

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17705

研究課題名（和文）水の添加によって熱音響エンジンの臨界温度が低下するメカニズムの解明とその応用

研究課題名（英文）Investigation of the mechanism of the reduction of the critical temperature difference of thermoacoustic engines having a wet regenerator

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） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では液体の水が管壁に存在する管内を音波が伝ばする際に起こる、熱音響現象に注目し、実験及び数値計算を行った。まず、中空の管内（内径40mm、長さ2 m程度）に細い流路（内径1 mm以下）が多数空いたハニカムセラミックス（以後スタックと呼ぶ）を設置し熱音響エンジンを作成した。スタックの両端に熱交換器を設置し、温度差を与え、エンジンを駆動させた。この際スタックを水に浸した場合と浸さない場合で駆動に必要な温度差を比較した。その結果、浸したほうが小さな温度差で駆動することが分かった。次に、実験結果を湿分の移動により引き起こされる熱流束を加味した理論に基づいた数値計算により再現し、よい一致を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では熱音響エンジンの稼働温度が液体の水の存在により低下する現象について、そのメカニズムを実験および数値計算により解析した。熱音響エンジンはピストンやバルブなどの可動部品を一切持たない、外燃機関であるため、長寿命、低メンテナンスコストを実現できる排熱利用エンジンとしての応用が期待されている。本研究により、水の存在により稼働温度が100℃以下にできることが明らかになり、特に低温排熱の利用可能性が示された。また、数値計算による再現にも成功しており、装置の設計指針やその効率の予測も可能になった。

研究成果の概要（英文）：In this study, thermoacoustic phenomena coupled with evaporation and condensation of water was investigated. First, we constructed a thermoacoustic engine that was composed of a wide-long tube and narrow-short tubes. The diameter and length of the wide-long tube were 40 mm and 2 m, respectively, whereas those of narrow-short tubes were 0.8 mm and 40 mm, respectively. The engine worked when the temperature difference between the sides of the stack was above the critical value. We compared the critical temperature difference in two conditions. One condition was that the stack wall had liquid water and the other was that it had no liquid water. It was turned out that the critical temperature difference with water is much smaller than that without water. Next, we were successful in numerically reproducing this experimental results by using the theory that can treat the acoustic wave propagation in a wet-wall tube.

研究分野：熱音響工学

キーワード：熱音響エンジン 低温排熱

## 1. 研究開始当初の背景

熱音響エンジンは、音の伝ばに伴う媒質(作動流体)の圧力変動、密度変動、温度変動を利用してエネルギー変換を行う。そのエネルギー変換効率は研究が始まった1980年代には数%であったが、現在ではガソリンエンジンのそれに匹敵する30%に達している(S. Backhausら; *Nature* **399** 1999, H. Tjaniら *J. Appl. Phys.* **110** 2011)。

自動車や発電所で用いられている一般的なエンジンではピストンやバルブ、タービンなどの可動部の動きを制御して作動流体の圧力、密度、温度の変動を適切なタイミングで引き起こしている。一方、熱音響エンジンは可動部ではなく音による熱力学的状態量の変化を用いるので、本質的に可動部を有せず、また、外燃機関であるので熱源を選ばない。これらの特長(高い効率、簡単構造、熱源の自由度の高さ)を活かして、エネルギーの有効活用を目指した熱音響システムの研究が進められている。例えば、de Blok は工場排熱(230 程度)で高温高圧蒸気を作り、その蒸気を熱源とする10kW出力熱音響システム(Kees dB *FEDSM-ICCM*2010-30527)を、Biらは太陽光を集光し、800 程度の熱を作り、それを熱源とする5kW出力熱音響発電装置を開発した(T. Biら *Applied Energy* **105** 2016)。後者は効率の面で太陽電池(Photovoltaics)と同程度が実現できており、さらに、上昇する可能性もある。日本では応用研究として自動車用や船舶用のエンジンからの排熱回生を目的に研究が行われていた(阿部ら *自技論* **43** 2012, 長谷川 *応用熱音響研究会* 2014)。

熱音響エンジンの応用範囲を広げるための技術的な課題の一つに利用可能な熱源温度の拡大が挙げられていた。この理由は、熱音響エンジンはある閾値以上の温度(以下、臨界温度と呼ぶ)を有した熱源がないと稼働しない点にある。この臨界温度は熱音響エンジンの構造や作動流体の種類、封入圧力に依存し、多くの熱音響エンジンでは150 から500 の範囲にある。もし、この値を150 以下にできれば、これまでに利用されることが少なかった150 以下の低温廃熱の利用が可能となる。

臨界温度を下げる方法として熱音響エンジンの作動流体に少量の水を加えるという方法が提案されていた。図1に熱音響エンジンの臨界温度と添加水量の関係の実験結果(Tsuda and Ueda, *AIP Advances* (2015))を示す。装置のサイズ(容積)3Lに対して、水の添加量を0gから徐々に増やしていくと、0.18gの時に、臨界温度は150 からステップ関数的に70 に低下していることが分かる。実験的に大幅な低下が示され、そのメカニズムの解明に様々なアイデアが提案されていたが、しかし、明確にはなっていなかった。

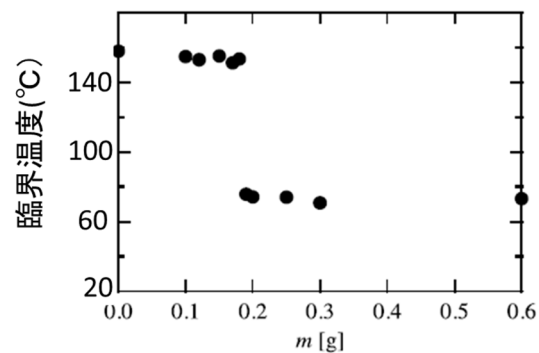


図1. 添加水量と臨界温度の関係

## 2. 研究の目的

本研究では水の存在が熱音響エンジンの発振温度を低下させるメカニズムを実験、数値計算的に明らかにし、さらに効率へどのような影響を与えるのかについて解析することを目的とした。

## 3. 研究の方法

熱音響エンジンは中空の管（内径数十 mm，長さ数十から数 m）とスタックと呼ばれる狭い流路（内径 1 mm 以下，長さ数十 mm）の集合体および二つの熱交換器で構成されている．もっとも重要な部品であるスタックの特性が臨界温度に大きな影響を与えることが知られている．そこで，水の存在による稼働温度低下のメカニズムを解明するために，スタック内流路，スタック両端の温度勾配および水の有無をパラメータとし，実験を行った．また，それらの実験結果と Raspnet が提案する，薄い液膜が壁に存在する状況での波動方程式を用いて数値計算の結果と比較した．よい一致が得られたので，さらに Raspnet の波動方程式を用いて，水の添加が与える効率への影響を調べた．

#### 4. 研究成果

まず，温度勾配が存在しない条件で，音波の伝搬に水が与える影響について述べる．具体的に調べた物理量としては，音波が運ぶ単位時間当たりのエネルギーの散逸量である．実験結果を図 2 に示す．中抜き丸（○）で示したのは圧力振幅が大きく速度振幅が小さい条件での実験結果，中塗り丸（●）

で示したのは速度振幅が大きく，圧力振幅が小さい条件での実験結果である．縦軸には水が存在する条件での散逸量を水が存在しない条件での散逸量で除した散逸量比，横軸は環境温度となっている．まず，●で示した実験結果（圧力振幅小，速度振幅大）に注目すると，散逸量比はほとんど環境温度に依存せず，その値は 1 に近い値になっている．一方，○で示した実験結果（圧力振幅大，速度振幅小）に注目すると，環境温度の増加とともに散逸量比が大きくなっていることが分かる．これら結果から，水の存在は圧力変動を通して音響現象に影響を与えることが分かった．これは，圧力変動に伴い，気体の温度変動が起き，管断面方向に飽和蒸気圧の勾配ができ，水の移動が引き起こされたためだと推測できる．また，環境温度の増加による散逸量比は温度と飽和蒸気圧の関係に相関があり，飽和蒸気圧の絶対値が現象に大きく影響を与えることが推測できた．

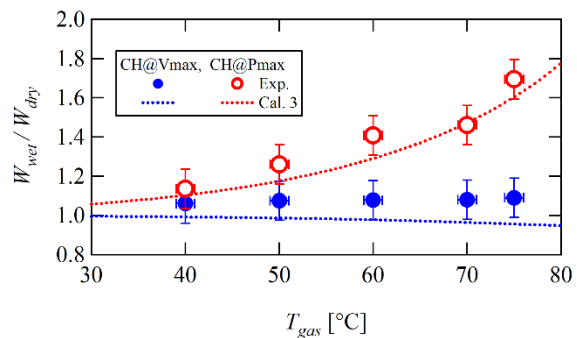


図 2 . 水の有るときと無い時のスタック内での散逸量の比 . (○) 圧力振幅大，速度振幅小の条件 . (●) 圧力振幅小，速度振幅大の条件 .

まず，●で示した実験結果（圧力振幅小，速度振幅大）に注目すると，散逸量比はほとんど環境温度に依存せず，その値は 1 に近い値になっている．一方，○で示した実験結果（圧力振幅大，速度振幅小）に注目すると，環境温度の増加とともに散逸量比が大きくなっていることが分かる．これら結果から，水の存在は圧力変動を通して音響現象に影響を与えることが分かった．これは，圧力変動に伴い，気体の温度変動が起き，管断面方向に飽和蒸気圧の勾配ができ，水の移動が引き起こされたためだと推測できる．また，環境温度の増加による散逸量比は温度と飽和蒸気圧の関係に相関があり，飽和蒸気圧の絶対値が現象に大きく影響を与えることが推測できた．

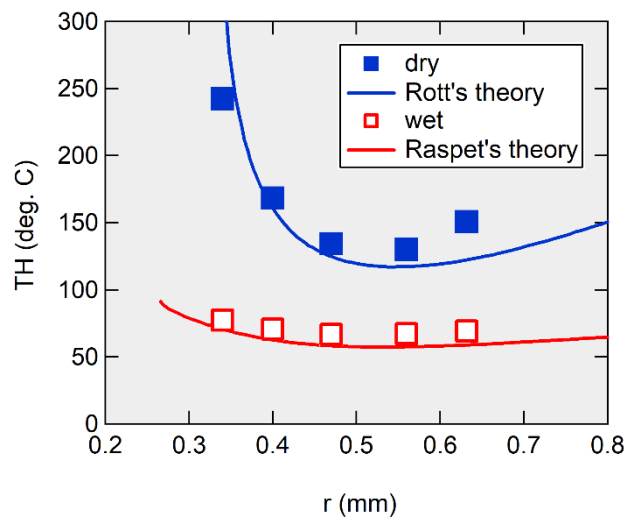


図 3 . 水の有るときと無い時の熱音響エンジンの臨界温度のスタック流路径依存性 . ( ) 水あり，(■) 水なし .

これらの結果を Raspnet により提案されている波動方程式を用いて予測した散逸量比と比較した．予測値をそれぞれ点線で示した．全体的に比で 0.1 程度過少に評価しているが，よい一致を示している．この 0.1 は測定のために用いた実験装置の課題だと考えている．得ら

れた一致から，Raspet の波動方程式を用いて，現象を理解できると結論付けた．

次に熱音響エンジンの稼働温度に水の存在がどのような影響を与えるかについて調べた結果について述べる．定在波型熱音響エンジンを作成し，その発振温度に水の添加が与える影響について調べた．低下することは明らかになっていたので，熱音響エンジンの構成要素であるスタック内の流路径をパラメーターにし実験した．実験結果を図 3 に示す．縦軸は熱音響エンジンが稼働し始める臨界温度とし，横軸はスタックの流路径とした．臨界温度以上であれば，熱音響エンジンは稼働し，それ以下であれば動かない．この図より，水が存在することにより，最大 160 の低下が実現できることが分かった．また，水が存在してもしなくても，発振温度を最も低下させる最適流路径が存在し，その値は水の存在の影響を受けないことも分かった．

Raspet の波動方程式は温度勾配のあるスタック内でも適用可能なので，熱音響エンジンの臨界温度を数値計算した．その結果を実線で示す．実験結果と数値計算結果はよい一致を示したことが分かる．

最後に Raspet の波動方程式をもとに，水の存在が熱音響エンジンの効率に与える影響について考察した．定在波型熱音響エンジンの場合，出力を  $20 \text{ kW/m}^2$  を実現する場合，振動維持に必要な高温温度は水が存在しない場合は  $730$  ，存在する場合は  $140$  となり，大幅に低温化が実現できることが分かった（作動流体を加圧しているため，沸点は  $140$  以上）この際の熱効率は水が存在しない場合は  $6\%$  ，存在する場合は  $2\%$  となった．熱効率が大きく低下している理由は，熱源温度が大幅に低下したため，熱力学的上限値（カルノー効率）が大幅に低下しているためである．この影響を明確にするために，熱効率を熱力学的上限値で除した，第 2 法則効率で比較すると，それぞれ  $9\%$  ，  $7\%$  となることが分かった．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ueda Yuki, Ogura Naoyuki	4. 巻 145
2. 論文標題 Measurement of acoustic dissipation occurring in narrow channels with wet wall	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 71 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1121/1.5085775">https://doi.org/10.1121/1.5085775</a>	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 -

1. 著者名 Farikhah Irna, Ueda Yuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Numerical Calculation of the Performance of a Thermoacoustic System with Engine and Cooler Stacks in a Looped Tube	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 672 ~ 672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app7070672	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Ueda
2. 発表標題 Wet wall thermoacoustics
3. 学会等名 Thermoacoustic Hub Date
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ueda and N. Ogura
2. 発表標題 Measurement of acoustic dissipation in porous medium with wet wall
3. 学会等名 The 26th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小倉直之
2. 発表標題 濡れた管壁が音波の減衰に与える影響
3. 学会等名 日本流体力学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上田祐樹
2. 発表標題 線形音響理論を用いた熱音響現象の数値計算
3. 学会等名 日本応用物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上田祐樹
2. 発表標題 THE MARGINAL CONDITION FOR THE ONSET OF THERMOACOUSTIC OSCILLATIONS OF A GAS IN A TUBE HAVING A WET WALL POROUS MEDIUM
3. 学会等名 International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----