

## 論文内容の要旨

論文題目 燃料噴射率形状が非定常噴霧燃焼に及ぼす影響

脇坂 佳史

1 サイクル中の燃料噴射率の時間的変化である燃料噴射率形状は、燃料の時間的・空間的分布を直接支配するため、ディーゼル機関の低公害化を実現する技術として大いに期待されている。しかしながら、従来の燃料噴射率形状と燃焼に関する研究では、ディーゼル機関を対象として有害物質の低減を実現する最適噴射率形状を探求する研究が多く、噴射率形状が噴霧や燃焼に及ぼす影響を混合気形成や火炎の展開の観点から現象の理解を通じて検討した例は少ない。また、従来の燃料噴射装置では、噴射率形状とともに噴射期間や最大噴射率の条件も一緒に変化してしまい、噴射率形状の影響のみを抽出することが難しい点が問題であった。そこで、本論文では、実機の雰囲気圧力や温度などの物理的条件のみを模擬した自由空間を対象として、燃料噴射率以外の噴射条件を揃えた△型噴射率形状の重心位置の変化をパラメータに設定して、噴射率形状が噴霧燃焼に及ぼす影響を実験と数値計算により系統的に検討することを目的としている。

本研究ではまず、燃料は蓄圧型でノズルシート部の絞りを制御することによって、従来の噴射装置よりも噴射率形状を自在に変化させることの出来る燃料噴射率形状可変型噴射装置を開発した。この噴射装置を用いて、図1に示すような△型の1段噴射で噴射率の上昇速度と降下速度を変化させて、噴射の重心が系統的に移動していく燃料噴射率波形（噴射率の上昇速度の速い順に A, B, C）を作成し、噴射率形状の影響を系統的に検討するためのパラメータとした。なお、燃料噴射率は燃料の噴出速度とノズル噴孔断面積の積に比例するため、噴射率及び噴射率形状が同一の条件のまま、燃料噴射圧力とノズル噴孔径の組合せを変化させて検討を行うことにより、より一般化した噴射率形状の影響に関する知見を得られるようにした。

実験では側面に観測窓が付いた定容容器内に燃料を噴射し、室温・高圧雰囲気条件で非蒸発噴霧の観察を、また、実機と同様の高温・高圧雰囲気条件で噴霧燃焼の観察を行った。燃焼時には輝炎の画像二色法により火炎中の温度分布とすす分布を計測した。また、汎用エンジンシミュレーションコードである KIVA コードを用いて数値解析を行い、燃料噴射率形状が噴霧内の燃料空間分布や混合気濃度分布に及ぼす影響を検討し、噴射率形状と噴霧燃焼の因果関係を考察した。

実験による非蒸発噴霧の観察と計算による燃料の空間分布・混合気分布の解析から、燃料噴射率形状が非定常噴霧に及ぼす影響として明らかになった知見を以下に示す。図2に低圧噴射、高圧噴射の両方の場合について、非蒸発噴霧の高速度連続写真を示す。図より、噴射率の上昇速度が速いパターン A ほど噴霧の噴射軸方向の成長が速いことが分かる。また、噴射率の上昇速度が速いパターン A では噴射初期から特に噴霧先端付近で噴霧が幅方向に広がっているのに対し、上昇速度が緩やかなパターン C では噴射初期の噴霧は幅方向の広がりが小さく、ある程度噴射率が大きくなってから幅方向に広がった噴霧を形成している。さらに噴射圧力の影響としては、噴射率形状に依らず噴射圧力が高いほど噴霧の幅が広がっている。また、本要旨では示していないが、噴霧全体の空気過剰率の観点から比較を行っても、噴射率の上昇速度が速く、噴射圧力が高いほど噴射初期より空気過剰率は高かった。このように、噴射率の上昇速度が速く、噴射圧力が高いほど噴霧は初

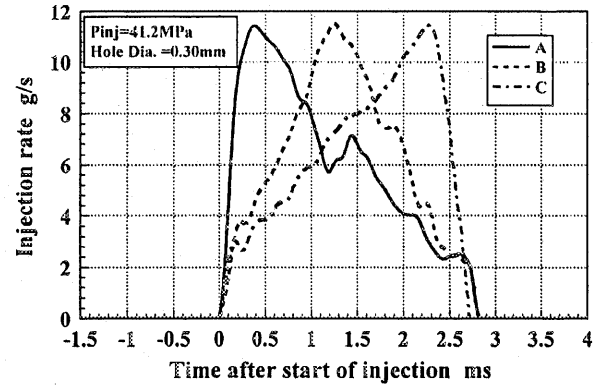


図1 実験および計算に使用した燃料噴射率形状

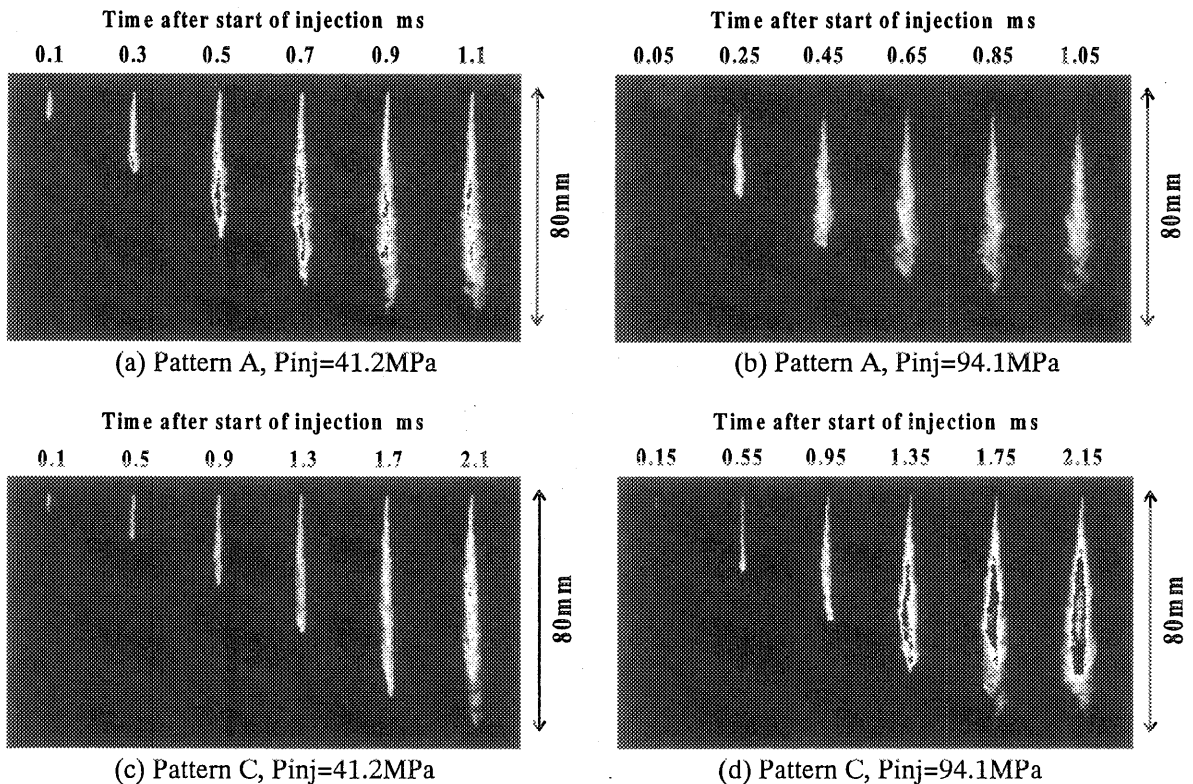
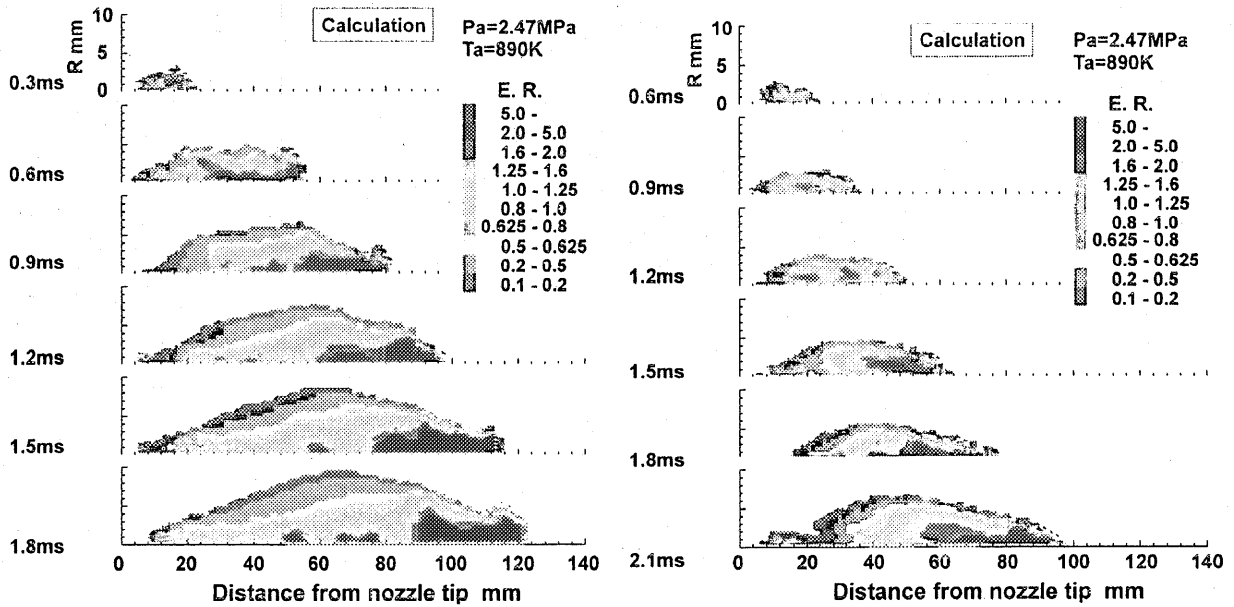


図2 燃料噴射率形状および噴射圧力が噴霧の成長に及ぼす影響( $\rho_a=9.2\text{kg/m}^3$ , 室温)

(a) Pattern A,  $P_{inj}=41.2\text{MPa}$ (b) Pattern C,  $P_{inj}=41.2\text{MPa}$ 図3 KIVA計算で求めた燃料噴射率形状が燃料の当量比分布に及ぼす影響( $P_a=2.47\text{MPa}$ ,  $T_a=890\text{K}$ )

期から急速に発達し、空気導入が促進された混合気を形成することが明らかになった。

図3にKIVAコードを用いて計算した、噴射率形状が非燃焼蒸発噴霧の当量比の空間分布に及ぼす影響を示す。噴射率形状の影響として噴射軸方向に当量比分布を観察すると、噴射率の上昇速度が速いパターンAでは、噴霧先端から比較的ノズルに近い位置までほぼどの断面においても中心部には当量比が1.0~2.0を超えるような濃い混合気が、周辺部には当量比が0.1程度の薄い混合気が存在している。これは、噴射率が噴射初期にピークに達して、その後緩やかに低下する場合には、後続の燃料の噴出速度が前方の燃料の噴出速度よりも遅く、後続の燃料が前方の燃料に追い付き・追い越すことがほとんど出来ずに、燃料が軸上に幅広く分散して存在するためと考えられる。一方で、噴射率の上昇速度が緩やかなパターンCでは、噴霧先端付近の噴霧中心部には当量比にして2.0以上の濃い混合気が存在しているが、ノズルに近くなるに連れて噴霧中心部の当量比が小さくなり、ノズル近傍では当量比が0.1~0.5程度の比較的薄い混合気のみが存在する傾向にある。これは、後続の噴出速度の速い燃料が次々と追い付くため、燃料が到達距離の成長とともに噴霧先端付近に集中して成長するためと考えられる。

次に、前述の噴霧に及ぼす影響の結果を踏まえて、噴霧燃焼実験を行い、噴射率形状が噴霧燃焼に及ぼす影響を明らかにした。火炎からの輝炎発光強度を燃焼率の指標と考え、輝炎発光強度が最大値の10%以上の期間を主燃焼期間と定義して整理した結果を図4に示す。いずれの噴射率形状においても、噴射圧力を高くすることによって、主燃焼期間は短縮化している。高圧噴射時は輝炎発光ピーク値が高くなる傾向があるため、両者を合わせて考慮すると、噴霧の混合気形成能力が促進されたことにより、燃焼が全体に活性化されたためと考えられる。噴射率形状の影響としては、低圧噴射の場合は、噴射率の上昇速度、降下速度とも中間にしたパターンBの噴射率形状の主燃焼期間が最も短かったが、噴射圧力を高くした場合は、 $C>B>A$ の順に主燃焼期間が短くなり、また、低圧噴射時に比べて噴射率形状による差は小さい。この結果は、主燃焼期間の短縮化の観点から考えた最適噴射率形状は、噴射圧力に

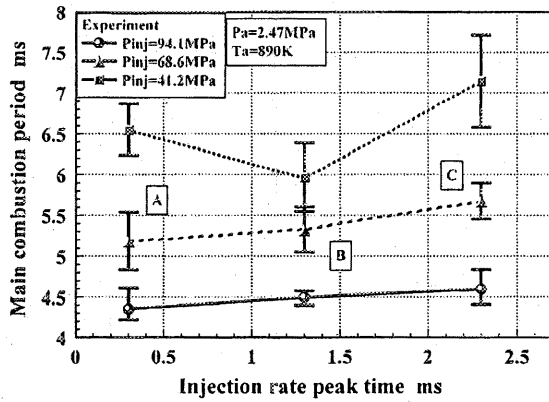


図4 主燃焼期間に及ぼす影響

よって異なることを示している。この理由として上昇速度を速くしたパターンAの場合、後期に噴射された燃料は混合気形成能力が低いため、燃焼が緩慢化し燃焼期間を長期化させているが、高圧噴射時は、運動量の増加に伴い燃焼後期の空気導入が促進されるため、燃焼が活発になり燃焼期間が短縮化したものと考えられる。一方上昇速度が緩やかなCの場合は、低圧噴射時は火炎によって燃焼後期の空気導入が妨害され、燃焼が緩慢になって燃焼期間が長期化するが、高圧噴射時は、運動量の増加に伴い空気導入が促進されたことと、噴射後期に高噴出速度で火炎内に噴射された後続の燃料が、噴霧火炎内で攪拌作用を増加させることにより燃焼が活性化され、主燃焼期間が短くなったものと考えられる。

二色法によって火炎中の温度分布を求め、熱的NO<sub>x</sub>生成に影響を及ぼすと考えられる火炎中の高温領域の時間変化を図5に示す。観測視野内の火炎に限定した議論となるが、噴射圧力が同一の場合、燃焼初期はパターンCの方がAよりも高温領域の面積が小さく、NO<sub>x</sub>抑制効果が高いと考えられる。一方で、パターンCは、燃焼中期から後期にかけて燃焼が促進されるため、高温領域の面積も増加しており、NO<sub>x</sub>生成が増加する可能性がある。高圧噴射時は、燃焼が促進され、高温領域も増加しているが、燃焼期間が短縮化されるため高温領域の存在期間は短くなっている。図6にNO<sub>x</sub>メータによって実測したNO生成量の結果を示すが、低圧噴射時はAに比べてCの方がNOの生成量が多い。また、KIVA計算によって求めたNO生成速度の時間変化を図7に示すが、低圧噴射時はCで燃焼後期のNO生成量が増大するとともに、NO生成期間がAやBよりも長期化している。図4, 5, 6を合わせて考えれば、Cの場合、燃焼後期に火

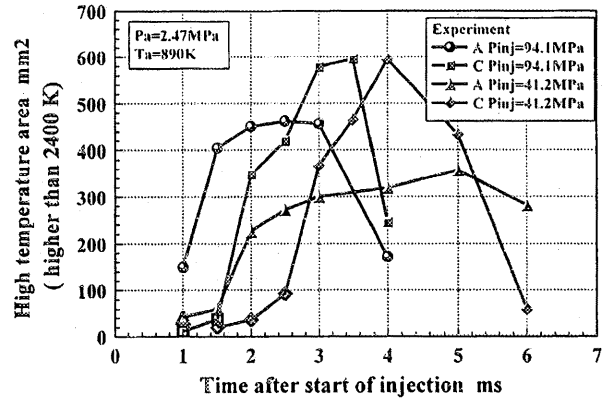


図5 高温領域に及ぼす影響

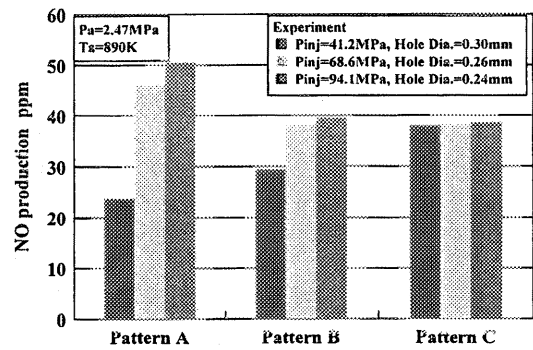
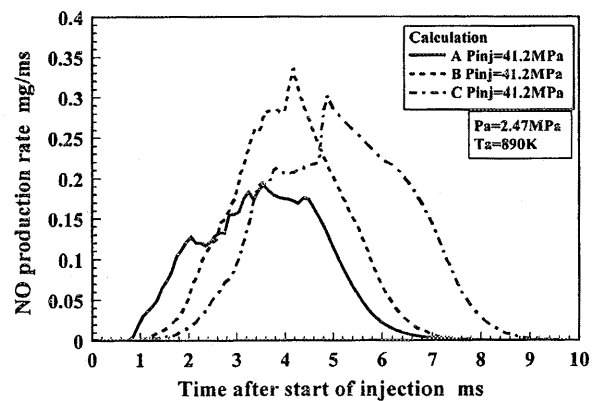
図6 NO<sub>x</sub>生成量に及ぼす影響

図7 KIVA計算で求めたNO生成速度の時間変化

炎温度が上昇し、主燃焼期間が A, B よりも長いことが最終的な NO 生成量を増加させた原因と考えられる。高圧噴射時は何れのパターンでも図 4 で主燃焼期間が短期化しているにも関わらず NO 生成量が増加している。これは、高圧噴射時は低圧噴射時よりも平均火炎温度が 50~100K 上昇していることから、火炎温度の上昇が NO 生成量を増加させた原因と考えられる。

図 8 に火炎中に存在するすすの総量の指標とみなせる面積積分 KL 値の時間変化を示す。パターン A は C に比べて、燃焼初期から面積積分 KL 値が大きい。なお、本要旨では示していないが、面積平均 KL 値を火炎面積で除した平均 KL 値も燃焼初期は A の方が C よりも大きかった。噴霧観察の結果からは、A は C に比べて噴射初期において空気導入が促進されているものの、燃料と空気の微視的な混合が完全に達成された訳ではないことが分かる。また、KIVA 計算の結果では、燃焼後期に、低圧噴射時の A ではノズルに比較的近い位置に、C では観測視野を外れた噴霧火炎先端部に未燃燃料が分布する傾向があることも示されており、最終的なすす生成量の増加につながるものと考えられる。

高圧噴射時は、パターン A, C とともに積分 KL 値が初期から増大し、最大値も増加する。しかしながら、噴射開始後約 3ms 以降は低圧噴射時に比べて急激に積分 KL 値は減少している。低圧噴射時と高圧噴射時で燃料の分布が大きくは変化していないことを考慮すれば、これは、初期には高圧噴射によって燃焼が促進されて火炎温度が上昇したことにより、すす生成が増加するものの、燃焼後期には高圧噴射による火炎中の乱れが増加して、すすの酸化が促進されることを意味しているものと考えられる。従って、最終的なすすの排出は高圧噴射時の方が低圧噴射時よりも減少するものと推定される。

以上の結果、燃料噴射率形状は燃料の時間的・空間的分布に影響を及ぼし、混合気形成や噴霧燃焼に大きな影響を及ぼすことが実証された。特に、初期の噴射率形状は着火までの混合気形成を大きく支配し、着火時期や主燃焼開始時期に影響を及ぼすこと、噴射率形状は燃料の空間分布に影響を及ぼすため、着火後の火炎の展開や主燃焼特性、そして NO<sub>x</sub> やすすなどの排気特性にも影響を及ぼすことが明らかになった。また、最適噴射率形状を議論するには噴射圧力の影響は必要不可欠であることが示された。

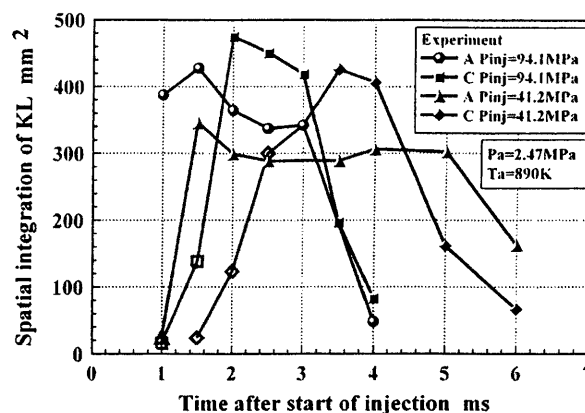


図 8 積分 KL 値の時間変化