点火電極イオンプローブによる燃焼診断*

浜本 嘉輔^{*1}, 吉山 定見^{*1}, 富田 栄二^{*1}
平田 則彦^{*2}, 上田 敦^{*3}

Combustion Diagnostics Using a Spark Plug as Ion Probe

Yoshisuke HAMAMOTO, Sadami YOSHIYAMA, Eiji TOMITA,
Norihiko HIRATA and Atsushi UEDA

In order to investigate the relation between ion current and combustion characteristics, ion current signal from a spark plug used as an ion probe, pressure history and flame development were measured in a homogeneous propane-air mixture in closed combustion chambers. When negative bias is applied to the central electrode of the spark plug, the ion current flows only due to an early flame kernel existing near the spark plug. When positive bias is applied to the central electrode, the ion current flows from the central electrode to the combustion chamber wall and to the ground electrode. Consequently, the ion current is dominated by the contact area between the flame and combustion chamber wall. The appearance time of ion-current peaks is related with combustion duration.

Key Words: Combustion, Premixed Combustion, Combustion Measurement, Ion Current, Internal Combustion Engine, Spark-Ignition Engine

1. まえがき

火炎の電氣的性質を利用し、静電探針あるいはイオン間隙を用いて燃焼室内を伝播する火炎面を検出したり、乱流火炎の内部構造を計測することはこれまでも数多くなされている^{(1)~(5)}。この方法は、簡単な装置にて比較的容易に火炎面を計測できるため、実用機関における燃焼状態の計測にはかなり有用である。

最近、Witze⁽⁶⁾は、多数のイオンプローブをガasket内に装着することによって、サイクルごとの火炎伝播時間の測定を行なっている。また、筆者らは、かつて、イオンプローブを別に設けることなく点火電極自身をイオンプローブとして用いることにより、燃焼室の形状を何ら変更することなく、イオン電流を検出し、点火遅れ時間の計測を行なっている⁽⁷⁾。また、Johnsonら⁽⁸⁾も同様な方法を実用機関に適用してイオン電流を検出し、信号解析した結果から燃焼状態の判別(おもに、緩慢燃焼サイクルと失火サイクルの検出)

が可能なことを示している。

一般に、イオン電流はイオン濃度のほかにもガス流動、電極形状、電極電位、電極と火炎面との傾斜角などの種々の因子の影響を受ける^{(9)~(10)}。点火電極をイオンプローブとして用いた場合、燃焼が終了するまでの長い期間にわたって、複数個のピークをもつイオン電流波形が得られるが、この波形が燃焼室内のどのような現象に対応しているかについては不明である。

本研究では、密閉燃焼室内のプロパン-空気均一混

図1 イオン電流検出回路

* 平成4年12月8日 第30回燃焼シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成5年7月27日。

^{*1} 正員, 岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

^{*2} 准員, 岡山大学大学院 [現: 中国電力(株)]。

^{*3} 三菱電機(株)姫路製作所 (〒670 姫路市千代田町840)。

合気中を伝播する火炎において点火電極イオンプローブにて計測されるイオン電流波形と火炎伝播過程とを比較することにより、イオン電流波形のもつ物理的な意味について検討した。また、得られたイオン電流波形の特性値と燃焼状態との関係についても調査した。

2. 点火電極イオンプローブ

炭化水素系燃料を燃焼させた場合、火炎帯付近に多くのイオンが存在することはよく知られている⁽¹¹⁾。静電探針あるいはイオン間隙は、火炎面および燃焼領域内の燃焼素面の検出等に広く用いられ、火炎とイオン電流波形との関係も調べられている⁽¹²⁾。点火電極イオンプローブは、燃焼室内に別の電極を挿入するのではなく、点火電極自身をイオンプローブとして利用しようとするものである。イオン電流の検出回路を図1に示す。点火栓の中心電極に一定の直流電圧 V_d (350 V)を加え、点火後の電圧 V の変化を高電圧プローブを介してデジタルメモリに収録した。なお、点火コイル側に直流電流が流れないように、イオン電流検出回路と点火コイルとの間に1 mmの間隙を設けてある。

このような点火電極イオンプローブ法を火花点火機関(シリンダ直径 85mm, 行程 85mm)に適用して測定したイオン電流波形およびそれと同時に測定したシリンダ内圧力波形の例を図2に示す。プロパン-空気混合気(当量比 $\phi=1.0$)を用い、機関回転速度1000rpm, 点火時期 30° BTDC, 印加電圧 $V_d=+350$ Vで測定した例である。点火後、燃焼の進行とともにイオン電流が増加し、燃焼初期および燃焼圧力がほぼ最大となる時期(ほぼ燃焼終了時期)に、それぞれピークをもつイオン電流波形が得られている。このようなイオン電流波形のもつ意味について検討するために、単純な形状の定積燃焼器を用いて実験を行なった。

図3に示すような直径75mmの球形燃焼室において、点火電極イオンプローブを用いてイオン電流 I を測定すると同時にそのときの圧力経過も測定した。図4には混合気中におけるイオン電流の測定例(燃焼時)と空気中におけるイオン電流の測定例(非燃焼時)を示す。初期圧力 $P_0=392$ kPa および初期温度 $T_0=288$ Kは、燃焼、非燃焼の両実験において同じである。非燃焼時においても、火花放電により大量に発生したイオンによって点火後約3 ms程度の間イオン電流が流れている。燃焼時には、火花放電によるイオン電流が減衰する途中で燃焼によるイオン濃度の増加にともなって電流値が増加している。したがって、燃焼によるイオン電流は図4(a)の波形から図4(b)の波形を差し引いた図4(c)のような波形となる。この燃焼によるイオ

図2 火花点火機関におけるイオン電流波形と圧力経過

図3 球形燃焼室

図4 イオン電流波形 ($\phi=1.0$, $P_0=392$ kPa, $T_0=288$ K)

ン電流を解析するためには、図4(b)に示したような放電によるイオン電流と明確に区別しなければならないので、本研究では、放電時間($=20\mu\text{s}$)の短いCDI点火装置を用いた。

3. 燃焼状態とイオン電流波形の特性値

当量比 ϕ を0.78~1.5の範囲で変化させたときのイオン電流波形と圧力経過を図5に示す。イオン電流はいずれの条件においても圧力上昇のほとんどない燃焼初期において第1のピークが現われ、その後いったん減少し、圧力の上昇にともなって再度上昇し始めていることがわかる。図6に示すように点火から第1ピークおよび第2ピークまでの時間をそれぞれ t_2 , t_4 , 点火から第2ピークの立ち上がりまでの時間を t_3 , 第1ピークおよび第2ピークの電流値をそれぞれ I_2 , I_4 とし、これらのイオン電流波形の特性値について調べた結果を図7に示す。 t_2 , t_3 , t_4 はいずれも希薄側において大きくなり、過濃側においてもわずかに大きくなっている。また、ピーク電流値 I_2 , I_4 は希薄側で小さくなり、過濃側でもわずかに小さくなっている。図8に、種々の当量比における、点火からの経過時間 t に対する燃焼質量割合の変化および各当量比での t_3 , t_4 の平均値 $\bar{t}_3$, $\bar{t}_4$ を示す。 $\bar{t}_3$ は燃焼質量割合が0.1~0.2, $\bar{t}_4$ は燃焼質量割合が0.5~0.9にそれぞれ対応している。 $\bar{t}_3$ と点火から10%燃焼するまでの時間 $t(00-10)$ との関係、および $\bar{t}_4$ と点火から90%燃焼するまでの時間 $t(00-90)$ との関係を図9に示す。それぞれについてかなり強い相関があることがわかる。したがって、イオン電流のこれらの特性値を計測することで燃焼状態をある

程度知ることが可能であると考えられる。次に、このイオン電流波形が燃焼室内でのどのような現象に関係して変化するのかについて詳細に検討した。

4. 初期火炎伝播とイオン電流波形

図4に示したようなイオン電流波形の第1のピークは、点火電極付近に存在する火炎核の挙動に関係していると考えられる。そこで、イオン電流測定と同時に、点火電極付近の火炎伝播の様子を高速度カメラ(毎秒4000駒)にてシュリーレン撮影し、両者の関係を調べた。実験には、図10に示すような直径50mm, 幅52mmの円筒形燃焼室を用いた。なお、燃焼室側壁には観測窓を取り付けてある。図11に火炎伝播の様子とイオン電流波形との同時測定例を示す。図中の破線は測定波形

図6 イオン電流波形の特性値

図5 イオン電流波形と燃焼圧力経過

図7 各特性値に及ぼす当量比の影響

から放電によるイオン電流波形を差し引いたものである。図11(a)より、点火から0.17ms後にはすでに火炎核は生成されており、中心電極とアース電極との間にイオン電流が流れているが、火炎面がアース電極を通過した後もイオン電流はさらに増加している。イオン電流は点火から4.83ms後において第1のピークを示すが、このときの火炎半径は12.8mmである(図11(b)参照)。その後、イオン電流は減少し、点火から15.65ms後において再度上昇している。当量比 $\phi=0.8$ および1.2についても同様の実験を行なったが、同様にある程度成長した火炎においてそれぞれ2つのピークをもつイオン電流波形が得られた。火炎半径の時間的変化を図12

図10 円筒形燃焼室

図8 燃焼質量割合

図11 初期火炎伝播とイオン電流の同時測定例
($\phi=1.0$, $P_0=392\text{kPa}$, $T_0=288\text{K}$)

図9 燃焼期間 $t(00-10)$ と $\bar{t}_3$ との関係、および
燃焼期間 $t(00-90)$ と $\bar{t}_4$ との関係

図12 火炎半径 r の時間的変化

に示す。図中の黒印 (● ▲ ■) はイオン電流波形に第1のピークが現われる時期を示している。いずれの条件においても火炎半径が11~13mm程度の大きさにおいて第1のピークを示すことがわかる。すなわち、イオン電流波形に現われる第1ピークは、点火直後に点火電極間に存在する火炎核によってはほとんど影響されず、ある程度成長した火炎によって影響されることを示している。

5. イオン電流波形に及ぼす燃焼室壁面の影響

図1に示したような回路構成においては、点火電極以外に燃焼室壁面が電極として作用している。火炎は燃焼室壁面と接触しながら点火栓と反対側の壁面に向かって伝播している。したがって、火炎と燃焼室壁面との接触状態によってイオン電流波形に変化が生じることが予想される。そこで、燃焼室を接地するか否かによってイオン電流波形がどのように変化するかを調べた。図13に示すように点火電極は棒状であり、燃焼室と電氣的に絶縁されている。イオン電流検出回路は図1と同様であるが、イオン電流検出用電源を接続した電極を電圧印加電極、接地した電極をアース電極と呼ぶことにする。電極の形状寸法は図示のとおりであり、アース電極の受感部長さ L_p を変えて実験を実施した。図14に点火後の火炎伝播の様子とイオン電流波形との同時測定例を示す。アース電極 $L_p=2.0\text{mm}$ の場合である。図中の実線は燃焼室を接地した場合であり、破線は燃焼室を接地しなかった場合である。図14(a)に示すように、火炎が電極付近に存在する期間においては、燃焼室を接地するか、しないかにかかわらず、電極間にはわずかにイオン電流が流れ、受感部を過ぎると減少していることがわかる。図14(b)に示すように、火炎は点火から9.61ms後に燃焼室壁面に到達している。このとき、燃焼室を接地した場合にはイオン電流が急激に流れ始めているのに対し、接地していない場合にはほとんど変化していない。アース電極の受感部長さ L_p を11.8mmとした場合のイオン電流波形と火炎伝播の様子を同時計測した例を図15に示す。火炎写真(図15(a))からわかるように火炎がアース電極と接触している期間(点火から5.71ms後まで)においては、ほぼ一定のイオン電流が流れ、火炎が絶縁管に達した後のイオン電流は減少していることがわかる。これは火炎がアース電極の受感部分を伝播しているとき、火炎帯中のイオン濃度および火炎帯と電極との接触面積がほぼ一定となるためと考えられる。図16に、アース電極の受感部長さを変化させた場合($L_p=2.0, 11.8, 23.5\text{mm}$)および電圧印加電極の受感部長さ $L_p=11.8\text{mm}$

図13 点火電極形状および回路構成

図14 火炎伝播とイオン電流波形

($\phi=1.0, P_o=101\text{kPa}, T_o=300\text{K}$)

図15 火炎伝播とイオン電流波形

($\phi=1.0, P_o=101\text{kPa}, T_o=301\text{K}$)

($L_p = 2.0\text{mm}$)とした場合のイオン電流波形を示す。アース電極の受感部長さを变化させた図16(a)~(c)の場合にはイオン電流波形が大きく変化しているのに対して、図16(d)と(a)からわかるように電圧印加電極の受感部長さ L_p を変化させてもイオン電流波形はほとんど変化しない。このことから燃焼室壁面を含むアース側電極と火炎面との接触面積によってイオン電流が支配されていることがわかる。

次に、点火位置を3通りに变化させたときのイオン電流波形の測定例を図17に示す。なお、燃焼室は接地してある。点火位置を燃焼室壁面に近づけるにしたがってイオン電流波形が点火栓を用いたときのイオン電流波形(図4参照)に類似してくることがわかる。前述のようにイオン電流が火炎面と燃焼室壁面との接触面積によって変化していると考え、図17(b)の場合、点火位置からもっとも近い壁面に火炎が到達した時期(点火から5.75 ms 後)にイオン電流が再び流れ始めていると考えられる。したがって、図17(c)の場合に点火から4.90 ms 後に現われるイオン電流の第1のピークは、点火位置に近い壁面において火炎面と壁面との接触面積が最も大きくなる時期に対応していると考えられる。すなわち、点火電極をイオンプローブとして用いた場合に測定されるイオン電流波形は、イオン電流が最初に流れ始める時期を除けば、すべて燃焼室壁面付近に存在する火炎帯でのイオン濃度と火炎面と燃焼室壁面との接触面積によって定性的に説明することができる。

図16 イオン電流波形に及ぼす電極受感部長さの影響
($\phi=1.0$, $P_0=101\text{kPa}$, $T_0=296\sim301\text{K}$)

6. イオンプローブ印加電圧の極性とイオン電流波形

以上では、点火栓中心電極の極性を正とした場合のイオン電流波形についてを検討してきたが、中心電極の極性を負にした場合のイオン電流波形を、正にした場合と比較して図18に示す。中心電極を負とした場合には、中心電極を正とした場合のような燃焼室壁面による影響はみられず、火炎が点火電極付近に存在するときのみイオン電流が流れることがわかる。

火炎帯において生成した正イオンと負イオンのうち、

図17 点火位置によるイオン電流波形の変化
($\phi=1.0$, $P_0=101\text{kPa}$, $T_0=302\sim303\text{K}$)

図18 点火電極の極性によるイオン電流波形の変化

負イオンのほとんどが電子であることはよく知られている⁽¹³⁾。正イオンは負の電極に、電子は正の電極にそれぞれ捕集され、イオン電流が流れるが、電子の移動度は正イオンに比べて非常に大きいので、移動度の低い正イオンの濃度と、その捕集電極すなわち負の電極の電極面積によってイオン電流が制限されることになる。本研究においても、負の電極がイオンの捕集電極として作用しており、正の電極がその補償電極として作用していると考えられる。したがって、点火栓中心電極に正の電位をかけた場合、アース電極および燃焼室壁面が正イオンの捕集電極として作用しており、燃焼終了までの長い期間にわたってイオン電流は流れている。一方、点火栓中心電極に負の電位をかけた場合には、中心電極が正イオンの捕集電極として作用しているため、火炎が点火電極間を通過するとイオン電流は減少している。

7. あとがき

点火電極自身をイオンプローブとして利用し、密閉燃焼室内での予混合火炎を計測したときに得られるイオン電流波形について、火炎のシュリーレン写真より観測される火炎伝播過程と比較し、その物理的な意味を検討した。得られた主な結果は次の通りである。

(1) 点火栓中心電極に正の電位をかけた場合には、中心電極とアース電極以外に燃焼室壁面にもイオン電流が流れており、火炎と燃焼室壁面との接触の仕方によって複雑なイオン電流波形が示されることがわかった。

(2) 点火栓中心電極に負の電位をかけた場合には、点火栓付近に存在する火炎によってのみイオン電流は流れることがわかった。

(3) イオン電流の特性値 t_3 , t_4 は希薄側で大きくなり、過濃側でもわずかに大きくなる。また、イオン電流のピーク値 I_2 , I_4 は希薄側で小さくなり、過濃側でもわずかに小さくなる。

(4) イオン電流の特性値 t_3 は燃焼期間 $t(00-10)$ と、 t_4 は燃焼期間 $t(00-90)$ とそれぞれ強い相関がある。

文 献

- (1) 大東・浜本・貴島, 定積燃焼容器内における火炎伝ばに及ぼす乱れの影響, 機論, 36-292, (1970), 2116.
- (2) Haghgoie, M., Kent, J. C. and Tabaczynski, R. J., Turbulent Time-Scale Measurements in a Spark-Ignition Engine Using Hot Wire Anemometry and Fast Response Ion Probes, Flows in Internal Combustion Engines, Proc. Winter Ann. Meet. ASME, (1982-11), 1.
- (3) 浜本・吉山・富田・泉, イオン間隙による燃焼室内乱流予混合火炎の計測, 機論, 55-512, B(1989), 1224.
- (4) 城戸・黄・中島, 火炎面プラズマ電位信号による予混合乱流伝ば火炎構造の考察, 機論, 56-521, B(1990), 175.
- (5) 浜本・富田・吉山, 密閉燃焼室内乱流予混合火炎, 機論, 59-559, B(1993), 941.
- (6) Witze, P. O., Cycle-Resolved Multipoint Ionization Probe Measurements in a Spark Ignition Engine, SAE Paper, (1989), (No.892099).
- (7) 大東・浜本, ガソリン機関における点火遅れと火炎伝ば, 機論, 36-282, (1970), 295.
- (8) Johnson, W. J. and Rado, W. G., Engine Performance Evaluation Using a Combustion Probe Signal Analyzer, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. VT-26, (1977-2), 71.
- (9) 平野・鈴木・橋本・益子, 予混合変動火炎測定に用いる円柱静電探針の基礎的性質, 機論, 46-405, B(1980), 1007.
- (10) Suzuki, T., Hashimoto, Y., Mashiko, I., and Hirano, T., Ion-Current Fluctuations Recorded with a Cylindrical Electrostatic Probe Passing Premixed Flames, Combustion and Flame, 36(1979), 179.
- (11) Lawton, J. and Weinberg, F. J., Electrical Aspects of Combustion, (1969), 214, Clarendon Press.
- (12) 浜本, ガソリン機関における燃焼とイオン電流, 機論, 36-285, (1970), 808.
- (13) 金原, 気体の燃焼物理, (1985), 裳華房.