

審査の結果の要旨

氏名 弘畑 幹鐘

本論文「非予混合火炎の LES に関する基礎研究」は、実用的な燃焼器に一般に見られる複雑な乱流非予混合火炎に対して有効な非定常数値解析法を新たに提案し、従来数値予測の困難であった吹き上がりバーナ火炎の流れ構造を予測した。

本論文は以下の4章より成っている。

まず、第1章において乱流火炎の数値予測の研究状況を概観し、特に、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)法が汎用性の高い数値予測法として期待されること、および、実用的な燃焼火炎に対しての flamelet approach の有効性を述べて、これらの実用的解析モデルの構築と複合火炎への適用検証を本論文の目的として取り上げている。

第2章では、燃焼反応の時間空間スケールが乱流変動スケールより十分小さい火炎に対して有効な近似として、乱流中における実際の燃焼反応が薄い火炎面にのみ存在すると考える flamelet approach の概念を導入し、これに基づく乱流火炎 LES 解析モデルを定式化する。まず、大きな温度変化、密度変化を伴う低マッハ数の燃焼流れの定式化と、その LES モデルを導出する。次に、拡散火炎に対しては、flamelet approach に基づいて、保存スカラー（混合分率）により全ての燃焼反応を代表するものとしたモデル化を採用する。ここで、燃焼反応に対しては層流火炎データベースを適用する Laminar flamelet model (Peters, 1986)を、SGS 乱流変動の近似には時間平均モデルにも採用されているベータ関数による推定 PDF モデルを導入して LES 解析モデルを定式化した。さらに、吹き上がり火炎などに見られる部分予混合火炎をあらゆる方法として、同じく flamelet approach に基づく予混合火炎 LES 解析モデルとして有効性の確認されている G-方程式を上記の拡散火炎モデルと連成して用いる解析法を新たに提案している。すなわち、1)濃度混合は混合分率で表現する、2)部分予混合の伝搬性を G-方程式で表現する、3)G を指標パラメータとして、火炎面($G=G_0$)下流の既燃領域は混合分率のみの関数として拡散火炎表現する、4)局所消炎効果を G-方程式の火炎伝播項に導入する、ことによって吹き上がり火炎基部の triplet flame がモデル化されている。これら結果として、複数の乱流火炎モデルの連成による汎用的な LES 解析法が提案された。

第3章においては、上記の flamelet approach に基づく乱流火炎 LES 解析を水素バーナ拡散火炎への適用して、その有効性を検証している。まず、乱流バーナ火炎の LES 解析における具体的な数値計算法を示し、特に流入条件の変動成分の適切な評価方法を数値検証により明らかにした。数値予測結果は各種乱流統計分布予測において実験値との良好な一致が示された。さらに、従来実験などでは明瞭ではなかった噴流中の3次元渦構造と火炎変形との関連性が数値計算結果に基づく可視化により解析された。

第4章では、典型的な複合火炎の例として、メタン-空気同軸バーナの吹き上がり火炎を

対象として数値検証が示される。数値検証結果に基づいて上記モデルの未定係数を評価決定し、さらに、数値解析モデルの物理的解釈の妥当性、予測の有効性、および、改良されるべき課題が述べられている。特に、吹き上がり火炎基部の局所伝播速度に対してサブグリッドスケールの triplet flame 周囲の流れ構造を考慮した修正を行うことで単純予混合火炎でのモデル定数との整合性が保たれること、吹き上がり距離に対する各要素モデルの物理的効果として消炎モデルと乱流火炎伝播速度モデルがそれぞれ Co-flow および主流速度の影響を支配していること、などが明らかにされた。火炎および流れ場の統計分布や可視化などから吹き上がりバーナ火炎の基本構造は本解析モデルによって予測されていると結論付けている。しかし、吹き上がり距離の主流速度による変化予測については実験との明らかな差異がみられることに対しては、拡散火炎モデルと G-方程式予混合火炎モデルの連成において G 分布の SGS 変動を考慮した定式の必要性、あるいは、乱流燃焼速度モデルの影響次数の妥当性などを検討し、今後の火炎解析モデルの改良の可能性として指摘した。

以上の研究成果を審査するに、乱流 LES 法において吹き上がり火炎などの複合火炎に適用しうる乱流燃焼流れ解析モデルを新たに提案したことのオリジナリティと学術的価値は大きい。また、実機を想定したバーナ火炎の数値計算結果を示し、解析モデルの妥当性の検証と改良の指針を与えたことによる、燃焼流 LES 実用化へ向けての工学的寄与も評価できる。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。