

令和元年6月19日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26289036

研究課題名(和文) 熱流の不安定性により生じる熱音響現象とその非線形挙動の解明

研究課題名(英文) Thermoacoustic phenomena and their nonlinear behaviors due to instability of heat flow

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) 10,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、気体中を流れる熱流の不安定性が引き起こす熱音響現象の非線形挙動を解明し、実験でその結果を検証することを目的としている。理論面では温度勾配をうける流路内の波動伝播に対して、非線形領域で適用できる近似理論体系を構築した。これにより衝撃波や音響流を含む自励振動を定量化できることが期待される。実験では両端が閉じられた直管やループ管路内にスタックを配置することにより熱流を発生させ、その不安定化から自励振動の発生を確認した。不安定化の始まりを近似理論を用いてもシミュレーションすることが可能になった。また、エネルギーハーベスティングを目指して自励振動を利用した振動発電を実際に試みた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱音響現象は熱的な要因で発生する音の発生を意味するが、本研究では熱流の不安定化による気体の強い振動が自然に生じる現象を取り扱う。この現象を定量化することは難しく、振幅が微小な場合の解析だけがこれまで行われてきたが、不安定化後の振幅が大きくなった場合に適用できる理論はこれまでなかった。本研究では、粘性や熱伝導性による拡散の影響と圧力振幅の大きさに応じた理論体系を構築した。これにより、不安定化から自励振動の発生の定量化が可能になる。また、直管やループ管路を用いて自励振動を実験でも発生させ、理論の根拠や結果について調べた。こうした研究は将来の環境・エネルギー問題の解決への試みとなる。

研究成果の概要(英文)：This project aims at establishing theoretical framework to deal with nonlinear behaviors in thermoacoustic phenomena resulting from instability of heat flow, and also at making experiments to verify the theoretical findings. The framework of theoretical treatments of weakly nonlinear wave propagation in a flow passage subjected to a temperature gradient has been established. The theories are expected to be applicable to quantitative clarification of emergence of self-excited oscillations including shock waves and acoustic streamings. In parallel, experiments are performed by using a closed, straight tube and a looped tube, in which a heat flow is produced by imposing a temperature gradient on a stack. The experimental results are checked against the theories. In addition, electricity generation from self-excited oscillations is also attempted in view of one means of energy harvesting.

研究分野：熱流体力学

キーワード：熱流体力学 熱音響 不安定性 非線形波動・振動 熱機関 エネルギーハーベスティング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 管路内の静止した気体にいわゆるスタックを用いて温度勾配を課し熱流を与えると、ある臨界条件を満たすと気体が自然に振動を始める熱音響現象が発生することが実験的に知られていた。
- (2) 発生する振動の振幅が大きいため、振動を利用したプライムムーバ(原動機)やヒートポンプ(冷凍機)等の熱機関への応用が考案され、その熱効率の高さから多くの関心が集まっていた。
- (3) しかし、発振のメカニズムについては振動する気体粒子の熱サイクルの立場からの定性的な説明しかなく、発振の臨界条件は70年前に低温物理分野のタコニス振動の解析に用いられたロットの理論が適用されてきた。この理論は臨界条件を実際に与える。
- (4) これに対し、本申請者は微小振幅でしかも調和振動を仮定するロットの理論を包括する熱音響波動方程式を2010年に発表し、調和振動に限らず任意の攪乱に対して初期値問題が構成でき、それからの時間発展を記述できることを示していた。

2. 研究の目的

- (1) 振幅が比較的大きくなった非線形振動の場合にも適用できる理論体系を熱流体力学に基づいて構築する。
- (2) 実験も平行して行い、理論で用いられる結果の検証を行う。
- (3) 発生する自励振動からエネルギーを取り出し利用する方法について検討を行う。

3. 研究の方法

- (1a) 熱音響波動方程式では攪乱の時間的な変動については任意であり、また粘性や熱伝導性による拡散層の厚さも流路径の大小によらず任意であるという一般性がある。しかし、攪乱の大きさは微小である線形理論であるので、攪乱が成長し有限の大きさになれば適用できないという制限がある。
- (1b) この制限を取り除くためには、上述の任意な状況がある程度制約せざるを得ない。そこで、拡散層の厚さと流路径の大小を仮定することにより、薄い拡散層の場合と厚い拡散層の二つの極端な場合を考えることにした。
- (1c) 圧縮性を考慮した熱粘性流体を仮定し、拡散層の厚さの程度を表すパラメータと攪乱の大きさを表すパラメータ、さらに攪乱の伝播速度の速さを表すパラメータの三つのパラメータによる漸近展開を行った。
- (1d) この結果、拡散層が薄いときには一次元の平面波の波動方程式に境界層による履歴の影響を取り入れた方程式を導出し、一方拡散層が厚い場合には拡散・波動方程式を導出した。これらの方程式は小さい攪乱から成長した後の非線形領域で適用できる。
- (1e) 拡散層の厚さが極端に薄いまたは厚いと仮定するとその中間領域でどのようなようになるか疑問がおきるが、拡散層の全ての範囲での振る舞いは、薄い場合と厚い場合の両極端の理論によって実質的にカバーできることが分かった。このため、どちらかの理論を適用すればよいことになる。
- (2a) 実験では、長さ約3.63m、直径80mmの直管と全長が13.4m、直径80mmのループ管路を用い、内部に大気を封入しスタックを挿入し温度勾配を与えることによってそれぞれの管路で熱音響自励振動の発生を確認した。
- (2b) 発生する自励振動は振幅の大きな明らかに非線形振動であり、ループ管路では衝撃波の発生も確認した。直管では圧力ピーク間値の最大は大気圧の約10%、ループ管路では15%にも達した。このレベルの圧力変動は理論で想定している状況である。
- (2c) 不安定化が始まり、自励振動が最終的に発生する過程を管内の圧力や温度を測定することにより明らかにした。
- (3a) 外部の共振系を利用して自励振動からエネルギーを取り出す方法を検討する。
- (3b) 振動発電の可能性を検討した。

4. 研究成果

本研究の最大の成果は、大きな振幅で振動する自励振動に関する様々な非線形現象を定量化する理論体系を構築できたことである。ここ2,3年、数値シミュレーションによる研究も行われ始めたが、それでも理論が示唆することは貴重である。この意味で、導出した方程式を解析することにより、熱音響現象の本質が解明できることが期待される。実験面でも自励振動が直管、ループ管路ともに発生でき、理論結果と比較すべき現象の定量化が進んだことが成果である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計13件)

Sugimoto, N. & Minamigawa, K., Experiments on self-excited thermoacoustic oscillations in an air-filled looped tube with a pair of stacks, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol.87, 2018, 104401 1-12. 査読有り
[Doi.org/10.7566/JPSJ.87.104401](https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.104401)

杉本信正, 熱流の不安定による熱音響振動発生の臨界条件, 京都大学数理解析研究所講義録「非線形波動現象の数理とその応用」2018, 43-54. 査読無し

杉本信正, 温度勾配のある狭い流路内の音響流と熱音響流, 京都大学数理解析研究所講義録「非線形波動現象の数理とその応用」2017, 216-224. 査読無し

Shimizu, D. & Sugimoto, N., Autonomous generation of a thermoacoustic solitary wave in an air-filled tube, J. Appl. Phys., Vol.120, 2016, 144901 1-6. 査読有り
<https://doi.org/10.1063/1.4964331>

Sugimoto, N., Nonlinear theory for thermoacoustic waves in a narrow channel and pore subject to temperature, J. Fluid Mech., Vol.797, 2016, pp.765-801. 査読有り
 Doi:10.1017/jfm.2016.295

杉本信正, 温度勾配のある狭いチャンネル内の非線形音波の伝播, 京都大学数理解析研究所講義録「非線形波動現象の数理に関する最近の進展」2016, 33-44. 査読無し

Sugimoto, N., Nonlinear Diffusion-Wave Equation for a Gas in a Regenerator Subject to Temperature Gradient, Recent Developments in Nonlinear Acoustics, AIP Conference Proceedings Vol.1685, 2015, 060001-15. 査読有り
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4934426>

Shimizu, D. & Sugimoto, N., Experiments on the acoustic solitary wave generated thermoacoustically in a looped tube, Recent Developments in Nonlinear Acoustics, AIP Conference Proceedings Vol.1685, 2015, 060004-2. 査読有り
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4934429>

Hyodo, H. & Sugimoto, N., Stability analysis for the onset of thermoacoustic oscillations in a gas-filled looped tube, J. Fluid Mech., Vol.741, 2014, 585-518. 査読有り
 Doi:10.1017/jfm.2013.621

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., Vol.83, 2014, 034403 1-13. 査読有り
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.034403>

杉本信正, 熱流の不安定性と熱音響現象 第3回 非線形現象編, Vol.33, 2014, 375-393. 査読有り

杉本信正, 熱流の不安定性と熱音響現象 第2回 線形理論編, Vol.33, 2014, 307-322. 査読有り

杉本信正, 熱流の不安定性と熱音響現象 第1回 導入編 Vol.33, 2014, 181-194. 査読あり

[学会発表](計 29 件)

南川佳祐, 杉本信正, 熱音響自励振動を利用した振動発電, 日本機械学会(関西大学、大阪), 2018.

清水 大, 杉本信正, 拡散層厚さに対する漸近理論による熱音響振動発生の数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2018 (大阪大学、大阪), 2018.

南川佳祐, 杉本信正, ループ管路において発生する熱音響自励振動に及ぼすスタック細孔半径の影響, 日本流体力学会年会 2017(東京理科大学, 東京), 2017.

清水 大, 杉本信正, 共鳴器列による定在波型熱音響自励振動の増幅, 日本流体力学会年会 2017(東京理科大学, 東京), 2017.

南川佳祐, 林祥大, 杉本信正, ループ管路における大振幅の熱音響自励振動の発生実験, 日本物理学会第 72 回年次大会(大阪大学, 大阪), 2017.

杉本信正, 温度勾配のある細管内の非線形音波の伝播, 日本流体力学会 2016 年会(名古屋工業大学、愛知), 2016.

清水 大, 杉本信正, 両端が閉じた直管における熱音響自励振動におよぼす管の室温部長さの影響, 日本流体力学会 2016 年会(名古屋工業大学、愛知), 2016.

杉本信正, 熱音響自励振動の発生とそのメカニズム, 電子情報通信学会超音波研究会(早稲田大学, 東京), 2016. 招待講演

Sugimoto, N., Asymptotic theories of nonlinear thermoacoustic waves in a gas-filled channel, 24th International Congress on Theoretical and Applied Mechanics (Palais des Congrès, Montreal, Canada) 2016.

Sugimoto, N., Theory for thermoacoustic waves in a narrow channel subject to temperature gradient, Fluid Mechanics Seminar (Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom), 2015. 招待講演

Sugimoto, N., On general expressions of temporal means of mass flux, shear stress and heat flux due to thermoacoustic waves, "The 3rd International Workshop on Thermoacoustics (University of Twente, Netherlands), 2015.

清水 大, 杉本信正, 熱音響ソリトンの発生実験, 日本流体力学会 2015 年会(東京工業大学, 東京), 2015.

Sugimoto, N., Nonlinear Diffusion-Wave Equation for a Gas in a Regenerator Subject to Temperature Gradient, "20th International Symposium on Nonlinear Acoustics (École Centrale de Lyon, France), 2015.

Sugimoto, N., Nonlinear diffusion-wave equation for a gas in a regenerator subject to temperature gradient, "20th International Symposium on Nonlinear Acoustics (École Centrale de Lyon, France), 2015.

兵頭弘晃, 杉本信正, 熱音響振動の臨界条件導出における漸近理論の有効性の検討, 日本流体力学会年会 2014 (東北大学、宮城), 2014.

Shimizu, D. & Sugimoto, N., Experiments of nonlinear thermoacoustic oscillations in a straight tube and effects of Helmholtz resonators on suppression of higher harmonics, The 2nd International Workshop on Thermoacoustics (Tohoku University, Miyagi), 2014.

Hyodo, H. & Sugimoto, N., Validity of the approximate thermoacoustic-wave equations in derivation of marginal conditions for the onset of gas oscillations in a looped tube, The 2nd International Workshop on Thermoacoustics (Tohoku University, Miyagi), 2014.

他 12 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 清水 大

ローマ字氏名: (SHIMIZU, Dai)

所属研究機関名: 福井工業大学

部局名: 工学部

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 40448048

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。