

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：25301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740267

研究課題名(和文)負の実効密度および実効弾性率をもつ音響メタマテリアルの構造探索

研究課題名(英文)Study of acoustic metamaterial with negative density and negative bulk modulus

研究代表者

坂口 浩一郎 (Sakaguchi, Koichiro)

岡山県立大学・情報工学部・助教

研究者番号：10551822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：音響メタマテリアル構造として、結合したヘルムホルツ共振器と連結した音響管の2つの単位構造を考え、それぞれ導波路に周期配置した際の音波伝搬特性を有限要素法により解析した。結合したヘルムホルツ共振器は互いに同相、逆相で振動する2つの固有モードを持ち、連結した音響管は閉管共鳴と開管共鳴に対応した固有モードを持つことがわかった。このような単位構造を導波路に周期配置した場合には、それぞれ固有モードに対応した遮断域と、系の周期性に起因する遮断域が生じることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this study the characteristics of sound wave propagation in waveguide with an array of coupled-Helmholtz resonators and that of connected acoustic pipe were investigated with numerical simulation by finite element method. In the result, it was found that the coupled-Helmholtz resonator has two resonant modes in which two resonators oscillate in the same phase and the reverse phase each other, while the connected acoustic pipe has open-pipe resonant mode and closed-pipe resonant mode. In transmission spectra of sound wave in waveguide with an array of these units, several forbidden bands due to the eigenmode of each unit and periodicity of the system were obtained.

研究分野：光エレクトロニクス・メタマテリアル

科研費の分科・細目：物理学，数理物理・物性基礎

キーワード：音響メタマテリアル

1. 研究開始当初の背景

メタ材料とはサブ波長の周期構造をもつ人工的な物質のことを指し、実効的な比誘電率と比透磁率を自在に調節可能なことから、電磁波に対して負の屈折率を実現するなど、自然物にはない特異な特性を示すことが知られている。

メタ材料の概念は電磁波以外の波動一般にも拡張できることから、音響メタ材料に関する研究も広く行われている。電磁波の波動方程式とのアナロジーより、音波において比誘電率と比透磁率に相当するパラメータは密度と体積弾性率である。メタ材料構造によってこれらを自在に調節し、音波に対する高い屈折率が実現できれば、屈折性デバイスを光と同様の思想で設計できるなど、有用性が高い。また、負の屈折率を実現できれば、回折限界を超えた分解能を持つイメージング技術や、小型で変調可能な超音波診断器の可能性も期待されているが、当然自然界にそのような物質は存在せず、メタ材料としてその構造を探索することの意義は大きい。

2. 研究の目的

(1) 本研究では負の実効密度、及び負の実効弾性率を実現するメタ材料構造を音波・弾性波伝搬シミュレーションによって探索、提案することを目的に研究を行った。

(2) 研究期間内においては、2つのヘルムホルツ共振器が結合した単位構造を導波路に周期配置した系と、連結した音響管を導波路に周期配置した系を考え、音波伝搬特性を有限要素法により解析することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 結合したヘルムホルツ共振器

図1に、結合したヘルムホルツ共振器を導波路に配置した構造を示す。細いネック部と太いキャビティ部から構成される2つのヘルムホルツ共振器を、キャビティ中央で結合管により結合し、導波路に配置した。また、このとき単一のヘルムホルツ共振器の固有振動数 f_0 は約37kHzである。

共振器と結合管および導波路は完全剛体とし、内部は水(密度： $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、音速： 1481 m/s)で充填されているものとした。導波路の左端から平面音波(5 kHz~120 kHz)を入射し、右端での透過スペクトルを COMSOL Multiphysics®を使用して有限要素法により解析した。

はじめに、結合したヘルムホルツ共振器単体の場合について、結合管の幅 a を変化させることで固有振動数の検討を行った。次に結合したヘルムホルツ共振器を導波路に周期配置し、その周期 b に対する依存性を検討した。

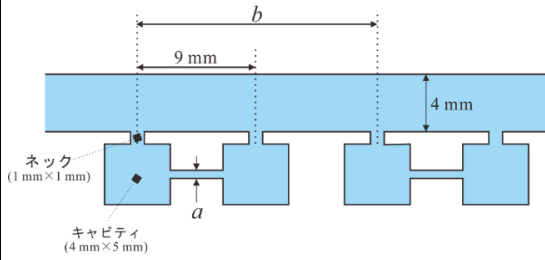


図1 結合したヘルムホルツ共振器の周期配置

(2) 連結した音響管

図2に連結した音響管を導波路に周期配置した構造を示す。連結した音響管とは、導波路に垂直に設置した2つの音響管(長さ： H 、幅： 3 mm)の先端を連結管(幅： 3 mm)で繋いだものである。また音響管の間隔を L 、配置周期を K とした。解析に用いた条件は(1)に示したものと同一とした。

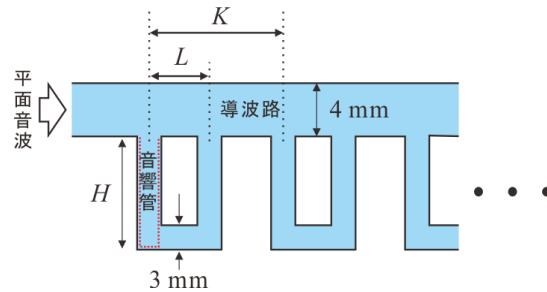


図2. 連結した音響管の周期配置

4. 研究成果

(1) 結合したヘルムホルツ共振器

① 結合ヘルムホルツ共振器の固有モード

図3は、結合管幅 $a = 0.5 \text{ mm}$ で結合した場合と、単一のヘルムホルツ共振器を導波路に配置した場合の音圧透過スペクトルを示している。単一の場合には、ヘルムホルツ共振器の固有振動数をピークとして1つの遮断域が見られる。それに対して結合した系では、2つの遮断域が現れることがわかった。このことから、結合したヘルムホルツ共振器は2つの固有モードを持つと考えられる。これらをモードX、モードYと呼ぶこととする。

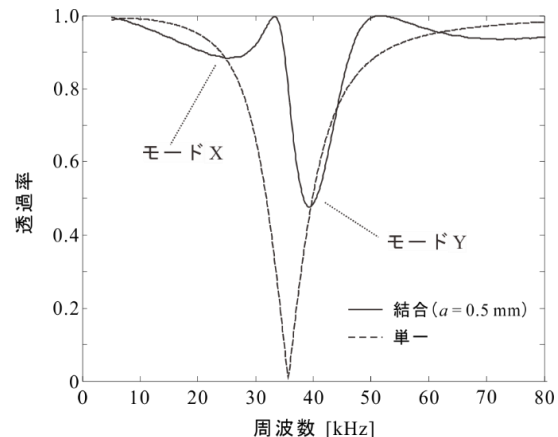


図3 透過スペクトル

次に a を 0 mm から 4 mm まで変化させたときの遮断域のピーク周波数の変化を図 4 に示す. これを見ると 2 つのモードともに a に対して連続的に変化している. そこで図 5 に示すように, $a = 4\text{ mm}$ における 2 つのモードそれぞれの周波数について, 共振器内の音圧分布を計算した結果を見ると, 高周波側のモードではキャビティ内で $1/2$ 波長共鳴が生じ, 左右で位相が逆になっている. それに対して低周波側のモードではキャビティ内が一様となっており, 同相で振動している. 結合管幅 a を小さくしていくと同相モードは互いに押し合うため, 単一の共振器の固有モードに収束すると考えられる. 従って, モード Y は 2 つの共振器が同相で振動するモードであり, 他方のモード X は逆相で振動するモードであると考えられる.

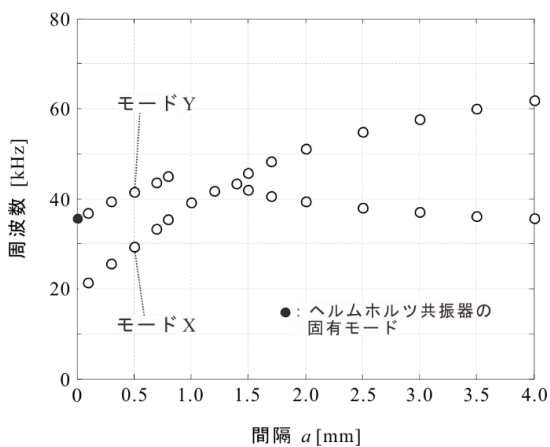


図 4 ピーク周波数と結合管幅の関係

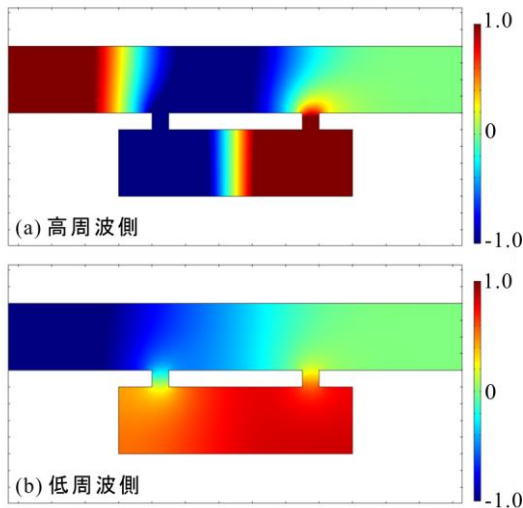


図 5 音圧分布画像

② 周期配置した場合の検討

次に, 結合したヘルムホルツ共振器を導波路に 30 個周期配置した場合の結果を図 6 に示す. 結合管の幅 a は 0.5 mm とし, 配置周期 b を $15\sim 21\text{ mm}$ まで変化させ, 図 4 と同様に透過スペクトルに生じた遮断域のピーク周波数をプロットした. また前節で求めた同

相, 逆相モードの周波数, および周期 b に対する $1/2$ 波長共鳴, 1 波長共鳴の周波数を実線と点線で示した. これを見ると 4 つのモードが存在しており, 低周波側の 2 つのモードは周期依存性がなく, 同相モードと逆相モードであることがわかる. 一方高周波側の 2 つのモードは周期 b を大きくするにつれて低周波側にシフトし, その周波数が周期 b に対する $1/2$ 波長共鳴, 1 波長共鳴と一致することから, 導波路中で定在波となるモードであると考えられる. $1/2$ 波長共鳴が計算値と大きくずれるのは, 図 1 からわかるように, 1 周期中に共振器の口が 2 つあり, 単調な周期系ではないことによる影響が低周波において大きいためであると考えられる.

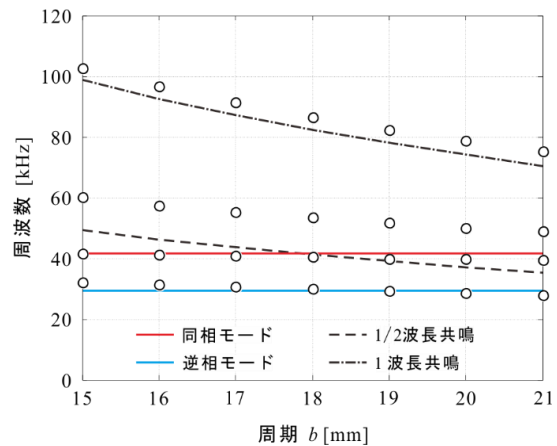


図 6 ピーク周波数と配置周期の関係

(2) 連結した音響管

図 7 は, $H = 11\text{ mm}$, $L = 4\text{ mm}$, $K = 9\text{ mm}$ としたときの透過スペクトルであり, 5 つの周波数で音波の遮断域が見られる.

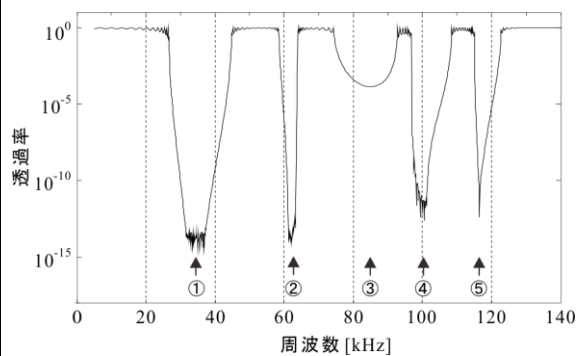


図 7 透過スペクトル

これらのモードを同定するため, ヘルムホルツ共振器の場合と同様に, 連結した音響管を導波路に 1 つ配置した系において音響管の間隔 L を変化させて解析を行った.

図 8 は透過スペクトルに現れた遮断域のピーク周波数を音響管の間隔 L に対してプロットしたものである. 2 つの実線は長さ H の閉管における $1/4$ 波長共鳴, $3/4$ 波長共鳴の周波

数を示し、点線は連結した音響管全体(長さ： $2H+L$)を開管とみなした場合の1波長共鳴、2波長共鳴の周波数を示している。これを見ると、①のモードは L に対して変化せず、その周波数は閉管の1/4波長共鳴と一致した。また②のモードは L が大きくなるにつれて低周波側にシフトしており、開管の1波長共鳴と一致した。同様に、④は閉管の3/4波長共鳴、⑤は開管の2波長共鳴のモードであると考えられる。④が L に対してわずかに依存しているのは、音響管の先端が開放されている影響であると考えられる。以上より、連結した音響管には音響管の長さ H に対応した閉管共鳴モードと、全体の長さ $2H+L$ に対応した開管共鳴モードが存在すると考えられる。また図7の③で示したモードは図8では見られず、ピーク周波数が周期 K に対する1/2波長共鳴(82.2 kHz)と一致していることから、ヘルムホルツ共振器の場合と同様に、系の周期性により導波路中で定在波となるモードであると考えられる。

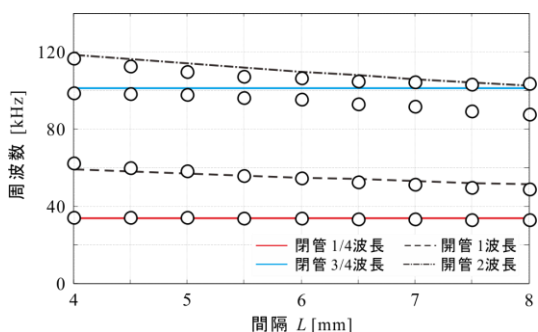


図8 連結した音響管の固有モード

(3)まとめ

音響メタマテリアル構造として、結合したヘルムホルツ共振器および連結した音響管を導波路に周期配置した系において、それぞれ音波の伝搬特性を有限要素法により解析した。

結合したヘルムホルツ共振器は互いに同相で振動する場合と逆相で振動する場合の2つの固有モードを持つことがわかった。また逆相モードの周波数は結合管幅に大きく依存する一方、同相モードではその依存性は小さく、単一のヘルムホルツ共振器の固有周波数とほぼ同程度となった。このような共振器を導波路に周期配置した場合には、これら2つの固有モードに対応した2つの遮断域と、系の周期性に起因する遮断域が生じることがわかった。

連結した音響管を導波路に周期配置した系では、音響管の長さに対応した閉管共鳴、全体の長さに対応した開管共鳴、系の周期性の3つの要因で音波遮断域が生じることが分かった。

今後はこれらの系における実効密度および実効体積弾性率の評価を行う。

5. 主な発表論文等

6. 研究組織

(1)研究代表者

坂口 浩一郎 (SAKAGUCHI, Koichiro)

岡山県立大学・情報工学部・助教

研究者番号：10551822