

早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科

博士論文審査報告書

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

周 蓓 霓
Beini Zhou

環境・エネルギー研究科 環境モビリティ研究

2016年2月

自動車は主要な交通機関として役割を担っており、その有力な原動機の一つであるディーゼル機関は高効率と高出力を特徴としている。しかしながら、その燃焼現象はきわめて複雑であり、高乱流を伴う高温高圧場に燃料が噴射され、微粒化、加熱・蒸発、混合を含む物理的過程と同時に多くの燃焼素反応からなる化学的過程が進行する。またその過程で NO_x や粒子状物質等の有害物質を生成、排出する。このため、燃焼現象の理解に当っては、各種の計測が必要とされる一方、エンジンの開発・設計の現場では、経験則や試作を繰り返す評価法に依存しているのが実情である。

これに対して高性能化が進んでいる電子計算機を利用して流動と燃焼に関わる諸過程を詳細に記述することが可能になれば、より詳細な燃焼の理解に繋がり、ひいてはエンジン設計に活用することで時間と労力の節約が図られ、CAE への発展が可能になるものと期待されている。

本研究は、このような要請に応じてエンジン内の乱流を伴う流動と燃焼、さらには微粒子の生成過程を記述する数値計算を行ったものである。このような燃焼場に対しては、通常 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)法が用いられている。それに対して、本研究では、最近のコンピュータリソースの向上により、LES (Large Eddy Simulation) 法が各種の乱流場をより高精度で予測する有用な計算ツールとなりつつあることに注目し、これをディーゼル機関の噴霧燃焼場に適用している。LES 法は、計算格子で捉えられない小さなスケールの乱流成分のみをモデル化することで実現象に近い予測結果が得られる計算手法とされている。これによって、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試みている。

4名の論文審査委員は、本論文に対して、平成 27 年 12 月 8 日、平成 28 年 1 月 7 日、同 23 日の計 3 回の審査を実施するとともに、個別の指導を行って内容の改善や検討の追加を求めた。その結果まとめられた論文の概要とその評価について以下に述べる。

本論文では、まず研究の背景、目的および意義について記し、エンジン内流動と燃焼の数値計算法に関する従来研究について概観している。RANS 法は、乱流現象のサイクル平均値を予測対象とし、サイクル平均化された計測データとの比較によってその予測性能が検証され、燃焼現象の概要を理解する上では妥当と考えられる。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分布などの非定常現象を詳細に解析することが出来ていない。これに対して LES では、流体場の大きな渦構造を捉えることが出来るため、噴霧や燃焼に伴う流動との連成現象をモデル化することで複雑な物理・化学現象を適切な計算負荷で解明できるとしている。

次に、研究で利用した数値解析法に関わる手法について具体的に説明している。具体的には、数値流体計算を行う汎用コードの KIVA をベースとして、各支配方程式にトップハットフィルタを適用することで乱流渦のスケールを分解する方法を採用し、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している。また、ディーゼル機関における拡散燃焼過程を支配する噴霧微粒化モデルを導入している。

さらに、燃焼反応に対して素反応過程を考慮するため、化学反応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、その常微分方程式を陽解法で解く高速ソルバーを KIVA コードに適用して大幅な反応計算時間の短縮を図っている。また微粒子の生成過程については、成長、核生成、低級不飽和炭化水素による表面成長反応、活性種 (OH, O₂) 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を引用して導入している。

これらのモデリングによる計算結果に対して、定容燃焼器を用いた噴霧燃焼の高速度観察画像を参照して比較することで、その予測性能を確認している。その計算では、円筒形の定容容器を想定し、底面の直径が 30mm、高さが 80mm の三次元領域として、格子依存度の確認を含めて高温非燃焼蒸発噴霧の解析を行っている。その結果、RANS モデルでは表現できない噴霧外縁から内部にわたって発生する渦を伴う非定常的な挙動が LES によって記述されることを確認している。

次に、この計算コードを用い、燃焼室形状を有する定容容器において壁面衝突するディーゼル噴霧の数値解析を行っている。その結果、LES 法は RANS 法に比べて、気相の渦構造により噴霧半径方向への拡散が増加し、非対称で不均一な燃料濃度分布を表現できることを確認している。これに壁関数等の改良を加え、微粒子の生成モデルとの連成を図っている。

最後に、エンジン内での噴霧燃焼を対象に LES 計算を行っている。特に、NO_x 抑制のために必要とされる排気再循環の循環率を変化させた際の微粒子の発生への影響について調査している。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エンジン実測における値とを比較し、一定の予測精度を有することを確認している。微粒子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履歴や空間分布について詳しく考察している。

以上、要するに本論文は、ディーゼル機関における噴霧燃焼過程とそこで発生する微粒子の生成過程を記述するための手法として LES 法を導入し、各種サブモデルを引用して組み込んだ上で、その予測性能について考察したものである。その試みには、工学的な観点から新規性があり、エンジン内のより詳細な燃焼現象を理解する上で有用であり、さらに今後、エンジン開発の手段ともなり得る可能性があるものと判断される。よって工学博士論文として価値あるものと認める。

審査委員

(主査) 早稲田大学教授

大聖 泰弘

大聖泰弘

早稲田大学教授 博士(工学) 早稲田大学

宮川 和芳

宮川和芳

早稲田大学教授 博士(工学) 早稲田大学

草鹿 仁

草鹿仁

早稲田大学准教授 博士(理学) 東京工業大学

滝沢 研二

滝沢研二