

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01420

研究課題名(和文) 先進センシング技術を利用した光・音・振動の相互作用に基づく潜在き裂の非破壊評価

研究課題名(英文) Nondestructive evaluation of crack in structural material based on interactions of light, sound, and vibration obtained by advanced sensing technique

研究代表者

中畑 和之(Nakahata, Kazuyuki)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：20380256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、き裂の応力状態に応じて生じる動的な変化(振動や波動)を利用して、広範囲からき裂の検出を行い、さらに局所検査によってき裂の同定を行う先進的非破壊評価法を開発することである。ここでは、光・超音波・共振の物理現象を融合した新しい非破壊検査法について検討を行った。広域検査と局所検査に分け、それぞれ異なる指標で、き裂の評価を行うことが特徴である。大型構造部材を想定し、広域検査では対象物に遠隔で超音波を発生させ、それを無線センサで受信するシステムを考えた。局所検査では、レーザー超音波とアレイセンシングを融合したき裂のイメージングを検証した。概ね、当初の予定通りに研究が遂行できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会基盤構造部材に発生するき裂を検出しそれを評価するために、様々な非破壊検査法に関する研究が行われているが、決定的な方法は確立されていない。本課題では、大型構造部材に対しても、き裂を評価できる方法が構築できないかと考えた。過去のメンテナンス情報がない状態でも広範囲からき裂を検出でき、広域検査で範囲を絞った後にき裂の正確な位置・高さを同定する非破壊検査手法を確立することは、昨今の社会インフラの老朽化とメンテナンスを考える上で、非常に重要である。ここでは、光、音、振動を連成させた学際的なアプローチでこれに対処するのが特徴であり、それぞれの手法に新規性と信頼性を有する。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop a state-of-the-art non-destructive evaluation method that utilizes dynamic properties (vibrations and waves) that occur in response to the stress state of the crack face to detect cracks over a wide area and evaluate the crack's accurate location and shape through local inspection. Here, we investigated a new non-destructive testing method that combines the physical phenomena of laser, ultrasonic, and vibration resonance. The method is categorized by wide-area and local inspections, each of which evaluates cracks using different indicators. Assuming a large structural component in civil engineering, for wide-area inspection, we manufactured a system in which ultrasound is generated remotely at the target object and received by a wireless sensor node. We verified flaw imaging for local inspection that combines laser ultrasound and array sensing. The research was successfully carried out as originally planned.

研究分野：非破壊評価

キーワード：振動 波動 無線センシング レーザ超音波 開口合成法 アレイイメージング

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造部材に発生するき裂を検出・評価するために、様々な非破壊検査法に関する研究が行われている。その中で、金属部材に発生するき裂に超音波を送信したときに、き裂で発生する波動の高調波非線形成分を利用した非破壊検査法が提案されているが、高周波は遠方では減衰しやすいため、大型構造部材には適用が難しい。そこで、大型構造部材に対しても、き裂を評価できる方法が構築できないかと考えた。現場応用を考える上で想定すべきことは次の2点。(a)過去のメンテナンス情報がない状態でも、広範囲からき裂の有無を推定すること、(b)広域検査で範囲を絞った後、最終的にき裂の正確な位置・高さを同定すること、である。特に、閉じたき裂(一旦開いたき裂面が圧縮応力によって接触しているもの)を対象としたアプローチを検討する必要があった。

2. 研究の目的

本研究は、き裂の応力状態に応じて生じる動的な変化(振動や波動)を利用して、広範囲からき裂の検出を行い、さらに局所検査によってき裂の同定を行う先進的非破壊評価法を開発することを目的とする。ここでは、大型構造部材を想定し、対象物に遠隔で超音波を発生させ、それを無線センサで受信するシステムを考えた。レーザ光の制御技術を利用し、光・超音波(音)・共振(振動)の物理現象を融合した新しい非破壊検査法について検討を行った。本課題では、複数の検討項目があり、それぞれ研究成果を報告する。

3. 研究の方法

本研究は、広域検査と局所検査に分けて実施した。広域検査では、(1)局所振動による超音波の振幅変化を利用した閉じたき裂の非破壊検出、(2)和差調波共振を利用した閉口き裂の検出に関する基礎的研究、(3)ゲート制御レーザ発振による任意周波数の超音波の発生に関する基礎的検討について検討を行った。広域検査でき裂が検出できたとして、局所検査として、(4)レーザ照射によって固体内に発生した超音波の指向性の解析的検討、(5)レーザ超音波法による縦波と横波を利用した固体中のアレイイメージングについて検討を行った。

4. 研究成果

【広域検査】

(1) 局所振動による超音波の振幅変化を利用した閉じたき裂の非破壊検出

き裂によって発生する非線形成分は送信周波数のエネルギーと比べて微小であることから、超音波の伝搬距離が大きい場合などは、非線形成分の検出が困難であることが考えられる。これまで、著者らは、疲労き裂面に作用する圧縮応力を静的に変化させながら超音波透過試験を行った場合に、透過波形が変化することや、基本周波数のフーリエ振幅のピーク値が低周波側へシフトすることを明らかにしてきた(構造工学論文集, Vol.66A, pp.529-539, 2020)。本研究ではき裂面に動的に圧縮/引張応力を作用させた時の、超音波の透過波形の変化について調査した。ここでは、図1に示すように加振器で試験片を加振することで、き裂面に作用する応力状態をわずかに変化させることを試みた。き裂振動の各フェイズで超音波を送信することで、透過計測を行った。

このとき、振動による応力変化は微小であるため、透過波の微弱な変化を高感度に観察するための方法と指標を提案した。この指標は、超音波透過波のピーク周波数の変化を基準化したものである(構造工学論文集, Vol.69A, pp.617-624, 2023)。き裂がない場合、共振/非共振にかかわらず指標に変化がみられない。一方、き裂があれば共振時に指標が変化する。この変化は、固有振動数と同じ周期で現れることから、き裂面の接触状態を反映していることがわかった。加振器の入力を大きくすれば、透過波のフーリエ振幅も大きく変化することから、振動を併用した超音波検査は、広範囲からき裂の有無を推定するのに有用であることを示した。

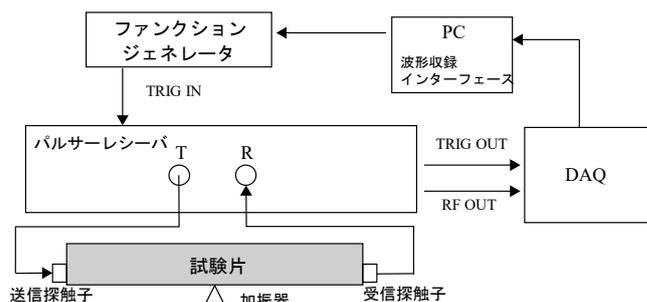


図1: 振動試験を行いながら透過超音波を測定するシステムの構成

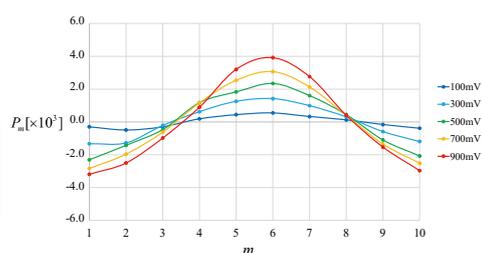
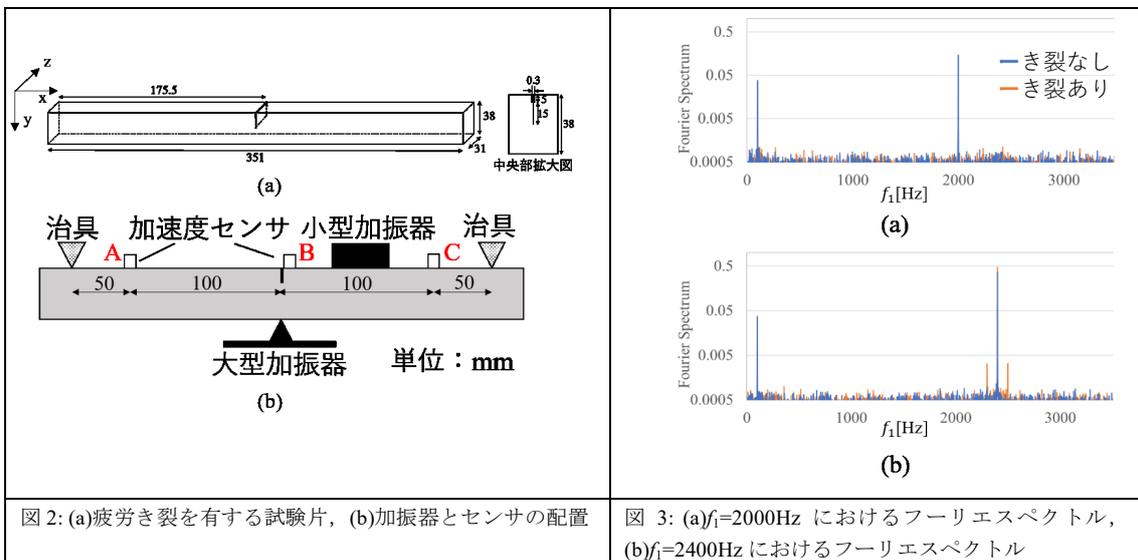


図2: 曲げ1次モードの固有振動数で疲労き裂試験片を揺らしたときの超音波透過波のピークスpekトルの変化

(2) 和差調波共振を利用した閉口き裂の検出に関する基礎的研究

非線形超音波法は、き裂の位置があらかじめ既知である場合に、局所的に大振幅超音波を送信することで、き裂の閉口部の長さが評価できる。しかし、土木構造部材は長尺で大型であるため、広い範囲から閉口した疲労き裂の有無を判断するだけでも有用である。ここでは、疲労き裂試験片に対して加振器を用いた強制加振を行い、疲労き裂面の応力状態を動的に変化させ、そのときに発生する非線形性を用いて疲労き裂の非破壊評価を行うことを試みた。ここでは、2つの加振器を用いて振動数の異なる加振を同時に行うことで、和差調波共振の発生を利用した疲労き裂の検出を検討した。振動だけでどの程度把握が可能かを調査した。

計測実験では、図2(a)に示すような疲労き裂試験片と、同寸法の疲労き裂のない健全な試験片を用いた。大型加振器による振動数を f_1 とし、小型加振器の振動数を $f_2=100\text{Hz}$ として計測を行った。1秒間のデータサンプリングを行い、フーリエスペクトルのピークの出現について調べた。 $f_1=2000\text{Hz}$ で加振した場合のセンサBで計測された波形のフーリエスペクトルを図3(a)に示す。この結果から、加振振動数以外のピークは見られないことがわかる。一方、試験片の曲げ1次固有振動数である $f_1=2400\text{Hz}$ で加振した場合のセンサBで計測された波形のフーリエスペクトルを図3(b)に示す。この実験結果から、疲労き裂試験片において、 2300Hz と 2500Hz にピークが現れていることが確認できた。これらは、 100Hz と 2400Hz の和と差の関係であることから、界面のたたき合いに起因する和差調波共振であることが推測できる。このように、和差調波を用いることで、対象構造部材からき裂の有無を推定できる可能性があることが示唆された(土木学会第76回年次学術講演会, 2021年9月)。



(3) ゲート制御レーザー発振による任意周波数の超音波の発生に関する基礎的検討

レーザー超音波法は、レーザー光を固体表面に照射することで超音波を固体内に送信し、損傷からの散乱波を受信することで検査を行うものである。しかし、非破壊検査用のレーザー光源は、パルスを発振するものか、連続的にレーザーを発振するものかのいずれかであり、超音波の周波数帯域を調整することは一般には難しい。そこで、本研究ではゲート信号に応じてレーザーの発振をON-OFFすることで、発生する超音波の周波数制御を行うシステムを開発した。本システムを用いて 100kHz 以下の任意の周波数の超音波の発生を目指して検討を行った。

ゲート制御によるレーザー光の発振原理を示す。図4(a)はレーザーのパルス出力を表しており、図4(b)のようなゲート信号で、レーザー射出のON-OFFを行うことで、図4(c)に示すパルス出力が得られる。いま、ゲート周波数を f とし、ゲートONの時間(ゲートパルス幅)を g とする。レーザーが照射されている間は固体内に超音波が発生するため、 g を調整することで、ゲート周波数 f の超音波が固体内に発生する。

図5(a)に示すようなI型ステンレス材を用いて、システムの検証を行った。レーザー発振点から、 500mm 、 1000mm 、 1500mm 、 1900mm 離れた地点で、加速度センサを用いて超音波の計測を行った。 $f=5\text{kHz}$ で発振し、計測地点ごとに収録した加速度波形を図5(b)に示す。また、 500mm 離

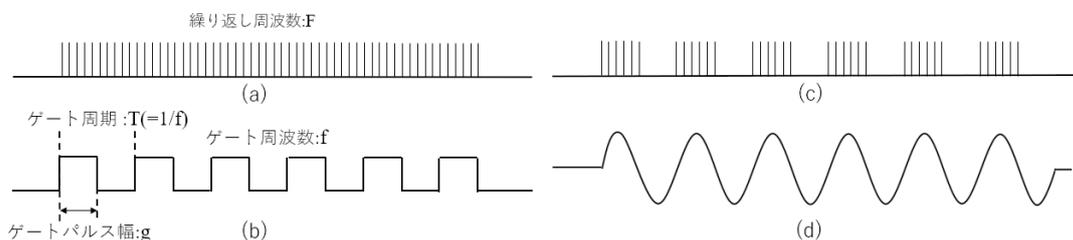


図4: 高繰り返しレーザー光源を利用した超音波の周波数制御の概要図。(a) パルスレーザーの繰り返し周波数, (b) ゲート信号, (c) レーザー出力, (d) 内部に発生する超音波の波形

れた地点で収録した波形のフーリエスペクトルを図 5(c)に示す. 波の到達時間より, 波の伝搬速度はおよそ 2000m/s であり, ガイド波として伝搬していることが考えられる. また, 図 5(b)のグラフでは, 5kHz にピーク値が確認されたことから, 所望の周波数を発生させることができた (第 30 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2023 年 1 月).

以上のように, 長距離伝搬する超音波が発生できたため広域検査に有用であると考えられる. このとき, 遠方で超音波を計測するために, 加速度センサや超音波センサを無線通信で使用できるようにノードを組み, 波形処理および同期処理がセンサノードに組み込まれている.

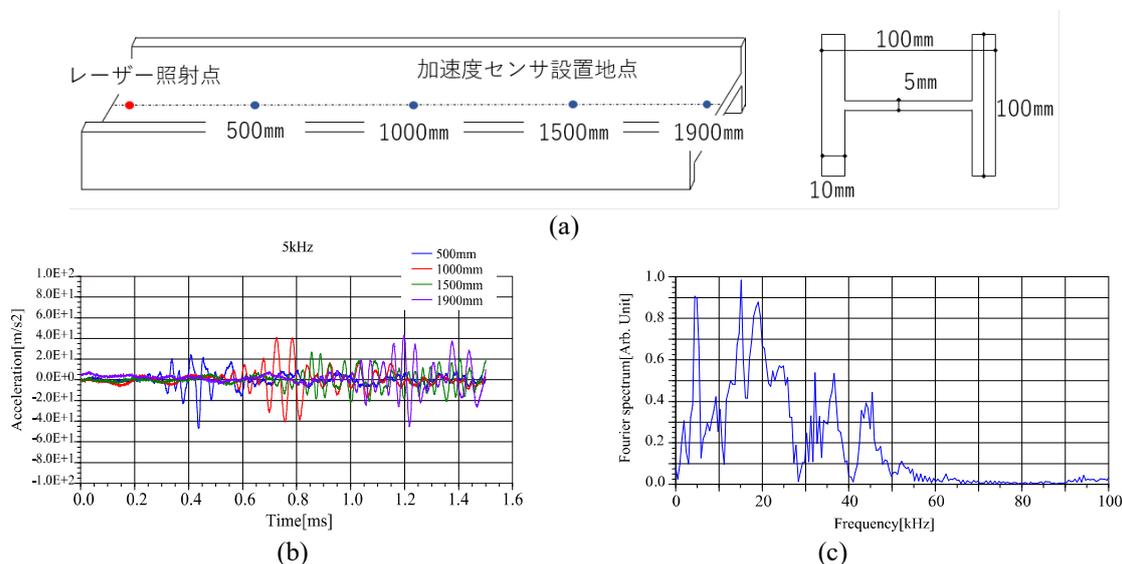
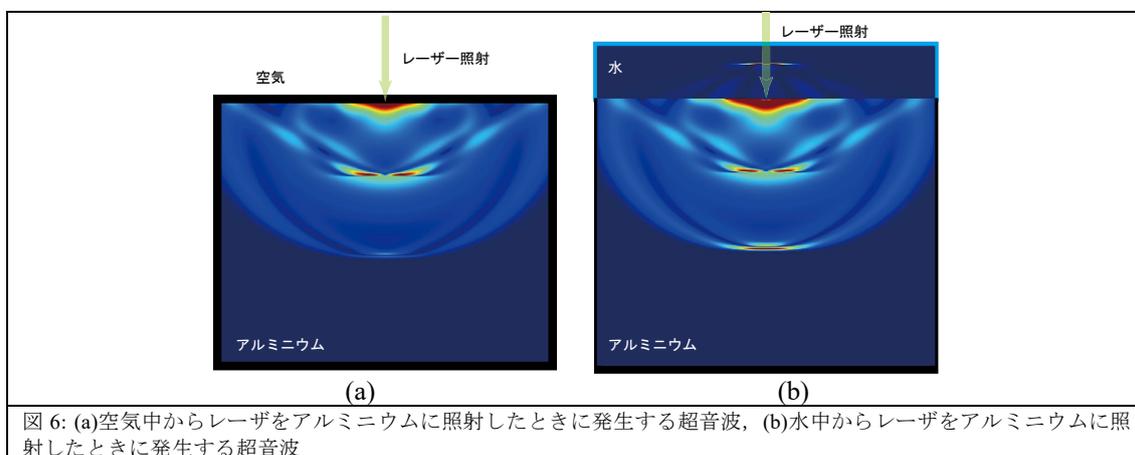


図 5: (a) I 型断面を有するアルミ試験体, (b) $f=5\text{kHz}$ のゲート制御レーザーで発振し, 各地点で計測した加速度波形. (b) 500mm 離れた地点での収録波形のフーリエスペクトル

【局所検査】

(4) レーザ照射によって固体内に発生した超音波の指向性の解析的検討

材料表面にレーザーを照射すると構造部材の内部に超音波が発生するが, これは短時間にパルスレーザー光が作用することで急激な熱応力が生じ, 応力波として伝搬するためである. ここでは, 光超音波の発生と伝搬を数値的にモデル化し, 実験によって数値モデルの妥当性を確認した. ここでは, 有限積分法(Finite Integration Technique: FIT)のスキームを用いて, 熱伝導問題と波動問題を連成して解いた. 非破壊検査の水浸試験において水中でレーザーを照射する場合を考え, 固体と液体の界面を含む波動場を想定して伝搬シミュレーションを実施した. 図 6 に示すように, レーザを被検体表面に直接照射する場合 (図 6(a)) と, 水中から照射する場合 (図 6(b)) では, 発生する縦波の強度が異なることが示された. これは, 水が上部に存在することで, 熱膨張によって発生した応力に対して反力が作用するため, 深さ方向の垂直応力が大きくなり, 光超音波の振幅も大きくなったためであると考えられる. 計測においても同様の傾向が観察されることから, 提案した連成解析のための FIT は良好に現象を模擬できる事を示した. (土木学会論文集, Vol.79, No.15, 22-15004, 2023)



(5) レーザ超音波法による縦波と横波を利用した固体中のアレイイメージング

熱弾性効果あるいはアブレーションによって発生する光超音波を用いて固体内部の欠陥評価

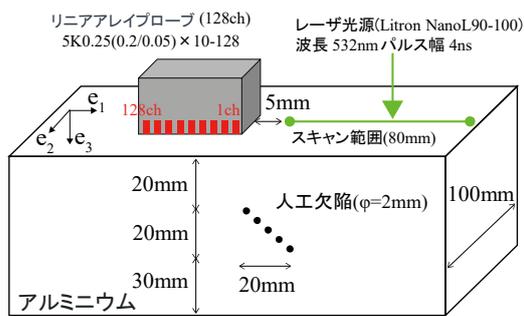


図 7：人工欠陥を有するアルミニウム供試体

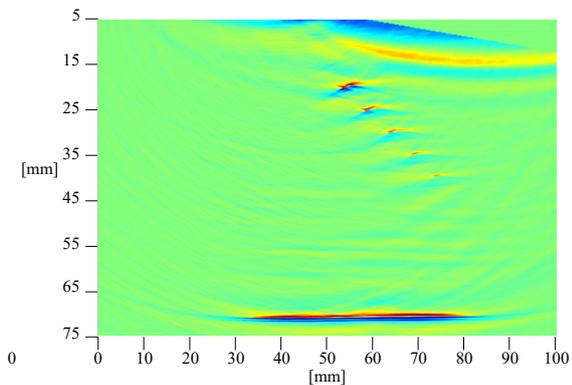


図 8：人工欠陥を有するアルミニウム供試体

を行うレーザー超音波法が近年研究されている。ここでは、局所検査を見据えて、アレイプローブを採用し、受信においても音響集束を動的に変えながら開口合成イメージングを行うことを考えた。レーザーから光超音波を複数の位置で発生することで仮想的に多素子アレイ送信を模擬できる。レーザーの照射ピッチを小さくし、照射点を増やすことでイメージングの分解能向上やノイズ減少が期待できる。固体の場合、レーザー照射によって縦波と横波の2つのモードが発生し、その指向性も異なるため、これらの特性を考慮した映像化を検討した（レーザー学会 第25回光音響イメージング技術専門委員会, 2024年2月）。

ここでは、レーザーの光学経路を設計し、意図した位置に0.05mmピッチでレーザー送信できるようにスキャンシステムを開発した。このシステムを利用して、固体中のきずの映像化手法を開発した。映像化原理は、レーザーを照射しながら、各アレイ素子で散乱波を受信し、照射(送信)と受信の多数の組み合わせの波形をポスト処理で開口合成する全波形サンプリング処理方式である。

図7にスキャンエリアとプローブとの位置関係を示す。計測ではアレイ素子が並ぶ方向の1ラインでレーザーを照射した。アレイ素子から最も離れた照射点は85mmで、最も近いのが5mmである。また、スキャン終了地点の真下に、表面から一番浅い横穴欠陥が来るように配置した。80mmの範囲を0.1mmピッチでレーザーを送信したときのイメージング結果を図8に示す。図8は、縦波に加えて横波モードを加えたデュアルモード映像である。縦波モードだけでは、深い位置の欠陥の指示が小さかったが、デュアルモードだと深部の欠陥の指示が大きくなるのがわかった。一方で、表面に近い部分で偽像が現れているが、これはレイリー波の影響であると考えられる。横波とレイリー波の音速は近いので、横波を用いるイメージングにはこの影響が入りやすい。

本システムはレーザーの照射ピッチを自在に調整できるため、照射点を増やすことで画像分解能が向上し、画像ノイズが平均化されることがメリットである。縦波だけでなく横波も加えたデュアルモードイメージングによって深部の欠陥再構成能が向上した。横波モードを用いる場合、レイリー波との干渉が問題となり、これを除去する必要がある。これについては、今後の検討課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Koehler Bernd, Schubert Lars, Barth Martin, Nakahata Kazuyuki	4. 巻 23
2. 論文標題 Electromechanical Reciprocity Applied to the Sensing Properties of Guided Elastic Wave Transducers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 150 ~ 150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s23010150	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 川崎 藍流、小野寺 慧、丸山 泰蔵、高橋 学、勝田 順一、中畑 和之	4. 巻 69A
2. 論文標題 局所振動による超音波の振幅変化を利用した疲労き裂の非破壊検出の試み	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 617 ~ 624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.69A.617	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 松尾大聖, 丸山泰蔵, 中畑和之	4. 巻 22
2. 論文標題 複数周波数MUSIC法を用いた超音波イメージングの実験的検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 19-221216
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 Koehler Bernd, Takahashi Kanta, Nakahata Kazuyuki	4. 巻 34
2. 論文標題 Application of Reciprocity for Facilitation of Wave Field Visualization and Defect Detection	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Research in Nondestructive Evaluation	6. 最初と最後の頁 222 ~ 246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09349847.2023.2261878	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 三木 陽大, 廣瀬 悠人, 丸山 泰蔵, 中畑 和之
2. 発表標題 有限積分法を用いた光音響波の伝搬シミュレーションと実験による検証
3. 学会等名 レーザー学会 第16回光音響イメージング技術専門委員会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山内謙汰, 丸山泰蔵, 中畑和之
2. 発表標題 固体へのレーザー照射による弾性波の発生とその波形特性について
3. 学会等名 土木学会四国支部 令和4年度技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎藍流, 小野寺慧, 丸山泰蔵, 中畑和之
2. 発表標題 振動時の疲労き裂の開閉口に伴う超音波透過波形の動的変化について
3. 学会等名 土木学会四国支部 令和4年度技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木 陽大, 丸山 泰蔵, 中畑 和之
2. 発表標題 動弾性・音響有限積分法によるレーザー超音波法の数値シミュレーション
3. 学会等名 第29回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷平智紀, 小野寺慧, 丸山 泰蔵, 中畑 和之
2. 発表標題 局所欠陥共振の数値モデリングに関する基礎的検討
3. 学会等名 IIP2023 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村蒼嗣, 山内謙汰, 丸山泰蔵, 中畑和之, 林高弘
2. 発表標題 ゲート制御レーザー発振による低周波超音波の発生に関する基礎的検討
3. 学会等名 第30回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuyuki Nakahata, Miki Akihiro, and Taizo Maruyama
2. 発表標題 A Fluid-solid Coupled FIT Simulation for Photoacoustic Wave Propagation and Its Experimental Validation
3. 学会等名 第 43 回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎藍琉, 小野寺慧, 丸山泰蔵, 中畑和之
2. 発表標題 振動による疲労き裂の開閉口が超音波透過波形に及ぼす影響の測定
3. 学会等名 土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 朝日 快佳, 丸山 泰蔵, 中畑 和之
2. 発表標題 非線形波動解析のためのEFITの適用に関する検討
3. 学会等名 土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyuki Nakahata, Kei Onodera, Taizo Maruyama
2. 発表標題 Mathematical modeling of ultrasonic refraction generated at partially closed crack face
3. 学会等名 第 44 回 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 廣瀬悠人, 中畑和之
2. 発表標題 アレイプローブを利用した固体中の3次元光超音波イメージング
3. 学会等名 第31回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中畑 和之, 廣瀬悠人, 中村太一
2. 発表標題 光音響縦波と横波を利用した 固体中のデュアルモードイメージングに関する研究
3. 学会等名 レーザー学会 第25 回 (第2 期第14 回) 光音響イメージング技術専門委員会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中畑和之, 山内謙汰, 林高弘
2. 発表標題 ゲート制御レーザー発振による光音響チャープ波の生成とその検証
3. 学会等名 電子情報通信学会 US研究会 (アコースティックイメージング, 非破壊検査, 医用超音波, 超音波一般)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中畑和之, 小野寺慧, 丸山泰蔵
2. 発表標題 部分閉口き裂面で屈折する超音波のモデル化に関する基礎検討
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2023年度秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuyuki Nakahata, Akihiro Miki, Taizo Maruyama
2. 発表標題 Simulation of Photoacoustic Wave Generation and Propagation in Fluid-solid Coupled Media Using Finite Integration Technique
3. 学会等名 1st OLYMPIAD in ENGINEERING SCIENCE (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	林 高弘 (Takahiro Hayashi)	大阪大学・大学院工学研究科・教授	
	(30324479)	(14401)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	都築 伸二 (Tsuzuki Shinji) (60236924)	愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授 (16301)	

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			
ドイツ	Fraunhofer Institute IKTS			