

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：52605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14775

研究課題名(和文)震災時の建造物トリアージ情報共有網を目的とした診断モニタリング

研究課題名(英文)Structural health monitoring for building's triage information sharing network at earthquake disaster

研究代表者

高橋 義典(Takahashi, Yoshinori)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授

研究者番号：30547732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：最初の大きな地震で倒壊を免れた建造物であっても、余震に耐え続けることができるとは限らない。風や交通騒音などの環境雑音によって生じる建造物の僅かな振動を用いて、建造物の健康状態を常時監視することができれば、被災者の安全と安心を確保できる。著者らは変動する音源スペクトルに埋もれた定常的な伝達系の調波構造を強調する累積調波分析を提案し、建造物の僅かな雑音振動から固有周波数をモニタリングする実験を提案した。さらに、モニタリング情報をネットワーク上で共有するシステムの試験的な構築を試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案手法を用いることで、従来の試験信号を用いる診断手法とは異なり、建造物の健康状態の常時モニタリングが可能となる。特に安全確保が必要な都心の高層ビル等においては、地下鉄や幹線道路等からの振動・騒音など、常に多くの環境雑音にさらされており活用が期待できる。また、大震災直後で従来の診断が困難な状況においても、避難するべきか否かの判断が可能となることから、熊本地震のような余震による倒壊での被害を減らすことができる。さらに、震災時の建造物トリアージ情報共有網が実現できれば、大地震発生直後の混乱期であっても街全体の被災状況の迅速な把握が可能となる。

研究成果の概要(英文)：Even if a certain building escapes from the collapse due to the first main quake, there is no guarantee that the building can survive from the aftershocks. If it is possible to monitor the condition of the buildings constantly using some faint random vibration caused by background vibration such as wind or traffic vibration, the safety will be more secured. The authors have proposed cumulative harmonic analysis that emphasizes the hidden resonances in a time-invariant transfer function, and conducted the experimental monitoring of the resonant frequency in an actual building from the analysis of the faint random vibration on the building. From the results of comparison with the measured values of the resonant frequency by an active diagnosis it was confirmed that the estimated values utilizing the proposed method obtains an accurate value only including few percent error. Furthermore, it was tried to make a prototype of a system that shares monitoring information on a network.

研究分野：音響学

キーワード：構造診断モニタリング 常時微動 累積調波分析 固有周波数 信号処理

1. 研究開始当初の背景

近年、日本の建造物は震度6強から震度7程度の地震に対しても、人命に危害を及ぼすような倒壊の被害を生じない耐震基準が設けられている[JASO 1997]. しかし、建造物は長期間に渡り自然環境にさらされることで劣化する。地震などの自然災害による致命的な破損が生じる前に、建造物の健康状態の診断によって劣化の発見が必要である。また、大地震発生後から巨大な余震が何度ももたらされることが知られている。最初の大きな地震で倒壊を免れた建造物であっても、ダメージの度合いによっては、その後の余震に耐え続けることができるとは限らない。しかし、余震に備えて建物から避難するべきかを被災直後に判断することは難しい。建造物の健康状態を火災報知器の様にモニタリングでき、都市全体の建造物の被災状況を共有できるネットワーク(建造物トリアージ情報共有網, 図1)を構築できれば、避難所の確保にも繋がる。

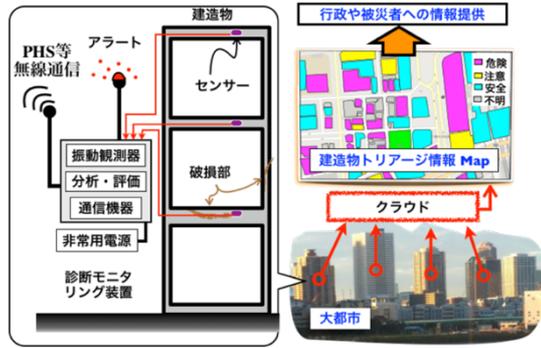


図1 建造物トリアージ情報共有網の概要

(2) 建造物の診断モニタリングに関する諸研究

最も基本的な建造物の診断手法としては、試験信号を加振し離れた点で伝達された振動を観測する手法が挙げられる[Lyon 1983]. 建造物の異常は減衰定数や固有周波数の変化として検出することができる。このような手法では試験信号を付加した時しか建造物の診断をすることができない。風や交通騒音などの環境雑音によって引き起こされる僅かな振動から、建造物の振動特性を分析できれば、建造物の健康状態を常時監視することが可能となる。機械診断の分野では、外部からの振動を用いた診断手法が幾つか提案されているものの、対象の共振特性が外部雑音のスペクトルに埋もれてしまい、外部信号の特徴が既知であることが一般的な条件である[Halliday 2002]. また、建築工学の分野では建物内での人の活動や風や騒音の少ない時間帯で行う常備微動診断[Trifunac 1972]などが研究されているが、昼夜問わず環境騒音の多い都市では、これを建造物の診断モニタリングに応用することは困難である。

一方、試験信号による加振を必要とせず、未知の雑音振動を用いた診断手法も提案されている。これらの手法は、環境雑音による僅かな振動を用いて、観測される雑音振動に埋もれている建造物の固有周波数を強調するものである。平田は、特定の音源信号を仮定しない非定常雑音振動における観測区間の主要な周期の分布(SIP: short interval periods)に基づいて、建造物の目に見えない変化をモニタリングする手法を提案している[Hirata 2004]. 振幅値を除いた主要スペクトルの周波数分布を用いることで、変動する音源スペクトルに埋もれた定常的な伝達系の調波構造を推定する手法である。しかし、SIPに関しては、音源信号のスペクトル分布の時間的変化の少ない定常雑音の場合における伝達系の推定に関する有効性は示されていない。

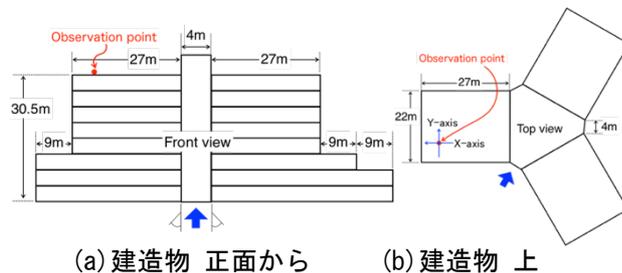
(3) 試験信号を必要としない建造物の診断モニタリング手法の提案

筆者らは累積調波分析(CHA: cumulative harmonic analysis)[Takahashi 2006]による建造物のパッシブ診断を提案してきた[Takahashi 2008]. CHAは時間とともにスペクトルを累積する効果を持った窓関数を用いて、時普遍的なスペクトルピークを強調する手法であり、元々はハウリング発生予測手法として提案された。CHAによるハウリング発生予測では、定常雑音の入力に対しても、ハウリングに発達する可能性のあるわずかなスペクトルピークを発見できることが確認されている[Takahashi 2014]. 従って、建造物のパッシブ診断においてもCHAが有効であると考えられる。これまでに模型実験を通して、建造物の固有周波数および等価帯域幅の変化が推定可能であることが示されてきた[Takahashi 2012].

さらに実際の建造物に生じる雑音振動を観測し、建造物の固有周波数の推定を試みてきた[Takahashi 2015, Takahashi 2016]. しかし、長期間にわたる観測および、アクティブ診断手法による固有周波数の実測値との比較は検討課題であった。

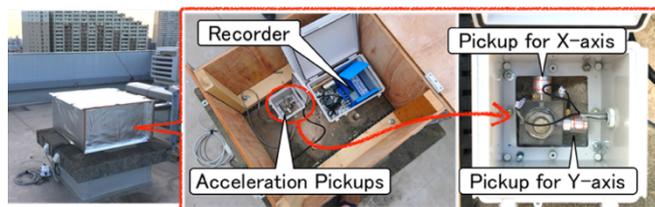
2. 研究の目的

本研究では、まず提案するパッシブ診断手法を用いて、実際の建造物の固有周波数を長期



(a) 建造物 正面から

(b) 建造物 上



Observation devices set up on the roof of a building

(c) 建造物に設置した加速度ピックアップ

図2 建造物(RC造 8階建)と設置した加速度ピックアップ

間にわたりモニタリングすることで、固有周波数の安定した推定値が得られることを確認する。その上で、建造物への重りの衝突によるアクティブな加振によって、建造物の固有周波数を実測し、提案手法による推定値の評価を試みる。さらに、震災時の建造物トリアージ情報共有網を想定した、モニタリング情報の共有網の試験的な構築を試みる。

3. 研究の方法

(1) 実建造物を対象とした固有周波数の長期間モニタリング実験

本研究では、図2に示す8階建の鉄筋コンクリート造(RC造)の建造物を対象に、長期間にわたる固有周波数のモニタリング実験を実施した。対象とした建造物は3方に向けた直方体の構造が中央部で連結された構造となっている(a, b)。そこで、本研究では1つの直方体の構造を測定対象とした。建造物の観測では、図2(c)に示すように圧電型の加速度ピックアップ(PV-87, RION)を用いた。建造物の振動による振幅が最も大きく加速度が観測しやすいと考えられる屋上に、加速度ピックアップを設置した。また、加速度ピックアップは直方体の構造物に対して、それぞれ長辺方向(X-axis, 桁行方向)と短辺方向(Y-axis, 梁間方向)を向いており各方向に対する振動を1ヶ月間にわたって観測を行なった。

観測された信号は、筆者らが提案してきたパッシブ診断手法[Takahashi 2012]を用いて分析され、建造物の固有周波数が推定される。図3は建造物に生じる微弱な雑音振動から固有周波数を推定するパッシブ診断手法の概要である。建造物の設置された加速度ピックアップでは外部雑音によって生じる建造物の微弱な雑音振動が観測される。観測された振動は矩形窓によってフレーム信号に切り出される。本実験ではフレーム長さを5秒、フレームシフトを2.5秒とした。各フレーム信号はCHAによって時間変動の無いスペクトルピークが強調される。各フレームのCHAスペクトルから一定の大きさを持つスペクトルピークの周波数を選択し、ヒストグラムを作成する。本実験では、CHAスペクトルピークの最大値の25%の大きさを持つピーク周波数を選択し、1時間毎にヒストグラムを作成した。ヒストグラムの最頻値となる周波数が1時間毎にモニタリングされる建造物の固有周波数の推定値となる。

(2) 固有周波数の推定精度の評価

建造物への重りの衝突によるアクティブな加振実験によって、建造物の固有周波数を実測し、提案手法による推定値の評価と比較した。本研究では図4に示す要領で、吊り下げた重りを柱に衝突させ建造物を僅かに加振する装置を用いてアクティブ診断を実施した。吊り下げられた袋の中には、重りとして20kgの砂袋が詰められたボイド管が入れられている。ただし、ボイド管は衝突の際に砂袋が衝撃を吸収してしまうことを防ぐ目的で使用されている。重りを入れた袋は支点から重りの中央までの長さが約1.2mとなるようにロープで吊り下げ、柱とロープの角度が30度になる程度に持ち上げ、振り子の要領で柱に衝突させる。小さな衝撃でもできるだけ大きなモーメント力を得る目的で、加振は建物の最上階の柱に対して行った。加振は12回実施し、平均と標準偏差を求めた。

(3) 災時の建造物トリアージ情報共有網を想定した、モニタリング情報の共有網の試験的な構築

本研究で提案する建造物の診断モニタリングシステムは、建造物に設置された加速度センサーが建造物の微振動を常時観測し、観測された微振動の波形から固有周波数を推定する。さらに、建造物トリアージ情報共有網では、固有周波数の推定結果に基づいて建

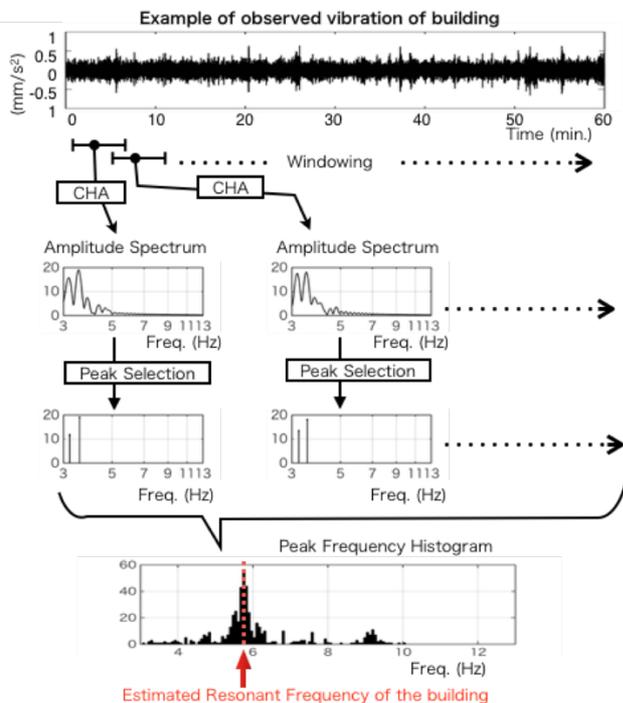


図3 建造物に生じる微弱な雑音振動から固有周波数を推定するパッシブ診断手法の概要



図4 重りの衝突によるアクティブな加振実験装置

建造物の安全性を評価し、IoT通信モジュール等を通してインターネット上の地図で建造物の状態を公開・共有するものである(図5)。

本研究では、その初期段階として、常に観測される微振動の波形ファイルを、データレコーダーよりネットワーク上のストレージ(NAS: Network Attached Storage)に移動・蓄積させる微振動の観測・転送システムの構築を試みた。図6に示すように、微振動の観測・転送システムは、無線LAN機能付きのSDカード上で動作するスクリプトを実行し、指定したNASに送信される方式(a)と、レコーダーの近傍に設置された小型のコンピュータより、SDカードにアクセスしてファイルを取得し、指定されたNASに送信される方式(b)の2通りの方法が考えられる。

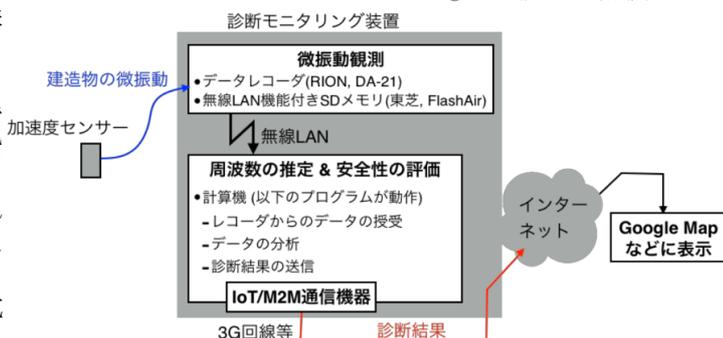
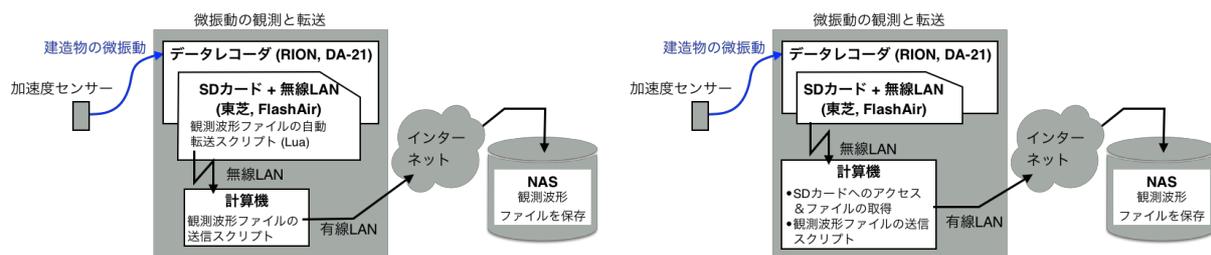


図5 建造物の診断モニタリングシステムの構成



(a) SDカードのスクリプトでファイルを送信する方式 (b) サーバからSDカードにアクセスする方式
図6 建造物に生じる微振動の観測・転送システムの試験的な構築方法

4. 研究成果

(1) 実建造物を対象とした固有周波数の長期間モニタリング実験の結果

図7はパッシブ診断手法を用いて得られた1時間毎のCHAピーク周波数ヒストグラムを表したものである。図中の黒い点は1時間毎のヒストグラムの最頻値、即ち固有周波数の推定値を表している。表1は各方向における推定値の平均と標準偏差、相対誤差である。これらの結果から、全体を通して概ね安定した推定結果が得られていることが確認できる。

(2) 固有周波数の推定精度の評価の結果

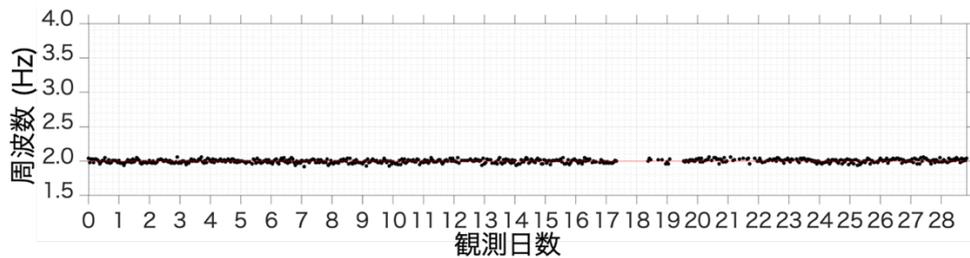
建造物に対して実施した重りの衝突による12回の加振により、固有周波数の実測値が(平均と標準偏差)が得られた(表2)。今回の加振実験では建造物の固有周波数は、X軸方向で 2.03 ± 0.13 Hz, Y軸方向で 2.79 ± 0.12 Hz と測定された。加振実験で得られた値を実験対象とした建造物の固有周波数の真値であると考え、提案手法によるモニタリングによって推定した値を評価すると、相対誤差は2%未満であることが確認できる、提案手法の有効性が確認できる[Takahashi 2019, Takahashi 2020]。

(3) モニタリング情報の共有網の試験的な構築の結果

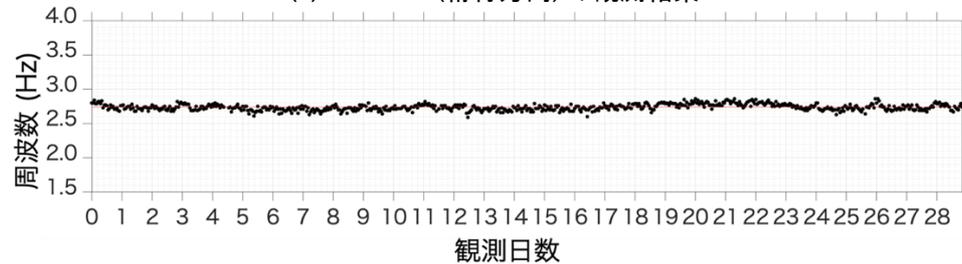
本研究では、図6(a)におけるコンピュータの代わりに無線ルーターを介して、ダイレクトにNASへファイル送信される観測・転送システムを試みた。データレコーダーはRION社製DA-21を使用し、Wifi機能付きのSDカードはTOSHIBAのFlashAir W-04を使用した。SDカードではluaによるスクリプトが実装され、1時間ごとに観測された振動データのファイルが作成される度に指定されたサーバに送信するよう設定した。その結果、システムは問題なく運用され長期間にわたる観測データを得ることが確認された[Hirata 2018]。

表1 パッシブ診断手法による建造物の固有周波数の推定結果

	X-axis 桁行方向	Y-axis 梁間方向
Average (Hz)	2.00	2.74
Standard deviation (Hz)	2.56×10^{-2}	4.45×10^{-2}
Relative error (%)	1.28	1.62



(a) X-axis (桁行方向)の観測結果



(b) Y-axis (梁間方向)の観測結果

図7 パッシブ診断手法を用いて1時間毎に推定された建造物の固有周波数。(実線は平均値)

表2 建造物に対する加振実験における固有周波数の実測結果

Impact No.	X-axis 桁行方向 (Hz)	Y-axis 梁間方向 (Hz)
Average (Hz)	2.03	2.79
Standard deviation (Hz)	0.13	0.12

参考文献

[JASO 1997] the Japan Institute of Architects and Japan Aseismic Safety Organization, Earthquake-resistant building design for architects, Shokokusha Publishing Co., Ltd., revised edition, 1997.

[Lyon 1983] R. H. Lyon, Journal of the Acoustical Society of America, 79 (4), pp. 1223-1229, 1983.

[Halliday 2002] P. J. Halliday, K. Grosh, Journal of the Acoustical Society of America, 111 (4), pp. 1709-1717, 2002.

[Trifunac 1972] M. D. Trifunac, Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 1, pp. 133-150, 1972.

[Hirata 2004] Y. Hirata, Journal of Sound and Vibration, 270, pp. 1041-1044, 2004.

[Takahashi 2006] Y. Takahashi, M. Tohyama, Y. Yamasaki, Journal of the Audio Engineering Society, 54 (7/8), pp. 620-629, 2006.

[Takahashi 2008] Y. Takahashi, T. Taniguchi, M. Tohyama, Advances in Acoustics and Vibration, vol. 2008, Article ID 261758, 2008.

[Takahashi 2014] Y. Takahashi, IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics, pp. 430-431, 2014.

[Takahashi 2012] Y. Takahashi, S. Goto, M. Tohyama, Advances in Acoustics and Vibration, Vol. 2012, Article ID 327135, 2012.

[Takahashi 2015] 高橋, 科学研究費助成事業 研究成果報告書, 24760477, 2016.

[Takahashi 2016] Y. Takahashi, Journal of the Acoustical Society of America, 140 (4), Pt. 2, 1aSA1, p. 2958, 2016.

[Hirata 2018] 平田, 根本, 高橋, 電子情報通信学会東京支部研究発表会, A-5, 2018.

[Takahashi 2019] Y. Takahashi, 23rd International Congress on Acoustics, 4712-4719, 2019

[Takahashi 2020] 高橋, 超音波テクノ 日本工業出版, 32(3), 52-55, 2020 (招待・解説)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 高橋義典	4. 巻 32
2. 論文標題 環境雑音を利用した建造物の診断モニタリング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 超音波テクノ	6. 最初と最後の頁 52--55
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 高橋義典	4. 巻 74 (8)
2. 論文標題 楽器製作とグラフィカルプログラミングで学べる小中学生向け音響学イベント	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本音響学会誌	6. 最初と最後の頁 435-439
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.20697/jasj.74.8_435	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21件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 金子卓也, 高橋義典
2. 発表標題 環境雑音を利用したボール型の屋外広告物の診断モニタリング
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 義典, 伊藤 沙織, 小林 奏人, 齊藤 章太, 真志 取秀人
2. 発表標題 作って学ぶ音響教材「スマートフォン拡声器」を活用した音の工作教室および高専出前授業の実施報告
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshinori Takahashi, Naru Sato and Yasutaka Nakajima
2. 発表標題 Field test of resonant frequency monitoring utilizing background vibration in various buildings
3. 学会等名 23rd International Congress on Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Arisa Kuramoto, Yoshinori Takahashi and Akisato Mizuno
2. 発表標題 Reproduction of shakuhachi from X-ray CT images by additive manufacturing
3. 学会等名 23rd International Congress on Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshinori Takahashi
2. 発表標題 Evaluation of Structural Health Monitoring Results utilizing Environmental Noise
3. 学会等名 Inter-noise 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋義典, 佐藤成, 中島康貴
2. 発表標題 環境雑音を利用した建造物の診断モニタリングシステムの構築
3. 学会等名 2019年 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉本有紗, 高橋義典, 水野明哲
2. 発表標題 付加製造法を利用したX線CT画像からの尺八の復元
3. 学会等名 2019年 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋義典
2. 発表標題 環境雑音を利用した建造物のパッシブ診断とその評価
3. 学会等名 アコースティックイメージング研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋義典
2. 発表標題 環境雑音を用いた建造物診断モニタリングの評価
3. 学会等名 2018年 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 倉本有紗, 高橋義典, 水野明哲
2. 発表標題 文化遺産の保護を目的とした3Dプリンタによる尺八の複製
3. 学会等名 2018年 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 真島祐樹, 高橋義典
2. 発表標題 環境雑音を利用した建造物診断モニタリングとその評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 東京支部 第23回学生会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平山翔, 根元大彰, 高橋義典
2. 発表標題 建造物の診断を目的とした振動観測システム
3. 学会等名 電子情報通信学会 東京支部 第23回学生会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋悠進, 高橋義典
2. 発表標題 累積調波分析を利用したハウリングの発生予測システムの構築
3. 学会等名 電子情報通信学会 東京支部 第23回学生会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋義典, 水野明哲
2. 発表標題 中学校の和楽器指導の充実を目的とした3Dプリンタによる尺八の複製
3. 学会等名 2018年 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤沙織, 小林奏人, 真志取秀人, 高橋義典
2. 発表標題 音響デバイスの形状について学ぶ, スマートフォン拡声器
3. 学会等名 2018年 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林真萌, 高橋義典
2. 発表標題 音響望遠レンズを目的とした環状プレート音響レンズの試作とその評価
3. 学会等名 2018年 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋義典
2. 発表標題 立体形状プログラミングを導入した音響工学科目の検討
3. 学会等名 音響教育研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林真萌, 高橋義典
2. 発表標題 音響レンズを用いた距離選択集音
3. 学会等名 若手・学生のためのAESジャパンフォーラム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林真萌, 高橋義典
2. 発表標題 焦点距離が可変な音響レンズ
3. 学会等名 2017年 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋義典
2. 発表標題 楽器製作とグラフィカルプログラミングで学べる小中学生向け音響学イベント
3. 学会等名 2017年 日本音響学会秋季研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋義典
2. 発表標題 音響教育における3Dモデルプログラミングと音響教材開発手法に関する検討
3. 学会等名 2017年 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----