

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01573

研究課題名（和文）非接触超音波計測と機械学習による自律型非破壊材料評価

研究課題名（英文）Autonomous nondestructive evaluation using non-contact ultrasonic measurements and machine learning

研究代表者

林 高弘（Hayashi, Takahiro）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30324479

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,500,000円

研究成果の概要（和文）：非破壊検査技術のIoT化や自動化に対応する技術として、非接触超音波計測と機械学習による異常音判定技術について検討した。非接触計測では、レーザやマイクロフォンを使った技術を検討し、機械学習ではOne Class-SVM（サポートベクターマシン）による配管から漏洩する音響データの異常音の自動判定について検討した。その結果、遠隔からの音響計測と機械学習の利用により非常に良い精度での異常音判定が可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非破壊検査は、高所や高温箇所、高線量などの過酷な環境で実施されることが多い上、検査技術者は非常に高度な技能が求められる。また、そのような技術者不足が進む一方であり、検査の自動化、無人化は喫緊の課題である。その社会的背景において本研究の技術は非常に重要な位置を占めている。

また、超音波検査で得られる計測データから機械学習を用いて判定する試みは最近始まったばかりであり、超音波計測の専門家がその知識を活かしてデータの前処理を適切に行った上で異常音判定を高精度で可能にした本研究は学術的にも重要である。

研究成果の概要（英文）：The non-contact ultrasonic measurement and machine learning technologies for determining abnormal noise were investigated as technologies for the IoT and automation of non-destructive inspection technology. For non-contact measurement, techniques using lasers and microphones were investigated, and for machine learning, the automatic determination of abnormal noise from acoustic data leaking from pipes using One Class-SVM was investigated. The results showed that the use of remote acoustic measurement and machine learning enabled the determination of abnormal noise with very good accuracy.

研究分野：超音波非破壊検査

キーワード：非破壊検査 機械学習 非接触超音波計測

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

内閣府の第5期科学技術基本計画において Society 5.0 が提唱され、物理空間とサイバー空間の融合による技術革新が期待されている。ものづくりの現場でも、単に自動化を進めてきた Society 4.0 を一歩進め、センサによる検出データをサイバー空間内で処理して製造手法にフィードバックして改良するような、自律型の製造方式が進められている。これは、4G, 5G などの通信技術と機械学習などのビッグデータ活用技術が確立したこと、それに伴い IoT 技術が進歩していることに起因するものであり、生産技術である非破壊材料評価の分野においても、物理空間とサイバー空間の融合は、製品の品質保証および製造環境の安全・安心に革新的な変化を起こすとして期待されている。

しかし、現状、製品の品質保証や製造現場の設備診断における IoT 技術の活用事例は、光学カメラや赤外線カメラなどによる画像の異常判定がほとんどであり、たとえば従来から広く利用されている超音波による工業材料の内部検査に対する事例はほとんど見られない。これは、カメラ画像が2次元または3次元の形状や表面の色などの多様な情報を非接触で容易に得ることができるのに対し、工業製品や工場設備に対する超音波計測の自動化は検査員の技能に依るところが大きいことが主因である。しかしながら超音波は、製品の内部欠陥の検査や配管などの工場設備内部の非破壊検査に欠かせないものであり、その IoT 化は喫緊の課題である。

では、超音波による非破壊検査・材料評価において、IoT 化を進め Society 5.0 に対応しサイバー空間を最大限に活用する革新的な技術を進めるにはどうすればよいか？これは、非破壊評価の分野でも国際的に問題提起されており、その解決手段となる非破壊評価技術の革新を NDE 4.0 (Non-Destructive Evaluation, 非破壊評価 4.0) と名付けている。

研究代表者らは、超音波非破壊評価における NDE4.0 実現のための課題を、計測に特別な技能が不要で再現性の高い非接触による超音波計測法(物理空間)の開発と その非接触計測により得られたビッグデータの処理と最適計測条件のフィードバック手法(サイバー空間)の確立の2つにあると研究開始当初考えた。

### 2. 研究の目的

本研究は、その2つの課題解決と それらを統合した次世代超音波非破壊評価技術の創出を目的としている。本報では、特に配管の異音診断に注目し、レーザおよびマイクロフォンを用いた非接触による超音波計測技術、その計測データから機械学習を用いて異音判定を行う技術について検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 機械学習による異音判定について

本研究では、2種類の機械学習手法を用いて異音判定を行った。1つは One Class SVM (サポートベクターマシン)、1つは Auto Encoder である。いずれもごくまれに現れる異音を判定するのに適しているとされる教師なし学習に分類される。後者については、現在進行中のため、すでに結果がまとまっている One Class SVM に関する検討を報告する。

One Class SVM では、得られたデータから特徴量を抽出し、その特徴量をスケーリングおよび主成分分析による次元削減を行った後、データ空間中の境界からの離れ具合(異常度)を算出し、しきい値を設けて異常を検出する手法である。

#### (2) 実験方法

図1に示すように、配管からの音を近接するマイクロフォンデバイスにより検出し、その音響データを異音判定に用いた。マイクロフォンデバイスは、MEMS マイクと信号増幅器、Bluetooth を内蔵し、配管から漏れる音を無線で伝送できるようにした。また、そのマイクユニットに太陽光パネルを取り付けることで、遠隔からレーザで給電できるようにした。これにより、無線マイクユニットを配管に載せた状態にして、検査時にレーザ光を遠隔から照射して音響データの伝送を始めることができる。

音響データ計測実験は、図1のモックアップ配管(アルミニウム合金製の外径 114.3 mm、厚さ 6.0 mm) に水を流した状態で行った。アルミ試験配管には、ピエゾ素子を貼り付け、そこからファンクションジェネレータで生成したパルス波を与えることで、そのパルス波の異音診断を行った。音響データは、15 秒間収録し、時間分割波形として少しずつ時間シフトさせながら 1 秒間の波形を取り出す。その結果 45 個に分割された波形の時間領域および周波数領域データから、表 2 に示す 10 個のパラメータを特徴量として抽出した。そして、特徴量のデータを標準化し、主成分分析によって 2 次元としたものを学習データとし、ガウシアンカーネルを用いた One-Class SVM による異常検知モデルを構築した。

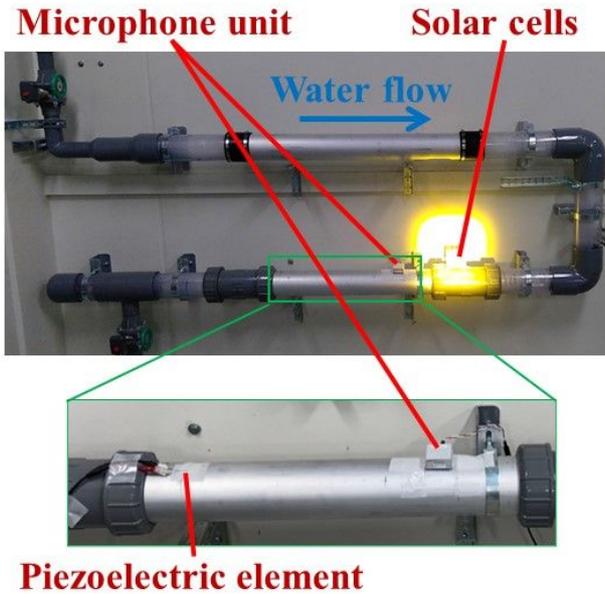


図1 実験配管とマイクユニット，ソーラーパネルの配置

表1 時間領域，周波数領域における音響データから抽出した特徴量

Domain	Feature	Equation
Time	RMS	$F_1 = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^2}$
	Crest factor	$F_2 = \frac{\max_{i \in M}  x_i }{F_1}$
Frequency	Peak	$F_3 = \max_{i \in M} X_i$
	Peak frequency	$F_4 = i \text{ s. t. } X_i = F_3$
	Median frequency	$F_5 = \arg \min_{k \in M} \left( \sum_{i=1}^k X_i - \sum_{j=k+1}^M X_j \right)$
	Relative peak	$F_6 = \max_{i \in M} \frac{X_i}{\bar{X}_i}$

#### 4. 研究成果

表2は， piezoelementに印可した種々のバースト波の仕様を示している．たとえば Burst Noneはバースト波を印加せず，流水音のみを収録したことを示し，Burst 1は8 kHz，印加電圧5Vp-p，バースト波の印加時間間隔300 msで50サイクルのバースト波を入力したデータであることを示している．それぞれ150回の計測を行い，表1の特徴量を抽出したのちに，機械学習を実施した．

表3は，それぞれの収録波形を学習データとした場合に，学習データ以外を異音として判定する精度を示したものである．たとえば，一番上の行は，流水音のみの音響データを学習データとして利用して，その機械学習モデルを使って，Burst 1~8を異音として判定した精度を示している．この場合が，いわゆる一般的な異音検出に対応しており，100%の検出精度を示した．2行目以下は，バースト波の音が混入したものを正常データとして学習させ，その学習モデルを利用

して、異なるバースト波（もしくは流水音のみ）を異常と判定するかどうかを検討した結果である。おおむね、良い結果を示したが、中には判定ができていない箇所もあった。これは、バースト波が間欠的に印加される状況で、その間のなにも現れない時間が流水音のみの場合やその他の場合と類似したと判定したことによるものと考えられる。

表2 ピエゾ素子に印可した種々のバースト波の仕様

Data label	Frequency [kHz]	Amplitude [V]	Interval [ms]	Cycles [times]	Number of measurements
Burst none		0			150
Burst 1	8	5	300	50	150
Burst 2	7	5	300	50	150
Burst 3	9	5	300	50	150
Burst 4	8	5	200	50	150
Burst 5	8	5	2000	50	150
Burst 6	8	5	300	20	150
Burst 7	8	5	300	100	150

表3 異音検知結果

Accuracy %		Test data							
		Burst none	Burst 1	Burst 2	Burst 3	Burst 4	Burst 5	Burst 6	Burst 7
Training data	Burst none		100	100	100	100	100	100	100
	Burst 1	100		100	100	100	100	99	7
	Burst 2	100	100		100	100	100	100	100
	Burst 3	100	100	100		100	100	100	100
	Burst 4	100	100	100	100		100	100	100
	Burst 5	100	100	100	100	100		41	100
	Burst 6	100	100	100	100	100	87		100
	Burst 7	100	100	100	100	100	100	100	

このような異常診断技術は、将来のプラントメンテナンスの自動化・自律化に大きく貢献できるものと考えている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5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 5件）

1. 著者名 Notani Kota, Hayashi Takahiro, Mori Naoki	4. 巻 63
2. 論文標題 Abnormal Sound Detection in Pipes Using a Wireless Microphone and Machine Learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1622 ~ 1630
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/matertrans.MT-I2022001	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 Fukuchi Takaaki, Hayashi Takahiro, Mori Naoki	4. 巻 62
2. 論文標題 Ultrasonic focusing using a stacked thin-plate region	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SJ1005 ~ SJ1005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acb361	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 Fukuchi Takaaki, Mori Naoki, Hayashi Takahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Numerical analysis of wave propagating in a periodic layered structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1048 ~ SG1048
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac48cc	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 Iiboshi Yuma, Iwata Akito, Hayashi Takahiro, Mori Naoki	4. 巻 133
2. 論文標題 Energy trapping of circumferential shear horizontal wave in a hollow cylinder	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 107044 ~ 107044
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ultras.2023.107044	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 Xia Mingqian, Hayashi Takahiro, Mori Naoki	4. 巻 63
2. 論文標題 Numerical analysis of the phased array imaging with a stacked plate buffer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 03SP55 ~ 03SP55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad25a9	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23件(うち招待講演 3件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 角井 陸斗, 綱木 大智, 森 直樹, 林 高弘
2. 発表標題 レーザー弾性波源走査法における弾性波動の時間・周波数領域解析
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤田 龍太郎, 林 高弘, 森 直樹
2. 発表標題 レーザー弾性波源走査法による損傷画像化の実験的検討 レーザ照射方法が画像に与える影響について
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本 悠磨, 林 高弘, 森 直樹
2. 発表標題 金属積層造形の欠陥画像化技術に対する機械学習の適用
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2022年度秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福地高明, 林 高弘, 森 直樹
2. 発表標題 薄板積層構造を持つパッファロッドを用いた超音波フォーカシング
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 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 川畑智裕, 林 高弘, 森 直樹
2. 発表標題 自己混合干渉を用いた非接触超音波計測
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 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 沖津 悠翔, 林 高弘, 森 直樹
2. 発表標題 CNNを用いた配管の音響遠隔診断
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2022年度卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 白髭 正規, 林 高弘, 森 直樹
2. 発表標題 CNNを用いた金属積層造形モニタリング
3. 学会等名 日本機械学会関西支部2022年度卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林高弘
2. 発表標題 レーザー照射により発生する超音波を用いた損傷画像化技術
3. 学会等名 第95回レーザー加工学会 講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角井陸斗, 森直樹, 林高弘
2. 発表標題 Lamb波エバネセントモードを用いた波動伝搬制御の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野谷洸太, 山本悠磨, 林高弘, 森直樹, 藤田文雄
2. 発表標題 One-Class SVMと無線マイクを用いた遠隔での配管の異常検知
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takaaki Fukuchi, Naoki Mori, Takahiro Hayashi
2. 発表標題 Numerical analysis of ultrasonic wave propagating through a thin plate stacked structure
3. 学会等名 The 42th Symposium on UltraSonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林高弘, 森直樹, 上野智丈
2. 発表標題 三次元積層造形における微小損傷検出の基礎検討
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 秋季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林高弘, 藤田文雄
2. 発表標題 レーザー弾性波励振とマイクロホン受信による遠隔配管損傷画像化
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 秋季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野谷洸太, 森 直樹, 林 高弘
2. 発表標題 One-Class SVM による異常検知モデルを用いた配管の音響診断
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 2021年

1. 発表者名 林高弘, 野谷洸太, 森直樹
2. 発表標題 非接触超音波計測と機械学習による自律型非破壊検査
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川畑智裕, 森直樹, 林高弘
2. 発表標題 自己混合干渉による超音波計測
3. 学会等名 日本機械学会関西支部 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎惇史, 森直樹, 林高弘
2. 発表標題 超音波による金属3次元積層造形のプロセス中モニタリング
3. 学会等名 日本機械学会関西支部 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中翔馬, 森直樹, 林高弘
2. 発表標題 複数マイクを用いたレーザ弾性波源走査法による損傷の画像化
3. 学会等名 日本機械学会関西支部 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今西賢祐, 林高弘, 森直樹
2. 発表標題 楕円上集束レーザを用いた金属表面の特性評価
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 関西支部 第46回関西支部 非破壊検査に関する研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mingqian Xia, Takahiro Hayashi, and Naoki Mori
2. 発表標題 Phased array imaging with a stacked plate buffer
3. 学会等名 The 44th Symposium on UltraSonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahiro Hayashi
2. 発表標題 Defect detection and imaging in elastic materials with complex geometries
3. 学会等名 Acoustics 2023 Sydney (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹井 海星、林 高弘、森 直樹
2. 発表標題 高繰り返しパルスレーザーを用いた選択的レーザー溶融法による金属積層造形
3. 学会等名 日本機械学会関西学生会2023年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 沖津 悠翔、林 高弘、森 直樹
2. 発表標題 無線マイクロフォンと機械学習による遠隔異音診断
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
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	森 直樹  (Mori Naoki)  (00802092)	大阪大学・大学院工学研究科・助教   (14401)	

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
---------	---------