

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：53203

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820418

研究課題名(和文) 熱音響場における多周波数音の単純化・増幅効果を応用した騒音援用冷凍機の開発

研究課題名(英文) Noise-Assisted thermoacoustic refrigerator by utilizing amplification and simplification effect of multi-frequency sound in thermoacoustic field

研究代表者

経田 僚昭 (Kyoden, Tomoaki)

富山高等専門学校・商船学科・准教授

研究者番号：50579729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は騒音エネルギーで冷熱を得る新しいエネルギー変換装置の開発を目的としたものである。騒音利用のためにはそのエネルギー密度の低さと周波数特性の複雑さが課題となるため、熱音響現象を利用することによるエネルギー増幅と熱音響現象を誘起するためのスタック(微細流路を多数有する蓄熱体)の粘性散逸を利用した音波単純化効果を利用する。本研究において、装置長さの1/3の場所にスタックを設置することで特定周波数音の増幅効果を実験的に明らかにした。冷凍能力向上を目指した装置形状の提案(ダブルループ管形状)を行った。

研究成果の概要(英文)：The object of this paper is to present thermoacoustic conversion device applied for noise energy generated. The noise is composed by multi-frequency sound waves and low energy density. Therefore, we demonstrated the selective amplification of acoustic power by utilizing thermoacoustic effect. The stacked mesh-screens with steep temperature gradient were installed in the one-third length of pipe. It was found that sound at third harmonic-frequency was amplified by thermoacoustic effect, and the sounds at other frequency were attenuated by viscosity dissipation in the stack. Summarizing these results, the performance of proposed selective amplification was clarified in relation to acoustic intensity.

And then, to study the improvement of performance in a looped-tube-type thermoacoustic cooler with branch resonator by additional bypass-looped tube with stack as the double loop-tube-type thermoacoustic cooler.

研究分野：エネルギー変換工学

キーワード：熱音響 冷却システム 騒音利用

1. 研究開始当初の背景

スタックと呼ばれる微細流路を多数有する蓄熱体に急峻な温度勾配を形成すると、音波が発生する場合がある。このような熱エネルギーと音響パワーの相互変換現象は熱音響現象と呼ばれている。温度勾配の形成のために排熱を利用する場合、排熱を熱源、発生する音波を出力仕事とみなすと熱音響エンジンとなる。また、音波がスタックを通過するとスタックに温度勾配が形成され、これは熱音響ヒートポンプと呼ばれる。これら熱音響現象のメカニズムの解明や熱音響エンジンとヒートポンプを組み合わせたループ管型熱音響冷凍機の高性能化に向けた研究は、日本はもとより、アメリカや中国、オランダなどで活発に行なわれている。特に、その駆動熱源には工場排熱や太陽光を想定したものが多い。

2. 研究の目的

本申請課題は図1に示すような未利用エネルギーとして騒音を活用した冷却システムを創成することを最終目標とし、その実現に向けた基礎的知見を得ることを目的とする。これまであまり活用されてこなかった騒音エネルギーの有効利用技術を実現する際には、騒音のエネルギー密度の低さと構成する周波数成分が複雑であることが課題となる。そこで、まずは熱音響現象による音響パワーの増幅効果を利用し、騒音を音頭勾配のあるスタックに導くことでエネルギー増幅を図る。同時にスタックの持つ微細流路の粘性散逸効果を利用して特定の周波数以外の音波を抑制させる。これにより複雑かつ低エネルギーの騒音の増幅と単成分化を図り、その性能を実験的に明らかにする。また、根本的にエネルギー密度の低い騒音からヒートポンプ効果を得る場合を想定し、高性能熱音響ヒートポンプを構築することは騒音利用熱音響冷凍機に資する技術となる。そこで独自に提案する熱音響冷凍機を示す。具体的には、枝管付ループ管型熱音響冷凍機の形状を基本とし、一つの音源でループ管と冷熱取得部を2ヶ所有する枝管付ダブルループ管型熱音響冷凍機を提案し、その音場特性と冷却性能を実験と数値計算により明らかにする。最後に、円管とスタック、温度差形成のためのスタック両端の熱交換器で構成される管内部での音波の挙動を詳細に把握するための高応答多点同時流速計と非接触温度計測のための多点マツハツエンダー計も構築した。

3. 研究の方法

騒音と排熱を利用した冷凍機の開発に資する取り組みとして、(1) 音波の増幅と単純化の実験的検討、(2) 高効率熱音響冷凍機のためのダブルループ管型の有効性、(3) 流速計測計と温度計測計の構築を行った。

(1) 熱音響現象による音波増幅と単純化

騒音波形が入力された温度勾配のあるスタックを内挿した円筒管における音波増幅について圧力振幅値、ならびに音響エネルギーの観点から実験的に明らかにした。片側が閉じた円筒管を対象に、他端に接続されたテーパ管を介してスピーカーから任意の周波数音波を入力し、閉端ならびに管壁に設置された圧力センサーにより管内音圧の周波数特性と管内音場特性について検討した。装置長さ $L = 2.0$ m、スタックは#16から#60までの6種類のSUSメッシュをそれぞれ長さ50 mmに積層した構造とし、その上端が装置長さの1/3の場所に設置されている。スタック両端は銅製の熱交換器で挟まれており、 $\Delta T = 300$ Kの温度差を形成できるようになっている。管内音場の基礎検討は $L = 2.0$ mの装置を用いて行った。選択的増幅効果の対象とする周波数は126 Hz成分とし、音波増幅効果と単成分化の両方の検討を行った。

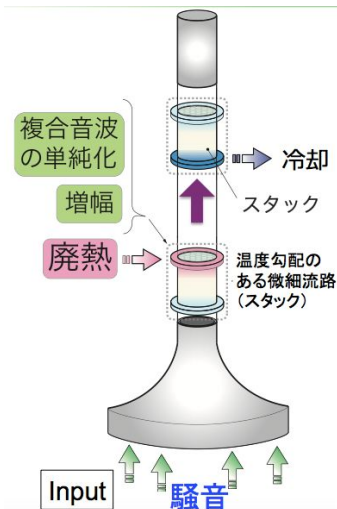


図1 騒音入力型熱音響冷凍機の概要図

(2) ダブルループ管形状による熱音響冷凍機の高性能化

低いエネルギー源である騒音からの冷熱取得を行うためにより高性能な冷却システムの確率が課題となる。そこで、独自の高性能化案として枝管付きダブルループ管形状を提案し、内部の音場特性を実験と数値計算で行いながら、冷却実験を行うことで冷却特性を音場特性と関連付けて明らかにした。シングルループタイプを従来型として図2(a)に、本研究で提案したダブルループタイプを図2(b)に示す。また、従来型として枝管付きループ管型熱音響冷凍機をシングル型としてダブルループ管タイプとの比較によりその効果を明らかにした。

(3) 流速・温度計測系の構築

円管内を伝播する音波を詳細に把握するために空間・時間的に変動する速度と温度の計測方法を確立した。具体的には Laser Doppler Velocimetry と Laser interferometry を開発した。

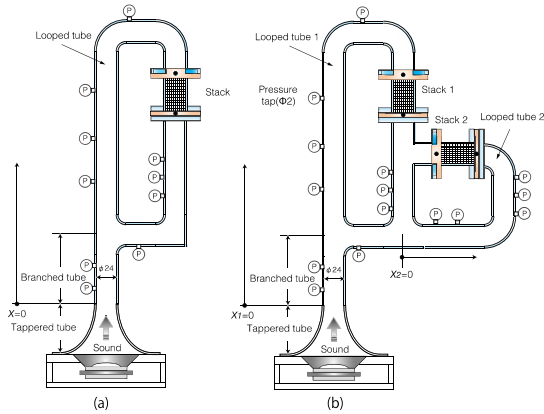


図 2 枝管付きループ管型熱音響冷凍機，(a) シングルループタイプ（従来型），(b) ダブルループタイプ（新提案型）。

4. 研究成果

(1) 熱音響現象による音波増幅効果

円筒管に入力された音波の増幅効果と単純化効果について管内の音圧計測に基づいて検討した。閉端面での圧力計測結果から音圧増幅効果を検討した。100 Hz から 250 Hz までの周波数音波に対し、音圧計測を行った。その結果を図 3 に示す。装置長さを波長の 1/4 の奇数倍の時に共鳴モードを得る今回の系において、3 倍振動モードの時に音圧もピークを迎える。このとき、スタック設置位置が装置長さの 1/3 の位置付近のとき速度振幅の節となり、粘性散逸による損失が少なくなるためである。一方、その他の周波数成分はスタック粘性散逸により抑制され、これら結果から 3 倍振動モードのときにもっとも大きな圧力振幅値が得られた。また、スタックの加熱による音圧の増幅効果が確認された。

スタック設置による構造に対する音圧増幅効果を検討するため、スタック目開きを変化させた時の増幅率をスタック設置のない場合 ($P_{\text{without stack}}$) に対し、加熱したスタックを設置したときの圧力振幅値 ($P_{\text{with heated stack}}$) の差で検討した。その結果を図 4 に示す。#60 スタックで最も大きな増幅効果を得ることができた。スタック内での熱的応答性は無次元数 $\omega\tau$ で表され、#60 スタックは $\omega\tau$ は小さい。つまり、進行は音波に有利なスタック構造となるため、スタック内部での圧力と変異変動の位相とスタック内部での固体壁面での熱交換のタイミングが適合したことによる増幅効果の向上と考えている。このようなスタック構造による有効な音圧増幅効果はそのメカニズムの解明も含めて今後の課題とした。

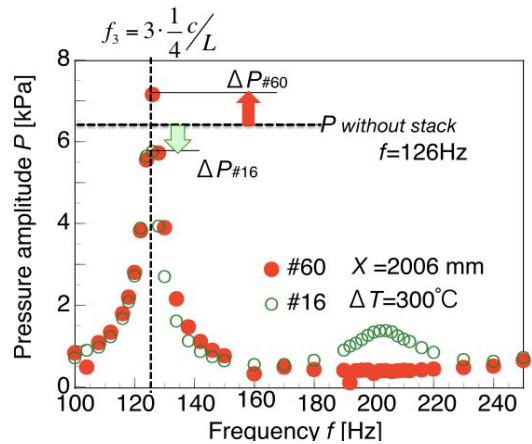


図 3 温度勾配のあるスタックの設置による音圧増幅効果

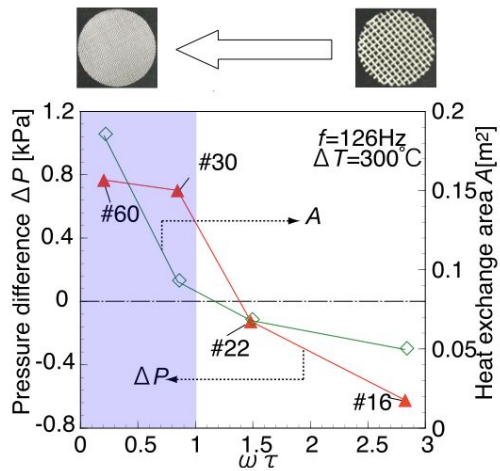


図 4 スタックの熱的応答性に対する音圧増幅量

(2) ダブルループ管形状の冷却能力の向上

従来の枝管付きループ管型熱音響冷凍機に対し、枝管出口に 2 つのループ管を設置したダブルループ管型熱音響冷凍機形状を提案し、実験と数値計算で管内部の音場特性、ならびに冷却性能について明らかにした。ループ管を 2 つとする形状とすることで両ループ管内に 2 か所の進行波位相の場所を作り出すことができた。この位置にスタックを設置することで冷熱も 2 か所で得ることができた。従来型をシングルタイプとし、ダブルループ管型での冷却能力を数値計算と実験により検討した。シングルループ型とダブルループ型との比較を図 5 に示す。ダブルループ形状とすることで個別のスタックでの冷却能力はシングル型より低下するものの、ダブルループ管で得られる冷熱の総和はシングル型を超えることができることを数値計算と冷却実験により明らかにされた。

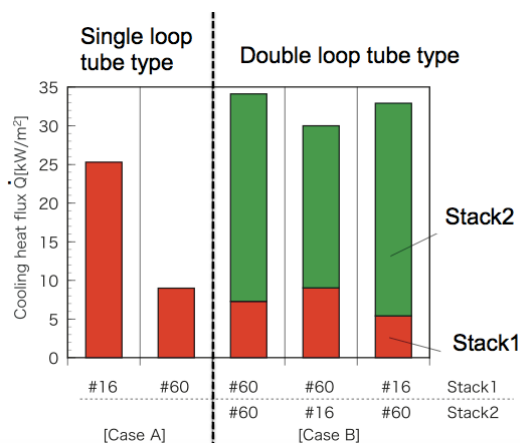


図 5 枝管付ループ管型熱音響冷凍機と枝管付ループ管型熱音響冷凍機の冷却能力の比較

(3) 高応答管内音場特性の計測系の確立

管内圧力計測方法はもとより時間的・空間的变化を伴う管内流速変動の計測系ならびに温度計測系についてもその基礎技術を構築した。流速計測系については高応答性ではあるものの、従来点計測であった Laser Doppler Velocimetry に着目し、その多点化を図った。また、温度計測系についてはレーザー干渉計に着目し、こちらについても多点化を狙い、光学系、信号取得系を構築した。

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)

[雑誌論文](計 6 件)

経田僚昭, 多田幸生, 瀧本昭, 大西元, 枝管付きダブルループ管型熱音響冷凍機における音場特性と冷却性能, 査読無, 冷凍, Vol. 91(1064), 393-394 (2016).

<http://www.jsrae.or.jp/reito/H28mokuji.html>

T. Kyoden, Y. Tada, Y. Iida, Selective amplification in circular pipe with narrow flow channels subject to temperature gradient, 査読有, Proceedings of the fourth international forum on heat transfer, No. 1873, (2016).

http://ifht2016.org/program/files/IFHT2016_program_final.pdf

Y. Tada, H. Onishi, T. Kyoden, Development of thermoacoustic engine by utilizing gas-liquid phase change, Proceedings of the fourth international forum on heat transfer, 査読有, No. 1880, (2016).

http://ifht2016.org/program/files/IFHT2016_program_final.pdf

N. Shoji, T. Kyoden, S. Akiguchi, T. Homae, N. Momose, H. Yoshioka, T. Hachiga, Study on temperature measurement system using laser

interferometry, Proceedings of the fourth international forum on heat transfer, 査読有, No. 1884, (2016).

http://ifht2016.org/program/files/IFHT2016_program_final.pdf

経田僚昭, 多田幸生, 飯田祐也, 枝管付きダブルループ管型熱音響冷凍機における音場特性と冷却性能, 査読有, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 32, 441-451 (2015).

DOI:Org/10.11322/tjsrae.15-34TA

経田僚昭, 多田幸生, 瀧本昭, 大西元, 枝管付きループ管型熱音響冷凍機における冷却性能の数値シミュレーション, 査読無, 冷凍, Vol. 89(1040), 10-11 (2014).

<http://www.jsrae.or.jp/reito/H26mokuji.html>

[学会発表](計 10 件)

末永力也, 多田幸生, 大西元, 経田僚昭, 複合メッシュ型スタックを用いた枝管付ループ管型熱音響エンジンの発振性能, 熱工学コンファレンス 2016, 2016 年 10 月 23 日, 愛媛大学城北キャンパス (愛媛県・松山市)

多田幸生, 梶博貴, 大西元, 経田僚昭, マルチメッシュスタックを用いた熱音響エンジンの高性能化, 第 53 回日本伝熱シンポジウム, 2016 年 5 月 26 日, 大阪国際会議場 (大阪府・大阪市)

経田僚昭, 熱音響冷凍機の冷却性能の予測モデルの構築及びエネルギーハーベスティング技術への展開, 第 14 回グリーンイノベーション研究会, 富山国際会議場 (富山県・富山市), 2016 年 2 月 2 日

梶博貴, 多田幸生, 大西元, 経田僚昭, 枝管付ループ管型熱音響エンジンにおける音波発生条件, 平成 27 年度日本伝熱学会北陸信越支部秋季セミナー 2015 年 10 月 31 日, 信州大学長野 (工学) キャンパス (長野県・長野市)

百生登, 莊司成熙, 経田僚昭, 義岡秀晃, 保前友高, 富田栄二, 秋口俊輔, 八賀正司, レーザー干渉法を利用した多点同時温度センサーの開発に関する基礎検討, 平成 27 年度日本伝熱学会北陸信越支部秋季セミナー, 2015 年 10 月 31 日, 信州大学長野 (工学) キャンパス (長野県・長野市)

多田幸生, 吉田拓馬, 大西元, 経田僚昭, 相変化を利用した熱音響エンジンにおける音波発生機構, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015 年 6 月 5 日, 福岡国際会議場 (福岡県・福岡市)

経田僚昭, 多田幸生, 飯田祐也, 義岡慧亮, 山口敦史, 温度勾配のある微細流路を設置した円筒管内における音波の選択的増幅効果, 熱工学コンファレンス 2014, 2014 年 11 月 8 日, 芝浦工業大学 (東京都・台東区)

安倍将太郎, 高田洋吾, 経田僚昭, 石田弘樹, 秋口俊輔, 寺西恒宣, 八賀正司, 安東嗣修, 狭窄部のある矩形流路内の脈動流を対象とした流動解析, 平成 26 年度日本伝熱学

会北陸信越支部秋季セミナー，2014年10月18日，長岡技術科学大学（新潟県・長岡市）
経田僚昭，多田幸生，瀧本昭，大西元，
ダブルループ館型熱音響冷凍機の冷却性能
の数値シミュレーション，第51回日本伝熱
シンポジウム，2014年5月21日，アクトシ
ティ浜松（静岡県・浜松市）

多田幸生，吉田拓馬，大西元，経田僚昭，
相変化を利用した熱音響エンジンの音波発
生機構，第51回日本伝熱シンポジウム，2014
年5月23日，アクトシティ浜松（静岡県・
浜松市）

6．研究組織

(1)研究代表者

経田僚昭（KYODEN TOMOAKI）
富山高等専門学校・商船学科・准教授

研究者番号：50579729