

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究(スタートアップ)

研究期間：2007 ~ 2008

課題番号：19860030

研究課題名(和文) 進行波音波を利用した革新的な高効率冷凍機の開発

研究課題名(英文) Development of an innovative traveling-wave thermoacoustic cooler

研究代表者

上田 祐樹 (UEDA YUKI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・特任准教授

研究者番号：00447509

研究成果の概要：

本研究では進行波音波を用いた熱音響冷凍機の性能を装置形状の最適化および作動流体の高圧化により向上させた。得られた性能は最低到達温度 -50 ，比カルノー成績係数 0.1 ($@-10$)であった。この時、用いた作動流体は 7 気圧窒素であった。さらなる高圧化により、カルノー成績係数の 0.3 程度まで向上できることが分かった。その他に、熱音響冷凍機の設計に使用できる計算コードの開発を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,340,000	0	1,340,000
2008年度	1,290,000	387,000	1,677,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,630,000	387,000	3,017,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物理学一般

キーワード：熱，音，振動

1. 研究開始当初の背景

音波が気体中を伝播する時、気体の圧力は変動する。広い空間中(自由空間中)であれば、この音波による圧力変動は断熱的に行われる。このことは、Newton や Laplace による「音速の研究」以来よく知られた事実である。一方、あまり知られていないが、細管内を音波が伝播する時、音波による圧力変動は断熱的に行われず、気体と細管壁の間で熱交換が行われる。この音波による

熱交換により、様々な熱音響現象が引き起こされる。

日常生活における音波では、圧力変動の大きさは大気圧(101 kPa)の 10^6 分の1程度と小さい。そのため、たとえ細管内を音波が伝播したとしても熱音響現象は観測できない。しかし、共鳴現象を用いたり、加圧気体を作動流体にしたりすると、音波による圧力変動は巨大(~ 300 kPa)になり、熱音響現象の一つである、熱から音響パワーへの

エネルギー変換(エンジン)や音響パワーから熱へのエネルギー変換(冷凍機)が引き起こされる。

音波による熱から音響パワーへのエネルギー変換を利用した装置は熱音響エンジンと呼ばれ、音響パワーから熱へのエネルギー変換を利用した装置は熱音響冷凍機と呼ばれている。熱音響エンジン・冷凍機はピストンやバルブではなく、音波による気体の圧縮・膨張を利用するので、従来のエンジンや冷凍機に比べて構造が簡単である。また、エンジンの場合、外燃機関であるので太陽エネルギーや廃熱を駆動エネルギーに利用でき、冷凍機の場合、空気やヘリウムなどの自然冷媒を用いる。これら特長から低コストで環境にやさしい装置として、熱音響エンジン・冷凍機は1970年代から研究されてきた。

1970年代から1990年代後半にかけての様々な研究の成果により、熱音響エンジン・冷凍機の効率はカルノー効率の20%程度まで引き上げられた。しかし、自動車のエンジンや家庭用冷蔵庫に比べると効率の更なる改善が必要であった。

1998年にYazaki等は従来とは異なる形状の熱音響エンジンを開発した。(T. Yazaki, et al. PRL 83, 153 (1998).) 翌年の1999年には、Yazaki等のエンジンにさらに改良を加えた熱音響エンジンがBackhausとSwiftによって開発された。(S. Backhaus and G. W. Swift, Nature 393 153 (1998).) 彼らのエンジンはカルノー効率の41%、熱効率で30%を達成した。高効率が達成できた理由は、進行波音波によりエネルギー変換を利用した点にあることが分かってきた。

2000年以降、進行波音波を利用するタイプの熱音響エンジンが世界中で研究されている。しかし、進行波音波を用いた熱音響冷凍機に関する研究はほとんど行われていなかった。

上田らは共鳴現象を利用しつつ、進行波音波を用いる熱音響冷凍機を開発した。(上田祐樹 加藤千幸, 日本機械学会論文集B 73 839 (2007).) この冷凍機の性能は、作動流体が1気圧空気で、高温端の温度が300 K、低温端の温度が290 Kの時、成績係数(冷凍出

力/入力仕事)は0.5であった。この値は装置形状の最適化、作動流体の高圧化によって格段に改善することが示唆されていた。

2. 研究の目的

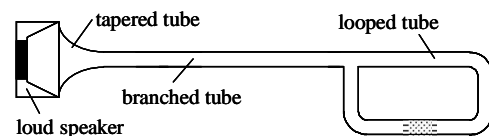
本研究の目的は、作動流体の高圧化および装置形状の最適化による進行波音波を用いた熱音響冷凍機の高効率化である。

3. 研究の方法

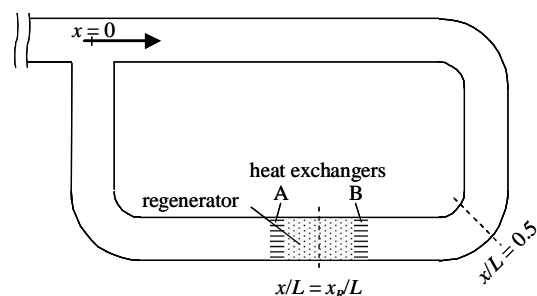
研究は実験と数値計算の両方を用いて行った。まず、装置の形状の変化が比較的簡単に行える大気圧空気を用いた冷凍機を製作する。この冷凍機を用いて、どの設計パラメータがどの程度性能に影響を与えるかを明らかにした。次に、得られた実験結果を再現できる数値計算プログラムを製作した。その後、計算プログラムを用いて加圧気体を作動流体とする冷凍機を設計し、最後に製作および性能評価を行った。

4. 研究成果

まず、大気圧空気を作動流体とした進行波型熱音響冷凍機を製作した。製作した装置の概略図を図1に示す。装置はスピーカ、枝管、ループ管で構成されている。ループ管内には熱交換器に挟まれた(ステンレスメッシュを積層して製作された)蓄熱器が挿入されている。枝管とループ管の接合部から蓄熱器までの距離をループ管長さで無次元化した X 、蓄熱器の流路を温度境界層で無次元化した r を変えながら成績係数 COP を測定した。その結果を図2に示す。この図から X, r は COP



(a) Experimental apparatus



(b) Close up of looped tube

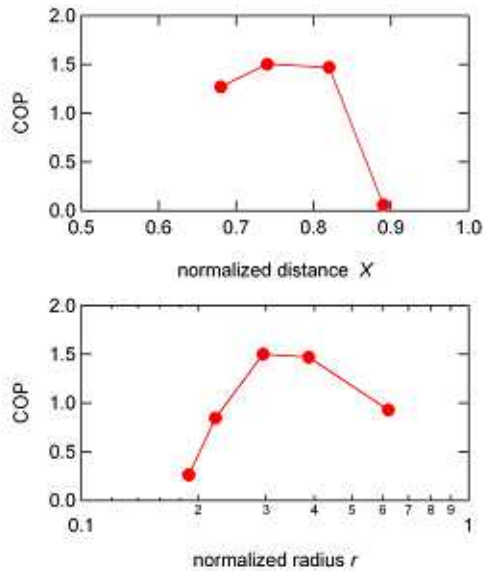


Fig. 2. (上) 成績係数 COP と蓄熱器の位置の関係と(下)COP と蓄熱器流路径の関係.

の値を変化させ、ともに最適値を持つことが分かった。また、 X, r を共に最適化することで、大気圧空気を作動流体とした冷凍機の成績係数 COP は温度差 10 の時 1.5 程度となり、以前報告された COP を大きく上回った。

次に、COP の X, r 依存性をシミュレートする計算コードを開発した。なお、計算コードでは線形理論を用いた。さらに、この計算コードを用いて 700 kPa の窒素を作動流体とする冷凍機を設計し、製作した。制作した冷凍機の写真を図 3 として示す。全長は約 3 m で音響パワーの入力は 40 W 程度である。製作した冷凍機の COP と低温端温度 T_c の関係および冷凍出力 Q_c と T_c の関係を図 4 にシンボルで、それらの計算による見積もり値を実線で示す。この図から分かるように、最低到達温度は -52 であった。また低温端温度が -10 の時の COP は 0.6 であった。この時、高温端(排熱側)の温度は 40 であったので、比カルノー成績係数は 0.11 となる。この図から分かるように、低温端温度が高温端温度に近い時、実験値と計算値はよく一致している。しかし、温度差が大きくなるとずれも大きくなる。この計算と実験の差の原因は今後の課題となった。なお、現在の装置は安全上の問題から 7 気圧窒素を用いたが、これを 30 気圧まで高めることで、比カルノー成績係数

0.3 を実現できると試算できた。



Fig. 3. 加圧気体を作動流体とする進行波型熱音響冷凍機の写真。(上) 全体、(下)蓄熱器付近、霜が付いている所が熱交換器。

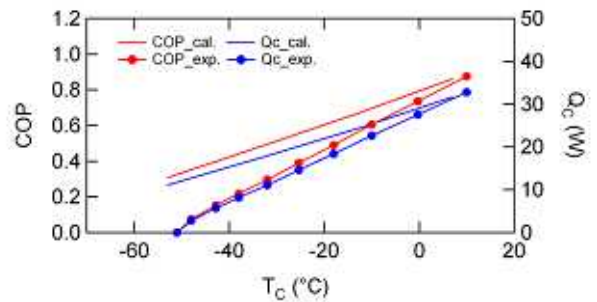


Fig. 4. 低温端の温度と成績係数 COP および冷凍出力 Q_c の関係。

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 4 件)

下川哲, 上田祐樹, 秋澤淳

“大気圧空気を使った進行波型共鳴管冷凍機の装置形状最適化” 日本機械学会論文集 B, (査読あり), Vol. 75 (掲載確定), 2009

Y. Ueda, T. Kato, C. Kato
“Experimental evaluation of the acoustic properties of stacked-screen regenerators” The Journal of the Acoustical Society of America , (査読あり), Vol. 125 (2009) 780-785

Y. Ueda
“Calculation method for the prediction of the performance of a traveling-wave thermoacoustic cooler” Journal of Power and Energy Systems ,(査読あり), Vol. 2, (2008) 1276-1282

Y. Ueda, C. Kato
“Stability analysis of thermally induced spontaneous gas oscillations in straight and looped tubes” The journal of the Acoustical Society of America ,(査読あり), Vol. 124, (2008) 851-858

[学会発表](計 7件)

Y. Ueda, “Stability analysis of thermoacoustic spontaneous gas oscillations occurring in thermoacoustic engines” The international congress of Ultrasonics, 2009/1/14, サンチアゴ(チリ)

辻康平 “ステンレスメッシュシート積層型蓄熱器の有効流路半径の測定” スターリングサイクルシンポジウム, 2008/11/5, 国土館大学

上田祐樹 “温度勾配の急峻さがタコニス振動の発振温度比に与える影響” 流体力学学会年会, 2008/9/7 神戸大学

Y. Ueda, “Experimental evaluation of the wave number in stacked-screen regenerators” Acoustics’08 2008/7/3, パリ(フランス)

下川哲 “大気圧空気を使った進行波型熱音響冷凍機の装置形状最適化” 低温工学・超電導学会, 2008/5/27 明星大学

Y. Ueda, “Calculation method for the prediction of the performance of a traveling-wave thermoacoustic cooler” The 13th International Stirling Engine Conference 2007/9/24, 東京(日本)

下川哲 “進行波を用いた熱音響冷凍機の開発” 日本冷凍空調学会, 2007/10/23, 東京農工大学

(2)研究分担者
なし
(3)連携研究者
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

上田 祐樹 (UEDA YUKI)
東京農工大学・大学院共生科学技術研究院
院・特任准教授
研究者番号：00447509