

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 2 月 1 日現在

機関番号：24201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2014

課題番号：23651072

研究課題名(和文) 廃熱の有効利用 - 熱エネルギーを用いたサイレンサーの基礎検討 -

研究課題名(英文) a basic study of thermoacoustic silencer

研究代表者

坂本 眞一 (Sakamoto, Shin-ichi)

滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号：40449509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：我々は熱音響現象を用いたこれまでにない新しい原理のサイレンサーの提案をした。熱音響現象を用いると、熱エネルギーと音エネルギーの相互エネルギー変換が可能となる。我々は廃熱の熱エネルギーを用いて、音エネルギーを抑え込むことが可能ではないかと着想した。熱音響サイレンサーのプロトタイプを作製し、原理確認実験を行った。ある条件においては十数パーセント程度の低下を確認することができた。また、我々は自動車のマフラーを想定した実験を行い、有効な実験結果を得た。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a silencer of the new principles unprecedented applying a thermoacoustic effect. With thermoacoustic effect, a mutual energy conversion of thermal energy and sound energy is enable. It has proposed to reduce the sound energy by utilizing the thermoacoustic effect from the waste heat. To prepare a prototype of thermoacoustic silencer, it was conducted principle confirmatory experiments. It was possible to confirm the reduction in the order of ten percent in certain conditions. In addition, we conducted experiments that assume the muffler of the automobile, we got valid experimental results.

研究分野：熱音響工学，超音波エレクトロニクス

キーワード：熱音響 サイレンサー 消音 エネルギー 廃熱

1. 研究開始当初の背景

これまでのサイレンサー（防音装置や防音材、遮音装置や遮音材、吸音装置など）は新たなエネルギーを入力する、構造が大きい、設置が難しい、また、十分な効果が得られないなどの問題を持っている。騒音対策も、様々に提案されているが、根本的な解決には至っていない。騒音源のもとを断つのではなく、ほとんどが発生してしまった音を到達させない（散乱/吸収）、跳ね返す（反射）方法を適応しているのが原因である。

申請者が提案するサイレンサーは、熱音響現象によって、熱エネルギーを用いて、騒音である音エネルギーを減衰させる原理を用いる。

申請者らのグループは、数年前より、『熱音響現象を利用したシステム』の実用化に向けた研究に取り組んでいる。熱音響現象を用いると、熱エネルギーと音エネルギーの相互エネルギー変換が可能となる。つまり、廃熱や未利用エネルギーを駆動エネルギー源とした冷却システムの実現が可能となる。プロトタイプを作製し、室温から零下30℃までの冷却に成功している。申請者は、熱音響現象を用いて冷却するのではなく、音エネルギーを抑え込むことが可能ではないかと着想した。

熱音響現象とは、温度勾配のある狭い流路を壁と熱接触しながら音波が伝搬することで音波の持つエネルギーが変化する。この現象を応用し、『熱エネルギーを用いたサイレンサー』の構築を目指す。温度勾配を強制的に付けることによって、熱音響現象を生じさせ、音エネルギーを減衰させる原理でサイレンサーを実現する。

2. 研究の目的

内燃機関などから発生する音の公害対策に用いられている従来の消音システムは、低周波域の消音を実現するため、10 kgを超える大きな重量を有する。そのため、燃費や原料コストへ与える影響は大きい。また、申請者が提案している熱音響現象を利用した熱音響サイレンサーでは低周波数域において高い消音効果が得られる。本サイレンサーは、細管両端の温度差のみで音波減衰が得られるため、構造が単純で軽量化が可能であるという長所がある。さらに、熱音響サイレンサーの駆動に必要な熱は、内燃機関等から発生するエンジン廃熱処理を行うラジエーターの負荷軽減も期待できる。

熱音響サイレンサーの実用化の検討は地球環境保全へ向けた次世代システムの展開につながるという可能性を持っている。

3. 研究の方法

熱音響サイレンサーの消音作用において、スタック流路の軸方向の温度勾配による熱音響効果が全く実現しない状態においても、

粘性散逸は音波の減衰作用に寄与している。しかし、粘性散逸と熱音響効果による減衰の効果を分離して計測することは困難であり、各々の影響を評価することは難しい。そこで、スタック両端に付加する温度差を変更することにより、音波の減衰作用と増幅作用を考える。

音波の減衰作用においては粘性や熱伝導による不可逆的な散逸の影響は減衰作用を促す効果を持つが、音波の増幅作用においては粘性や熱伝導による不可逆的な散逸の影響は損失となる。この熱音響効果による増幅・減衰作用と散逸の影響を図示すると、Fig. 1のように表せる。Fig. 1より、熱音響効果や散逸の影響は音波の増幅作用と減衰作用の比較によって検討することが可能であると考えられる。

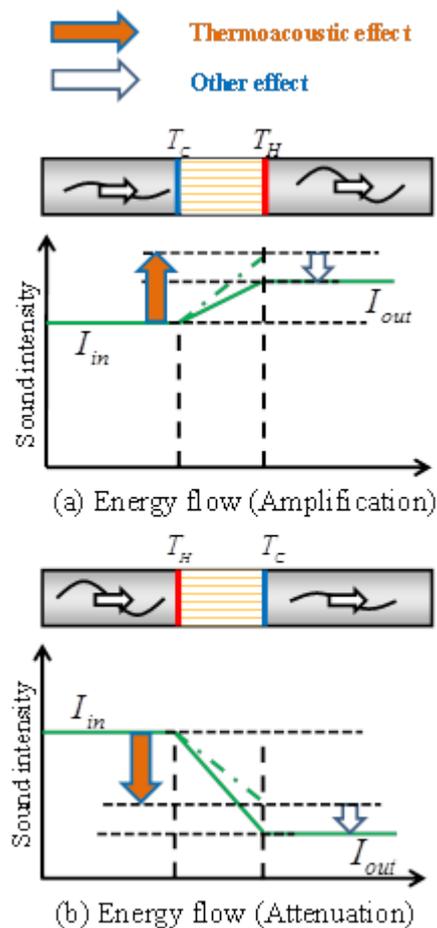


Fig. 1. Influence on sound intensity by thermoacoustic effect and other effect.

減衰作用を測定する実験系を Fig. 2 に示す．実験に用いた熱音響サイレンサーは，内径 42 mm の円筒形音響管内にスタックを設置し，低温熱交換器と高温熱交換器により温度差を維持した．低温熱交換器は循環水によって温度を室温に維持した．高温熱交換器はエレクトリックヒーターを用い，スタック両端の温度差が 100 K, 200 K, 300 K, 400 K となるようにヒーターに付加する電圧を調整した．FOSTEX 社製フルレンジスピーカーによって音波を入力し，B&K 社製 4182 型プローブマイクロフォンによってスタック通過前後の音圧測定を行った．音圧測定値に終端部より発生する反射の影響が及ばないようにするため，プローブマイクロフォン設置位置より後方は十分長くした．

スピーカー両端に入力する信号は，50 Hz から 1000 Hz のバースト 1 波とした．スタックは 3 種類のステンレス製のメッシュを 10 mm に積層したものをを用いた．それぞれのメッシュ数は 10 mesh, 40 mesh, 60 mesh（流路半径は 10 mesh:1.05 mm, 40 mesh:0.25 mm, 60 mesh:0.15 mm）とした．ここで，メッシュ数とは 1 inch あたりの目の数を表す．

音波の増幅作用の測定において，Fig. 2 の実験系でスタックに付加する温度差を逆転させるため，ヒーターと循環水の設置位置を反転させ実験を行った．

本実験結果の評価法として，(1)式で定義する音圧変化率 G を用いた．

$$G = (P_{out} - P_{in}) / P_{in} \times 100 \quad (1)$$

ここで， P_{in} はスタック通過前の音圧値， P_{out} はスタック通過後の音圧値を表す． G が 0 % より大きい場合，スタック通過前より通過後の音圧が増幅していることを表し，0 % より小さい場合スタック通過前より通過後の音圧が減衰していることを表す．

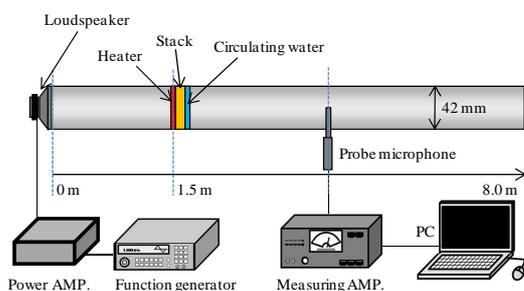


Fig. 2. Experimental system (Attenuation action).

熱音響サイレンサーを自動車のマフラーとして利用する場合，スタックの設置場所として，エンジン後部にある複数の管が並ぶ排気マニホールドと，管が合流した後のエキゾーストパイプの 2 箇所が考えられる．本検討では，2 本の管が 1 本に合流する構造のシステムに対して，合流前後にスタックを設置した場合の消音特性について検討した．

測定システムは Fig. 3 のように，2 本の管が 1 本に合流する構造で，左端にスピーカーを設置し，右端を開端とした．1200 cpsi，長さ 50 mm のハニカムセラミックスをスタックとして使用し，合流前（青色破線箇所）の管に 1 個ずつ設置する場合と合流後（橙色破線箇所）に 1 個設置する場合の 2 通り測定した．スタックに与える温度勾配は，0, 200 および 400 K とした．スピーカーから，バースト正弦波（100 から 1000 Hz）を 1 パルス入力した．管に設置した圧力センサーのピーク音圧をそれぞれ P_L , P_R および P_C とし， $2P_C / (P_L + P_R)$ により音圧変化率を算出した．さらに，各温度勾配時の音圧変化率を温度勾配 0 K 時の音圧変化率で除すことで，周波数間の伝搬損失の差を除去した．

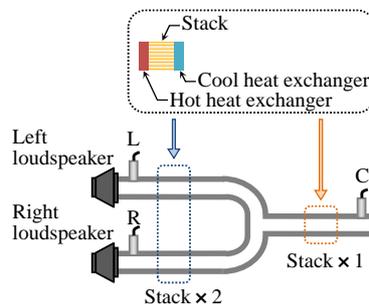


Fig. 3 Schematic diagram of experimental system.

4. 研究成果

各メッシュのスタック両端に付加する温度差を変化させた場合の，増幅および減衰作用の周波数特性を Fig. 4 と Fig. 5 に示す．各図における #10, #60 はそれぞれ 10 mesh, 60 mesh を表す．図中において注釈はスタックに付加した温度差を示す．

Fig. 4 において，200 Hz 以上の周波数域ではスタックに付加する温度差に対して音圧変化率はほぼ変化しない結果が得られた．100 Hz 以下の周波数域では減衰・増幅作用共にスタック両端の温度差に依存した効果が顕著に表れていることが確認できる．この結果より，#10 のスタックにおいては，低い周波数域でのみ温度差に依存する熱音響効果による消音がスタック全体の消音に大きく影響していると考えられる．高い周波数域で熱音響効果による消音効果が得られていない理由として，スタックを通過する流体粒子の振動周期に対し，流路での熱緩和時間が長

いため、各流路にて流路内の流体粒子が十分な熱交換をしていないことが考えられる。

Fig. 5 において、#60 で構成されるスタックは#10 のスタックとは異なり、全測定周波数において、増幅および減衰作用共にスタック両端の温度差に依存した効果が表れている。#60 では#10 と比較して流路が狭いため、流路において熱緩和時間は短くなる。#10 と比較して、スタックを通過する流体の振動周期が短くなった場合においても、良好な熱音響効果が実現されていると考えられる。しかし、増幅作用では高い周波数域において、透過波の音圧値が入射波の音圧値よりも小さく音圧変化率は 0 %を下回っている。高い周波数域では、スタック内の散逸による減衰作用が熱音響効果による増幅作用を上回り、音波が減衰していると考えられる。

各スタック流路半径に対する音圧変化率を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、流路半径が小さな条件において、スタック両端の温度差による音圧変化率の違いを確認した。スタック両端の温度差が消音効果に与える影響を大きくするにはスタック流路半径を小さくする必要がある。

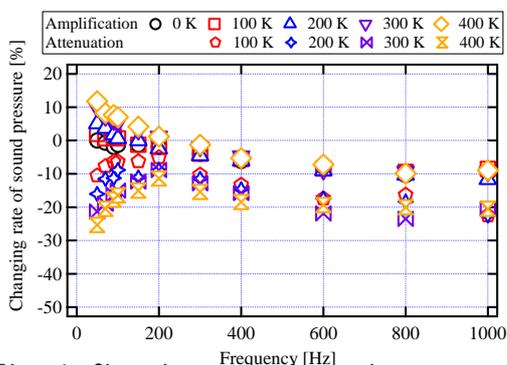


Fig. 4. Changing rate of sound pressure to temperature difference the ends of stack (#10).

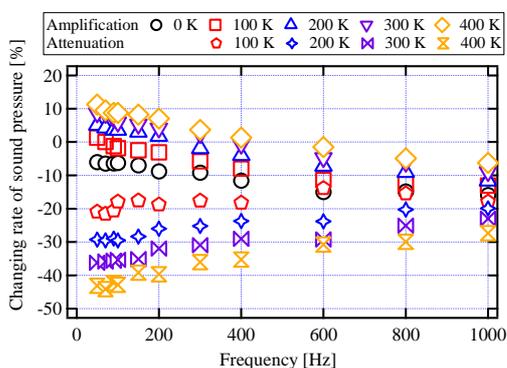


Fig. 5. Changing rate of sound pressure to temperature difference the ends of stack (#60).

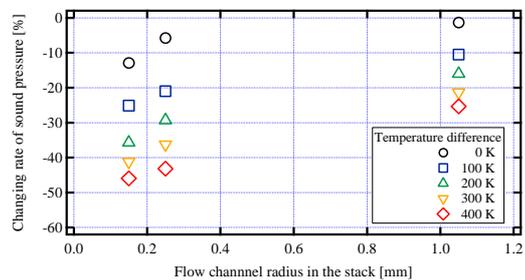


Fig. 6. Changing rate of sound pressure to temperature difference the ends of stack (50 Hz).

消音効果の周波数特性を示した Fig. 7 より、どの周波数、温度勾配に対しても音圧変化率が 1 より小さいことから、スタックを管合流前後のどちらに設置しても消音が可能である。さらに、スタック設置位置による消音効果の違いは見られない。以上より、入力熱量が一定の場合、スタックが 1 個の方が大きな温度差が形成できることから、管の合流後にスタックを置くことで、効果的に消音できると考えられる。

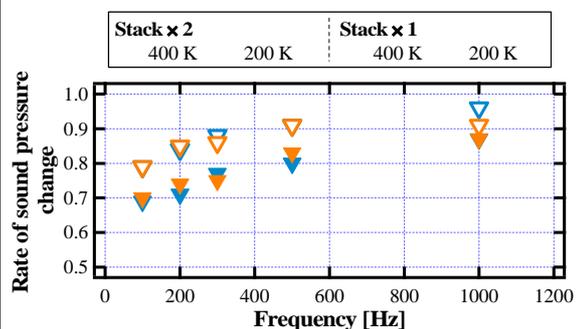


Fig. 7. Rate of sound pressure change as a function of frequency.

<引用文献>

下記の発表論文等があるが、代表的に下記の 3 点を記す。

川本暁, 坂本眞一, 高橋健太, 折野裕一郎, 乾義尚, 池之上卓己, 渡辺好章, 第 60 回応用物理学学会春季学術講演会 講演予稿集, pp.01-119, 2013 年。

小林徹也, 坂本眞一, 渡辺好章, "熱音響サイレンサーの動作メカニズム解明に向けた研究 - 増幅効果と減衰効果の比較," 第 49 回同志社大学理工学研究所研究発表会講演論文集, pp.119-122, 第 49 回同志社大学理工学研究所研究発表会 2011 年度学内研究センター合同シンポジウム

小林徹也, 坂本眞一, 塚本大地, 柳本浩平, 柴田健次, 渡辺好章, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 125-128, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会 2011 年。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

川本暁, 坂本眞一, 折野裕一郎, 乾義尚, 池之上卓己, 渡辺好章, “ 段差形状小型熱音響プライムムーバーの実用化に向けて ~ スタック位置がシステムに及ぼす影響の基礎検討 ~ ,” 信学技報, 査読なし, vol.113, no.284, US2013-57, pp.19-24

K. Yanagimoto, S. Sakamoto, Y. Nakano, K. Kuroda, and Y. Watanabe, “ Multistage Stack with Multiple Pore Radii Applying the Temperature Gradient to a Thermoacoustic Engine, ” Journal of Energy and Power Engineering, 査読有り, pp. 1440-1447, 2013.

〔学会発表〕(計19件)

Shin-ichi Sakamoto, Satoshi Kawamoto, Yuichiro Orino, Yoshitaka Ota, Yoshitaka Inui, and Yoshiaki Watanabe, "Basic study on inset position of stack in the system with branch tubes for applying thermoacoustic silencer to multi cylinder engine muffler, "Proceedings of 43rd International Congress on Noise Control Engineering 43rd International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise2014), Melbourne (Australia), Nov. 16-19, 2014.

川本暁, 坂本眞一, 太田佳孝, 折野裕一郎, 乾義尚, 池之上卓己, 渡辺好章, “ 熱音響サイレンサーの多気筒エンジン用マフラーへの応用に向けて 分岐管を持つシステムに対するスタック設置場所の基礎検討 ,” 第61回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, p.01-149, 19p-PA7-7, 2014年 第61回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 青山学院大学, 2014年3月19日

川本暁, 坂本眞一, 高橋健太, 折野裕一郎, 乾義尚, 池之上卓己, 渡辺好章, “ 熱音響システムの実用化に向けたスタックの基礎検討 ポリイミドチューブで構成されたスタックのヒートポンプ特性 ,” 第60回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集, pp.01-119, 2013年 第60回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 神奈川工科大学, 2013年3月27日 .

小林徹也, 坂本眞一, 塚本大地, 柳本浩平, 柴田健次, 渡辺好章, “ 熱音響現象を用いた新たな消音システムに関する研究 - 変換部を複数設置することによる消音効率向上に向けた試み - ,” 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 125-128, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会, 東京, 芝浦工業大学, 2011年9月15日 .

T. Kobayashi, S. Sakamoto, D. Tsukamoto, Y. Kitadani, and Y. Watanabe, “A study on thermoacoustic silencing system - Discussion of the mechanism by

comparing amplification with attenuation of sound-,” INTER-NOISE 2011, Osaka, Japan, Sep., 4th, 2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 眞一 (Sakamoto Shin-ichi)
滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号:

40449509

以上