

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420187

研究課題名(和文) 圧電吸音板の背後空気の縮小と広帯域化に関する研究

研究課題名(英文) Reduction of air-space and bandwidth extension of piezoelectric sound absorption panel

研究代表者

山田 啓介 (Yamada, Keisuke)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：80456798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：先行研究で提案した圧電吸音板では対象の周波数において吸音率が最大になったが、高い吸音率が得られる周波数の範囲が狭い問題が残った。そこで、本研究では高い吸音率の得られる範囲の拡大を目的に、二種類の手法を提案した。前者はL-LRC回路を用いることで、固有振動数を一つ増やす方法であり、後者は平板を加振する音圧を増幅し、平板の見かけの機械インピーダンスを低減する方法である。前者では周波数の範囲が5割程度広がり、後者では約3倍に広がった。また、本手法では音場が平板の変位で加振されるため、変位加振の場合のモード解析手法の研究も行った。さらに、圧電吸音板を用いたエネルギー回生の可能性についても研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We proposed a piezoelectric sound absorbing panel in the preceding research. The sound absorption coefficient was maximized at the targeted frequency; however, there remains a problem that the frequency range where the sound absorption coefficient is high is narrow. Therefore, two methods that broaden the frequency range were proposed in this research. One method uses an L-LRC circuit instead of the LR circuit to increase a natural frequency. The other method amplifies the excitation sound pressure that is added to the plate using a microphone and another piezoelectric element. This active method decreases the mechanical impedance of the plate. The frequency range is increased by about 50 % and 250 % by the former and latter methods, respectively. In addition, the modal analysis of the acoustic field that is subjected to the displacement excitation was also studied. Furthermore, the effectiveness of the energy harvesting using the piezoelectric sound absorbing panel has been studied.

研究分野：工学

キーワード：吸音 低周波音 圧電素子 スマート構造システム 共鳴 エネルギーハーヴェスティング モード解析

## 1. 研究開始当初の背景

静かな空間にするためには、騒音源の除去が最善の対策であり、それができない場合には騒音源の振動の低減が効果的である。しかし、機械や電化製品の場合、騒音源の除去は通常不可能であり、振動を低減する対策を行っても十分に騒音を抑えられない場合がある。そこで、騒音自体の低減も必要であり、一般には吸音材が用いられる。多孔質吸音材などの一般的な吸音材は、材料表面の粘性で気体粒子の運動エネルギーを消散するが、吸音材を設置する壁際には低周波域で気体の粒子速度が小さいため、低周波音に対しては吸音率が低い欠点がある。いっぽう、能動的な消音手法は低周波音の低減に適しているが、スピーカと複数のマイクロホンが必要であり、常に系の安定性が問題となるため、広く実用されているとはいえない。

低周波音の吸音を目的として、研究代表者らは先行研究で圧電吸音板を提案した。これは、平板に圧電素子を貼付し、その圧電素子にLR回路を接続することで平板に適切な大きさの減衰を付加し、入射音を受動的に吸収する手法である。この方法は音圧が平板を加振することで平板にエネルギーを与え、その結果として音のエネルギーが減るため、装置を音圧が高い壁際に設置する方が効果的である。先行研究において基礎的な知見は得られたが、まだ複数の課題が残されている。圧電吸音板の最大の問題は平板の共振を用いるという性質上、高い吸音率の得られる周波数の範囲が狭く、対象周波数から少し離れると吸音率が大きく低減することである。そこで、第一の課題は高い吸音率の得られる周波数域の拡大である。第二の課題は、これまでの圧電吸音板では吸収した音のエネルギーを抵抗器で熱として消散しているが、このエネルギーの回生である。また、付随する課題として、平板による変位加振を受ける音場の解析方法の確立も必要である。

本研究では圧電吸音板の小型化のために、平板に負剛性を付加して背後空気の空気ばねを相殺する方法の研究も行ったが、先行研究を超える成果は得られなかった。しかし、高い吸音率の得られる周波数域を拡大する方法が吸音板の小型化にも貢献するので、こちらの方法の研究に注力した。

## 2. 研究の目的

研究代表者らは先行研究において圧電吸音板を提案し、さらにこれを応用して音場の共鳴音を抑える方法も提案した。後者の方法を圧電吸音板と区別して、本研究では圧電制音板と称している。圧電吸音板は圧電素子と回路によって平板に適切な大きさの減衰を付加することで、平板が入射音のエネルギーを吸収するように動作する新しい吸音方法である。先行研究で基礎的な知見は得られたが、1章で述べた複数の課題が残されており、本研究はこれらの課題の解決を第一の目的と

する。具体的には、受動型およびハイブリッド型の圧電吸音板による、高い吸音率の得られる周波数域の拡大である。また、本手法はエネルギーの回生と相性がよいので、圧電吸音板を用いたエネルギーの回生に関する基礎的な知見を得ることを第二の目的とする。また、音場の共鳴を抑える圧電制音板の場合には変位加振を受ける音場の解析が必須であり、この解析方法の確立を第三の目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) L-LRC回路を用いた受動型圧電吸音板による吸音効果の広帯域化

本研究では、先行研究で用いたLR回路の代わりにL-LRC回路を用いる。L-LRC回路を用いることで圧電素子の静電容量も含めて考えると電気系が2自由度系になり、圧電吸音板の固有振動数が一つ増える。これにより平板が共振によって大きく振動する周波数の範囲が広がり、吸音効果が広帯域化される。理論的にL-LRC回路の最適値を求め、シミュレーションと実験で有効性を実証する。

### (2) 加振音圧に比例した力を圧電吸音板に加えることによる吸音効果の広帯域化

圧電吸音板が音のエネルギーを効率よく吸収するためには、平板が音圧を受けながら大きく振動する必要がある。すなわち、圧電吸音板の機械インピーダンスは小さい方がよい。そこで、平板の前面においてマイクロホンで音圧を測定し、これに比例した力をもう一組の圧電素子で平板に加えることにより、音場から見た圧電吸音板の機械インピーダンスを低減する方法を提案する。理論的に回路の最適値を求め、シミュレーションと実験で実証する。

### (3) 圧電吸音板によるエネルギー回生

従来の圧電吸音板ではLR回路の抵抗器において音のエネルギーを熱に変換して消散しているため、これを蓄積すればエネルギーは回生できる。本研究では、回生エネルギーの最大化を目的とした場合のLR回路の最適値を求め、吸音を目的とした場合のLR回路の最適値と比較する。また、それぞれの最適値を用いた場合の吸音率と回生エネルギーを比較する。理論と実験の両面より検証する。

### (4) 変位加振を受ける音場のモード解析

圧電制音板の研究では音場の共鳴音の低減が目的であるため、音場の理論解析も不可欠である。音場は平板の変位で加振されるがこの場合の音場の理論解析は不十分であった。本研究では圧電制音板の最適値を求める必要もあり、そのためには支配方程式の低自由度化が必要であるため、モード解析を用いて理論解析を行う。

(5) 一次元音響管の開口部からの放射音の低減

一次元音響管でモデル化できるダクトの開口端からの放射音の低減を目的として、次の二通りの研究を行う。一つは、管内の共鳴音を低減するため、ダクトの側面に圧電制御音板を設置する方法の研究、もう一つはダクト内に進行波のみが存在する条件下で圧電吸音板を用いて進行波を吸収する方法の研究である。

#### 4. 研究成果

(1) L-LRC 回路を用いた受動型圧電吸音板による吸音効果の広帯域化

図1にL-LRC回路を用いた受動型圧電吸音板の概略を示す。平板に貼付された圧電素子は一種のコンデンサであり、静電容量を持つ。そのため、電気系全体で二自由度の回路である。圧電吸音板では平板の基本振動モードを用いるため、他の振動モードを無視すれば、振動系は実質的に三自由度振動系となる。LR回路を用いた場合は二自由度振動系であるため、L-LRC回路を用いる場合には自由度が一つ増え、固有振動数も一つ増えることになる。これにより圧電吸音板が共振する周波数域が拡大され、高い吸音率が得られる周波数域が広がる。本研究では三つの周波数で吸音率が最大の1になる条件より、L-LRC回路の最適値を求めた。図2に吸音率のシミュレーションと実験の結果の一例を示す。三つの周波数において高い吸音率が得られており、LR回路に比べると高い吸音率が得られる範囲が広がった。

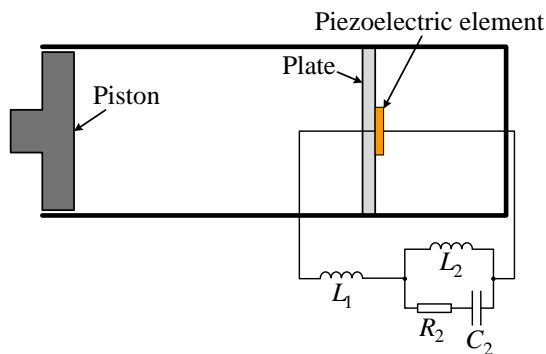


図1 L-LRC 回路を用いた圧電吸音板の概略

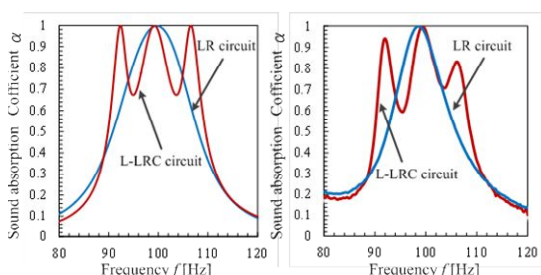


図2 L-LRC 回路を用いた方法の吸音率のシミュレーションと実験の結果の一例

(2) 加振音圧に比例した力を圧電吸音板に加えることによる吸音効果の広帯域化

図3に提案手法の概略を示す。本手法では平板前面の音圧をマイクロホンで測定し、これに比例した加振力をもう一組の圧電素子で平板に加えることにより、音場からみた圧電吸音板の見かけの機械インピーダンスを低減する。これにより、圧電吸音板の振幅が増幅し、等しい音圧を受ける場合の吸収エネルギーが増し、高い吸音率が得られる周波数域が拡大する。本研究では加振音圧の増幅を含めてLR回路の最適値を求めた。

また、一本のマイクロホンで平板前面の音圧を測定すると、加振音圧の増幅率  $n$  が1になる前後でハウリングが生じた。そこで、図3に示すように、分布マイクロホンを導入した。実際には図3のように長さを持つマイクロホンは入手できないため、本研究では3本

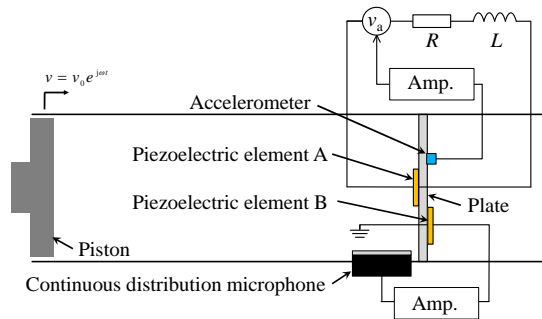
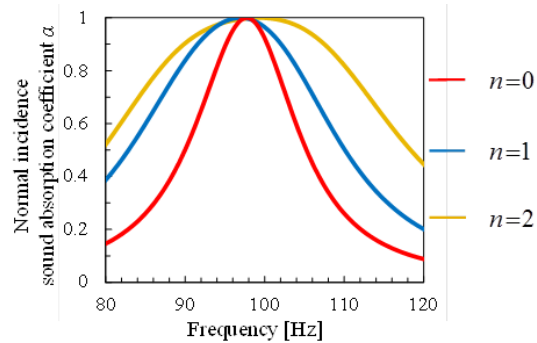


図3 加振音圧を増幅する方法の概略

(a) Simulation



(b) Experiment

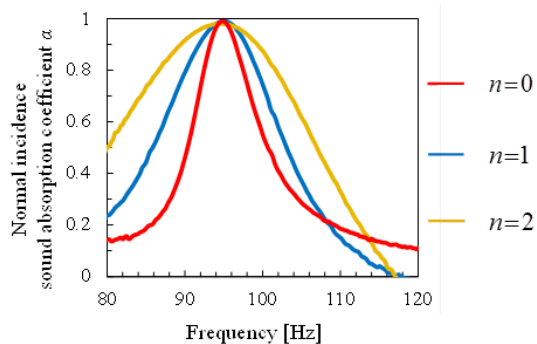


図4 加振音圧を増幅する方法のシミュレーションと実験の結果の一例

のマイクロホンを一定の距離で配置した。3本のマイクロホンで測定される音圧の和を用いると、マイクロホン間の距離で決まる不可観測周波数が存在することになるため、これをハウリングの生じている周波数に合わせることでハウリングの問題を解決した。図4に吸音率のシミュレーションと実験結果の一例を示す。高い吸音率が得られる周波数域が約3倍になった。

### (3) 圧電吸音板によるエネルギー回生

本研究ではLR回路を用いた圧電吸音板でエネルギーを回生する場合の理論解析と実験を行った。吸音ではなく、回生エネルギーの最大化を目的とした場合のLR回路の最適値を求め、吸音率の最大化を目的とした場合の結果と比較した。なお、これらの比較は騒音の周波数が単一かつ一定の周波数の場合と、白色雑音の場合の二通りで行った。騒音の周波数が単一かつ一定の周波数の場合は、吸音とエネルギー回生を目的とする場合それぞれでLR回路の最適値が異なり、白色雑音の場合は両者の最適値が一致することを見出した。

### (4) 変位加振を受ける音場のモード解析

圧電制音板の研究は音場の共鳴音の低減が目的であるため、音場の解析も行う必要がある。この場合、音場は平板の変位によって加振される。音場の一つの固有振動数による共鳴を、平板の基本振動モードの共振と、電気系のLC共振を用いて抑えるため、実質的には3自由度振動系を考えればよい。そのためにはモード解析で振動系を解析する必要があるが、変位加振を受ける音場のモード解析の方法は確立されていない。そこで、本研究では変位加振を等価な力加振と固定の境界に置きかえる方法を提案し、変位加振を受ける音場のモード解析の方法を確立した。

### (5) 一次元音響管の開口部からの放射音の低減

ダクトの開口部からの放射音の低減を目的として、二通りの研究を行った。一つ目は管内の共鳴音を低減するために、管の側面に圧電制音板を設置する方法の研究である。本研究ではモード解析を用いて平板とLR回路の最適値を求め、シミュレーションと実験で有効性を確認した。

また、二つ目の研究では一次元音響管が十分に長く、管内に音場の進行波しか存在しないと見なせる条件下で、管の側面に設置した圧電吸音板で騒音を吸音する方法の研究を行った。図5に提案手法の解析モデルを示す。この場合は、LR回路の最適値を定点理論に基づいて近似的に求めることができた。また、(2)の方法を本研究にも適用し、吸音効果の得られる周波数域を拡大する研究も行う

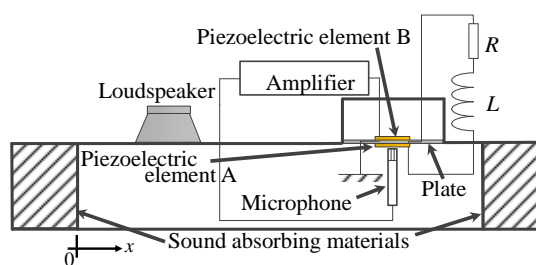
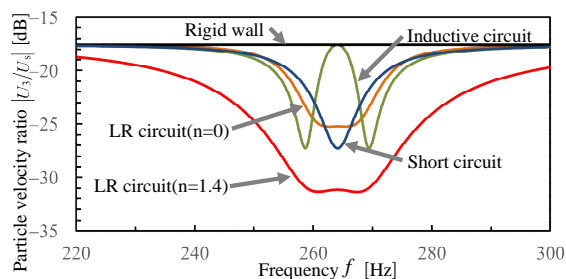


図5 開口部からの放射音の低減を目的とした圧電吸音板の解析モデル

#### (a) Simulation



#### (b) Experiment

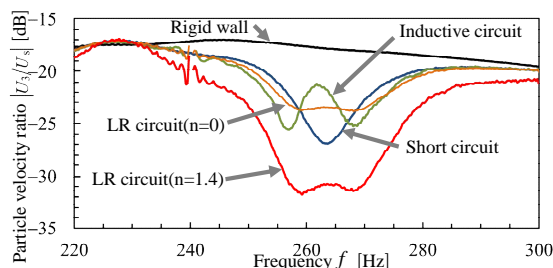


図6 開口部の粒子速度比のシミュレーションと実験の結果の一例

た。図6にシミュレーションと実験の結果の一例を示す。ここでも、 $n$ は加振音圧の増幅率である。圧電吸音板の代わりに剛壁を設置した場合と比べて、提案手法では開口部における粒子速度が低減されていることが分かる。

#### <引用文献>

中澤 知哉, 山田 啓介, 松久 寛, 宇津野 秀夫, 澤田 勝利, 圧電素子を利用した吸音パネルによる低周波騒音の低減, Dynamics and Design conference 2011, (2011), CD-ROM 724.

西田 隼人, 山田 啓介, 二自由度共振回路による圧電吸音板の性能向上, 日本機械学会関西学生会平成28年度学生員卒業研究発表講演会, (2017), p. 16-2.

寺尾 保紀, 山田 啓介, 振動増幅による圧電吸音板の吸音特性の広帯域化, Dynamics and Design Conference 2016, (2016), USB memory 308.

寺尾 保紀, 山田 啓介, 振動増幅による圧電吸音板の吸音特性の広帯域化, 日本機械学会関西支部第92期定時総会講演会,

(2017), p. 191 .

平山 恵太, 山田 啓介, 圧電吸音板によるエネルギーハーベスティングの理論的解析, 第 17 回システムインテグレーション部門講演会, (2016), USB memory 103-5 .

山田 啓介, 構造-音場および音場-音場の連成振動の理論解析, Dynamics and Design Conference 2016, (2016), USB memory 342

山田 啓介, 連続体の境界における変位加振の等価な力加振への置換による解析, Dynamics and Design Conference 2014, (2014), USB memory 654 .

川端 優介, 山田 啓介, 圧電制音板による一次元音響管の開口端からの放射音の低減, 日本機械学会関西学生会平成 26 年度学生員卒業研究発表講演会, (2015), p. 16-19 .

今井 勇企, 山田 啓介, 圧電吸音板を用いた音響管内の進行波の吸収, Dynamics and Design Conference 2016, (2016), USB memory 306 .

今井 勇企, 山田 啓介, 圧電吸音板と振動増幅を用いた音響管内の進行波の吸収, 日本機械学会関西支部第 92 期定時総会講演会, (2017), p. 192 .

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Keisuke YAMADA, Junichi KURATA, Hideo UTSUNO, and Yoshihiro MURAKAMI, Optimum values of electrical circuit for energy harvesting using a beam and piezoelectric elements, Mechanical Engineering Journal, 査読有, 掲載決定.

〔学会発表〕(計 2 2 件)

山田 啓介, 振動源の振動特性を考慮した振動エネルギー回生用回路の最適値, 日本機械学会関西支部第 92 期定時総会講演会 2017 年 3 月 14 日, 大阪大学 (大阪)

西田 隼人, 山田 啓介, 二自由度共振回路による圧電吸音板の性能向上, 日本機械学会関西学生会平成 28 年度学生員卒業研究発表講演会, 2017 年 3 月 11 日, 大阪大学 (大阪)

平山 恵太, 山田 啓介, 圧電吸音板によるエネルギーハーベスティングの理論的解析, 第 17 回システムインテグレーション部門講演会, 2016 年 12 月 15 日, 札幌コンベンションセンター (北海道)

山田 啓介, 構造-音場および音場-音場の連成振動の理論解析, Dynamics and Design Conference 2016, 2016 年 8 月 25 日, 山口大学 (山口)

今井 勇企, 山田 啓介, 圧電吸音板を用いた音響管内の進行波の吸収, Dynamics and Design Conference 2016, 2016 年 8 月 23 日, 山口大学 (山口)

寺尾 保紀, 山田 啓介, 振動増幅による圧電吸音板の吸音特性の広帯域化,

Dynamics and Design Conference 2016, 2016 年 8 月 23 日, 山口大学 (山口)

Yamada Keisuke, Optimum Values of Circuit Used in Energy Harvesting Using Piezoelectric Elements or DC Motors, The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics, 2016.8.10, Kanazawa Miyako Hotel (Ishikawa)

Yamada Keisuke, Utsuno Hideo, MODAL ANALYSIS OF CONTINUOUS BODY SUBJECTED TO DISPLACEMENT EXCITATION USING COORDINATE TRANSFORMATION, The 23rd International Congress on Sound and Vibration, 2016.7.11, Athens (Greece).

山田 啓介, 電磁誘導または圧電効果を用いた振動エネルギー回生の回路の最適値, 日本機械学会関西支部第 91 期定時総会講演会, 2016 年 3 月 12 日, 大阪電気通信大学 (大阪)

寺尾 保紀, 山田 啓介, 圧電吸音板の共振増幅による吸音効果の広帯域化, 第 16 回システムインテグレーション部門講演会, 2015 年 12 月 16 日, 名古屋国際会議場 (愛知)

今井 勇企, 山田 啓介, ダクト出口放射音の圧電吸音板による低減, 第 16 回システムインテグレーション部門講演会, 2015 年 12 月 16 日, 名古屋国際会議場 (愛知)

山田 啓介, 宇津野 秀夫, 変位加振を受ける連続体の座標変換を用いた振動解析, Dynamics and Design Conference 2015, 2015 年 8 月 25 日, 弘前大学 (青森)

Yamada Keisuke, Utsuno Hideo, THEORETICAL ANALYSIS OF VIBRATION OF CONTINUOUS BODY USING REPLACEMENT OF DISPLACEMENT EXCITATION WITH FORCE EXCITATION, The 22nd International Congress on Sound and Vibration, 2015.7.15, Florence (Italy).

大庭 崇史, 山田 啓介, 圧電吸音板の背後空気の空気ばねの負ばねによる直接相殺, 第 15 回システムインテグレーション部門講演会, 2014 年 12 月 17 日, 東京ビッグサイト (東京)

Keisuke YAMADA, Kenta YAMAGATA, and Hideo UTSUNO, Reduction of air space behind piezoelectric absorbing panel using negative stiffness, inter.noise 2014, 2014.11.17, Melbourne (Australia).

山田 啓介, 連続体の境界における変位加振の等価な力加振への置換による解析, Dynamics and Design Conference 2014, 2014 年 8 月 29 日, 上智大学 (東京)

〔その他〕

ホームページ等  
<http://vibration.jp/>

## 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

山田 啓介 (YAMADA, Keisuke)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：80456798

(2)研究分担者

宇津野 秀夫 (UTSUNO, Hideo)  
関西大学・システム理工学部・教授  
研究者番号：00362442

(4)研究協力者

寺尾 保紀 (TERAO, Yasuki)  
今井 勇企 (IMAI, Yuki)  
西田 隼人 (NISHIDA, Hayato)  
平山 恵太 (HIRAYAMA, Keita)  
田中 敏史 (TANAKA, Satoshi)  
大庭 崇史 (OBA, Takafumi)  
川端 優介 (KAWABATA, Yusuke)