着火遅れ測定法に関する実験的検討*

小沼 義昭*¹, 樋口 隆行*²Experimental Examinations of the Methods
of Ignition Delay Measurements

Yoshiaki ONUMA and Takayuki HIGUCHI

The following three methods of ignition delay measurements, ultraviolet radiation of OH, visible and ultrared radiation and pressure rise due to ignition, were experimentally compared in the spontaneous ignition of fuel sprays injected into a steady hot-air stream. The following results were obtained. (1) Ignition delays measured by the above three methods show a similar trend to each other in the Arrhenius co-ordinates, but the values are different and become larger in order for OH radiation, visible and ultrared radiation and the pressure rise. In particular, the difference is large for a high air temperature or short ignition delay. (2) Ignition delay measured with visible and ultrared radiation is strongly influenced by soot formation. This suggests that the detection of visible and ultrared radiation may possibly be incorrect in some conditions of ignition delay experiments because the soot formation drastically changes in flow fields due to fuels or mixing condition.

Key Words: Combustion, Spontaneous Ignition, Measuring Method, Spray Combustion, Cetane Number

1. ま え が き

燃料噴霧やガスの自発着火を検出する方法には種々のものがある。ディーゼル機関や定容燃焼器を用いた実験では燃焼開始時の圧力上昇をもって着火と判定することが多い。この方法は実用的意味においては最も重要な情報を提供するものであるが、噴霧を対象とする場合、着火遅れが短く着火時にまだ十分な量の可燃混合気ができている場合などは真の意味での着火の瞬間をとらえているとは考えにくい。一方、フォトダイオードなどを用いて可視および赤外領域の火炎発光を感知して着火を検出する方法も多く使われている。この方法は着火の検出という点では圧力上昇を用いる方法よりは精度がよいと考えられるが、可視および赤外光を用いるために問題が生ずる。つまり、着火に関する実験においては背景光が存在することが多いが、この測定法では着火による発光がこの背景光より強くなった瞬間を検出していることになり、この測定値には燃料の蒸発性や火炎輝度の違い、背景光の強さなど

が影響を及ぼすと考えられるからである。より厳密に着火の瞬間をとらえるものとしては、着火初期に発生するOH基の紫外域での発光を使用する方法がある。この方法では紫外光を用いるため、背景光にはほとんど妨害されことなく測定感度を上げることができ、上述の三つの方法のうちでは最も精度良く着火の瞬間をとらえる方法であると考えられる。

このように着火の検出には種々の方法が用いられており、測定法や着火そのものの定義の違いによって着火遅れの測定値には相当な相違が生ずるものと推測されるが、それらの相互関係は必ずしも明らかではない。そこで本研究においては、電気炉で発生した定常高温空気流中に各種の液体燃料を噴射したさいの着火を対象として、上記3種の検出法を用いて着火遅れの同時測定を行った。得られた測定値の相互関係を比較検討した結果、各測定法の特徴および着火遅れ測定における問題点に関し若干の知見を得ることができたのでここに報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は文献(1)の実験で使用したものと同じであるので詳しい説明は省略し、以下にその要点のみを述べる。燃焼器は96 mm×196 mmのく形断面で高さ

* 平成元年7月14日 東海支部岐阜地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年12月19日。

*¹ 正員、豊橋技術科学大学(〒440 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)。

*² 学生員、豊橋技術科学大学大学院。

が200 mm, 対向する2側面は石英ガラスでできている。電気炉で1073~1273 Kに加熱した空気を燃焼器中を下から上へ流し, 燃焼器壁面に取付けられたノズルからアキュムレータに蓄圧された燃料を水平, 空気流に対し直角に噴射する。燃料噴射は常に着火が起こった後に止められた。使用したノズルは噴口径0.2 mm, 噴口数1のホールノズル(NP-DLOS 201 NP 1)で, 実験はすべて常圧, 気流速度4 m/sで行った。燃料噴射圧は11 MPaである。

燃焼器を上部から見たときの各種検出器の配置および計測器系の概要を図1に示す。着火遅れは, 5 mW He-Ne レーザからの細光を噴射燃料が遮断する瞬間と, 各種検出器が着火を感知した瞬間との時間間隔を計測することにより求めた。

可視および赤外における発光の検出は15個(3×5)のフォトダイオード(浜松ホトニクス, S1190-01)で行った。感度波長範囲は430~1140 nm, 最高感度波長は900±50 nm, 立ち上がり時間は3 nsである。

OH基からの紫外光は, 燃焼器全域からの光が感知できるように石英レンズで集光された後, 2枚のフィルタを透過し, 光電子増倍管で検出された⁽²⁾。フィルタ1は金属干渉膜フィルタ(日本真空光学, MIF-W形, ピーク波長: 309.5 nm, 半値幅: 17 nm), フィルタ2は色ガラスフィルタ(東芝硝子, UV-D33S, ピーク波長: 330 nm)である。光電子増倍管(浜松ホトニクス, C752)の感度波長範囲は180~870 nm, 最高感度波長は330 nm, 応答速度は2.2 nsである。

着火・燃焼による圧力上昇の検出についてであるが, 本実験では大気解放の燃焼器を用いて行われており, 密閉容器での実験のように圧力上昇を感知して着火を検出することはできない。そこで図1に示すように圧力変換器を燃焼器の外部(ノズル対壁から15 mmの位置)に設置し, 大気中において着火時に生ずる微弱圧力波を感知する方法を試みた。圧力波が着火点か

ら圧力変換器まで伝ばする時間は0.05 ms以下である。使用した圧力変換器(豊田工機, PMS-5形-5H)の感度は20 mV/kg/cm², 固有振動数は40 kHz以上である。

以上の検出法を用いて3種類の着火遅れを同時に計測した。以下に示す測定データはすべて30回の測定の平均値である。

3. 実験結果および検討

3.1 メタノールと軽油の着火遅れ 図2に同時測定波形の例を示す。図中のINJ, PD, PMT, PTはそれぞれ, 燃料噴出に対する波形, 可視および赤外発光に対するフォトダイオードの出力, OH発光に対する光電子増倍管の出力, 圧力波に対する圧力変換器の出力を示す。図2(a)は高温空気流中でのメタノールの着火に対する結果であるが, これを見ると, まず最初にOH発光が現れ, 一度やや減衰した後可視・赤外発光の出現とともにOH発光も再び強くなって大きな極値を示し, ほぼ同時に最初の圧力波が検出されている。この2段階着火のような現象は高温時に現れるもので, 図2(c)の軽油の場合にもわずかにその傾向が見られる。高温時は着火遅れが短く, 着火時に存在する可燃混合気量は少ない。したがって着火時にできる火炎によってはフォトダイオードで検出できるほどの光量は得られず, 2回めのより大きな急激燃焼時に可視・赤外発光の検出が行われたものと考えられる。図2(b)は低温時の結果である。この場合は2段階着火のような現象は見られず, PD, PMT, PTの出力波形ともほぼ同時に立ち上がっている。図2(c)は高温時における軽油の着火に対する結果である。軽油の場合にはメタノールのように可視・赤外発光と同時に圧力波が発生するのではなく, 圧力上昇がやや遅れる特徴がある。高温時の結果である図2(a), (c)の圧力信号を見ると, 最初の大きな圧力波に続いて, 小さな圧力波がいくつか生ずることがわかる。これは着火後の爆発的な燃焼の後でも, 混合気形成と急速燃焼を周期的に繰返していることを示すものと思われる。なお, 図からわかるように, 圧力波の出力信号は最大でも0.02 mVであり, 圧力に換算すると0.1 kPaとかなり微弱であった。

図2のような波形から着火遅れを求め, アレニウスプロット, つまり縦軸を着火遅れの対数, 横軸を絶対温度の逆数として整理した結果を図3および図4に示す。フォトダイオードおよび光電子増倍管の波形においては立ち上がり点を着火時刻としたが, 圧力波形においては, 立ち上がり点が不明りょうであるため, パ

図1 実験装置概要

図2 信号波形

ルス状波形の頂点をもって着火時刻とみなした。実験は空気温度を 1273 K , 1223 K , 1173 K , 1123 K , 1073 K の5段階に変化させて行った。両図から、3種の着火検出法によって得られた着火遅れ時間の対数値は、絶対空気温度の逆数に対しほぼ直線的に変化し、高温部で水平方向へ少し曲がるという同一の傾向を示していることがわかる。しかし測定値そのものには違いが現れ、OH 発光、可視・赤外発光、圧力上昇の順に遅れは長くなっており、特に高温時の着火遅れが短い場合に違いが大きくなることがわかる。

図3および図4をもとに可視・赤外発光遅れとOH発光遅れの差 $\Delta\tau_{PD}$ と圧力上昇遅れとOH発光遅れの差 $\Delta\tau_{PT}$ を求めた結果を図5に示す。縦軸 $\Delta\tau$ は普通目盛であり、また添字1, 2はそれぞれ燃料をメタノールおよび軽油とした場合を表す。図3, 4のアレニウスプロットにおいては、測定法による着火遅れの違いは高温部で大きく、低温部ではほとんどない結果になっているが、普通目盛で描いた図5を見ると、OH発光から可視・赤外発光までの時間あるいはOH発光から圧力上昇までの時間は、絶対値としては空気温度が変化しても大きな違いはなく、むしろ温度が低くなって着火遅れが長くなると若干長くなっていることがわかる。

図3 メタノールの着火遅れ

図4 軽油の着火遅れ

また、図3において燃料をメタノールとした場合は可視・赤外発光遅れが圧力上昇遅れに近い曲線を示すのに対し、図4の軽油の場合には可視・赤外発光遅れはOH発光遅れに近くなっている。この現象は、軽油がすすを生成しやすく火炎の輝度が大きいことに起因するものと考えられる。つまり、火炎輝度の大きい軽油の場合には着火によるOH発光から短時間の後に明るい火炎が出現するのに対し、すす生成のないメタノールの場合、火炎がフォトダイオードの検出可能な光量に達するのは多量の燃料が燃焼する圧力上昇時の直前まで遅れるため、このような現象が生じたものと考えられる。

著者らは、従来空気温度1223 Kより低温領域で実験を行ってきたが、それらの結果においては、アレニウスプロットされた着火遅れはほぼ1本の直線上に乗る現象が見られた⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。今回電気炉を改造して最高温度を50 K高め、1273 Kとしたが、その結果図3、4に見られるごとく、1273 Kの測定値は直線からわずかに上方にずれ、高温領域での着火遅れは下に凸の挙動を示す結果となった。このような挙動は文献(4)において簡単なモデルを使って予測しており、また、燃料ガス噴流の着火においても見られる現象で、文献(5)においても簡単に言及している。したがって、本報ではこれに関する議論は省略するが、この現象については今後さらに詳細な理論的検討を行う予定である。

ここで、本実験において新しく試みられた圧力波の検出について考えてみる。ディーゼル機関や定容燃焼器における着火遅れ測定で通常用いられる圧力上昇の感知は、化学的着火以後の燃焼による積算発熱量を検出しているのに対し、本実験の圧力波の感知は発熱量の時間微分値を検出していることになるものと考えられる。したがってこれら二つの測定法は異なる現象を検出しているわけであるが、燃焼積算量がある限界値を超える時点は、化学的な着火以後に起こる最初の急激燃焼期にほぼ一致する確率は大きいと考えられ、この場合は両測定法による着火遅れは近い値をとること

図5 着火遅れ時間の差

になる。ただしこれは推論であり、これら2種の測定値の相互関係に対する判定は困難であるが、本実験から判断して、少なくとも、圧力波の検出は着火遅れに関連した情報を得る一つの手段となりうることは間違いないと思われる。

3・2 セタン価と着火遅れ 燃料の着火性を評価する指標にセタン価があり、この標準燃料として通常セタン $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_3]$ と α -メチルナフタリン $(\text{CH}_3\text{C}_{10}\text{H}_7)$ の混合燃料が用いられる。そこで次の実験として、上記混合燃料中のセタンの質量割合(セタン価)と着火性の関係が前に述べた3種の着火遅れ測定法によってどのように変化するかを調べた。

セタン価100, 50, 0の燃料に対する着火遅れをアレニウスプロットした結果を図6に示す。空気温度が高温になって着火遅れが短くなると測定法による着火遅れの違いが著しくなり、またOH発光、可視・赤外発光、圧力上昇の順に信号が検出されることは先に示したメタノールおよび軽油の場合と同様である。図6(a), (c)を比較すると、セタンを燃料とした場合は可視・赤外発光遅れは圧力上昇遅れに近い挙動を示すのに対し、 α -メチルナフタリンの場合はOH発光の直後に可視・赤外発光が発生していることがわかる。可視・赤外発光遅れのこのような燃料による挙動の相違は図3、4に示したメタノールと軽油の場合にも現れた現象である。セタンと α -メチルナフタリンとを燃焼によって比較したところ、 α -メチルナフタリンのほうがすす生成傾向がわきだって大きく、この現象もまた燃料によるすす生成量の違いによる火炎輝度の相違に起因しているものと考えられる。図6(b)はセタン価50の場合であるが、この燃料においても α -メチルナフタリンの大きなすす発生傾向が可視・赤外発光に強い影響を与えているようである。

図7、8、9はOH発光、可視・赤外発光、圧力上昇を用いて測定した着火遅れのセタン価に対する依存性を示す。図7、図9を見ると、OH発光遅れと圧力上昇遅れは、絶対値やこう配は両者でやや異なるが、空気温度に関係なくセタン価が大きくなるとその対数値がほぼ直線的に小さくなるのがわかる。これに対し図8に示す可視・赤外発光遅れにおいては、着火遅れに対するセタン価依存性は複雑な挙動を示し、特に、空気温度が高いときは極値を持つことがわかる。 α -メチルナフタリンの混合割合が大きくなりセタン価が小さくなると、図7に示すように着火遅れ自体は増大するが、すす発生傾向も増大し、OH発光から可視・赤外発光までの時間間隔は短縮される。これが可視・赤外発光遅れが極値を持つこのように複雑な挙動を示した原因

であると考えられる。空気温度が低くなると可視・赤外発光遅れもしだいに単調な変化をするようになり、1073 Kにおいてはセタン価に対しほぼ直線的に減少するようになるが、この理由としては、図5を考慮すると、OH発光遅れ時間に対するOH発光から可視・赤外発光までの時間間隔の比率が急激に小さくなることにあると考えられる。

このように、可視・赤外発光遅れは着火・燃焼時に発生するすす濃度によって大きく影響され、セタン価および他の二つの測定値との対応も良くない。一般燃焼場におけるすすの生成状況は燃料の種類のみならず、

雰囲気温度や圧力、さらに流動・混合の状態によっても変化するため、上記の現象は、可視・赤外発光を用いた着火遅れの測定は実験方法によっては大きな誤差を生ずる危険性があることを示唆している。

(a) セタン価 100

(b) セタン価 50

(c) セタン価 0

図6 セタン価と着火遅れ

図7 OH発光遅れのセタン価依存性

図8 可視・赤外発光遅れのセタン価依存性

図9 圧力上昇遅れのセタン価依存性

4. ま と め

燃料噴霧の自発着火に伴う三つの現象、つまり OH 紫外発光、可視・赤外発光、圧力上昇、を検出することによって 3 種の着火遅れが測定できる。本研究では、定常高温空気流中へ噴出された燃料噴霧の着火遅れを上記三つの測定法を使って同時測定することによって、これら測定法の特徴および測定された着火遅れの意味などについて検討し、次のような結論を得た。

(1) 本研究に用いた燃焼器は大気解放形であるため、圧力上昇遅れの測定法としては気流中を伝ばする微弱な圧力波の検出を試みたが、測定結果から、この測定法は着火に関する情報を得る一つの手段となりうる事が推察された。

(2) 上記 3 種の方法によって測定された着火遅れはアレニウス座標上でよく似た挙動を示すが、その大きさは異なり、OH 発光遅れ、可視・赤外発光遅れ、圧力上昇遅れの順に長くなる。特に、空気温度が高く、着火遅れが短いときにその違いは著しい。

(3) セタンと α -メチルナフタリンの混合燃料を用い、セタン混合比率(セタン価)を変化させて実験を行った結果、OH 発光遅れおよび圧力上昇遅れはその対数値がセタン価とほぼ線形関係を示したが、可視・

赤外発光遅れは極値を持つ複雑な挙動を示した。

(4) この原因は可視・赤外発光が燃料のすす生成特性に強く影響されることにあるものと推察された。また、この事実は、フォトダイオードなどによる可視・赤外発光の検出が実験条件によっては着火遅れとしては不適当な情報を提供する可能性のあることを意味している。

得られた実験結果は、OH 発光から圧力上昇までには時間を要し、特に着火遅れが短いときにはその時間間隔は OH 発光遅れそのものよりむしろ長くなることを示している。本実験は常圧で行われており、この結果をもって高圧下での現象を推測することは困難であるが、もしこのような現象がディーゼル燃焼においても存在するとすれば、実用的に重要な現象である圧力上昇遅れを究明するためには、化学的意味での着火のほかに、それに続く蒸発・混合・燃焼を経て圧力上昇に至る過程を研究する必要があるものと思われる。

文 献

- (1) 小沼・ほか 2 名, 機論, 51-472, B (1985), 4327.
- (2) 水谷・ほか 2 名, 機論, 52-476, B (1986), 1931.
- (3) 小沼・ほか 3 名, 機論, 52-481, B (1986), 3380.
- (4) 小沼・柴田, 機論, 52-482, B (1986), 3577.
- (5) 上島・小沼, 機論, 51-516, B (1989), 2526.