大音圧である有限振幅超音波が入射したときに、接触面の非線形振動により 2 次高調波あるいは分調波などの非線形成分が発生することが見出され、接触型音響非線形性(CAN: Contact Acoustic Non-linearity)という名前で知られるようになった[5]。近年では、閉じた亀裂の検出のような非破壊検査への応用も行われている[6]。また、塑性変形部でも転位や閉じた亀裂が多数存在し、それらが非線形振動したときに高調波が発生することが明らかとなっている[7]。この原理をボルト-ナット締結状態の検査に利用できると考え、これまでに申請者はボルトの塑性変形やねじ山間の CAN による 2 次高調波の検出を実験において確認している[3, 4]。また、ねじ山接触状態が変化することに注目し、超音波の反射係数の変化も観測している[2]。しかし、これらはボルトに直接探触子を取り付けた検討であり、実際の環境ではボルト締結部が構造物の内部に存在するなど直接探触子を取り付けられない場合や、検査員が高所など容易に辿りつけぬ箇所にある場合が考えられる。そのため、離れた位置から超音波エネルギーをボルト締結部まで送り届け、さらにボルトで生じた 2 次高調波成分を離れた位置で検出することが課題となる。

2. 研究の目的

ボルト締結されている鉄骨や橋梁などは、超音波の波長が長ければ、波長に対して薄い板状試料とみなすことができる。このような板状試料の場合、縦波あるいは横波を入射すると試料内部で縦波と横波がそれぞれにモード変換を繰り返し、Lamb 波などのガイド波として伝搬することが知られている。本研究では、この Lamb 波を用いてボルト締結されている板状試料に Lamb 波を伝搬し、ボルト締結状態の評価を試みることを目的とする。

Lamb 波は超音波周波数により速度分散性が強く、様々なモードが励起・伝搬される。板の厚さに対して適切な周波数を選択しなければ、非破壊検査に利用することは困難である。一般には、くさびを用いて超音波を斜角入射する方法が行われている。速度分散曲線から発生させたいモードの Lamb 波の位相速度とくさびの音速から、スネルの法則によって臨界角となるようくさびを設計する。これにより、効率よく Lamb 波を発生・検出することができる。しかし、本研究のような 2 次高調波の検出をする場合、送波時の基本波と受波時の 2 次高調波で位相速度が異なっていることがほとんどである。2 次高調波を受波する際のくさびの角度が臨界角ではないため、受波感度が低下することが問題となる。そこで、申請者は Lamb 波の中にラムモード[8]と呼ばれる $S_0(f \text{ Hz})$, $A_1(2f \text{ Hz})$, $S_1(3f \text{ Hz})$, $A_2(4f \text{ Hz})$ ・・・のように基本波の整数倍の周波数に各モードの位相速度・群速度が一致するモードの利用を考えた。このモードを非破壊検査に応用する例はあるが、ボルト締結評価に利用した例は見当たらず、申請者のオリジナルな点である[9]。

ラムモードは位相速度が同一のため、送受波でくさびを変更する必要は無く、反射法での検討が容易である。申請者が以前開発した二層型圧電振動子(DLPT: Double-Layered Piezoelectric Transducer)を用いた非線形超音波検出システム[10]の利用が可能である。このシステムは、2 次高調波検出感度を従来法と比べ相対的に 80dB 向上できており、CAN により発生するような非常に音圧の小さな 2 次高調波を検出するのに有用である。そのため、反射法を行う前に、透過法によりラムモードの有用性を確認する。本研究では、高次のラムモードの Lamb 波に着目し、透過法による送受波する。

3. 研究の方法

3.1. Lamb 波の発生原理

本実験で用いる Lamb 波について説明する。Lamb 波には平板の厚さ方向対称に伸縮・屈曲し伝搬する S モードと、反対象に伸縮・屈曲し伝搬する A モードがあり、さらに、それぞれに高次のモードが存在する。Lamb 波は平板の厚さ、音速、伝搬する超音波の周波数により、伝わる

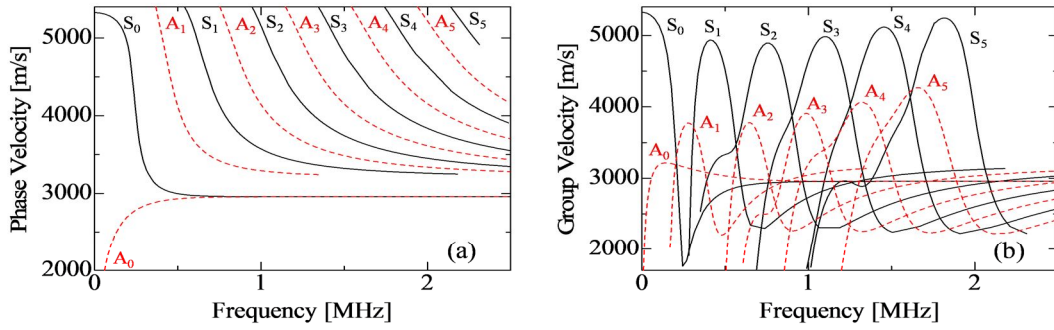


Fig. 1 Dispersion curves of a carbon steel plate. (a) Phase and (b) group velocities.

波の位相速度および群速度が大きく変化する速度分散性を持つ。この特性は Rayleigh-Lamb 周波数方程式で表現される。平板の厚さを $2b$ 、平板中の縦波音速と横波音速を c_L と c_T 、角周波数を ω とすると、S モードと A モードの Rayleigh-Lamb 周波数方程式は式(1)および式(2)となる。

$$\frac{\tan k_1 b}{\tan k_2 b} = -\frac{(k_0^2 - k_2^2)^2}{4k_0^2 k_1 k_2} \dots (1)$$

$$\frac{\tan k_1 b}{\tan k_2 b} = -\frac{4k_0^2 k_1 k_2}{(k_0^2 - k_2^2)^2} \dots (2)$$

ここで、

$$k_1^2 = \left(\frac{\omega}{c_L}\right)^2 - k_0^2$$

$$k_2^2 = \left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - k_0^2$$

である。 k_1 と k_2 を除去し、 k_0 を求めることで、位相速度 c_p は、

$$c_p = \frac{\omega}{k_0} \dots (3)$$

で求められる。また、群速度 c_g は式(4)で定義される。

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \dots (4)$$

3.2. Lamb 波による平板中の欠陥からの 2 次高調波検出

本実験で用いる平板($c_L = 5.77$ m/ms, $c_T = 3.20$ m/ms)の厚さ $2b = 10$ mm の溶接欠陥を有する炭素鋼平板である。位相速度と群速度の速度分散曲線を描くと、図 1(a), 1(b)のようになる。

A2 モードの Lamb 波(0.94 MHz)を基本波として選択する。2 次高調波は A4 モードの Lamb 波(1.88 MHz)となる。これらは同一の位相速度を有している。比較のため、従来法として基本モードの S0, A0 モード Lamb 波(0.50 MHz)による実験も行う。

実験システムを図 2 に示す。発振器からバースト正弦波 10 波を発振し、パイポラ増幅器で 100 V に増幅し、送波用探触子に印加する。超音波はくさびを介して平板に射角入射される。平板中に入射した縦波から Lamb 波が形成されて平板中を伝搬する。伝搬路中に閉じたき裂などの非線形発生源となる欠陥があれば 2 次高調波が発生する。Lamb 波は受波用探触子により受波される。受波された信号はオシロスコープで観測される。

4. 研究成果

4.1. ラメモード Lamb 波による平板中の欠陥からの 2 次高調波検出

ラメモード Lamb 波の受波波形とそのスペクトルを図 3(a), 3(b)に示す。また、従来法の Lamb

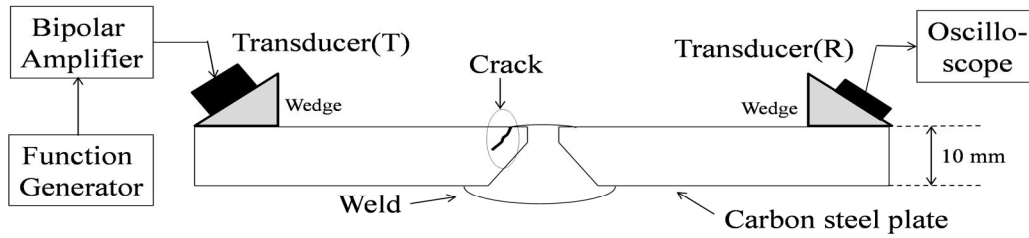


Fig. 2 Experimental setup.

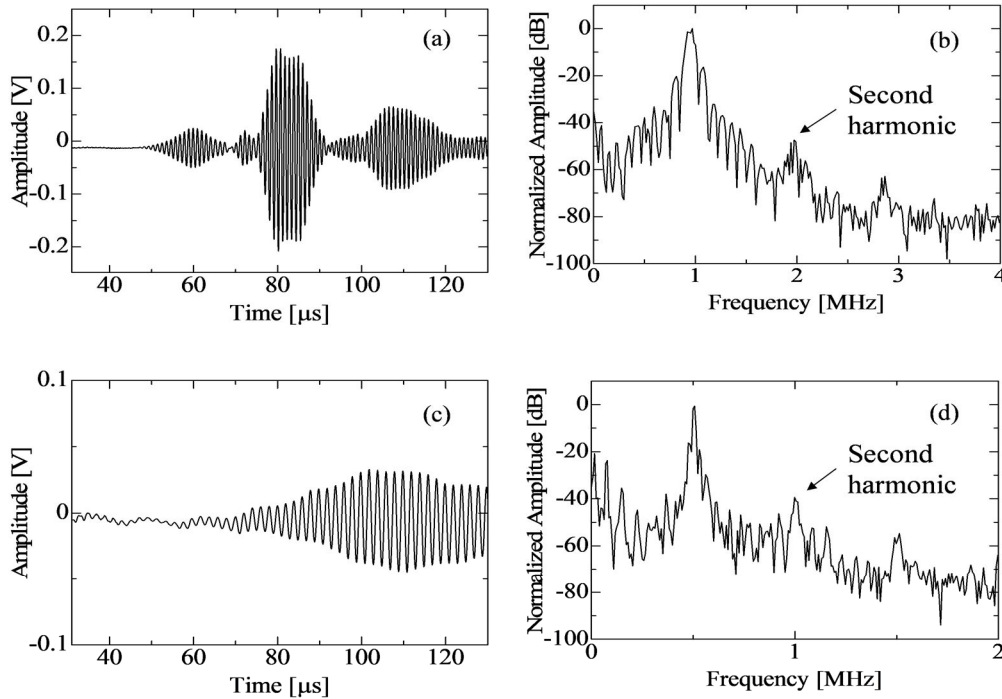


Fig.3 (a) Received waveform and (b) its spectrum using Lamé mode Lamb waves.
(c) Received waveform and (d) its spectrum using conventional Lamb waves.

波の受波波形を図 3(c), 3(d)に示す。ラメモード Lamb 波の 2 次高調波成分は約 -50 dB 検出されたのに対し、従来の Lamb 波では 2 次高調波成分は約 -40 dB 検出された。このように、ラメモードの場合の 2 次高調波成分は、従来の方法よりも約 10 dB だけ小さくなった。どちらも微小欠陥によって発生した 2 次高調波成分は検出されているものと考えられるが、ラメモードを用いることで伝搬過程において発生する 2 次高調波成分が抑制されたため約 10 dB だけ小さくなったものと考えられる。これらの結果は文献[11]に掲載される。

2 次高調波成分は、トランスデューサ接着面や電源などで生じるため、プレートに亀裂が見られない場合でも検出されてしまう問題がある。特に、有限振幅超音波を使用すると、これらの成分を完全に除去することが困難となる。今後は、複数の低振幅超音波を送波し、き裂部分で重ね合わせて振幅を増大させる wave mixing 法の利用の検討が考えられる。

4.2. Lamb 波による平板中に開いた丸穴の縁部からの 2 次高調波検出

本研究では、ボルトの締結までラメモード Lamb 波の利用を検討するには至らなかったが、上記のほかにボルト締結のための穴を開けた際、塑性変形によって穴の縁部から生じる 2 次高調波の検討を報告している[12]。アルミニウム平板に穴を開け、穴の縁部を伝搬するように S0 モード Lamb 波を送波した。穴を開けた結果、2 次高調波成分が 3 dB 増加した。増加した理由としては、穴を開けたことにより、穴の周辺部が塑性変形し、2 次高調波が発生したのと考えられ

る。

さらに、丸穴の周辺に傷を持った場合について検討する。丸穴の縁部をやすりでランダムに傷をつけ、2次高調波を検出した。やすりで傷をつけたことにより、2次高調波が減少する結果となった。2次高調波が減少した理由については、縁部につけられた傷により Lamb 波が散乱したためではないかと考えられる。穴を開けているので周辺部には塑性変形が起きているため、2次高調波は発生していると考えられる。Lamb 波の波長は 5 mm 程度である。傷のサイズは波長と同程度かそれよりも小さいサイズである。レイリー散乱による散乱減衰の式は散乱体が結晶粒であるとして定義されているが、丸穴周辺部につけた傷も先端部などを粒形とみなせばレイリー散乱が起きていると考えてよい。レイリー散乱は周波数の 4 乗に比例して散乱減衰が大きくなる。したがって、周波数が 2 倍である 2 次高調波の方が基本波よりも減衰が顕著になる。そのため、傷をつけた平板では 2 次高調波が減少したものと考えられる。本検討の具体的な応用例としては、丸穴を開ける製造工程での非破壊検査があげられる。正常に丸穴が開けられた場合の 2 次高調波を基準値として計測しておき、丸穴を開ける過程でのなんらかの不具合で丸穴の周辺に傷が生じた場合には、基準値よりも小さな 2 次高調波が検出されることになる。このように、2 次高調波に注目することで、丸穴周辺部の健全性を確認できる可能性が示された。

4.3. サイドバンドを用いた超音波非破壊検査のための同軸型探触子の提案

また、非線形超音波法による非破壊検査では、低周波（ポンプ波）と高周波（プローブ波）の 2 つの超音波をき裂に入射することで生じるサイドバンドを検出することで、非破壊検査を行う方法も提案されており、サイドバンド検出のための同軸型探触子についての検討も行った[13]。提案した同軸型探触子は、ポンプ波用のリング型振動子とプローブ波用の円板型振動子から構成され、サイドバンドの発生に適切なリング型振動子の内径と円板型振動子の直径の比率を有限要素法により数値計算で求めた。また、一例として閉じたき裂を有する音場に本提案の同軸型振動子によりサイドバンドを発生できることを確認した。

今後は、これらの非線形超音波法を利用したボルト締結評価法の検討が必要となる。

<引用文献>

- [1] 酒井, “増補ねじ締結概論”, 養賢堂, pp.108-113, 2003.
- [2] M. Fukuda et. al. : “Evaluation Method of the Bolt Conclusion Using the Scattering Parameter for Ultrasonic Waves”, J. Inst. Industrial Appl. Eng., vol. 3, no. 2, pp. 80-84, 2015.
- [3] 福田誠, et. al. : “軸力に対する二次高調波超音波の増加分を用いたボルト締結評価に関する一検討”, 電子情報通信学会論文誌 A, vol. J96-A, no. 8, pp. 590-592, 2013.
- [4] M. Fukuda et. al. : “Detection of a second harmonic ultrasonic component generated from a fastened bolt using a double-layered piezoelectric transducer”, IEICE Electronics Express, vol. 6, no. 20, pp. 1438-1443, 2009.
- [5] Solodov et. al. , “CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solid”, Ultrason., Vol.40, pp.621-625, 2002.
- [6] Ohara et. al. , “High-Selectivity Imaging of Closed Cracks in a Coarse-Grained Stainless Steel by Nonlinear Ultrasonic Phased Array Method”, NDT&E International, Vol.91, pp.139-147, 2017.
- [7] Jin et. al. , “Dynamic Acousto-Elastic Response of Single Fatigue Cracks with Different Microstructural Features: An Experimental Investigation”, Journal of Applied Physics, Vol.124, pp.075303-1-14, 2018.
- [8] 琵琶, 松田, “ラム波の分散性と高調波発生挙動”, 非破壊検査, Vol.64, pp.554-559, 2015.
- [9] M. Fukuda et. al.: “Pulse-Echo Detection of Lamé Mode Lamb Wave for Non-Destructive Testing Using Nonlinear Ultrasonic Wave Method”, Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPM2018) (Kobe, Japan), Paper No. P1-13, 2018.
- [10] M. Fukuda, et. al. : “Real time extraction system using double-layered piezoelectric transducer for second-harmonic ultrasonic pulse waves”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, no. 5B, pp. 4556-4559, 2006.
- [11] M. Fukuda, M. Nishihira: Weld Root Crack Detection in Metal Plates Using Nonlinear Higher-Order Lamb Waves in Lamé Mode, IEEJ Journal of Industry Applications, vol.13, no.6, in press (2024)
- [12] 福田誠, 西平守正: 2次高調波 Lamb 波を用いた平板に開いた丸穴の縁部の健全性評価, 日本素材物性学会誌, vol.33, no.1/2, pp.7-11 (2023)
- [13] 福田誠, 西平守正, 松澤亮: サイドバンドを用いた非線形超音波法による非破壊検査のための同軸型探触子の提案, 日本素材物性学会誌, Vol.34, no.1/2, in press (2024)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 福田誠, 西平守正	4. 巻 33
2. 論文標題 2次高調波Lamb波を用いた平板に開いた丸穴の縁部の健全性評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本素材物性学会誌	6. 最初と最後の頁 7~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5188/sjsmerj.33.1_2_7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 福田誠, 西平守正, 松澤亮	4. 巻 34
2. 論文標題 サイドバンドを用いた非線形超音波法による非破壊検査のための同軸型探触子の提案	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本素材物性学会誌	6. 最初と最後の頁 15~19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Makoto Fukuda, Morimasa Nishihira	4. 巻 13
2. 論文標題 Weld Root Crack Detection in Metal Plates Using Nonlinear Higher-Order Lamb Waves in Lame Mode	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 尾形瞬, 西平守正, 福田誠
2. 発表標題 超音波を用いたWave Mixing法における閉じたき裂の位置と非線形成分検出量の解析
3. 学会等名 光環境DX研究学会 第2回年次学術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀島司, 西平守正, 福田誠
2. 発表標題 プローブ波とポンプ波を用いたき裂検出における2次高調波超音波の駆動電圧依存特性
3. 学会等名 日本音響学会東北支部第6回東北地区音響学研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐久間裕太, 西平守正, 福田誠
2. 発表標題 高調波検出におけるLamb波のWave mixing法のための送波信号の検討
3. 学会等名 日本音響学会東北支部第6回東北地区音響学研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐久間 裕太, 西平 守正, 福田 誠
2. 発表標題 有限要素法を用いたLamb波のWave mixing法のための振幅距離特性解析
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 第1回NDE4.0シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松澤 亮, 福田 誠, 西平 守正
2. 発表標題 閉じたき裂のセンシングのための一探触子型振動子の特性解析
3. 学会等名 光環境DX研究学会 第1回年次学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐久間 裕太, 福田 誠, 西平 守正
2. 発表標題 平板中の閉じたき裂から生じる2次高調波のWave mixing法による検出感度向上の一検討
3. 学会等名 光環境DX研究学会 第1回年次学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀島 司, 福田 誠, 西平 守正
2. 発表標題 プローブ波とポンプ波を用いたき裂を有するガラスからの2次高調波超音波の検出実験
3. 学会等名 光環境DX研究学会 第1回年次学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚田 颯太, 福田 誠, 西平 守正
2. 発表標題 Lamb波のLameモードを用いたNon-collinear wave mixing法の実験的検討
3. 学会等名 日本音響学会東北支部第5回東北地区音響学研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾形 瞬, 福田 誠, 西平 守正
2. 発表標題 閉じたき裂における非線形超音波のサイドバンド抽出法の一検討
3. 学会等名 2022年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松澤 亮, 福田 誠, 西平 守正
2. 発表標題 円環型圧電振動子の変位分布の有限要素解析
3. 学会等名 2022年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松澤亮, 福田誠, 西平守正
2. 発表標題 非線形超音波の振幅変調効果を用いた閉じたき裂の方向検出の試み
3. 学会等名 日本音響学会東北支部 第4回東北地区音響学研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 福田誠, 西平守正	4. 発行年 2024年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 356
3. 書名 超音波による非破壊検査・材料評価技術の進展 (第13章 2次高調波Lamb波を用いた平板に開いた丸穴の縁部の健全性評価の検討)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>秋田大学研究者総覧 https://akitauiinfo.akita-u.ac.jp/search?m=home&l=ja 秋田大学 電気電子工学コース 福田・西平研究室 http://www.ee.akita-u.ac.jp/lab/lab06/lab06.html</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------