

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02607

研究課題名（和文）環境発電用小型熱音響エンジンの開発

研究課題名（英文）Development of a small thermoacoustic engine for energy harvesting

研究代表者

上田 祐樹（Ueda, Yuki）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：00447509

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：環境熱発電に熱音響エンジンを利用することを目的に、熱音響エンジンの駆動に必要な温度差を小さくすることを試みた。具体的には作動流体として少量の水を加えた。また、環境熱発電のために装置がどの程度まで小さくできるかについて検討した。実験の結果、装置全長が20cmの時、70℃以下の熱源を用いて動作することが分かった。さらに、数値計算により全長3cm程度まで小さくできることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では温度差を利用し熱を振動に変換する熱音響エンジンを対象とし研究を行った。熱音響エンジンは可動部を全く持たない熱機関であり、その単純さから長寿命、低製造・維持コストの実現が可能となる。一方、必要な温度差や装置サイズが課題となっていた。これらの問題を、相変化物質を作動流体に加えることで改善できることが本研究により示された。IoT技術の発展には情報の送受信を行うデバイスとともに、そのデバイスを駆動する電力を環境に存在する温度差や振動に伴うエネルギーを用いて供給する環境発電技術の進歩も必要となる。本研究は環境発電技術への熱音響エンジンの利用可能性を示した点に社会的意義があると感ぜられる。

研究成果の概要（英文）：To apply a thermoacoustic engine for energy harvesting, experimental and numerical investigation has been performed. To reduce hot temperature needed for driving a thermoacoustic engine, water is used as one of working fluids. Experimental results show that the hot temperature was about 85 degree Celsius when the length of a thermoacoustic engine was 20 cm. Furthermore, based on numerical results, the length was found to be shorten to 3 cm, when the hot temperature was limit to be below 100 degree Celsius.

研究分野：熱音響工学

キーワード：熱音響エンジン 環境発電

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自然界には未利用のエネルギー(物体の振動,熱,流体の流れなど)が大量に存在し,これらを電気エネルギーに変換する「環境発電」技術が注目されている。これは,外部から電力を供給することが困難なセンサや小型の電子機器の独立電源として期待されているからである。環境中に存在する主要なエネルギーとして「熱(温度差)」があり,微小な「熱」を電力に変換する技術の開発が日本,欧米,中国で進められている。熱を電気に変換する方式として(1)熱電効果の利用(2)熱イオン発電(3)光熱発電(4)熱-機械発電があげられる。[桑野博喜監修 エネルギーはーベスティング技術の最新動向(2010)]

熱を仕事に変換する装置の代表として自動車のエンジンに代表される「熱機関」があげられ,熱機関を用いた方式は前記の(4)に分類される。熱機関の利用は特殊な材料を必要としないこと,比較的古典的な設計法が利用可能なことなどに利点がある。しかし,一般的な熱機関は摺動部を有しているため,数 cm ~ 数 mm のサイズに縮小すると,出力に対して摺動部でのロスが大きくなり,有効なエネルギー変換の実現が難しいという問題点がある。また,サイズの制約による,摺動部の製作のコストアップ,組み立ての精度にも課題がある。そのため,「熱」をエネルギー源とする環境発電技術としての熱機関の研究例は少ない。

環境発電技術としての熱機関の実現には弱点となる摺動部を取り除く必要がある。そこで本研究では摺動部を持たない熱機関として知られる「熱音響エンジン」に注目した。熱音響エンジンとは図1に示すように,中空の管に細管の束(以後,慣例にならってスタックと呼ぶ)で構成されている。管内は気体(例えば空気)で満たされており,スタック両端には高温用と低温用の熱交換器がある。高温熱源からの熱入力と水冷や空冷による低温熱交換器からの徐熱により,スタック両端に温度差をつける。温度差が閾値(臨界温度差)以上であると,管内の気体がひとりでに振動を始める。この現象は熱音響自励振動と呼ばれている。熱音響自励振動が起こっている時,温度差を維持するのに必要な熱が音の運ぶ力学的なエネルギーに変換されている。

ユタ大学のグループは小型の熱音響エンジンを製作し,その稼働を実現している。[Symko et al. Ultrasonics(2013)] しかし,Symko 等の装置は長さ 1 mm 程度のスタック長さに 200 K の温度差を付ける必要があり,環境発電に利用するためには,臨界温度差を大幅に低下させる必要がある。

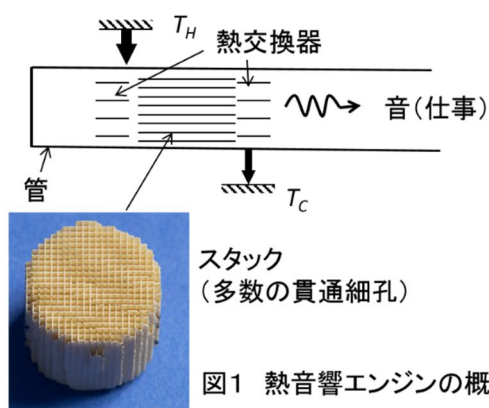


図1 熱音響エンジンの概略図。

2. 研究の目的

本研究の目的は水の相変化(沸騰ではなく沸点以下で起こる蒸発・凝縮)が熱音響自励振動に与える影響を実験的,理論的に解明し,その成果を利用し,小型熱音響エンジンの臨界温度差がどこまで下げられるかについて明らかにする。

3. 研究の方法

(1)熱音響エンジンを製作し,装置サイズと臨界温度差の関係を明らかにする。この際,スタックの流路は可能な限り小さくする。これは,熱境界層厚さと流路径の比には最適値

が存在し、装置サイズを小さくすると自励振動の周波数が高くなり、周波数に依存する熱境界層が薄くなるためである。(2) 装置サイズと臨界温度差の間の関係の実験結果と数値計算結果を比較し、現状の数値計算が実験を再現できるかを明らかにする。(3) 再現できる場合は(結果的に再現可能になった)数値計算を利用して、装置サイズの小型化がどの程度まで可能かについて検討し、その際に必要なスタック流路を見積もる。(4) 発電の可能性を検討するために、実験可能なサイズの熱音響エンジン((1)で製作した装置)とピエゾ素子を組み合わせることで発電実験(起電力の測定)を行う。

4. 研究成果

直径 40 mmの管を用いて図 2 に示す熱音響エンジンを製作し、装置長さおよび高温側パイプ長さを変えながら振動開始時の高温熱交換器の温度(以後、発振温度と呼ぶ)を測定した。スタックの長さは 40 mm であり、作動流体として大気圧空気および少量の水を用いた。実験の結果から、装置長さを固定した場合、高温側パイプ長さを長くすると発振温度が低くなることが分かった。また、装置長さが短くなると振動が 100 以下で起こる高温側パイプ長さの下限値が大きくなることが分かった。つまり、小型の装置を製作するには高温側パイプ長さをできる限り大きくすればよいといえる。

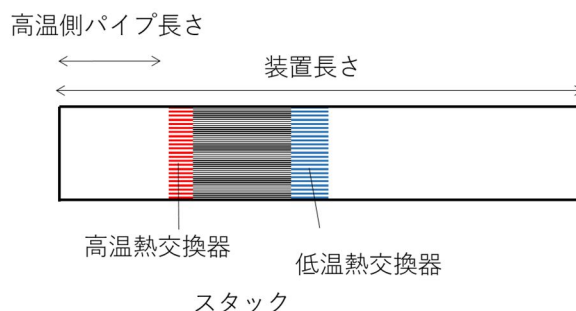


図2 装置模式図

装置長さを 0.4 m から 0.9 m とした場合の発振温度と装置長さ(全長)の関係の実験結果と本研究で開発した数値計算手法を用いた計算結果の比較を図 3 に示す。この図からわかるように発振温度を数値計算により予測することが可能であることが分かった。以後、数値計算を用いて装置の小型化について検討を行った。

実験ではスタックの長さを 40mm で固定して行ったのに対して、スタックの長さを短くすると発振温度が低下することが分かった。そこで、装置長さおよび、スタック長さをパラメータとして発振温度を計算した。計算の結果、同じ装置長さの時、スタックの長さが短ければ短いほど発振温度が低くなる

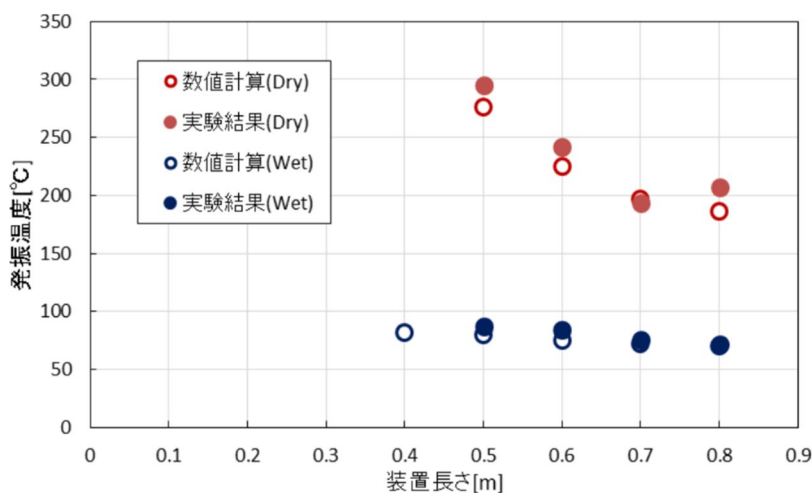


図3 数値計算結果と実験結果の比較

なることが分かった。また、100 以下の発振温度が実現できる最小の装置長さ 3 cm でスタック長さ 1 mm の時であった。

最後に、図 2 に示した開端(図中右)をピエゾ素子で閉じ(閉端化し)、さらに低温熱交換器を取り除き、空冷式にした熱音響エンジンを製作し、最大で 0.6V の起電力を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Ueda Yuki, Yonemitsu Shunsuke, Ohashi Kenichiro, Okamoto Takuya | 4. 巻 147 |
| 2. 論文標題 Measurement and empirical evaluation of acoustic loss in tube with abrupt area change | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America | 6. 最初と最後の頁 364 ~ 370 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/10.0000597 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名 網野一樹, 上田祐樹 |
| 2. 発表標題 音響効果による熱と物質の同時輸送 |
| 3. 学会等名 スターリングサイクルシンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------|
| 1. 発表者名 橋本一步, 上田祐樹 |
| 2. 発表標題 小型熱音響エンジンの発振特性 |
| 3. 学会等名 日本音響学会成果発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 ケビンヤブプリー, 上田祐樹 |
| 2. 発表標題 ウエットスタックを用いる熱音響エンジンの振動の安定限界に及ぼす平均圧力の影響 |
| 3. 学会等名 スターリングサイクルシンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Ohashi, Y. Ueda |
| 2. 発表標題 QUANTIFICATION OF PRESSURE DIFFERENCE BEFORE AND AFTER MINOR LOSS OF RESONANCE TUBE |
| 3. 学会等名 International Congress on Sound and Vibration (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 岩見 健太郎 (Iwami Kentaro) (80514710) | 東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (12605) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|