火花点火機関の燃焼室内におけるクエンチすきま特性について*

石 澤 静 雄^{*1}Characteristics of Quenching Crevice Widths in Combustion Chamber
of a Spark Ignition Engine

Shizuo ISHIZAWA

Exhaust HC emissions from spark ignition engines are still creating a major environmental problem. It is difficult to reduce HC emissions during engine warm-up because the catalysts cannot work well at low temperatures. The source of unburned HCs from engines is thought to be crevices in the combustion chamber, oil layer and deposits on the cylinder wall surfaces. Quenching crevice widths in the combustion chamber were measured under various engine operating conditions with an ion probe that could detect flame arrival. Then, an experimental equation of quenching crevice width was estimated as a function of cylinder pressure and cylinder wall temperature. Schlieren photographs of a combustion chamber with a lubricant free piston were also taken to monitor the flow of gas of unburned HCs emitted from the piston crevice during the expansion and exhaust processes.

Key Words: Chemical Reaction, Extinction, Combustion Products, Gasoline Engine, Flow Visualization, Unburned Hydrocarbon, Quenching Distance, Ion Probe

1. 緒 言

ガソリン機関から排出される排気の中でも、未燃炭化水素(以下 HC と略す)は光化学大気汚染と大きくかわるため、従来より多くの研究がなされてきた。

当初は燃焼室壁面に形成される消炎層が HC の主要な発生源と考えられた⁽¹⁾が、機関による詳細な実験の結果、消炎層内の HC は速やかに反応し排出 HC にはそれほど寄与しない⁽²⁾とする説が一般的となった。その後の研究により HC の排出源は、燃焼室内で火炎が進入できない狭いクレビス部や、シリンダ表面の潤滑油膜、あるいはデポジットと呼ばれる付着物など⁽³⁾であると推定されている。特にシリンダ表面の油膜と燃料の干渉についてはいくつかの研究が精力的に行われ^{(4)~(7)}、吸気、圧縮行程時に混合気中の燃料が油膜に吸着され、それが膨張、排気行程時に放出され、HC の排出に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

上に述べた排出源のなかでも火炎が冷却作用を受けるため未燃で残るクレビス部の混合気が排気中の HC に大きな割合を占めると考えられ、定容器や機関でそ

れぞれクレビス容積を変えて、排出 HC への影響を検討した研究^{(8)~(10)}などがある。またピストントップランドへの火炎の侵入を計測した研究⁽¹¹⁾などが報告されているが、実機によるクエンチすきまの計測の例は見当たらないようである。

そこで本報では機関で種々の運転条件におけるクエンチすきまの特性を実験的に明らかにすることを試みたものである。また燃焼室内のシュリーレン撮影により、燃焼室内のガスの挙動を可視化してピストンクレビス部からの未燃ガスの放出をとらえる実験も行った。

2. 実験装置および方法

2.1 供試機関と運転条件 実験には単気筒四サイクル火花点火機関を使用した。表 1 にその主要諸元を示した。燃焼室形状は半球形であり、燃料は吸気ポート上流に電磁式の燃料噴射弁を取付け、機関に供給した。その下流には燃料と空気の混合を促進するためのミキシングチャンバを設けてある。また運転条件は市街地一定速走行に相当する 1400 rpm、充てん効率 η_c 36% とし、この条件を基本に空燃比、EGR 率、点火時期、充てん効率などをパラメータとして実験を行った。燃料は市販のガソリン(比重 0.738, 288 K)を使用

* 原稿受付 1995 年 3 月 14 日。

*¹ 正員、日産自動車(株)総合研究所(● 237 横須賀市夏島町1)。

Table 1 Engine spec

No. of cylinder		1
Valve mechanism		OHV
Bore and stroke		85x78
Comb. chamber		Hemi-sphere
Compression ratio		8.5
valve timing	Intake valve	12degBTDC-48degABDC
	Exhaust valve	60degBBDC-10degATDC

Fig. 1 Schematics of ion detector

した。

2・2 クエンチすきま測定装置 装置の先端部の形状を図1に示した。先端に2枚の平行平面ではさまれた狭いすきまを形成し、中心部にイオン電流検出器を設けた。平行平板のすきま幅 W_r はスペーサの厚さを変えて調節が可能のように構成されており、スペーサにはアルミニウムはくを用いた。 W_r は0.1 mm まで測定可能であり、実験条件に応じ W_r の測定間隔を設定した。イオンプローブには50 V の電圧を印加し、すきま部を火炎が消炎せずにイオンプローブまで到達するとイオン電流が検知される。なおクエンチ板の大きさ、厚さがクエンチすきまに及ぼす影響については未検討で、したがって測定されたクエンチすきまの絶対値の一般性に関しては議論できないが、各種の運転パラメータの及ぼす影響についての検討は十分に可能と考えた。

クエンチすきまは連続した100サイクルのうち50サイクルについて火炎の到達が確認できるすきま幅として定義した。イオン電流波形はオシロスコープにより観測し、それをポラロイドカメラにより写真にとり、

Fig. 2 Experimental apparatus to take schlieren photographs

信号が検知されるサイクル数を求めた。またシリンダ内の圧力は、キスラー社製の圧電式圧力ピックアップにより測定した。排気分析は排気ポートにサンプリング管を導入し、HCはFIDにより測定した。

2・3 燃焼室内シュリーレン撮影装置 膨張、排気行程時の燃焼室内のガスの挙動を図2に示すようなシュリーレン撮影装置により可視化した。矩形シリンダによる燃焼室内のシュリーレン撮影によるクレビスからの未燃ガスの噴出の可視化がよく知られているが⁽¹²⁾、エンジンの圧縮比やピストン形状など実用の機関とは相当異なる。そこで本実験では実用機関と主要な諸元はほぼ同一とし、シリンダヘッドの上方から平行光をシリンダ内に導入し、ピストンの上面に形成した平面鏡で反射させ、シュリーレン像を得た。なお、撮影に用いたシリンダヘッドの燃焼室形状はディスク形である。また圧縮比はクエンチすきま測定に使用した機関と同一の8.5とした。燃焼室のシリンダボア周囲のガスの挙動を可視化するために吸気弁、排気弁それに点火プラグを燃焼室の片側に寄せた。このレイアウトにより燃焼室の約40%を視野にとらえることができた。石英ガラスはシリンダボア径よりも大きな径とした。またシリンダヘッドと石英ガラスの間にはシリコンゴムを充てんし、クエンチすきまが形成されるのを防止した。撮影速度は3000コマ/s、カメラはスターレックスを、またフィルムはコダック16mmカラーフィルム(ASA 400)をそれぞれ使用した。

3. 実験結果および考察

3・1 検出されるイオン電流波形 機関の燃焼室に取付けたクエンチすきま測定装置からのイオン電流波形を図3に示した。図3中には燃焼圧力も表示したが、最高圧力に到達するクランク角にてイオン電流出力はほぼピークに達し、燃焼の終了とともに零となる。図4および図5にはオシロスコープで得られた70以上の連続したサイクルのイオン電流出力波形の一例を示した。図4では運転条件が理論混合比近傍であること、クレビスすきまが大きいことにより、すべての

Fig. 3 Cylinder Pressure and Ion Current

Fig. 4 Ion current (Flame arrives at the ion detector in every cycle)

Fig. 5 Ion current (Flame cannot arrive at the ion detector in some cycles)

サイクルでイオン電流が観測され、火炎はクレビス内部まで到達するが、イオン電流の大きさにはサイクル変動が見られる。図5は図4の条件に比べクレビスすきまを小さくし、さらに空燃比を希薄化した条件での結果であり、サイクルごとにイオン電流の大きさに変動が見られるとともに、イオン電流がまったく観測されないサイクルも発生している。バーナによる消炎距離の測定実験⁽¹³⁾では火炎が伝ば不可能なすきまをもって定義するが、機関では種々の要因によりサイクル変動が伴うため、前述のような統計処理によりクエンチすきまを定義して求めた。

3・2 測定位置とクエンチすきま 燃焼室内の測定位置のクエンチすきま幅(以下 W_c)への影響を検討するため測定位置を変化させたときの結果を図6に示した。図6(a)の結果は点火プラグが燃焼室のほぼ中央の中心点火の条件で、4点の測定点のうち、3点で W_c は約 0.4 mm でほぼ等しいが、点火プラグに最も近い、吸気弁そばの位置では 0.28 mm となった。図6(b)は点火プラグを排気弁の近くに取り付け、燃焼室の片側から点火した。3測定点のうち2点ではほぼ中心点火時と同じ測定値を示したが、点火プラグから最も離れた位置 C_2 における W_c は 1.45 mm とほかの点における値に比べ、大きくなる。火炎が到達する時間が遅れるため、火炎伝ばが阻害されやすいと考えられる。

以上より点火プラグに近接した位置や、逆に最も離

(a) Central ignition

(b) Side ignition

Fig. 6 Dependence of quenching width on location of ion detector

れた位置を除けば燃焼室内の W_c はほぼ一定と考えられる。なおこの実験条件では点火プラグの位置を変えても、排気 HC 濃度には差は見られなかった。以下の実験では点火はすべて中心点火で、 W_c は点 D_1 にて測定した。

3.3 クエンチすきま特性

3.3.1 空燃比特性 W_c の空燃比への依存を調べた結果を図 7 に示す。HC の排出濃度およびサイクル変動を示すパラメータとして図示平均有効圧力の変動率 (COV_{imep}) も図 7 に示した。 W_c は混合気の A/F が約 13 で最小値を示し、希薄化するにつれやや増加する。しかし A/F がおよそ 19.0 以上になると、急激に大きくなる。これは火炎がクエンチすきまで冷却されて伝ばできなくなるサイクルのほかに、燃焼室内で火炎伝ばが不完全となり、クエンチすき測定装置に火炎が到達する前に消失するサイクルが発生することによると考えられる。すなわち、希薄化によるクエンチすきまの増加に、サイクル変動の影響が加わり、クエンチすきまが急激に大きくなったと推定され COV_{imep} の測定結果もそれを裏付けていると考えられる。

排出 HC 濃度は A/F が 16 から 17 程度のときに最小濃度となり、したがって HC 濃度にはクレビスすきま以外の他の因子の影響も大きいことを示している。

3.3.2 EGR 特性 EGR 率を変えたときの W_c と HC 排出特性および COV_{imep} を図 8 に示す。EGR 率が増加するにつれ W_c は増大する。この結果も空燃比特性と同様に EGR 率が大きくなるにつれ、正常な火炎伝ばが行われないサイクルが増え、 W_c はその影響を受けると考えられる。火炎伝ばの不完全なサイクルと正常な火炎伝ばが行われても、火炎がクレビス部

で冷却され、イオンプローブまでに到達できないサイクルとは区別できないので、EGR 率が大きいときの W_c の定義も希薄限界近くと同様に正常な火炎伝ばだけ行われる運転条件時とはやや異なってくると考えられる。HC 濃度は EGR 率の増加とともに単調に増加する。これは EGR 率の増加とともに火炎温度、燃焼後の既燃ガス温度も低下するため、膨張、排気行程時の未燃 HC の酸化が促進されにくいと考えられる。

3.3.3 点火時期特性 点火時期を変えたときの W_c 、HC 排出濃度、 COV_{imep} を図 9 に示す。MBT は 23° BTDC である。点火時期を進めるほど W_c は小さ

Fig. 8 Dependence of quenching width on EGR rate

Fig. 7 Dependence of quenching width on A/F

Fig. 9 Dependence of quenching width on Ig. timing

くなり、遅らせるほど大きくなる。一方 HC 濃度は点火時期を遅らせるほど低下する。点火時期を遅らせると燃焼のサイクル変動を示す COV_{imep} はやや増加するが、希薄限界付近や、EGR 限界付近ほどの大きなサイクル変動は示さない。したがって実験範囲内では火炎伝ばは正常で、火炎がクエンチすきまにより冷却作用を受けてすきまに侵入できないと考えられる。この結果も W_c だけでは HC の排出濃度は説明できず、火炎伝ば後の燃焼室内のガス温度と、ガスの混合が重要なパラメータであることを示唆している。

3・3・4 充てん効率特性 充てん効率を変化させたときの W_c 、HC 排出濃度および COV_{imep} の結果を図 10 に示す。充てん効率が大きくなるにつれ、 W_c は減少する。しかし HC の排出濃度は充てん効率の増加とともにやや増加する。 COV_{imep} は充てん効率が 20% ではやや大きい、充てん効率が大きくなると急激に小さくなり、約 30% を超すとほぼ一定となる。充てん効率の小さな条件での W_c は希薄限界近傍の運転と同様に燃焼のサイクル変動が大きくなり、正常な火炎伝ばに至らない燃焼サイクルが発生し、そのために W_c が急激に大きくなると考えられる。1 サイクル当たりの発熱量は充てん効率の増加とともに増大し、排気温度も高くなる。HC 濃度は充てん効率が増えると、やや増加するが、これは膨張、排気行程での排気ガスの温度とガスの混合による影響と考えられるが、詳細は今後の課題である。

3・3・5 燃焼室壁温度特性 W_c の燃焼室壁面温

Fig. 10 Dependence of quenching width on charging efficiency

度への依存を調べるために、機関の冷却水温度を変えて、燃焼室壁面温度を制御して実験を行った。結果を図 11 に示すが、実験時の空燃比は 14.5 と 17.0 の 2 条件とした。壁面温度の増加とともに W_c は減少する。これは壁面温度が上昇すれば、火炎からの冷却損失は減少し、火炎は消炎しにくくなるため、クレビス部に侵入しやすいためと考えられる。また HC の排出濃度も示したが、 A/F が大きいほうが W_c は大きく、HC 濃度は低くなるが、壁面温度への依存は W_c と HC 濃度には同じ特性が見られる。しかし排気 HC 濃度の低下は W_c の減少が原因とは必ずしも断定できず排気温度、油膜からの HC の放出の減少などの効果も検討する必要があると思われる。

3・4 クエンチすきまの実験式

3・4・1 クエンチすきまの圧力依存 機関の回転数、空燃比、燃焼室壁面温度を一定に保ち、点火時期、充てん効率を変えてシリンダ内の圧力を変え、圧力依存を調べた結果を図 12 に示す。これより W_c は式 (1)

Fig. 11 Dependence of quenching width on cylinder wall temperature

Fig. 12 Dependence of quenching width on maximum cylinder pressure

Fig. 13 Experimental dependence of quenching width on cylinder pressure and cylinder wall temperature

で表される。ここで K_1 は比例定数である。

$$W_c = K_1 P_{\max}^{-0.9} \dots \dots \dots (1)$$

3・4・2 クエンチすきまの圧力、温度依存 いろいろな運転条件におけるシリンダ内圧力と燃焼室壁面温度を測定し式(2)で表される実験式を得た。その結果を図13に示した。

$$W_c = K_2 P_{\max}^{-0.9} T_w^{-0.5} \dots \dots \dots (2)$$

ただし式(2)は理論混合比付近の運転条件で得られた式である。これはバーナにおいて得られる実験式と同形であり⁽¹⁾、定容器による壁面クエンチの実験⁽¹⁴⁾とは係数の値が異なるが、機関の燃焼室内における火炎の壁面クエンチも同様の現象であり、同じメカニズムにより発生すると考えられる。式(2)の物理的な意味は未燃ガスに火炎から対流により伝わる熱量と、燃焼室に熱伝導により失われる熱量の比がある限界値を超えると、火炎は消炎に至ると解釈できる。

3・5 シリンダ内ガスの可視化 シリンダ内のシュリーレン撮影の写真を図14に示す。燃焼行程では火炎は細かい乱れを伴った乱流火炎の状態では伝播するが、火炎伝播が終了し、膨張行程から排気行程に移ると排気下死点付近でシリンダのボア周辺部に、既燃部とは異なる層が形成される。

矩形シリンダによる実験⁽¹²⁾によれば燃焼が終わり、膨張行程の早い時期にクレビス部から未燃ガスの放出があると報告されているが、本実験ではその現象は観察されなかった。機関や運転条件、あるいは画像撮影法の相違に原因するのかもしれない。

観測される層は排気行程の進行とともにシリンダの周辺部から中心部に張り出してくる。これはピストントップランドとシリンダの間に形成されるクレビス部に残留していた未燃ガスが、排気行程時にシリンダ内

1400rpm, A/F:14.5, IA:MBT, η_c :36%

Combustion process 0 deg ATDC(TDC)

Exhaust process 180 deg ATDC(BDC)

Exhaust process 200 deg ATDC

Fig. 14 Schlieren photographs in the combustion chamber

の圧力の低下に伴いシリンダ内に噴出すると考えられる。この層は排気行程の半ばまで観察される。

また、下死点時の図14中左の噴出層の先端部は、かなり乱れを伴っているが、上部、右部から噴出している層にはあまり強い乱流構造は見られない。また左上の部分からの噴出は弱く、明確な層は見られない。このようにピストンクレビスからのガスの噴出は、必ずしもピストン全周にわたり均一ではなく、場所により変化している。ピストントップランドクレビス部におけるクエンチも一様ではないことを示唆しているのかもしれない。

なおピストントップランドクレビス幅は冷機時で、約0.3 mmあり、運転時には拡大すると考えられるが、火炎が侵入するほどのクレビス幅には至らないと思われる。また実験では機関はピストンとシリンダは無潤滑の条件で運転されるため、燃焼室壁面上の油膜とHCの干渉の影響はないと考えられる。

4. 結 言

火花点火機関の燃焼室内におけるクエンチすきまを平行平板とイオン信号検出器を組み合わせた測定装置により測定し、さらにシュリーレン写真によりシリンダ内のガスの挙動を可視化し、以下のことが明らかになった。

(1) 燃焼室内のクエンチすきま幅 W_c は燃焼室の広い範囲で一定であるが、点火プラグに近接した位置では小さく、点火プラグより離れた火炎伝播が遅れる場所では、大きくなる傾向が得られた。

(2) W_c は混合気が希薄化するにつれ、EGR 率が大きくなると、充てん効率が小さくなると、燃焼室壁面温度が低下すると、また点火時期を遅らせると、すべて大きくなることが確かめられた。

(3) 機関の燃焼室内の W_c を与える実験式を得た。 W_c はシリンダ内最高圧力と燃焼室壁面温度の関数として表すことができ、バーナ火炎で得られる消炎距離の式と同じ形が得られた。

(4) シリンダ内の膨張、排気行程時のガスの挙動を可視化し、排気行程時に、シリンダボアの周囲より、ガスが噴出することを確認した。噴出タイミングなどよりピストントップランドとシリンダの間に形成されるクレビス部からの未燃ガスと推定される。また噴出ガスのガス量、噴出速度は場所により変化する傾向が

見られた。

終わりにのぞみ、本研究の実験に絶大なご協力をいただいた、当時、日産自動車(株)中央研究所の橋本光明、ならびに橋詰豊の両氏に感謝申し上げる。

文 献

- (1) Daniel, W. A., *Proc. 6th Int. Symp. Combust.*, (1957), 886-894.
- (2) LoRusso, J. A., ほか2名, *Combust. Sci. Technol.*, **21** (1981), 121-125.
- (3) Adamczyk, A. A., ほか1名, *Combust. Sci. Technol.*, **47** (1986), 193-212.
- (4) Kaiser, E. W., ほか2名, *Proc. 18th Int. Symp. Combust.*, (1981), 1881-1890.
- (5) 石澤静雄・ほか1名, *機論*, **52**-482, B(1986), 3627-3634.
- (6) 是松孝治・ほか1名, *機論*, **56**-526, B(1990), 255-260.
- (7) Cheng, W. K., ほか, *SAE Paper*, No. 932708(1993), 1-13.
- (8) Adamczyk, A. A., *Combust. Sci. Technol.*, **64**(1989), 263-376.
- (9) Min, K., ほか2名, *SAE Paper*, No. 940306(1994), 89-103.
- (10) Wentworth, J. T., *Combust. Sci. Technol.*, **4**(1971), 97-100.
- (11) Sterlepper, J., ほか2名, *SAE Paper*, No. 941994(1994), 121-129.
- (12) Namazian, M., ほか1名, *SAE Paper*, No. 820088(1982), 1-26.
- (13) 雑賀 高・ほか2名, *機論*, **52**-475, B(1986), 1420-1424.
- (14) 富田栄二・ほか2名, *機論*, **53**-487, B(1987), 1108-1116.