

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360084

研究課題名(和文) 細管内気体の温度勾配による不安定化と圧力波の発生 熱音響現象の解明と応用に向けて

研究課題名(英文) Instability of a gas in a narrow tube subject to temperature gradient and spontaneous excitation of thermoacoustic oscillations

研究代表者

杉本 信正 (SUGIMOTO, Nobumasa)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：20116049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、熱音響現象を解明するための理論体系を流体力学を基に構築し、成果を熱音響式熱機関に応用しその実用化を促進させることである。気体が不安定化する臨界条件を導出するために、一般的に適用できる熱音響波動方程式と、これから導かれる境界層理論と細管理論を用いて、境界層理論および細管理論の有用性を示した。また、固体壁の熱伝導性の影響を考慮した熱音響波動方程式も導出した。まず境界層理論を用いて、対称モードのタコニス振動やループ管路内の不安定化の臨界条件を導出し、理論の有効性を示した。一方、細管近似理論をスタック内に用いて、ループ管路の不安定化の臨界条件の導出に用い、両理論の適用範囲を明確にした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to establish a theoretical framework based on the fluid dynamics, aiming at clarification of thermoacoustic phenomena and promotion of their application to practical heat engines. Marginal conditions of instability for a gas subject to temperature gradient have been examined analytically by using the boundary (thin diffusion)-layer theory and the thick diffusion-layer theory derived by the general thermoacoustic-wave equation. Also examined in parallel to this study is effects of heat conductivity in a solid on the thermoacoustic-wave equation. Using the boundary-layer theory, marginal conditions of a symmetric mode of Taconis oscillations and of oscillations in a looped tube have been obtained. The thick diffusion-layer theory is also applied to marginal conditions of the gas in the stack in the looped tube. It has been shown that both theories are very useful not only in derivation of the marginal conditions but also in understanding the phenomena.

研究分野：流体力学

キーワード：熱流体力学 熱音響 不安定性 非線形振動・波動 熱機関

## 1. 研究開始当初の背景

流体の粘性や熱伝導性は一般に拡散の作用をするので、流れがなければ攪乱を減衰させ安定化させるのが普通である。ところが、温度勾配のある壁面に接した静止気体では、拡散が攪乱を逆に不安定化させる場合がある。典型的な例は、一端が開いた管の開口端を極低温まで冷却し閉端を室温に保つと、管内に静止していたヘリウムガスが不安定化し振動を始める現象である。これは60年前にタコニスによって発見され、タコニス振動として知られている。現象の本質は、ヘリウムガスや極低温にあるのではなく、温度勾配下での拡散作用にあることが明らかになってきた。こうした現象は熱音響現象として知られているが、実際には熱と振動と流れが複雑に關与する熱流体の非線形現象である。

振動の発生は、壁面に熱として蓄えられていたエネルギーが気体の運動エネルギーやポテンシャルエネルギーに変換された結果と見ると、これはまさにプライムムーバ(原動機)の作用である。一方、閉じた管内の気柱をピストン等で強制振動させると、熱が管の中央部から両端に向かって運ばれ、中央部の温度が下がり両端では上昇する。これはヒートポンプであり、プライムムーバとは逆の作用である。この現象を熱力学的に見た場合、効率がカルノー効率に近いことや、装置の構造が簡単で、太陽熱、地熱、廃熱のような低温熱源が利用できることもあって、熱音響の新しい原理に基づく熱機関が提案されている。しかし、出力や効率は現在まだ低く、この原因は現象の理解や定量的な把握が十分なされていないことにある。そこで現象を熱流体力学の原理に基づき理解すると共に定量化が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、流体力学の立場から温度勾配のある壁面に囲まれた気体に対して、粘性や熱伝導性による拡散が引き起こす不安定現象の理論を構築し、実験でその正当性を検証することである。特に、非定常現象の定式化は殆ど行われていない。

本申請者はこれまで、拡散層が薄い場合には境界層理論が非線形現象の記述も含め有用であることを明らかにしてきたが、最近、拡散層が厚

い場合の細管理論確立への突破口を開いた。研究をさらに推し進めることによって熱音響現象の理解を深め、定量化の方法が確立できると考えている。本研究では理論体系を完成させ、様々な条件下での不安定化の臨界条件を明らかにするとともに、非線形現象の定量化による解明と熱音響式熱機関への応用を目指す。

## 3. 研究の方法

研究目的を達成するために、当初4年度にわたる計画であったが、研究の進展のため1年度早く本研究課題を終了し、新たな計画を進めることにした。3年度にわたり次の3つの研究課題を実施した。(1)境界層理論を完成させるとともに、(2)温度勾配下での拡散層の振る舞いを一般的に記述する熱音響波動方程式を基に細管理論を展開し、(3)実験によって両理論の正当性と適用範囲の確認を行なった。

熱音響現象自体は理想気体で説明でき、流体力学のナビエ・ストークス方程式とエネルギー式、連続の式で記述できる。研究方法には、方程式をそのまま数値計算するのではなく、現象の本質を捉えた数理モデルの構築を行い、モデルの解析と数値シミュレーションによる手法をとる。実験では、ループ管路と空洞を取り付けた共鳴管を用いて、臨界条件および不安定化した圧力波の非線形挙動を理論と比較する。

## 4. 研究成果

課題(1)については、(a)両端が閉じた直管における対称モードの不安定化の条件の導出と圧力波発生解析、(b)空洞を取り付けた共鳴管での不安定化と圧力波発生解析、(c)スタックを使わないループ管路における不安定化の臨界条件の導出の3つの課題を計画し、(a)、(c)に関しては予定通りの成果が得られ、日本流体力学学会年会、日本機械学会関西支部総会講演会にて成果を発表した。(b)については、時間的な余裕がなく進展はなかった。

課題(2)については、(a)拡散・波動方程式の解析とスタックに対する等価境界条件の導出、(b)等価境界条件を用いた臨界条件の導出、(c)管路の壁面温度の影響の評価の3つの課題を計画し、概ね目標は達成できた。特に(c)に関しては予想以上の進展があり、成果はアメリカ音響学会および第61回理論応用力学講演会で発表し、さらにはJ. Fluid Mech.に掲載した。

課題(3)については、(a) ループ管路の設計と製作、(b) 共鳴管の製作の2つの課題を計画し、(a)に関しては実験装置のうち、特にスタックとそれに温度勾配を与える熱交換器の設計と製作を行った。(b)の課題については、時間的な余裕がなく理論と同様今後の研究に回すことになった。

以上より、課題(2)の(c)に関しては予定以上の進展と成果が得られた反面、時間的な制約により(1.b)、(3.b)の研究は進展が無かったが、概ね期待以上の成果は得られた。この成果を受けて、熱音響現象の非線形挙動の解明と実験による検証が現在行われている。

研究成果は論文や国内の学会発表のみならず、国際会議等を通して海外の研究者とも交流を深めることによって広めた。実際、日本機械学会と韓国機械学会共催の第8回「熱流体工学会議」(2011年3月、韓国で開催)の全体会議において熱音響現象に関する基調講演を行った。また、第4回「噴流、後流、剥離流に関する国際会議」(2013年9月、名古屋大学で開催)でも同様の招待講演を行った。さらに2013年4月には、熱音響の研究が現在盛んに行われているフランス共和国・Ecole Centrale de Lyon および Le Mans の L'Université du Maine に招待され、流体力学の観点からの熱音響現象とその定量化に関する講演を行い研究成果の一部を紹介した。

#### 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14件)

1. Hyodo, H. & Sugimoto, N.: “Stability analysis for the onset of thermoacoustic oscillations in a gas-filled looped tube,” *J. Fluid Mech.*, 741, 585-618 (2014). 査読有り
2. Shimizu, D. & Sugimoto, N.: “Determination of marginal conditions for thermoacoustic oscillations in a looped tube by evolution of an initial disturbance based on the boundary-layer theory,” *J. Phys. Soc. Jpn.*, 83, 034403-1-9 (2014). 査読有り
3. 杉本 信正, “熱流の不安定性と熱音響現象,” 京都大学数理解析研究所講究録「非線形波動現象の数理と応用」#1890, 37-38 (2014). 査読無し
4. Hyodo, H. & Sugimoto, N., “Marginal conditions of thermoacoustic oscillations in a looped tube based on thick and thin diffusion-layer theories,” *Proceedings of the 21st International Congress on Acoustics,*

(POMA-ICA2013, 19, 045086 (2013); *J. Acoust. Soc. Am.*, 133(5), Pt.2, 3557 (2013). 査読有り

5. Shimizu, D. & Sugimoto, N., “Numerical simulation of a transient behavior in the onset of thermoacoustic oscillations in a looped tube,” *Proceedings of the 21st International Congress on Acoustics, (POMA-ICA2013, 19, 045085 (2013); J. Acoust. Soc. Am.*, 133(5), Pt.2, 3556 (2013). 査読有り
6. 兵頭 弘晃, 杉本 信正, “境界層および厚い拡散層近似を用いたループ管内の熱音響振動の安定性解析,” 京都大学数理解析研究所講究録「非線形波動の数理, モデリングおよび応用」#1847, 1-9 (2013). 査読無し
7. Sugimoto, N. & Hyodo, H., “Diffusive effects on acoustic wave propagation in a gas-filled channel subject to temperature gradient,” *Proceedings of XXIII International Congress on Theoretical and Applied Mechanics (eds. Y. Bai & J. Wang), FM16-21 (2012).* 査読有り
8. Shimizu, D., Nishikawa, K. & Sugimoto, N., “Numerical simulations of thermoacoustic oscillations in a looped tube,” in *NON-LINEAR ACOUSTICS State-of-the-Art and Perspectives (Proc. 19th Intl. Symp. Nonlinear Acoustics, eds. T. Kamakura & N. Sugimoto), AIP Conference Proceedings #1474, pp.299-302 (2012).* 査読有り
9. Sugimoto, N. & Hyodo, H., “Effects of heat conduction in a wall on thermoacoustic-wave propagation,” *J. Fluid Mech.*, 697, 60-91 (2012). 査読有り
10. 兵頭 弘晃, 杉本 信正, “温度勾配のある平行壁面間の音の伝播を表す波動方程式とそれに及ぼす壁の熱伝導性の効果,” 京都大学数理解析研究所講究録「非線形波動現象の研究の新たな進展」#1800, 236-248 (2012). 査読無し
11. 杉本信正, “非線形音響と非線形音響の世界,” *超音波テクノ*, 24, 1-6 (2012). 査読無し
12. 杉本信正, “温度勾配のある平行壁面間の音波の伝播とそれに及ぼす壁の熱伝導性の効果,” *超音波テクノ*, 24, 51-55 (2012). 査読無し
13. Sugimoto, N. & Hyodo, H., “Effects of heat conduction in wall on thermoacoustic wave propagation in a gas-filled channel subject to

temperature gradient,” Proceedings of the 162nd meeting of Acoustical Society of America, J. Acoust. Soc. Am., 130(4), Pt.2, 2371 (2011). 査読無し

14. 杉本信正, “熱音響現象とこれを利用した新しい熱機関,” 生産と技術, 63, 51-57 (2011). 査読無し

〔学会発表〕(計 24 件)

1. 兵頭弘晃, 杉本信正, 「ループ管における熱音響振動の臨界条件の検討 拡散層厚さに応じた近似理論による結果と Rott の理論による結果との比較」, 日本機械学会関西支部第 89 期定時総会講演会, 2014 年 3 月 19 日, 大阪府立大学.
2. 宮本 拓, 杉本信正, 「ループ管内の音の伝播におよぼす温度勾配と断面形状の影響」, 日本機械学会関西支部第 89 期定時総会講演会, 2014 年 3 月 19 日, 大阪府立大学.
3. 杉本信正, 「熱流の不安定性と熱音響現象」, 京都大学数理解析研究所共同研究集会「非線形波動現象の数理と応用」, 2013 年 10 月 16 日, 京都大学.
4. 兵頭弘晃, 杉本信正, 「拡散層厚さに応じた近似理論によるループ管内の熱音響振動の解析」, 京都大学数理解析研究所共同研究集会「非線形波動現象の数理と応用」, 2013 年 10 月 16 日, 京都大学.
5. Sugimoto, N., “Thermoacoustic instability and its related fluid dynamical problems,” Proceedings of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-IL12, 2013 年 9 月 21 日, 名古屋大学. 招待講演
6. 清水 大, 杉本信正, 「直管における非線形熱音響振動の実験」, 日本流体力学会, 2013 年 9 月 12 日, 東京農工大学.
7. Hyodo, H. & Sugimoto, N., “Marginal conditions of thermoacoustic oscillations in a looped tube based on thick and thin diffusion-layer theories,” The 21st International Congress on Acoustics, 2013 年 6 月 6 日, モントリオール国際会議場, カナダ.
8. Shimizu, D. & Sugimoto, N., “Numerical simulation of a transient behavior in the onset of thermoacoustic marginal oscillations in a looped tube,” The 21st International Congress on Acoustics, 2013 年 6 月 6 日, モントリオール国際会議場, カナダ.

9. Sugimoto, N., “Thermoacoustics from fluid dynamical viewpoint,” Laboratoire d’Acoustique de l’Université du Maine, 2013 年 4 月 19 日, ルマン, フランス. 招待講演
10. Sugimoto, N., “Thermoacoustics from fluid dynamical viewpoint,” Laboratoire de Mécanique des Fluides et d’Acoustique, Ecole Centrale de Lyon, 2013 年 4 月 18 日, リヨン, フランス. 招待講演
11. 清水 大, 杉本信正, 「ループ管における熱音響臨界振動に至る過渡的な管内気柱の振る舞いの数値計算」, 第 62 回理論応用力学講演会, 2013 年 3 月 7 日, 東京工業大学.
12. 兵頭弘晃, 杉本信正, 「境界層および厚い拡散層近似を用いたループ管内の熱音響振動の安定性解析」京都大学数理解析研究所共同研究集会「非線形波動現象の数理, モデリングおよび応用」, 2012 年 10 月 17 日, 京都大学.
13. 兵頭弘晃, 杉本信正, 「ループ管内のスタック内気体に対して厚い拡散層近似を用いた場合の熱音響不安定の臨界」, 日本流体力学会年会 2012, 2012 年 9 月 17 日, 高知大学.
14. 清水 大, 杉本信正, 「ループ管における進行波型熱音響振動のシミュレーション」, 日本流体力学会年会 2012, 2012 年 9 月 17 日, 高知大学.
15. Sugimoto, N. & Hyodo, H., “Diffusive effects on acoustic wave propagation in a gas-filled channel subject to temperature gradient,” The 23rd International Congress on Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2012), 2012 年 8 月 22 日, 北京国際会議場, 中華人民共和国.
16. Shimizu, D., Nishikawa, K. & Sugimoto, N., “Numerical simulations of thermoacoustic oscillations in a looped tube,” The 19th International Symposium on Nonlinear Acoustics, 2012 年 5 月 23 日, 早稲田大学, 東京.
17. Sugimoto, N., “Thermoacoustics as instability of gas due to diffusion under temperature gradient,” The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012 年 3 月 22 日, Songdo Convensia, 仁川市, 大韓民国. 招待講演
18. 渡邊悠介, 杉本信正, 「温度勾配のあるループ管内の気柱の固有振動解析」, 日本

機械学会関西支部第 87 期定時総会講演会，  
2012 年 3 月 17 日，関西大学。

19. 佐々木亮，杉本信正，「両端が閉じた管におけるタコニス振動の対称モードの数値シミュレーション」日本機械学会関西支部第 87 期定時総会講演会，2012 年 3 月 17 日，関西大学。
20. 兵頭弘晃，杉本信正，「厚い拡散層近似を用いたループ管路における熱音響振動の臨界条件」第 61 回理論応用力学講演会，2012 年 3 月 9 日，東京大学生産技術研究所。
21. 清水 大，杉本信正，「境界層理論を用いたループ管路における熱音響自励振動に対する臨界条件の数値的導出」第 61 回理論応用力学講演会，2012 年 3 月 9 日，東京大学生産技術研究所。
22. Sugimoto, N. & Hyodo, H., “Effects of heat conduction in wall on thermoacoustic wave propagation in a gas-filled channel subject to temperature gradient,” The 162nd meeting of the Acoustical Society of America, 2011 年 11 月 1 日，サンディエゴ，アメリカ合衆国。
23. 兵頭弘晃，杉本信正，「温度勾配のある平板間の音の伝播を記述する熱音響波動方程式とそれに及ぼす壁の熱伝導性の効果」，京都大学数理解析研究所「非線形波動現象の研究の新たな進展」，2011 年 10 月 14 日，京都大学。
24. 佐々木亮，杉本信正，「両端が閉じた管におけるタコニス振動の対称モードの臨界条件」，日本流体力学会年会 2011，2011 年 9 月 7 日，首都大学東京。

〔図書〕(計 1 件)

1. Kamakura, Tomoo & Sugimoto, Nobumasa (eds), “NONLINEAR ACOUSTICS State-of-the-Art and Perspectives, AIP Conference Proceedings #1474 on the 19th International Symposium on Nonlinear Acoustics, American Institute of Physics 1-410 (2012).

〔その他〕 ホームページ

<http://www.thermofluids.phys.kansai-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

杉本 信正 (SUGIMOTO, Nobumasa)  
関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：20116049

### (2) 研究分担者

清水 大 (SHIMIZU, Dai)

福井工業大学・工学部・准教授

研究者番号：40448048

### (3) 連携研究者 なし

( )

研究者番号：