論文・報告

噴霧の干渉がディーゼルエンジン燃焼に及ぼす影響 (第1報)

Effect of Spray-spray/wall Interaction on Diesel Engine Combustion (First Report)

宮下　和也*　古川　伸哉*　石井　義範*　小澤　恒*
Kazuya Miyashita　Shinya Furukawa　Yoshinori Ishii　Hisashi Ozawa

要　旨

エンジン筒内に噴射された燃料噴霧は、周囲の空気を取り込みながら発達していく。その過程においては、噴霧側面への空気導入の流れが隣接する噴霧のそれと干渉する。また、噴霧はピストン壁と干渉し、壁面に沿って発達後、同様に発達した隣接する噴霧とも干渉する。本報では、単気筒エンジンを用いて各干渉が燃焼に及ぼす影響を検証した。

Abstract

Fuel spray injected into diesel engine cylinder develops with entraining ambient air. Air entrainment flow surrounding the spray side boundary interferes with that of adjacent sprays. And the spray interferes with piston wall and develops along the wall surface. Then the spray interferes with the adjacent sprays developing along the wall surface similarly. In this study, effect of each interference on combustion was investigated by using a single cylinder engine.

1　はじめに

気候変動問題の解決に向けて2050年までのカーボンニュートラル(以下、CN)実現が宣言されて以降、CN社会実現に向けた取り組みが加速する中、自動車においてはバッテリ式電気自動車や燃料電池自動車の普及が進みつつある。一方で、既存の内燃機関においても、電動化技術との組み合わせによるCO_2排出量の低減や合成燃料の利用によるCN化がCN社会実現への重要な技術として位置付けられている[(1)]。メーカがこれら多様な動力源の開発に対応していくためには、これまで以上に開発リソースを有効に活用する必要がある。モデルベース開発(以下、MBD)は開発効率向上に有効な手段であり、今後の更なる高度化が求められている。

エンジンMBDにおいては、システム検討からシリンダ内の現象理解まで、0または1次元から3次元のさまざまなシミュレーションツールが活用されている[(2)]。しかしながら、シリンダ内の現象は複雑であり、現在も現象把握やモデル化の取り組みが続けられている。中でも、噴霧火炎の干渉が燃焼や排出ガスに及ぼす影響を把握・モデル化することは重要な課題となっている。筒内に噴射された燃料噴霧は、周囲の空気を取り込みながら発達し、やがて着火に至り噴霧火炎を形成する。その過程においては、**図1**に示すように、①噴霧火炎側面へ向かう空気導入の流れが隣接する噴霧火炎の空気導入の流れと干渉する(噴霧基部エントレインの干渉)。その後、②噴霧火炎はピストン壁に衝突する(噴霧火炎と壁面の干渉)。更に、衝突後に壁面に沿って発達した噴霧火炎は、③同様に発達した隣接する噴霧火炎とも干渉する (壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉)。

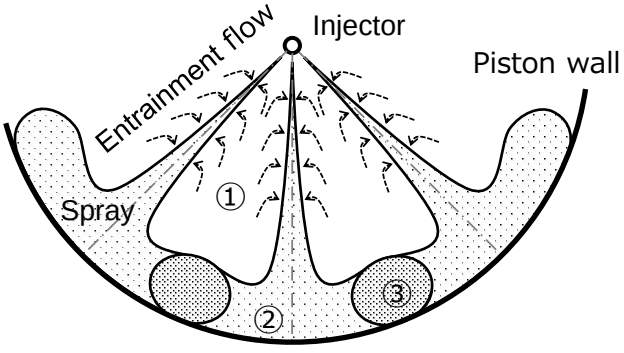


図1　シリンダ内噴霧挙動の概念図

これら個々の干渉については、これまでにも詳細な研究が進められている。噴霧基部エントレインの干渉については、噴孔間角度を変化させたインジェ

*(株)いすゞ中央研究所

Copyright© 2026 ISUZU MOTORS LIMITED.
All Rights Reserved. 無断転載・複製・配布禁止

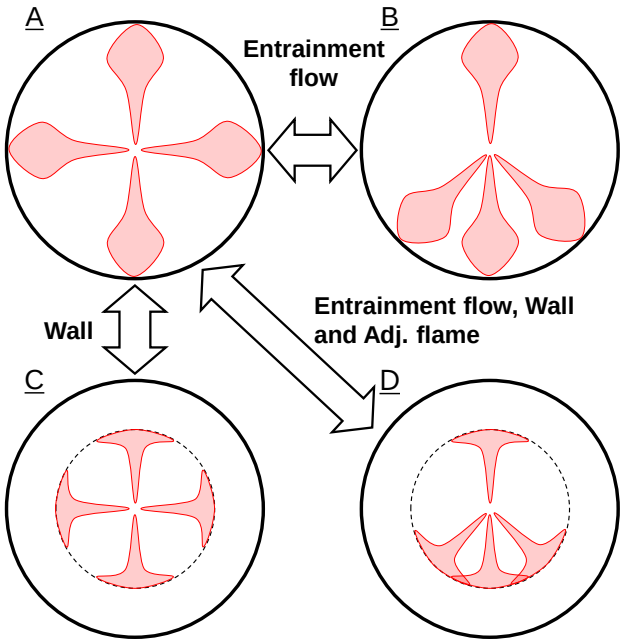
クタを用いて、運転条件を変化させた場合の可視化試験が実施されており、干渉によりset-off長(lift-off長)が変化することが確認されている[3][4]。また、噴霧火炎間の領域においてノズル方向に向かう既燃ガスの流れが確認されており、これがset-off長を短縮させる要因のひとつであることが示されている[5]。噴霧火炎と壁面の干渉については、壁面に衝突するディーゼル噴霧の燃料濃度分布計測[6]や火炎と壁面の干渉により生じる熱損失の計測が熱流束センサ[7]や赤外光の可視化[8]により、詳しく調べられている。また同時に、3次元CFD(数値流体力学：Computational Fluid Dynamics)においては壁関数の改良により、壁面干渉後の噴霧挙動[9]や火炎からの壁面熱損失[10]の再現性向上を目指した取り組みが進んでいる。壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉については、火炎の干渉により熱発生が抑制されて後燃えが増加することが示されており[11][12]、火炎の干渉を抑制する噴孔配置や燃焼室形状が検討されている[13]。また、火炎間の干渉領域におけるすすの生成や酸化に着目した現象解明も進められている[12][14]。

上述したように、これまでの詳細な研究により個々の干渉現象の理解が深まっている。その一方で、エンジン筒内においてはこれらの干渉が同時に発生しているが、先行研究では個々の干渉がそれぞれどの程度の寄与度をもって燃焼に影響を与えているかまでは示されていない。そこで本研究は、個々の現象を包含するエンジン筒内において、①噴霧基部エントレイン、②噴霧火炎と壁面、③壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の3種の干渉がそれぞれどの程度の寄与度をもって燃焼に影響しているのかを明らかにし、現状の3次元CFDシミュレーションによりその寄与度の再現性を検証する。本報では、シミュレーションの検証に必要なデータを取得するために、各干渉の寄与度を定量的に分離して、比較することを目的とする。

2　実験方法

2.1 干渉影響の分離評価方法

燃焼室内径とノズル噴孔方向を変化させた4パターンの燃焼を比較することで干渉影響を評価する。**図2**にその概略図と各干渉の分離方法を示す。Aはベースとなる干渉の影響を含まない状態である。Bは不均等なノズル配置により、噴霧基部エントレインの干渉影響が含まれた状態となる。Cは燃焼室内径を小さくすることにより、噴霧火炎と壁面の干渉影響が含まれた状態となる。Dは噴霧基部エントレイン、噴霧火炎と壁面の干渉影響に加えて、壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉影響を含んだ状態である。BとAの差分より噴霧基部エントレインの干渉影響を、CとAの差分より噴霧火炎と壁面の干渉影響をそれぞれ分離することができる。壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉影響は全ての影響を含むパターンDとAの差分を求めたうえで、噴霧基部エントレイン、噴霧火炎と壁面の干渉影響を差し引くことにより分離することができる。



Entrainment flow	B−A
Wall	C−A
Adj. flame	D−A− (B−A) − (C−A)

図2　各干渉が燃焼に及ぼす影響の分離方法

2.2 実験装置・運転条件

実験に用いるエンジンの諸元を**表1**に、燃焼室断面形状を**図3**に、噴孔配置を**図4**に示す。干渉影響の分離試験にはボアΦ115mmの単気筒ディーゼルエンジンを用い、円筒形状の燃焼室内径をΦ80mm及びΦ50mmとすることで噴霧衝突距離を変化させた。また燃焼室外側の形状を調整することにより、どちらの内径の場合も圧縮比は15.3で一定としている。ノズルはいずれも4噴孔の噴孔径Φ0.115mm、噴射角度180°で燃焼室内に水平方向に燃料を噴射した。噴孔方向は噴孔間角度を変化させた3種類のノズルを作製した。噴孔間角度90°の均等ノズル**(図4(a))**をベースとして、噴霧干渉させるため、4噴孔のうち3噴孔を噴孔間角度30°で配置した不均等1ノズル**(図4(b))**と、4噴孔すべてを噴孔間角度30°で配置して干渉領域を拡大させた不均等2ノズル**(図4(c))**を試

作した。**図5**にボッシュ長管法で測定した各ノズルの噴射率を示す。同一噴射圧力・指示パルス期間とした場合**(図5(a))**では均等ノズルに対して、不均等1ノズルでは最大噴射率が高く、不均等2ノズルでは噴射期間が長期化していることが確認された。これはノズル内流れの差によるものと考えられる。今回は不均等1ノズルを使用する場合は噴射圧力を、不均等2ノズルを使用する場合は指示パルス期間を変更して、均等ノズルと同等の噴射率**(図5(b))**となるように調整して試験を実施した。また、今回の試験においては噴霧火炎がシリンダヘッドに衝突することを避けるために、インジェクタを可能な限り突出させ、シリンダヘッドと噴孔中心間距離を3.8mm確保した。

表1　エンジン諸元

Bore		Φ115mm
Stroke		125mm
Displacement		1,298cm^3
Compression ratio		15.3
Swirl ratio		1.29
Chamber diameter		Φ50mm, Φ80mm
Injector nozzle	Hole	Φ0.115mm×4holes
	Direction	Uniform, Non-uniform
	Angle	180°

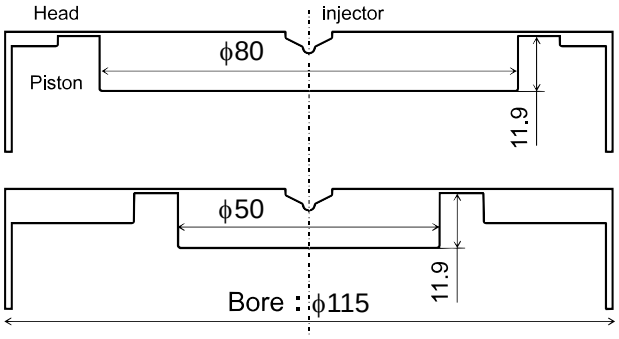


図3　燃焼室形状

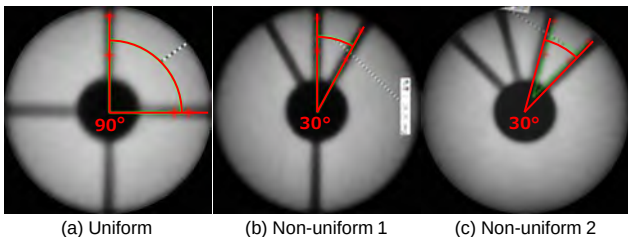


図4　各ノズルの燃料噴射方向

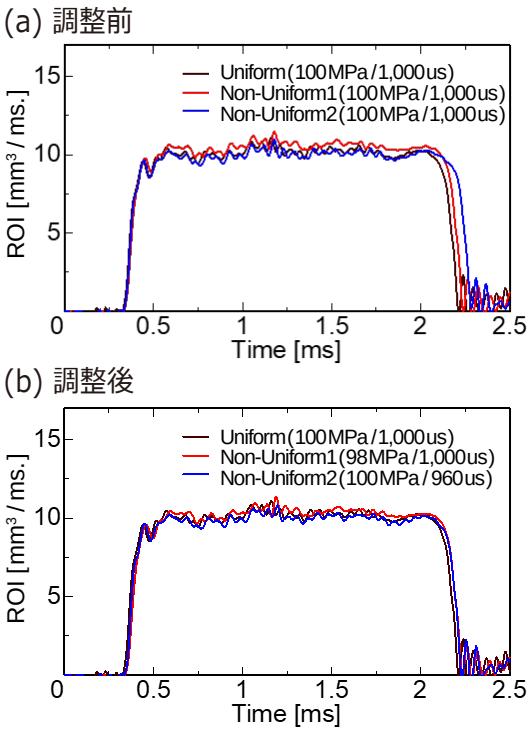


図5　各ノズルの燃料噴射率

表2に運転条件を示す。回転数は1,000rpmとして、モータリング運転時の最高筒内圧力が6MPaとなるように吸気量を調整した。燃料噴射は噴射量22mm^{3}の単段噴射として、噴射圧力を65MPa、100MPa、135MPaの3段階で変化させ、噴射圧力が各干渉の寄与度に与える影響を確認した。燃焼解析にはシリンダヘッドに取り付けたピエゾ式圧力センサ(Kistler製6056A)で筒内圧を計測し、燃焼解析装置(小野測器製DS3000)を用いて熱発生率を算出した。

表2　運転条件

Engine speed	1,000rpm
Injection quantity	22mm^3
Injection timing	-3.55° ATDC
Injection pressure	65MPa, 100MPa, 135MPa
Motoring Pmax	6MPa
EGR rate	0%

2.3 燃焼可視化

噴霧干渉時の燃焼状態を把握するために、観察窓下方より光学アクセス可能な下方可視化エンジンを用いて、筒内輝炎を高速度カメラ(ACS-1, ナックイメージテクノロジー製)で撮影した。**図6**に可視化装置の概略図を示す。観察窓には視野範囲を可能な限り広げるためにアクリル材を使用した。本可視化エンジンの最大視野径はΦ80mmとなっており、今回の検証条件においても燃焼室内を全域可視化することが可能である。燃焼室内径は観察窓上部のピストントップの形状を変更することで**図3**と同一にした。運転条件は**表2**と同条件であるが、噴射圧力は135MPaのみを撮影した。

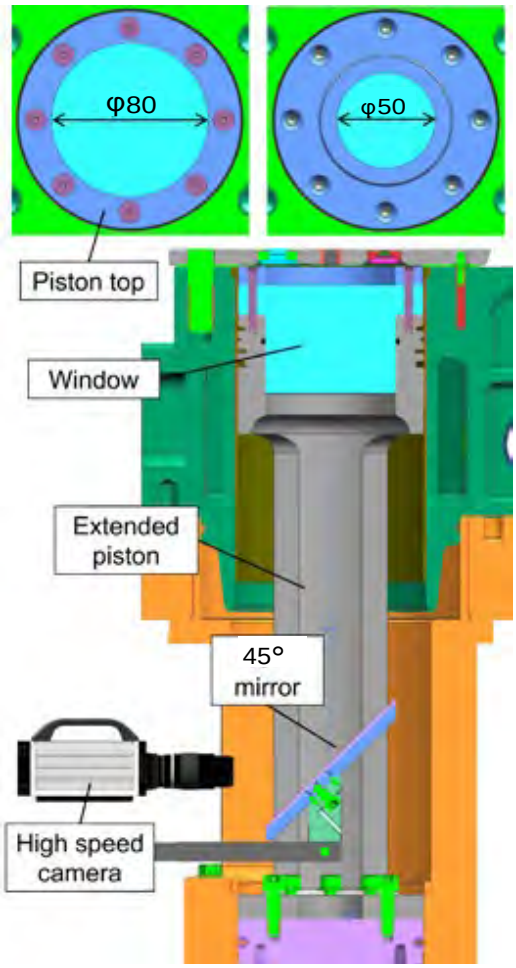


図6　燃焼可視化装置

3　実験結果

3.1 干渉時の熱発生率と火炎挙動の比較

図7及び**図8**に噴射圧力135MPaにおいて、燃焼室内径とノズル噴孔方向を変化させた場合の熱発生率の比較と筒内輝炎の可視化画像を示す。熱発生率は紙面の都合上、65MPaと100MPaの結果は掲載していないが、135MPaとおおむね同様の傾向となっている。可視化画像はカメラの露光開始時期を噴射開始トリガーに同期させて撮影し、10サイクル間で平均化した画像である。**図5**の噴射率計測結果から噴孔配置が異なることでノズル内部の流れが変化し、噴孔ごとの噴霧火炎に差異が生じることが懸念された。しかし噴射率を同等にすることで、パターンA及びBの可視化画像に示される噴孔ごとの輝炎の外形や到達距離に極端な差はみられず、今回の試験条件では噴孔配置が噴霧火炎自体に及ぼす影響は少ないと判断した。

図7(a)の熱発生率は**図2**のパターンAとBの比較であり、噴霧基部エントレインの干渉影響を比較している。噴霧基部エントレインが干渉することにより、拡散燃焼初期のクランク角 (以下、CA)3°ATDC(上死点後：After Top Dead Center)付近から燃料噴射終了までの期間で、不均等ノズルの熱発生率は均等ノズルよりも低くなり、干渉領域が広い不均等2は不均等1よりも低下量が大きいことが分かる。**図8**の同期間であるCA：5°ATDC~8°ATDCの可視化画像を見ると、パターンBのノズルにおいては噴霧基部エントレイン干渉部の輝炎先頭がノズル近傍まで発生しており、空気導入が悪化していると考えられる。また、噴射終了後のCA：10°ATDC以降でも熱発生率に差が見られるが、これは燃焼室内径Φ80mmとした場合においても噴霧火炎が壁面に衝突し、パターンBにおいては壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉が発生してしまうためである。可視化画像でも壁面衝突後の隣接噴霧火炎との干渉領域において、輝炎が長期間滞留している様子が観察されている。

図7(b)の熱発生率は**図2**のパターンAとCの比較であり、噴霧火炎と壁面の干渉影響を比較している。噴霧火炎が壁面と干渉することにより、拡散燃焼初期のCA：3°ATDC付近ではパターンAと比べて熱発生率が低下しているが、その後の噴射期間終了までは熱発生率が増加し続け、噴射終了時はパターンAとおおむね同等の値となっている。また、噴射終了後のCA：10°ATDC以降でも熱発生率に差は見られず、噴霧火炎と壁面の干渉では後燃えが増加していないことが分かる。**図8**の同期間の可視化画像を見てみると、パターンCにおいては輝炎が観察され始

める時点から、既に噴霧火炎は壁面に衝突しており、CA：3°ATDC付近では噴霧火炎と壁面の干渉により燃焼が悪化していると推察される。その後、壁面に衝突した噴霧火炎は燃焼室底面に沿って発達しながら、ノズル近傍まで達している様子が観察されている。壁面衝突により噴霧の拡散が促進したため燃焼が活発になっていると推察される。その結果、輝炎消失の時期はパターンAと比べても変化が見られない。

図7(c)の熱発生率は**図2**のパターンAとDの比較であり、噴霧基部エントレイン、噴霧火炎と壁面の干渉に加えて壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉影響が含まれている。壁面衝突後の隣接噴霧火炎との干渉が追加されることで、拡散燃焼初期のCA：3°ATDC付近から熱発生率が大幅に低下している。パターンCで見られた噴射期間中の熱発生率の増加も見られず、単調に減少し、噴射終了後のCA：10°ATDC以降においても熱発生が続いている。隣接噴霧火炎との干渉によって燃焼が緩慢になり、燃焼期間が長期化していることが分かる。**図8**の可視化画像からも輝炎が観察され始めるCA：2°ATDC付近から壁面衝突後の隣接噴霧火炎との干渉が発生している様子が観察されている。隣接噴霧と干渉した火炎はその場に滞留し続けており、噴霧の拡散が抑制されていると推察される。その結果、隣接噴霧と干渉した火炎は噴射終了後の膨張行程においても長い間観察され続けている。これらの結果からも、後燃えの原因は壁面衝突後の隣接噴霧火炎との干渉が主要因であることが分かる。

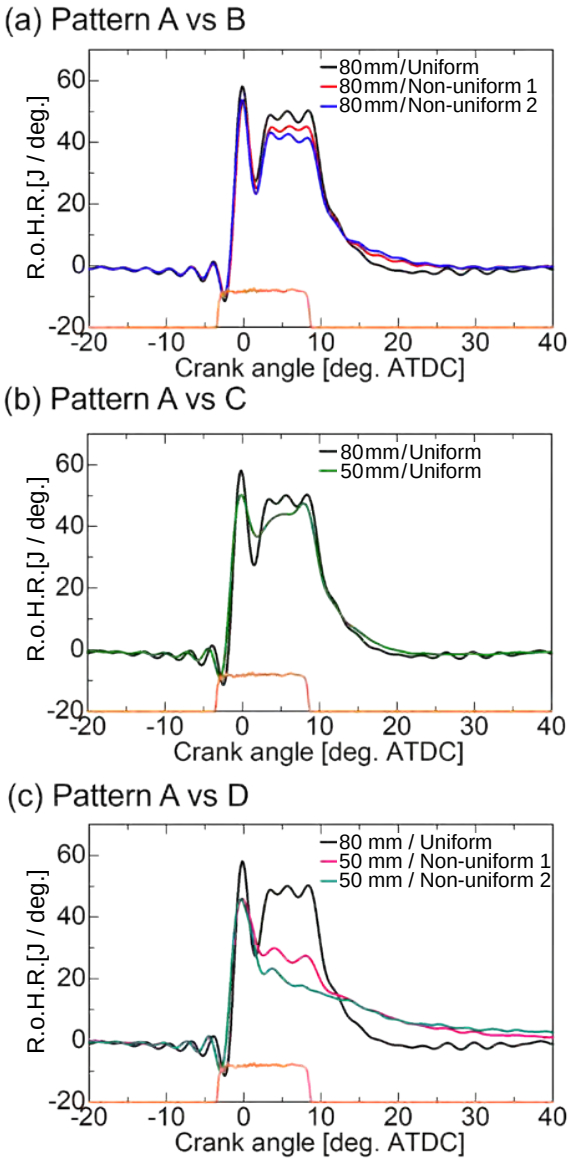


図7　各干渉時における熱発生率の比較

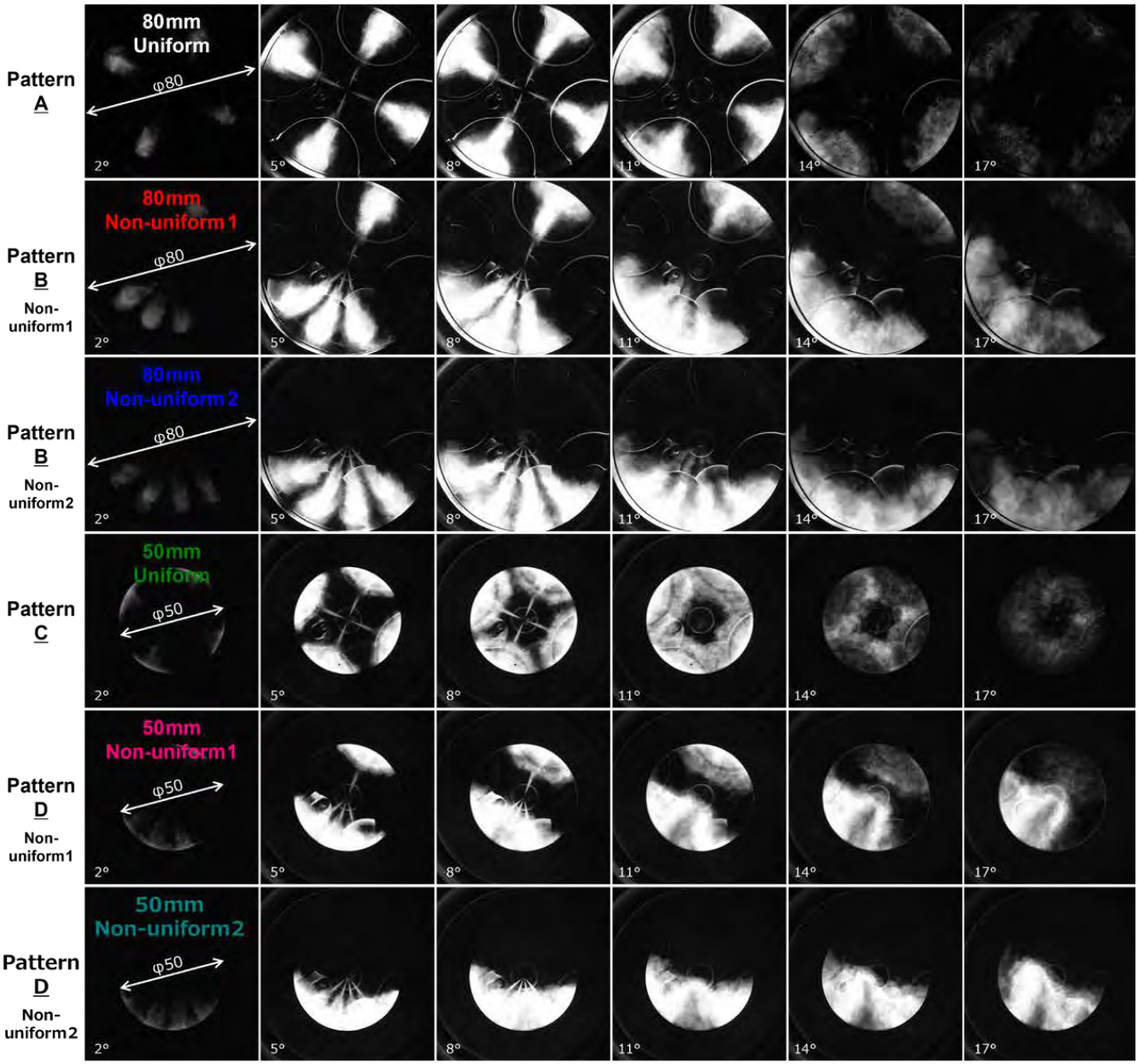


図8　各干渉時における筒内燃焼状態の比較

3.2 各干渉が燃焼に及ぼす影響

噴霧基部エントレイン、噴霧火炎と壁面及び壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉が、それぞれどの程度の寄与度をもって燃焼に影響しているかを評価する。**図9**に噴射圧力135MPaにおけるパターンAからパターンDの熱発生率と、**図2**の関係から求めた各干渉による熱発生率の差分を示す。噴霧の干渉により噴射期間中の熱発生率が低下し燃焼が悪化していることが分かる。その後、噴射終了後の膨張行程において発熱量が増加していることが確認できる。今回は噴射期間中の噴霧干渉に着目して、燃焼に与える影響を評価した。CA：−3°~2°ATDCにおいて差分が大きく振動しているが、これはパターン違いで予混合的な燃焼が変化しているためである。この領域は燃焼が急峻で正確に差分が見積れない。本報では拡散燃焼に対する干渉影響を検証するため、この領域は検証の対象外とした。**図9**のハッチングで示すのは、**図9**下段の熱発生率の差分の立下り(すべての干渉影響を含む (D-A)の立下り90%時期)から可視化画像より求めたパターンAにおいて輝炎が壁面に到達するまでの期間を示している。この期間においてパターンAはいかなる干渉の影響も受けないと見なして、**図9**上段の黒色ハッチング領域をベースとなる発熱量とした。**図9**下段の赤色のハッチング領域は噴霧基部エントレイン、緑色は噴霧火炎と壁面、青色は壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉による発

熱量の低下を示している。そこで、ベースとなる発熱量に対する各干渉による発熱量の低下率を用いることにより、各干渉が燃焼に及ぼす影響を評価した。

ただし、噴射圧力65MPa、100MPaは可視化試験を実施していないため、パターンAで輝炎が壁面に到達するまでの期間が不明である。そこで次に示すHiroyasuの**式(1)**[13]から火炎の壁面到達時期を推定した。

$$S = 2.95\left(\frac{\Delta P}{Pa}\right)^{\frac{1}{4}}\sqrt{d_0 t} \qquad \cdots(1)$$

ΔPは噴射差圧、Paは周囲気体密度、d_0はノズル噴孔径である。**図10**に噴射圧力135MPaにおける10サイクル平均画像から読み取った火炎先端位置をプロットし、**式(1)**と比較した結果を示す。輝炎の先端位置は可視化画像の最大輝度値の10%以上となった最長距離を読み取り、均等ノズルの4噴孔の平均値から求めた。**式(1)**は非蒸発噴霧のペネトレーションに関するもので、本来は噴霧火炎には適応できないが、**図10**において135MPaにおける火炎の先端位置と**式(1)**の結果がおおむね一致したため、今回はこの**式(1)**で火炎の先端位置が推定できると仮定した。噴射圧力65MPa、100MPaにおけるパターンAで噴霧火炎が壁面に到達するまでの期間は**式(1)**で到達距離が燃焼室半径40mmとなる時期から求めた。

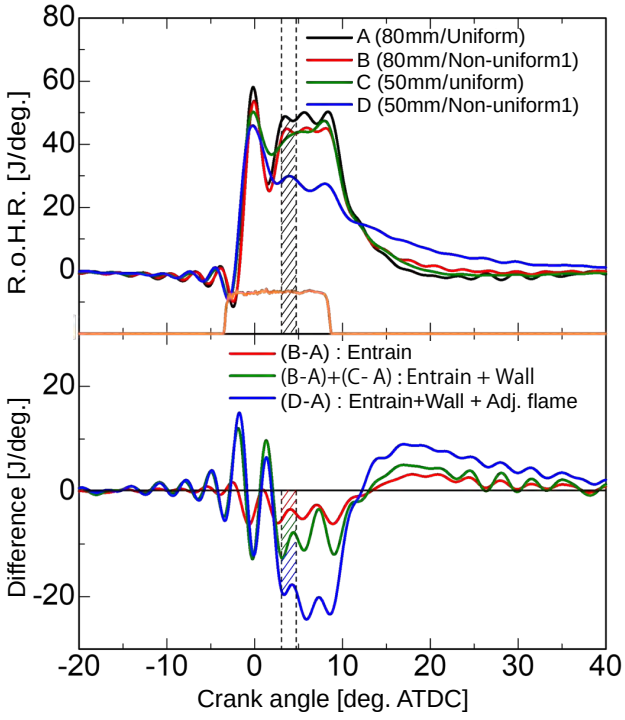


図9　熱発生率の比較(上)とその差分(下)

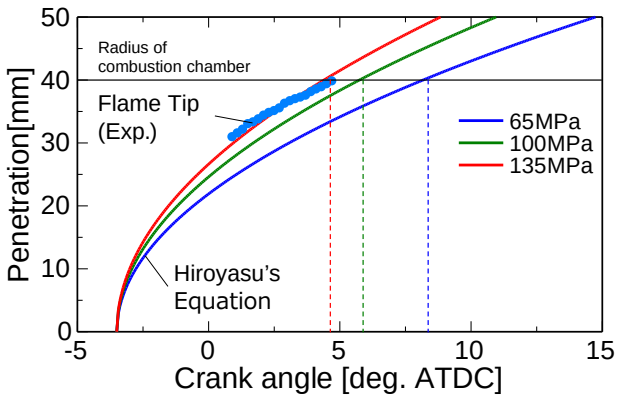


図10　噴霧火炎先端の到達距離

図11に噴射圧力を変化させた場合の各干渉による発熱量の変化率を示す。上段が不均等1ノズル、下段が不均等2ノズルの結果である。不均等2ノズルでは干渉領域が拡大することによって不均等1ノズルに比べて、噴霧基部エントレイン及び壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉影響が増加していることが分かる。また噴射圧力に着目すると、各干渉影響が燃焼悪化に与える寄与度は、噴射圧力により変化していることが分かる。噴霧基部エントレインについては噴射圧力が高くなると、干渉影響が小さくなっている。先行研究により噴霧基部エントレインの干渉影響が大きくなると、set-off長が短くなることが知られている[3][5]。均等ノズルのような自由噴霧相当では噴射圧力が増加するとset-off長が長くなる[16]。一方で不均等ノズルのように隣接噴霧が存在する場合においては噴射圧力が増加するとset-off長は長くなるが、それと同時に既燃ガスの逆流速度も増加するためset-off長を短縮させる[5]。この影響により不均等ノズルでは噴射圧力増加によるset-off 長の変化は相殺され、干渉影響が現れる可能性がある。しかし今回の試験においては噴霧火炎がシリンダヘッドに衝突することを避けるために、インジェクタを可能な限り突き出しており、噴霧火炎とシリンダヘッド間に空間が存在している。そのため既燃ガス逆流の影響が小さくなり、噴射圧力増加によって噴霧基部エントレインの干渉影響が小さくなる結果となったと考えられる。これらの詳細を把握するためには先行研究でも実施されているような、噴射圧力を変化させた場合のset-off長の変化を比較することが有効な手段であるが、今回は噴射圧力135MPaにおける輝炎直接撮影しか実施できておらず、set-off長の変化は計測できていない。詳細把握は今後の課題としたい。噴霧火炎と壁面の干渉は65MPaにおいて燃焼悪化への寄与度が顕著であるが、噴射圧力の増加により、寄与度が小さくなっていることが分かる。

これは噴射圧力を増加するほど壁面との干渉後も十分な運動量が維持され、噴霧の拡散が進むためと推察される。一方で壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉は強まるという結果になっている。

これらの結果から、4パターンの燃焼を比較することで、①噴霧基部エントレインの干渉、②噴霧火炎と壁面の干渉、③壁面衝突後の隣接火炎間の干渉を定量的に分離して、それぞれどの程度の寄与度をもって燃焼に影響を与えているかを評価することができた。各干渉が燃焼に与える影響は噴射圧力によって寄与度が変化し、低噴射圧力では①噴霧基部エントレインの干渉、②噴霧火炎と壁面の干渉の寄与度が大きく、高噴射圧力では③壁面衝突後の隣接火炎間の干渉の寄与度が大きいことが分かった。

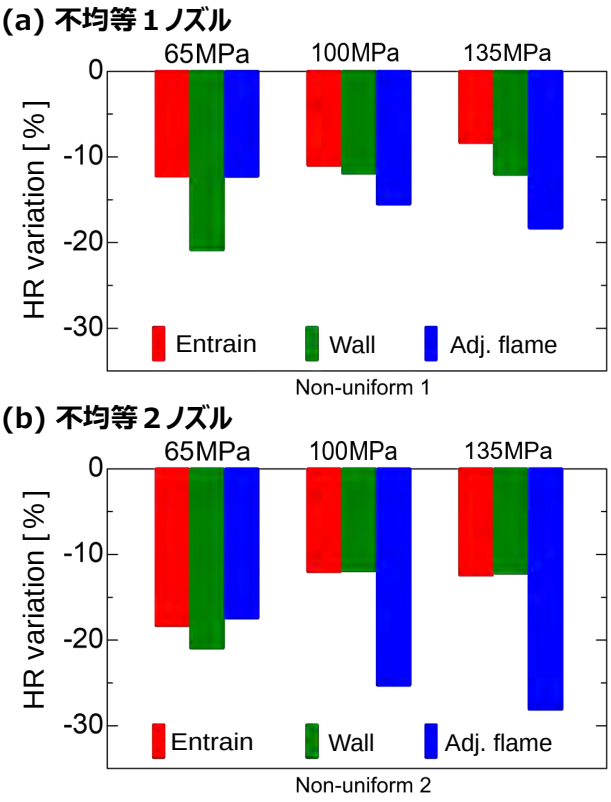


図11　各干渉が発熱量に与える影響

4　おわりに

ディーゼル噴霧火炎の干渉が燃焼に及ぼす影響を検証するために、燃焼室内径とノズル噴孔方向を変化させた4パターンの燃焼を比較することによって噴霧基部エントレイン、噴霧火炎と壁面及び壁面衝突後の隣接噴霧火炎間の干渉の影響を切り分け、各干渉がそれぞれどの程度寄与度をもって燃焼に影響しているかを評価した。得られた結論は以下のとおりである。

1. 熱発生率と筒内輝炎の可視化画像を比較することで、噴霧基部エントレインの干渉により空気導入が阻害されて、噴射期間中の熱発生率は低下するが後燃えは変化しないこと、噴霧火炎と壁面干渉により衝突時の熱発生率は低下するが、その後は衝突により噴霧の拡散が促進され、燃焼悪化せず後燃えは変化しないこと、噴霧火炎が壁面に衝突した後に隣接火炎と干渉することで噴霧の拡散が抑制されて後燃えの大きな要因となっていることが分かった。
2. 4パターンの燃焼の熱発生率の差分をとり、干渉を含まない熱発生との比率から低下率を求めることで各干渉が燃焼悪化に与える寄与度を評価可能であることが分かった。
3. 噴射圧力を変化させて各干渉が燃焼悪化に与える寄与度を評価した結果、噴霧基部エントレイン及び噴霧火炎と壁面の干渉は噴射圧力が増加することで寄与度が少なくなることか分かった。一方で壁面衝突後の隣接火炎との干渉は噴射圧力の増加で寄与度が大きくなることが分かった。

本文献は、自動車技術会論文集Vol.56, No.2に掲載された論文を加筆修正のうえ報告するものである。

参考文献

(1) 経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html (参照 2024-07-24)
(2) 大橋伸匡 ほか：ディーゼルエンジンのライトサイジングによる部分負荷の熱効率向上コンセプト，自動車技術会論文集，Vol.55，No.3 (2024)，p.533-545
(3) Clément Chartier, et al. : Influence of jet-jet interactions on the lift-off length in an optical heavy-duty DI diesel engine, Fuel 112 (2013), P.311-318.

(4) Hyun Jo, et al. : Effect of Jet-Jet Angle on Combustion Process of Diesel Spray in an RCEM, SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility, 2020-01-2058 (2020).
(5) T. Fuyuto, et al. : Set-off length reduction by backward flow of hot burned gas surrounding high-pressure diesel spray flame from multi-hole nozzle, Int. J Engine Research, Vol.18, (2017), p.173-194
(6) G. Bruneaux : Mixing Process in High Pressure Diesel Jets by Normalized Laser Induced Exciplex Fluorescence, Part II: Wall Impinging Versus Free Jet, SAE Paper 2005-01-2097 (2005)
(7) M. Nakata et al. : A Study on the Wall Heat Loss from Diesel Spray Flame with Rapid Compression and Expansion Machine, 9th COMODIA 2017, A208 (2017)
(8) R. Mahmud, et al. : Infrared High-Speed Thermography of Combustion Chamber Wall Impinged by Diesel Spray Flame -Imaging Velocimetry of the Radially Striped Infrared Radiation Pattern-, SAE Paper 2023-32-0087 (2023)
(9) K. Saijyo, et al.: CFD Analysis of Spray-Wall Interaction under Evaporating Conditions, SAE paper 2015-01-1854 (2015)
(10) 堀司 ほか：解析的壁関数による壁面に衝突するディーゼル噴霧火炎の解析，第28回内燃機関シンポジウム講演論文集，No. 12 (2017)，P1-6
(11) 渡邉一雅 ほか：火炎間の干渉がディーゼル拡散燃焼に与える影響，自動車技術会論文集，Vol.52，No.6 (2021)，p.1180-1185
(12) Y. Kidoguchi, et al. : Characteristics of Heat Release History of Multi-Hole Diesel Spray Affected by Initial Mixture Formation, Wall Impingement and Spray Interaction, SAE paper 2020-01-2119 (2020)
(13) 小川英之 ほか：千鳥噴孔配置燃料噴射ノズルによる噴霧間干渉の抑制とディーゼル燃焼の改善，自動車技術会論文集，Vol.54，No.3 (2023)，p.574-579
(14) 井上大地 ほか：レーザー誘起赤熱法によるディーゼル噴霧火炎干渉領域におけるすす生成過程に関する研究，自動車技術会論文集，Vol.54，No.5，(2023)，p.984-989
(15) Hiroyasu H, et al. : Development and use of a spray modeling to predict diesel engine efficiency and pollutant emissions: part 1 combustion modeling. B JSME; 26 (214): (1983), p.569–575
(16) Siebers, D., et al. : Flame Lift-Off on Direct-Injection Diesel Sprays Under Quiescent Conditions, SAE Technical Paper 2001-01-0530, (2001)