

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：32629

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06161

研究課題名(和文) 波動誘導・遮断制御とエネルギートラッピング制御による安定的な無振動状態生成法

研究課題名(英文) Stable method for generation of a vibration-free state using wave-guidance, wave-blocking and energy-trapping control

研究代表者

岩本 宏之 (Iwamoto, Hiroyuki)

成蹊大学・理工学部・准教授

研究者番号：90404938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ある方向のみに伝播する波動を計測する手法(波動フィルタリング法)と、特定の波動を除去する波動制御法を組み合わせることで、1方向のみの波動伝播を許容する「波動弁」を構築した。さらに、2組の波動弁を対向させて設置することにより、構造物中を伝播する波動(外乱エネルギー)をある領域内に捕獲する制御手法を確立した。これにより、構造物中の嫌振領域において無振動状態を生成しつつ、広い領域において新たな共振が発生することを回避することが可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の波動制御法においては、構造物中に無振動状態を生成したとしても、非制御領域において新たな共振現象が発生してしまい、安定性に問題があった。そこで、構造物中の限られた領域に外乱エネルギーを封じ込めることにより問題を解決した。能動振動・音響制御分野において、エネルギーの封じ込めという概念に依拠した手法はほとんど存在せず、学術的な意義は大きいと考える。

研究成果の概要(英文)：By combining the wave filtering method that measures amplitudes of the wave propagating for a specific direction and the wave control method that reduces the specific wave propagation, the wave valve was established that allows the wave propagation for only one direction. Furthermore, the energy trapping control was presented that confines disturbance energy within the designated region by using two wave valves arranged to face each other. Based on this method, it is possible to generate a vibration-free state in a vibration-unacceptable region and to avoid the new resonances in a wide region of the target structure.

研究分野：機械力学，音響工学，制御工学

キーワード：波動制御 波動フィルタ エネルギートラッピング制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、構造振動を振動モード(固有モード)ではなく波動の観点から制御する試みに注目が集まっている。当該手法は、ある領域に流入する波動を遮断することで無振動状態の生成が可能である。これはダンピング付加に終始する従来手法では達成できない制御効果である。当該手法に関して、申請者は一次元構造物に特化していた波動制御理論を二次元問題にまで拡張し、薄肉矩形平板においても上記の制御効果を得ることが可能であることを明らかにしている。

波動制御の問題点は、空間的な制御であるがゆえに非制御領域が存在し、その領域において新たな共振現象が発生してしまうことにある。例えば、柔軟構造物のある領域に流入する波動を遮断することによって無振動状態を生成しても、対象領域においては定在波が形成され、別の共振現象に帰結してしまう。この問題は、柔軟はりや平板のように単純な構造のみならず、複雑な構造システムにおいても同様の現象が発生する。

2. 研究の目的

本プロジェクトでは構造システム内において透過・反射する外乱波動を能動制御によって誘導・遮断することで、振動現象が許容されない嫌振領域において無振動状態を生成し、かつ、ある程度の振動が許容される領域においてその振動エネルギーを捕獲し、定在波を形成させない手法を提案する。この捕獲制御においては、一方向のみの波動伝播を許容する制御系(いわば波動弁)2組構築し、これらに対向させることで実現する。本プロジェクトではこれをエネルギートラッピング制御と名付ける。

3. 研究の方法

(1) 波動フィルタの導入

一般的にフィードバック型の波動制御を行う場合、その制御則は、外力とセンサ出力の位置関係に大きく依存する。外乱に関する情報を一切必要としないことがフィードバック制御の利点であることに鑑みると、この特性は大きな問題となる。この問題に対して、構造物中を伝播する波動の情報を基調とするフィードバック制御系の構築を考える。すなわち、制御点へ流入する波動の振幅をセンサ情報とすることで、制御則が外乱の位置に依拠しないような手法を提案する。これを可能にするのが、複数のセンサ情報から構造物中を伝播する波動をダイレクト計測する波動フィルタリング法である。ここでは、隣接する2つの速度センサの情報进行处理することにより、進行波と後退波の振幅を入手する手法を導入する。

(2) 波動弁の構築

構造物中に設置した制御点において、そこを透過する波動を除去する制御系の構築を考える。フィードバック信号は上記の波動フィルタリング法によって得られた波動振幅とする。これにより、当該制御系の制御則は外乱の位置情報に依拠しなくなる。この場合、当該制御系は波動フィルタが計測対象とする方向の波動が流入した時のみ、透過波は除去され、波動伝播はブロックされる。一方、計測対象の波動とは逆方向に伝播する波動が存在する場合は、波動フィルタの出力はゼロとなり、波動制御系は機能しない。結果、波動は当該制御系をただ通過することになる。したがって、当該制御系は、対象とする方向に伝播する波動のみをブロックし、逆方向の波動を素通りさせる「弁」のような特性を持つことになる。本プロジェクトでは、これを「波動弁」と呼ぶ。

(3) エネルギートラッピング制御の提案

図1に示すように、上記の波動弁を対向させて構造物に設置することで外乱波動を捕獲する手法を提案する。すなわち、一度捕獲領域に流入した外乱波動は、当該領域内において反射を繰り返すのみであり、当該領域外に再度流出することはない。この場合、外乱波動は捕獲領域において定在波を形成するので、共振現象を発現させる。しかし、捕獲領域を狭くすることで、共振ピークを高周波領域にシフトさせることが可能であると考えられる。

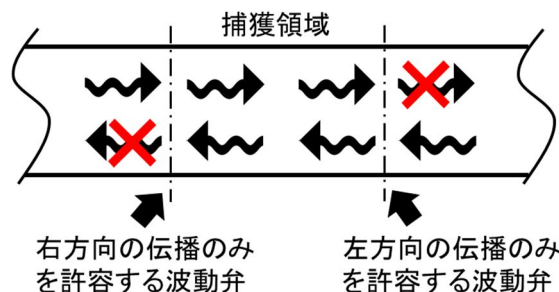


図1 波動弁によるエネルギートラッピング制御の概念図

4. 研究成果

本研究では、図2に示すような等しいマス、ダンパ、バネが一方向に N 個連なった機械系の振動解析手法を示す。 m, d, k は、それぞればね質点系の質量、減衰係数、剛性係数である。右端は自由端とし、左端に強制速度 $v_0(s)$ を与える。左から i 番目の質点の速度を $v_i(s)$ 、 i 番目の質点に右側から作用する力を $f_i(s)$ とする。また、 s はラプラス変数を表す。

(1) 伝達マトリクス法の導入

振動系の状態ベクトルは速度と力によって定義されるとすると、 $i+1$ 番目の質点における状態ベクトル $\mathbf{z}_{i+1}(s)$ は、 i 番目の質点の状態ベクトル $\mathbf{z}_i(s)$ と伝達マトリクス $\mathbf{M}(s)$ を用いて、以下のように記述される。

$$\mathbf{z}_{i+1}(s) = \mathbf{M}(s)\mathbf{z}_i(s) \quad (1)$$

ただし、

$$\mathbf{M}(s) = \begin{bmatrix} 1 & -Z(s) \\ -Y(s) & 1+Z(s)Y(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Z(s) = \frac{s}{ds+k}, Y(s) = ms$$

次に、左端において強制速度が与えられ、右端の境界条件が自由端であることに鑑みると、両端における状態ベクトルの関係式は以下のように記述される。

$$\mathbf{z}_N(s) = \mathbf{M}^N(s)\mathbf{z}_0(s) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_N(s) \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}^N(s) \begin{bmatrix} v_0(s) \\ f_0(s) \end{bmatrix}$$

さらに、伝達マトリクスの N 乗を以下のように表記するものとする。

$$\mathbf{M}^N(s) = \begin{bmatrix} M_{N,1}(s) & M_{N,2}(s) \\ M_{N,3}(s) & M_{N,4}(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入することで、 $f_0(s)$ が以下のように求まる。

$$f_0(s) = \frac{M_{N,3}(s)}{M_{N,1}(s)} v_0(s) \quad (5)$$

上式より、初期状態ベクトル $\mathbf{z}_0(s)$ の全ての要素が導出されたので、 $\mathbf{z}_0(s)$ に伝達マトリクスを必要な回数乗じることで、構造物中の任意点における状態ベクトルを計算することが可能になった。

(2) 波動フィルタリング法の導入

伝達マトリクスの固有値解析を行い、固有値 $\lambda_1(s), \lambda_2(s)$ と、固有ベクトルからなる変換行列 $\mathbf{T}(s)$ を計算すると、それぞれ以下のように求まる。

$$\lambda_1(s), \lambda_2(s) \equiv 1 + \frac{Z(s)Y(s)}{2} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{Z(s)Y(s)}{2}\right)^2 - 1} \quad (6)$$

$$\mathbf{T}(s) = \begin{bmatrix} Z^-(s) & Z^+(s) \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Z^+(s) = -\frac{Z(s)}{\lambda_2(s)-1}, Z^-(s) = \frac{Z(s)}{\lambda_1(s)-1}$$

状態ベクトルを上記の変換行列 $\mathbf{T}(s)$ によって座標変換し、その結果を式(1)に適用すると次式を得る。

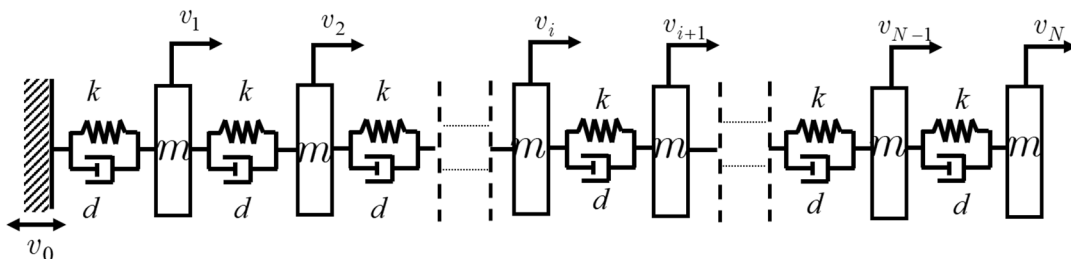


図2 バネ・マス・ダンパ系

$$\begin{bmatrix} v_{i+1}^-(s) \\ v_{i+1}^+(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1(s) & 0 \\ 0 & \lambda_2(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i^-(s) \\ v_i^+(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 $v_i^+(s)$ は i 番目の質点において + 方向に進む進行波であり、 $v_i^-(s)$ は - 方向に進む力の後退波である。また、 i 番目の質点の振動速度 $v_i(s)$ は、これらの進行波と後退波の和で表される。

次に、 i 番目の質点と $i+1$ 番目の質点の振動速度は、それぞれ進行波と後退波の和となるので、次式が成立する。

$$\begin{bmatrix} v_i(s) \\ v_{i+1}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i^-(s) \\ v_i^+(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{i+1}^-(s) \\ v_{i+1}^+(s) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(8)を式(9)に代入して整理すると、波動分離の式が以下のように得られる。

$$\begin{bmatrix} v_i^-(s) \\ v_i^+(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_1(s) & \lambda_2(s) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_i(s) \\ v_{i+1}(s) \end{bmatrix} \equiv \mathbf{W}_f \begin{bmatrix} v_i(s) \\ v_{i+1}(s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式によって示されるように、隣接する質点の振動速度情報を入手し、それに \mathbf{W}_f で表される信号処理を講じることで、進行波と後退波の振幅が得られる。

(3) 波動弁の構築

図3に示されるように、 i 番目の質点に制御力 $f_c(s)$ を設置し、その点における後退波を除去する制御系を考える。この場合、フィードバック信号は $i+1$ 番目の質点における後退波とする。制御則を $G(s)$ とすると、制御力は以下のように記述される。

$$f_c(s) = G(s)v_{i+1}^-(s) \quad (11)$$

また、振動系の状態方程式は以下のように記述される。

$$\begin{bmatrix} v_N(s) \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}^N(s) \begin{bmatrix} v_0(s) \\ f_0(s) \end{bmatrix} + \mathbf{M}^{N-i}(s) \begin{bmatrix} 0 \\ f_c(s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(11)を式(12)に代入して整理すると、 $f_0(s)$ が以下のように求まる。

$$f_0(s) = -\frac{M_{N,3}(s) - AM_{N,3}(s) + CM_{N-i,4}(s)G(s)}{M_{N,4}(s) - AM_{N,4}(s)G(s) + BM_{N-i,4}(s)G(s)} v_0(s) \quad (13)$$

上式により、初期状態ベクトルの全ての要素が確定した。そこで、 i 番目の質点における後退波を計算し、それをゼロと置くことで制御則 $G(s)$ を導出すると以下ようになる。

$$G(s) = \frac{M_{N,4}(s) + Z^+(s)M_{N,3}(s)}{Z^+(s)(A(s)M_{N,3}(s) - B(s)M_{N-i,4}(s)) + A(s)M_{N,4}(s) - C(s)M_{N-i,4}(s)} \quad (14)$$

ただし、

$$A(s) = \frac{Z^-(s)M_{1,2}(s) - Z^+Z^-M_{1,4}(s)}{Z^+(s) + Z^-(s)}, B(s) = \frac{Z^-(s)M_{i+1,1}(s) - Z^+Z^-M_{i+1,3}(s)}{Z^+(s) + Z^-(s)} \quad (15)$$

$$C(s) = \frac{Z^-(s)M_{i+1,2}(s) - Z^+Z^-M_{i+1,4}(s)}{Z^+(s) + Z^-(s)}$$

以上より、後退波のみを制御点においてブロックする波動弁が構築された。

(4) エネルギトラッピング制御法の提案

前節において提案した波動弁を対向させて構造物に設置することで、外乱波動をある領域内に捕獲すること(エネルギトラッピング制御法)を考える。この場合の制御系の概要図を図4に示す。なお、本節では紙面の都合上、当該制御系に関する理論展開は割愛し、数値解析結果のみを記載する。計算条件としては、自由度を $8(N=8)$ とし、質量を 00kg 、バネ定数を 00N/m 、減衰係数を 00Ns/m に設定する。また、波動弁の制御力は3番目と6番目の質点に設置する。

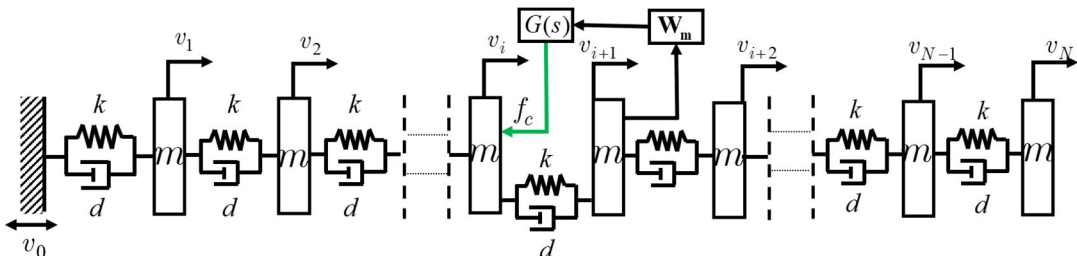


図3 波動弁の概念図

図5は質点2, 質点5および質点7における振動速度の周波数応答を表している. 質点2の周波数応答から明らかなように, エネルギートラッピング制御時において, 共振, 反共振現象が無くなり, ゲイン特性が漸近線に収束しているのがわかる. これは, 外乱点から左側の波動弁に向かう進行波のみが存在していることを意味している. 次に, 質点7の周波数応答に着目すると, 無振動状態が生成されているのがわかる. これは, 右側の波動弁によって進行波が遮断されることによって, 進行波のみならず後退波も存在しない場が生成されていることを示している. 次に, トラッピング領域である質点5の周波数応答に着目すると, 定在波があるため共振していることがわかる. ただし, トラッピング領域は2つの質点のみが存在するため, 共振ピークも2個のみとなっている.

以上より, 2つの波動弁を組み合わせることで, 質点1~3の領域においては共振現象が回避され, 反射波制御点と進行波制御点で囲まれた領域(質点4~5)では新たな共振が発生し, 進行波制御点以降(質点7~8)では無振動領域になることがわかった. すなわち, 提案されたエネルギートラッピング制御により, 無振動領域の生成と同時に, トラッピング領域に共振を閉じ込めることに成功した.

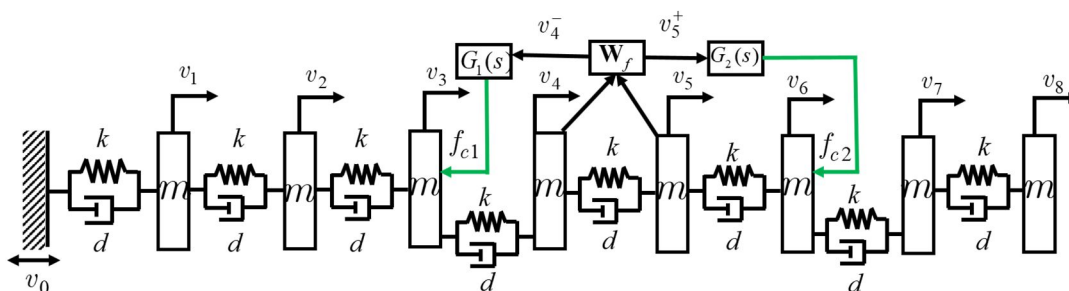


図4 エネルギートラッピング制御系の概要図

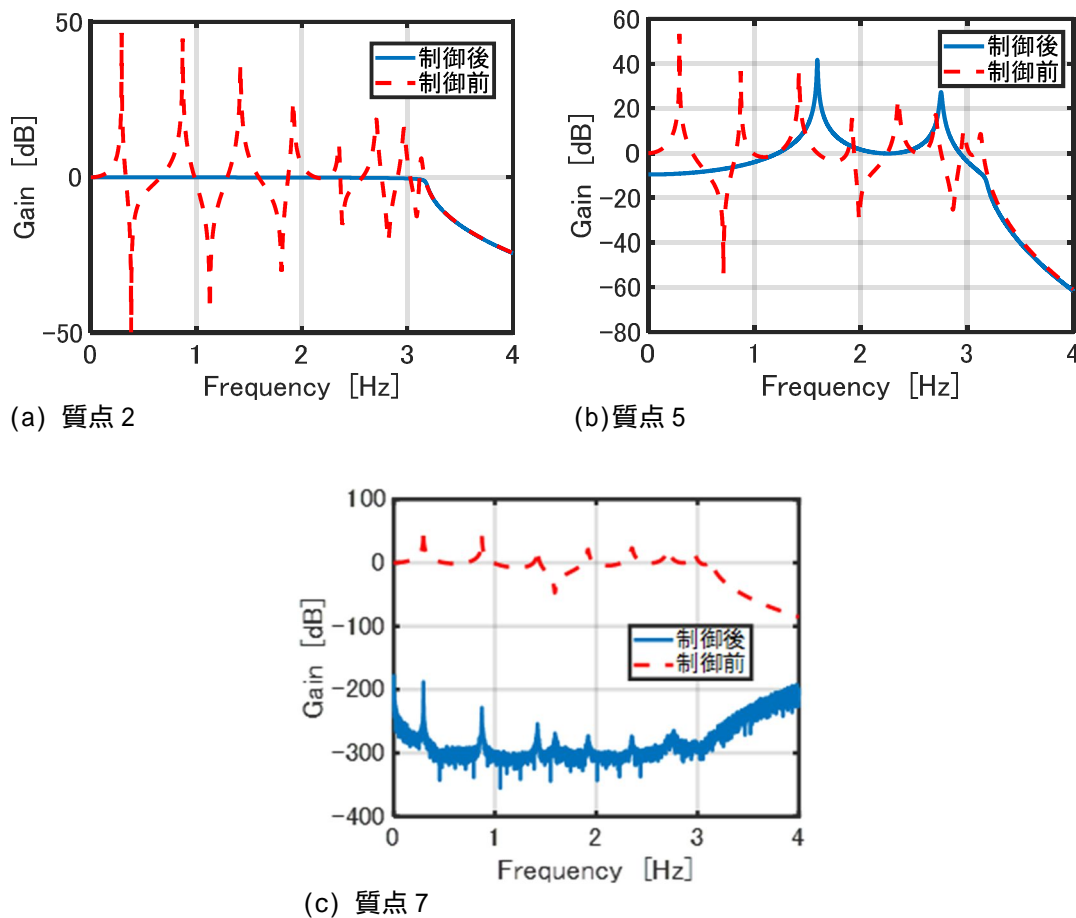


図5 振動系の周波数応答

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 岩本宏之, 田中信雄, 眞田明	4. 巻 100
2. 論文標題 Wave filter based approach for generation of a quiet space in a rectangular cavity, , vol.100, (2017), pp.570-587	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 570-587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.07.050	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 鄭小蘭, 西郷宗玄, 岩本宏之	4. 巻 4
2. 論文標題 Control of a crane rope-and-mass system by wave absorption with support feedback control	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 16-00397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1299/mej.16-00397	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18件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Hiroki Tanaka, Hiroyuki Iwamoto and Shotaro Hisano
2. 発表標題 Optimal control of acoustic radiation power for a multiple-walled structure
3. 学会等名 Asia-Pacific Vibration Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Marin Matsuyama, Hiroyuki Iwamoto and Shotaro Hisano
2. 発表標題 Adaptive control of a string-plate coupled system
3. 学会等名 Asia-Pacific Vibration Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shotaro Hisano, Satoshi Ishikawa, Shinya Kijimoto and Hiroyuki Iwamoto
2. 発表標題 Structural-acoustic coupled analysis by concentrated mass model
3. 学会等名 Asia-Pacific Vibration Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Ogasawara, Hiroyuki Iwamoto and Shotaro Hisano
2. 発表標題 Minimization of sound power using multiple control sources -on the zero control power phenomenon-
3. 学会等名 Asia-Pacific Vibration Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩本宏之, 久野翔太郎, 山田遼太郎
2. 発表標題 スマートセンサと適応フィードフォワード制御による柔軟はりのエネルギー最小化制御
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中裕貴, 岩本宏之, 久野翔太郎
2. 発表標題 多重壁構造物における音響放射パワー最適制御
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久野翔太郎, 石川諭, 雫本信哉, 岩本宏之
2. 発表標題 集中系モデルによる音響振動連成現象の解析
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小笠原雄太, 岩本宏之, 久野翔太郎
2. 発表標題 音響パワーの最小化とゼロパワー現象の発生条件
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩本宏之, 田中信雄, 眞田明
2. 発表標題 柔軟はりの放射音特性に着目した1次元ニアフィールドスピーカに関する研究
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松山茉莉, 岩本宏之
2. 発表標題 変位制御による弦・平板連成系の放射音制御
3. 学会等名 日本騒音制御工学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Marin Matsuyama, Hiroyuki Iwamoto, Nobuo Tanaka
2. 発表標題 FEEDFORWARD CONTROL OF A STRING-PLATE COUPLED SYSTEM
3. 学会等名 The 25th International Congress on Sound and Vibration (ICSV25) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka
2. 発表標題 Wave absorption of a flexible beam for band-limited spectra using direct feedback
3. 学会等名 The 24nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV24) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kentaro Okada, Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka
2. 発表標題 Active control of sound radiated from a double-walled structure using active noise control and active vibration control
3. 学会等名 The 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Makoto Matsuda and Hiroyuki Iwamoto
2. 発表標題 Semi-active vibration isolation using an inerter connected to a spring
3. 学会等名 The 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鄭小蘭, 西郷宗玄, 岩本宏之
2. 発表標題 クレーンの波動制御とフィードバック制御の統合振れ止め制御特性
3. 学会等名 D&D2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岡田健太郎, 岩本宏之, 田中信雄
2. 発表標題 能動騒音制御および能動振動制御による二重壁放射音の抑制
3. 学会等名 D&D2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka
2. 発表標題 Wave absorption of an orthotropic rectangular panel based on direct feedback
3. 学会等名 MOVIC&RASD2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroyuki Iwamoto and Nobuo Tanaka
2. 発表標題 Active control of bending waves propagating in an orthotropic rectangular panel
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016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	田中 信雄 (Tanaka Nobuo) (70305423)	成蹊大学・理工学部・客員研究員 (32629)	
研究分担者	西郷 宗玄 (Saigo Muneharu) (80357053)	成蹊大学・理工学部・客員研究員 (32629)	