

京都大学	博士（工学）	氏名	甲斐玲央
論文題目	Numerical Study on Flame-Wall Interaction in Gas and Spray Combustion (ガスおよび噴霧燃焼における火炎-壁相互作用に関する数値解析による研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、層流予混合火炎、乱流予混合火炎、乱流噴霧火炎における火炎-壁相互作用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。</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、遮熱材壁、またはAl合金壁に向かって伝播する層流予混合火炎を対象に、1次元および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。材料の異なる壁における壁面熱流束を正確に予測するため、反応流体計算と壁内熱伝導計算を連成させた共役熱伝達解析を行っている。当量比を0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 圧力を1 MPa, 2 MPa, 4 MPaと変化させた計算を行っており、これらの変化が遮熱材による壁面熱流束に及ぼす影響を調査している。当量比の影響を調査する場合には、燃料として水素、メタン、エタン、プロパンを用いており、水素の燃焼反応には9化学種19反応から成る詳細反応機構を、メタン、エタン、プロパンの燃焼反応には70化学種318反応から成る詳細反応機構を用いている。一方、圧力の影響を調査する場合には、燃料としてメタンを用いており、その燃焼反応には2段総括反応モデルを用いている。</p> <p>この結果、燃料の種類によらず、比熱容量と熱伝導率が小さい遮熱材の壁面では、自動車エンジンにおいて通常使用されるAl合金の壁面と比較して、壁面温度が上昇し、壁面熱流束が1-2%程度減少することを確認している。また、この減少率は、当量比が1、すなわち化学量論比から離れるほど増大すること、また、この傾向は燃料の種類によらないことを明らかにしている。加えて、この当量比に対する減少率の変化は、壁面における気相の熱伝導率、および壁面における気相の温度勾配の時間変化により明確に説明できることを示している。さらに、メタンを燃料とした場合において、遮熱材による壁面熱流束の減少率は、圧力の増加に伴い増大することを明らかにしている。</p> <p>第3章では、摩擦レイノルズ数が395のチャンネル乱流場において、等温壁と干渉するV字形乱流予混合火炎を対象に、3次元の数値シミュレーションによる検討を行っている。具体的には、壁乱流が壁面近傍における火炎挙動に及ぼす影響、および乱流燃焼モデルの開発において重要となるSurface Density Function (SDF)の壁面近傍における統計的挙動について詳しく調査している。燃料としてはメタンを用いており、当量比を1としている。また、メタンの燃焼反応には2段総括反応モデルを用いており、壁面近傍における乱流火炎の挙動を正確に捉えるため乱流モデルは用いていない。</p> <p>この結果、壁近傍における火炎挙動は乱流の組織構造である縦渦の影響を強く受けること、具体的には、スイープ運動により、チャンネル中心部から壁面への火炎伝播は促進され、イジェクション運動により、壁近傍の未燃ガスがチャンネル中心部に持ち上げられ、下流部において未燃ガスのポケットが形成されることを明らかにしている。また、壁面近傍においてSDFの平均値は減少し、遷移領域、および粘性底層におけるSDFの平均値は、それぞれ外層領域の値の約90%、10%にまで減少することを明らか</p>			

京都大学

博士（工学）

氏名

甲斐玲央

にしている。さらに、この壁面近傍における SDF の平均値の減少への寄与は、壁乱流による速度勾配の寄与と比べて、熱損失による反応の抑制の寄与が大きいことを明らかにしている。

第4章では、壁に噴流状態で衝突する乱流噴霧火炎を対象に、3次元の数値シミュレーションによる検討を行っている。具体的には、燃料噴霧の噴射速度を 100 m/s, 150 m/s, 216 m/s の3ケースに変化させた計算を実施することにより、燃料噴霧の噴射速度が壁面熱流束に及ぼす影響を詳しく調査している。乱流燃焼モデルとして、火炎片データを事前にデータベース化し、そのデータベースを参照しながら燃焼場の計算を行う flamelet 法の一種である、Non-Adiabatic Flamelet/progress-variable 法を用いている。燃料としてはノルマルドデカンを用いており、そのデータベースは、255 化学種 1466 反応からなる詳細反応機構を用いた 1 次元数値シミュレーションを実施することにより作成している。本計算では、反応流体計算と壁内熱伝導計算を連成させた共役熱伝達解析を実施している。また、熱伝導、熱伝達に加え、気相および壁面からのふく射伝熱、さらには、壁面における液膜の形成も考慮している。

この結果、燃料噴霧の噴射速度が大きいほど、また噴流の中心に近いほど、壁面近傍における乱流熱輸送が促進され、壁面熱流束は大きな値を示すことを明らかにしている。また、対流熱流束とふく射熱流束からなる壁面熱流束の内、ふく射熱流束の占める割合は、噴射速度が小さいほど、また噴流の中心から離れるほど大きくなり、壁面全体で 17–30% 程度を占めることを明らかにしている。このことから、高精度の壁面熱流束予測式を構築するためには、ふく射の影響は無視できず、対流熱流束とふく射熱流束の寄与を区別して厳密に考慮する必要があることを示している。

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。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、層流予混合火炎、乱流予混合火炎、乱流噴霧火炎における火炎-壁相互作用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. 遮熱材壁に向かって伝播する層流予混合火炎を対象とした1次元もしくは2次元の共役熱伝達解析により、比熱容量と熱伝導率の小さい遮熱材の壁面では、自動車エンジンにおいて通常使用されるAl合金の壁面に比較して、壁面温度が上昇し、壁面熱流束が1-2%程度減少することを確認した。また、この減少率は、化学量論比から離れるほど、また圧力を上げるほど増大することを明らかにした。
2. チャンネル乱流場において等温壁と干渉する乱流予混合火炎を対象とした3次元直接数値計算により、壁近傍における火炎挙動は乱流の組織構造である縦渦の影響を強く受け、スイープ運動により壁面への火炎伝播は促進され、イジェクション運動により下流部における未燃ガスのポケットが形成されることを明らかにした。また、熱損失の影響を受けて、乱流燃焼モデルの開発において重要となるSurface Density Functionが粘性底層で急激に減少することを明らかにした。
3. 壁に噴流状態で衝突する乱流噴霧火炎を対象とした3次元共役熱伝達解析により、燃料噴霧の噴射速度が大きいほど、また噴流の中心に近いほど、壁面近傍における乱流熱輸送が促進され、壁面熱流束が大きな値を示すことを明らかにした。また、対流熱流束とふく射熱流束からなる壁面熱流束の内、ふく射熱流束の占める割合は、噴射速度が小さいほど、また噴流の中心から離れるほど大きくなり、壁面全体で17-30%程度を占めることを明らかにした。このことから、高精度の壁面熱流束予測式を構築するためには、ふく射の影響は無視できず、対流熱流束とふく射熱流束の寄与を区別して厳密に考慮する必要があることを示した。

以上、本論文は、燃焼器壁の遮熱特性、乱流構造、およびふく射が、壁近傍における火炎挙動や壁面熱流束に強く影響すること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。