

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 11 日現在

機関番号：13902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400398

研究課題名(和文) 熱音響同期現象におけるエネルギー流束測定

研究課題名(英文) Measurements of energy flux density in thermoacoustic synchronization

研究代表者

矢崎 太一 (Yazaki, Taichi)

愛知教育大学・教育学部・教授

研究者番号：20144181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：我々は同期現象に対してある疑問を持っている。同期を維持しているエネルギー源が何処にあるかという素朴な疑問だ。同期現象のように複数の振動子が存在するときはエネルギー源は自明ではない。熱音響振動と呼ばれた気柱自励振動系でこの問題を実験的に明らかにする。

温度勾配によって励起された気柱自励振動に周期的外力を加え強制同期現象を実現した。音響強度を測定することにより同期振動を維持しているエネルギー源(音源)がどこにあるかを明らかにした。たとえ小振幅外力が自励振動を引き込んで、あるいは大振幅外力が自励振動を抑制しても音源は外力ではなく自励振動を維持している温度勾配にあることが実験的に明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We address a basic question in synchronization phenomena, “Where is the power source necessary to sustain synchronized oscillations?” Very little experimental research exists that has specifically focused on synchronization from the viewpoint of the power source or power flux density. To find the power source may be easy if a system has just one source, but is never trivial in the case of synchronization phenomena involving multiple power sources.

Self-sustained oscillations in a gas column induced by a temperature gradient are periodically perturbed by external forcing. The power source required to sustain synchronized oscillations is identified using sound intensity measurements. We demonstrate that, even if small forcing entrains the natural frequency or strong forcing completely suppresses the natural dynamics, the external forcing device is never the source of power; this source resides in the temperature gradient, which creates natural-frequency oscillations.

研究分野：音響物理学

キーワード：同期現象 振動抑制 熱音響振動 音響強度 共鳴管のQ値

1. 研究開始当初の背景

1998年に進行波熱音響自励振動が観測されて以来、進行波型熱音響エンジン・冷凍機・発電機などの応用研究が活発に行われている。これらのデバイスは以下のような多くの利点を有している；

- (1) 本質的に可逆的熱機関であるため効率はカルノー効率に近い
- (2) 可動部を持たないため維持・管理等の負担が少ない
- (3) フロンガスを使用せず排熱を利用できるため環境負荷の低いデバイスである
- (4) 装置が単純で、特殊な材料が使わず極めて安価で製作できる

このような理由で国内でも産業界を中心に実用化を目指した研究が活発に行われ、数年後には熱音響デバイスの商品化も期待されている。しかし、熱音響現象には物理学で解決しなければならない基本的問題を抱えていることも事実である。特に問題となるのは内燃機関などの燃焼器内で発生する大振幅熱音響自励振動である。上記に示したように自励音波を有効利用するためのデバイス開発の一方で、燃焼器内での自励音波の発生は内燃機関の安全な運転を遂行するためには抑制しなければならない緊急の課題でもある。このように熱音響現象には積極的に音響振動を利用する側面と、また抑制しなければならない2つの側面を有している。国内外で行われている研究は主として前者であり、振動抑制の基本的な研究は極めて少ないのが現状である。

研究の最終目標は気柱自励振動子の相互作用を利用して大振幅自励振動音を抑制することである。そのために我々は熱音響振動系における同期現象に注目している。複数の振動子間で発生する周期的同期現象は非線形現象の代表でもあり多くの分野に共通する普遍的現象の一つである。これまでに提案されている理論的研究は、主として位相空間（位相モデル）での理解であり、それらは気柱音響振動系・電気回路及び生物系など多くの分野で実験的検証がなされている。本研究で注目するのは熱音響振動系における強制同期現象（相互同期を含む）で、主たる目的はエネルギー流束測定を通じて同期振動を維持している power source（音源）を実験的に明らかにすることである。振動音を抑制するためにも音源を明らかにすることは重要な課題である。単一の振動子が存在するときの音源は自明だが、同期現象のように複数の振動子が存在するとき音源の所在は必ずしも自明ではない。我々の研究は同期現象のエネルギー的な観点からの新しい理解と、熱音響デバイスにおける振動音抑制の新たな手法の手掛かりとなる可能性がある。従来このような研究がなされなかったのはエネルギー流束測定が難しかったのが理由の一つである。熱音響現象を理解するためにエネルギー

流束（音響強度）測定の開発が始まり、そしてその技術が提案されたのは1998年である（Phys. Rev. Lett., 81, 3128, 1998）。音響強度測定の観点から従来の振動・波動現象を理解する試みは20世紀後半から21世紀にかけて大きな進展があった。気柱自励音波（Proc. Royal Soc. London A 454, 2113: 1998）や衝撃波音波（J. Acoust. Soc. Am., 136, 965, 2014）の「音源」が特定され従来の波動現象の理解が大きく進展しているのが現状である。

2. 研究の目的

熱音響気柱自励振動で観測可能な同期現象は振動子間の相互同期現象と、周期的な外力による強制同期現象である。本実験では周波数や振幅を自由に制御できる熱音響自励振動子の強制同期現象から始める。非線形動力学においては1980年代から van der Pol 方程式を用いた理論的研究（分岐現象）が精力的に行われている。しかし実験的な検証例は極めて少ないのが現状である。理論によると1:1同期現象には大別すると2つの基本的なメカニズムが存在する。一つは周期的外力の小振幅領域で実現される Saddle-node 分岐を通じた位相（周波数）引き込みであり、もう一つは大振幅領域で実現される Torus-death-birth 分岐による振動子の振幅抑制である。

本研究の最初のステップはこれらの1:1同期の分岐図を作成し理論的結果と比較することである。第2のステップは分岐図の同期領域（1:1位相引き込み領域および振幅抑制領域）で音響強度測定を行い、同期振動を維持するために必要な「音源」を実験的に明らかにすることである。圧力変動と流速変動の同時測定から決定する。第3のステップは音源の結果を踏まえて熱音響自励振動の抑制方法を提案する。

3. 研究の方法

実験装置を Fig. 1 に示す。内半径20mm、長さ1.06mのガラス管内に900セルのセラミックスタックを挿入する。スタックは高温熱交換器 (T_H) と環境温度である低温熱交換器 ($T_C = 293\text{ K}$) に挟まれ、 T_H を変化させることにより管内気柱を平衡状態から遠ざける。温度 $T_H = 481\text{ K}$ で気柱は周波数 $f_0 = 168.54\text{ Hz}$ で自発的に振動しだす。この周波数は半波長モード（基底モード）の定在波気柱音波に相

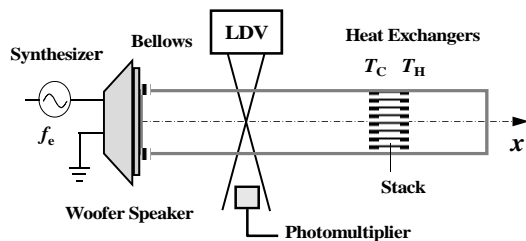


Fig. 1 Schematic drawing of experimental setup.

当する。スタック内の流体要素はある種の熱機関と同様の熱力学的サイクル（往復運動）を実行し、結果としてスタック両端から仕事流速密度（音響強度）を放射する。その一方でサイクルが本質的に不可逆過程であることからスタック内部でエントロピーを生成する。自励振動子を強制振動させるために管の左端には woofers speaker (Fostex FW108) が取り付けられた。

音源を特定するため、気柱共鳴管内でエネルギー流束密度 I

$$I = 0.5 p \cdot u \cos$$

が測定された。ここで p および u はそれぞれ圧力振幅および流速振幅を示し、また \cos は圧力と流速の間の位相差を示す。圧力は共鳴管の管壁に高温用接着剤で接合した内半径 1mm の短い銅管に小型圧力センサを取り付け測定された。作業気体の流速測定には LDV が用いられた。レーザ光の散乱粒子としては共鳴管内に封入されたタバコの煙を使用した。こうして圧力と流速を同時計測し、FFT アナライザを用いて p と u および \cos を決定した。音源を特定するために管の軸方向に沿って音響強度の空間分布（音場）が測定された。

4. 研究成果

熱音響自励振動系における強制同期現象で観測された分岐図、振幅抑制および「音源」についての主要な研究成果を示す。これらの結果の詳細は日本物理学会誌 (J. Phys. Soc. Jpn, 82, 103001, 2013) ですすでに出版されているの参考にしてほしい。

(1) 強制同期における分岐図

温度勾配によって励起された気柱自励音波を外部からスピーカーで周期的外力を加えたとき、この系が示す強制同期現象の分岐図を実験的に明らかにした。結果を Fig.2 に示す。Coupling-Strength に対応したスピー

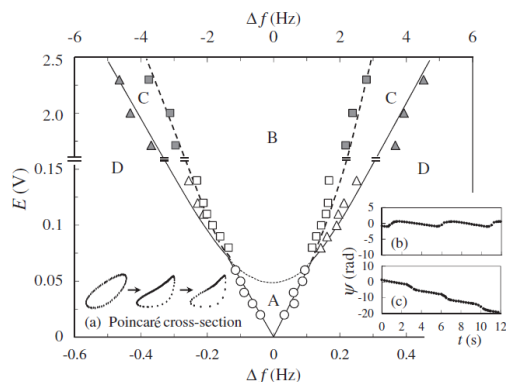


Fig. 2. Experimental bifurcation diagram for 1 : 1 forced synchronization in the forcing amplitude E vs frequency detuning ($\Delta f = f_c - f_0$) plane. Domain A is a phase-locked region via saddle-node bifurcation, which is shown by circles (experimental data) and solid lines drawn to guide the eye, whereas the squares and dashed curves between B and C show the Andronov-Hopf bifurcation. Transition from the phase-trapped state C to quasiperiodicity D is shown by the triangles and solid curves. The solid symbols follow the upper axis. (a) Observed sequence of Poincaré cross sections near the outer boundary of the left-hand branch of domain A for $E = 38$ mV. (b) Time dependence of the phase lead ψ of P_1 over V observed in domain C for $E = 140$ mV. (c) Phase observed in domain D near transition border for $E = 140$ mV.

カーに印可する電圧 E と Frequency-Detuning (外力の周波数 f_c と f_0 の差) との空間で、1 : 1 同期の分岐図がよく知られた Arnold-tongue 構造を示すことが分る。外力が小振幅領域では Saddle-Node 分岐を通して位相引き込みがおり、また大振幅領域では Torus-Death 分岐により振幅抑制が観測された。実験で得られた分岐図は周期的外力が加えられた van der Pol 方程式

$$\ddot{x} - (\lambda - x^2)\dot{x} + 2\pi f_0 x = F \cos 2\pi f_c t$$

から得られる理論的結果と同等で、実験系が同方程式と普遍的なクラスに属することを意味している。

(2) 振幅抑制

大振幅領域で得られた圧力のパワースペクトルを解析して外力であるスピーカーの圧力振幅 p_0 によって気柱自励振動子の振幅 p が抑制される様子を調べてみた。結果を Fig.3 に示す。ここで p_0 は外力がない場合の自励振動の振幅であり、 f は (f_c, f_0) を示す。上式に示した周期的外力がある場合の van der Pol 方程式に基づいて計算された理論曲線を示す。実験と理論曲線との一致は熱音響自励振動系が本質的には van der Pol 方程式と同じ普遍性を待つことを意味する。特に応用として注目されるのは p_0 のおよそ 0.7 倍程度の外力振幅で自励振動を抑制できることである。実験結果は「消音」が非線形同期現象における振幅抑制という新たな手法を用いて実現できる可能性を示している。

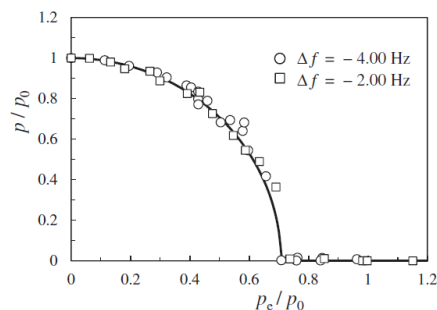


Fig. 3. Amplitude response of forced oscillations p to external forcing p_c for $\Delta f = -2.00$ and -4.00 Hz. The solid curve $p^2 + 2p_c^2 = p_0^2$ is based on the forced van der Pol equation.

(3) 同期振動を維持するための音源

周期的外力が自励振動を振幅抑制するのに必要な power を測定するために音響強度の空間分布を測定した (Fig.4)。(a) は温度勾配のない場合で外力は気柱振動を維持するために 130 W/m^2 を出力している。(b) は臨界点に近づくと外力とスタックがともに音源となることを示し、その出力は驚くことに僅か 5 W/m^2 程度である。

Saddle-node 分岐を通じた位相引き込みの場合と Torus-death-birth 分岐 (振幅抑制) の場合の音響強度分布をそれぞれ (c) と (d) に示す。周期的な外力が自励振動の位相を引き込み、また振幅を抑制したにもかかわらず

音源は外力(スピーカー)ではなく、抑制された自励振動の音源であるスタックの中にあることが分かる。スピーカーは振動数や振幅を決めているがエネルギー源としての役割はなく、むしろエネルギーの吸収源であることを意味している。臨界点を超えると外力はエネルギー源としての役割を果たさないことを $f_0 : f = 1:2$ の場合について実験し、(e)に示す通り同様の結果を得た。

結果的に自励振動が引き込まれても、あるいは外力によって抑制されたとしても、同期振動を維持するための音源は外力ではなく自励振動の音源である温度勾配にあることが実験的に明らかになった。

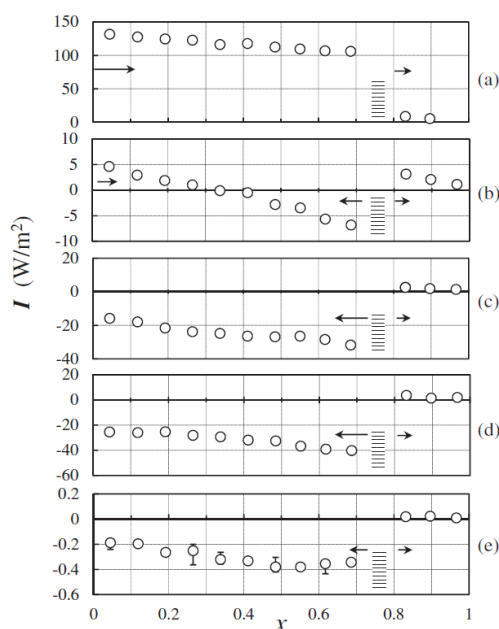


Fig. 4. Axial distribution of sound intensity. (a) No temperature gradient, $T_H = 293$ K. (b) Just before onset temperature, $T_H = 466$ K. (c) Phase-locked region (domain A) with $E = 52$ mV. (d) Amplitude-suppression region (domain B) with $E = 2.8$ V and $\Delta f = -4.00$ Hz. (e) External forcing mode ($p_0 = 88$ Pa at $f_0 = 84.11$ Hz) for 1:2 phase synchronization. The shaded region shows the location of the stack. The direction of I is to the right (indicated by right-pointing arrow) or left (indicated by left-pointing arrow) when I is positive or negative, respectively.

< 今後の展望・課題 >

熱音響現象を理解するための最も本質的な物理量は圧力や速度の振幅ではなく、音響強度の方向を決定する位相であることが分かる。音響強度や音響インピーダンスを直接測定するのは難しく、それらの測定技術が急速に発展したのは「音場のエネルギー(流束)的理解」が不可欠だった熱音響現象が切掛けだと認識している。1990年代に提案された Two-sensor method や LDV を用いた音響強度・音響インピーダンスの測定技術はまさに熱音響現象を理解するための必要不可欠な技術となった。

多様な音響現象の「エネルギー的理解」は新たな発見を可能にするかもしれない。特に複数の音源がある場合はその可能性が高い。具体例は本研究が示したように同期現象が挙げられる。150年ほど前に Rayleigh が彼の

テキスト “ The Theory of Sound ” の中で述べている Organ Pipes の同期現象である。最近 Abel らによって現象が再現され注目されている。気柱自励振動子が周期的外力によって引き込まれたり、あるいは抑制されたからといって(強制同期)振動を維持するための Energy Source (音源)が常に外力にあるとは限らない。また Organ Pipes のように2つ、あるいは多くの振動子がお互いに引き込みあった(相互同期)としても、振動を維持するための「音源」がどこにあるかは興味深い問題である。同期せずに異なった周波数で振動(準周期振動)していたとしても音源は自明ではない。音響強度を測定することによってはじめて思いがけない「音源」が見つかるのである。このように、複数の音源が存在している現象は「音場のエネルギー的理解」によってはじめて新しい発見が可能になると確信している。これからの音響学における大きなテーマである。

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6件)

(1) 温度勾配のある気柱共鳴管の Q 値と発振条件

平川雄規 矢崎太一

日本音響学会誌(2016年出版予定)

(2) Amplitude Death in Coupled Thermo-acoustic Oscillators.

T. Biwa, T. S. Tozuka and T. Yazaki

Physical Review Applied, **3**, 034006 (2015).

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.3.034006>

(3) Observation of thermoacoustic shock waves in a resonance tube.

Tetsushi Biwa, Kazuya Sobata, Shota Otake, and Taichi Yazaki

J. Acoust. Soc. Am., **136**(3), 965 (2014).

<http://dx.doi.org/10.1121/1.4892782>

(4) Measurements of acoustic particle velocity in a coaxial duct and its application to a traveling-wave thermo-acoustic engine.

Jun Morii, Tetsushi Biwa, and Taichi Yazaki

Review of Scientific Instruments, **85**(9), 094902(2014).

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4893639>

(5) Experimental determination of the evolution equation for thermally induced acoustic oscillations.

Tetsushi BIWA1, Fumitomo SHIMA1, and Taichi YAZAKI

J. Phys. Soc. Jpn, **82**, 043401(2013).

<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.04>

3401

- (6) Forced Synchronization of Periodic Oscillations in a Gas Column: Where is the Power Source?
Takamasa YOSHIDA, Taichi YAZAKI, Yuki UEDA, and Tetsushi BIWA
J. Phys. Soc. Jpn, 82,103001(2013).
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.103001>

〔学会発表〕(計 2 件)

- (1) 温度勾配のある共鳴管の Q 値と発振周波数
平井雄規, 矢崎太一
日本音響学会(2015年3月中央大学理工学部)
- (2) Suppression of self-excited oscillation in a coupled thermo-acoustic system.
T. Biwa, S. Tozuka, and T. Yazaki
10th European Fluid Mechanics Conference (2-7 Sept., 1-4, 2007, Technical University of Denmark)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢崎 太一 (YAZAKI, Taichi)
愛知教育大学・教育学部・教授
研究者番号 20144181

(3) 連携研究者

上田 祐樹 (UEDA, Yuki)
東京農工大学・工学研究科・准教授
研究者番号 : 00447509