

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01375

研究課題名(和文) 熱音響自励振動における非線形現象の解明 振動の促進と抑制を目指して

研究課題名(英文) Unravelling nonlinear phenomena in thermoacoustic self-excited oscillations&#8722;aiming at promotion and suppression of the oscillations&#8722;

研究代表者

杉本 信正 (Sugimoto, Nobumasa)

大阪大学・大学院工学研究科・招へい教授

研究者番号：20116049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,860,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、管路内の静止気体中を流れる熱流が不安定化し、気体全体が自励振動する熱音響現象の解明に向け、現象の定量化を可能にする方程式系を熱流体力学に基づき漸近法を駆使して導出し、簡単化された理論体系を構築した。これにより非線形現象の解析やシミュレーションが可能になり、不安定化の促進と抑制についての知見が得られた。

一方、自励振動からエネルギーを取り出す二つの方法を試みた。一つは振動によりリニア発電機を駆動させ、もう一つは振動流によりウエルズ・タービンを回転させ同軸の直流発電機により振動発電を行わせた。一気圧の空気をを用いる限り出力は最大数ワット程度であるが、加圧することにより出力の増大が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

持続可能な社会の実現のため様々なエネルギー源が研究されており、太陽熱や地熱、低温廃熱の利用を想定した熱音響振動によるエネルギー・ハーベスティングが注目されている。実現には大出力化が必須であり、これには現象の定量化が不可欠である。本研究は、熱流体力学を基礎として、現象の本質を捉えた理論の構築を目指してきた。この体系が概ね完成し、現象の解明や定量化に用いることができる。

一方、振動エネルギーを発電により取り出す実験も並行して行った。振動でリニア発電機を駆動する方法の他に、振動流によりウエルズ・タービンを回転させ同軸に配置した直流発電機を駆動させ、実際に発電できることを確認し大出力化への知見を得た。

研究成果の概要(英文)：A simplified and systematic theory has been developed to unravel thermoacoustic, self-excited oscillations resulting from an instability of a heat flow through a still gas in a tube. In a framework of fluid dynamics, asymptotic methods are exploited to derive one-dimensional equations taking account of the essence of the phenomena. They are applied to derive marginal conditions of instability and also to simulate numerically ensuing nonlinear phenomena. Novel knowledge on the promotion or suppression of instability has been obtained.

With an application for renewable energy, in parallel, energy harvesting has been attempted by exploiting the oscillations. One method is to drive a linear generator to generate electricity, while the other is to rotate the Wells turbine by oscillatory flow to drive a DC generator connected coaxially. As long as the atmospheric air is used, the output power is a few watts in both cases, but this will be expected to be enhanced if the air is pressurized.

研究分野：熱流体力学

キーワード：熱音響 熱流の不安定化 臨界条件 ループ管路 直管 自励振動 振動発電 エネルギー・ハーベスティング

1. 研究開始当初の背景

熱音響現象自体は古くから知られており、出現する現象も様々である。最近の30-40年にわたり盛んに研究されてきた現象は、温度勾配を受ける静止気体中を流れる熱流が不安定化し、管路内の気体全体が自然に振動をし始めるものである。典型例は、60年以上前に発見された低温ヘリウムのタコニス振動である。振動が発生するときの管路両端の温度比は数十倍と大きく、これを室温の空気に当てはめると極端な高温が必要となる。

ところが管路内にハニカム構造体の多くの細孔からなるいわゆるスタック等を配置すると、室温の空気でもさほど大きくない温度比で発振することが明らかになってきた。しかも強い振動が発生するので、振動からエネルギー・ハーベスティングできないかと期待されている。そこで太陽熱や地熱、低温廃熱を熱源とした熱音響式原動機や冷凍機が再生可能エネルギーの観点から注目を集めている。さらに装置は簡単な構造をしており、可動部がないことも注目を集める一つの理由である。

管路が与えられた場合、発振が起きるスタックの位置や大きさ、課す温度比等の条件は経験的に見つけられることが多く、理論的に求めるのは簡単ではない。この解析には、タコニス振動の解明に開発されたロットの線形理論が用いられ、発振条件や臨界状態の様子が求められる。しかし、この理論は微小振幅の間しか適用できず、不安定が発生し振動が成長していく非線形過程には適用できない。このため振幅の成長が収まった後の飽和振幅の決定や、振動により発生する音響流の解析に用いる理論はなかった。そこで最近では、熱流体力学の厳密な方程式を計算機で解く数値流体力学を用いたシミュレーションが試みられているが、計算コストは嵩む。この手法でも形状の複雑なスタック等には何らかの近似モデルを用いる必要がある。シミュレーションは定量的な結果を与えるが、現象のメカニズムや本質の理解には不向きである。

研究代表者および分担者は、本研究開始以前から、調和波を仮定するロットの理論を任意の攪乱でも扱えるよう拡張するだけでなく、非線形性を考慮した理論体系の構築を目指してきた。現象の本質は、流路壁面が温度勾配をうけるときの粘性や熱伝導性の拡散作用によるものである。この作用を拡散層の厚さの違いにより明らかにしてきた。しかし、本研究開始当初では、理論は十分に確立されていない状態にあった。

一方、理論の構築だけでなく、実際に気体の発振や自励振動の発生を実験的にも確認した。これまでの科学研究費補助金により直管およびループ管路を製作し、様々な流路をもつスタックを準備した。直管は内径80ミリ、長さは最長で約3.6メートルあり、図1の上図に概形を示す。下図にはループ管路を示し、内径80ミリ、ループ径は約4メートルである。スタックはループ管路では2箇所対向する位置に設置できるように設計されている。

ループ管路では、自励振動の振幅が大きくなると圧力や流速が不連続に変化する「音響衝撃波」が発生する。これに対し、過去の研究から示唆されるヘルム共鳴器列をループ管路に空間的に等間隔で取り付け、管路が周期構造をもつようにすると波に分散性が発生し、ループをエンドレスに周回し続ける衝撃波を伴わない「熱音響孤立波」の伝播を初めて実証した。圧力変動のピーク間値が大気圧の約15% (170dB (SPL))にも達する大振幅のパルス波からなる自励振動を発生させることができた。両管路における熱音響自励振動の発生はすでに実験により確認されていたが、定量的な計測は行われておらず、成果は学会発表や論文での公表には至っていない。

2. 研究の目的

本研究の第一の目的は、構築しつつある理論体系を早急に完成させることである。この後、理論を具体的な場合に適用し、自励振動による衝撃波や孤立波、音響流の発生などの非線形挙動の解析や実験のシミュレーションを行い理論を検証する。さらに気体の不安定化の促進や振動の大振幅化を図る方法を明らかにする。

得られた知見は、不安定化や自励振動の発生が問題となる他の状況下の振動の抑制に利用できる。ボイラの釜鳴りやタービンやロケットエンジンなどの燃焼室での燃焼不安定では、専ら不安定化の抑制に関心がある。こうした熱音響問題では燃焼による非定常な発熱が主たる原因であるが、ケーシングに発生する温度勾配による熱流の影響は2次的と見なされ研究されていない。一例として、ターボファンジェットエンジンのバイパスダクトを考える。音は軸方向に温度勾配のある環状流路内を巡回しながら伝播する。温度勾配がこのときどのような影響を与えるかについては、理論的には明らかにされていない。このような問題は本来の研究対象とする熱音響現象とは異なるが、成果の他分野への応用も研究する。

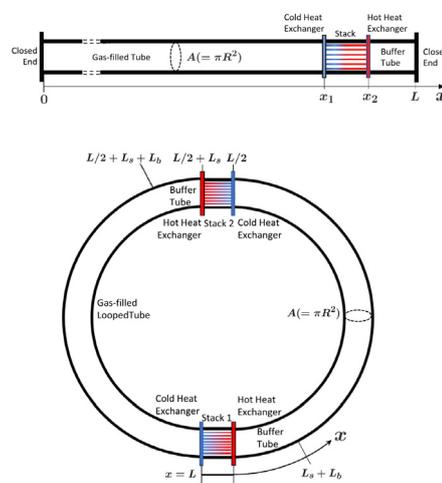


図1：直管およびループ管路の概形

次に実験面での研究目的を述べる。発生する自励振動は極めて安定しており、これを利用した振動発電によるエネルギー・ハーベスティングの実験を行う。直管の場合には、スタックから離れた管の端にベローズを介してリニア発電機を取り付け、ループ管路ではスタック付近に枝管を設け、その端にベローズを取り付けリニア発電機を取り付ける。

自励振動が発生すると管路内に気体の振動流が発生する。特にループ管路では、最大変動圧が平均圧の10%にもなる振動が発生し、これにより最大秒速が25メートル程度の振動流が発生していると予想される。振動流からエネルギーを取り出すために、海洋の波浪発電に用いられているウエルズ・タービンを利用する。しかし、周波数が25ヘルツと波浪発電における周波数より高いので、ウエルズ・タービンが果たして回転するのか興味のあるところである。回転すればタービンと同軸に直流発電機を接続し、発電の可能性や出力を確認する。

3. 研究の方法

理論では、解析とならんで導出した方程式系を用いてシミュレーションを行う。流路に対する拡散層の厚さの大小により解くべき方程式系は二つに分けられる。拡散層が薄い場合には、拡散層外部のコア領域断面にわたり平均化して導かれる空間1次元の非線形の波動方程式に、拡散層による履歴効果を考慮した方程式系を用いる。一方、スタックや熱交換器内の狭い流路では拡散層が厚く、空間1次元に帰着させた非線形の拡散・波動方程式を用いる。解くべき方程式が異なる領域の境界では、質量やエネルギー・流束の接続を行う。

スタックや熱交換器の両端では流路断面積が急激に変化するので、線形音響理論による質量流束と音圧連続の接続条件を課すと解は時間の経過と共に発散し破綻することがこれまでの研究で分かっている。しかし、攪乱が小さい間では、臨界条件の導出には適用できる。現実にはスタックや熱交換器の両端では渦の発生や剥離現象が発生するので、これらの影響を取り込んだ接続条件を課さなければ、長時間のシミュレーションは不可能であろう。振動流の影響は両端付近だけに限られると仮定して、流管モデルで近似し接続する。これで解くべき方程式系と接続条件が揃うことになる。数値解法にはCrank-Nicholson型の差分法を用いる。

実験では、リニア発電機を駆動するために圧力波との共振系を構築する。直管、ループ管路の枝管にベローズを介して発電機を設置し、ばねで支えることにより出来るだけ高いQ値をもつ共振系を工夫する。一方、振動流により回転するウエルズ・タービンを製作する。タービンを収納するケーシング内に直流発電機を同軸に設置する。二つのタービン翼を取り付け可能なように設計する。ループ管路では各ケーシングを2箇所を設置する。

4. 研究成果

成果を理論と実験に分けて箇条書きに記す。各項目末に公表した文献等を付す。

【理論】

1. 熱音響現象を記述する古典的かつ線形理論であるロットの理論を包括し、実際の現象が起きる非線形領域に適用できる理論体系を構築した。表1に体系を纏める。線形理論および弱非線形理論が本研究の対象である（図書 Springer-Nature, 2019）。

表1：理論体系と各理論が解明を目標とする現象

	圧力攪乱の 大きさ $\varepsilon = \Delta p/p_0$	攪乱の タイプ	流路径 R に対する粘性および熱伝導性による拡散層厚さの比 $\delta = \sqrt{\nu/\omega/R} \sim \sqrt{\kappa/\omega/R}$			目標とする現象
			薄い ($\delta \ll 1$)	中間 ($\delta \sim 1$)	厚い ($\delta \gg 1$)	
線形理論	無限小 $\varepsilon \rightarrow 0$	調和振動	ロットの方程式			不安定化の臨界条件 臨界 (中立) 振動
		任意	熱音響波動方程式			初期値問題の設定 初期不安定化からの 発展
			線形境界層理論	拡散層が薄いまたは 厚い理論の拡張	線形拡散・波動 (移流) 方程式	
弱非線形 理論	微小有限 $0 \ll \varepsilon \ll 1$	任意	非線形 + 線形境界層理論	拡散層が薄いまたは 厚い理論の拡張	非線形拡散・波動 (移流) 方程式	自励振動, 衝撃波 音響流, 熱音響流
非線形 理論	任意	任意	数値計算流体力学 (CFD) (振動流に伴う渦の発生, 剥離, 端面での熱流等)			現象の高精度な シミュレーション

2. 構築した理論を用いてループ管路での不安定化の臨界条件をシミュレーションで求めた（論文 Proc. Mtgs. Acoust., 2018）。
3. 実験で用いる直管やループ管路を対象に臨界条件を理論的に示した（論文 IMA J. Appl. Math., 2019）。
4. 1. で構築した理論を適用する領域間の接続条件を明らかにした。この条件が適切でないと長時間のシミュレーションが破綻する。外界との熱流の出入りを考慮した流管モデルを用いると、条件が適切に与えられ長時間のシミュレーションが可能になった。これにより熱交換器を通る熱流を定量化できた（論文 Proc. Mtgs. Acoust., 2022）。
5. 3. で得られた臨界条件に比べ、測定された発振温度は高く、不安定化する増幅率が小さい

- ことが明らかになった。原因は、実験 12. を行うことにより、スタック断面内の非一様な温度分布であると考え、断面内の熱流の影響を調べた。この結果、非一様性は発振温度を上昇させ、また増幅率を抑えることが分かった (論文 J. Phys. Soc. Japan, 2021)。
- 構築した理論を用いて、軸方向に温度勾配のある円筒ダクト内を伝播する非平面音波への影響を調べた。この結果、定量化されていなかった温度勾配のない場合の音波の減衰率が求められた。しかし、温度勾配による不安定化は起こり得ないことが分かった一方、温度勾配は音波を低温箇所に関じこめる作用をすることが新しく分かった (論文 J. Fluid Mech., 2022)。
 - スタックや熱交換器の外部の領域に適用できる方程式には拡散により履歴効果が現れる。この効果はシミュレーションを進めるにつれ蓄積するので、計算時間が長くなりその短縮がこれまで問題であった。そこで、履歴効果の本質を失うことなく履歴計算をバイパスする新しい方法を考案した (論文 J. Acoust. Soc. Am. に投稿予定)。

【実験】

- 直管を用いて発振および自励振動発生の実験を行い、定在波型の自励振動を確認した。発振に及ぼすスタック流路の影響を理論と比較検討した。図 2 は 4 種類のスタック (断面積一平方インチ当たり 50, 100, 200, 300 セル) の違いが固定端の圧力 p' (p_0 は大気圧) の飽和振幅に及ぼす影響を示す。 (論文 Proc. 23rd Intl. Congress on Acoustics, 2019)。

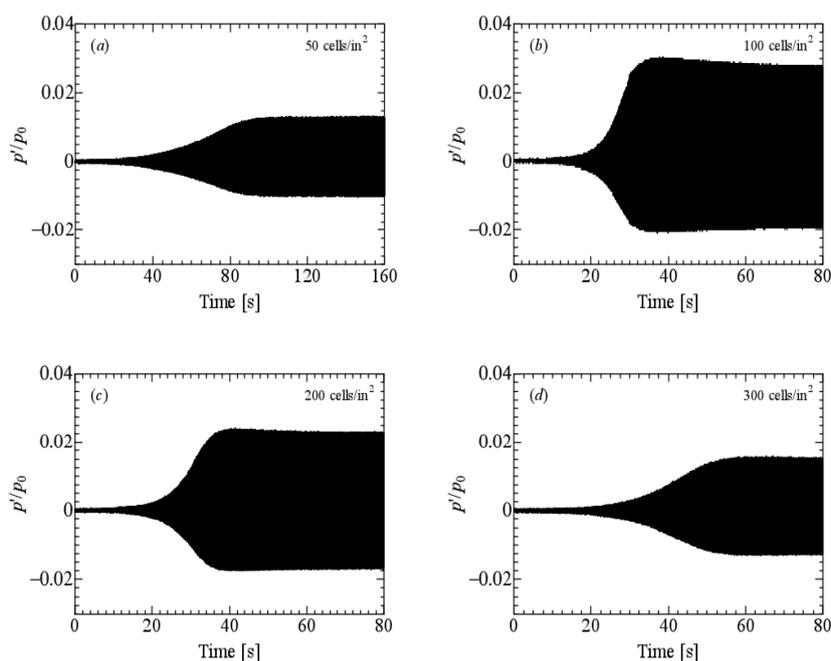


図 2 : 直管での発振と圧力の飽和振幅に及ぼすスタックの違いの影響

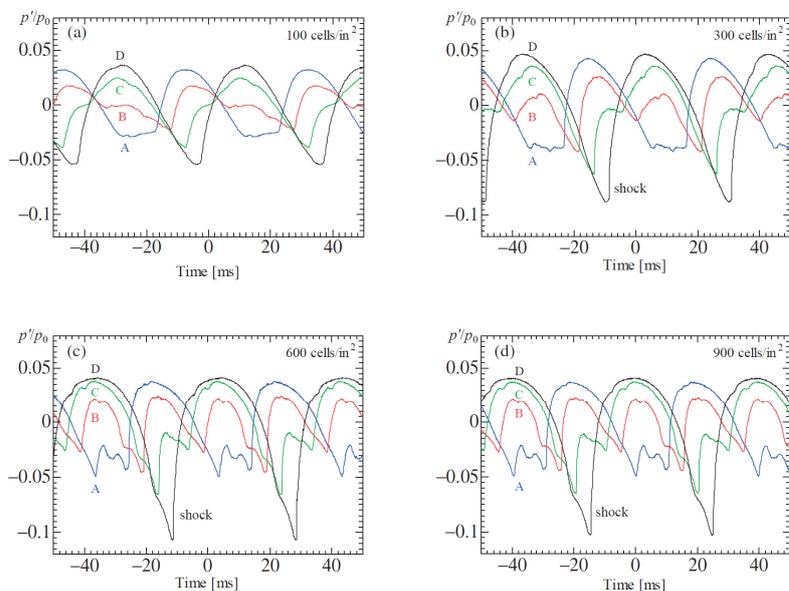


図 3 : ループ管路での自励振動の圧力波形に及ぼすスタックの違いの影響

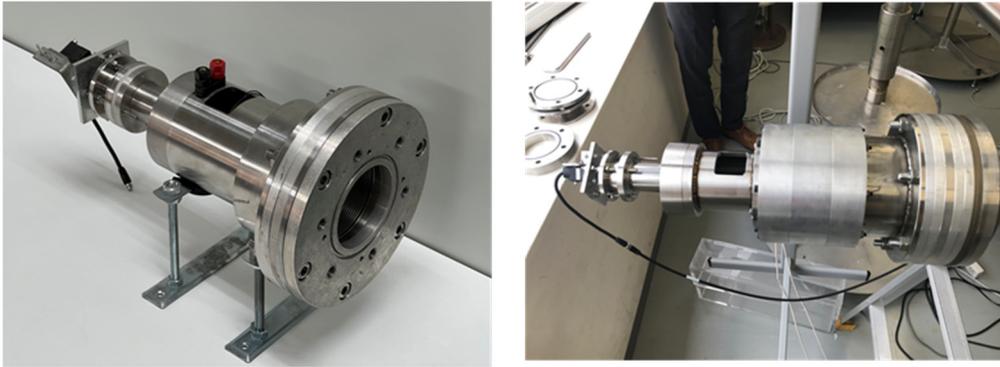


図4：リニアモーター（左）とリニア発電機（右）

9. ループ管路で8.と同様の実験を行い、進行波型の自励振動と衝撃波発生の有無と流路径の関係調べた。図3には4種類のスタック(100, 300, 600, 900セル)の違いによる圧力波形を示す。図中のA, B, C, Dは管路に沿って等間隔離れた位置で計測した波形である。振動はループ全長を1波長とするモードだけでなく、2波長から4波長におよぶ高次モードの臨界条件の影響についても調べた(論文 J. Phys. Soc. Japan 2018)。
10. ループ管路で観測される図3の波形において、(a)以外には衝撃波の発生が見られる。衝撃波形成に及ぼすスタックの細孔径の影響を調べた(Proc. Mtgs Acoustics 2018)。
11. 直管内のスタックから離れた管端に、ベローズを介してリニア発電機を設置し振動発電を試みた(図4左)。適切な発電機が入手できなかったため、市販のリニアモーターを逆に駆動することを試みた。同様の実験をループ管路でも行った。リニアモーターを駆動すると発電機として作動するが、発電機としては性能が劣る。その後、図4右のリニア発電機を企業から借用し同じ実験を行ったが、可動部の質量が大きすぎて高いQ値の共振系が構成できなかった。出力は直管で1W程度、ループ管路では2,3Wであった(学会発表日本機械学会 2018)。
12. 理論と実験で得られた臨界条件の違いの原因を探る目的で、直管のスタック側の一端に放射温度計をとりつけスタック高温端の断面の温度分布を計測した。この結果により、スタック断面内の非一様な温度分布による熱流の影響を調べる研究(理論5.)につながった(論文 J. Phys. Soc. Japan, 2021)。
13. 振動流からエネルギーを取り出すためにウエルズ・タービン翼(図5左)および直流発電機を組み込んだタービン発電機(図5右)を二組設計した。内部が可視化できるようにアクリルとABS樹脂でそれぞれ製作した。各タービンケーシング内にはNACA0020型対称翼8枚からなるタービン翼が二つ対向するように配置できる。本研究期間内にはループ管路に1つの翼を設置したタービン発電機一組を用いて、振動流による発電を確認した。発生する自励振動モードはタービン位置に大きく影響されるので、今後最適条件を調べる予定である。

【まとめ】

コロナの蔓延による研究の中断や遅れが生じたが、研究期間を1年延長したため当初の研究目的は概ね達成できたものと考えている。熱音響自励振動から実用に供するエネルギー・ハーベスティングを行うには、出力の増大が必須である。このためには装置の大型化と加圧気体を用いることが考えられる。この実現にはシミュレーションは不可欠であり、構築した理論が役立つことが大いに期待される。

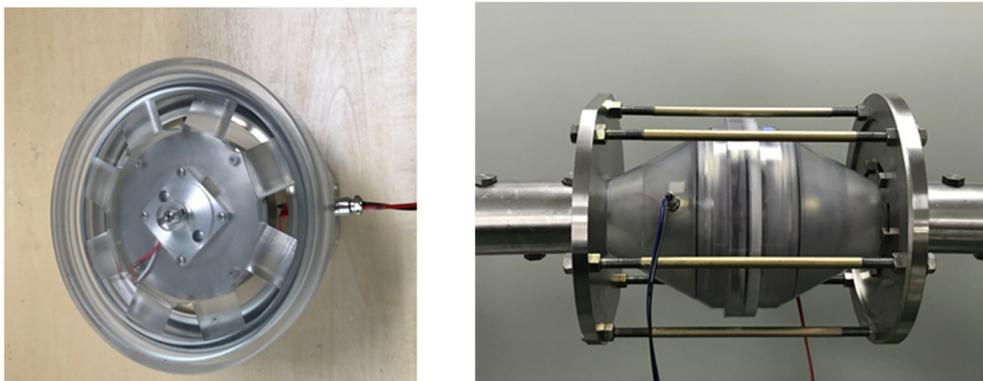


図5：ウエルズ・タービン翼（左）とタービン発電機の外観（右）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Nobumasa Sugimoto	4. 巻 945
2. 論文標題 Thermoacoustic effects on the propagation of non-planar sound in a circular duct	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A26 1-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2022.523	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Dai Shimizu, Nobumasa Sugimoto	4. 巻 48
2. 論文標題 Numerical simulation of a heat flow due to thermoacoustic oscillations in a looped tube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Meetings on Acoustics, Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 045008 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/2.0001653	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nobumasa Sugimoto	4. 巻 90
2. 論文標題 Onset Behavior of Thermoacoustic Instability in an Air-Filled Closed Tube	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 014401 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.014401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nobumasa Sugimoto	4. 巻 90
2. 論文標題 Effects of a Cross Heat Flow on Thermoacoustic Instability in a Gas-Filled Channel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 014402 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.014402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清水 大, 杉本信正	4. 巻 32(4)
2. 論文標題 熱音響システムにおける衝撃波の発生と抑制	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 超音波テクノ	6. 最初と最後の頁 6-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11501/3302214	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobumasa Sugimoto, Keisuke Minamigawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Experiments on self-excited thermoacoustic oscillations in an air-filled closed tube	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics	6. 最初と最後の頁 5619-5626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18154/RWTH-CONV-238934	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nobumasa Sugimoto	4. 巻 84
2. 論文標題 Marginal conditions for the onset of thermoacoustic oscillations due to instability of heat flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IMA Journal of Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 118-144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/imamat/hxy051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobumasa Sugimoto & Keisuke Minamigawa	4. 巻 34
2. 論文標題 Shocked and unshocked thermoacoustic oscillations in a looped tube	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Meetings on Acoustics, Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 045004 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/2.0000847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Dai Shimizu, Takuya Iwamatsu & Nobumasa Sguimoto	4. 巻 34
2. 論文標題 Numerical simulations of thermoacoustic oscillations in a looped tube by asymptotic theories for thickness of diffusion layers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeing of Meetings on Acoustics, Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 045025 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/2.0000888	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nobumasa Sugimoto & Keisuke Minamigawa	4. 巻 87
2. 論文標題 Experiments on self-excited thermoacoustic oscillations in an air-filled looped tube with a pair of stacks (with Erratum)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104401 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.104401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nobumasa Sugimoto & Keisuke Minamigawa	4. 巻 89
2. 論文標題 Erratum: Experiments on self-excited thermoacoustic oscillations in an air-filled looped Tube with a pair of stacks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 38001 1-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.038001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件(うち招待講演 1件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 清水 大, 杉本信正
2. 発表標題 ループ管における熱音響振動による熱流の数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本信正
2. 発表標題 温度勾配のあるダクト内を伝播する非平面音波に及ぼす熱音響効果
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Dai Shimizu, Nobumasa Sugimoto
2. 発表標題 Numerical simulation of a heat flow due to thermoacoustic oscillations in a looped tube
3. 学会等名 22nd International Symposium on Nonlinear Acoustics
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本信正
2. 発表標題 円形ダクト内を回転しながら伝播する非平面音波に及ぼす熱音響効果
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021 (オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水 大, 杉本信正
2. 発表標題 ループ管における熱音響自励振動に及ぼす管の曲率と入力パワーの影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会 2021 (オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水 大, 杉本信正
2. 発表標題 ループ管における熱音響自励振動に及ぼす管の曲率の影響
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020 (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobumasa Sugimoto, Keisuke Minamigawa
2. 発表標題 Experiments on self-excited thermoacoustic oscillations in an air-filled closed tube
3. 学会等名 The 23rd International Congress on Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本信正, 南川佳祐
2. 発表標題 直管内の熱音響自励振動の実験
3. 学会等名 非線形音響研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 大, 杉本信正
2. 発表標題 熱音響システムにおける非線形現象 衝撃波の発生と抑制
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 大, 杉本信正
2. 発表標題 共鳴器の局所接続による定在波型熱音響自励振動の増幅
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本信正, 清水 大
2. 発表標題 温度勾配のある細管内の熱音響現象の線形および非線形理論
3. 学会等名 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値とその応用」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南川 佳祐, 杉本 信正
2. 発表標題 熱音響自励振動を利用した振動発電
3. 学会等名 日本機械学会 2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水 大, 杉本 信正
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本流体力学会 年会20018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobumasa Sugimoto, Keisuke
2. 発表標題 Shocked and unshocked thermoacoustic oscillations in a looped tube
3. 学会等名 21th International Symposium on Nonlinear Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Dai Shimizu, Nobumasa Sugimoto
2. 発表標題 Nonlinear simulations of thermoacoustic oscillations in a looped tube
3. 学会等名 21th International Symposium on Nonlinear Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉本信正
2. 発表標題 熱流の不安定による熱音響振動発生の臨界条件
3. 学会等名 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その応用」
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Nobumasa Sugimoto, Dai Shimizu	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer-Nature	5. 総ページ数 376
3. 書名 Applied Wave Mathematics II	

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	清水 大 (Shimizu Dai) (40448048)	福井工業大学・工学部・教授 (33401)	
研究分担者	板野 智昭 (Itano Tomoaki) (30335187)	関西大学・システム理工学部・教授 (34416)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関