

研究状況の概要【中間報告】	
氏 名	上道 茜
1. 研究題目	分岐および断面積変化を有する配管を伴うガス燃焼器における燃焼によって励起される発振周波数の研究
2. 研究内容	
2.1 研究背景, 研究目的, 研究の新規性および独創性 燃焼振動は、燃焼による発熱と圧力の連成から生じ、機器の固有周波数と一致すると大きな自励振動を引き起こす現象である。とりわけ、バーナやその上流・下流配管の分岐や断面積変化は音響特性に大きく影響するが、これらと燃焼振動の関係を包括的に調査した研究はほとんどない。本研究では、燃料組成の変化によって発振周波数がシフトする点に着目し、これまで築いてきた音響ネットワークモデルに分岐や断面積変化を考慮し、実験的にも検証しながら燃焼振動と配管系の連成による発振周波数を予測することを目指している。 この研究の新規性は、燃焼器のみならず上流・下流配管も含めたモデル化を行い、分岐や断面積変化による音響的境界条件の変化を音響インピーダンスによって表現している点が挙げられる。また、燃焼による温度変化を組み込んだ配管系モデルは十分に研究されていないため、学術的にも高い価値を持ち、複数の振動モードに対して燃焼振動を抑制できる燃焼器設計など産業応用への汎用性も期待される点に独創性がある。	
2.3 研究手法 本研究は燃焼振動という複雑な現象を、まずはモジュール式の実験装置によって可視化・定量化し、その知見をネットワークモデルや解析手法の精緻化に反映するという方法論をとる計画である。理論・実験の両面から燃焼振動発振機構の解明と制御指針の確立を進めることで、最終的には燃焼振動が発生しにくい配管形状や運転条件の提示を目指す。それによって、燃焼機器の破損リスク低減や大きな騒音発生への抑制など、社会的にも有意義な成果が期待される。 (1) 燃焼器模擬実験装置の設計、製作 実際の燃焼器が有する流路の分岐や断面積変化が音響特性や燃焼振動に与える影響を調査するため、新たにガス模擬実験装置の設計および製作を行う。従来の単純な Rijke 管を基本とするが、ヒーターを熱源とした形式を採用するとともに、モジュール式の構造を導入してさまざまな配管要素を着脱・組み合わせ可能にすることで、多様な配管形状や境界条件を自由に再現できるようにする。具体的には、直管部をベースに設計した Rijke 管本体に対して、分岐モジュールや断面積変化モジュールをフランジなどで接合し、配管の分岐角度や管径の急激な変化を再現しやすい構成とする。こうしたモジュール式の実験装置を実際に製作するにあたっては、ヒーター周辺の高温度環境に対応できる耐熱材料の選定や、分岐部・断面変化部の精度を確保するための工作精度の検討が重要となる。また、将来的に二音源法を用いる計測に対応するため、複数の圧力センサやマイクロフォンを適切に配置できるだけの取り付けポートを確保し、データロガーとの接続を拡張しやすい設計とする必要がある。 (2) 分岐または断面積変化を有する配管系音響ネットワークモデル構築 申請者がこれまでに構築してきた音響ネットワークモデルに対し、新たに分岐要素や断面積変化要素を組み込む拡張を行う。この際、伝達マトリクスに含まれるパラメータが増加するため、モデルが扱う計算	

量が大きくなるほか、共鳴周波数の求解時には特性方程式が複雑化する。そこで、MATLAB 上で効率的にパラメータ走査（配管長さや分岐角度、断面積比など）を実行できるよう、プログラムを改良する必要がある。さらに、火炎（ヒーター）周辺の高温領域によって変化する音響インピーダンスのモデル化や、分岐および断面変化部で発生する音波の透過・反射を組み込む必要がある。

(3) 分岐または断面積変化および高温部を有する配管系の音響特性計測

(1)で製作したモジュール式装置を本格的に稼働させ、高温環境を伴う状態での音響インピーダンスや音波の伝播特性を測定する。特に、ヒーター稼働時に高温部が形成されることで、音速や反射係数などがどの程度変化するかを実験的に評価し、(2)のネットワークモデルと照合することが大きな目的となる。本研究では二音源法を用いることで、複数の境界面におけるインピーダンスを同時に測定する計画であるため、複数の圧力センサをデータロガーに接続し、サンプリングレートや同期精度を十分に確保する必要がある。また、分岐や断面積変化を伴う複数のモジュールを組み替えながら測定することで、多様な形状パターンに対する音響特性の差異を見だし、理論モデルとの比較や改良に活かしていく。これにより、分岐や断面積変化が燃焼振動の発振周波数をシフトさせる具体的なメカニズムがより明確になり、実際の燃焼器設計との関連を議論しやすくなる。

(4) 音響共鳴周波数から発振周波数を予測する手法の検討

(1)～(3)の一連の実験データとモデル構築の結果を統合し、燃焼振動の発振周波数をより現実的に予測するための手法を完成させることを狙いとしている。本来、音響共鳴周波数が存在しても、必ずしもそのすべてが燃焼振動として励起されるわけではないため、火炎面の流動特性や熱交換、さらには減衰係数の評価など複数の要因を考慮する必要がある。本研究では、これまでの汎用流体解析ソフトウェア (CFD) を用いた音響減衰の見積方法も活用し、実際に励起されやすいモードを選別するプロセスをモデルに組み込む。このアプローチによって得られる燃焼振動の発振周波数予測は、理想的な模型実験やシミュレーションだけに頼るのではなく、高温環境下の実測データを組み込むことによって信頼性を高めることが期待される。

こうした研究成果がまとめられ、燃焼器や配管系の設計において複数のモードを同時に抑制する指針が提供できる可能性があり、学術的な意義だけでなく、産業界における燃焼機器の安全性・効率性向上にも貢献が見込まれる。

3. 研究成果・課題など

3.1 現在までの成果および発生した課題・問題点

2024 年度の研究計画では、燃焼器模擬実験装置の設計・製作ならびに分岐や断面積変化を有する配管系音響ネットワークモデルの構築を想定していたが、実際には早稲田大学から山口大学への異動に伴う実験室整備に時間を要したため、当初予定していた装置製作と実験作業が大幅に遅れる結果となった。具体的には、コンプレッサやチラー、ヒーター駆動用のスライダックを運用できるように電気工事を施し、新たな実験室環境を整備する必要が生じたことで、実際の本格的な装置稼働までは至っていない。

一方で、実験装置に関しては、小規模な直管のみの Rijke 管を試作し、熱音響振動を起こす実験を試みたものの、ヒーター出力が不足して十分な加熱が行えず、狙いとする振動の発生を確認できなかった。しかし、部材の手配を進めるなかで、将来的に分岐モジュールや断面積変化モジュールを接合できる構成を検討できたことは、今後の装置拡張につながる基盤づくりとして意義がある。

本研究では、分岐部が音響特性である音響インピーダンスや共鳴周波数にもたらす影響を定量的に評価するため、分岐を複数有する管楽器 (Venova) を対象とした音響ネットワークモデルを新たに構築し、そ

の特性を MATLAB を用いて数値的に解析した。具体的には、複数の分岐管を含む管路を複数の伝達マトリクスに分割し、各境界部での音響インピーダンス変化や音波の反射・透過をモデルに組み込むことで、分岐位置や分岐数の違いが共鳴周波数にどのような影響を与えるのかを検討した。

まず、分岐位置が入口付近にある場合には音響特性に与える影響が大きく、特に入口に近い分岐管ほど共鳴周波数を変化させやすいことが確認された（図 1）。さらに、分岐の有無による共鳴周波数の変化を調べた結果、分岐数が増えるほど共鳴周波数が高くなる傾向が見られた。これは、複数の分岐管が加わることで、主管に対して新たな反射面や音響境界が複数生じるためであり、その結果として音波の伝搬経路が複雑化し、より高次の共鳴モードが励起されやすい形となるからである。本来、単純な直管であれば限られたモード数しか発現しないが、分岐数の増加は主管内の音波干渉パターンを多様化させることにつながる。こうした知見は、燃焼振動のモデル化においても、分岐を含む配管がもつ振動モードを適切に捉えるうえで重要な示唆を与えると考える。

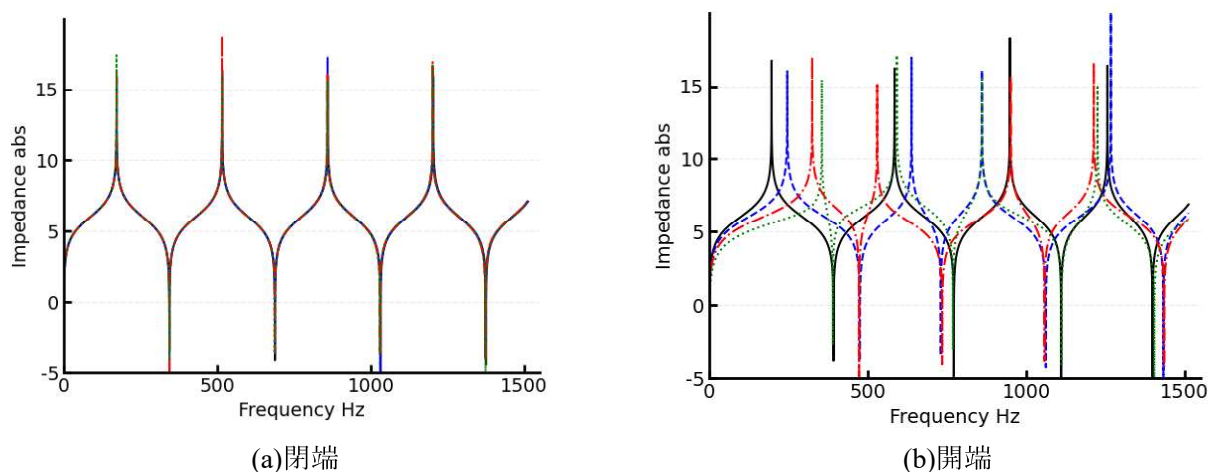


図 1 分岐の位置を変化させたときの音響インピーダンス（絶対値）の変化

さらに直管の上流端音響インピーダンスを可変とする新たなモデルを構築し、現在、解析に取り組んでいる。これらの取り組みは、実際の燃焼を伴わない段階での基礎的な音響特性解析を充実させ、将来的に火炎（ヒーター）を組み込む際のモデル検証に備える意味で有用である。

このように、当初計画のうち、実験装置の本格的な製作と燃焼を伴う実験までは進められなかったものの、実験環境の整備や小規模装置の試作を通じて、今後の拡張に向けた準備が整いつつある。また、モデル面では分岐や可変インピーダンス要素を取り入れた解析が進展し、燃焼実験の前段階として共鳴周波数の挙動を理論的に把握する基礎が着実に築かれている。今後は、ヒーターをはじめとする熱源の出力向上策や、分岐・断面積変化モジュールを実際に導入した実験の実施によって、計画時に想定していた燃焼振動の発生メカニズム検証へと本格的に踏み出すことが期待される。

3.3 関連する学会・研究発表会や連携活動

本年度においては、国内外の研究者との意見交換や研究連携に向けた活動として、以下の取り組みを実施した。まず、カナダ・ビクトリア大学の流体関連振動および流体構造連成の研究を専門とする第一人者である Prof. Peter Oshkai と面談し、研究に関するセミナーを実施するとともに情報交換を行った。Prof. Oshkai は流体機械と海洋生物との共生を目指して騒音低減に関する研究を進めており、その実験手法および解析手法について具体的な紹介を受けるとともに、研究テーマ設定に関する新たな視点を得ることができた。本面談は、燃焼振動分野にとどまらず、より広い視点でのアプローチを考える契機となり、非常

に貴重かつ有意義な訪問となった。さらに、将来的な連携を視野に入れて、今後も継続的に情報交換を行っていく方針を確認した。

また、国内外の研究者と交流し、最新動向を把握するため、米国機械学会（ASME）Pressure Vessel and Piping 部門の日本支部ミーティングである PMCI2024 に参加し、これまでの燃焼振動に関する研究成果を発表した。本ミーティングでは、多様な専門分野の研究者との意見交換を通じて、燃焼振動の基礎研究から応用研究まで幅広い視野で情報を収集することができた。さらに、日本機械学会 FIV（Flow-Induced Vibration）研究会でも海外の燃焼振動研究を含む流体振動領域の最新事例に触れ、その知見を自らの研究に反映すべく検討を進めている。加えて、日本機械学会 D&D2024 に参加し、燃焼振動を含む流体関連振動分野の研究動向を調査したことで、今後の研究計画の立案や研究成果の社会実装に向けた可能性を一層広げることができた。

これらの活動を通じ、燃焼振動研究における解析・実験双方の最先端手法や周辺分野の動向を把握するとともに、国内外の専門家ネットワークを拡充する機会を得た。特に、Prof. Oshkai との面談は新たな連携の可能性を開くものであり、今後の研究発展に向けた大きなステップとなったと考えている。今後も国内外の学会や研究会への積極的な参加を継続し、幅広い交流・情報収集を通じて、燃焼振動分野の研究を深めていきたい。

4. 今後の予定 （助成希望金額とその使途についてもご記入願います）

4.1 研究計画

(1) 小型実験装置の改良と基礎データの取得(2025 年 1 月～3 月)

2024 年度末までに製作した小規模 Rijke 管実験装置（直管）に対して、シースヒータ（ナガノ製・特注品）の導入と配管系部品の改良に向けて検討を行い、熱音響振動を再現可能な条件設定を模索する。2024 年度にはヒーター出力不足で十分な振動を確認できなかった問題を解消するため、より高出力のヒータと、空気・ガス流量を細かく制御できる装置改造を実施する。これにより、モデル検証用の基礎データ（音圧波形、周波数スペクトル、インピーダンスの変化など）を確保し、分岐音響管実験装置の大規模化に向けたノウハウを蓄積する。

高感度圧力センサ (Kulite WCTV-312) の導入に備えて、既存ロガーとの接続性やサンプリング周波数の調整、アンプ (TEAC SA-570ST) の特性確認を行う。これにより、燃焼振動の微小な圧力変動や高周波成分を捉えやすい計測体制を確立する。あわせて、National Instruments の現有データロガーについては、チャンネル数増設に向けた仕様確認・注文手続きを進め、2025 年度の装置拡張に備える。

(2) 新規モデル機能の検証(2025 年 2 月～6 月)

2024 年度に構築した「分岐の有無」や「上流端音響インピーダンス変化」を取り入れたモデルを用い、小規模 Rijke 管実験で取得したデータとの比較を行い、モデルの妥当性・誤差要因を洗い出す。また、実験と理論の整合性が得られた場合には、より複雑な分岐構造を導入した場合のシミュレーションを実施し、構築する実験装置への適用方法を検討する。また、非平衡化学計算が可能な cantera を MATLAB ツールと連動させて使用するものとする。

(3) Rijke 実験装置の本格稼働(2025 年 4 月～9 月)

2025 年度は、2024 年度に得た改良ノウハウを基に、分岐音響管実験装置をさらに拡張し、燃焼振動が発生する条件下での本格的な実験を行う。分岐数・断面積変化が複数存在する配管要素を組み合わせることで、燃焼振動と配管系の連成挙動を詳細に評価し、共鳴周波数シフトや圧力振幅の変化を観測する。実験装置を完成させるため、実験装置構成部材（配管系、ヒーターを含む）、高感度圧力センサ、データロ

ガーチャンネル数増設、アンプの購入費用を予算計上した。

(4) 理論モデルの高度化と燃焼振動予測精度向上(2025 年 10 月～2026 年 1 月)

実験装置の拡充に合わせて、MATLAB 上で構築した音響ネットワークモデルをさらに高度化し、火炎面まわりの熱交換・減衰係数の評価や分岐要素の複雑な干渉を考慮する。これにより、実験で観察される発振周波数のシフトや圧力振幅の変動をより正確に再現できるようになると期待される。最終的には、燃焼振動がどのような配管設計で抑制できるか、設計指針を示すことを目指す。音響ネットワークモデルの高度化に必須のソフトウェアを安定運用するため、MATLAB ライセンス保守費用を計上した。

(5) 研究成果のまとめ(2026 年 2 月～3 月)

4.2. 国際学会発表と連携拠点の拡充

2025 年度には、研究成果を海外の研究者へ向けても発信し、国際的なフィードバックを得ることを目標とする。とくに、カナダ開催の FSSIC2025 (7th symposium on fluid-structure-sound interactions and control) への参加を計画しており、海外研究者との意見交換によって研究の進展を図る。燃焼振動に関する成果発表を行うとともに、カナダの研究者を中心とした国際的な連携を深め、新規共同研究の可能性を探る。そのため、国際学術会議(FSSIC2025)旅費・参加登録料を予算計上した。

4.3. 今後の展望

2025 年 1 月～3 月にかけては、実験装置の改良とモデル検証の下準備が中心となるが、2025 年度(4 月以降)は大規模分岐音響管実験によって燃焼振動と配管系の連成特性を本格的に探究し、国際会議への参加を通じて研究成果の発信と海外研究者との連携を推進する。これらの成果をもとに、理論と実験を融合した高精度な燃焼振動予測手法を確立し、将来的には燃焼振動を抑制する配管設計や運転条件の提案へとつなげたいと考えている。

以上の計画の実施により、前年度の活動で整備した研究環境と初期モデルを一層発展させ、燃焼振動現象の解明と制御手法の確立に寄与する包括的な成果を得ることを目指す。