

# 博士学位論文審査要旨

2009年2月17日

論文題目: Large Eddy Simulation による  
非定常噴霧構造および噴霧火炎の三次元解析

学位申請者: 堀 司

審査委員:

主査: 工学研究科 教授 千田 二郎

副査: 工学研究科 教授 藤本 元

副査: 工学研究科 教授 水島 二郎

要 旨:

近年、わが国においても高効率化の観点から乗用車用の内燃機関に展開されつつあるディーゼル機関内の非定常燃焼過程は、液体燃料の高圧噴射、乱流の誘起、噴霧の微粒化、蒸発、周囲気体との混合、着火および燃焼などの物理的・化学的な現象が互いに影響を及ぼしながら進行する複雑な現象であり、特に噴霧構造および燃焼過程の高精度な数値解析による予測が望まれている。

本研究では、これまで数値解析分野で用いられてきた乱流予測精度が低いRaynolds-Averaged Navior Stokes (RANS)に代わり、Large Eddy Simulation (LES)手法を既存の解析コード(KIVAコード)に組み込み、噴霧により誘起される乱流などの流れ場を高精度に解き、噴霧内部の燃料液滴群や蒸気濃度の空間的な不均一構造を予測し、さらに乱流燃焼モデルとしてMixing Control Model およびFlamelet Time Scale (FTS) モデルを適用して各種化学種成分の空間分布を含む非定常燃焼過程を数値的に予測する最適な解析コードを構築した。LES手法は計算格子を基準として、大スケールの乱流成分を直接数値計算により、小スケールの成分をSub Grid Scale(SGS)モデルによって解くものである。

本論文は12章から構成されている。主要な部分として、第4章で数値解析手法全体の構成を述べた後、第5章では本解析スキームの計算格子幅の最適化を非蒸発噴霧を対象に解析し、第6章では移流スキームの検討を行いCubic-Interpolated Pseudo-Particle Scheme (CIP法)の合理性を示し、第7章では噴霧の分裂モデルの最適化について検討している。構築した解析手法を用いて、第8章と第9章においてそれぞれ非蒸発噴霧と蒸発噴霧に対して実験結果との比較検証を行い、本手法の数値予測の妥当性を確認している。特に蒸発噴霧場においては燃料濃度を定量的に計測するためにレイリー散乱光測定を実施している。第10章ではMixing Control 乱流燃焼モデルを適用して噴霧燃焼火炎場における温度分布とOHラジカルやNO濃度の空間分布の相関を定量的に解明している。そして、第11章において新たに着火モデルを最適化しFlamelet Time Scaleモデルを適用して乱流のSGS成分を考慮した噴霧火炎のLES解析を可能とした。

本論文では、ディーゼル燃焼場の更なる高効率化と低エミッション化を実現するために高精度の解析手法を構築し、今後の噴霧・燃焼過程の最適化に極めて有用な知見を得ている。

よって、本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位を授与するにふさわしいものであると認められる。

## 総合試験結果の要旨

2009年2月17日

論文題目： Large Eddy Simulation による  
非定常噴霧構造および噴霧火炎の三次元解析

学位申請者： 堀 司

審査委員：

主査： 工学研究科 教授 千田 二郎

副査： 工学研究科 教授 藤本 元

副査： 工学研究科 教授 水島 二郎

要 旨：

本論文提出者は、2006年3月に同志社大学大学院工学研究科博士課程（前期課程）を修了後、2006年4月より本学大学院工学研究科博士課程（後期課程）に在学している。提出者は、この間、一貫して、Large Eddy Simulation による非定常噴霧構造および噴霧火炎の数値解析研究を行い、2007年4月から2カ年の間、日本学術振興会特別研究員（DC2）に任用されている。

本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集（B編）に1編、微粒化に1編それぞれ論文として出版公表されている。また、Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems に3件、SAE World Congress に5件、International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems に1件、Thermo-and Fluid Dynamic processes in Diesel Engines に1件の論文発表を行っており、内外の学会において十分な評価を得ている。

2009年1月10日午後1時から約1時間半にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに講演終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、いずれも十分な学力を有することが確認できた。また、英語の語学試験に合格し、ドイツ語についても十分な能力を有すると認定されている。

よって、総合試験の結果は合格であると判定した。

## 博士学位論文要旨

論文題目: Large Eddy Simulationによる非定常噴霧構造および噴霧火炎の三次元解析

氏名 : 堀 司

### 要 旨 :

ディーゼル機関はガソリン機関と比較して熱効率が高く、地球温暖化の要因となる二酸化炭素の排出が少ない反面、混合気の不均一燃焼に起因した微粒子状物質 (すす) や窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) を多く排出する。これらの低減には種々の燃焼改善技術および後処理技術を高度に最適化する必要がある。その最適化手法の一つとして数値解析を用いたエンジン設計支援技術の利用が急速に注目されている。さらに、ディーゼル機関で適用される非定常噴霧 (ディーゼル噴霧) 燃焼過程の解明にも、数値解析手法が重要な役割を担ってきている。

しかし、ディーゼル噴霧燃焼過程は、燃料噴射、乱流の誘起、噴霧の微粒化、蒸発、周囲気体との混合、着火および燃焼などの物理的・化学的な現象が互いに影響を及ぼしながら進行する極めて複雑な現象であり、数値解析によるその高精度の予測は困難である。現在、ディーゼル燃焼過程の予測精度を向上させるために、噴霧の分裂、蒸発モデルなどの噴霧モデルや燃焼モデルの改良、燃焼反応の化学反応動力学コード (CHEMKINなど) による詳細反応機構の導入が行われている。しかしながら、計算負荷の低減を考慮し、乱流予測精度が低いRANS (Raynolds-Averaged Navior Stokes)が乱流解析手法として適用されるため、非定常噴霧の混合気形成過程および燃焼過程の予測精度が低い。

そこで本論文では、RANSに替わる乱流解析手法として、Large Eddy Simulation (LES)の導入について検討した。LESは計算格子を基準として乱流成分を大スケールと小スケールに分離し、大スケールの成分を直接数値計算により、小スケールの成分をSub Grid Scale(SGS)モデルによって解く手法である。LESはすべての乱流成分をモデル化して解くRANSよりも乱流の予測精度が高く、計算格子幅を縮小するにつれて計算精度が改善される特性を有する。さらに、エンジン燃焼のLES解析においてはサイクル変動の評価が期待される。

本論文は12章から構成される。第1章および第2章では研究背景と従来の研究例について述べた。続く第3章ではDNS (Direct Numerical Simulation), RANS, LESの三種類の乱流解析手法について説明し、非定常噴霧解析に対してLESを用いる利点と問題点について記述した。さらに、内燃機関および噴霧燃焼過程の計算コードであるKIVAにLESを導入したKIVA-LESを構築し、KIVA-LESを用いて非定常噴霧に対するLES解析手法を構築するために、以下の五項目を検討した。

- (1) 計算格子幅の選定 (第5章)
- (2) 移流スキームの改良 (第6章)
- (3) 噴霧モデルの最適化 (第7章)
- (4) 実験値との比較による妥当性検証 (第8章, 第9章)
- (5) 燃焼モデルの最適化 (第10章, 第11章)

第4章ではKIVA-LESを用いた噴霧解析手法について概説した。SGS応力モデルには $k-\Delta$ モデル、SGSスカラモデルには勾配拡散モデルを適用している。移流スキームはKIVAに導入されている手法に加えて、数値安定性と計算精度に優れたCIP法(Cubic-Interpolated Pseudo-Particle Scheme)を適用した。

第5章では非蒸発場における非定常噴霧を対象とし、LES解析で使用すべき計算格子幅について検討した。その結果、RANS解析では計算結果に及ぼす計算格子幅の影響は小さく、計算格子幅に依らず噴霧中心軸に対して軸対象な噴霧外形が計算された。一方、LES解析では、計算格子幅の大きさに応じて渦構造の解像度が変化し、計算格子幅の減少によって混合気形成過程の非定常性がより実際と近くなることを示した。

第6章では移流スキームがLES解析結果に及ぼす影響を調べるため、二次元移流方程式、ステップ流れ、蒸発噴霧解析の三種類の計算を実施した。KIVA-LESで標準に使用される準二次精度風上差分法(QSOU: Quasi-Second Order Upwind Method)は数値粘性が大きいため、速度場の拡散を引き起こして乱流渦構造の発達を妨げること、CIP法は数値粘性が小さいために混合気形成過程を適切に表現できることを確認した。

第7章では、分裂モデルがLES解析結果に及ぼす影響を考察した。分裂モデルには修正TABモデル(Taylor Analogy Breakup model)、WAVEモデル、KHRTモデル(Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor model)の各モデルを使用した。その結果、分裂モデルは分裂後の液滴径に影響を与えるだけでなく、液滴分裂後の周囲気体と噴霧液滴との運動量交換にも影響するため、乱流渦構造の生成過程を左右し、噴霧外形を大きく変化させることを示した。

第8章および第9章ではLES解析の妥当性について検証した。

第8章では、非蒸発場におけるディーゼル噴霧のLES解析結果を評価するために、噴霧先端到達距離および噴霧体積の平均値と分散値に着目し実験結果との比較を行った。LES解析では、モーメントム計測実験による速度履歴を境界条件として採用することによって噴射毎の噴霧構造の違いを再現した。

第9章では蒸発噴霧の燃料濃度分布について評価を行うため、レイリー散乱光撮影を実施した。その結果、噴射初期において計算結果は噴霧軸付近の燃料濃度を過大に評価するが、噴射から十分に時間が経過した領域では噴霧内燃料濃度の実験値と計算値は良く一致した。

第10章および第11章では非定常噴霧の燃焼場への展開について記述した。

第10章ではKIVAコードの燃焼モデルによって噴霧火炎を計算した。乱流燃焼モデルにはMixing Control Modelを用いた。NO<sub>x</sub>やOHラジカルなどの燃焼生成物はKIVAコード内の簡易モデルにより計算を行った。計算格子幅を減少させるに従って詳細な渦構造が解像されるため、熱発生率履歴および噴霧外形の計算値は実験値と良く一致した。また、噴霧断面の燃焼生成物について調べると、OHラジカルは噴霧外縁、NO<sub>x</sub>は噴霧先端や噴霧側面の高温領域に多く存在し、乱流渦による拡散を受けて非定常に分布することを確認した。

第11章では着火モデルとしてShellモデルを導入すると同時に、LESの乱流燃焼モデルとして注目されているFlamelet系のモデルを用いて噴霧火炎の計算を実施した。本研究では、Flameletモデルに特性時間の概念を導入したFlamelet Time Scale (FTS) モデルを採用した。その結果、FTSモデルによってSGS成分を考慮した噴霧火炎のLES解析が可能となった。一方、予混合的燃焼の予測精度が低く、計算結果は実験結果に比べて予混合的燃焼期間における熱発生率を過大に予測した。さらに、予混合的燃焼時の熱発生によって衝撃波が形成され、それが燃焼室を伝播し、拡散的燃焼時の熱発生率を振動させることが分かった。

第12章では非定常噴霧構造および燃焼過程のLES解析手法の現状と今後についてまとめた。本論文では、LES解析手法は乱流渦構造を考慮することによって、ディーゼル噴霧の混合気形成や燃焼過程の非定常性を予測し得ることを示した。今後は新しい計算手法の導入および高精度の実験手法を開発して計算精度を高めていくと共に、LES解析をエンジン燃焼場へ展開し、高効率・低エミッションのエンジン開発に利用するスキームを構築する必要がある。

以上が本論文の要旨である。