

京都大学	博士 (工学)	氏名	長尾 順
論文題目	Numerical Study on Unstable Combustion: Combustion Instability and Combustion Noise (不安定燃焼の数値的研究: 燃焼振動および燃焼騒音)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、不安定燃焼の一種である燃焼振動および燃焼騒音の数値的研究の結果をまとめたものであり、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景および既往研究との関連性について概観し、本研究の目的と重要性について述べている。</p> <p>第2章では、燃焼振動の基礎理論について概説している。ここで基礎理論として、熱音響モード、燃焼振動が駆動される条件 (Rayleigh の条件)、フィードバックプロセスを取り上げている。熱音響モードについては、燃焼振動が熱音響における共鳴振動現象であることから、振動強度や周波数の決定因子となる、共鳴モードの種類と特性について整理している。Rayleigh の条件については、流体の支配方程式から音響エネルギーの支配方程式を導出したうえで、音響エネルギーの支配方程式から音響エネルギーが増加する、つまり燃焼振動が駆動される条件について論じている。フィードバックプロセスについては、燃焼振動下で様々な振動現象の因果関係がループを形成していることが知られているため、それらの個々の原因と結果となる現象を詳細にまとめている。</p> <p>第3章では、液体燃料を用いた希薄燃焼での燃焼振動を対象に、3次元の数値計算による検討を行っている。具体的には、ケロシンを燃料としたバックステップ燃焼器を対象に、当量比を 0.6, 0.8, 1.0 と変化させた Large-eddy simulation (LES) を行い、その振動強度を含めた振動特性への影響を調べている。</p> <p>この結果、数値計算を行った全当量比 (0.6, 0.8, 1.0) の条件下で燃焼振動が発生すること、また、その圧力の振動強度は当量比の減少に伴い減少し、最も低い当量比 0.6 において顕著な時間変化が見られることを明らかにしている。さらに、新たに提案した、圧力と熱発生率の相関の時間変化を考察することができる指標“Time Gap”を用いることにより、当量比 0.6 においてのみ、圧力と熱発生率の相関が変化し、圧力振幅が増大するときに圧力と熱発生率の振動の位相差が小さくなることを明らかにしている。加えて、この指標は圧力振幅の時間変化に先行して変化するため、燃焼振動予測にも使用可能であることを示している。</p> <p>第4章では、気体燃料を用いた希薄燃焼での燃焼振動を対象に、3次元の数値計算による検討を行っている。具体的には、水素を燃料とした弱旋回燃焼器を対象に、当量比を 0.39 とした LES を行い、燃焼器上流の振動を含めた振動特性を調べている。また、同燃焼器を対象とした先行の実験的研究において世界で初めて観察された、特異な振動現象の本計算手法による再現性についても調査している。</p> <p>この結果、実施された数値計算は、希薄水素弱旋回火炎にて、実験で初めて観察された、火炎の逆円錐形状の火炎と平坦な火炎、および流入気体の拡散流れと収束流れのスイッチング現象を高精度に再現可能であることを示している。また、拡散流れの位相においては、速い流入気体が火炎周辺部に存在し、火炎周辺部が下流に押し流さ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	長尾 順
<p>れて火炎は逆円錐形状になる一方で、収束流れの位相においては、火炎周辺部の流速が遅くなり、周辺部の火炎が上流に火炎伝播するため、火炎は平坦な形状となることを明らかにしている。さらに、本数値計算は、実験で観察された燃焼振動が瞬間的に減衰する現象も再現可能であること、また、この現象が、火炎が瞬間的かつ局所的に上流に伝播し、火炎が燃焼器入り口の一部に付着することによって、燃焼振動モードを変化させ、火炎の振動を安定化させることに起因することを明らかにしている。</p> <p>第5章では、気体燃料を用いた希薄燃焼での燃焼騒音を対象に、3次元の数値計算による検討を行っている。具体的には、水素を燃料とした弱旋回燃焼器を対象に、当量比を0.45としたLESを音響解析に用いるAcoustic perturbation equations for reacting flow (APE-RF)とカップリングさせて実施し、壁面を火炎付近に配置することによる燃焼騒音の影響を調査している。同時に、反応乱流場における燃焼騒音の数値計算手法として反応乱流場と音響場を分離して計算するLES/APE-RF法について、壁面境界条件および並列計算の最適化手法についての検討を行っている。</p> <p>この結果、LES/APE-RF法が、壁面内に仮想的に物理量を与えるゴーストポイント法を採用することによって、音波の反射や回折を良好に再現可能であることを示している。また、並列計算の最適化について、反応乱流場と音響場の同領域を同じ並列計算プロセスに担当させることによって、計算に必要な物理量の補間に際する通信を最低限に抑えることができ、補間にかかる計算速度を既往の手法に比べて約200倍に高速化が可能であることを示している。さらに、これらの手法を用いたLES/APE-RF法が、実験で観察された、壁面なし条件で見られていた騒音周波数ピークが壁面あり条件で消滅する現象を良好に再現可能であることを示している。加えて、この現象が、壁面がない場合は、乱流の変動によって周期的な火炎の振動が発生し、音波を発生させていたのに対して、火炎付近に壁面がある場合は、火炎の一部が壁面と干渉して周期的な火炎の振動が抑制され、音波の発生が消滅したことに起因することを明らかにしている。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の研究課題についても言及している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、不安定燃焼の一種である燃焼振動および燃焼騒音の数値的研究の結果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 液体ケロシンを燃料としたバックステップ燃焼器における燃焼振動の数値計算により、計算を行った全当量比(0.6, 0.8, 1.0)中で、燃焼器内の圧力振動強度の時間変化は、当量比が最も低い 0.6 で顕著になることを明らかにした。また、新たに提案した“Time Gap”を用いた解析により、この低当量比条件下では、圧力と熱発生率の相関が時々刻々に変化し、それらの振動の位相差が小さいときに圧力振動が増大することを明らかにした。
2. 希薄水素を燃料とした弱旋回燃焼器の燃焼振動の数値計算が、先行実験で初めて観察された希薄水素弱旋回火炎に特有の現象である、逆円錐形状の火炎と平坦な火炎のスイッチング現象、および流入気体の拡散流れと収束流れのスイッチング現象を高精度に再現可能であることを示した。さらに、本数値計算は、先行実験で観察された燃焼振動が瞬間的に減衰する現象も再現可能であること、また、この現象が、火炎が瞬間的かつ局所的に上流に伝播し、燃焼器入り口の一部に付着することによって、火炎の振動を安定化させることに起因することを明らかにした。
3. 希薄水素を燃料とした弱旋回燃焼器の燃焼騒音について、開放火炎の周囲で計測される騒音周波数のピークが火炎付近に壁面を置くことで消滅するという実験で観測された現象を、同火炎を対象とした数値計算により、数値的に精度よく再現可能であることを示した。さらに、この現象が、壁面がない場合は、バーナ近くの強いせん断流の近くで生じる乱流の周期運動によって火炎の振動が発生し、これが音波を発生させていたのに対して、火炎付近に壁面がある場合は、火炎の一部が壁面と干渉することにより、周期的な火炎の振動とそれに伴う音波の発生が抑制されることに起因することを明らかにした。

以上、本論文は、燃焼器の設計においてその対策が課題となっている不安定燃焼のメカニズムの一端を、大規模かつ高精度な数値計算により明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年2月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。