

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：33401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820044

研究課題名(和文) 熱音響エンジンにおける進行波型自励振動の発生メカニズムの解明

研究課題名(英文) Mechanisms for the generation of self-excited traveling waves in thermoacoustic engines

研究代表者

清水 大 (SHIMIZU, DAI)

福井工業大学・工学部・准教授

研究者番号：40448048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：ループ管型の熱音響エンジンにおいて、スタックの空隙率等に注目して、境界層理論を応用した準1次元モデルによる数値計算を実施した。まず、臨界温度比の特定には慣習的に用いられてきたパラメータだけでなく、空隙率や壁厚等が重要であることが明らかになった。実験との比較から、 $\omega\tau = 2$ 付近まで境界層理論が有効であることが示された。これを受け、空隙率等と進行波発生との関係を調べた結果、スタックの壁厚が一定の場合は空隙率が小さい程、空隙率が一定の場合は壁厚が薄い程、進行波が発生しやすいことが明らかになった。一方、空隙率0.5辺りを境として、より低い空隙率に対しては、これらの傾向が反転することも明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulations of self-excited thermoacoustic oscillations in a looped tube are performed based on the one-dimensional theory in the boundary-layer approximation. Effects of porosity and other sub-parameters of the so-called stack on the generation of traveling waves are studied. It is found that the generation of traveling waves is enhanced as the porosity decreases when the wall thickness of the stack is constant. Thinner wall thickness of the stack is also effective for the generation of traveling waves when the porosity is constant. It is also found that these results become opposite for the porosity below around 0.5. It is unveiled that not only the common parameter $\omega\tau$ but also the porosity of the stack and other sub-parameters are important for the specification of marginal temperature ratios and for the generation of traveling waves. The boundary-layer theory has turned out to be applicable even to the case with apparently narrow pores in the stack.

研究分野：熱流体力学

キーワード：熱音響自励振動 境界層理論 臨界条件 進行波 スタック 空隙率

1. 研究開始当初の背景

熱音響自励振動は、熱をエネルギー源として、独りで大振幅の音を発生させる不思議な現象として注目されている。この熱音響自励振動は、熱と音との相互作用により、可動部なしに熱エネルギーと音の運動エネルギーが相互に変換される熱音響現象の一つである。この現象は低温廃熱等の有効利用が難しい熱源からも有用な力学的エネルギーを抽出可能な現象として、工学的な応用が期待されている。なぜなら、この熱音響自励振動の発生には温度勾配(より正確に言えば対数温度勾配)が重要な役割を果たし、必ずしも高い温度比が必要とされない特徴があるからである。

この現象を工学的なデバイスに応用する試みは、ここ数十年にわたり盛んに行われており、熱エネルギーを音の力学的エネルギーに変換する原動機や、その逆の冷凍機としての工学的応用が提案され、多くの実験的研究がなされてきた。特に、1979年に Ceperly によって提案された原動機と冷凍機を組み合わせたループ型熱音響冷凍機に関する実験的研究は、近年、国内においても盛んに行われ、熱して冷やす不思議なデバイスとして注目されている(図1および図2参照)。

このデバイスの特徴は原動機側で発生する自励振動に進行波が含まれることである。進行波は定在波とは異なり音響強度を正にすることが可能である。これによりループ管の反対側が冷凍機の機能を果たすことが可能となる。しかしながら、進行波が発生するメカニズムが解明されていないがために、エネルギー変換効率を上げることが難しく、実用化には至っていない。この問題を解決するためには、もう一度原点に立ち戻り、原動機の方に注目して進行波の発生メカニズムを解明することが必要である。

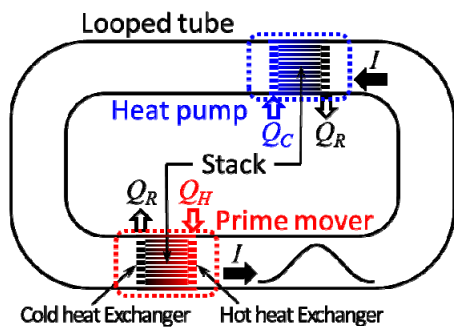


図1. ループ管型熱音響冷凍機の概略図

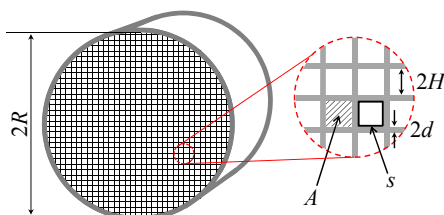


図2 スタック

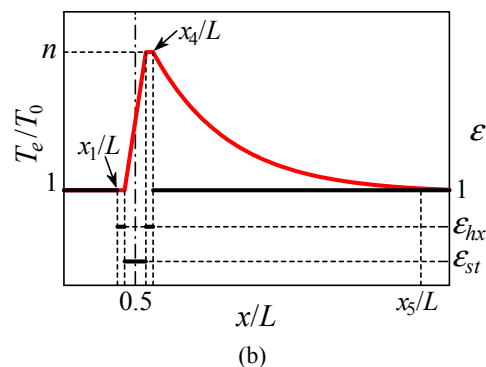
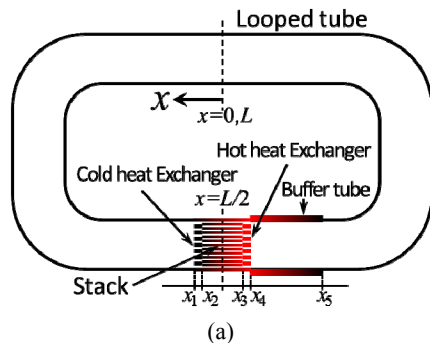


図3. (a) ループ管型熱音響エンジン (b)不連続な温度分布 T_e/T_0 およびスタックの空隙率 ϵ_{st} と熱交換器の空隙率 ϵ_{hx}

2. 研究の目的

ループ管型の熱音響エンジンにおいて発生する自励振動について、進行波が発生するメカニズムを明らかにする。本研究では、これまで我々が開発を進めてきた境界層理論に基づく準1次元モデルを熱交換機やスタックが挿入されたループ管に応用することで、CFDや高次元モデルでは解明されていない進行波発生メカニズムをスタックの空隙率や壁厚に注目して数値計算により明らかにする。

3. 研究の方法

数値計算は、境界層理論に基づいて準1次元に帰着させた方程式を熱交換機やスタックが管内に挿入された各種不連続量を伴うループ管に応用することにより実施する(図3参照)。

我々は近年、従来より熱音響現象への適用が難しいとされた境界層理論に基づく問題の定式化を実施し、その有効性を示してきた。具体的には、最も古典的な熱音響自励振動であるタコニス振動の発生を、初期・境界値問題を数値的に解くことによって示し、熱音響効果による管内気柱の不安定化から非線形性による振動の飽和に至るまでを数値計算で示すことに成功した。これに加え、その音響場およびエネルギーの流れを明らかにすることでタコニス振動の発生メカニズムを解明することに成功してきた。

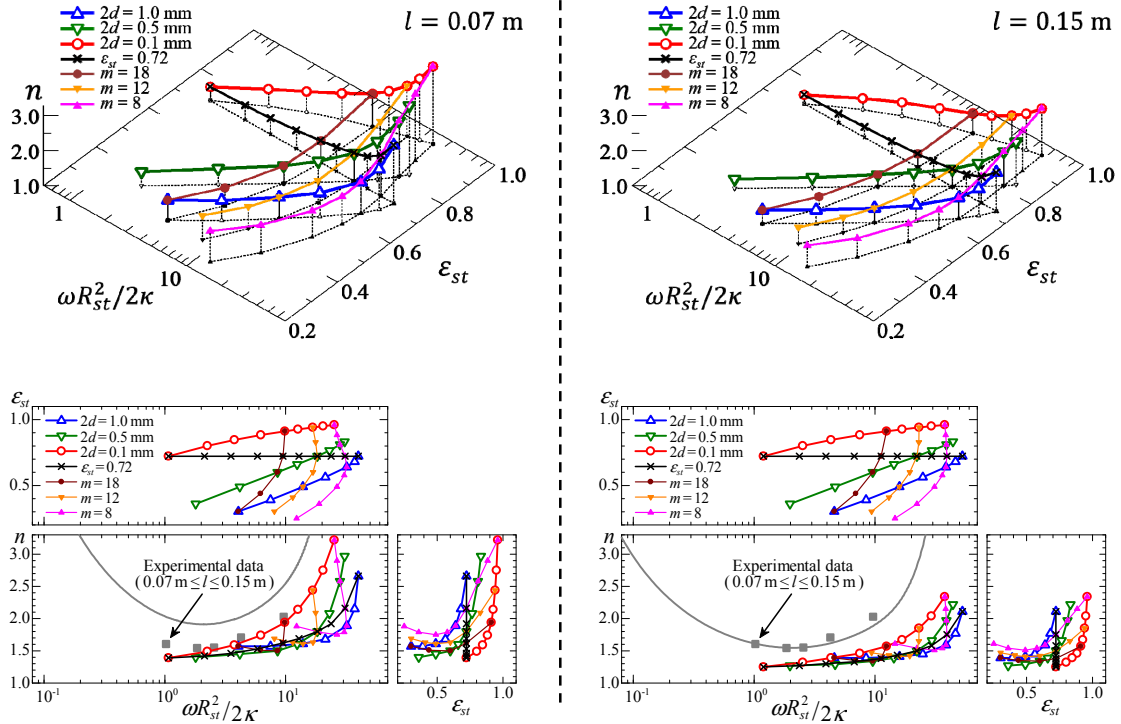


図4 臨界条件（実験データおよび無印の灰色実線は上田ら(2008) FIG. 4 参照）

境界層理論では、粘性および熱拡散層が管壁およびスタック壁近傍の狭い領域に限られると仮定し、音場を壁近傍の境界層とそれ以外の主流部に分けて考える。境界層は線形かつその代表厚さの1次オーダーで記述できると仮定する。連続の式、運動方程式、エネルギー方程式をそれぞれ管断面にわたり平均化し、境界層の解析解を用いることで、主流に関する1次元方程式を導出する。境界層の効果は非整数階微分で示される履歴積分を通して、流路断面積 A に対する濡れぶち長さ s の比に比例する湧き出し項として主流の連続の式の右辺に集約される。

本研究では、この境界層理論に基づく準1次元方程式を、ループ管型の熱音響エンジンに応用し、管内に挿入する熱交換機やスタックに着目して、定常的な進行波成分を含む自励振動が発生するメカニズムを明らかにする。しかしながら、熱交換機やスタックの挿入に起因する各種不連続量の取り扱いが境界層の効果を含めて容易ではない。

熱交換機とスタックは、急峻な温度勾配の形成と温度勾配下での濡れぶち長さを局所的に増大させることで、臨界温度比を低く抑える目的で管内に挿入されるが、伝熱促進以外の影響については余り議論されてこなかった。この挿入に起因する局所的な断面閉塞と温度分布の関係が進行波の発生に与える影響を調べることで、進行波発生メカニズムを解明する。

なお、数値計算では、全長 $L = 2.8$ m、半径 $R = 0.02$ m のループ管を考え、温度勾配もしくは空隙率が不連続になる接続位置をそれぞれ $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (0.4875, 0.4925, 0.5075, 0.5125, 0.7275)L$ とする(図3参照)。熱交換機空隙率は一定の値 $\varepsilon_{hx} = 0.7$ とする。

4. 研究成果

まず、スタックの挿入に起因する局所的な空隙率の低下と、定在波・進行波を問わない自励振動そのものの発生を決定付ける臨界温度比 n との関係性を明らかにした。

バッファチューブの長さ l (図3(b)における $x_5 - x_4$ を決定付ける代表長さ) が異なる2つの場合について得られた計算結果を上田らの実験結果および Rott の理論に基づく臨界曲線(無印の灰色実線)と共に図4に示す。ここで $\omega R_{st}^2/2\kappa$ は、いわゆる $\omega\tau$ に相当し、 $x/L = 0.5$ における値を用いた。これにより、これまで慣習的に用いられてきた水力半径に対する境界層の代表厚さの比であるいわゆる $\omega\tau$ だけでなく、スタックの空隙率、空隙率を決定付ける壁厚 $2d$ や壁板の枚数 m 等が、臨界曲線の特定に重要であることが分かった。また、先行実験との比較から、我々の準1次元モデルの適用範囲が非常に広く、上述の n が2付近まで有効であることが分かり、各臨界曲線における最低温度比付近まで境界層理論が有効であることが示された意義は非常に大きい。

これを受け、重要性が明らかとなった空隙

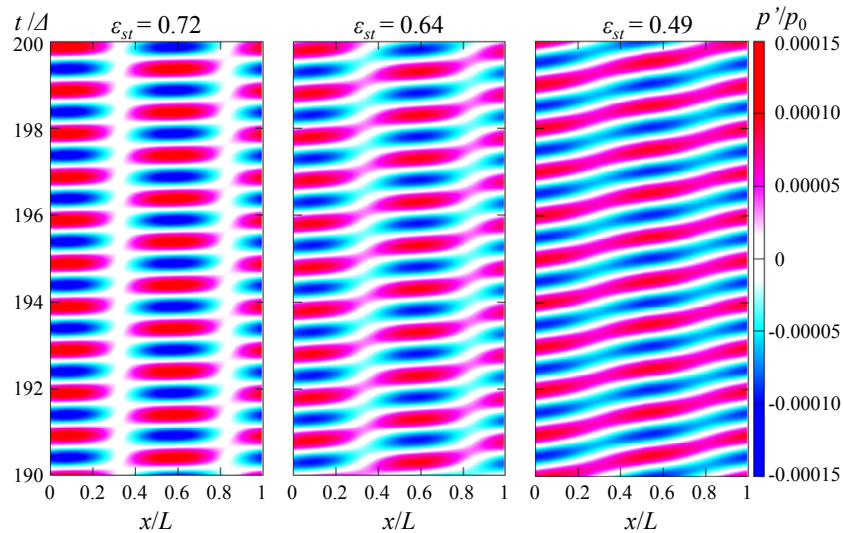


図5 空隙率と進行波の関係 ($2d = 1.0$ mm and $l = 0.15$ m)

率、壁厚やセル数($(m+1)^2$)と進行波の関係について詳細に調べた。数値シミュレーションを実施した結果、本モデルが有効ないわゆる右の分枝における進行波の発生には、壁厚が一定の場合は空隙率が小さい程、有利であることが図5より明らかになった。図5は、スタックの空隙率のみが異なる3つの場合について、同じ初期流速攪乱から過渡振動を経た後に定常振動に至った超過圧の時空間発展の様子を、室温での音速を基準とする周期における190~200周期にわたり示している。ここでは、超過圧の最大値を空間的に結んだ包絡線の最大値と最小値の比を簡易的な評価指標として採用した。同様に、空隙率が一定の場合は壁厚が薄い程、有利であることが分かった。しかしながら、空隙率0.5辺りを境として、より低い空隙率に対しては、これらの傾向が反転することも明らかになった。一方、セル数が一定の場合、進行波の発生に有利な条件は空隙率0.3~0.4となり、臨界温度比が低くなる空隙率0.4~0.6と必ずしも一致しないことが明らかになった。この様に、非線形性とは無関係に進行波の発生に有利な条件が明らかになった意義は大きい。非線形性と進行波の関係については、導入した実験的手法と合わせて、引き続き研究を進める。

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2件)

Dai SHIMIZU and Nobumasa SUGIMOTO, "Determination of Marginal Conditions for Thermoacoustic Oscillations in a Looped Tube by Evolution of an Initial Disturbance Based on

the Boundary-Layer Theory," Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 83, No. 3, 034403 1-9 (2014) 査読あり
DOI: 10.7566/JPSJ.83.034403

Dai SHIMIZU and Nobumasa SUGIMOTO, "Numerical simulations of a transient behavior in the onset of thermoacoustic marginal oscillations in a looped tube," Acoustical Society of America Proceedings of Meetings on Acoustics, POMA Vol. 19, No. 1, 045085 1-5 (2013)
DOI: 10.1121/1.4799368

[学会発表](計5件)

清水 大, "熱音響自励振動の発生メカニズムの解明~タコニス振動から熱音響ソリトンまで~"平成26年度第3回応用熱音響研究会, 2015/3/21, 東海大学(東京)

清水 大, "熱音響現象と新しい熱機関への応用", 機械学会北陸信越支部特別講演会, 2014/12/12, 福井工業大学(福井)

Dai SHIMIZU, Yuuki HATTORI and Nobumasa SUGIMOTO, "Experiments of nonlinear thermoacoustic oscillations in a straight tube and effects of Helmholtz resonators on suppression of higher harmonics," The Second International Workshop on Thermoacoustics, O-12 27, 2014/5/25, Tohoku University (Sendai).

6. 研究組織

(1)研究代表者

清水 大 (SHIMIZU DAI)

福井工業大学・工学部機械工学科・准教授
研究者番号: 40448048