

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月20日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760206

研究課題名（和文） 圧電素子を用いた吸音板に関する研究

研究課題名（英文） Sound absorbing panel using piezoelectric element

研究代表者

山田 啓介（YAMADA KEISUKE）

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80456798

研究成果の概要（和文）：一般によく知られている板振動型吸音は、平板の固有振動数の近傍で吸音効果が得られるが、平板の減衰の不足が原因で、その吸音効果は不十分であることが多かった。そこで本研究では、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によって平板に等価的に減衰を付加し、高い吸音率を得る方法を提案した。本研究では、圧電素子の効果を等価的に高める手法との組合せも検討した。また、吸音板の背後空気の空気ばねを相殺するため、圧電素子と負性容量回路を用いた負剛性の付加についても提案した。

研究成果の概要（英文）：The sound absorbing effect of the plate that is obtained at around the natural frequency of the plate is well known; however, the effect is usually insufficient because of the lack of the damping ratio of the plate. Therefore, we proposed the sound absorbing panel using the piezoelectric element and LR circuit. Because the piezoelectric element and LR circuit give the damping effect to the plate, the proposed sound absorbing panel indicated the high sound absorption coefficient. In addition, the method that enhances the efficiency of the piezoelectric element was applied to the proposed method. The method that gives negative stiffness to the plate using the negative capacitance was also proposed in order to cancel the air spring effect of the air space behind the sound absorbing panel.

交付決定額

（金額単位：円）

|       | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 2,100,000 | 630,000 | 2,730,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：吸音，低周波音，圧電素子，スマート構造，共鳴，動吸振器

## 1. 研究開始当初の背景

静かで快適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、次に騒音源の振動の低減が効果的である。しかし、それらの対策が不可能な場合や、それだけでは不十分な場合には発生してしまっている騒音自体の低減が求められる。身近な例では、道路騒音や乗り物の室内の騒音がある。一般に騒音は吸音材を用いて音のエネルギーを熱エネルギーに変換することで低減する。最も一般

的に用いられているグラスウールやウレタンフォームなどの多孔質吸音材は、主に粘性減衰でエネルギーを消散させる機構となっている。多孔質吸音材は、ある程度以上の周波数域では周波数に関係なく高い吸音率を示すが、低周波音に対しては吸音率が低い。一方、低周波音の低減に有効な方法として板振動型吸音がある。板振動型吸音では、平板の固有振動数近傍で平板が共振し、周波数選択的に吸音効果が得られる。エネルギーの流

れとしては、音圧が平板を加振し、平板が共振することで音のエネルギーが平板の振動のエネルギーに流れ込む。この平板の振動のエネルギーは、平板の構造減衰で熱エネルギーに変換され、消散される。平板の固有振動数を低く設定すれば、低周波音の低減に効果があるが、実際には板振動型吸音は広くは用いられていない。この理由は、板振動型吸音では平板の減衰に最適値が存在するが、最適値を満足する大きな減衰を平板に自由に付加することが困難なためである。すなわち、平板に任意の大きさの減衰を付加する方法が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、圧電素子を貼付した平板とアナログ回路による低周波音の吸音を目指し、理論的に吸音率を導出し、回路と平板の最適値を求めることを目的とする。圧電素子を遮音板に適用した研究は数多くあるが、吸音板に用いた例は見当たらない。この理由は、吸音板は遮音板とは逆に平板が薄いほど効果が高まるが、同時に大きな減衰の付加が必要となり、従来は圧電素子でそのような大きな減衰が得られなかったためである。一方、研究代表者らは圧電素子の効果を高める手法を先行研究で提案した。本研究ではこの手法を用いることで、吸音板に十分な減衰性能を付加することを目指す。また、吸音板の背後には空気が密閉された空間が必要であるが、これは対象とする周波数では空気ばねとして働く。平板を薄くすると、平板の剛性に対してこの空気ばねの影響が無視できず、吸音効果の得られる周波数を下げることができなくなると考えられる。そこで、圧電素子と負性容量回路を用いた負剛性の付加により、吸音板の固有振動数を低減する方法についても効果を確認する。さらに、圧電素子を貼付した平板を用いて、閉空間の共鳴音を低減する場合についても検討し、圧電素子と回路の最適調整条件を導く。最終的にシミュレーションと実験で提案手法の有効性を確認する。

## 3. 研究の方法

圧電素子を用いた振動制御の場合は回路の最適調整条件を導くだけでよかったが、圧電吸音板の場合は平板も含めて最適に設計する必要がある。また、共鳴音を低減する場合には音場との連成も考慮しなければならない。平板の背後空気の空気ばねの影響の低減も必要であるので、以下のように課題を整理して、それぞれの課題に取り組んだ。

(1) LR直列回路を用いた受動型圧電吸音板の理論解析と最適設計および実験

(2) LR回路を用いた受動型圧電制音板の理論

解析と最適設計および実験

(3) 負性容量回路を用いて電氣的に負剛性を付加する手法との組合せ

(4) 平板の振動変位信号を用いたハイブリッド型圧電吸音板の理論解析と最適設計および実験

## 4. 研究成果

(1) LR直列回路を用いた受動型圧電吸音板の理論解析と最適設計および実験

図1に提案した受動型圧電吸音板の概略を示す。また、図2に提案手法の等価機械モデルを示す。圧電吸音板の右側の背後空気は、対象とする周波数の音の波長に比べて長さが十分に短いとすると空気ばねとして働く。図2において空気ばねはばね定数が $K_T$ のばねに含まれており、空気ばね自体のばね定数は $K_a$ である。提案手法では平板の基本振動モードの共振を利用するため、等価機械モデルにおいては、平板は一自由度振動系で表されている。また、圧電素子の静電容量がばね、LR回路のインダクタンスが質量、抵抗がダッシュポットで等価的に与えられ、平板と合わせると二自由度振動系となる。圧電素子とLR回路による電気系は動吸振器と同等の働きをするため、その固有振動数の付近で平板に減衰を等価的に付加する効果がある。本研究では図2の等価機械モデルを用いて受動型圧電吸音板の垂直入射吸音率を理論的に求め、特定の周波数で吸音率を最大の1にする調整条件と、白色雑音が入射される場合に吸収する音のエネルギーを最大化する調整条件を理論的に求めた。また、これらの二種類の調整条件を同時に満たす条件も導き、吸音率がほぼ1になる周波数の範囲が広くなり、ロバスト性の高い吸音板となることを見出した。シミュレーションと実験で理論解析の妥当性を確認した。図3に吸音率の最大値を1にする調整を行った実験の結果を示す。この実験において、平板のみでは減衰が不足して吸音率の最大値は0.6程度であったが、提案手法では圧電素子とLR回路による効果で吸音率の最大値はほぼ1となった。

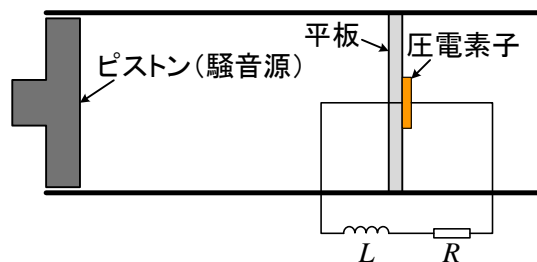


図1 受動型圧電吸音板の概略

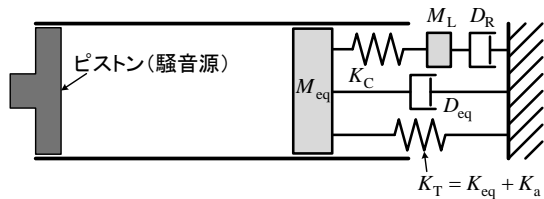


図2 受動型圧電吸音板の等価機械モデル

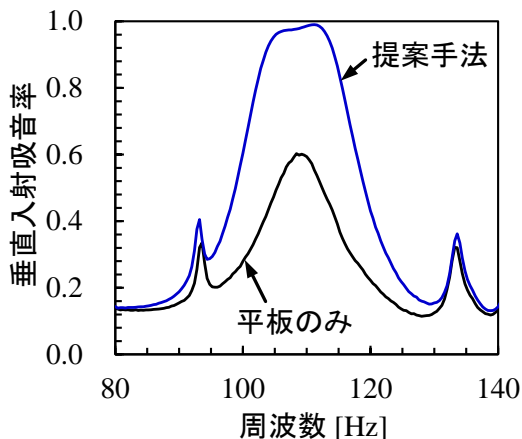


図3 受動型圧電吸音板の実験結果

(2) LR回路を用いた受動型圧電制音板の理論解析と最適設計および実験

図1において、平板の左側の音響管内の共鳴音を低減することを目的とした受動型圧電制音板を提案した。提案した圧電制音板は外見上は図1と変わらないが、音場の共鳴も考慮する必要があるため、音場の音響モードと、平板と回路からなる二自由度振動系の連成を考える必要がある。提案手法は音場の一つの音響モードに対して低減効果が得られるため、近似的にほかの音響モードを無視すると、全体として実質は三自由度振動系の問題となる。平板と回路からなる二自由度振動系は音場に対する二重吸振器の働きをするが、一般的な二重動吸振器と同様に解析的に

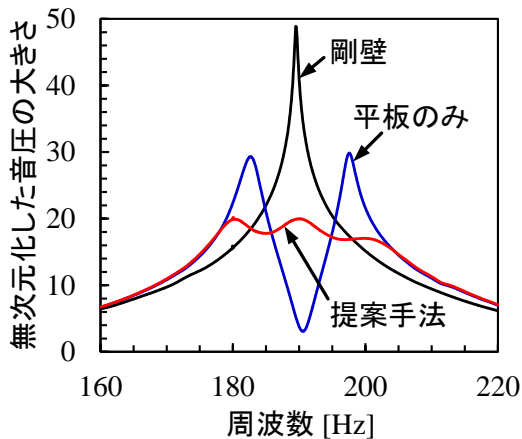


図4 受動型圧電制音板の実験結果

その最適調整条件を導出することができない。そこで、本研究では近似を用いて準最適調整条件を求めた。シミュレーションと実験により理論解析の妥当性を確認した。図4に実験結果の一例を示す。本実験で使用した音響管の長さが0.9mであったため、音響管の一次の共鳴の固有周波数は約190Hzであった。低周波音は100Hz以下の音であるため、本実験で低減した音は低周波音とは言えないが、本質的な差異はないため、本手法は低周波音に対しても有効である。

(3) 負性容量回路を用いて電的に負剛性を付加する手法との組合せ

図5に負性容量回路を用いた圧電吸音板の概略を示す。また、図6に等価機械モデルを示す。本手法では図1に示したLR回路を用いる方法のインダクタンスの代わりに負性容量回路を使用する。本手法では負性容量回路と抵抗の調整により、負剛性と減衰を同時に平板に付加する。図6の等価機械モデルにおいては、圧電素子の静電容量に相当するばねと負性容量回路に相当する、ばね定数が負のばねが直列に接続される形で表される。負性容量回路に相当するばねの負のばね定数を調整することにより、両者を合成したばねのばね定数を負にすれば、平板の固有振動数を下げることができる。同時に抵抗に相当するダッシュポットで適切な減衰も付加する必要がある。本研究ではこれらの最適調整条件を解析的に導出した。また、シミュレーションと実験で提案手法の有効性を確認した。図7に実験結果の一例を示す。本実験では、吸音率がピークとなる周波数が低周波数側に約30Hzだけ移動しているが、これは圧電吸音板の固有振動数を変えることなく背後

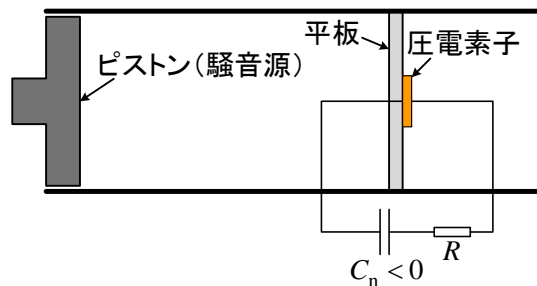


図5 負剛性を付加する手法の概略

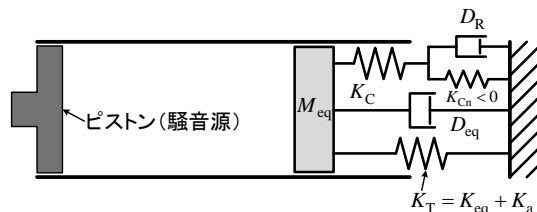


図6 負剛性を付加する手法の等価機械モデル

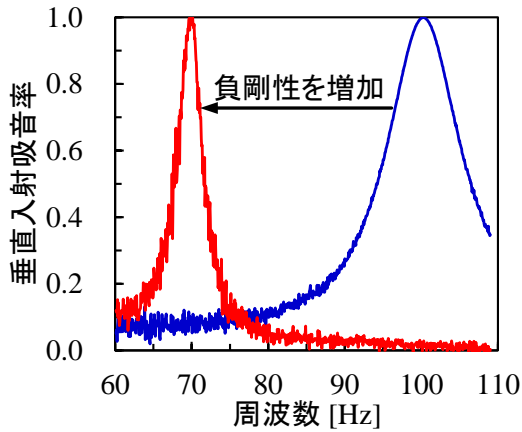


図7 負剛性を付加する手法の実験結果

空気の長さを6割削減できる効果に相当する。本手法を用いれば、圧電吸音板を小型化できる。

(4) 平板の振動変位信号を用いたハイブリッド型圧電吸音板の理論解析と最適設計および実験

受動型の圧電吸音板では圧電素子の等価剛性比が小さいことが原因で、広い周波数領域で高い吸音率を得ることができなかつたため、研究代表者らが圧電素子を用いた振動制御の研究で過去に提案した、平板の振動変位または加速度に比例した信号を用いて圧電素子の等価剛性比を疑似的に高める手法の適用を提案した。図8に提案手法の概略を示す。また、その等価機械モデルを図9に示す。等価機械モデルにおいて、印加電圧により、インダクタンスに相当する質量に外力を加えることができるが、この外力は平板の等価質量の変位または加速度に比例した力で

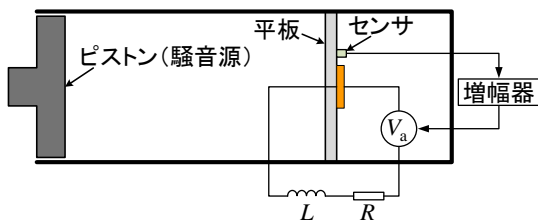


図8 ハイブリッド型圧電吸音板の概略

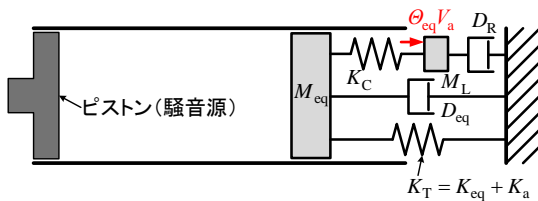


図9 ハイブリッド型圧電吸音板の等価機械モデル

与えられる。この力は吸振器の振幅を増やす働きをし、結果として吸振器が平板に付加する減衰を増加させる。本研究では、本手法を用いた場合のLR回路の最適値を解析的に求めた。そして、シミュレーションと実験で理論解析の妥当性を確認した。図10に実験結果の一例を示す。この実験では、圧電素子の性能の指標である等価剛性比を約10倍まで高める調整を行ったが、吸音率が高い周波数の範囲が受動型に比べてほぼ倍に広がっていることが確認できる。なお、本実験では白色雑音が入射された場合に吸収される音のエネルギーが最大になる調整を行った。

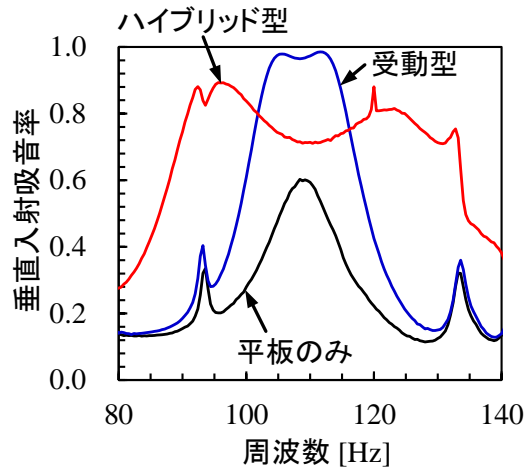


図10 ハイブリッド型圧電吸音板の実験結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計6件)

- (1) 山形健太, 山田啓介, 澤田勝利, 圧電吸音板の負剛性を用いた小型化に関する研究, 日本機械学会関西支部平成24年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 2013年3月15日, 大阪工業大学
- (2) Tomoya NAKAZAWA, Keisuke YAMADA, Hiroshi MATSUHISA, Katsutoshi SAWADA, and Hideo UTSUNO, LOW-FREQUENCY NOISE REDUCTION USING A PIEZOELECTRIC SOUND ABSORBING PANEL USING LR CIRCUIT AND APPLIED VOLTAGE, The 11th International Conference on MOTION AND VIBRATION CONTROL, 2012.10.17, Fort Lauderdale (USA)
- (3) 山田啓介, 北川晃祥, 松久寛, 宇津野秀夫, 圧電素子を貼付した平板とLR回路による共鳴音の低減, Dynamics and Design Conference 2012, 2012年9月18日, 慶應義塾大学
- (4) 中澤知哉, 山田啓介, 松久寛, 宇津野秀

夫，澤田勝利，圧電素子を用いた吸音板による低周波騒音の低減，日本機械学会関西支部第 87 期定時総会講演会，2012 年 3 月 16 日，関西大学

(5) 北川晃祥，山田啓介，松久寛，宇津野秀夫，澤田勝利，中澤知哉，圧電素子を貼付した平板による共鳴音の低減，日本機械学会関西支部平成 23 年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会，2012 年 3 月 15 日，関西大学

(6) 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 年 9 月 9 日，高知工科大学

[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)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80456798

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研修者 なし