回流式燃焼装置による燃料ガス噴流の着火特性に関する研究*

上 島 光 浩^{*1}, 小 沼 義 昭^{*2}Studies on the Ignition Characteristics of Fuel Gas Jets using
a Circulating Flow Combustion Device

Mitsuhiro UEJIMA and Yoshiaki ONUMA

A circulating flow combustion device was developed for a spontaneous ignition experiment on fuel gas jets under high pressure. The combustion device is composed of a circular duct, a fan and electric heaters. Ethylene was injected perpendicular to a hot air stream of high pressure circulating through the duct. The ignition delay was measured and the effects of pressure, air temperature and fuel jet velocity were examined. The results show that the ignition delay time τ is expressed in terms of pressure P_a and air temperature T_a by the equation $\tau = AP_a^n \exp(E/RT_a)$, and the apparent activation energy E is constant, unrelated to pressure. In this study, E was 243 kJ/mol and the pressure exponent n was -1.3.

Key Words: Combustion, Ignition, Gaseous Fuel, Circulating Flow Combustion Device, Ignition Delay

1. ま え が き

著者らは実験条件の制御が容易で、正確な測定が可能な実験方法として、電気炉で発生させた常圧下での高温空気流中に燃料を噴出させることによって、自発着火の研究^{(1)~(7)}を行ってきた。本研究はディーゼル燃焼を対象としているため、次の段階として雰囲気圧力の上昇による現象の変化を調べる必要がある。高温高圧空気流を発生させる方法として、コンプレッサによる高圧空気を電気ヒータで加熱した後燃焼器に導入し、大気中への排出ガス口の絞りを加減することによって、燃焼器内圧力を調節する方法がある。しかしこの場合には、大出力のコンプレッサおよび加熱装置が必要となるため、装置は大形でしかも高価なものになる。そこで本研究では、円管ダクト内に電気ヒータを設置し、その内部に充てんした高圧空気をファンにより回流させる装置、つまり回流式燃焼装置を考案した。小形でしかも単純な構造を有するこの装置は、制御された温度、圧力、速度をもった高温高圧空気流を

簡便に得ることができる点に特徴がある。

今回この装置を用いて、高圧下における燃料ガス噴流の着火遅れ時間を測定し、空気温度、圧力および噴流速度が着火遅れに与える影響について調べ、有用な知見が得られたので報告する。

2. 実験装置および実験方法

2・1 燃焼装置の構造 図1に実験装置の概略を示す。燃焼装置は内径150 mmの耐熱鋼製円管ダクト(耐圧:2 MPa)で構成されており、内径50 mmの断熱材円管によって内張りされている。ポンペより供給した高圧乾燥空気は、回転数可変の軸流ファンによって流路長さ約3.8 mの装置内を回流する。図1に示すように、ヒータとしてはファン下流側の主流部に、ドライヤボビンに巻かれた出力1 kWのコイル状ニクロム線を設置し、その直後から測定部までの壁面には、全出力で3.5 kWのセラミックファイバヒータ(セラミック製断熱材の内部にコイル状ニクロム線が埋め込まれたもの)を取付けた。このようにヒータ部と測定部を分離しているので、ヒータから測定部への放射が少なく、着火時の発光を精度よく測定できる。空気温度は、測定部上流側に付けた熱電対の指示値をモニタとし、セラミックヒータに接続された温度調節器によ

* 原稿受付 1997年2月3日。

^{*1} 正員、東京都立工業高等専門学校(〒140 東京都品川区東大井1-10-40)。^{*2} 正員、豊橋技術科学大学(〒441 豊橋市天伯町字雲雀丘1-1)。

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

って ± 1 Kの精度で制御した。空気温度が1000 K程度に昇温するまでの時間は約90 minであり、その後の温度安定性は非常によい。また予期できない異常な圧力上昇を防ぐために、噴射弁取付位置の近くに安全膜(厚さ20 μm のステンレス薄膜)を設置した。

2・2 測定部および燃料噴射系 測定部の大きさは、燃焼装置を設計するうえで重要な因子であり、装置の小形化およびヒータの低出力化のためにはなるべく小さいほうがよい。ところが、測定空間を極端に小さくすると、燃料噴流と燃焼器壁との干渉によって着火過程に影響を及ぼすことになり、また空気流速が速い場合には燃料噴流が主流に流されて、着火が測定視野の外で発生することも考えられる。そこで本実験においては、ノズル径を1.4 mmと細くし、さらに噴流速度および空気流速は極端に大きくしないことにより小さな火炎を形成させて、測定空間をなるべく小さくするようにした。燃料噴射弁取付位置における測定部断面および着火遅れ測定装置の概要を図2に示す。測定部は、内径50 mmの円形流路であり、内壁には厚さ50 mmの断熱材が設置されている。また、観測窓として直径70 mm、厚さ30 mmの石英ガラスが2枚取付けられている。着火実験に先立ち、測定部で形成される定常状態の火炎の大きさおよび形状について目視で観察した。その結果、火炎は対壁には衝突せず、また上向きの高温空気流および火炎自体の浮力によって火炎形状は若干上方に湾曲するが、今回の実験条件の範囲内で形成される火炎においては、測定窓の視野内で火炎全体が観察できることを確認した。

着火時の発光を検出する方法として、火炎輝度や背

Fig. 2 Test section and measuring apparatus of ignition delay

Fig. 3 Fuel injector

景光などの影響を受けにくく、より厳密に着火の瞬間をとらえられるものとして、波長310 nm付近に現れるOH基からの発光を検出する方法⁽⁸⁾を用いた。OH発光は直径50 mmの石英レンズで集光された後、金属干渉フィルタ(ピーク波長:309 nm, 半値幅:15 nm)、色ガラスフィルタ(ピーク波長:330 nm)を透過させ、光電子増倍管(感度波長範囲:185~870 nm, 最高感度波長:330 nm)により検出した。発光検出器の出力および電磁弁への入力信号はウェーブメモリーに同時記憶した。

一方、蓄圧タンクに充てんされた燃料のエチレンガス(純度99.0%)は、噴射弁から気流と直角方向、すなわち水平に一定期間噴射され、着火後に止められる。燃料噴射量は燃焼装置内空気量に比べて非常に少ないため、着火実験においては酸素濃度の低下が1%を超えない範囲で複数回の燃料噴射を行った。この条件下で着火遅れを測定した場合に、酸素濃度の低下が測定結果に対し影響を与えないことは、大気圧下および高圧下での着火実験で確認した。噴射弁としては、図3に示す高速応答形の電磁弁を用いた。電磁弁の吐出側に取付けられたステンレス製ノズルの内径は1.4

mm, 長さは 90 mm である。なお, 後述する実験結果で特に断らない限り, 噴流速度は 30 m/s 一定とした。

噴射開始の検出は, ウェーブメモリーに記憶した電磁弁への入力波形の立上り時期から, 常温時に測定した電磁弁の駆動遅れ時間(通電開始から弁が駆動して燃料が噴出するまでの時間)を補正する方法をとった。今回使用した電磁弁の駆動遅れ時間の平均値は 4.0 ms で標準偏差は 18 μ s であった。このことから, 高温時に着火遅れが 1 ms 程度と非常に短くなった場合においても, 駆動遅れ時間のばらつきが着火遅れの測定結果に及ぼす影響はほとんど現れず, 測定精度が高く保たれることになる。

着火遅れの定義は, 噴射開始から発光検出器の出力波形が立上るまでの時間間隔とし, 測定回数 30 回の平均を求めた。なお, 実験は雰囲気気圧 0.1~2.0 MPa, 温度 813~1123 K で行った。

2.3 測定部における空気温度分布 一般に定容燃焼器を用いた着火実験において, 空気温度を測定する場合に熱電対を使用するが, 周壁への熱放射などが原因となって, 空気温度を精度よく測定することは困難である。ところが, 燃料噴流の着火実験においては, 空気温度の測定精度が非常に重要であり, 5 K 程度の測定誤差が着火遅れ測定値に重大な影響を与える。そこで今回製作した燃焼装置に対して, アルメル-クロメル熱電対(線径 0.32 mm)を裸で用いた場合, またそれと同じ熱電対を吸引式高温計の温度センサとして用いた場合について空気温度の比較測定を行った。

図 4 は, 燃料噴射弁取付断面上における空気温度 T_a の分布の一例である。実験は大気圧下で行って

Fig. 4 Comparison between air stream temperatures measured with suction pyrometer and thermocouple

り, また X はノズル先端からの噴射方向距離を示している。吸引式高温計のデータのほうが熱電対のデータよりも約 80 K 大きな値を示すことがわかる。以上のことから, 着火実験の際の空気温度測定には, 吸引式高温計を使用した。

図 5 は, 空気圧力 P_a を 0.1, 1.0, 2.0 MPa に変化させたときの空気温度分布の測定結果である。図 5 より, 圧力が変化しても均一な温度分布が得られていることがわかる。すなわち, 今回製作した回流式燃焼装置においては, 雰囲気温度が均一な場で, 雰囲気圧力のみを変化させた着火実験ができることを確認した。

2.4 測定部における空気流速分布 測定部における空気流速の測定には, 波長 514.5 nm, 出力 500 mW の Ar^+ レーザを光源とするデュアルビーム後方散乱方式のレーザドップラー流速計(日本カノマックス, IFA 750)を使用した。測定体積の寸法は, 直径 0.11 mm, 長手方向長さ 1.60 mm である。

一般に, 本装置のように高温高压下の密閉容器内において, レーザ流速測定に必要な微粒子を多量にシードすることは困難であるが, 本研究においては, 容器中でマグネシウムを燃焼させることによって酸化マグネシウム粉体(粒径 0.2~1.0 μ m)を発生させる方法を試みた。測定部にある観察孔の片方に設置されたマグネシウムリボンをニクロム線で加熱着火させると, 酸化反応により多量の煙状の酸化マグネシウム粒子が発生し, その粒子は空気流の主流部に誘引され装置内を回流する。流速測定はマグネシウムがすべて燃焼した後のシーディングが安定したときに行った。高温高压下での実験に先立ち, 常温大気圧下での空気流速を, 良好な流速データが得られることが知られている超音

Fig. 5 Effect of pressure on distribution of air stream temperature

波加湿器で発生させた水滴をシード粒子として用いる方法によって測定し、上記の方法による測定結果と比較した。その結果、今回用いた方法は、加湿器による水滴の流速データと変わらないことがわかった。次に高温高圧下で実験を行ったが、大気圧下での実験と比較して、特に測定上の問題は生じなかった。以上のことから、高温高圧下の密閉容器内における流速測定に対して、このシード粒子供給法は一つの有効な手段であると考えられる。

図6は、燃料噴射弁取付断面上における時間平均空気流速 U と乱れ速度 u' の測定結果の一例である。空気温度は 914 K であり、軸流ファンの回転数は 1500 rpm 一定とした。図6より、空気圧力を 0.1 MPa から 1.0 MPa に変化させても、時間平均空気流速および乱れ速度の分布形状にはほとんど違いが生じないことがわかる。また、噴流中心軸上の平均をとると、0.1 MPa のとき $U=1.62$ m/s, $u'=0.061$ m/s, また、1.0 MPa のとき $U=1.35$ m/s, $u'=0.115$ m/s であり、両者に大きな違いは生じていない。燃料の噴出速度は 30 m/s であり、着火が発生する流れ場の状態はほぼ燃料噴流によって支配されており、この程度の空気流の相違は着火遅れにはほとんど影響しないものと考えられる。また、この事実は開放形燃焼器では実験により確認されている⁽¹⁾。そこで、今回は軸流ファンの回転数を 1500 rpm 一定とし、空気圧力および温度を変化させて着火実験を行った。

3. 実験結果および検討

3.1 開放形燃焼器との比較 高圧下の着火実験に先駆けて、今まで著者が使用していた開放形燃焼器

Fig. 6 Effect of pressure on distribution of air stream velocity

を用いてエチレンガス噴流の着火遅れを測定し、大気圧下での回流式燃焼装置による実験結果と比較した。図7にその結果を示すが、測定値はアレニウス座標、すなわち空気温度 T_a の逆数を横座標に、着火遅れ時間 τ の対数を縦座標にとってプロットしてある。なお、開放形燃焼器内の平均空気流速は 4.0 m/s である。図7より、両者はよい対応関係を示しており、燃焼器を替えても測定結果にはほとんど差が生じないことが確認される。また、図6で示したように回流式燃焼装置内の平均空気流速は 1.62 m/s であり、開放形燃焼器のそれよりも小さいが、上述のごとく、この程度の流速の違いは着火遅れに対してほとんど影響力をもたないものと考えられる。

3.2 噴流速度の影響 前述のごとく、本実験においては空気流の乱れは非常に小さく、燃料ガス噴流の速度は 30 m/s と周囲空気流速に比べて大きいため、噴流自体が発生する乱れが燃焼場を支配していると考えられる。そこで、燃料ガスと高温空気の混合速度を変化させたときの着火遅れの挙動について調べる目的で、燃料噴射速度を変えた実験を行った。その結果を図8に示す。空気圧力と温度の実験範囲は、0.1 MPa で 1075~1132 K, 1.0 MPa で 925~979 K である。図8より、空気圧力によらず、この実験範囲では着火遅れに対する噴射速度の影響は小さいことがわかる。なお、温度が低下して着火遅れの値が大きくなると、噴射速度の増加が着火遅れをわずかに長くする傾向を示している。この現象は、著者がすでに報告した開放形燃焼器を用いた実験⁽²⁾においても観測されている。現象の発生理由としては、低温時には、活性化

Fig. 7 Comparison between ignition delay times measured with circulating flow combustor and open combustor

Fig. 8 Effect of fuel jet velocity on ignition delay

Fig. 9 Effect of pressure on ignition delay

学種や熱の発生速度が小さいため、これらの拡散・消失速度が着火遅れに対し影響を与え、乱れの増大が着火遅れを長くするものと考えられる。

3.3 空気温度および空気圧力の影響 図9は、空気圧力 P_a をパラメータにして着火遅れの温度依存性について調べた結果である。空気圧力と温度の実験範囲は、0.1 MPa で 1018～1132 K、1.0 MPa で 907～979 K、2.0 MPa で 852～909 K である。図9より、この実験範囲では、着火遅れは大きな傾きをもつ1本の直線で表されることがわかる。また圧力が高くなると着火遅れは短縮されるが、大気圧下のデータとほぼ同じ温度依存性を示し、着火遅れ直線は平行移動するのみであるように見える。

ディーゼルエンジンおよびガスタービンエンジンの自発着火実験において、着火遅れ τ に対して雰囲気圧力 P_a および雰囲気温度 T_a の関係を整理するとき、以下の式が用いられることが多い⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

$$\tau = AP_a^n \exp(E/RT_a) \quad (1)$$

ここで、

E : 見掛けの活性化エネルギー

R : 一般ガス定数

A : 定数

n : 圧力指数

である。式(1)から次式が得られる。

$$\ln \tau = \ln A + \ln P_a^n + (E/1000R)(1000/T_a) \quad (2)$$

$$\ln \tau P_a^{-n} = \ln A + (E/1000R)(1000/T_a) \quad (3)$$

式(2)を P_a をパラメータとして図9に示すような縦軸 $\ln \tau$ 、横軸 $1000/T_a$ の座標系で表すと、 $E/1000R$ の同一こう配をもった直線群となる。したがって、図

Fig. 10 Sealing of ignition delay times

9に示された実験結果は、式(2)によって良好に表現されることがわかる。一方、式(3)は縦軸 $\ln \tau P_a^{-n}$ 、横軸 $1000/T_a$ なる座標系においては、こう配が $E/1000R$ の1本の直線を示しており、このような座標系で整理すると、着火遅れデータは圧力に関係なく1本の直線上に乗ることを表している。そこで、圧力指数 n を0.1刻みで変化させて検討した結果、図10に示すように、 $n = -1.3$ のとき各データはほぼ1本の直線上に乗ることがわかった。図10に示す直線から活性化エネルギー E を求めると 243 kJ/mol となったが、この値は、図9の $P_a = 0.1, 1.0, 2.0$ MPa に対する活性化エネルギー 238, 236, 244 kJ/mol の平均値 239 kJ/mol とほぼ一致する。したがって、本実験における着火遅れは次式で表せることになる。

$$\tau = 3.12 \times 10^{-12} P_a^{-1.3} \exp(243/RT_a) [\text{ms}] \quad (4)$$

Spadaccini-Tevelde⁽⁹⁾ は圧力 1.0～3.0 MPa の高

温高速空気流中にノズルから燃料を噴出し、下流に形成される火炎の前縁と噴射ノズル間の距離をガス流速で割ることによって、噴霧の着火遅れを測定している。彼らが高压下で求めた軽油の活性化エネルギーの値は 174 kJ/mol であった。一方、著者らが開放形燃焼器を用いて常圧下で求めた軽油噴霧の活性化エネルギーは 166 kJ/mol で⁽⁷⁾、Spadaccini-Tevelde の求めた値とほぼ一致している。これより、圧力に関係なく活性化エネルギーが一定値を示す現象は、本研究で示すような燃料ガス噴流の場合だけでなく、液体燃料噴霧の着火においても見られることがわかる。

ガス噴流に対する圧力指数のデータは、著者の知る限り見あたらないが、噴霧については報告がある。林ら⁽¹⁰⁾は、Spadaccini-Tevelde と同様な実験方法によって灯油噴霧の着火遅れを測定し、雰囲気圧力 1~3 MPa、温度 680~810 K の実験範囲で、 $n=-1$ の値を得ている。新井・広安ら⁽¹¹⁾は高压容器内に電気炉を設置した、いわゆる定容燃焼器を用いて噴霧の着火遅れを測定している。噴射ノズルには単孔ホールノズルを、着火の検出にはフォトランジスタを用い、雰囲気圧力 1.1~4.0 MPa、温度 714~1 000 K の実験範囲で、軽油噴霧に対して $n=-1.22$ の値を得た。噴霧の着火に対して得られたこれらの値は、本実験のガス噴流の結果とほぼ一致している。

4. ま と め

円管ダクト内に充てんした高压空気をファンにより回流させるとともに、電気ヒータで加熱する回流式燃焼装置を開発した。燃焼装置内の空気温度および流速分布を測定し、この装置が高压下において燃料ガス噴流の着火特性を調べるうえで十分な性能を有することを示した。空気流速の測定にはレーザドップラー流速計を用いたが、高温高压下でもシード粒子を多量に安定供給できるものとして、燃焼器内でマグネシウムを燃焼させて煙状の酸化マグネシウムを発生させる方法

を試みた。その結果、密閉容器内における流れ計測に対するシーディング法として、この方法が有効であることがわかった。さらに、この燃焼装置を用いて、エチレングス噴流の着火遅れ時間を測定し、空気温度、圧力および噴流速度が着火遅れに与える影響について検討した。なお、実験範囲は空気圧力 0.1~2.0 MPa、空気温度 852~1 132 K である。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 空気圧力 0.1~1.0 MPa、空気温度 925~1 132 K の実験範囲において、噴流速度を 30~100 m/s に変化させても、着火遅れにほとんど影響が現れない。

(2) 空気圧力をパラメータにして、着火遅れをアレニウス座標で整理すると、各データは大きなこう配をもつ 1 本の直線で表される。また空気圧力を高くすると、着火遅れは短縮するが大気圧下のデータと同じ温度依存性を示し、着火遅れ直線は平行移動するのみである。

(3) 本実験範囲において着火遅れは次式で表せる。

$$\tau = 3.12 \times 10^{-12} P_a^{-1.3} \exp(243/RT_a) [\text{ms}]$$

最後に、装置の製作および実験に協力された、当時、都立高専学生 草野貴雄、高山正男、鶴岡政幸、布施直也、大坂良一、斉藤久人、高橋裕也、丸山祐次の諸君に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 上島光浩・小沼義昭, 機論, **55** 516, B(1989), 2526-2532.
- (2) 上島光浩・小沼義昭, 機論, **58** 556, B(1992), 3773-3778.
- (3) 上島光浩・小沼義昭, 機論, **60** 576, B(1994), 2924-2930.
- (4) 小沼義昭・ほか 2 名, 機論, **51** 472, B(1985), 4327-4333.
- (5) 小沼義昭・ほか 3 名, 機論, **52** 481, B(1986), 3380-3387.
- (6) 小沼義昭・柴田耕嗣, 機論, **52** 482, B(1986), 3577-3580.
- (7) 小沼義昭・樋口隆行, 機論, **55** 518, B(1989), 3228-3233.
- (8) 水谷幸夫・ほか 2 名, 機論, **52** 476, B(1986), 1931-1939.
- (9) Spadaccini, L. J. and Tevelde, J. A., *Combust. Flame*, **46**-3(1982), 283-300.
- (10) 林茂・ほか 4 名, 機論, **54** 501, B(1988), 1145-1149.
- (11) 新井雅隆・ほか 2 名, 機論, **50** 453, B(1984), 1345-1352.