

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02052

研究課題名(和文) ガイド波エバネッセントモードを利用した超高分解能弾性波カメラの開発

研究課題名(英文) Development of super-resolution elastic wave camera using evanescent modes of guided wave

研究代表者

林 高弘 (Hayashi, Takahiro)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：30324479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、レーザー光の照射により固体材料内に発生する弾性波により損傷を画像化する手法に関する研究である。コンクリートや配管などの大型構造物に対しては、可聴音程度の低周波でも損傷画像化が可能であることを示した。アルミニウム合金内の鑄巣や炭素繊維複合材料内の剥離、さらには電子部品の電極部のマイクロボイドといった小型部品の非接触画像化検査への適用に関する研究では、損傷検出能力と共振周波数の関係を明らかにし、数ミクロンのボイドの計測も可能であることを理論的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パルス状のレーザー光を薄板状材料に照射すると、弾性波が発生し、そのエネルギーはレーザー照射位置の板の厚みや内在する損傷に依存する。この性質を利用すると、レーザーの走査によって、コンクリート構造物の剥離やプラント内の鉄鋼構造物の内部損傷を遠隔より非接触で画像化ができる。本研究は、大型構造物の遠隔検査および小型部品の微細損傷の検出に関し、その適用可能性を示したものである。この非接触計測技術により、プラントの自動検査や製品の付加価値向上に大きく役立つ。

研究成果の概要(英文)：This study is on the defect imaging technique using elastic waves in solid media generated by laser emission. For large structures such as concrete walls and steel pipes, low frequency range of audible sound can be used for the imaging. In the study for micro cracks in aluminum castings, delaminations in carbon fiber reinforced plastics and micro void in electrodes in electric circuits, the relationships between the ability of detection and resonance frequencies are revealed, which theoretically shows the feasibility for imaging micro voids.

研究分野：x非破壊検査

キーワード：x弾性波 非破壊検査 非接触 レーザ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は研究開始当初、レーザ弾性波源走査法により薄板内にある損傷を画像化する手法を開発しており、その画像化手法には、ガイド波のエバネッセントモードが影響していることが分かってきていた。これは、従来法よりもずっと低い周波数を用いたとしても、十分な分解能で損傷が検出でき、また高周波数帯域を利用すれば、非常に微細な損傷も検出できる可能性があることを示唆していた。

また電磁波の分野では、エバネッセントモードを積極的に利用した新しい計測技術が多く出現しており、弾性波（音響波）である本分野への適用も期待できると考えた。

### 2. 研究の目的

このガイド波エバネッセントモードの相互作用による振動エネルギーの発生現象について、数値計算によりその原理を解明し、スケールの異なる2つの薄板構造に対し、その適用性を検討することが本研究の目的であった。

大型の対象物としては、発電プラントや鉄鋼・化学プラント、土木構造物などで高効率検査が求められる配管やコンクリート構造物といった数 m 規模のものを想定した。また、小型の部品としては、アルミニウム鋳造品中のマイクロボイドや電極部の不完全接着層などの $\mu\text{m}$  ~  $\text{mm}$  オーダーのボイドや介在物を対象として研究を進めた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 大型構造物に対する低周波数帯域の利用によるワイヤレスリモート非破壊検査

これまでの研究代表者らの研究により、レーザ弾性波源走査法による損傷画像化技術では、数 cm ~ 数十 cm 程度の広がりを持った損傷部を数 kHz ~ 20 kHz 程度の低周波数帯域の弾性波を用いて画像化できることが示されてきた。従来の超音波探傷ではその 100 倍 ~ 1000 倍程度の周波数を利用してコンクリート検査や配管検査を行っていることを考えると、非常に低い周波数帯域が利用されていることになる。これは、薄板内の損傷部近傍で発生するガイド波エバネッセントモードの性質を利用したことによるものである。

数 kHz ~ 20kHz の周波数帯域を利用するため、弾性波の受信や回路、信号送受信器に安価で高性能な音響機器が適用できるようになった。ここでは、図 1 に示すような実験システムにより非接触での損傷画像化を試みた。弾性波の励振は、これまで研究代表者が行ってきたファイバーレーザを変調させたシステムを用いたが、弾性波の受信には MEMS マイクロフォンを用いた。これは携帯電話などのマイクとして広く利用され、性能の向上が著しいデバイスである。対象物の近くにかざすと、対象物から空気中に漏洩した振動を検出することができる。この信号をプリアンプで増幅した後、Bluetooth 送信器で無線伝送した。これにより、MEMS マイク、アンプ、Bluetooth 送信器を内蔵した受信ユニットを対象物の近くに一旦設置すると、遠隔からのレーザ照射によって薄板状材料中の損傷の画像化が実現できる。これまで、弾性波の受信にレーザドップラー振動計を用いてきたが、屋外構造物など風などによる揺動が大きい対象物に対し振動計測ができなかったが、この受信デバイスを用いることで、安定した計測が実現できる。

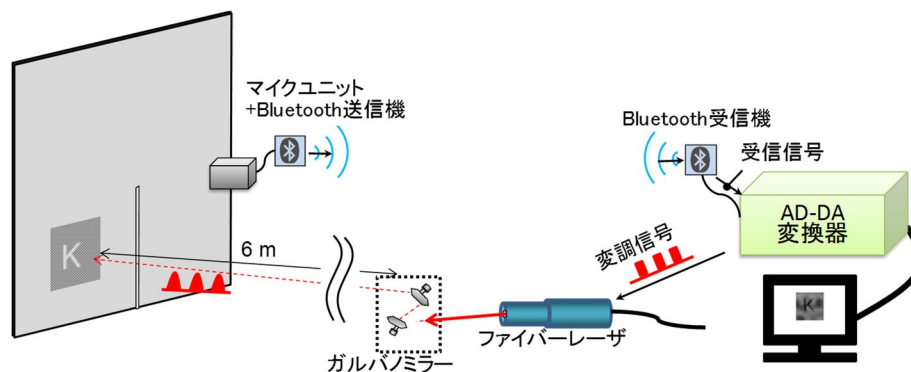


図 1 音響 MEMS マイクロフォンと Bluetooth 送信器を備えたマイクユニットを使った損傷画像化システムの概要図

#### (2) 拡散場を用いた損傷画像の鮮明化

低周波数帯の音響波を対象物に入射すると、受信点では直接到達波と壁面からの反射波が重なって検出される。つまり、従来の超音波検査のように伝搬経路がはっきりしたコヒーレントな音響場（図 2 左）を利用することは難しい場合が多い。そこで、壁面からの反射を繰り返し媒質内に十分拡散したのちの音場（拡散場、図 2 右）を利用した新しい画像化手法を考案した。

レーザ弾性波源走査法による損傷画像化技術は、レーザ光の照射点において励振する振動エネルギーの違いを画像として表示したものである。薄板状材料内部に損傷が存在すると、その部分では振動エネルギーが大きく得られ、健全な部分では振動が小さく励振されるという違いを表している。一方で、レーザ照射によって薄板状材料中に発生した振動場は、レーザ照射直後は図 2 左のように同心円状に伝搬し、伝搬経路のはっきりしたコヒーレント場が形成され、しばら

く経過すると壁面での反射を繰り返し、図2右のような拡散場となる。拡散場が適切に形成されると、エネルギー密度の時間平均が構造内において一樣になることが知られており、このエネルギー密度は入射した振動エネルギーに比例している。

以上のようなレーザー弾性波源走査法による損傷画像化の原理と拡散場の性質に着目し、拡散した後のエネルギー値によってマッピングすることで、より鮮明な画像が得られると考えた。拡散場を適切に形成するためには、(a)広帯域波を利用すること(b)構造内での減衰が小さいこと、などの条件があり、それら条件変化による損傷画像の違いを検討した。

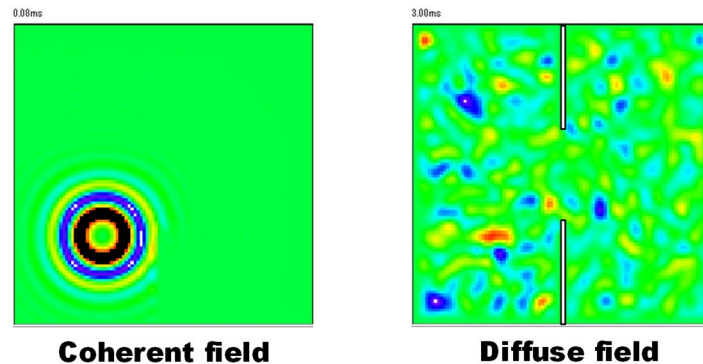


図2 コヒーレント場と拡散場（数値計算結果）

(3) kHz オーダーの周波数帯域を用いた mm サイズの剥離画像化とマイクロポイドへの適用検討

マイクロポイドへの適用を目指し、初めに 50 mm × 80 mm × 20 mm のアルミニウムブロック内の表面直下 1 mm の位置にある直径 10 mm の人工剥離の画像化を行った。図3は、その計測装置の概要図である。主要構成は図1の実験システムと同じであるが、2 MHz まで変調可能なファイバーレーザーを用い、受信を MHz 帯域の受信が可能なレーザードップラー振動計とした。

このシステムにより狭帯域の超音波を励振させることができ、周波数を変更することで構造の共振周波数を解析することができる。また、励振位置をガルバノミラーにより移動させることで、共振パターンも計測することが可能である。

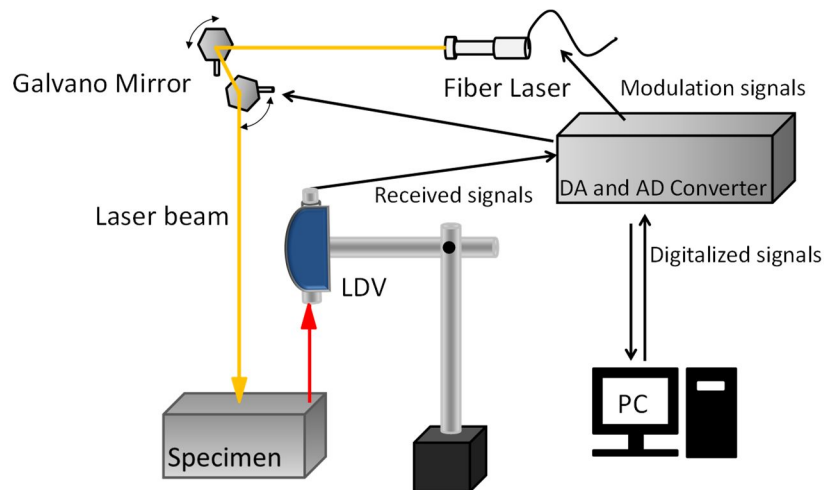


図3 用いた実験システム

4. 研究成果

(1) 大型構造物に対する低周波数帯域の利用によるワイヤレスリモート非破壊検査

図4は試作した MEMS マイクロフォンデバイスである。MEMS マイクとアンプおよび Bluetooth 送信器に電力を供給するため、リチウムイオンバッテリーが装着されている。このマイクデバイスを対象物から 10 mm 程度の距離に置いて、漏洩する音波を計測し、厚さ 3 mm のアルミニウム合金薄板裏面につけた幅 2 mm、深さ 1.5 mm の”K”という文字の溝に対する画像が図5である。励振用レーザー装置は試験平板から約 6 m 離れたところにあったが適切に人工損傷の画像が得られ、マイクを利用した遠隔計測が可能であることが示された。

今後はリチウムイオンバッテリーの部分太陽光パネルなどの給電装置に変更する予定であり、MEMS マイクの周囲に取り付けられた太陽光パネルにレーザー光や投光器による光を照射しながら計測を行うことで、マイクデバイスを充電のために回収する必要のないデバイスと計測システムを開発していく。

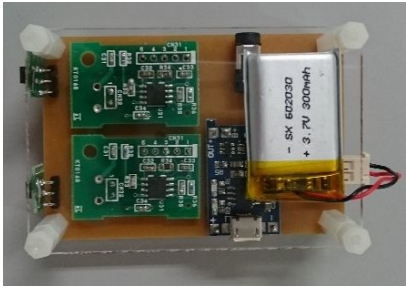


図4 試作した MEMS マイクロフォンデバイス

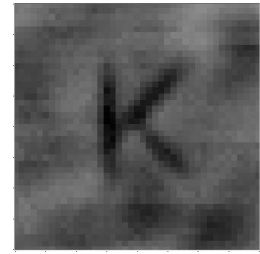
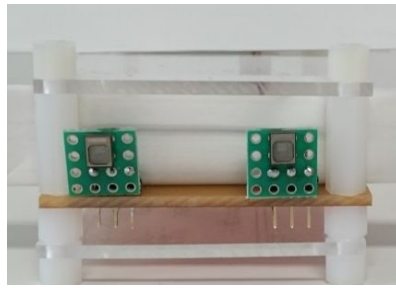


図5 損傷画像

## (2) 拡散場を用いた損傷画像の鮮明化

図6は、拡散場を用いた損傷画像化の実験に利用した試験平板である。アルミニウム合金平板の中央上下から切り込みが入れてあり、複雑な形状の試験平板を模擬している。試験体中の400mm × 150mm の領域にレーザを走査し、左上に接着した圧電素子により波形を受信した。このとき、レーザに与える変調信号を変更して、20 kHz の狭帯域波を励振した場合と、10 kHz ~ 40 kHz の周波数帯域を有するチャープ波を与えた場合の結果を比較した。狭帯域波(図7(a))を用いた場合は、試験体中に拡散場が適切に形成されないため、試験体内の共振パターンが大きく現れる結果となった。これにより、裏面の人工傷の模様はほとんど得られていない。一方、広帯域波を用いた場合(図7(b))では、画像が非常に鮮明になっている。すなわち、拡散場を適切に形成させることで、より鮮明な損傷画像が得られることが示された。

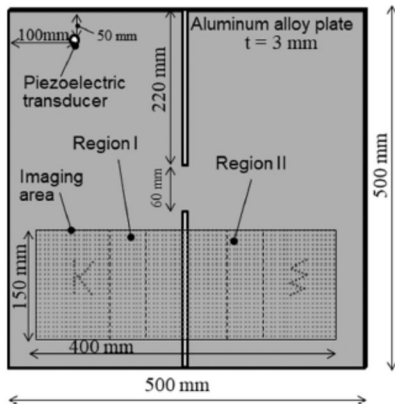
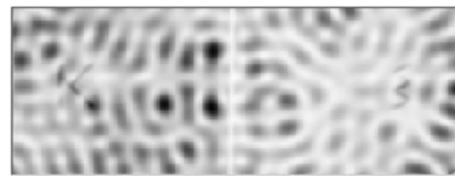
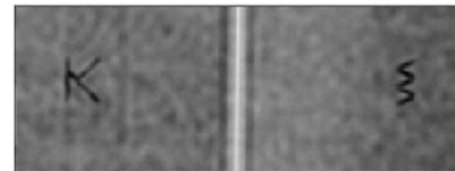


図6 用いた試験平板



(a) 狭帯域波を用いた場合



(b) 広帯域波を用いた場合

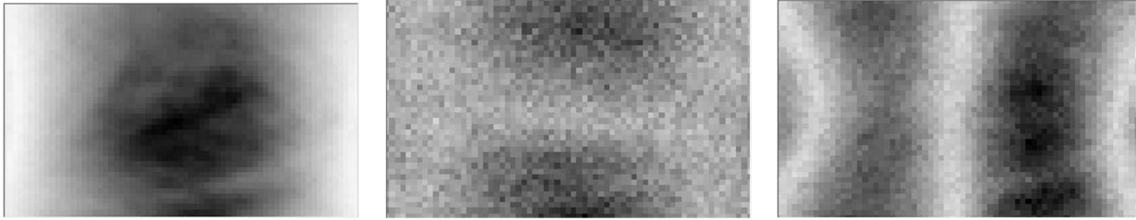
図7 損傷画像化結果

## (3) kHz オーダーの周波数帯域を用いた mm サイズの剥離画像化とマイクロボイドへの適用検討

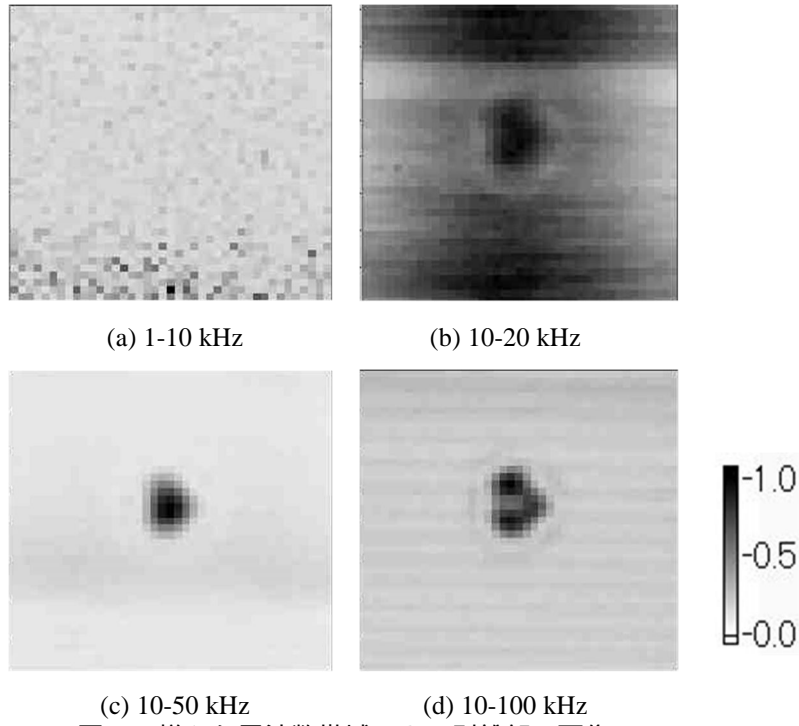
初めに、ブロック状の試験体における剥離検出には、試験体全体の共振周波数が大きく影響を与えることを理論的に明らかにした。そこで、図3のシステムを用いて実験的に共振パターンを得たものが図8である。この周波数および共振パターンは、理論解析と非常によく一致しており、適切に試験体全体の共振が測定されていることが示された。

次に、表面直下の剥離の画像化実験を様々な周波数帯域を用いて行った(図9)。最も低い周波数帯域を利用した図9(a)では、剥離画像が得られず、広帯域波を利用するほど、画像が鮮明になることが分かった。これは、理論解析でも示されている結果であり、最低次数の共振周波数以下では、損傷画像が得られにくく、構造全体の共振周波数を多く含むような周波数帯域ほど損傷画像が鮮明になることが明らかになった。

本実験では、100 kHz 以下の低周波数帯域を利用しているが、工業的に計測が容易な 30 MHz 程度までの周波数帯域を利用可能であると考えており、その場合、 $100\text{kHz}/30\text{MHz} = 1/300$  程度(10mm/300=30  $\mu\text{m}$ )の小さな剥離部の検出が非接触で可能になると期待できる。



(a) 14.3 kHz                      (b) 25.9 kHz                      (c) 31.0 kHz  
 図8 実験により得られたアルミニウム合金ブロックの共振パターン



(a) 1-10 kHz                      (b) 10-20 kHz  
 (c) 10-50 kHz                      (d) 10-100 kHz  
 図9 様々な周波数帯域による剥離部の画像

## 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 1件）

1. 著者名 Takahiro Hayashi	4. 巻 143
2. 論文標題 Defect imaging for plate-like structures using diffuse field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 EL260 ~ EL265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/1.5030915	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 Nakao Shogo, Hayashi Takahiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Adhesive Bond Imaging by Noncontact Measurements With Single-Sided Access	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering System	6. 最初と最後の頁 021009 ~ 021009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4039229	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 Hayashi Takahiro	4. 巻 153
2. 論文標題 Non-contact imaging of pipe thinning using elastic guided waves generated and detected by lasers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Pressure Vessels and Piping	6. 最初と最後の頁 26 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijpvp.2017.05.006	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 Hayashi Takahiro, Nakao Shogo	4. 巻 58
2. 論文標題 Energy Analyses for the Imaging Technique of Bonded Regions and Delaminations in a Thin Plate	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Transactions	6. 最初と最後の頁 1264 ~ 1273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.M2017151	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14件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Takahiro Hayashi, Atsuya Maeda, Shogo Nakao
2. 発表標題 Imaging diagnostics of plate-like structures by remote measurement of elastic waves with lasers
3. 学会等名 Optics & Photonics International Congress 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Hayashi
2. 発表標題 Defect imaging technique using guided waves generated by laser
3. 学会等名 2018 Spring Conference of the Korean Society for Nondestructive Testing (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Hayashi, Atsuya Maeda
2. 発表標題 Remote imaging inspection for plate-like structures by scanning laser source and microphone detection
3. 学会等名 Laser Ultrasoncis 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Hayashi, Shogo Nakao
2. 発表標題 Defect Imaging for plate-like structures using diffuse acoustic wave generated by modulated laser
3. 学会等名 45th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中尾章吾, 林高弘
2. 発表標題 非接触計測による剥離の非破壊評価
3. 学会等名 2018年度日本機械学会 年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Hayashi, Shogo Nakao,
2. 発表標題 Imaging of disbond and delamination using flexural vibrations generated by laser modulation
3. 学会等名 IEEE International Ultrasonics Symposium 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shogo Nakao, Takahiro Hayashi
2. 発表標題 Imaging Inspection for Delamination Using Energy Variations of Flexural Vibrations Generated by Laser
3. 学会等名 第39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 2018年

1. 発表者名 林高弘, 前田篤弥
2. 発表標題 音響マイクロフォンを受信デバイスに利用した配管の遠隔損傷画像化
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 平成30年度秋季講演大会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Takahiro Hayashi, Shogo Nakao
2. 発表標題 Imaging NDT for plate-like structures using diffuse acoustic field
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 平成30年度秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中尾章吾, 林高弘
2. 発表標題 非接触計測による薄板接着部の評価
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 先進的非破壊検査合同シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hayashi Takahiro
2. 発表標題 Imaging of defects and adhesive objects in plate-like structures using laser generated guided waves
3. 学会等名 Conference & Exhibition on Non-Destructive Evaluation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林高弘
2. 発表標題 レーザにより励起された弾性波の拡散場を利用した 複雑平板材料の非破壊評価
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 平成29年度第2回「超音波による非接触材料評価研究会」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中尾章吾, 林高弘
2. 発表標題 レーザー弾性波源走査法による薄板間の接着評価
3. 学会等名 日本機械学会 年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林高弘, 福山美咲
2. 発表標題 Defect imaging of a thin plate using evanescent modes of guided waves
3. 学会等名 第38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
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 振動検出装置および振動検出システム	発明者 林 高弘	権利者 国立大学法人京都大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-158984	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----