

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360039

研究課題名(和文) 自然エンジンの非平衡ダイナミクスの理解と応用

研究課題名(英文) Understanding of nonlinear dynamics of natural engines and its application

研究代表者

琵琶 哲志 (Biwa, Tetsushi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50314034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,000,000円、(間接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：熱による気柱の不安定振動である熱音響自励振動の非線形ダイナミクスの理解を目的とした。熱音響カオス振動子を結合させたとき、カオスの振動を保ったまま同期に至ることが観測された。また同等な二つの熱音響自励振動子をバルブで結合した場合には振動子の振動数差が大きい場合に振動停止に至ることを明らかにした。振動数差がゼロの場合にはバルブに加えて半波長程度の長さのチューブでも結合する必要があった。さらに熱音響自励振動系の発展方程式の実験的導出に成功している。

研究成果の概要(英文)：Objective of this study was to experimentally understand the nonlinear dynamics of thermally induced unstable oscillations known as thermoacoustic oscillations. When two thermoacoustic chaos oscillators are connected each other, chaos synchronization was observed for the first time in fluid system. Also when two thermoacoustic oscillators are connected via a needle valve, the oscillation was observed to stop when the frequency detuning was large. When the frequency detuning was zero, it was necessary to add a connecting tube to annihilate the oscillation. The evolution equation was experimentally derived which was able to describe oscillatory dynamics near the bifurcation point.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：熱音響振動 音響 カオス同期 発展方程式

1. 研究開始当初の背景

(1) 自然エンジン-音の熱機関-

ある臨界温度差以上までに気柱を加熱すると、音響振動が自発的に開始する。この熱音響自励振動は、音波の形で動力を発生する「ある種の熱機関」と見なすことができる。この熱機関の最大の特徴は、何ら人為的な調整機構や可動部品を必要としない点にある。この現象を利用したエンジンは、加熱するだけで自発的にエネルギー変換が起こるので「自然エンジン」と呼ばれる。自然エンジンは、少数のパーツで構成され、フロンや特殊な材料をいっさい必要としない。申請者は独自に開発した音場計測技術を適用して、自然エンジンの基本的なエネルギー変換メカニズムを実験的に明らかにし、熱するだけで低温生成が可能な自然エンジンプロトタイプを開発・提案した。このエネルギー変換技術は、安全で安価という特徴を備えた排熱回収技術や太陽光エネルギー利用技術としてその可能性を十分に検討する必要があると考へた。

(2) これまでの自然エンジン研究

熱音響自励振動は、レーリーベナール対流やレーザーと同様、非平衡系で観測される散逸構造の一種である。しかしこれまでは線形物理の枠組みの中で議論されてきた。線形安定性解析による臨界点の予測や、「重ね合わせの原理」に基づくエネルギー変換機構の分類など、直感的で明快な解析のおかげで、1990年代後半以降になって、熱音響自励振動の理解は格段に進歩した。欧米で行われている実用化プロジェクトでも線形理論に基づく数値計算で装置設計を行っている。しかしながら、非平衡非線形物理の問題としては基礎的な理解すらも圧倒的に不足しているのが現状である。自然エンジンの応用展開を支える基礎、基盤として、自然エンジンの非平衡ダイナミクスに関する基本的理解を充実させる必要がある。

(3) 検討すべき課題

自励振動系を平衡状態から十分に遠ざけると、やがてカオス振動を呈する。二つのカオス振動子を結合したときに、カオス振動を保ちながら両者が同期するカオス同期現象は、カオス振動が単なるでたらめなノイズとは異なることを証拠づける基本的現象である。このカオス同期はレーザーや電気回路などの振動系では観測され、これを積極的に応用した秘匿通信が提案されている。しかし、カオス研究の発端となったにも関わらず、レーリーベナール対流に代表される流体系ではこれまで報告例がない。熱音響自励振動では、液体ヘリウム温度を用いた特殊な装置環境で熱音響カオス振動の報告例はあるが、これまでに熱音響カオス同期に関する実験的、理論的研究は報告されていない。

二つの自励振動系を結合するとき、相互作用が小さければ非同期状態にあるが、十分に相互作用が大きければ同期状態に至ることが知られている。加えて、相互作用によって振動が停止する「oscillation death」も起こることが知られている。音響系では、Rayleighによりパイプオルガン結合系で oscillation death 現象が指摘されたが、最近 Abel らにより否定された。自然エンジンの系においても同期現象が起こることは報告例があるが、oscillation death 現象はこれまでに報告例がない。音響パワー出力を利用する自然エンジンの応用では oscillation death は望ましくない現象だが、不安定振動を抑制する立場からは oscillation death は簡便で信頼性の高い抑制手法に発展する可能性がある。いずれの目的に置いてもどのような条件で oscillation death 現象が生じるかを明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、熱音響自励振動系に対して、(1) 熱音響カオス同期の観測を試みること、また(2) 結合熱音響自励振動系において oscillation death 現象の発生の可能性を検証すること、の2点を目的とした。また、熱音響自励振動系の分岐点近傍の振る舞いを記述可能な発展方程式を実験的に求めることも目的とした。

3. 研究の方法

(1) 熱音響カオス同期の観測

液体ヘリウム温度と室温という極端な温度条件のもとでは、系は、線形振動から準周期運動を経て熱音響カオスに至ることが観測されている。しかしこのような極低温の系では、実験が著しく困難である。そこで室温に保たれた系の一カ所を電気ヒーター加熱により昇温することで熱音響カオスが観測されるかどうかをはじめに調べることにした。

図1は本研究で試作した装置であり、典型的な熱音響自励振動系である。内径40mmの透明アクリル円筒製の気柱共鳴管の一端を金属平板で閉じ、他端をOリングでシールした可動式プラグで閉じている。その結果、全長 L を自由に調整できる構造となっている。固体平板側から135mmの位置にスタックを挿入し、その両端の高温熱交換器と低温熱交換器を用いてスタックの軸方向に温度差を与えた。なお低温熱交換器の温度 T_L は室温の循環冷却水によりなるべく室温近傍に保った。また高温熱交換器の温度 T_H は外周に巻き付けた電気ヒーターへの通電量(入力熱量)で調整した。共鳴管内部には作動気体として室温、大気圧の空気を充填した。気柱の自励振動の圧力波形は、固体平板にあけた穴に挿入した小型の圧カトランスデューサーと、FFTアナライザーでモニターした。

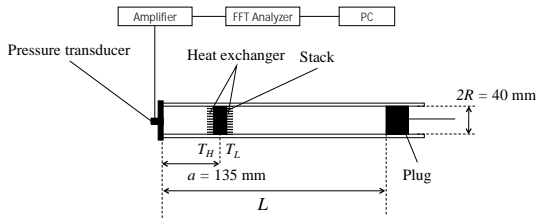


図1 実験装置

1.1 m \leq L \leq 2.1 m の範囲で予備的実験を行ったところ、全長を反波長とするような基本モードが発振することが分かった。とくに L = 2.1 m のときには、2 周期の準周期運動が観測された。そこでこの場合に加熱量を 300 W に増やしてより平衡状態から遠ざけてみた。結果的には図 2 に示す通り、熱音響カオスではなくて熱音響衝撃波が形成された。さらに加熱量を増やしてみたが、波形(a)に観測される不連続面の大きさが成長するのみでカオス振動に移行する様子はまるで観測されなかった。準周期運動を生み出す振動モード間の相互作用により同期現象が生じた結果だと解釈される。容易に同期させないためには気柱の振動モード周波数が整数比を持たないように工夫をすべきであることが分かった。このような気柱管は dissonant であると言われる。

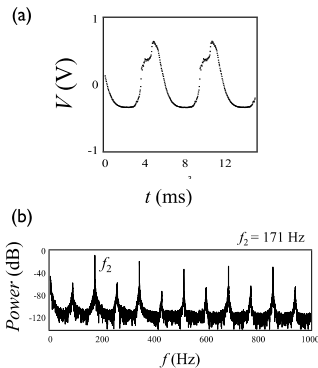


図2 熱音響自励振動衝撃波の波形(a)とそのパワースペクトル(b)

気柱管を dissonant にするために、図 3 に示すように、共鳴管内に長さ 10 cm、肉厚 2 mm の中空円筒管を挿入し、気柱管の断面積が一樣でなくなるようにした。加熱量を 250 W に保ったまま、中空円筒管の軸座標位置 b を 33 cm $<$ b $<$ 183 cm の間で 5 cm 刻みに調整して自励振動波形を調べた結果をまとめたのが図 4 である。ほとんどの b ではリミットサイクル、もしくは準周期が観測されたが、 $b = 153$ cm でカオス振動が発生することが分かった。この近傍でより詳細に調べたところ、152 cm $<$ b $<$ 156 cm のごく狭い範囲でカオス振動が観測されることが分かった。気柱の断面積を一部区間だけ変化させることで、液体ヘリウム温度で行われた過去の報告例と同様に、準周期振動を経てカオス状態に至ることが観測された。そこでこのような系を二つ作成し、カオス同期を検証することにした。

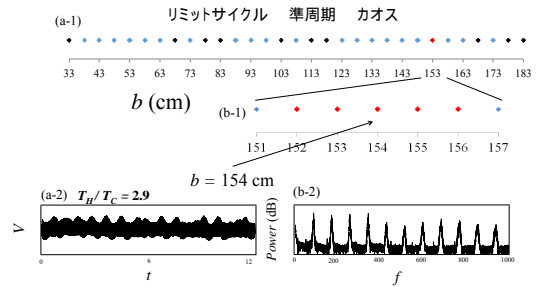


図3 分岐図(a-1, b-1)と振動波形(a-2)およびパワースペクトル(b-2)

(2) oscillation death 現象の観測

oscillation death 現象を観測する対象として、典型的な熱音響自励振動系を選択した。図 4(a)に示すような、直径 24 mm のステンレス円筒製の気柱共鳴管の内部にスタックと高温および低温の熱交換器を挿入した熱音響自励振動子を 2 つ準備した。一方の熱音響自励振動子の全長を 720 mm で固定し、他方は O リングでシールした可動式プラグで閉じてその全長を調整できるようにした。これにより 2 つの振動子の固有振動数の差 (デチューニング) Δf を実験パラメータとして変更できる。それぞれ独立の状態では適当な温度差のもとで自励振動を開始することを確認した上で、開度が微調整可能なニードルバルブを介して 2 つの振動子を結合した。共鳴管内に充填した気体は大気圧 ($p_m = 100$ kPa)、室温の空気である。

バルブを閉じた状態で、バルブ近傍に取り付けた小型圧力トランスデューサーで、自励振動音圧の振動数と振幅をモニターした。自励振動数は全長で決まる基本振動数であるが、振幅は加熱温度とともに増大した。そこで 2 つの振動子がともに音圧 1.4 kPa で振動するように加熱温度を調整し、バルブを明けたときもこの加熱温度を保つようにして実験を行った。

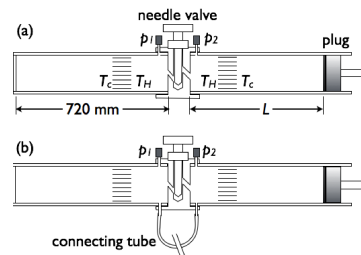


図4 実験装置。(a)はニードルバルブによる結合、(b)はニードルバルブとチューブによる結合。

回転角度 ϕ で与えられるバルブの開度とデチューニング Δf をパラメータとして分岐図を作成してまとめたのが図 5(a)である。分岐図は 3 つの領域に分けられることが分かった。領域(I)は準周期振動が観測される領域であり、2 つの振動子の位相差は時間とともに単調に増大する (挿入図 a-1)。この位相ドリフト状態は開度 ϕ が比較的小さい領域で、デチューニング Δf が有限な場合に観測された。領

領域(II)は同期状態に対応する．この場合には2つの振動子の位相差は時間的に変化せず一定値を保つ(挿入図 a-2)．なお振動子の位相差は、観測されたそれぞれの圧力の時間発展をヒルベルト変換して求めた瞬時位相の差として求めている．

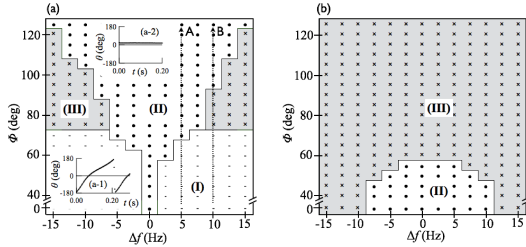


図5 分岐図．バルブによる結合(a)，バルブとチューブによる結合(b)

領域(III)は振動が停止する oscillation death 領域である． Δf が比較的小さい場合には同期するのみである (Route A) が、大きい場合には oscillation death 領域を経た後最終的には同期状態に達する (Route B) ことが分かる．Route A と B の違いを振幅に注目してまとめたのが図5である．さきほど同様にヒルベルト変換を利用して2つの振動子の波形の瞬時振幅を求め、その時間的平均値 $|p|$ を決定した．Route A と B の場合について、時間平均振幅のバルブ開度依存性を示したのが図5(a) および(b)である．なお同期状態においては、時間平均振幅 $|p|$ とともに振動子間の位相差 θ も図示してある．

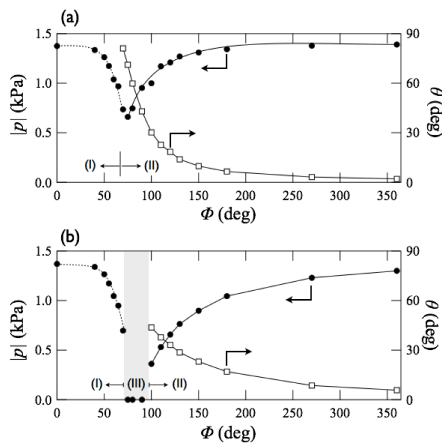


図6 時間平均圧力振幅と位相差のバルブ開度依存性 (a)と(b)は図5のRoute AとBに対応する．

Route A では開度 ϕ が增大するとともに振幅 $|p|$ は減少するが、同期状態に達するとともに復活し始める．また、振動子間の位相差は0に近づき、完全な同相同期に近づく．この結果をバルブを通過する流体により生じるエネルギー散逸に基づいて考えてみる．周波数が異なる場合や、周波数が同じでも位相差が異なれば、バルブ両端の圧力振動差は有限である．この圧力に駆動されて流体は狭いバルブの狭窄流路内を振動運動するので、必ず

エネルギー散逸を生じることになる．しかし振動子が完全同期すれば、圧力振動差は0になるので、バルブ内のエネルギー散逸も必ず0になる．

Route B の場合も同様に、バルブ開度の増大とともに振幅は低下する．バルブによるエネルギー散逸の結果である．しかし、 Δf が大きいために同期状態に移行する前に、エネルギー散逸により振動が停止し、oscillation death 領域に入る．バルブ開度が十分に大きくて互いの相互作用が大きくなると、同期状態が可能になるから、領域(II)に入ることになる．

言い換えれば、デチューニング Δf が小さくて系が容易に同相同期するならば、oscillation death は起こらない．だから $\Delta f = 0$ の場合には領域(II)が観測されるのみである．振動を抑制することを目的とする場合、必ずしもデチューニング Δf は有限ではないので、同一の振動子で構成される熱音響振動子系でも oscillation death を引き起こす工夫が必要である．

これを実現するために、逆相状態で同期状態が起こるような結合方法を試すことにした．Swift らは2つの熱音響自励振動子を半波長程度の長さのチューブ(中空管)で結合したとき、互いに逆位相で同期することを報告している．そこで、バルブに加えてそのような長さのチューブを図4(b)のように追加することにした．この状態で、oscillation death 現象を検証することにした．

4. 研究成果

(1) 熱音響カオス同期の観測

共鳴管内に中空管を挿入して断面積を変化させ、カオス振動を発生するようにした熱音響自励振動子を2つ準備し、ニードルバルブを介して結合した(図7)．

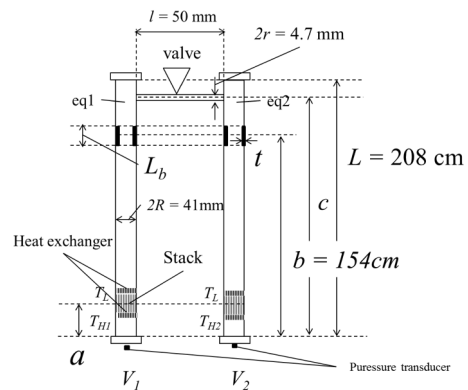


図7 結合熱音響カオス振動子の概略図

共鳴管のどの位置で結合するかは重要な問題であるが、並行して行っていた oscillation death 現象の実験結果を参考にして、もっとも圧力振動が大きくなる閉端近傍同士で結合することにした．

バルブを閉じた状態でカオス振動を発生させ、その様子を固体平板に取り付けた小型

圧力トランスデューサーで電圧信号としてモニターした。得られた圧力振動の時間発展 $V_1(t)$ と $V_2(t)$ からその差 $\Delta V(t)$ を求めた。図 8(a) はバルブ開度が 0 (全閉) の場合の結果である。一見して分かるように非周期的波形を示しており、対応するパワースペクトルも幅広くカオス的であった。バルブ開度が 0.2 回転の場合、図 8(b) に示すように ΔV は比較的小さなラミナー領域と比較的大きなバースト領域を示すようになった。これは電気回路で観測されたカオス同期現象でも観測される前駆現象である。ラミナー領域とバースト領域に関しては普遍的な統計則が成立することが理論的に予測され、簡単な系で実験的にも観測されている。今回、そのような解析を試みたが、実験データにノイズが多く詳細な解析は困難であった。さらに開度を増やし、最大開度である 3 回転にしたときの結果が図 8(c) である。このようにして作成した実験装置の概略図である。 $V_1(t)$ と $V_2(t)$ は依然としてそれぞれカオス振動を呈していたが、 ΔV はほぼゼロになり、カオス同期に至ることが分かった。これは流体系で観測された初めてのカオス同期現象である。

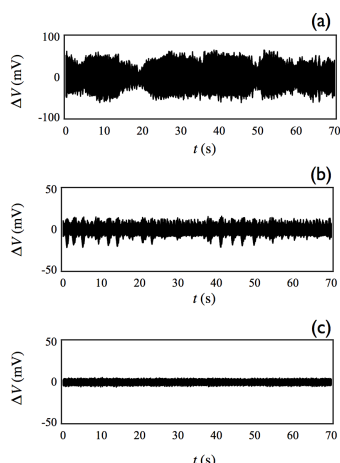


図 8 圧力振動差。バルブ開度は 0 回転(a), 0.2 回転 (b), 3 回転 (c)

流体系の特徴は空間的自由度を持つことである。そこで、バルブによる結合位置を変化させ、共鳴管の中央付近で互いに結合してみた。この位置は基本モードに対しては圧力の腹になる位置であり、結果的にバルブ両端の圧力差は最も小さくなる位置である。圧力波形を観測したところ、2 つの振動子は互いに独立にカオス振動するのみでカオス同期は観測できなかった。流体系のカオス同期では空間的自由度も重要な役割を果たすことが分かった。

今後、熱音響カオス振動子は流体系のカオス同期の典型例として理論的予測を検証するモデル系になると期待される。

(2) oscillation death 現象の観測

バルブに加えてチューブで結合した熱音響自励振動系を作成した。バルブを閉じた状態でチューブのみで結合したところ、2 つの

振動子は互いに逆位相で振動する逆相同期状態に直ちに移行した。この状態でバルブを瞬時にあけたときの圧力振動 $p_1(t)$ と $p_2(t)$ の時間発展を示したのが図 9(a) である。時刻 $t=0$ では逆相同期状態にある。そのためバルブ両端の圧力差は最大の条件にある。結果的にエネルギー散逸は最も大きくなるので時間の経過とともに振動振幅は低下し、やがて停止に至った。一方、チューブを閉じておいて、バルブのみで結合すると同相同期状態が実現するが、この状態でチューブ結合を導入した結果が図 9(b) である。やはりこのときも振動は短時間で減衰し、振動停止に至ることがわかる。振動停止に至る特徴的な時間が(a)よりも(b)の方が大きいので、より大きなエネルギー散逸の機構が働いたことが分かる。チューブ内部の音響振動による散逸と、チューブと気柱管の接続部における渦生成が関与していると考えられるが、今のところ詳細は不明である。この実験結果から、同相同期状態と逆相同期状態を引き起こすような 2 種類の結合方式を併用することで、デチューニングが 0 の系においても oscillation death が可能になることが分かった。

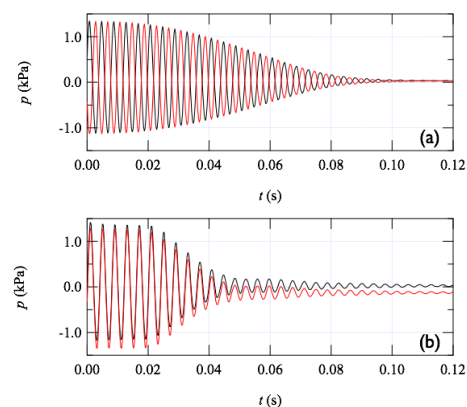


図 9 圧力振動の時間発展。チューブで逆相同期を実現した後でバルブをあけた場合(a)とバルブで同相同期を実現した後でチューブ接続した場合 (b)。

燃焼振動系では、不安定振動が一旦生じると直ちに燃焼器の破壊につながる危険性がある。Oscillation death 現象はこのような系に対して有効な抑制方法として発展する可能性がある。

(3) 熱音響自励振動発展方程式の実験的観測

自励振動の振幅が成長するか、一定値を保つか、あるいは減衰して停止するかは、系のエネルギー散逸とエネルギー生成のバランスによって決まる。熱音響自励振動系では音響エネルギーの散逸と生成がちょうど釣り合うような温度差 ΔT のときに定常振動することになる。つまり音響エネルギーを $E(t)$ とするとき、 $E(t)$ に関する発展方程式は温度差 ΔT を分岐パラメータとして

$$\frac{dE}{dt} = f(\Delta T, E)$$

と書ける．この発展方程式を実験的に求めるために，自励振動と同じ周波数で振動する外力振動を加え，外力が供給する音響パワー W と系に蓄えられたエネルギー E の関係を調べた．外力からの音響パワーが加わって定常振動が得られるので， W は発展方程式の右辺の符号を変えたものに等しいはずだからである．図 10 は温度差をパラメータとして決定した系の発展方程式である．これから，この熱音響自励振動系は subcritical Hopf 分岐を示すことが分かった．

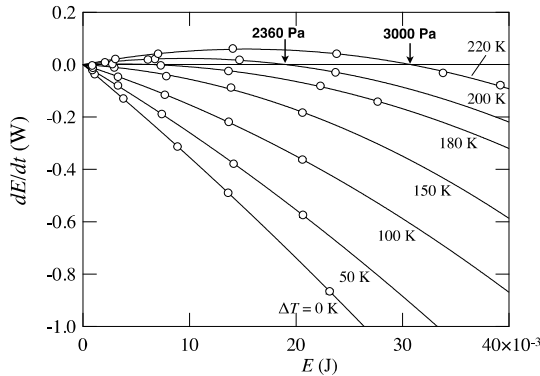


図 10 熱音響自励振動系の実験的発展方程式

この方法は原理的には supercritical Hopf 分岐にも適用可能である．熱音響自励振動分岐がどちらの分岐を示すかを系統的に調べるのに利用したいと考えている．

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 1 件)

Tetsushi BIWA, Fumitomo SHIMA, and Taichi YAZAKI, Experimental Determination of the Evolution Equation for Thermally Induced Acoustic Oscillations, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, vol. 82, 2013 43401, 10.7566/JPSJ.82.043401

〔学会発表〕(計 7 件)

戸塚 智史, 琵琶 哲志, 結合熱音響振動子系における熱音響自励振動の抑制, 2013/9/25-27, 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会, 豊橋技術科学大学.

蕎麦田和也, 琵琶 哲志, 熱音響自励振動におけるカオス同期, 2013/9/25-27, 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会, 豊橋技術科学大学.

蕎麦田和也, 琵琶 哲志, 熱音響自励振動におけるカオス同期, 2013/9/12 - 2013/9/14, 日本流体力学会年会 2013, 東京農工大小金井キャンパス.

井原拓真, 琵琶 哲志, 熱音響自励振動へのフィードバック外力を用いた抑制, 平

成 24 年度第 3 回応用熱音響研究会, 2013 年 3 月 16 日, 東北大学東京分室

蕎麦田和也, 琵琶 哲志, 共鳴管熱音響自励振動衝撃波の探索, 2012 9/16-9/18, 日本流体力学会年会 2012, 高知大学

琵琶 哲志, 島 史知, 熱音響自励振動系の発展方程式の実験的導出, 日本流体力学会年会 2011, 2011/9/9 - 2011/9/11, 首都大学東京.

井原拓真, 琵琶 哲志, フィードバック制御による熱音響自励振動の抑制, 日本流体力学会年会 2011, 2011/9/9 - 2011/9/11, 首都大学東京.

〔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: