

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 6 月 12 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760181

研究課題名（和文）300℃以上の温度差で稼働する pistonless スターリングヒートポンプの開発

研究課題名（英文）Piston-less Stirling heat pump generating a temperature above 300℃

研究代表者

上田祐樹 (UEDA YUKI)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00447509

研究成果の概要（和文）：

本研究では排熱を利用して、熱力学的に高品位な熱を作り出すことが可能なヒートポンプの開発を行った。開発したヒートポンプは二つの特徴を有している。一つは仕事から熱へのエネルギー変換を可動部なしで実行できる点であり、もう一つは多様な温度域の熱を作り出せる点にある。実験の結果、低温熱源を室温とした場合、380℃を実現し、150℃での成績係数は 1.1 であった。また、同じ構造の装置を冷凍機として動かした場合（高温熱浴を室温とした場合）、最低到達温度は-50℃で0℃での成績係数は 0.8 となった。

研究成果の概要（英文）：

In this study, a heat pump that can upgrade a wasted heat by increasing its temperature was constructed and tested. The heat pump has two features. One is that it can work without any moving parts and the other is that it can increase a temperature of heat in wide range. When the constructed heat pump worked as a heater the highest value of the generated temperature was above 380℃ and its coefficient of performance (COP) was 1.1 at 150℃. When it worked as a refrigerator, the lowest value of the generated temperature was -52℃ and its COP was 0.8 at 0℃.

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	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：エネルギー利用・ヒートポンプ

1. 研究開始当初の背景

製鉄所や化学プラント・食品製造所等、多くの工場で大量の熱が環境に排出されている。特に 100～300℃の排熱は大量に存在する。これら低温の未利用排熱を低コストで利用できれば、経済的メリットだけでなく、地球温暖化抑制対策としても大きな効果が得られる。図 1 に示すような熱力学的に低質な 300℃以下の熱源を利用して仕事を生み出し、その仕事をヒートポンプに入力し比較的に利用しやすい 500℃以上の熱を作り出す事が出来れば、1 次エネルギーを一切必要せず、未利用排熱の有効利用が可能となる。

図 1 に示すシステムを製作するためには排熱で駆動する熱機関と高温域で駆動できるヒートポンプ（加熱機）を開発する必要がある。本研究では後者のヒートポンプに注目する。家庭用の空調機に代表されるようなランキンサイクルを用いたヒートポンプの場合、その動作温度は媒質の相変化が起こる温度によって決まる。そのため、300℃以上の大きな温度差を実現できない。一方、気体を媒質として用いるヒートポンプであれば、気体が気体である温度、例えば窒素であれば 77K(-196℃)以上の温度域で稼働できる。

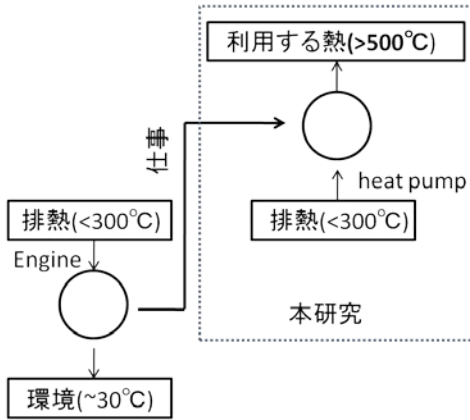


図1

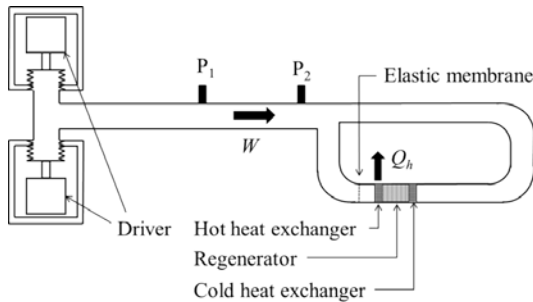


図2

2. 研究の目的

本研究の目的は気体を媒質として用いるヒートポンプを開発し、 300°C 以上の温度差を実現すること、またその性能測定である。

3. 研究の方法

排熱を用いた装置を実用化するうえで、製造・維持にかかるコストは重要な因子である。そこで、本研究では可動部品が少なく、排熱駆動の原動機との組み合わせも可能な熱音響ヒートポンプに注目した。このヒートポンプは音波による気体の圧力変動と位置変動を利用して仕事から熱へのエネルギー変換を行うために本質的に可動部を必要としない。さらに、自動車のエンジンと同等以上の効率を実現できる熱音響エンジンと組み合わせることで、図1に示したシステムにも発展させることができる。なお、この場合システム内にピストンやバルブなどの稼働部品は一つもない。

従来の研究では熱音響ヒートポンプは冷凍機としてのみ利用されており、加熱機としての性能は評価されたことがない。そこで、本研究では熱音響スターリングヒートポンプを製作し、その性能を評価した。

性能は装置への入力（音響）仕事と加熱量を測定し成績係数（加熱量/入力仕事）を評価した。この際、温度に対して成績係数がどのように変化するかを調べた。なお、最高温

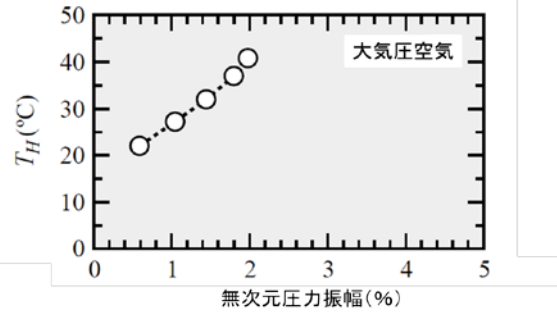


図3

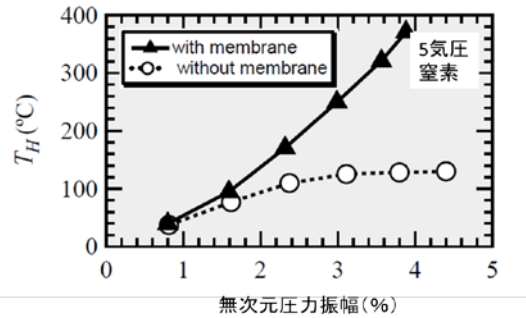


図4

度は 150°C とした。これは熱媒（エンジンオイル）および熱媒循環装置（ポンプ）の耐温度条件によって決定した。

製作した熱音響ヒートポンプの概略図を図2に示す。大きく分けて音響入力部、共鳴管部、ループ管部で分けられる。音響入力源としてシンホニアテクノロジー社製のレシプロモータを使用した。（研究期間内に2種類の装置を製作し、初期型のモータの数は1つで、後期型の数は2つである。図2には後期型が示されている。）レシプロモータはハウジング内に収められ、ダイナミックベローズを介して共鳴管につながっている。共鳴管として $\phi 56$ のステンレス管を用いた。共鳴管壁には内部の圧力変動を測定する圧力センサが二つ設置されている。これら圧力センサにより入力（音響）仕事を測定した。ループ管としては $\phi 40$ のステンレス管を銅製の90度エルボーおよび銅製のT字管で繋いだものを用いた。ループ管内には40 mm 積み重ねたステンレス製のメッシュが詰め込まれている。これを蓄熱器と呼ぶことにする。蓄熱器両端には熱交換器が設置されている。高温熱交換器には熱媒を循環させ、熱交換器入口と出口での熱媒の温度および温度差を測定し、加熱能力を測定した。作動流体には大気圧空気と加圧窒素を用いた。大気圧空気を用いた実験では管壁に取り付ける圧力センサの数を増やし装置内の音場を詳細に調べた。

4. 研究成果

(1) 到達温度

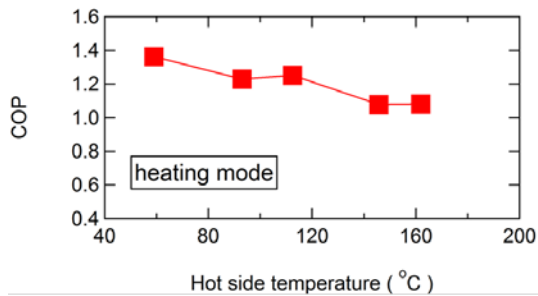


図5

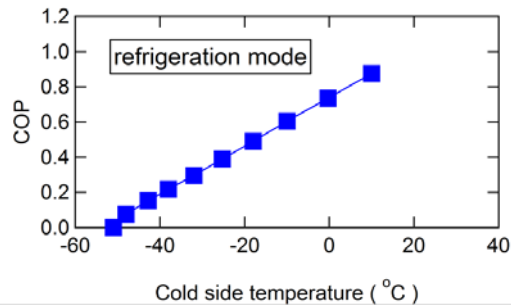


図6

まず、作動流体を大気圧空気とした場合の高温端温度 (T_H) を無次元圧力振幅 (圧力振幅/大気圧) の関数として図 3 に示す。なお、この場合の使用したモータの数は 1 である。この図から分かるように圧力振幅の大きさが大きくなるとともに高温端の温度が上昇することが分かった。

蓄熱器高温端の温度が上昇する理由を明らかにするために複数の圧力センサを用いて装置内の音場を測定した。その結果、蓄熱器内の流体がスターリングサイクルに似た熱力学的サイクルを経験することで、(音響)仕事は熱に変換されていることが分かった。スターリングサイクルの熱力学的性質より、上記の結果は本装置の高効率化の可能性を示している。

次に、作動流体を 5 気圧の窒素として実験を行った。その結果を図 4 に○で示す。データ (○) が示すように、3%以下では無次元圧力振幅の増大と共に高温端温度 (T_H) は上昇する。しかし、3%以上では、 T_H は上昇しない。無次元圧力振幅が 4.5%程度の時、手で触れると T 字管付近の温度が上昇していることが分かった。高温熱交換器と T 字管の距離から判断して、この温度上昇の原因は管壁を通る熱流による温度上昇ではなく、ループ管内を循環する音響流であると判断した。そこで、室温熱交換器 (図 2 の cold heat exchanger) から 50 mm 程度離れた位置に (音波は通過するが作動流体は通過できない) ゴム膜を設置した。ゴム膜有の条件での結果を図 4 に▲で示した。データ (▲) が示すように、 T_H の上

昇に飽和傾向は観測されず、無次元圧力振幅の上昇と共に T_H は上昇した。無次元圧力振幅が 3.9%の時、 T_H は 380°C になった。これは室温 (20°C) より 360°C 高い。

次に高温熱交換器を室温に保って、低温熱交換器の温度を測定した。つまり、冷凍機としての性能を評価した。平均圧力を 5 気圧とした場合、無次元圧力振幅が 5%の時、低温端熱交換器の温度は -42°C となり、平均圧力を 7 気圧とした場合、-52°C となった。

(2) 成績係数

作動流体を加圧窒素とし、成績係数の測定を行った。加熱機として使用する場合は高温熱交換器にエンジンオイルを熱媒として流し込み、出口と入口での温度の差を測定した。得られた温度差と熱媒の流量、比熱を用いて加熱量を算出した。上記した様にエンジンオイルを循環させるのに用いたポンプの耐温度 (200°C) より、熱交換器出口での熱媒の温度最大値は 150°C とした。測定の結果を図 5 に示す。高温端の温度が 60°C の時の成績係数は 1.3 となった。また、高温端温度が 150°C の時の成績係数は 1.1 となった。

冷凍機として働かせるために、高温側熱交換器を室温に保ち装置稼働させた。低温熱交換器にヒータ線を巻きつけ冷凍能力の測定を行った。その結果を図 6 に示す。この図から分かるように低温端の温度が上昇する、言い換えると、室温との温度差が小さいほど大きな成績係数が得られた。0°C での成績係数は 0.8 となった。

(3) まとめ

本研究では -52°C から 360°C までの任意の温度を実現できる熱音響スターリングヒートポンプを開発した。また、低温端と高温端の温度差が本質なので、加熱機として使用する場合、低温側の温度を上昇 (例えば排熱の温度まで) させれば、その温度より高い温度が実現できる。今後、開発したヒートポンプを熱音響エンジンとの組み合わせることで、排熱の質を向上させるシステムおよび排熱駆動の冷凍機の開発が期待できる。

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)

1. D. Noda and Y. Ueda

“A thermoacoustic oscillator powered by vaporized water and ethanol” American Journal of Physics 80 124-126 (2013) 査読有 DOI: 10.1119/1.4766940

2. 下川哲, 上田祐樹, 秋澤淳

“加圧窒素を作動流体とした進行波型共鳴管冷凍機の性能評価” 低温工学 47 37-41 (2012) 査読有

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsj/47/1/47_37/_pdf

3. B. M. Mehdi, Y. Ueda, A. Akisawa

“A thermoacoustic Stirling heat pump working as a heater” Applied Physics Express 4 107301_1-3 (2011) 査読有

DOI: 10.1143/APEX.4.107301

4. K. Nakamura and Y. Ueda

“Design and construction of a standing-wave thermoacoustic engine working with heat sources with a given temperature ratio” J. Thermal Science and Technology 6 416-423 (2011) 査読有

DOI :10.1299/jtst.6.416

〔学会発表〕(計 17 件)

①津田研一郎, 上田祐樹, 秋澤淳 “熱音響スターリングヒートポンプの加熱性能の測定”2012年度日本音響学会秋季研究発表会 信州大学 長野 2012/9/21

② Y. Ueda, “Temperature difference required for the operation of a vaporized-water thermoacoustic engine “ the 19th International Congress on Sound and Vibration リトアニア ビュリニス 2012/7/10

③ Y. Ueda, “High-amplitude acoustic oscillations externally induced in a thermoacoustic engine” The 19th International Symposium on Nonlinear Acoustics 早稲田大学 東京 2012/5/23

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田祐樹 (UEDA YUKI)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00447509

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし