ディーゼル噴霧火炎内すす濃度の経時変化に及ぼす諸因子の影響*

瀬川大資^{*1}, 山崎博司^{*2}, 角田敏一^{*1}
河津敏弘^{*3}, 津江光洋^{*4}Effects of Operating Parameters on the Time Resolved Soot Concentration
in Diesel Spray FlameDaisuke SEGAWA, Hiroshi YAMASAKI, Toshikazu KADOTA^{*5},
Toshihiro KAWATSU and Mitsuhiro TSUE^{*5} Osaka Prefecture University, Dept. of Mechanical Engineering,
1-1 Gakuen-cho, Sakai, Osaka, 599-8531 Japan

An experimental study has been made of the instantaneous two dimensional visualization of soot distribution profile in a diesel spray flame. The spray flame was formed by a single shot of fuel injection in high pressure and high temperature gaseous environments inside a constant volume combustion chamber. A cross section of the spray flame was illuminated by a sheet of incident laser light. The images of visible flame and scattered light were recorded simultaneously by using a CCD camera with a gated image intensifier at an arbitrary instant of time after the start of fuel injection. The results showed that the high concentration region of soot existed along the central axis of the spray flame, and that the soot distribution profile was highly heterogeneous. The soot in the spray flame would increase with the lapse of time and would reach a maximum after which it would decrease to a very low value approaching zero. The effects of ambient oxygen concentration, injection pressure and fuel properties on the soot formation were revealed.

Key Words: Combustion, Liquid Fuel, Diesel Engine, Spray Flame, Soot Formation, Laser Light Scattering, Operating Parameters

1. 緒 言

ディーゼル機関は、熱効率および経済性でガソリン機関より優位であり、広く利用されているが、排出黒煙による環境汚染が社会問題となっている。これらの問題を解決するには、ディーゼル機関の燃焼室内におけるすす生成機構の解明が必要である。しかしながら、ディーゼル噴霧燃焼は非定常で高速な現象であるため、計測上の困難さから、未解明な点が依然として多く残されている。

このような観点から、ディーゼル噴霧火炎内におけるすす生成機構について、多くの検討が行われてきた。著者らの一部は、高温定常空気流中に形成された非定常噴霧火炎を対象として、すすの濃度、平均粒径、粒子数密度およびC/H比の時間変化を、直接採取法により測定した⁽¹⁾⁽²⁾。神本らは、大形急速圧縮装置内に形成された非定常噴霧火炎を対象に、その火炎内に

おけるすすの濃度、平均粒径および粒子数密度の瞬時二次元分布を、レーザ光散乱法やレーザ誘起赤熱法により明らかにしている^{(3)~(5)}。また、神本らは、実用ディーゼル機関において、その噴霧火炎内のすす濃度分布の時間的・空間的变化を、二色法により明らかにしている⁽⁶⁾。一方、塩路らは、レーザ光散乱法を利用し、実用ディーゼル機関の噴霧火炎内すす濃度分布に及ぼす燃料噴射量、噴射時期や燃焼室形状などの影響を明らかにしている^{(7)~(9)}。このほかにも、実用ディーゼル機関にレーザ光散乱法やレーザ誘起赤熱法を適用した報告例がある^{(10)~(12)}。しかしながら、非定常噴霧火炎内におけるすす濃度などの時間的および空間的变化に及ぼす諸因子の影響について、同一の実験手法により、広範囲にわたって系統的に明らかにした研究は見当たらない。

本研究の目的は、予混合燃焼法により実現される高温高圧場に形成した非定常噴霧火炎を対象として、その火炎内におけるすす濃度の経時変化に及ぼす諸因子の影響を、比較的簡便な手法である平面レーザ光散乱法を利用して定性的に評価することにある。ここでは、雰囲気酸素濃度、噴射圧および燃料性状の影響について検討した結果を報告する。

* 原稿受付 1999年5月24日。

^{*1} 正員、大阪府立大学工学部(〒599-8531 堺市学園町1-1)。^{*2} 正員、愛媛大学教育学部(〒790-8577 松山市文京町3)。^{*3} 学生員、大阪府立大学大学院。^{*4} 正員、東京大学工学系研究科(〒113-0030 東京都文京区本郷7-3-1)。

E-mail: kadota@energy.osakafu-u.ac.jp

2. 実験装置および実験方法

これまで、種々の方法によりディーゼル噴霧火炎の構造解明が試みられているが、実験条件の設定・制御が比較的容易な点から、定容容器とその内部に設置した電気炉を組合せて、高温高压雰囲気を実現する方法がおもに用いられてきた。しかしながら、この方法では装置が大形になるとともに、視野の確保が困難となる。そこで、本研究では予混合燃焼法を採用した。同方法は、定容容器に充てんした可燃性混合気を燃焼させることにより高温高压雰囲気を実現するものである。この方法では、広い視野が確保されるとともに、比較的広範囲な実験条件の設定が可能である。

定容容器および燃料噴射系は、既報と同様のものを用いた⁽¹³⁾。実験装置の概略を図1に示す。その内部に非定常噴霧火炎を形成する定容容器は、内径120 mm、奥行き80 mmの円筒形である。容器側面には、高さ80 mm、幅20 mmのレーザシート光入射用窓および直径120 mmの観察窓が、それぞれ2箇所に対向して取付けられている。容器上方の中央には、噴孔径0.3 mmの単孔ホールノズルが取付けられている。油圧ポンプ・シリンダの作動によってボッシュ式噴射ポンプのプランジャが押し上げられ、それにより供試燃料がノズルから噴射される。一回燃料噴射装置を利用して、非定常燃料噴霧を形成した。なお、混合燃料を

用いた実験では、燃料タンクにかくはん装置を取付け、燃料の混合比が一定になるように配慮した。

定容容器にメタン、空気および酸素からなる希薄混合気を充てんし、これを着火・燃焼させることで実現される高温高压雰囲気中に供試燃料を噴射して、その非定常燃料噴霧を既燃ガス中の残留酸素により燃焼させた。希薄混合気の初期酸素濃度を変化させることにより、高温高压雰囲気(残留)酸素濃度も変化する。この雰囲気酸素濃度は、メタン/空気/酸素の平衡計算により求めた。なお、従来の空気雰囲気中での実験の場合とは異なり、本研究での実験結果には、希薄混合気の燃焼により生成される各種成分の影響が現れていると考えられ、この点については今後の検討が必要である。しかしながら、実用ディーゼル機関の燃焼室内にも既燃ガスは残留しており、その中における非定常噴霧の燃焼現象を明らかにするにあたって、本研究での実験結果は有用であると考えられる。

既燃ガスの温度および圧力の経時変化は、それぞれ素線径100 μm のR形熱電対(Pt 100%, Pt 87%-Rh 13%, 時定数6.3 ms)およびひずみゲージ式圧力センサを用いて測定した。本実験で測定対象とした噴霧燃焼期間内における高温高压雰囲気の温度降下は5 K、圧力降下は3.8 kPaであったことから、温度および圧力はほぼ一定とみなされる。そこで、既燃ガスの温度および圧力が所定の値となった時点で供試燃料を噴射し、測定を行った。

非定常噴霧火炎内のすすは、平面レーザ光散乱法により可視化した。光源には、Nd:YAGパルスレーザの第2高調波(波長532 nm)を利用した。球面レンズおよび円筒面レンズにより、レーザ光を厚さ約0.5 mmのシート状光として、噴霧火炎の噴射ノズル中心軸を通る断面に照射した。レーザの発振時期は、ノズル針弁リフトセンサからの出力信号および遅延回路を利用して制御し、噴霧内の燃料液滴が蒸発した以降について測定を行った。受光系の光路中には2枚の鏡を設置し、噴霧火炎の輝炎像およびレーザシート光による散乱光像を、イメージインテンシファイア付CCDカメラで同時撮影した。散乱光像は、一方の鏡とカメラとの間に挿入した干渉フィルタおよび減光用NDフィルタにより、火炎発光の影響を減じて撮影した。なお、ノズル中心軸方向について、撮影範囲内のレーザシート光強度分布をあらかじめ測定したが、その変化は10%未満であった。また、噴霧の成長過程等を、高速度カメラ(8 000 frame/s)を利用して観察した。

供試燃料には、*n*-ドデカン純粋燃料を用いた。また、純粋燃料の場合よりもすすが低減され则认为ら

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

れる, アルコール混合燃料⁽¹⁾⁽²⁾, および燃料に水を混入させた水中油滴形乳化燃料⁽¹⁴⁾も, 実験対象とした. 混合燃料のアルコール成分としては, メタノールまたはエタノールを用い, n -ドデカンへの混入率は10%あるいは20%(体積比)とした. 乳化燃料は, n -ドデカン, 蒸留水, および非イオン性界面活性剤のポリオキシエチレンノニルフェニルエーテル(Emulgen 906, HLB=10.8, 花王)を所定の体積比で混合し, マグネティックスターで24 h かくはんして作成した. そして, 減圧脱気を2 h 以上行った後に実験に供した. 乳化燃料の含水率は5%あるいは10%(体積比)とした. 界面活性剤は1%(体積比)混入させた.

本実験では, 燃料噴射開始時における高温高压雰囲気温度 T_a および圧力 P_a を, それぞれ1300 K および1.8 MPa とした. また, 雰囲気酸素濃度は, 4.3~34.3%の範囲で変化させた. 噴射ノズルの開弁圧で代表させた噴射圧 P_{inj} は, 10~30 MPa の範囲で変化させた. 噴射期間は2.5 ms とした.

3. 実験結果および考察

3.1 すす散乱光強度分布 レーザシート光を照射した n -ドデカン非定常噴霧火炎からの散乱光像の例を, 図2に示す. 雰囲気酸素濃度は4.3%, 噴射圧は15 MPa であり, 図2(a)は噴射開始後5.5 ms に撮影された散乱光像, 図2(b)はその散乱光像を画像処理し, 散乱光強度分布を4本の等高線で表した等高線図である. 散乱光強度の高い領域は, おもに噴霧中心軸に沿って, 断片的に存在していることがわかる.

散乱光強度は, すす粒子を球形と仮定すると Mie の散乱理論より, すすの粒径分布, 数密度および複素屈折率の関数で表される. さらに, すす粒径と複素屈折率が一定であると仮定し, 多重散乱の影響を無視す

ると, 散乱光強度はすす濃度に比例することになる⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾. しかしながら, 非定常噴霧火炎内において, すすの粒径は空間的に不均一であり, さらに時間とともに変化することが明らかにされている⁽¹⁾⁽⁵⁾. したがって, すす濃度の高い領域では散乱光強度も高くなるが, 散乱光強度分布は, 厳密にはすす濃度分布に対応しない. そこで, 本研究では, すす濃度の高低を定性的に表す指標として, 散乱光強度(すす散乱光強度)を利用した. なお, すす散乱光強度の分布は, 粒径の大きなすすに「重み」をつけたすす濃度分布に相当することが, Dec⁽¹¹⁾により指摘されている.

図2に示されるように, すす散乱光強度の高い領域は, 噴霧火炎内にしま状に存在している. このしまの間隔, つまりすす高濃度領域の間隔と, ノズル先端からの距離との関係を, 図3に示す. すす高濃度領域の間隔はノズルから離れるとともに広がり, その増加割合はノズルから離れると小さくなることがわかる. ま

Fig. 3 Spacing between neighboring stripes for the spray and the spray flame

Fig. 2 Images of instantaneous two-dimensional scattered light intensity and its contour of the diesel spray flame, at 5.5 ms after injection

Fig. 4 Time histories of normalized value of spatially-integrated scattered light intensity

た、図3にあわせて示されている非燃焼噴霧内の液体燃料分布のしき間隔⁽¹³⁾は、すす高濃度領域の間隔とほぼ一致している。このことは、すす高濃度領域の分布が、非燃焼噴霧における液体燃料分布の枝状構造⁽¹³⁾に類似していることを示している。

図4に、すす散乱光強度の火炎断面内積分値または火炎体積内積分値の経時変化を示す。横軸は、噴射開始からの経過時間である。縦軸の I_a は、測定断面においてすす散乱光強度を積分した値(散乱光強度×面積)であり、測定断面内に存在するすすの総量を定性的に表す指標と考えられる。一方、 I_v は、噴霧中心軸を対称軸とした回転体を想定し、測定断面でのすす散乱光強度をその体積において積分した値(散乱光強度×体積)であり、噴霧火炎内部全体に存在するすすの総量を定性的に表す指標と考えられる。ただし、 I_a および I_v は、いずれも極大値で規格化して示している。図4より、 I_a と I_v はほぼ同様に、時間の経過とともに単調に増加して極大値を示し、その後急速に減少することがわかる。ただし、前半の増加期間においては、多少の相違が見られる。なお、図4には、すすによるレーザ光減衰の影響を考慮したときの積分値 I_a および I_v も、あわせて示されている。ここでは、すす粒子は単分散で粒径の経時変化もない、複素屈折率は $1.90-0.55i$ ⁽¹⁷⁾、すすの密度は 2 g/cm^3 ⁽¹⁸⁾と仮定し、さらに火炎内すす質量分布を台形分布⁽⁴⁾と仮定している。レーザ光減衰の影響を考慮したときとしないときで、大きな差はないことがわかる。

図2に示されるように、噴霧火炎内のすすは不均一に分布しており、噴霧火炎内に生成されたすすの総量を表す指標に、軸対称を仮定した積分値を用いることは、適当とは思われない。そこで、本研究では、 I_a (散乱光強度×面積)、つまりすす散乱光強度の火炎断面内積分値を用い、非定常噴霧火炎内のすすの総量の経時変化に及ぼす諸因子の影響について、定性的な評価を行った。なお、前述のように、すす散乱光強度分布は厳密にはすす濃度分布に対応しない。したがって、すすの多いときにはすす散乱光強度の火炎断面内積分値も大きくはなるが、その積分値は、厳密には測定断面内や噴霧火炎内部に存在するすすの総量に対応しない。つまり、これ以降で検討しているすす散乱光強度の火炎断面内積分値の経時変化、および積分値が極大値を示す時期は、すすの総量の経時変化による影響だけでなく、すす粒径の分布とその経時変化や、すす粒子が合体することによるすす粒径の増大とすす粒子数密度の減少などの影響も、受けていると考えられる。その詳細に関しては、従来より広く利用されている透

過光減衰法や、近年利用が広まりつつあるレーザ誘起赤熱法などを併用し、今後さらに検討を行う必要があると思われる。

3.2 雰囲気酸素濃度・噴射圧の影響 図5に、 n -ドデカン非定常噴霧火炎の場合の、すす散乱光強度の火炎断面内積分値の経時変化に及ぼす雰囲気酸素濃度の影響を示す。横軸は、燃料噴射開始からの経過時間であり、縦軸は、雰囲気酸素濃度20.6%のときの極大値で規格化された積分値(散乱光強度×面積)である。いずれの酸素濃度においても、すす散乱光強度の火炎断面内積分値は時間の経過とともに単調に増加し、極大値を示した後に減少することがわかる。また、雰囲気酸素濃度が増加すると、極大値は減少するとともに、噴射開始から極大値を示すまでの時間も短縮している。以上の結果は、直接採取法によるすす濃度の測定結果⁽¹⁾⁽²⁾と、よく一致している。酸素濃度の増加により積分値が減少する要因としては、すすの再燃焼などが考えられ、極大値を示す時期が早まる要因としては、着火遅れの短縮が考えられる。高速度カメラによる撮影結果をもとに、燃料のノズル先端からの噴出開始から、噴霧中に火炎発光が最初に確認されるまでの時間を、着火遅れとみなした。図6に、すす散乱光強度の火炎断面内積分値の、着火からの経時変化を示す。積分値が極大値を示す時期の違いは、図5の場合に比べて小さくなっている。このことから、図5での極大値までの時間には、着火遅れが大きく影響しているものと考えられる。ただし、図6においても、極大値までの時間は酸素濃度の増加により短縮しており、酸素濃度増加によるすす生成および再燃焼の促進効果が現れているものと推測される。

なお、酸素濃度の減少とともにすすは増加する傾向

Fig. 5 Effect of oxygen concentration on the integrated scattered light intensity

Fig. 6 The integrated scattered light intensity as a function of time after autoignition (effect of oxygen concentration)

Fig. 8 The integrated scattered light intensity as a function of time after autoignition (effect of injection pressure)

Fig. 7 Effect of injection pressure on the integrated scattered light intensity

Fig. 9 Effect of water content in emulsified fuel on the integrated scattered light intensity

が示されたが、一方、液滴火炎の場合には、ある程度まで酸素濃度が減少すると、すすは逆に減少することが明らかにされている⁽¹⁹⁾。このことから、本実験の場合にも、実験範囲外のより低酸素濃度の領域においては、酸素濃度の減少とともに、すすが減少する傾向を示すものと推測される。

図7に、すす散乱光強度の火炎断面内積分値の経時変化に及ぼす噴射圧の影響を示す。縦軸は、噴射圧10 MPaのときの極大値で規格化された積分値(散乱光強度×面積)である。いずれの噴射圧においても、すす散乱光強度の火炎断面内積分値は時間の経過とともに単調に増加し、極大値を示した後に減少することがわかる。また、極大値および噴射開始から極大値を示すまでの時間は、噴射圧の上昇とともにそれぞれ減少・短縮することがわかる。噴射圧の上昇は噴霧の微粒化促進に有効であり、このため、燃料液滴の蒸発および雰囲気体との混合が促進され、着火遅れは短くなる

と考えられる。図8は、着火を起点とした、すす散乱光強度の火炎断面内積分値の経時変化である。着火から極大値を示すまでの時間も、図7の場合ほど顕著ではないが、噴射圧の上昇とともに減少している。この時間短縮と極大値の減少は、噴射圧の上昇による微粒化と混合促進のために、すすの生成および再燃焼が促進されたことによるものと推測される。

3.3 乳化・アルコール混入の影響 図9に、*n*-ドデカンおよびその乳化燃料の非定常噴霧火炎における、すす散乱光強度の火炎断面内積分値の経時変化を示す。縦軸は、*n*-ドデカンのときの極大値で規格化された積分値(散乱光強度×面積)である。また、図9には、界面活性剤を使わずに、燃料タンク内のかくはん装置によって *n*-ドデカンと水とを混合した場合の結果も、あわせて示されている。含水率を5%とすることで、積分値の極大値は大幅に減少することがわかる。そして、含水率を5%から10%まで増加させた場

合には、極大値はあまり減少しない。以上の結果は、直接採取法によるすす濃度の測定結果⁽²⁾、および微小重力環境下の液滴火炎を対象として、平面レーザ光散乱法を利用した実験結果⁽²⁰⁾と、よく一致している。一方、含水率10%のとき、界面活性剤を使用していない水混合燃料の場合と、界面活性剤を使用した場合との結果に、大きな差はない。このことから、すすが減少傾向を示すのは、水混入の影響によるものと考えられる。このように、本実験の観察および測定では、ミクロ爆発発生など乳化燃料に特有の二次微粒化現象とすす低減との因果関係を、明確に示すような結果は得られなかった。

図10に、エタノールまたはメタノールを混入した *n*-ドデカン/アルコール二成分混合燃料の非定常噴霧火炎における、すす散乱光強度の火炎断面内積分値の経時変化を示す。アルコールの混入により、積分値の極大値は減少することがわかる。また、メタノールを混入させた場合のほうが、極大値の減少割合は大きくなる。このようにすすが減少傾向を示すのは、アルコールの混入による火炎温度の低下や、アルコール分子中の酸素原子の影響⁽²⁾⁽²¹⁾などによるものと考えられる。なお、噴射開始から積分値が極大値を示すまでの時間は、*n*-ドデカン純粋燃料の場合と、メタノールまたはエタノールを混入させた場合とで、大きな差のないことがわかる。

図11および図12に、それぞれすす散乱光強度の火炎断面内積分値の極大値、および噴射開始から極大値を示すまでの時間に及ぼす、含水率またはエタノール混入率の影響を示す。図11より、乳化燃料の場合には5%程度の含水率とすることで、すすの減少傾向は顕著に示されることがわかる。しかしながら、乳化燃

料の場合に、着火遅れは大きくなることが知られており、その結果、図12のように極大値を示すまでの時間が長くなってしまふものと考えられる。一方、エタノール混入の場合、すすの減少傾向は乳化燃料の場合ほど顕著ではないものの、20%の混入で極大値が30%近く低減されることがわかる。そして、図12に示されるように、エタノール混入の場合には極大値を示すまでの時間は変化しない。エタノール混入は、噴霧の着火にあまり影響を及ぼさないものと考えられる。

4. 結 言

定容容器内の高温高压雰囲気中に形成した非定常噴霧火炎を対象として、その火炎内におけるすす濃度の経時変化に及ぼす諸因子の影響を、比較的簡便な手法である平面レーザ光散乱法を利用し、定性的に評価した。高温高压雰囲気は、予混合燃焼法により生成した。すすの総量を定性的に表す指標として、すす散乱

Fig. 11 Effect of water or ethanol content on peak value of the integrated scattered light intensity

Fig. 10 Effect of ethanol or methanol added to fuel on the integrated scattered light intensity

Fig. 12 Effect of water or ethanol content on time to the peak

光強度の火炎断面内積分値を用い、その経時変化に及ぼす雰囲気酸素濃度、噴射圧および燃料性状の影響について検討を行った。本研究より得られた結論を以下に示す。

(1) すすの多い領域は断片的に存在しており、その分布は、非燃焼噴霧における液体燃料分布に見られる枝状構造と類似している。

(2) すす散乱光強度の火炎断面内積分値は、時間の経過とともに増加し、極大値を示した後に減少する。

(3) 雰囲気酸素濃度の増加および噴射圧の上昇とともに、積分値の極大値は減少する。

(4) 燃料噴射開始からすす散乱光強度の火炎断面内積分値が極大値を示すまでの時間は、雰囲気酸素濃度の増加および噴射圧の上昇とともに短縮する。着火から極大値までの時間も、雰囲気酸素濃度の増加および噴射圧の上昇とともに短縮する。

(5) 乳化燃料の含水率の増加とともに、すす散乱光強度の火炎断面内積分値の極大値は減少する。燃料噴射開始から極大値を示すまでの時間は、含水率の増加とともに長くなる。

(6) 界面活性剤を使用しない水混合燃料においても、乳化燃料の場合と同様に、積分値の極大値は減少する。

(7) メタノールおよびエタノールの混入により、すす散乱光強度の火炎断面内積分値の極大値は減少する。一方、燃料噴射開始から極大値を示すまでの時間は変化しない。

文 献

- (1) Kadota, T., Henein, N. A. and Lee, D. U., *Proceeding 18th Symposium (International) on Combustion*, (1981), 329-336, The Combustion Institute.
- (2) Kadota, T. and Henein, N. A., *Particulate Carbon*, (1981), 391-421, Plenum Press.
- (3) 元永浩・神本武征・小林治樹・小酒英範, 機論, **57**-536, B (1981), 1469-1475.
- (4) Won, Y. H., Kamimoto, T., Kobayashi, H. and Kosaka, H., *SAE Paper*, No. 920114 (1992).
- (5) 小酒英範・西垣隆弘・原田伸一・神本武征, 機論, **61**-590, B (1995), 3426-3431.
- (6) Matsui, Y., Kamimoto, T. and Matsuoka, S., *SAE Paper*, No. 790491 (1979).
- (7) Shioji, M., Yamane, K., Sakakibara, N. and Ikegami, M., *Proc. COMODIA-90*, (1990), 613-618.
- (8) 塩路昌宏・島倉久範・山根浩二・池上詢, 機論, **60**-579, B (1994), 3971-3976.
- (9) 塩路昌宏・伊藤智・山根浩二・池上詢, 機論, **61**-581, B (1995), 344-350.
- (10) Dec, J. E., zur Loye, A. O. and Siebers, D. L., *SAE Paper*, No. 910224 (1991).
- (11) Dec, J. E., *SAE Paper*, No. 920115 (1992).
- (12) Pinson, J. A., Mitchell, D. L., Santoro, R. J. and Litzinger, T. A., *SAE Paper*, No. 932650 (1993).
- (13) 津江光洋・服部廣司・斉藤晃・角田敏一, 機論, **59**-564, B (1993), 2584-2589.
- (14) 岩間彬・石田博樹・岩田元彦, 燃料協会誌, **58**-626 (1979), 432-448.
- (15) 角田敏一, 燃焼研究, **59** (1982), 15-33.
- (16) Kerker, M., *The Scattering of Light*, (1969), 27-96, Academic Press.
- (17) Lee, S. C. and Tien, C. L., *Proceeding 18th Symposium (International) on Combustion*, (1981), 1159-1166, The Combustion Institute.
- (18) Wersborg, B. L., Howard, J. B. and Williams, G. C., *Proceeding 14th Symposium (International) on Combustion*, (1973), 929-940, The Combustion Institute.
- (19) Kadota, T., Hiroyasu, H. and Farazandehmehr, A., *Combust. Flame*, **29** (1977), 67-75.
- (20) Tsue, M., Segawa, D., Kadota, T. and Yamasaki, H., *Proceeding 26th Symposium (International) on Combustion*, (1996), 1251-1258, The Combustion Institute.
- (21) Kadota, T. and Hiroyasu, H., *Combust. Flame*, **55** (1987), 195-201.

(1) Kadota, T., Henein, N. A. and Lee, D. U., *Proceeding*