

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 21 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420148

研究課題名(和文) 火炎の壁面上におけるクエンチングに伴い生成する燃焼生成物の挙動

研究課題名(英文) Behavior of combustion products formed by quenching of a flame on a wall

研究代表者

古畑 朋彦 (Furuhata, Tomohiko)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：80261585

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：小型ディーゼルエンジンでは、噴霧火炎が燃焼室壁面に到達しクエンチングが生じ、これが未燃炭化水素の排出や壁面へのデポジットの付着につながると考えられる。そこで本研究では、その基礎研究として炭化水素燃料の拡散火炎に壁面を挿入し、火炎に及ぼす壁面挿入の影響を調査した。その結果、軽油の層流拡散火炎では、火炎内部の温度が低下することや、粒子状物質の濃度が増加することが明らかとなった。また、プロパンの層流拡散火炎を用いて実験を行った結果、軽油の場合とほぼ同様な結果が得られたが、壁面温度の火炎に対する影響はほとんど見られないことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In downsizing diesel engine, spray flame seems to impinge on the combustion chamber wall and be quenched there. The quenching probably causes emission of unburned hydrocarbon and formation of deposit on the wall. In this study, a wall was inserted into a laminar diffusion flame of hydrocarbon fuel, and effects of the wall on the combustion characteristics of the flame were investigated as a fundamental study of the quenching. As a result, in the flame of diesel fuel, temperature in the flame decreased by the wall insertion. Moreover, it was found that the concentration of particulate matter increased in the flame. In the laminar diffusion flame of propane, effects of the wall insertion on the flame were similar to that in the flame of diesel fuel. In the propane flame experiment, moreover, the wall temperature was changed and effects of wall temperature were also investigated. We found that the quenching effect did not so depend on the wall temperature.

研究分野：燃焼工学

キーワード：燃焼生成物 クエンチング 粒子状物質 多環芳香族炭化水素 未燃炭化水素 ディーゼルエンジン

1. 研究開始当初の背景

ディーゼルエンジンはその熱効率の高さからCO₂排出量が少なく燃費にも優れており、特に欧州で多用され、近年の厳しい排出ガス規制をクリアしたものは日本でもクリーンディーゼルとして注目されている。今後のCO₂排出規制を考えると一層の高効率化が求められており、最近の乗用車用小型ディーゼルエンジンでは高過給および小排気量化により摩擦損失や機械損失の低減を図るダウンサイジング化が進められている。さらに燃焼改善のために燃料噴射圧も一層の高圧化が行われている。従って、従来よりも小さな燃焼室に貫通力の高い噴霧が噴射されることになり、噴霧火炎の壁面への衝突が頻繁に生じていると考えられる。火炎が壁面に衝突すると、熱損失による温度の低下やラジカルの失活によりクエンチングが生じると推察される。クエンチングが生じることにより、未燃炭化水素や粒子状物質(PM)などの燃焼生成物の排出量が増加する恐れがある。さらに燃焼室壁面へデポジットが堆積していく可能性もある。

2. 研究の目的

火炎が壁面に到達し、そこでクエンチングすることにより生成すると考えられる未燃炭化水素やPMなどの燃焼生成物の挙動を解明することは、低公害で高効率なディーゼルエンジン開発において今後重要になると考えられる。しかしながら、実際のエンジン内におけるディーゼル噴霧火炎は複雑な構造となっており、調査が困難である。そこで本研究では、まず基礎的な研究として軽油をはじめとする炭化水素燃料の層流拡散火炎を用いて調査することとした。層流拡散火炎に金属板を挿入し、挿入された火炎内部の温度分布、ガス組成分布およびPM濃度分布などを測定し、それらの結果を金属板が挿入されていない火炎における結果と比較することにより、クエンチングにより生成する各種燃焼生成物の挙動を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

炭化水素燃料としては、軽油とプロパンを用いた。

(1) 軽油を用いた場合の実験方法

図1に軽油の層流拡散火炎形成装置を示す。この装置は燃料供給装置、火炎を形成するための燃料プールで構成されている。燃料供給装置は一定の燃料をプールに供給するもので、図中に示すフロート機構によってプール内の燃料高さを一定にするように燃料を供給する働きを持っている。燃料プールには直径16mm、深さ6mmのものを使用した。また、軽油は比較的揮発性の低い燃料であるため、燃料蒸発を促進するために焼結金属(直径8mm、高さ17mm)をプール中央に挿入し、いわゆる灯心火炎を形成するようにした。

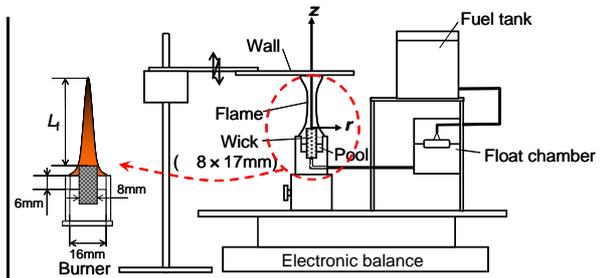


図1 軽油の層流拡散火炎形成装置

燃料流量 m_f は装置全体を電子天秤に乗せ、その重さの単位時間あたりの減少量から求めた。火炎の中心を z 軸、半径方向を r 軸とし、焼結金属の先端に各原点をとった。測定する火炎の長さ L_f は60mmで一定とした。この時の燃料流量は $m_f = 1.95\text{mg/s}$ である。

図1では火炎に金属壁面を挿入しているが、壁面には $65\text{mm} \times 35\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ の銅板を使用し、図1における壁面の右端から17.5mm、短辺の中央に火炎中心がくるように火炎内に挿入した。壁面の焼結金属先端からの高さ z_w は任意に調節できる。

火炎温度の測定には素線径0.5mmのPt-Pt13%Rh熱電対を用いた。測定時には熱電対にすずが付着するため1回の計測毎にすずを除去し、測定位置に挿入した後の最大値を測定値とした。また、壁面温度の測定には素線径0.25mmのK型極細シース型熱電対を用い、それを壁面上部にクリップで密着させることで計測した。

燃焼ガスのサンプリングは火炎内にステンレス製のプローブ(外径3.0mm、内径2.2mm)を火炎中心軸上に挿入することで行った。この時の吸引速度は挿入位置の燃焼ガス流速にできるだけ一致するようにした。燃焼ガス中のPMはプローブ直後に設置した石英フィルタで捕集した。予めN₂を充填したサンプリングバッグ内に燃焼ガスを吸引することで20倍希釈とし、自動車排ガス分析装置(HORIBA MEXA-584L)を用いてHC、CO、CO₂およびO₂の濃度計測を行った。捕集したPMは超微量PM分析装置(HORIBA MEXA1370PM)を用いて分析し、Dry-sootおよびSOFの質量を計測した。また、燃焼ガス中のPAHsをステンレス管に充填したTENAX-TAに吸着させ、それをGC: Gas Chromatograph (SHIMADU GC14BP + GC14BPF)を用いて分析した。このシステムでは、ベンゼン、トルエン、ナフタレン、プチルベンゼン、ジフェニル、フルオレンおよびピレンの定量分析が可能である。

(2) プロパンを用いた場合の実験方法

プロパンを燃料として用いた場合には、市販のブンゼンバーナを用い、空気との予混合は行わずプロパンのみを噴出させ層流拡散火炎を形成した。火炎長さ L_f は60mmで一定とした。火炎および壁面の温度測定法や燃焼ガスのサンプリングおよび分析方法は、軽油

を燃料とした場合と同様である．さらに，プロパンの層流拡散火炎を対象とした場合には，壁面温度を変えることにより壁面温度の影響を検討した．予備実験により，挿入する銅板の大きさを変えることで火炎が衝突している位置の壁面温度を変えられることが明らかとなった．そこで，70mm×90mm と 30mm×50mm の銅板を壁面として使用した．大きい銅板の場合には，壁面温度は約 270 ，小さい銅板の場合には約 330 となった．これらに加えて冷却水を循環させる冷却壁面も製作し使用した．冷却壁面も銅製で，壁面温度は約 18 とした．

また，プロパンの層流拡散火炎では分光器を用いた火炎内部の主要なラジカル化学種の発光強度分布計測も試みた．

4. 研究成果

(1) 軽油の層流拡散火炎

図 2 に壁面を挿入しない場合(以下 w/o Wall)および挿入した場合の火炎写真を示す．

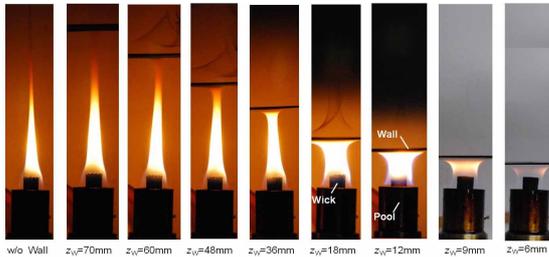


図 2 軽油の層流拡散火炎

壁面がプールに近づくほど火炎の直径が大きくなっていることがわかる．これは火炎が壁面に衝突することで半径方向への流れが生じ，壁面がプールに近づくほどその流速が大きくなるためであると考えられる．また，火炎と壁面の間にわずかな隙間が確認できる．これは壁面近傍での消炎によるものであると考えられる．これ以降では壁面高さ z_w が 48mm の場合について結果を示す．

図 3 に火炎中心軸上の温度分布を示す．

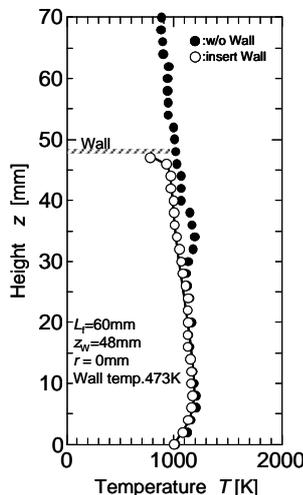


図 3 火炎中心軸上温度分布

縦軸は測定高さ，横軸は火炎温度である．図より，壁面を挿入することで壁面近傍のみでなく $z = 30\text{mm}$ 付近から下流にかけて温度が低下していることがわかる．これは壁面との接触による熱損失だけでなく，壁面から離れた位置の火炎からも輻射により低温の壁面への熱移動が生じているためであると考えられる．

図 4 に火炎中心軸上における各ガス成分の濃度分布を示す．縦軸は各成分の濃度，横軸は測定高さである．図より w/o Wall に比べ，壁面を挿入した場合には上流部で HC および CO が増加し，火炎全体で O_2 が増加していることがわかる．これは火炎温度の結果と同様に，壁面近傍のみでなく壁面から離れた火炎上流側においても輻射により熱損失が増加し，燃焼反応が抑制されたためであると考えられる．また，壁面近傍において CO_2 が減少した．これは壁面近傍での消炎により，燃焼が抑制されたためであると考えられる

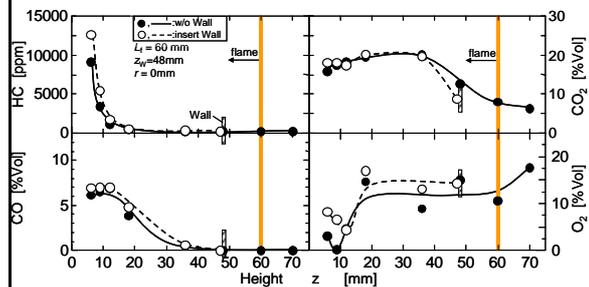


図 4 HC, CO, CO_2 , O_2 の火炎中心軸上濃度分布

図 5 に火炎中心軸上における PM 成分の濃度分布を示す．縦軸は Dry-soot および SOF の質量濃度，横軸は測定高さである．

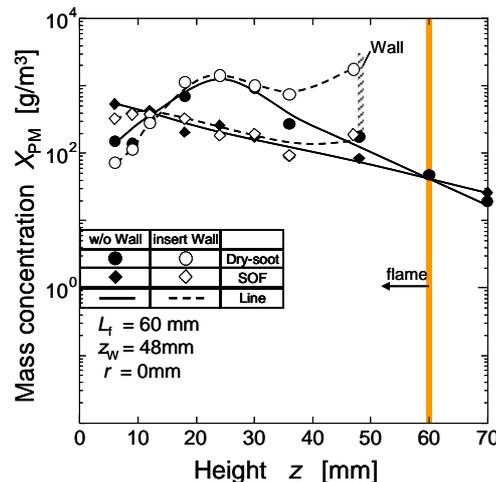


図 5 Dry-soot と SOF の火炎中心軸上濃度分布

w/o Wall に比べ，壁面を挿入することで $z = 30\text{mm}$ 付近から Dry-soot が増加していることがわかる．これは壁面挿入による火炎温度の低下から，火炎下流側での Dry-soot の酸化が抑制されたためであると考えられる．SOF

については Dry-soot より下流側でわずかに増加した。これについても Dry-soot と同様に酸化が抑制されたことも考えられるが、燃焼反応の抑制による未燃分の増加の影響もあると考えられる。

図6に火炎中心軸上における PAHs の濃度分布を示す。縦軸は各成分の質量濃度、横軸は測定高さ(左段: 0~70mm, 右段: 0~20mm)を示している。

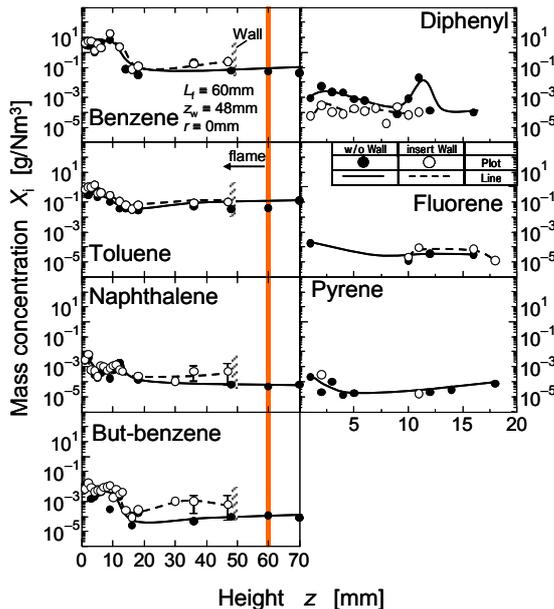


図6 PAHsの火炎中心軸上濃度分布

w/o Wall と比較して壁面を挿入した場合では $z = 20\text{mm}$ までの火炎上流部において、ジフェニルの濃度は減少しているが、ベンゼン、トルエン、ナフタレン、プチルベンゼンの濃度に差異はなかった。また、フルオレンおよびピレンは検出できた測定点は少なかったが、濃度に大きな差異は見られなかった。一方で、 $z = 20\text{mm}$ から壁面近傍にかけてベンゼンがわずかに増加し、ナフタレンおよびプチルベンゼンが大幅に増加した。これは壁面挿入による火炎温度の低下から、火炎中心軸上において PAHs がより炭素数の大きな物質になる成長が抑制された、あるいは脱水素反応が抑制されたためであると考えられる。

PAHs 成分分析の結果と PM 成分分析の結果から、 $z_w = 48\text{mm}$ では火炎上流部での PAHs の成長および Dry-soot の生成への壁面挿入の影響は小さく、火炎温度が低下した領域における Dry-soot の酸化への抑制効果が大きくなると考えられる。また、壁面近傍での SOF の増加は比較的炭素数の小さい PAHs などの炭化水素の増加の影響であると推察できる。

(2) プロパンの層流拡散火炎

プロパン火炎の場合には、壁面の挿入高さ z_w を 12, 24, 36, 48mm として比較を行った。また、ここでは主に壁面として 70mm×90mm の銅板と水冷した冷却壁面(cold wall)を用いた場合の結果を示す。

図7に火炎中心軸上の温度分布を示す。

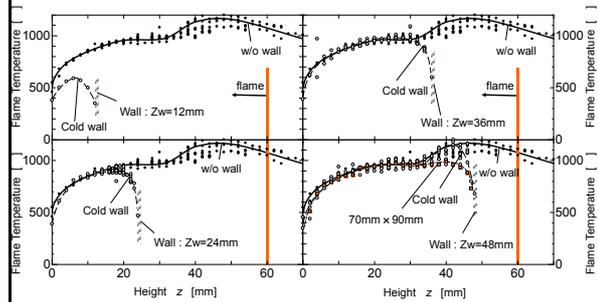


図7 火炎中心軸上温度分布

壁面を挿入しない場合の温度分布と比較すると、 $z_w = 12\text{mm}$ の場合は壁面を挿入することにより壁面より上流側で温度が全体的に低下しているが、 $z_w = 24, 36, 48\text{mm}$ の場合には、壁面近傍でのみ温度が低下していることがわかる。 $z_w = 48\text{mm}$ の場合では、壁面近傍の温度分布が 70mm×90mm の銅板と冷却壁面の場合で異なっているように見えるが、測定データのばらつきを考慮すると、顕著な差があるとは言えないと思われる。

図8に火炎中の化学種濃度分布の一例として、未燃分である CO の火炎中心軸上濃度分布を示す。

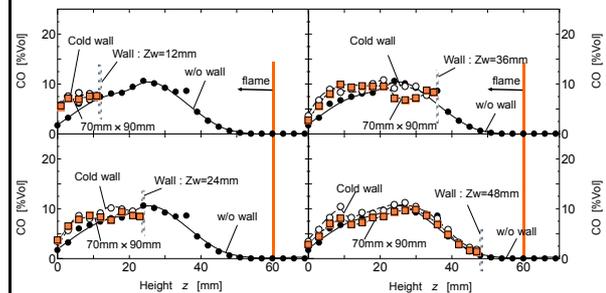


図8 火炎中心軸上 CO 濃度分布

CO 濃度分布については、壁面の挿入高さによらず、壁面近傍よりも火炎の上流側で壁面を挿入しない場合と比較して濃度が高くなっていることがわかる。また壁面温度の違いによる差異は小さいことも明らかとなった。

図9に Dry-soot の火炎中心軸上濃度分布を示す。プロパン火炎の場合には、図5の軽油火炎の場合と比較して濃度が大幅に低くなっていることがわかる。

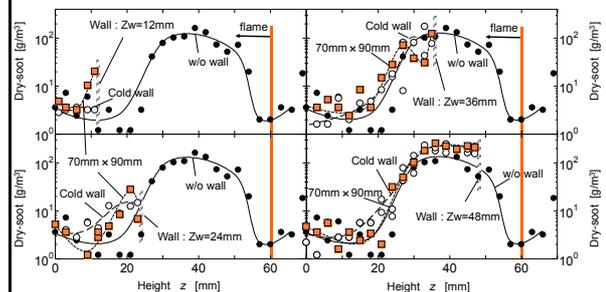


図9 火炎中心軸上 Dry-soot 濃度分布

Dry-soot の濃度分布については、 $z_w = 12, 24,$

48mm の場合では、軽油火炎の場合と同様に、壁面近傍で濃度が明らかに高くなっている。また、 $z_w = 36\text{mm}$ では壁面近傍よりも火炎上流で濃度が高くなっていることがわかる。Dry-soot についても、壁面温度の影響は顕著には見られなかった。

図 10 に分光器による計測結果の一例として CH ラジカル火炎中心軸上における発光強度分布を示す。

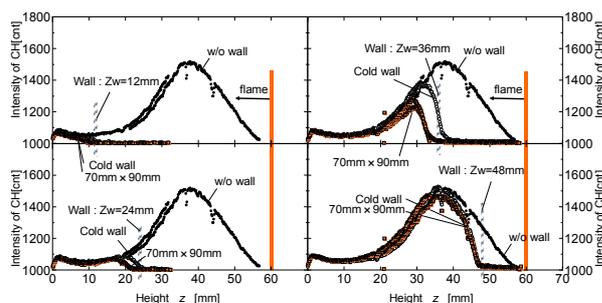


図 10 火炎中心軸上 CH ラジカル発光強度分布

壁面を挿入することにより、壁面近傍の領域で CH ラジカル発光強度も低下していることがわかる。ラジカル発光強度は温度にも依存するため、ラジカル濃度と直接結びつけることはできないが、壁面上でのラジカル失活だけでなく、火炎温度の低下もラジカル濃度の低下に寄与しているのではないかと推測される。また、ラジカル発光強度についても、 $z_w = 36\text{mm}$ の場合を除いては壁面温度の影響はあまり見られなかった。

以上の結果から、プロパン火炎でも軽油火炎とほぼ同様の壁面挿入の影響が見られることが明らかとなった。さらに、挿入する壁面の温度は、壁面挿入が火炎に及ぼす効果に対してはあまり影響しないことがわかった。

本研究成果は、燃焼生成物の生成挙動に対する壁面によるクエンチングの影響を調査した基礎研究として国内外でもあまり例がなく、有用な知見が得られたと考えられる。今後は噴霧火炎を用いた検討や、壁面にごく近い領域での詳細な反応機構を、より空間分解能を高めた計測方法を用い、さらに数値シミュレーションを活用するなどして調査していく必要があると思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計1件)

大橋宇宙(古畑朋彦), 拡散火炎中への壁面挿入による燃焼生成物の生成挙動に及ぼす影響, 第52回燃焼シンポジウム, 2014年12月3日, 岡山コンベンションセンター(岡山県岡山市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古畑 朋彦 (FURUHATA, Tomohiko)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号: 80261585

(2) 研究分担者

座間 淑夫 (ZAMA, Yoshio)

群馬大学・大学院理工学府・助教

研究者番号: 30594113