

外 3-9

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Computational Prediction of
Engine Turbulence and Premixed-Flame

(エンジン内の乱流と予混合火炎伝播の数値予測)

申請者

内藤 健

Ken Naitoh

平成 3 年 6 月

理 1516 (1778)

通常、自動車用火花点火機関の開発期間は約5年である。膨大な量の実験が繰り返されるが、それでも目標性能に達しないことをしばしば経験する。エンジンの素性の善し悪しを決定する、流動と燃焼の特性という内的要因に対する配慮不足が原因の一つである。また近年クローズアップされてきた地球規模の環境問題やそれに付随する様々な法規制を考えると、排気特性改善と低燃費を両立するための徹底した希薄燃焼化は一つの大きな方向となるが、それには乱れとサイクル変動を制御した安定燃焼実現が欠かせない。

火花点火機関内の乱流と燃焼の制御をおしそうめるために必要な基礎データとして、以下のテーマについて研究が進められている。

- (1) 吸入行程で生成される横スワールや縦渦、空間的に均一な圧縮等の、点火前の乱れに対する影響度合いの定量化
- (2) 亂れとサイクル変動の分離した理解とその制御
- (3) 3次元的に複雑なエンジン形状の変化が流動場や乱れに与える影響
- (4) 亂れと火炎構造の関係の把握

(1)と(2)に関する定量化のためには、乱れを空間的な場としてとらえることが必要であり、現在、Particle Image Velocimetryと呼ばれる可視化手法の開発に多くの努力が注がれている。(4)に関しては、0.1 mm以下という要求実験解像度が達成されていないため、エンジン内の乱流予混合火炎構造に関する解説は確定していない。この様な実験の空間情報の不足が、エンジンの流動と燃焼に関する素質の本質的な改良に取り組めない理由の一つである。

一方、スーパーコンピュータやパラレルマシンに代表される近年の計算機の進歩はめざましい。非圧縮性流れ領域では、乱れの積分スケール程度のサイズの詳細な計算格子での計算が可能になってきており、エンジン内の現象解析を押し進めるツールとしても期待される。しかし、エンジンにおいては、大きな密度変化を伴う乱流場の計算方法と乱流火炎伝播のモデルが確立されていないために、運転条件を変えての火炎伝播の予測といったものはまだ実現されていない。

この様な背景のもとで、本研究では、乱流遷移やサイクル変動の様な不安定現象をも直接計算できるラージエディシミュレーションと火炎内部の構造をも解像するダイレクトシミュレーションを行うために有効な計算方法を開発し、それをベースとした予混合火花点火機関内の乱流と火炎伝播に関する3次元数値解析モデルを構築した。本論文は、それを用いて得られた、上記テーマに関する進んだ情報や予測を系統的に整理してまとめたものである。

本論文の具体的な内容は、第1章で、本研究の目的とそれに関する今までの研究動向について述べる。

第2章においては、まず、本研究のモデル化の範囲について述べる。次に、エンジン内の複雑な密度変化と境界条件に関する、独自の数学的な定式化を行った

。境界層近似、空力騒音の理論等にみられる様に、それぞれの現象に固有の見通しの良い定式化は、少ない計算量で質の高い結果をもたらすからである。圧縮性のNavier-Stokes方程式を変形するとともに、その積分形と高階微分形の保存則を併用することで、各行程で異なる境界条件や密度変化を引き起こす数種の物理的要因と、それらの乱流生成機構における役割を統一的かつ陽的に表現した、エンジン特有の定式化となっている。そして、各物理的な要因の影響度合いを、オーダー評価によって明らかにした。

第3章では、第2章の定式化と評価を基に開発した、超音速領域を除く流れにおいて重要な物理量や因子に関する数値誤差を有効に取り除く差分法について述べる。密度変化の取扱いに関するImplicit-Continuous-fluid Eulerian method、Hiyakodaの圧力境界条件補正法、河村らが提唱した非圧縮性乱流に有効な高精度 scheme、不連続面の取扱いに関するFlux Corrected Transport methodはそれぞれ断片的ではあるがエンジンにとって重要な意味をもっており、これらの長所をも取り込み拡張し、流体力学的なミクロ量と熱力学的なマクロ量の両方に関する精度向上と計算時間の短縮を両立させたものである。

第4章と第5章では、圧縮性Navier-Stokes方程式を直接解いて得られた、流動に関する結果を述べる。

第4章では、流れの物理的な特性を調べるために最低限必要な形状として矩形ピストンを持ったエンジンを用いる。圧縮行程終了付近で、空間平均された圧縮率が最大になることと関係して層流から乱流への急激な遷移をとらえた。この結果から、圧縮行程の空間的に均一な圧縮と吸入行程で生じた大きな縦渦が点火前の乱れにとって重要であることが理解された。吸入行程でバルブ開口部付近で生じた強い乱れは、圧縮行程前半に急激に散逸してしまうことも確認した。また、従来行われてきた方法は、アンサンブル平均されたものであり、サイクル変動に関する情報は得られていなかったが、本研究では、乱れとサイクル変動の物理的な意味のちがいについても調べた。吸入行程の微小な外乱が非線形性のために拡大されて圧縮行程終了時の流動パターンがサイクルごとに大きく変わることが確かめられた。乱流遷移時期や密度変化の強さとパターンに関して、作動流体としてフレオンを用いたマッハウェンダー干渉計による可視化写真と定量的によく一致している。以上の結果は、本方法が空気を用いた通常の機関において 5000 rpmを越える高回転域の流動現象の正確な予測が可能であることを示すとともに、(1)と(2)に関する重要な知見となっている。

第5章では、実機の2弁、4弁機関の流動場のちがいについて議論した。エンジンの3次元形状としては、CAD dataが用いられ、バルブ、バルブシステム、分岐したポート等の複雑なトポロジーを再現した状態で、1400 rpmでの吸入、圧縮行程の計算を行った。平均流速に関して行ったレーザードップラー流速計による計測値との比較は、流れの周全体で良く一致している。そして、これらのエンジ

ンにおいても、第4章で述べた機構による乱流生成が予測された。また、(3)に關して、2弁、4弁機関ではその流动パターンが大きく異なり、バルクフローと亂れの強さが4弁機関では弱いことが示された。

第4章と第5章の結果から、エンジン内の乱れの生成機構とその空間構造について詳細な情報を得ることができた。

第6章と第7章では、乱流火炎伝播に関する結果を示す。

第6章では、アレニウス型の燃焼モデルと圧縮性Navier-Stokes方程式を2次元、3次元で直接解いて、現象の把握を行った。まず、約1mm幅で10万点の計算格子を用いた3次元計算によって、吸入圧縮行程でつくられた渦群が螺旋状火炎を生成することを定性的に示した。また、その結果から、現象を支配する物理スケールである1mm以下の火炎内構造の定量的な把握が重要であることが理解された。そこで本研究では、さらに、0.05mm幅の計算格子を用いて、2次元での不混合乱流燃焼のダイレクトシミュレーションを行い、乱流レイノルズ数やカルロビッツ数の影響を詳細に調べた。その結果、高カルロビッツ数の条件下では、Cuspと呼ばれる火炎構造が存在することや、カルロビッツ数が小さくなるにつれて起こる火炎伝播速度の減少に関する定量的な情報等、(4)について現在の実験では得られない知見を得た。そして、燃焼領域を不連続面として近似したフレームシートモデルが、定量的な3次元のエンジン内火炎伝播計算を行う上で有効である可能性を見いだし、また、その適用範囲について論じた。

第7章では、本研究の締めくくりとして、ラージエディシミュレーションにより第5章で用いた実機4弁機関における乱流火炎伝播を計算した。第6章で基本的な有効性を確認したフレームシートモデルと近年Yakhotが提唱した、くりこみ群理論をベースとした乱流モデルにより格子以下の影響を考慮している。機関回転数、空燃比、点火時期の運転条件を変えて得られた計算結果は、乱れ強さや火炎伝播速度に関して実験と良く一致することを確認した。第7章の結果は、單なる現象理解にとどまらず、開発したモデルが、超希薄燃焼の様な極端な条件や高回転域を除いた、ある程度の運転条件範囲において火炎伝播を正確に予測できる可能性をも示している。

第8章では、第1章から第7章までの結果を整理して本研究の結論とし、さらに、ノックキングモデル等の今後のテーマについて展望を述べた。

展開した定式化、計算方法とそれを基に構築した乱流と乱流火炎伝播の數値解析モデルはエンジン内の多くの現象を捉え、機関研究開発上有効な情報を得た。そして、開発したモデルが機関開発の高度化と効率化を目指した総合的なエンジンCAEシステムの核となる可能性を見いだした。