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2報)

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

古川　伸哉*　Shinya Furukawa
宮下　和也*　Kazuya Miyashita
石井　義範*　Yoshinori Ishii
小澤　恒*　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、これらの干渉影響を切り分け、それぞれが燃焼に与える影響を実験(第1報)と計算(第2報)の両面から明らかにした。

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, the effect of each interference on combustion was analyzed by using engine combustion CFD simulation.

1　はじめに

第一報にて説明したように、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(数値流体力学：Computational Fluid Dynamics)シミュレーションによりその寄与度の再現性を検証した。第1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明らかにした[15]。本報では、第1報で取得した実験に対する計算を行い、各種モデルの検証を実施した。

2　計算方法

2.1 3次元CFDシミュレーション

本報の計算には、3次元CFDソフト (Convergent Science製 CONVERGE)を用いた。**表1**及び**表2**に、計算条件と計算に使用したモデルを示す。

後述のとおり、燃焼室内径とノズル噴孔方向の組み合わせにより、各干渉の影響を検証した。対象の燃料はJIS2号軽油であり、燃焼モデルにはShell & CTCモデルと詳細反応モデルの2種類を用いた。詳細反応モデルはヘキサデカンとヘプタメチルノナンの2成分で構成されており、ローレンス・リバモア国立研究所で開発された詳細反応メカニズムを簡略化したものを使用した[16]。また、壁関数には、標準壁関数と解析的壁関数の2種類を用い、壁近傍の噴霧火炎挙動の比較を行った。**図1**に、計算に用いた噴孔軸断面のメッシュ構造を示す。直交に配置されたBase grid(2mm)に対して、噴孔近傍には噴孔軸に沿ったInlaid mesh(0.25mm)を配置した。また、速度及び無次元距離y+を対象に解適合格子(AMR)を適用した。速度に対しては噴射速度の1%を閾値として0.25mm、y+に対しては30～100となるように0.125mmまでメッシュサイズを細分化した。

*(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

表1　計算条件

Bore × Stroke		φ115×125mm
Compression ratio		15.3
Swirl ratio		1.29
Chamber diameter		80mm,50mm
Injector nozzle	Hole	φ0.115mm×4
	Direction	Uniform,Non-uniform
	Angle	180°
Engine speed		1,000rpm
Injection quantity		22 mm^3
Injection timing		-3.55° ATDC
Injection pressure		65MPa,135MPa
In-cylinder pressure@IVC		150kPa(abs)
In-cylinder temperature@IVC		379.8K
EGR rate		0%

表2　CFD計算に用いたサブモデル

Turbulence	RNG k-ε	
Breakup	KH-RT w/o breakup length	
Liquid fuel property	Diesel 2	$nC_{16}H_{34}$/$isoC_{16}H_{34}$ (Mass fraction: 0.547:0.453)
Fuel vapor component	nC_7H_{16}	
Combustion	Shell & CTC model	Detailed chemistry (97species/136reactions)
Near wall treatment	Std. wall function (SWF) (Launder, Spalding, O'Rourke & Amsden)	Analytic wall function (AWF) (Craft & Suga)

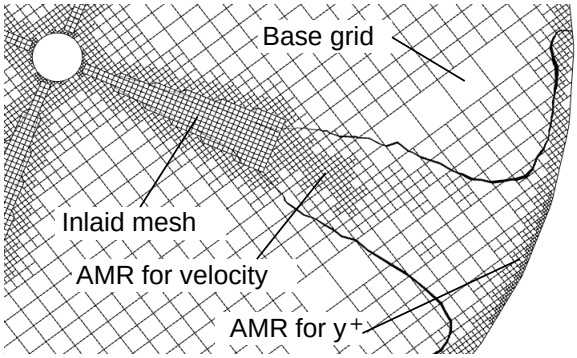
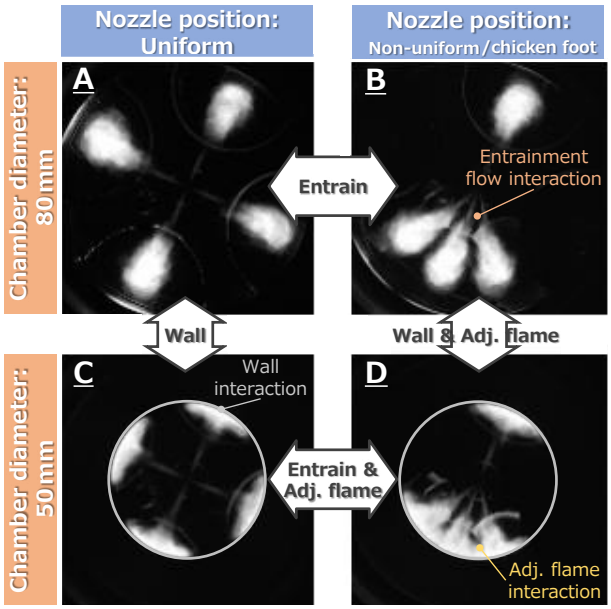


図1　CFD計算に用いた格子構造

2.2 干渉影響の評価方法

図2に、燃焼室内径と噴孔方向の組み合わせパターンAからDの筒内可視化画像と干渉影響の分離方法を示す。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、1噴霧のみ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、壁面の干渉影響が含まれた状態となる。なお、ここでの壁面とはキャビティ側面と底面及びヘッド下面であり(**図7**)、壁面の干渉影響は火炎の拡散が阻害される効果と壁面熱伝達が助長される効果の両方を含んでいる。Dは、エントレインと壁面に加えて、隣接噴霧火炎間の干渉影響を含んだ状態である。例えばBとAの熱発生率の差分より、エントレインの干渉影響を、CとAの差分より、壁面の干渉影響をそれぞれ分離することができる。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の差分を取ったうえで、エントレイン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
Adjacent flame	D-A-(B-A)-(C-A)

図2　噴霧間干渉が燃焼に及ぼす影響の分離方法

図3に、噴射圧力135MPaの実験で得られたパターンAから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。クランク角-3～2°ATDCにて差分が大きく振動している。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。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3**のハッチングで示す領域は、**図3下部**の熱発生率の差分の立下り(全ての干渉影響を含む(D-A)の立下り90%時期)からパターン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、黒色ハッチング領域をベースとなる発熱量とした。赤色のハッチング領域はエントレイン、緑色は壁面、青色は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。

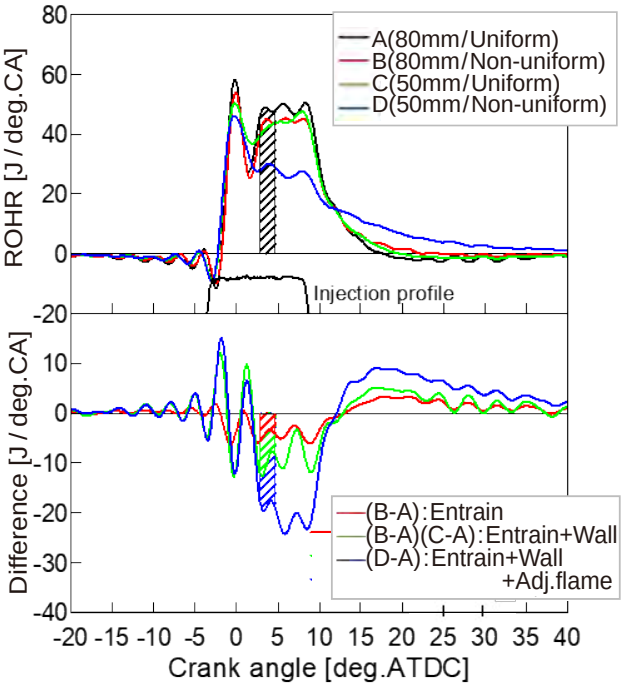


図3　実験による熱発生率(上)とそれら差分(下)

3　計算結果と考察

3.1 燃焼モデルの評価

図4に、噴射圧力135MPa、パターンAの実験結果と計算結果の比較を示す。壁関数にはSWF (標準壁関数:Standard Wall Function)を用い、壁面熱伝達計算にはO'Rourke & Amsdenモデルを用いた。計算結果は、見かけの熱発生率に加えて真の熱発生率も示しており、実験と同様のローパスフィルタ処理を施している。Shell & CTCモデル、及び詳細化学反応計算のどちらを用いた場合も、熱発生率の立ち上り時期、拡散燃焼時の熱発生率の最大値及び燃焼期間は比較的良く再現されている。

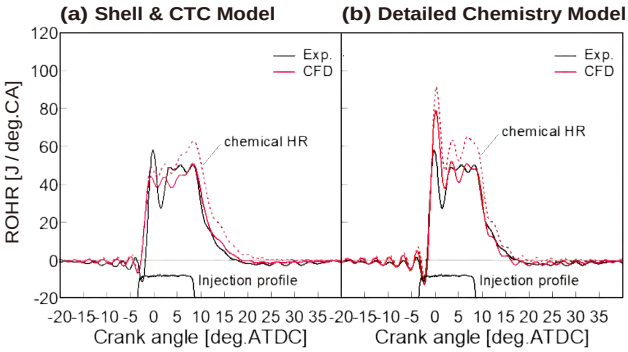


図4　実験及び計算による熱発生率の比較

図5に、筒内をピストン下方から観察した結果を示す。実験結果は火炎の直接撮影画像、計算結果は温度2,000Kと当量比2.0の等値面を表示している。実験結果において白く見える領域は、高温に晒されたSootからの輝炎発光であり、おおむね筒内の高温領域に対応するものとして、本比較を行った。また、3者とも着火時期が異なるため、実験においては輝炎が明確になるタイミング、計算においては温度2,000Kの等値面が明確になるタイミングを起点として、クランク角3°ごとに3枚の画像を比較した。**図5**より、実験で観察された輝炎は、燃焼室内壁(図中白線)付近で現れ、噴霧の上流及び下流側へと広がっていく。これに対して、Shell & CTCモデルを用いた計算結果においては、高温領域は、噴霧の比較的上流部で現れたのちに下流側へ広がっている。これは、実験で確認される輝炎の挙動とは逆の傾向となっている。一方、詳細反応計算を用いた計算結果においては、高温領域は、燃焼室内壁付近で現れ、噴霧の上流及び下流側へと広がっており、実験の輝炎の挙動と一致している。これは、化学反応計算により、予混合気形成後にある程度の着火遅れ時間を経てから着火に至る過程を再現できたためと考えられる。これらの結果から、本検証においては、高温領域の挙動が実験結果の輝炎の挙動と比較的良く一致した詳細反応計算を用いることとした。

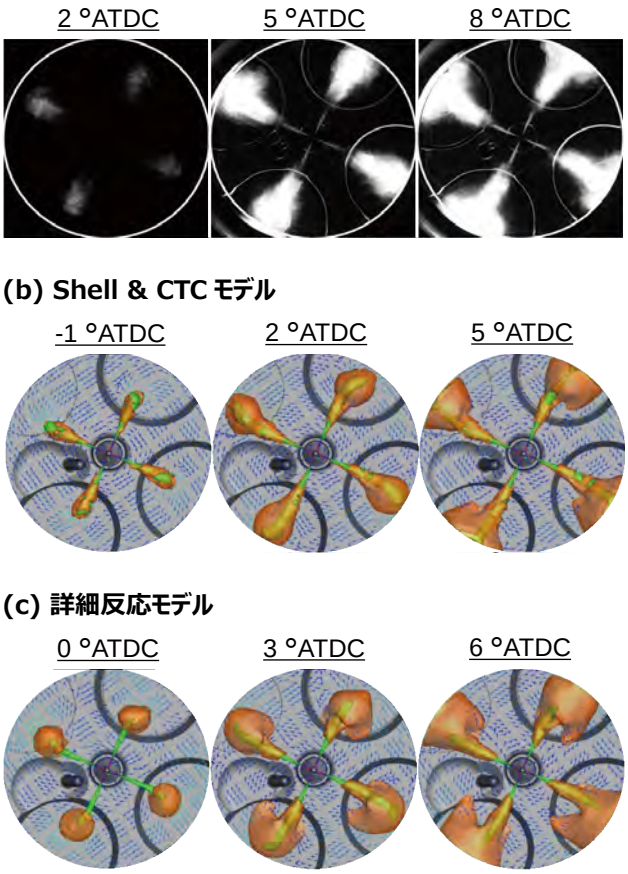


図5　筒内可視化画像
実験及び計算結果の比較(橙：温度2,000K等値面、緑：当量比2.0 等値面)

3.2 壁関数の評価

図6に、パターンCにおいて、SWFとAWF (解析的壁関数:Analytic Wall Function)を用いた場合の計算結果と実験結果の比較を示す。**図6**より、両者の真の熱発生率に大きな違いは見られない。しかしながら、SWFはAWFに対して、熱損失が小さく、見かけの熱発生率の再現性が高いように見える。**図7**に、両壁関数を用いた計算結果の噴孔軸断面の温度分布を示す。燃焼室側面に衝突した噴霧火炎は、燃焼室底面に沿ってシリンダ中心方向に向かって発達していく。AWFでは、火炎先端部が底面から浮き上がっているのに対して、SWFでは先端部も壁面に接触している。また、AWFはSWFに比べて、壁面に沿うペネトレーションが小さく、底面垂直方向への火炎の巻き上がりが大きくなっている。今回の筒内可視化試験は下方からのみの観察であるため、火炎先端部の巻き上がりについて検証することができていない。しかしながら、先行研究における壁面に沿って発達する噴霧の計算においては、壁面に沿うペネトレーションが過大評価され、巻き上がりが過小評価されることが指摘されている[7][8]。また、定容容器のディーゼル燃焼計算において、AWFはSWFに比べて、壁面に沿うペネトレーションが抑制されると同時に、衝突点からの距離に対する熱流束の傾向再現性が改善することが報告されている[8]。本報の計算においても壁面に沿うペネトレーションについては同様の傾向が確認されていることから、噴霧挙動及び熱損失の傾向の再現性向上が期待できるAWFを用いることとした。

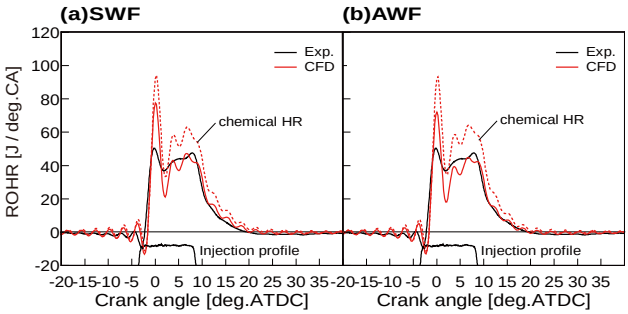


図6　実験及び計算による熱発生率の比較

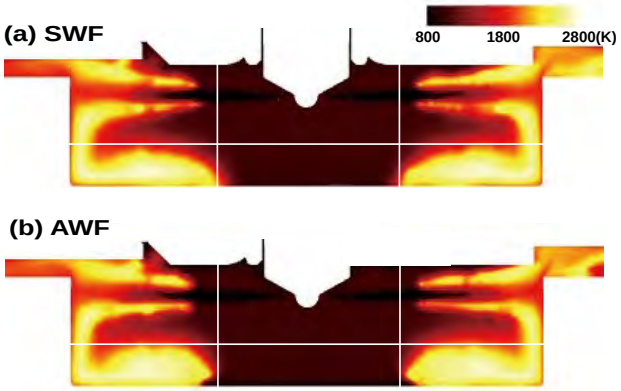


図7　噴孔断面の温度分布

3.3 噴霧干渉影響の評価

図8に、パターンAにおける実験結果と計算結果の比較を示す。いずれの噴射圧力においても、**図4**での比較と同様に、実験の傾向は計算により再現できている。**図9**に、噴射圧力135MPaにおける筒内直接撮影画像と計算結果の比較を示す。比較の方法は、**図5**と同様である。前述のパターンAの場合と同様に、パターンBからDにおいても、実験の輝炎と計算の高温領域は、壁面近傍で出現したあと、噴霧の上流及び下流へ広がることが分かる。また、パターンB及びDの不均等ノズル配置においては、均等配置の場合と比べて、輝炎及び高温領域がノズルに近い位置まで遡っている。図中のパターンBの挿入図に示すように、近接した噴霧間にはノズル方向へ逆流す

る流れが生じている。これは、前述のとおり、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によるものと考えられる[3]。本報の実験及び計算においても、同様の挙動が再現されていることが確認できた。

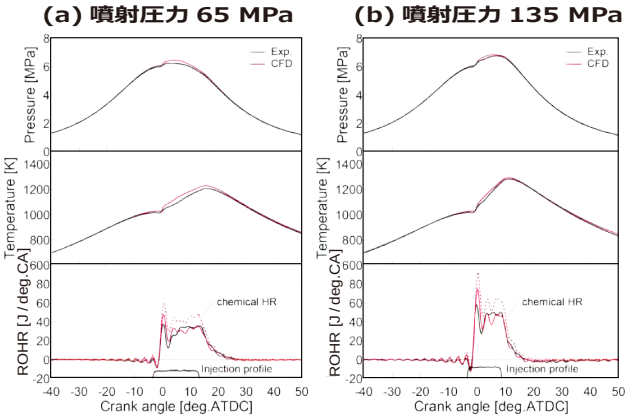


図8　実験及び計算により得られた筒内力、温度、熱発生率

図10に、各パターンの熱発生率の比較を示す。計算結果については、見かけの熱発生率と真の熱発生率を示している。これらの熱発生率に対して、**2.2節**で述べた方法により各干渉が熱発生率に与える影響を評価した。**図11**に、各干渉の寄与度分析結果を示す。実験結果(**図11左**)において、噴射圧力65MPaの場合は壁面の干渉の寄与度が最も大きいのに対して、135MPaの場合は隣接噴霧火炎間の干渉の寄与度が大きくなっている。これを計算による見かけの熱発生率 (**図11中**)を用いた結果と比較すると、いずれの噴射圧力においても、エントレイン及び隣接噴霧火炎間の干渉の寄与度は実験結果を比較的良く再現しているものの、壁面の干渉の寄与度は過大評価となっている。一方、計算により得られる真の熱発生率(**図11右**)を用いた評価では、各干渉の寄与度は、実験結果を比較的良く再現している。見かけの熱発生率と真の熱発生率の最も大きな違いは、熱損失の影響を含むか否かである。この結果から、熱損失を含む見かけの熱発生率は噴霧火炎と壁面との干渉による熱発生率の低下幅が実験値よりも大きく、熱伝達の影響が過大に評価されることが示される。これらの結果より、熱伝達モデル改良の必要性が明らかとなった。これについては今後の課題としたい。

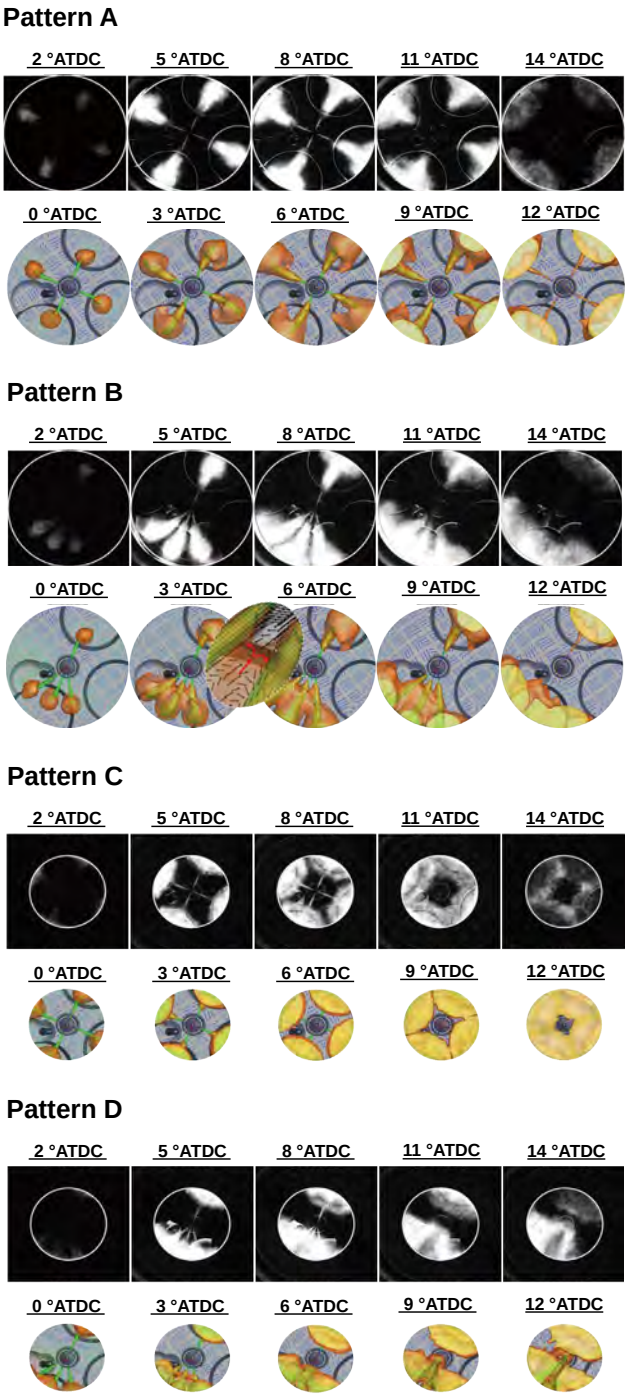


図9　パターンAからDの筒内可視化画像
上段：実験による輝炎発光
下段：計算による温度2,000K(橙)及び当量比2.0(緑)の等値面

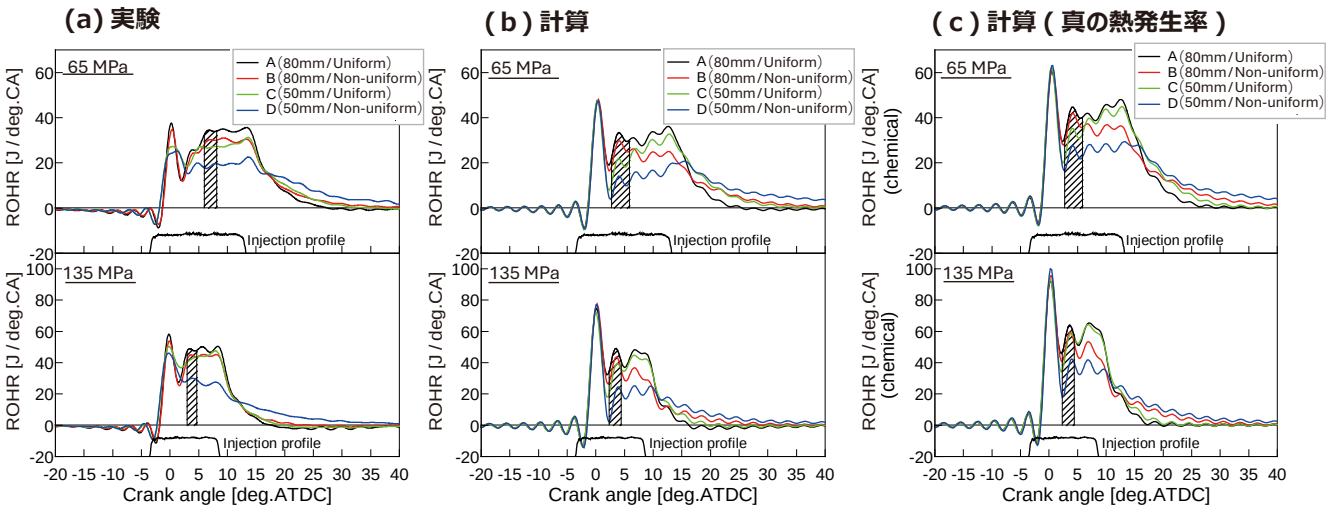


図10　パターンAからDの熱発生率の比較

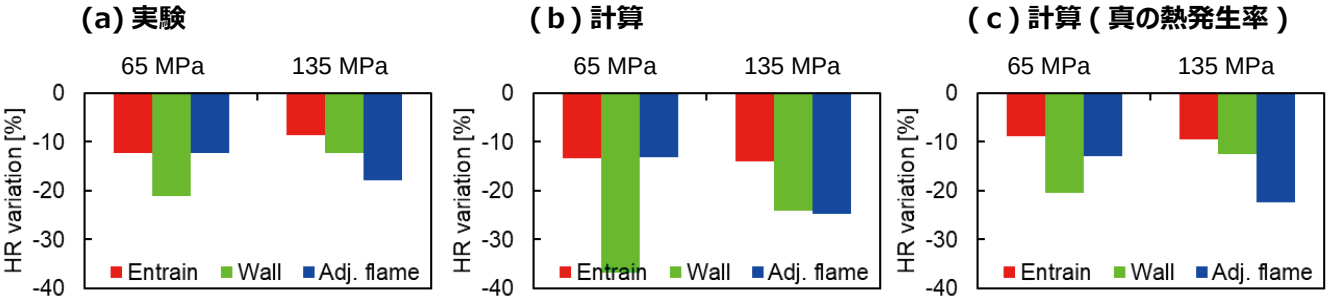


図11　噴霧間干渉が発熱量に及ぼす影響

3.4 噴射圧力が噴霧の干渉に及ぼす影響

本計算においては壁面熱伝達の見積もりに課題が確認された。壁面の干渉には、壁面熱伝達に加えて、壁面による噴霧の分散抑制の影響も含まれる。前節の真の熱発生率を用いた評価は、熱損失の影響を含まないという点から噴霧の分散を主眼とした評価と言える。本実験条件においては、これが実験結果と比較的良く一致した。このことから、本計算結果を用いた場合においても噴霧の分散の観点からの考察は可能と考え、計算により得られた噴霧の質量分率を解析した。

図12に、パターンAからDの噴霧の質量分率を示す。ここでの質量分率$Spray\ mass\ fraction$は、筒内の質量$M_{In\ cylinder}$に対する当量比0.1以上の領域の質量$M_{Phi>0.1}$とし、**式(1)**より算出した。

$$Spray\ mass\ fraction = \frac{M_{Phi>0.1}}{M_{In\ cylinder}} \quad \cdots(1)$$

噴霧の質量分率は、本評価に用いた期間(**図10**のハッチング期間)の平均値を示している。また**図12**中の数値は、各噴射圧力におけるパターンAの質量分率を1とした場合の相対値を示している。**図12**より、いずれの噴射圧力においても、ベースのパターンAに対して、パターンBからDは干渉の影響により噴霧の質量分率が低下する。これは干渉の影響により噴霧の分散が抑制されるためである。65MPaの場合は、135MPaに比べて、パターンCでの低下が大きくなっている。これは、噴射圧力が低いほど、壁面との干渉により噴霧が運動量を失い分散が抑制される効果が大きいためと考えられる。また、**図13**に、各パターンの温度及び当量比の筒内分布を示す。タイミングはそれぞれ本干渉影響の評価に使用した期間の開始付近のタイミングである。**図13**より、壁面の干渉後のパターンCにおいて、噴射圧力が低いほど高温領域の広がりが小さく、噴霧の分散が抑制される様子が確認できる。

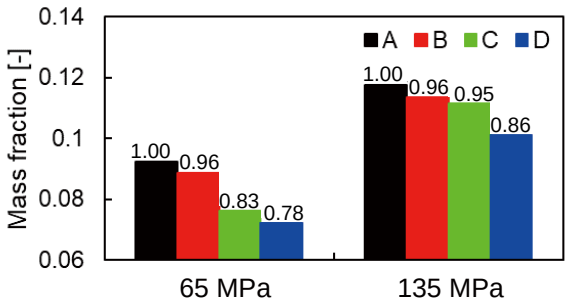


図12　各パターンにおける噴霧の質量分率

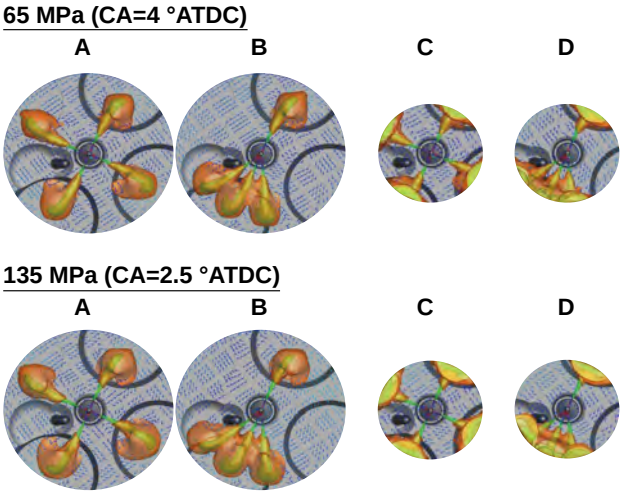


図13　干渉影響が顕著になる時期における
温度2,000 K(橙)及び当量比2.0(緑)の等値面

一方、**図12**より、135 MPaの場合は、65 MPaに比べて、パターンDでの噴霧の質量分率の低下が大きくなっている。これは噴射圧力が高いほど、壁面との干渉後も十分な運動量をもって噴霧が発達するため、その後の隣接噴霧火炎間の干渉の影響が大きくなるためと考えられる。**図13**より、壁面の干渉後のパターンDにおいて、噴射圧力が高いほど高温領域の広がりが大きく、隣接噴霧火炎間の干渉領域が広がっている様子が確認できる。

これらの結果から、噴射圧力が高くなると噴霧火炎間の干渉の寄与度が大きくなる要因として、壁面との干渉後においても噴霧が十分な運動量を維持していることで拡散が継続できることが考えられる。

4　おわりに

噴霧火炎の各干渉が燃焼に及ぼす影響を分離評価し、3次元燃焼CFDシミュレーションソフトCONVERGEを用いて、本現象の解析を行った。

- 燃焼モデルにおいて、Shell-CTCモデルと詳細反応計算を比較した結果、高温領域の発生挙動に違いが見られた。詳細反応計算の結果は、輝炎の発生挙動を比較的良く再現することが確認された。
- 壁面に沿って発達する噴霧火炎において、AWFでは、SWFに対して、壁面水平方向のペネトレーションが抑制され、垂直方向の巻き上りが大きくなる傾向が確認された。これは先行研究にて指摘されるペネトレーションが過大評価かつ巻き上がりが過小評価されるという課題を改善する傾向であった。
- 各干渉が燃焼に与える影響を分離評価した結果、エントレイン及び隣接噴霧火炎間の干渉による熱発生率の低下については、計算により比較的良く実験の傾向が再現された。
- 本評価における壁面の干渉による熱発生率の低下には、噴霧の分散と壁面熱伝達の影響が含まれる。真の熱発生率を用いた評価では実験の再現性が良好であったが、見かけの熱発生率による評価では熱発生率の低下が過大評価された。
- 上記の原因は熱損失の見積もりにある。今後、壁面衝突噴霧火炎に対する熱伝達モデルの改良を行う必要がある。
- 各干渉が熱発生率の低下に及ぼす影響として、噴射圧力の上昇とともに、壁面の干渉の寄与度が小さく、隣接噴霧火炎間の干渉の寄与度が大きくなる傾向が見られた。噴霧の分散の観点から、この要因は、噴射圧力が高くなると壁面との干渉後においても噴霧が十分な運動量を維持していることで拡散が継続できることが考えられる。

本文献は、自動車技術会論文集56巻4号p. 738「噴霧の干渉がディーゼルエンジン燃焼に及ぼす影響(第2報)」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 (参照日：2024.7.24)
(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) 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: 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，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 (2015)
(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－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) 宮下和也 ほか：噴霧の干渉がディーゼルエンジン燃焼に及ぼす影響，自動車技術会論文集，Vol.56，No.2 (2025)，p305-311
(16) H. Saito, et al.: Numerical Simulation of In-Cylinder Particulate Matter Formation in Diesel Combustion by CFD Coupled with Chemical Kinetics Model, SAE paper 2019-01-2244 (2019)