

(論文内容の要旨)

本論文は、燃料噴流における混合気形成過程の解明および燃焼制御指針の提案を目指し、非定常流動予測手法である **Large Eddy Simulation (LES)** を用いて、密度の異なる高速非定常噴流内の流動ならびに乱流混合過程を解析した結果をまとめたもので、6章から構成されている。

第1章の緒論では、噴流が多くの燃焼機器における燃料－空気混合過程にみられる基本様式であり、とくに直接噴射式ガスエンジンの最適燃焼制御や有害物質低減を図るためには、噴流内部のガス流動ならびに濃度不均一について理解を深める必要があることを示している。その上で、これまで行われてきた噴流発達・混合気形成過程および火花点火燃焼・自着火燃焼過程に関する基礎研究の動向と得られた知見をまとめるとともに、そのような不均一の強い対象を解析するためには、非定常流動を記述できる **LES** が有効な手法であることを示し、本研究の目的と取り組むべき内容を提示している。

第2章では、密度の異なる非定常噴流の発達を **LES** に基づいて予測し、せん断層付近に生じる渦の挙動と混合過程について検討している。その結果、噴射初期の立ち上がり応答時間が長いと乱れの生成が遅れて噴流内微視混合が進行しないこと、密度の小さな噴流流体ではせん断層付近に生じる流動が速やかに減衰・散逸するために、投入燃料体積に対する空気取り込み体積が少なくなること示している。一般に、噴流角が広いと空気取り込みが多く物質混合が活発であると考えられるが、噴流流体密度が小さい場合には運動量を失った噴流流体が滞留し、空気取り込み体積は流体密度が大きい場合に比べむしろ少ないことを明らかにしている。さらに、同じ投入運動量であれば密度が小さいほど下流において乱れが速やかに散逸するために噴流先端到達距離はやや増加するものの、いずれの噴流流体でも噴射初期の発達経過はほぼ同様となり、ノズル径の15倍より下流では概ね相似領域に推移する。

第3章では、**LES** に仮想ノズルの考えを適用し、直接噴射式ガス機関に見られる高速非定常噴流を幅広い条件で模擬することを試みるとともに、各種噴射条件における混合気形成過程について検討している。その結果、噴射圧力が高い条件ほど先端到達距離は大きくなるものの、ノズル出口直下の見かけのノズル径の増大に伴い、投入燃料に対して噴流内に取り込む空気体積は少なくなるとともに混合も進行しないことを明らかにしている。すなわち、メタンに比べ密度の低い水素では噴流内の流動が速やかに減衰して噴流内に取り込む空気導入体積が減少し、広い可燃範囲と高い燃焼速度に加え比較的小スケールの乱れにより、同一点火位置であっても燃焼促進に効果的な条件が揃うことになる。さらに、見かけのノズル径ならびにノズル出口の音速から算出される無次元時間および無次元先端到達距離により、高圧噴射による噴流の発達・混合状況が推測できることを示している。

第4章では、高速非定常メタン噴流の火花点火安定性について可燃混合気形成の観点から検討し、直接噴射方式の天然ガスエンジンに有効と考えられる噴射条件を提案している。その結果、可燃混合気は噴射開始初期においては乱れの強い噴流境界において薄く分布するのみで点火が困難である可能性が極めて高いこと、噴流発達の相似性からノズル径に対して十分下流でないと可燃混合気塊を噴流内部に拡大できないこと、比較的弱いせん断のもとでしか点火が確保できないこと、など渦を時間的に平滑化する従来の計算手法では予測が困難な混合気の不均一分布を LES によって予測できることを示している。これらに基づき、高速噴流の点火安定のためには可燃混合気領域をまず確保し、その上でその領域における流動を抑制する必要があることを示している。

第5章では、密度不均一場における LES 精度向上の指針を得るために、LES における密度加重平均の有効性について検証を行うことを主な目的として、粒子画像流速計測法 PIV およびレーザ誘起蛍光法 LIF を同時に用い、速度の空間変動と濃度の不均一を同時に 2 次元面計測するシステムを構築し、乱流輸送過程について検討を行うとともに、数値流体手法で重要となる乱流シュミット数の特定ならびに SGS スカラー流束モデルの評価を行い、各種モデルに及ぼす密度の影響について検討している。その結果、乱流シュミット数は噴流流体密度によらず噴流半径方向の断面上ではほぼ 1 程度になることを明らかにするとともに、SGS スカラー流束モデルの評価においては噴流流体密度によらずモデルの特徴はほぼ同じであり、密度変動を伴う場においてもスケール相似則モデルで高精度に乱流混合過程を予測できる可能性があることを示している。

第6章の結論では、本研究で得られた成果を要約し、とくに LES が非定常ガス流動解析手法の一つとして噴流内乱流混合・燃焼解析ならびにエンジン内現象の解明に広く活用できることを述べるとともに、局所不均一場の定量的予測精度の向上、せん断渦構造および噴霧・噴流の組織的構造の燃料噴射による制御指針の提案、消炎機構の記述、など LES 応用の可能性および今後の展開についてまとめている。

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、燃料噴流における混合気形成過程の解明および燃焼制御指針の提案を目指し、非定常流動予測手法である **Large Eddy Simulation (LES)** を用いて噴流内の流動ならびに乱流混合過程を解析したもので、主な成果は以下の通りである。

1) 非定常噴流の発達を **LES** に基づき予測し、せん断層に生じる渦の挙動と混合過程を検討した。とくに噴射弁応答性および噴流密度が混合気形成に及ぼす影響を調べた結果、応答が速いほどせん断層の渦が速やかに形成されて混合が進むこと、密度が小さい流体ほど渦の散逸が速く、空気取込みが少なくなり混合が遅れること、等を示した。

2) **LES** と仮想ノズルの考えを組み合わせ高速非定常噴流の流動予測に適用し、噴射条件が混合気形成に及ぼす影響について検討した結果、ノズル径が小さく噴射圧力が低いほど見かけのノズル径が小さくなり、混合が速やかに進行して希薄化することを明らかにした。さらに、水素では速やかに可燃混合気を形成して急激燃焼の可能性が高まるのに対し、天然ガスでは可燃範囲が狭く乱れの作用が大きくなることを示した。

3) 直接噴射式天然ガスエンジンにおいて問題となる点火不安定のメカニズムを **LES** によって解析し、高噴射圧力時における不安定が主に可燃混合気の形成遅れに起因することを明らかにするとともに、組織的変動を利用した混合促進法を提案して、点火制御に有効となる可能性を示した。

4) 密度変動場における **LES** 予測精度の向上を図るために、粒子画像流速測定法およびレーザ誘起蛍光法を用いて流速分布と濃度分布の同時計測を実施し、**LES** における **SGS** 乱流混合モデルの実験評価を試みた。その結果、いずれの流体密度においても **Scale Similarity** モデルが最も精度よく乱流混合過程を記述できること、時間平均型モデルにおける乱流シュミット数が幅広い密度変化の条件下で概ね 1 程度であること、など **LES** 計算の際に有用な知見を得た。

以上、本研究は **LES** による非定常流動予測精度の改善、それを活用した混合制御法の提案、噴流点火における不安定メカニズムの解明ならびに最適噴射条件の提示を通じて、各種燃焼機器の効率向上技術の発展に大きく貢献するもので、得られた知見は学術上、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（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 21 年 2 月 20 日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。