

京都大学	博士（工学）	氏名	柚木啓太
------	--------	----	------

論文題目	Numerical Investigation on CO Emissions in Lean Premixed Combustion (希薄予混合燃焼におけるCO排出に関する数値解析による研究)
------	---

(論文内容の要旨)

本論文は、希薄予混合燃焼場におけるCO排出に関する研究の結果をまとめたものであり、5章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景及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。

第2章では、天然ガスの主成分であるメタンを燃料として、冷却壁を有する予混合燃焼場を対象に、1次元及び2次元の数値シミュレーションによる検討を行っている。熱損失を伴う冷却壁面近傍でのCO生成挙動を正確に捉えるため、乱流モデルを用いず、燃焼反応モデルとしては各化学種の燃焼反応過程を物理空間で厳密に解く詳細化学反応モデル、もしくは同過程を事前に1次元で解いてデータベース化し、そのデータベースを物理空間の流れ計算とリンクさせて解く非断熱型Flamelet法の一つである、Non-Adiabatic Flamelet Generated Manifolds (NA-FGM) モデルを用いている。詳細化学反応メカニズムにはGRI-mech3.0を用いており、53化学種、325反応を考慮している。

詳細化学反応モデルを用いた1次元数値シミュレーションの結果、冷却壁面近傍ではCO酸化反応のクエンチ、すなわちCO消費速度の低下によるCO₂への転換率の低下が起こること、また、その傾向は、低当量比、高圧力、低壁面温度条件において顕著であり、特に、壁面温度の感度が最も高いことを明らかにしている。さらに、2次元数値シミュレーションでも同様の傾向が起こることを確認し、実際のガスタービン燃焼器からのCO排出量が低当量比条件において増加する要因が、CO生成量の増加ではなく、CO酸化反応のクエンチにより、COが下流まで残存することに起因することを示唆している。加えて、NA-FGMモデルは、詳細化学反応モデルにおける壁面温度低下に伴うCO酸化反応のクエンチ現象を低計算負荷で良好に再現可能であり、同モデルが乱流希薄予混合燃焼のCO排出量予測に有効であることを明らかにしている。

第3章では、同軸噴流バーナ及び冷却壁を有するモデル燃焼器内の希薄予混合乱流燃焼場を対象に、燃焼モデルとしてNA-FGMモデルを用いた3次元のLarge Eddy Simulation (LES/NA-FGM) による検討を行っている。また、NA-FGMモデルの有効性を検証するため、断熱燃焼モデルである、Adiabatic Flamelet Generated Manifolds (A-FGM) モデルを用いたLES/A-FGMを併せて実施し、既往研究で実施された燃焼実験結果との比較、検証を行っている。燃料はメタンとし、CO排出量に及ぼす熱損失と当量比 ($\phi=0.43\sim 0.50$) の影響を調査している。詳細化学反応メカニズムには、GRI-mech3.0を用いており、53化学種、325反応を考慮している。

この結果、LES/NA-FGMは、LES/A-FGMに比べて、低当量比 ($\phi=0.43$) 条件下でCO排出量が増加する計測結果を良好に再現しており、希薄予混合乱流燃焼場においてCO排出量を正確に予測するには、冷却壁面近傍で生じる熱損失がCO生成及び消費を含む化学反応に及ぼす影響を考慮することが重要であることを明らかにしている。また、低当量比 ($\phi=0.43$) 条件下でCO排出量が増加する原因は、CO生成量が増加するためではなく、高当量比 ($\phi=0.50$) 条件下に比べてCO酸化反応のクエンチが顕著に

京都大学	博士（ 工学 ）	氏名	柚 木 啓 太
<p>なること、また、このクエンチが起こる要因として OH ラジカルの影響が大きいことを明らかにしている。具体的には、低当量比（$\phi=0.43$）条件下では、燃焼後期における OH ラジカル生成量が減少することで、OH ラジカルの消費によって生じる CO の CO₂ への転換が抑制されるため、CO 排出量が増加することを見出している。</p> <p>第 4 章では、冷却空気を伴う実燃焼器内の部分予混合乱流燃焼場を対象に、3 次元の LES による検討を行っている。実燃焼器内では、拡散燃焼と予混合燃焼とが共存する複雑な部分予混合燃焼場を形成するため、拡散燃焼から予混合燃焼までシームレスに評価可能な燃焼モデルである Hybrid Turbulent Combustion (HTC) モデルを提案し、この HTC モデルを用いた LES/HTC を実施している。解析結果との比較、検証のため、大気圧下での燃焼実験による計測も行っている。燃料はメタンとし、冷却空気が CO 排出量に与える影響を調査している。詳細化学反応メカニズムには、GRI-mech3.0 を用いており、53 化学種、325 反応を考慮している。</p> <p>この結果、LES/HTC は、実燃焼器内では実際に拡散燃焼と予混合燃焼とが共存する複雑な部分予混合乱流燃焼場が形成されていることを示すとともに、このような複雑な燃焼場においても燃焼器内の冷却空気を伴う壁面近傍における CO 濃度分布を良好に再現可能であることを明らかにしている。加えて、CO は、火炎帯及び冷却空気が注入される壁面近傍において生成され、下流まで残存すること、また、これは燃焼室下流での冷却空気の影響による温度低下によってメタン及び CO の酸化反応がクエンチを起こすことに起因することを明らかにしている。</p> <p>第 5 章は結論であり、本研究で得られた結果を要約すると共に、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、希薄予混合燃焼場における CO 排出に関する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. 乱流モデルを用いず、燃焼モデルとして詳細化学反応モデルもしくは非断熱型フレイムレットモデルの一種である Non-Adiabatic Flamelet Generated Manifolds (NA-FGM)モデルを用いた冷却壁面近傍燃焼場の 1 次元及び 2 次元の数値解析により、NA-FGM モデルは、CO 排出量を高精度、且つ詳細化学反応モデルに比べて低計算負荷で予測可能であることを示した。また、ガスタービン燃焼器からの CO 排出量が低当量比条件下で増加する要因は、CO 生成量の増加ではなく、CO 酸化反応のクエンチ (CO 消費速度の低下による CO₂ への転換率の低下) により、CO が下流まで残存するためであることを明らかにした。
2. 燃焼モデルとして NA-FGM モデルもしくは断熱型 FGM (Adiabatic FGM, A-FGM)モデルを用いたモデル燃焼器内の希薄予混合燃焼場のラージ・エディ・シミュレーション (LES)により、LES/NA-FGM は、LES/A-FGM に比べて、低当量比 ($\phi=0.43$) 条件下で CO 排出量が増加する計測結果を良好に再現可能であること、また、希薄予混合乱流燃焼場の CO 排出量予測には、冷却壁面近傍における熱損失が化学反応に与える影響の考慮が重要であることを明らかにした。さらに、CO の排出量が増加、すなわち CO 酸化反応のクエンチが起こる要因として、OH ラジカルの影響が大きいことを明らかにした。
3. 燃焼モデルとして拡散燃焼から予混合燃焼までシームレスに評価可能な Hybrid Turbulent Combustion (HTC)モデルを開発した。また、その HTC モデルを用いた実機燃焼器内の部分予混合燃焼場の LES/HTC により、拡散燃焼と予混合燃焼とが共存する複雑な燃焼場においても、火炎帯及び冷却空気が注入される壁面近傍において CO が生成し、下流まで残存することを明らかにした。また、これは、冷却空気によって CO 酸化反応のクエンチが起こることに起因することを明らかにした。

以上、本論文は、ガスタービン燃焼器内燃焼場を高精度に予測可能な数値解析手法を確立するとともに、CO 生成メカニズムの一端を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 4 年 2 月 17 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。