

令和 3 年 8 月 18 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01524

研究課題名（和文）振動と音の相互作用を利用した閉口ひび割れの定量的非破壊評価に関する研究

研究課題名（英文）Quantitative nondestructive evaluation of closed cracks using interaction of sound and vibration

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） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、振動数 $F$ で振動している閉口き裂に周波数 $f$ の超音波を送信し、閉じたひび割れを音と振動の相互作用によって非破壊的に評価することである。まず、き裂閉口時と開口時の超音波透過波形の違いを数理的に明らかにした。また、定常状態においてき裂面でのクラッピングによって生じる和差調波( $f \pm F$ )が計測でき、き裂からの非線形振動が卓越する条件を見いだした。さらに、構造部材を対象とした局所きずの超音波アレイ映像化に成功した。今後は、非定常状態において超音波プローブで非線形成分を検出すること、実際のき裂に対して非線形超音波映像化の検討することが課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

き裂が閉じている場合は、非破壊検査時において過小評価するケースが多く、閉じたき裂の定量的評価は社会インフラの維持管理の高度化において悲願であった。本研究の独創的な点は、き裂界面の開閉口に起因する振動の非線形現象を超音波で計測することである。この非線形現象を数理モデルに基づいて説明し、さらにこれらの発生が顕著になる条件を明らかにできたことは学術的にも有意義である。き裂界面の非線形現象の発現について基礎的知見を得ることができたので、今後は、実用に向けたセンシング法を構築することが課題である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a quantitative nondestructive evaluation method of closed cracks in a structural component using the interaction of sound and vibration. This method utilizes a nonlinearity due to contact and separation behaviors of a crack face.

First, we investigated the ultrasonic transmission waveforms in the case of contacted and separated conditions of the crack face experimentally and numerically. Then, the summed and differential harmonics by the crack face interaction were measured in a steady-state using oscillation sources with two different frequencies. The next step is to measure the nonlinearity using ultrasonic transducers. Furthermore, we succeeded in ultrasonic imaging using a low-frequency array transducer designed for the concrete structure. As future works, we combine nonlinear ultrasonics to array imaging and validate it for actual cracks.

研究分野：応用力学

キーワード：閉口き裂 振動 超音波 和差調波共振 固有振動数 コンクリート 非破壊検査

## 1. 研究開始当初の背景

橋梁等の長尺なコンクリート部材に発生する曲げひび割れは引張り側に発生するため、それは技術者がアクセスしにくい桁下等である場合が多い。近年では無人航空機を遠隔操作しながら、桁下のひび割れの写真を撮る方法も提案されているが、初期ひび割れはその幅が微小であるために画像では見落とす可能性もある。また、ひび割れが表面から確認できたとしても、表面ひび割れと内部に進展したひび割れの深さが異なる場合も少なくない。一般的に、載荷時にはき裂先端に引っ張り塑性域が形成されるものの、除荷時は圧縮となりき裂端部の界面は強い力で接触する。このとき、超音波やサーモグラフィ等の非破壊検査によってひび割れ深さを推定しようとした場合、き裂先端に行くにつれて強い力で閉じているため端部の位置が正確に評価できず、実際のき裂深さよりも過小に診断してしまうことになる。この理由は、接触界面では超音波、あるいは熱量が透過することで明確な反射信号・熱拡散が見られないためである。このように、ひび割れを非破壊検査する上で問題となることは、ひび割れが閉じていることであり、閉じた状態で定量的に評価することがこれまでの課題であった。

## 2. 研究の目的

本研究の当初の目的は、ハンマー加振等によって固有振動モードを励起し、振動している部位にオーダーの異なる周波数の超音波(連続波)を送信し、閉じたひび割れ界面の接触・非接触によって送信超音波の波形がひずむことを利用して、閉口ひび割れの発生量や進展深さを評価する技術の開発し、その妥当性を検証することであった。き裂に強制外力として引張/圧縮を作用させたとき、ひび割れ界面が接触・非接触する。この強制振動数を  $F$  としたとき、この状態で超音波を界面に送信すると、界面のインタラクションに起因して周波数  $f$  の超音波が変調されることを利用する。本研究の独自性は、この 2 つの周波数の相互干渉を利用して、初期の損傷段階にあるひび割れを定量的に評価することにある。本研究では二段階方式の検査方法を提案する。第 1 検査(広域を対象としたアプローチ)では、対象部材の両側に超音波プローブを設置し、長距離伝搬した透過波を計測する。この透過波形にバンドパスフィルタを作用させて和差調波  $f \pm F$  の周波数成分を抽出し、この諸量から閉じたひび割れの有無を評価する。第 2 検査(局所的な検査アプローチ)では、和差調波が発生する部位に対して、アレイプローブを用いて超音波を集束させ、ひび割れの正確な位置と深さを映像化によって評価する。

## 3. 研究の方法

### 【第 1 検査(広域を対象としたアプローチ)】

#### (1) き裂の開閉口時の超音波透過波形の詳細調査

長尺の試験体に作成した疲労き裂に遠方から超音波を送信し、疲労き裂を透過して長距離伝搬した波形とき裂の開閉口状態の関連を調査することと、その波形に含まれる非線形性について検証する。き裂面のたたき合い(クラッピング)に起因する非線形超音波とは理論的には整数次の高調波成分であり、これを計測するために、送・受信で共振周波数の異なる 2 つの超音波プローブを用意した。試験体に載荷試験を行いながらき裂面の応力状態を制御し、この過程で超音波の透過波を段階的に計測して、透過波の波形および周波数の変化を調べた。

#### (2) 2 つの周波数の相互作用による閉じたき裂の評価

上記(1)にて、供試体の固有振動数  $F$  に相当する振動数で強制加振し、共振周波数  $f$  を有する超音波プローブを用いて計測を行ったが非線形超音波成分は観測されなかった。この原因は、超音波プローブの共振振動数  $f$  が原因であると考えた。そこで、小型加振器を用いて  $f$  を可変制御し、そのときに発生する非線形成分と周波数の関係を調査することとした。ここでは、周波数帯域がフラットである加速度センサを受信用に用いた。

#### (3) 実際の橋桁を模擬したコンクリート試験体での計測実験

橋桁をモデル化した RC 梁に対して載荷試験を実施し、載荷初期段階から徐々に進行する力学的なひび割れと、固有振動特性の変化の関係を調査した。この研究は、破壊の進展に伴う動的パラメータの変化を、モックアップを使って計測したものである。

### 【第 2 検査(局所的な検査アプローチ)】

#### (4) アレイプローブを用いたき裂のイメージング

フェーズドアレイ法は、独立に駆動できる振動素子にディレイ(時間遅延)を設けて電気回路でスイッチング処理することで、任意の方向や深さ方向にビームを送信できる電子スキャン装置を使用するのが一般的である。研究代表者らの方法は、1 つの振動素子から発生する素元波を後から個々に重ね合わせることによって、映像化対象とする任意の位置に集束するビームを再構成するものである。GPU 計算を利用して高速実行するシステムを開発しており、全波形サンプリング処理(Full-waveforms Sampling And Processing: FSAP)方式と呼んでいる。特に、コンクリートは高減衰材料であるので素子の駆動は大電圧が必要となるが、FSAP 方式の場合、遅延回路が不要なので制御が容易になる。本研究では、低周波超音波探触子を専用設計し、コンクリート中の欠陥を映像化することを試みた。

#### 4. 研究成果

##### 【第1検査（広域を対象としたアプローチ）】

##### (1) き裂の開閉口時の超音波透過波形の詳細調査

図1(a)に示すように、4点曲げ試験機を用いて、き裂が開いている状態からき裂面に圧縮応力が作用するように载荷し、閉口状態に遷移するように設定した。試験片の長さは300mm、疲労き裂の高さは16mmである。このき裂は、疲労試験で作製したものであるが、一度、モードI引張試験によって開口させている。図1(b)に示すように、両端に超音波プローブを設置し、透過試験を行った。送信周波数は1MHzとした。開口状態から閉口状態に推移するときの受信波形とそのフーリエスペクトルを図1(c)と(d)にそれぞれ示す。荷重0~12kNまでの受信波形は、荷重13kNの波形とほぼ同じだったので、割愛している。図1(c)では、载荷重が14kNを超えると波形の位相の変化が見られ、载荷重が19kNでは、位相がほぼ反転することが確認できる。図1(d)のフーリエスペクトルは、13~15kNの間で1MHz付近の極大値が減少し、15~16kNの間で最も小さくなる。このとき、極大値の位置が低周波側にシフトし、15kN以降で極大値は増大していく。一方で、3MHz付近の高調波成分の大きさは殆ど変化はなく、ピークシフトも起こらないことが確認できる。数値解析による検証によって上記の現象が説明できた。き裂が開いている時は、き裂端部で超音波が回折・散乱することによって、位相がシフトした波形が受信された。一方、き裂が閉じて超音波がき裂面を透過するようになると、入射波の励起周波数のまま透過波が到達する、すなわち、閉口状態では位相シフトは生じない。この研究から、き裂面の開閉口によって超音波波形に違いが見られることが明らかとなった。

次に、試験片の固有振動数 $F$ に相当する振動数で強制加振しながら、同じ超音波装置を用いて透過波を計測したが、非線形超音波成分は観測されなかった。超音波プローブは共振周波数 $f=1\text{MHz}$ と固定されているため、周波数が変更できず、これ以上の検討ができなかった。そこで、事項(2)において $f$ を可変とし、さらにき裂の周辺にセンサを置いて非線形成分が発生しているのかを確かめることとした。

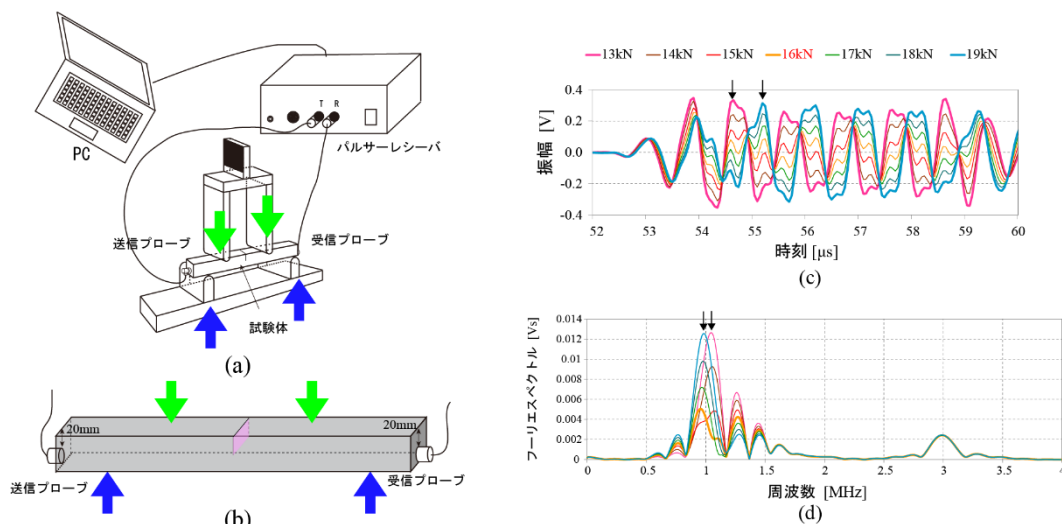


図1:(a)圧縮試験の概要、(b)疲労き裂を有する試験片、(c)透過波の時刻歴波形、(d)透過波のフーリエスペクトル

##### (2) 2つの周波数の相互作用による閉じたき裂の評価

き裂試験片に対して2つの加振器(大型と小型)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、非線形振動の発生を検証した。図2(a)に示すように、長さ351mmの試験片の中央部に深さ15mmの疲労き裂を進展させた。この試験片の第一次固有振動数は、2413Hzであり、図2(b)の数値シミュレーションの結果、共振時に疲労き裂端部に応力が作用していることを確認している。計測実験では、大型加振器による振動数を $F$ とし、小型加振器の振動数 $f$ を掃引しながら計測を行った。加振振幅が大きすぎると、装置系や材料の非線形性による振動成分も生じるため、加振器の励起を微小振幅として計測を行った。図2(c)は、 $F=2000\text{Hz}$ 、 $f=100\text{Hz}$ 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である。この結果から、加振振動数 $F$ と $f$ 以外のピークは見られないことがわかる。一方、 $F$ を試験片の固有振動数付近の2400Hzとし、 $f=100\text{Hz}$ 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2(d)に示す。この実験結果から、2300Hzと2500Hzにピークが立っていることが確認できた。これらは、 $f=100\text{Hz}$ と $F=2400\text{Hz}$ の和( $F+f$ )と差( $F-f$ )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。振動数 $F$ をいろいろ変えながら実験したが、固有振動数2400Hz付近がもっともフーリエスペクトル値が大きくなることが確認できた。以上のことから、き裂の開閉口が生じる振動数 $F$ のとき、振動数 $f$ の振動を適切に入力することで非線形現象が発現することを確認した。生じた非線形成分はき裂周辺で減衰するものと思われるが、今後は、どの程度遠方で計測出来るかを検討してみたい。

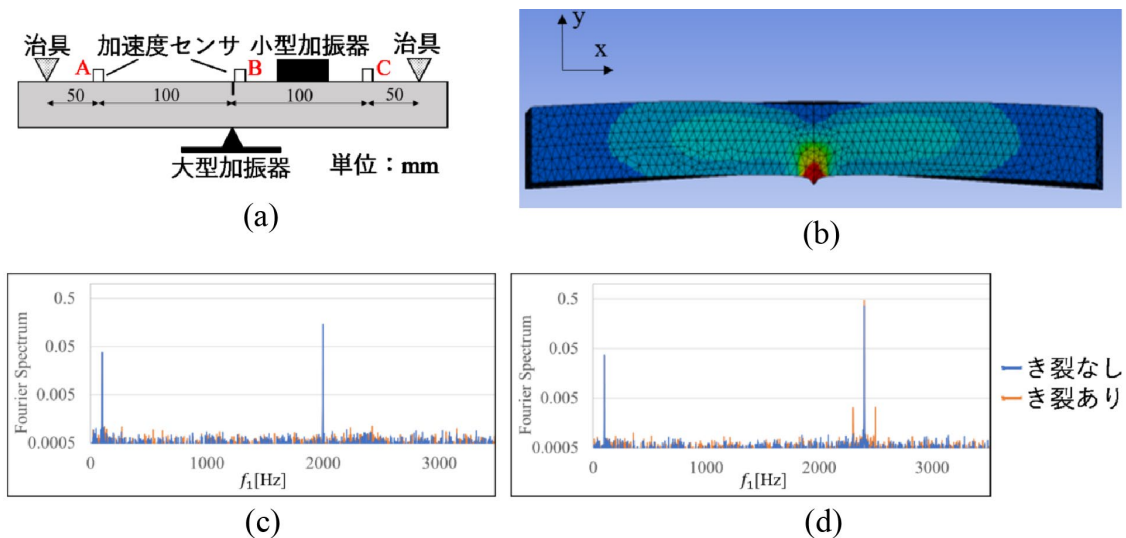


図 2: (a)2 つの加振器を用いた振動実験, (b)共振時のき裂周辺の応力分布, (c) $F=2000\text{Hz}$ ,  $f=100\text{Hz}$  のときの加速度センサで計測されたフーリエ振幅, (d) $F=2400\text{Hz}$ ,  $f=100\text{Hz}$  のときの加速度センサで計測されたフーリエ振幅

### (3) 実際の橋桁を模擬したコンクリート試験体での計測実験

曲げ载荷により力学的損傷が進展する様子と、固有振動数の変化の関係を調査するために 4 点曲げ多段階载荷を実施した。図 3(a)に試験状況を、図 3(b)に静的段階载荷計画を示す。多段階载荷とは、10kN ずつ荷重を静的に増加させ、その载荷毎に荷重とたわみを計測するものである。各段階の最大荷重まで载荷した後、一旦 0kN まで除荷し、その際に固有振動数を計測した。ここで、試験体 A は初期状態で切り欠きがないもの、試験体 B は高さ 5cm の断面欠損を模擬した切り欠きを有するものである。図 3(c)に最大履歴荷重の増加に伴う一次卓越振動数の変化を示す。これによると、試験体 A, B ともに、履歴荷重の増加に伴い、振動数が低下している。0-30 kN では可視損傷は現れていないが、固有振動数は約 1%低下することがわかった。この固有振動数の低下は、外観からは確認できない内部の損傷進展が原因であると推測される。健全状態からわずか 1%しか固有振動数が変化していない初期損傷時は、通常の振動計測では、き裂の有無を確認することは困難である。今後は、非線形超音波を利用して、この初期状態の損傷を評価することが目標である。

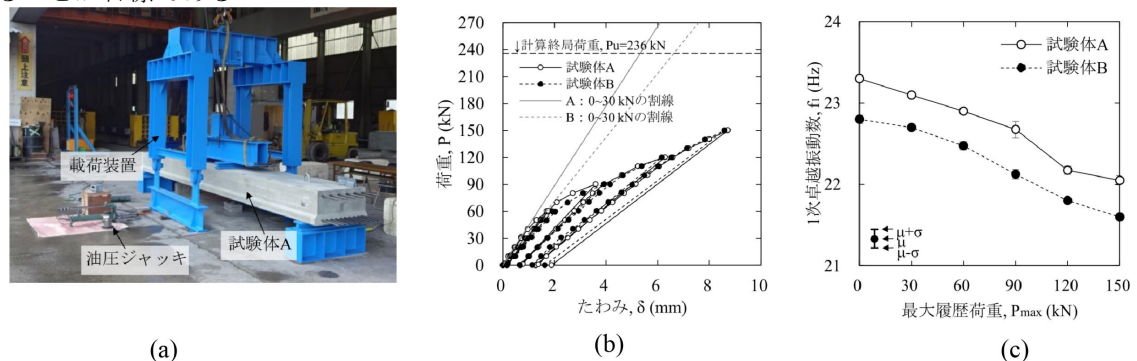


図 3: (a)コンクリート試験体と载荷試験機, (b)多段階载荷, (c)履歴荷重の増加に伴う固有振動数の変化

## 【第 2 検査 (局所的な検査アプローチ)】

### (4) アレイプローブを用いたき裂のイメージング

図 4(a)に示すように、アスファルトとコンクリートの複合部材を模擬した供試体を作製し、人工的に欠陥を設けたものに対して、FSAP による映像化実験を行った。路盤を模擬する材料として、最大粒径が 20 mm の普通コンクリート (水セメント比 50%, 骨材体積率 69%) を用いた。ここで、コンクリートの厚さは 300 mm とした。また、アスファルト層を模擬するために、高速道路の部分補修に使用している密粒度アスファルト混合物 (再生密粒度, 最大粒径 13 mm) を用いた。密粒度アスファルト混合物は、粗骨材, 細骨材, フィラー, アスファルトから成る。配合でアスファルト量は 5.5%とした。図 4(b)に示すように、この供試体は、コンクリート内部 (界面から下に 150 mm)にき裂を模擬したスリットを設けている。検証に使用した超音波素子を図 4(b)にそれぞれ示す。超音波素子は複合圧電材を用いており、バッキング材(B.M.)が接合されている。中心周波数は 75kHz とした。図 4(c)は超音波イメージングの結果である。硬化後の供試体のアスファルト音速は 3100 m/s, コンクリート材料のそれは 4300 m/s であり、界面での



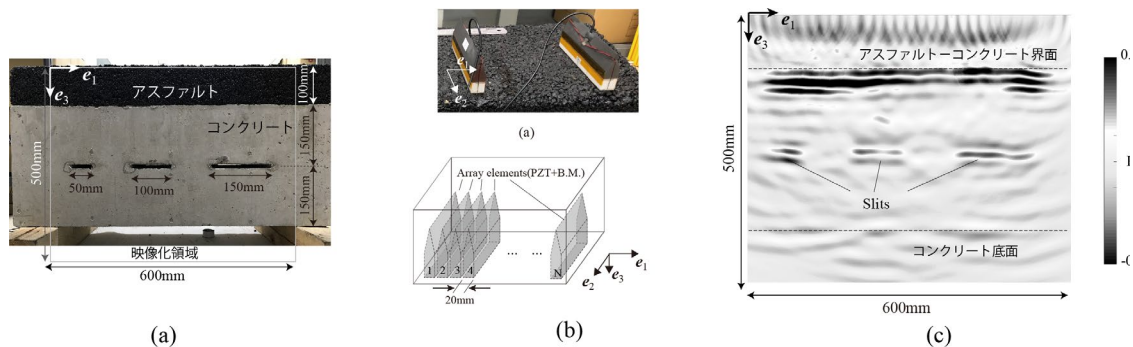


図 4: アスファルト・コンクリート供試体, (b)超音波素子, (c)FSAP 映像化結果

超音波の屈折による経路補正を考慮して映像化を行っている。映像化範囲は  $600\text{mm} \times 500\text{mm}$  の 2 次元断面であり、ボクセルサイズは  $2\text{mm}$  とした。スリットの位置と大きさが精度良く表れている。ちなみに、この供試体は研究室で作製されたが、アスファルトの締め固めが十分ではなかったため、界面での接着が十分ではなく、界面で超音波の反射が生じたと考える。このように、本研究では低周波超音波探触子を専用設計し、コンクリート中のき裂を映像化することができた。映像化に要する時間は GPU 計算を用いているため僅か  $0.5$  秒であった。

#### 【今後の課題】

本研究の当初の目的は、ハンマー加振等によって固有振動モードを励起し、振動している部位にオーダーの異なる周波数の超音波(連続波)を送信し、閉じたひび割れを音と振動の相互作用によって非破壊的に評価することであった。第 1 検査において、き裂面でのクラッピングによって非線形振動が発生していることを確認でき、仮説の検証という意味では、概ね目標を達成できた。現状は、き裂近辺に設置した小型加振器によって発生した非線形成分の検出に止まっている。今後は、大振幅の超音波を遠方から送信し、超音波プローブで非線形成分を受信することが課題である。また、第 2 検査においてコンクリートを対象とした FSAP 映像化に成功した、これは当初の目標を大きく上回って達成できた。今後は、実際のき裂において検証を行うことと、非線形超音波を利用した映像化手法を開発したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 高橋 菜太, 中畑和之	4. 巻 66A
2. 論文標題 疲労き裂面の接触状態による透過超音波の波形特性の変化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 529-539
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.66A.529	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 -

1. 著者名 中畑和之, 天野裕維, 溝田裕久, 斎藤隆泰, 木本和志	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 Wavefieldデータを利用した数値モデルの構築と時間反転イメージングへの応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2	6. 最初と最後の頁 I_71-I_81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_I_71	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 -

1. 著者名 森 伸一郎, 小林 巧	4. 巻 28
2. 論文標題 5径間単純PC橋の経年変化と曲げ破壊履歴による固有振動特性の変化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第28回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 383-388
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高橋 菜太, 中畑和之	4. 巻 65A
2. 論文標題 相反性を用いた構造部材の動的挙動の可視化と選択的波動モードによる欠陥検出	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 264-274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.65A.264	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 -

1. 著者名 Kanta Takahashi, Kazuki Karakawa, Kazuyuki Nakahata	4. 巻 6
2. 論文標題 Flaw detection by three-dimensional wave field visualization in infrastructure component using hammer excitation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 6th Japan-US Symposium	6. 最初と最後の頁 501042
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 無
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 -

1. 著者名 高橋 菜太, 中畑和之, 伊津美 隆, 大平克己	4. 巻 26
2. 論文標題 閉じたき裂を含む構造部材の振動・波動計測と数値モデリング	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第26回 超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 87-88
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 無
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 -

1. 著者名 細川隼人, 牧田陽行, 中畑和之, 小原良和	4. 巻 26
2. 論文標題 同時励振FSAP法を用いた閉じたき裂の映像化の試み	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第26回 超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 51-52
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 無
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 -

1. 著者名 森 伸一郎, 小林 巧	4. 巻 67A
2. 論文標題 4点曲げ載荷を受ける鉄筋コンクリート梁の可視損傷の進展と固有振動数の変化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 209-219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.67A.208	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 -

1. 著者名 中畑和之, 牧田陽行, 林恭平, 上林正和	4. 巻 33(2)
2. 論文標題 超音波アレイ探触子の移送によるシームレスな広域イメージング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 超音波テクノ	6. 最初と最後の頁 1-5
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 無
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 -

1. 著者名 森 伸一郎, 森本 大貴, 江見 和泰, 伊藤 弘樹, 海野 豊数, 藤川 正己, 加川 順一	4. 巻 28
2. 論文標題 92年経過したコンクリートアーチ橋の修復工事前後の超音波速度計測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第28回超音波による非破壊評価シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 29-34
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 無
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 -

1. 著者名 牧田陽行, 丸山泰蔵, 中畑和之	4. 巻 28
2. 論文標題 散乱波の位相情報を利用したアレイ超音波イメージングの試み	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第28回超音波による非破壊評価シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 11-114
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 無
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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 川崎藍流, 丸山泰蔵, 勝田順一, 高橋学, 中畑和之
2. 発表標題 疲労き裂面の接触状態による超音波透過特性に関する基礎的検討
3. 学会等名 令和2年度四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Kanta Takahashi, Kazuyuki Nakahata
2. 発表標題 Flaw identification in structural component from wavefield visualization data by multipoint acceleration measurement
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 秋季講演大会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野寺慧, 川崎藍流, 丸山泰蔵, 中畑和之
2. 発表標題 非線形振動を利用した疲労き裂の評価に関する基礎的研究
3. 学会等名 令和3年度 土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江見 和泰, 森 伸一郎
2. 発表標題 経年損傷した多径間鉄筋コンクリート桁橋の物性調査と振動測定による評価
3. 学会等名 土木学会 第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武藤健太, 中畑和之, 橋爪謙治
2. 発表標題 低周波アレイ探触子を用いたアスファルト舗装内部の映像化
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 秋季講演大会
4. 発表年 2020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	森 伸一郎  (Mori Shinichiro)  (10304643)	愛媛大学・理工学研究科(工学系)・准教授   (16301)	
研究 分担者	高橋 学  (Takahashi Manabu)  (20274334)	愛媛大学・社会共創学部・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
---------	---------