

早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科

博士論文概要書

論文題目

ディーゼル機関における
三次元非定常乱流場の噴霧燃焼と微粒子生成
過程に関する研究

A study on spray combustion and soot
formation processes in three-dimensional
unsteady turbulent flow fields
in diesel engines

申請者

氏名

周	蓓霓
Beini	Zhou

研究科・研究指導
(課程内のみ)

環境・エネルギー研究科 環境モビリティ研究

2016年 2月

近年，一層の大気汚染の防止と地球温暖化の抑制の観点から，自動車用ディーゼルエンジンに対して段階的に厳しい排出規制や燃費基準への適合が求められる．その対策としては，排気の後処理への負担軽減と燃費の改善のため，幅広い運転範囲における燃焼自体の改善が不可欠である．近年，コンピュータの発達に伴い，CFD (Computational Fluid Dynamics) が非常に有用なツールとして注目され，高効率で低排出ガスを有するディーゼルエンジンの燃焼システムを開発するための手段として利用され始めている．このような状況にあつて，CFD を用いてエンジン内の現象をさらに高精度に予測することが非常に重要な課題となっている．

エンジンの燃焼過程には，乱流を伴う高温高圧場での燃料の微粒化，蒸発，混合をはじめとする物理的過程に加え，それと同時に燃焼反応が進行する化学的過程を混在するため，CFD の利用に当たっては，それらの精緻なモデル化が求められる．最近，乱流計算の手法の一つとして，LES (Large Eddy Simulation) が実用的なエンジン燃焼解析ツールとなりつつある．LES は，計算格子で捉えられない乱流の小さなスケール成分のみをモデル化し，比較的粗い計算格子でも精度の高い計算結果を得ることを可能とする．このため，これを適用することで，エンジン筒内の三次元非定常乱流場における噴霧燃焼や有害排出物の生成を高精度に予測することが期待されている．

そこで本研究では，米国 Los Alamos 国立研究所において開発されたエンジン数値熱流体コード KIVA を改良して用いることで，ディーゼル機関における噴霧燃焼と有害排出物の生成の予測精度を改善することを狙いとした．具体的には，エンジン筒内の乱流現象に着目し，乱流解析手法として LES モデルを計算コードに導入した．さらに，詳細な素反応過程を考慮することによって排出ガスの予測精度の向上を図った．これによって，従来の解析手法である RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations) モデルに比べて同じ計算格子，同じ離散手法を用いて燃料混合や非定常流れなどに関するさらに詳しい情報を解析することを目的とした．本論文は以下のように，5章から構成されている．

第1章は序論として，研究背景と目的，意義について述べる．まず，エンジン内流れに関する従来研究の現状について詳しく説明した．これまで従来のCFD 応用例では RANS モデルに基づく解析手法が主流になっており，アンサンブル平均化された解が提供されている．このような手法は，エンジン内の現象のサイクル平均値を予測対象として評価し，サイクル平均化された計測データとの比較により，それを検証することは，一般的なエンジン設計において妥当と考えられる．しかしながら，RANS モデルでは，噴霧燃焼におけるサイクル変動に起因する現象のメカニズムや，空間的に変化する物理量の瞬時分布などの非定常現象を詳細に解析することは出来ない．これに対して，LES では進

化した乱流モデルとして、乱流をスケール分離し、複雑な実形状を再現する解析法として有用である。また、エンジン内の流動解析においても、噴霧や燃焼に伴う複雑な連成現象をモデル化することによって、複雑な物理現象を解明できると考えられる。このように、すべての現象を一括して取り扱うことでは、予測精度からも、計算負荷の観点からも合理的と言える。

第 2 章においては、数値解析を実施するにあたって利用する多次元数値流体シミュレーションコードの構成について説明した。まず、本研究で導入した LES モデルについて述べた。具体的には、KIVA をベースコードとして、各支配方程式にトップハットフィルタを適用することによって、乱流における渦のスケールを分解する方法を採った。その改善されたサブグリッドスケールの乱れに関する SGS (Sub-Grid Scale) 応力項のモデル化や、壁近傍のモデル化などについて詳細に説明した。次に、ディーゼルエンジンにおける拡散燃焼過程に対して大きな影響を与える噴霧微粒化モデルの概要と格子依存性を低減する手法についても述べた。

また、燃焼反応の詳細な記述に必要とされる素反応過程を考慮するために、CHEMKIN-II パッケージ内の各種サブルーチンを KIVA コードに連成させた。本研究では高速な陽解法 ODE (Ordinary Differential Equations) ソルバーである ERENA を KIVA コードに適用する方法を説明し、これにより詳細化学反応計算時間の大幅な短縮を図った。さらに、微粒子の生成過程について、成長、核生成、低級不飽和炭化水素 (C_2H_2) による表面成長反応 (Hydrogen Abstraction C_2H_2 Additon), 活性種 (OH, O_2) による表面酸化反応, 衝突・凝集の一連の過程を記述する現象論モデルの数値解析方法を示した。

第 3 章では、定容燃焼器を用いた噴霧燃焼の高速度観察を行い、第 2 章で述べた各モデルを連成した計算コードによる計算結果との比較を通じて精度を検証した結果について述べた。計算では、円筒形の定容容器を想定し、底面の直径が 30mm、高さが 80mm の三次元領域とした。

はじめに、格子依存度を調べるために、それぞれサイズが違う 4 種類の計算格子を使用し、酸素が存在しない高温度場での非燃焼蒸発噴霧の解析を行った。次に、同じ条件で従来の乱流解析手法である RANS の下で計算を行い、LES 計算結果と実測結果をそれぞれ比較した。その結果、RANS モデルでは、使用する計算格子によって蒸気相外形に変化が見られず、噴霧に及ぼす計算格子の影響が少ないことが確認された。また、計算された蒸気相外形は軸対称であり、噴霧外縁における非定常挙動が解析されないことが確認された。

一方、LES モデルの計算結果により、噴霧軸方向と半径方向の両方への発達が生じ、蒸気相形状や噴霧外縁部において渦の発生を伴う非定常挙動が解析されることが分かった。さらに、格子精度が上がるにつれ、噴霧半径方向への

発達が促進される傾向が認められた。これらの結果の比較から、計算上の問題点を明らかにし、モデル改良して非定常燃焼に適応し、ディーゼル噴霧燃焼解析を検討した。次いで、モデルの最適化により、微粒子の空間的分布を解析し、RANS, LESによる結果と実験結果を比較し、LESモデルの妥当性を確認した。

第4章では、まず第3章で高精度を確認された計算コードを用いて、燃焼室形状を有する定容容器において、衝突を伴うディーゼル噴霧の数値解析を行った結果について述べた。第3章と同様に、RANSモデルとLESモデルを用いて、計算を行い、それぞれの計算結果と計測結果との比較、検討を行った。その結果、LESはRANSモデルに比べて、気相の渦構造により噴霧半径方向への拡散が増加し、非対称、不均一な分布を示すことが分かった。さらに、LESに適応する壁関数の変更により、壁面と筒内ガスの熱伝達については、変更前と異なる結果が得られ、予測結果の高精度化が可能性なことが分かった。これらの改良点を踏まえた上で、LES解析法により予測精度の改善し得ることを示した。

最後に、上述の定容燃焼器と同様の断面を持つ計算格子を使用してエンジン計算を行った。計算では $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ と C_7H_8 の混合燃料とし、EGR率をパラメータとして変化させた際の排出ガスへの影響について調査した。その妥当性の評価には、計算で得られる指圧線図と熱発生率を実測値と比較し、排出ガス量が一定の予測精度を有することを確認した。特に、Soot生成の予測に当たっては、その濃度、粒子密度、粒子径などに関する時間的な生成履歴や空間的な分布について詳しく調査した。

第5章では、ここまで述べた各章の成果を総括し、今後求められる新たなディーゼル燃焼技術の進展の可能性について展望した。その実現に当たっては、本研究で確立した数値モデルを改良、発展させ、一層の熱効率の向上や排出ガスの低減につながる高精度の予測手法と高度な計測技術に関わる研究開発を追究する必要があることを指摘した。