

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286073

研究課題名(和文) 結合熱音響振動子系の理解と応用

研究課題名(英文) Understanding of coupled thermoacoustic oscillators and their applications

研究代表者

琵琶 哲志 (Biwa, Tetsushi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：50314034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：熱音響自励振動は熱的な要因で発生する気柱の自励振動である。とくにその非線形性に由来する諸現象を理解、制御できれば、音波エンジンや燃焼振動抑制方法など応用技術の発展が多いに期待できる。本研究では、自作した熱音響自励振動子を用いて、チューブとバルブで結合することで相互作用を導入し、相互同期現象および振動死を実証した。また結合熱音響カオス振動子において初めてカオス同期の観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：Thermoacoustic oscillations mean thermally-induced acoustic oscillations of a gas column. Understanding their nonlinear behaviors should lead to the development of various applications like acoustic heat engines and suppression tools of combustion instability. In this study, mutual interactions between thermoacoustic oscillators were introduced by using a connecting tube and a valve to successfully observe synchronization and oscillation-death phenomena. Also, chaos-chaos synchronization was demonstrated for the first time in the coupled thermoacoustic oscillators.

研究分野：熱音響工学

キーワード：熱音響自励振動 相互同期 oscillation death カオス同期 時間遅れ制御

### 1. 研究開始当初の背景

気体が充填された気柱管に局部的に外部から熱を加えると、気体は不安定になり系の固有振動数の気柱振動が発生する。この熱音響自励振動は、基本的な熱流体现象であり気柱管と熱源を持つ多様な系、例えば燃焼器や液体ヘリウム配管において普遍的に観測される。

これまでの成果により、比較的単純な熱音響自励振動系については流体力学の安定問題として、基礎方程式に基づいて議論され基本的な理解が得られるようになってきた。高温部と低温部の温度比についても、自励振動発生に至る臨界温度は気体の物性値や管の幾何学的条件をもとに予測可能であるといっている。

この理解をもとに最近では応用展開も試みられている。熱音響自励振動で発生する音響パワーを出力とする熱機関「音波エンジン」の開発はその代表例である。機械的可動部品を持たない熱機関として期待されている。一方、燃焼器では、この熱音響自励振動は迷惑な現象であり、機器の安定稼働の面からは抑制対象である。抑制技術の開発も期待されている。

気柱の静止状態が不安定化した後に実現する振動状態を説明する Stuart-Landau 型の発展方程式が流体力学の基礎方程式から熱音響自励振動系に対して理論的に導出されているものの、すでに観測されている多様な非線形熱音響現象の理解は十分ではない。とくに同期現象や準周期振動・カオス振動などの非線形振動現象は実験的にも十分検討されていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、非線形熱音響現象の実験的理解を深めることである。その成果は以下の応用展開に直結すると考えた。

- ・外燃機関であることから音波エンジンのエネルギー密度は内燃機関に比べて低い傾向にあるが、構造の単純さから単体で大出力を実現するのではなく、複数を組み合わせることで出力増大を実現するのが現実的である。その場合、動作周波数は共通であることが望ましい。気柱管の長さを通じて動作周波数を調整することは可能だが、現実には微小な差異は不可避であり、調整の必要がある。ところが音波エンジンは調整部品を持たない。同期現象の理解は周波数のファインチューニングに役立つ可能性がある。

- ・自励振動系を結合して互いに相互作用させると、同期現象の以外に、互いに抑制し完全に停止する amplitude death という現象が起こり得る。この現象を利用すれば、燃焼振動等で起こる自励振動を簡便にしかも確実に停止する方法に発展させることができる。また得られた知見をもとに単一の振動子に対して自己フィードバックを導入することで amplitude death が実現できればより簡便な抑

制方法となる。

- ・音波エンジンの研究開発に伴い、臨界温度比は低下し、発生する音響振動はより強くなってきた。そのため、有限振幅に基づく非線形効果は決して無視できない。カオス振動や準周期振動に対する実験的な理解が必要である。

以上のことから、より具体的な研究テーマを次のように設定した。

- (1) 熱音響自励振動子間の相互作用による同期現象と amplitude death の観測

- (2) 自己フィードバックによる熱音響自励振動の抑制

- (3) 熱音響カオスの発生とカオス-カオス同期の観測

以下では(1)～(3)の研究テーマについてそれぞれ研究の方法及び研究成果を示す。

### 3. 研究の方法

- (1) 熱音響自励振動子間の相互作用による同期現象と amplitude death の観測

熱音響自励振動子の作成

長さ 720 mm、内径 24 mm の円管に一辺が 0.93 mm の正方形の穴を多数持つ長さ 20 mm の多孔質体を挿入して熱音響自励振動子を作成した。円管内には大気圧室温の空気が封入されている。多孔質体の両端には高温の熱交換器と低温の熱交換器があり、自励振動発生に必要な温度差を発生できる。低温熱交換器の温度を循環冷却水で室温( $T_C$ )に保ったまま、高温熱交換器に取り付けた電気ヒーターで加熱し、多孔質体の高温端温度  $T_H$  を増加させたところ、 $\Delta T = T_H - T_C$  が 230 K を越すと系の基本振動数(250 Hz)で熱音響自励振動が発生することが分かった  $\Delta T$  を増やすと音響振動は次第に強くなり、 $\Delta T = 350$  K では閉端で観測される圧力振幅が 1.4 kPa に達した。同様の熱音響振動子をもう一つ準備し、この温度差条件のもとで結合して互いに相互作用させることにした。なお、2 つ目の振動子の円管の長さを調整することで、二つの振動子間に相互作用を導入した。

結合方法

二つの振動子を結合する方法として、開度を調整可能なニードルバルブを用いた。この結合方法は散逸的結合の役割を果たす。また中空のチューブを介して結合することも試みた。この方法は時間遅れ結合の役割を果たす。なおバルブとチューブはそれぞれ振動子円筒間の一端の固体平板に穴をあけてそこに接続した。この位置は音響振動の圧力振幅が最も大きな位置である。

測定方法

振動子円筒管同士を接続するバルブやチューブを接続する側とは反対側の固体平板上で音圧が計測できるように圧力トランスデューサーを接続した。圧力トランスデューサー出力はオシロスコープでモニターしながら A/D コンバーターで記録した。

## (2) 自己フィードバックによる熱音響自励振動の抑制

### 気柱振動子の作成

先の研究でチューブによる結合が十分な結合強さの時間遅れ結合として働くことが分かった。この知見をもとに燃焼振動抑制方法につなげるために本実験を計画した。そのために、複雑な燃焼振動を簡単な機構で模擬した気柱振動子を作成した。本体は長さ 590 mm、直径が 260 mm から 280 mm まで変化する円筒管で内部には大気圧室温の空気が封入されている。管の一端にはラウドスピーカー、他端には圧力トランスデューサーを取り付けた。トランスデューサー出力に時間遅れとゲインを加えてラウドスピーカーにフィードバックすると、適当な遅れ時間と十分に大きなゲインのもとで自励振動が発生することを確認した。円筒の側面に中空のチューブの両端を接続して自己フィードバックを実現した。

### 安定性の定量的評価

自己フィードバックによる安定性向上の効果を定量化するために振動の  $Q$  値に注目した。 $Q$  値は振動系のダンピングの小ささを表す無次元量である。安定な静止状態に外力を加えた後の減衰振動の様子から  $Q$  値を求めた。安定状態では  $Q$  値は有限だが、中立安定な状態では  $Q$  値は無限大に発散する。系のパラメータを変化させたときの  $Q$  値の変化から、系が発振状態にどれだけ近いかを定量的に表すことを試みる。

## (3) 熱音響カオスの発生とカオス-カオス同期の観測

### 熱音響カオス振動子の作成

熱音響系でのカオス振動の観測例はこれまで、管の一端を液体ヘリウム温度にまで冷却したタコニス振動の系でしか報告されていない。この系では基本モードと高次モードのモード間競合を通じてカオス振動状態に達する。室温以上の温度条件の実験では、波形が歪みやがて衝撃波に達する例が報告されているだけであった。この例では、高次モードも発生しているが、基本モードと高次同期を起こすために、周期振動しか起こらない。そこで本実験では、気柱管の断面積を一部だけ狭くするという工夫を施すことで、モード間の周波数調整を行い、カオス振動の発生を試みた。

### 熱音響カオス振動子の結合

二つのカオス振動子を相互作用させると、カオス振動を保ったまま同期することがある。振動が単にノイズならば起こり得ないこの現象はカオス-カオス同期として知られていて、電気回路やレーザーなど支配方程式が比較的単純な実験系では報告例があったが、流体系では依然として少ない。そこで、本実験で作成した熱音響カオス振動子を二つ準備し、細孔を介して結合することでカオス-カオス同期の可能性を検証した。

## 4. 研究成果

### (1) 熱音響自励振動子間の相互作用による同期現象と amplitude death の観測

#### 散逸結合

二つの熱音響振動子をバルブで散逸結合した。バルブ開度で調整した結合強さと、一方の振動子の振動周波数を変化させて調整した周波数差をパラメータにして分岐図を作成したところ、周波数差が小さいときに同相同期が実現した。結合強さを大きくすると同期状態を実現する周波数差は広がるが、さらに周波数差を大きくすると、振動振幅が次第に小さくなり、ついには振動停止に至った。なお結合強さが比較的小さいときに周波数差を大きくすると準周期状態が実現し、振動停止には至らない。

#### 散逸結合と時間遅れ結合の同時利用

より広いパラメータ範囲で振動停止を実現するために、バルブ結合と同時にチューブによる時間遅れ結合を行った。その結果、周波数差がたとえゼロであってもある程度以上の結合強さがあれば振動停止に至ることが分かった。時間遅れ結合だけでも振動停止が実現することは電気回路の系でも報告されているが、本研究において簡単なシミュレーションを行ったところ、散逸結合と時間遅れ結合を併用することでより強力に振動停止できることを示した。結合振動子系において振動停止を実現するのに有効な方法と考えている。

### (2) 自己フィードバックによる熱音響自励振動の抑制

#### 自己フィードバックチューブの効果

作成した気柱振動子はフィードバックゲイン  $G$  を大きくすると  $Q$  値が増大し、ある臨界ゲイン以上で発振状態に至る。 $G$  と  $Q$  値の逆数 ( $1/Q$ ) を図示したところ  $G$  の増加により直線的に 0 に近づくことが分かった。自己フィードバックチューブを接続したところ、 $1/Q$  が上方にシフトし、その結果臨界ゲインが上昇することが分かった。さまざまな長さのチューブで  $Q$  値計測を行った結果、チューブ長さが想定される気柱振動周波数のときの波長の半分の整数倍のとき、強い抑制効果が得られることが分かった。

#### モデル化と実験結果の比較

得られた結果を簡単な数理モデルと比較した。Van der Pol 方程式の右辺に自己フィードバックを表す項を加えて、線形安定性解析を行った。この場合、遅れ時間によっては振動発生が促進する場合があるが、実験では自己フィードバックチューブにそのような効果はない。つまり安定化する方にしか作用しない特長があることが分かった。

以上の結果から、熱音響自励振動を抑制する簡便な手法としてチューブによる自己結合は有効な方法と考えられる。

### (3) 熱音響カオスの発生とカオス-カオス同期の観測

#### 熱音響カオス振動の発生

長さ 2.1 m, 内径 48 mm の円管と正方形の穴を多数持つ多孔質体で熱音響振動子を作成した。作動気体は大気圧室温の空気である。系の不調和性(dissonance)を増すために、長さ 100 mm, 厚み 2 mm の円環を挿入した。円環の位置が dissonance を調整する重要なパラメータであり、ごく狭い領域に設置したときのみ、モード間競合を通じてカオス振動に至ることが分かった。その他の領域では、系はやがて周期的衝撃波に移行するのみであった。

#### カオス-カオス同期の観測

熱音響カオス振動子を二つ作成し、互いの閉端部分で、一枚の平板を介して接続した。平板には細孔(orifice)があり、平板両端の圧力差で流体がこの細孔を行き来することで、二つの振動子間に相互作用が生まれる。比較的相互作用が強いとき、つまり細孔の断面積が大きいとき、二つの熱音響カオス振動子は互いにカオス振動を保ったまま、同期することが分かった。すなわち、それぞれの振動子の圧力信号  $P_1$  および  $P_2$  を測定すると、圧力差  $P_1 - P_2$  はほぼゼロとなる。この状態は完全同期状態と呼ばれる。相互作用を弱くすると、完全同期状態は崩れる。中間的な相互作用強さのとき、 $P_1 - P_2$  は間欠的な振る舞いを示した。つまり、ほぼゼロであるようなラミナー状態とシグナルが観測されるバースト状態がランダムに現れた。 $P_1 - P_2$  について統計的な性質を調べたところ、On-off intermittency に対して理論的に予測されている統計的性質が確認された。我々の知る限り、流体系で統計的性質まで含めて検証されたカオスカオス同期はこれまでにない。熱音響系は、特徴的振動数や非平衡パラメータである温度差がそれぞれ系の軸方向長さと同熱量を通じて性格に制御できるという利点を有する。またその振動周波数は 100 Hz のオーダーであるので、長周期に渡る現象の観測や高周波ダイナミクス成分の観測も比較的容易である。流体系において非線形振動現象を調べるのに好適な系だと考えている。

#### 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 4 件)

Rémi Delage, Yusuke Takayama, Tetsushi Biwa, On-off intermittency in coupled chaotic thermoacoustic oscillations, *Chaos*, 査読有, vol. 27, 043111 (2017).  
doi: 10.1063/1.4981910

Tetsushi Biwa, Yoshiki Sawada, Hiroaki Hyodo, Soichiro Kato, Suppression of spontaneous gas oscillations by acoustic self-feedback, *Physical Review Applied*, 査読有, vol. 6, 044020 (2016).  
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.6.044020

Tetsushi Biwa, Hiroki Nakamura, Hiroaki Hyodo, Experimental demonstration of a thermoacoustic diode, *Physical Review Applied*, 査読有, vol. 5, 064012 (2016).

DOI: 10.1103/PhysRevApplied.5.064012

Tetsushi Biwa, Satoshi Tozuka, Taichi Yazaki, Amplitude death in coupled thermoacoustic oscillator, *Physical Review Applied*, 査読有, vol. 3, 034006 (2015).

DOI: 10.1103/PhysRevApplied.3.034006

〔学会発表〕(計 3 件)

中村啓樹, 琵琶哲志, 兵頭弘晃, 小型熱音響ダイオードの開発, 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会, 2016 年 9 月 16 日, 富山大学 (富山).

澤田欣己, 琵琶哲志, 兵頭弘晃, チューブを用いた自己フィードバックによるレイケ管型熱音響自励振動の抑制, 日本流体力学会年会 2016, 2016 年 9 月 26 日, 名古屋工業大学 (名古屋).

Tetsushi Biwa, Experimental understanding of thermo-acoustic phenomena, 10<sup>th</sup> PAMIR International Conference Fundamental and Applied MHD, 2016 年 6 月 20 日, Cagliari (Italy).

〔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:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者

琵琶哲志 (BIWA, Tetsushi)  
東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 :

50314034

(2)研究分担者

( )

研究者番号 :

(3)連携研究者

( )

研究者番号 :

(4)研究協力者

( )