

定容燃焼器による燃焼現象の観察*

—高速度シュリーレン撮影による火炎挙動の観察—

吉田 勝哉¹⁾

近藤 克哉²⁾

小宮 孝司³⁾

Observation of combustion phenomena in a constant volume combustion chamber

- The flame propagation after ignition is observed by using high-speed schlieren photographs -

Katsuya Yoshida

Katsuya Kondou

Takashi Komiya

This study is conducted with constant volume combustion chamber by using methane (CH_4) is the main component of natural gas and hydrogen (H_2) as the fuel. As a result, following facts are clarified. The hydrogen is easy to ignite in comparison to the methane and it's lean burn limit is wide, and the burning speed is very fast. Utilizing these characteristics of the hydrogen, it is possible to burn the super lean mixture of the methane as the major fuel by the small hydrogen torch that is produced by igniting the small amount of hydrogen supplied around the ignition plug.

KEY WORDS : Methane , Hydrogen , Ignition , Combustion , Flame Propagation

1. はじめに

石油の枯渇および CO_2 増加による地球の温暖化が脅威になっている。このため、自動車用エンジンは燃料消費量が少ないことを強く求められている。近年、エンジンのシリンダ内に、ガソリンを直接噴射して火花で点火し、濃度が極めて薄い混合気を燃焼させる筒内直接噴射ガソリンエンジンが実用化されている⁽¹⁾。超希薄燃焼は、混合気を層状に分けてシリンダ内に吸い込む、点火プラグまわりに濃い混合気を供給して確実に点火させ、残りの広い空間にある超希薄混合気に火炎を伝播させる方法である。これによって、従来の方式によるエンジンに比べ、半分以下の薄い混合気で燃焼させることができるために、大幅な燃費改善と CO_2 低減が期待されている。

一方、石油の代替燃料として天然ガス、水素が考えられ、燃焼の基礎研究からエンジンシステムの研究開発まで幅広く進められている⁽²⁾⁽³⁾。天然ガスエンジンの場合も、超希薄混合気を燃焼させる方式が望まれる。

これらのエンジンを開発するうえで、点火および火炎伝播の様子を知ることが重要である。しかし、実際のエンジンではピストンが動き燃焼室まわりの構造も複雑であるため、燃焼現象を簡単に観察することができない。このため、基礎研

究には定容燃焼器を用いた実験が行われ、燃焼の観察実験の報告も多い⁽⁴⁾。

本研究では定容燃焼器を用いたシュリーレン撮影を行い、燃焼現象を観察した。燃料としてメタン(CH_4)、水素(H_2)を用いた。これらの希薄燃焼限界を調べ、少量の H_2 を火種として天然ガスの主成分である CH_4 を超希薄燃焼させた場合の混合気の流れ、火炎伝播の様子、さらに点火プラグの影響について観察した。

2. 実験装置及び実験方法

図 1 に定容燃焼実験装置の全体図を示す。円筒型の定容燃焼器（以下、燃焼器と称する）を中心に設け、燃料供給系、タイミング制御系及び光学・撮影系で構成する。

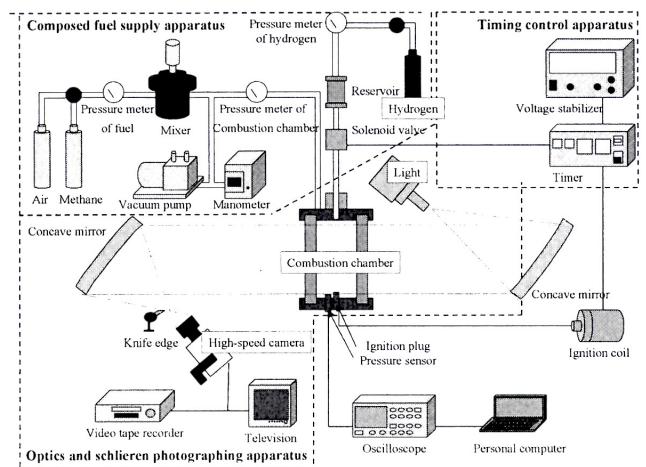


Fig. 1 Constant volume combustion apparatus.

*2013年8月6日受理。第45回全国自動車短期大学研究発表会において発表。

1)・2)・3) 新潟工業短期大学 自動車工業科

(950-2076 新潟県新潟市西区上新栄町5-13-7)

図 2 に燃焼器を示す。燃焼器はアルミニウム製で燃焼空間は内径 100mm、厚さ 30mm（容積 235cm³）で、両端面には厚さ 30mm の石英ガラス壁を用いることで、点光源発生装置からの光を通し、内部全域を透視することができる。

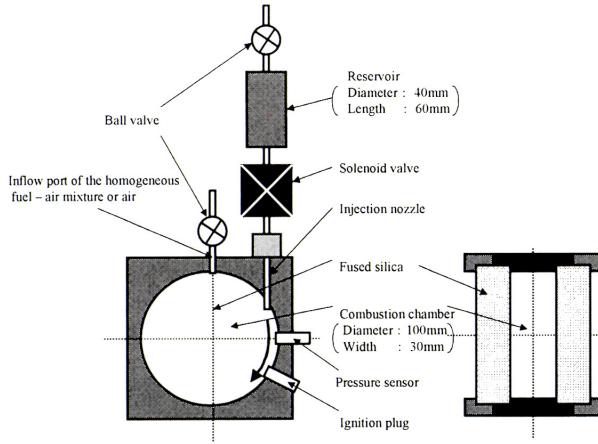


Fig. 2 Constant volume combustion chamber.

空気または燃料と空気の均一混合気の導入口は真上から中心部に向けて設け、リザーバ内に貯えた燃料の噴射口は接線方向に向け、その延長線上に点火プラグがある。H₂を着火源とする燃焼の実験では、まず、燃焼器内に CH₄ の希薄混合気を導入する。その後、燃焼器近くに設けた純 H₂ を燃焼器内に噴射し、点火する。タイミング制御系は、タイマー、定電圧装置で構成され、電磁弁を開いている時間（噴射時間 t₁）および噴射終了から点火するまでの時間（点火時間 t₂）を 1ms ごとにデジタル設定できる。また、点火プラグ、イグニションコイルは一般の自動車用エンジンに用いられるものを使用した。光学・撮影系は、高圧水銀灯で発させた点光源を凹面鏡（焦点距離 1m、直径 100mm）に照射し、平行光線にして燃焼器の石英ガラスを透過させる。次に凹面鏡で反射させた光線が収斂するところにナイフエッジを置く。高速度カメラの映像は暗くなるが、燃焼器の中にガス流動や燃焼など密度変化を伴う現象が起きると、光源がナイフエッジ後方に漏れ鮮明な画像が得られる。この技法をシュリーレン撮影法という。高速度デジタルビデオ撮影装置は Kodack 社製の EKTAPRO で、撮影速度は 1000fps、撮影継続時間は 2.1s である。ビデオモニターを用いてスローモーションで観察した。

3. 実験結果

3.1. CH₄, H₂—空気の均一混合気の静止状態における燃焼

CH₄ または H₂ と空気の均一混合気を作成し、初期圧力 P₀ = 0.2MPa の静止状態で燃焼状況を観察した。結果を図 3 に示す。なお、当量比 ϕ は空気過剰率の逆数で、 $\phi = 1.0$ が理論混合比である。

混合気の濃度が当量比 $\phi = 1.0$ の場合、CH₄ では、点火した後、火炎の乱れが殆ど無い状態で伝播しているが、H₂ では燃

焼が極めて早く火炎面に細かい凹凸がある。

H₂ と空気の当量比 ϕ を 0.5 → 0.3 と薄くした場合の結果を図 4 に示す。混合気が薄くなるにつれ燃焼が遅くなることが分かる。

CH₄ または H₂ と空気の均一混合気について希薄燃焼限界を調べた結果を図 5 に示す。当量比 ϕ を 1.0 から徐々に小さくしていき、点火プラグに火花を 1 回飛ばしても点火しなくなる限界を希薄燃焼限界とした。

希薄燃焼限界は、CH₄, H₂ について、それぞれ 0.7, 0.25 程度である。CH₄ に比べ H₂ は極めて薄い領域でも点火することが確認された。これらの傾向は、これまで報告された結果と一致する⁽⁵⁾。

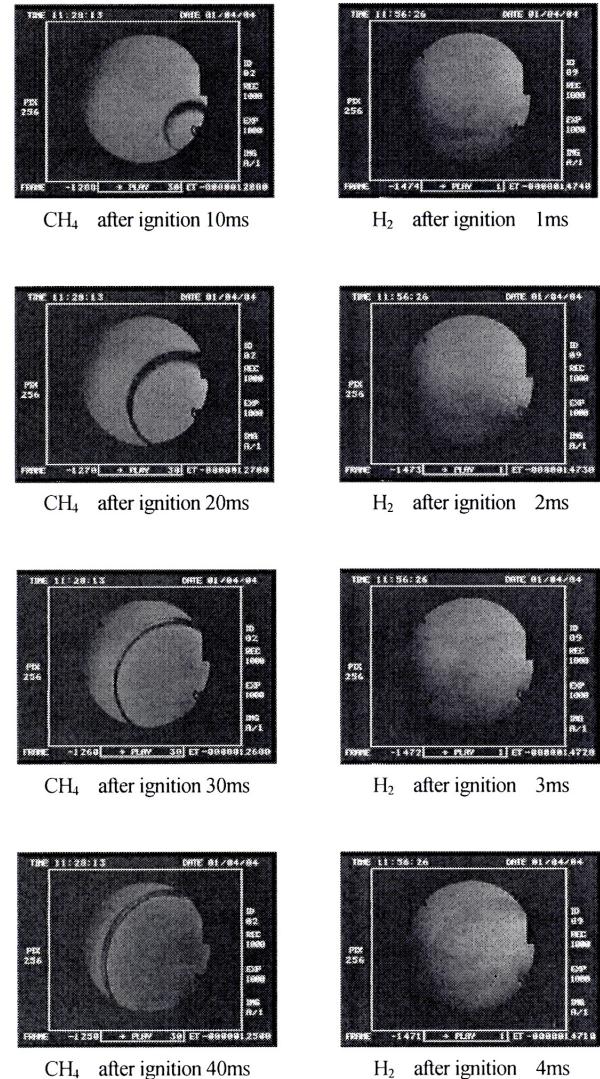
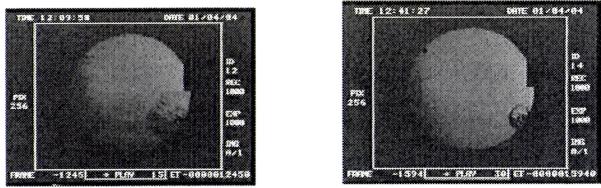
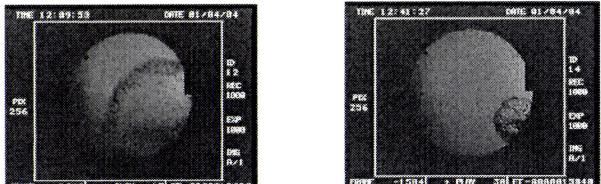


Fig. 3 Flame propagation of CH₄ or H₂ and air homogeneous static state mixture ($\phi=1.0$).



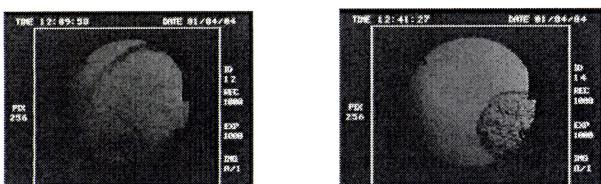
$H_2(\phi=0.3)$ after ignition 5 ms

$H_2(\phi=0.3)$ after ignition 10ms



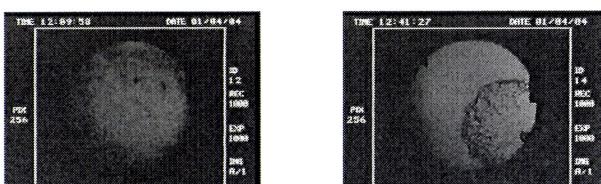
$H_2(\phi=0.5)$ after ignition 10ms

$H_2(\phi=0.3)$ after ignition 20ms



$H_2(\phi=0.5)$ after ignition 15ms

$H_2(\phi=0.3)$ after ignition 30ms



$H_2(\phi=0.5)$ after ignition 20ms

$H_2(\phi=0.3)$ after ignition 40ms

Fig. 4 Flame propagation of hydrogen - air homogeneous mixture.

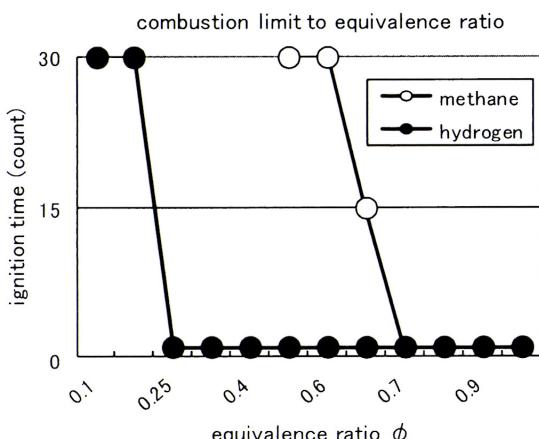


Fig. 5 Lean combustion limit of CH_4 and H_2 .

燃焼室内の圧力測定結果から求めた、燃焼時間 τ 、平均燃焼速度 v および燃焼最大圧力 P_{max} を図 6 に示す。ここで、燃焼時間は点火時刻から燃焼最高圧力に達するまでの時間、平均燃焼速度は燃焼室の直径を燃焼時間で割った値である。混合気が薄くなるにつれ、燃焼が遅くなり、燃焼最高圧力が低くなる。

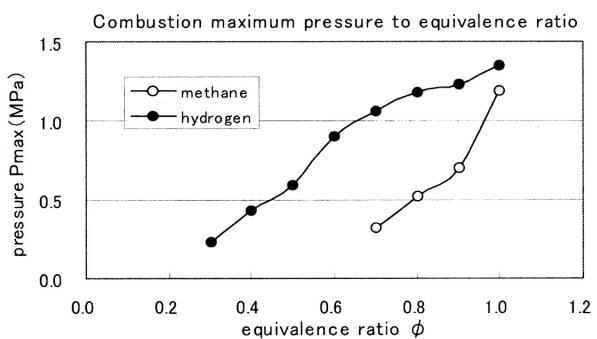
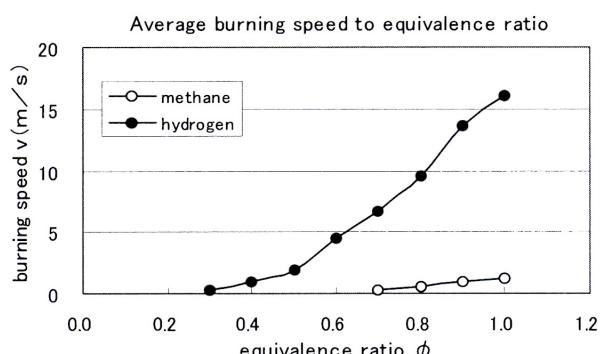
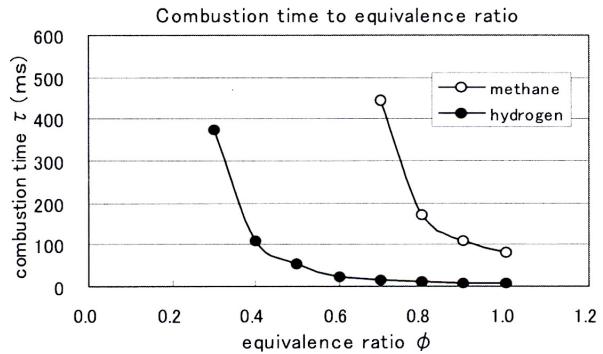
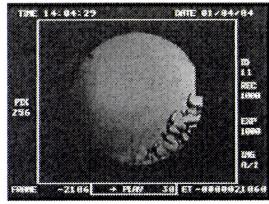


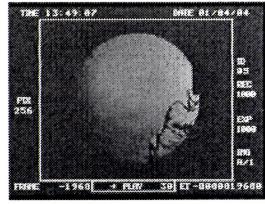
Fig. 6 Combustion time, burning speed and maximum pressure.

3-2. CH_4 の希薄混合気中に H_2 を噴射した場合の燃焼
燃焼器内に 0.2MPa の希薄 CH_4 を導入して静止状態にした後、リザーバから比較的高圧の純 H_2 を噴射し、点火した。リザーバ内圧力は燃焼器内の初期圧力 $P_0=0.2$ MPa を基準として +0.03MPa である。ここで、噴射時間 $t_1=30$ ms、点火時間

$t_2=30\text{ms}$ である。CH₄混合気の $\phi=0.5$ と 0.3 の場合の結果を図 7 に示す。



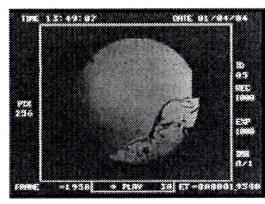
$\phi=0.5$ after ignition 10ms



$\phi=0.3$ after ignition 10ms



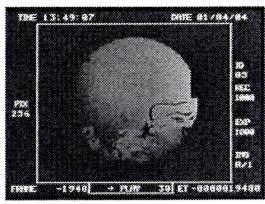
$\phi=0.5$ after ignition 20ms



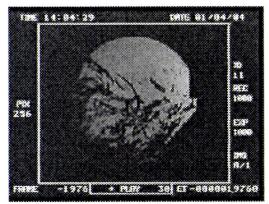
$\phi=0.3$ after ignition 20ms



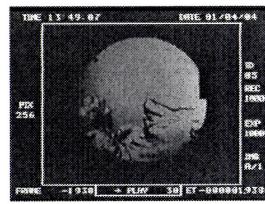
$\phi=0.5$ after ignition 30ms



$\phi=0.3$ after ignition 30ms



$\phi=0.5$ after ignition 40ms



$\phi=0.3$ after ignition 40ms

Fig. 7 The combustion with H₂ jet into the methane-air mixture (CH₄=0.2MPa, H₂=+0.03MPa).

電磁弁が開き始めるとリザーバから点火プラグに向け、下方にH₂が噴射し始める。噴射圧力が高いため、H₂は勢い良く噴射され続け、燃焼器内壁下面に沿うスワールとなり空気との混合が進む。H₂の流れは渦状になり燃焼器上部に向かう。つぎに、点火プラグに火花が飛ぶことにより、燃焼を開始する。点火された部分から火炎が急速に広がり、残りの領域全体が燃焼する。

この時のH₂噴射量を圧力上昇値から求めると、H₂が燃焼器内全体に広がり均一混合気になったとした場合の当量比にして $\phi=0.49$ に相当し、かなり多い量である。

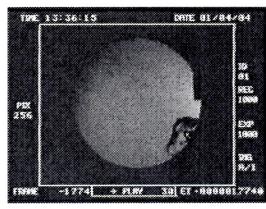
次に、CH₄混合気の $\phi=0.3$ の場合は $\phi=0.5$ の場合と比べ

ると、CH₄の濃度が薄くなつたために、火花が飛んでから火炎伝播の勢いが弱くなるが、領域全体に燃焼が及ぶことが分かる。

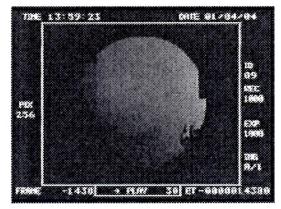
3-3. CH₄の希薄混合気中に少量のH₂を噴射した場合の燃焼

次に、点火プラグ近くに少量のH₂を噴射して、この部分を確実に点火させ、全体を燃焼させることを試みた。t₁, t₂ は前出の条件と同一である。CH₄混合気の $\phi=0.5$ と 0.3 のときの結果を図 8 に示す。

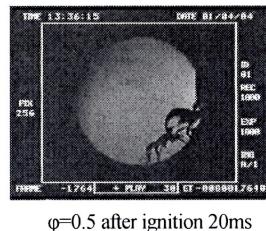
図 7 の場合と比べると、リザーバ内圧力 P₀=+0.02MPa と低くなっているため H₂の噴射の勢いは小さくなっているが、点火プラグで確実に点火されている。この時の H₂噴射量は圧力検出器で測定できないほどの量で、最大に見積もっても、H₂が燃焼器内全体に広がり均一混合気になったとした場合の当量比 $\phi=0.08$ で燃焼不可能な量であった。



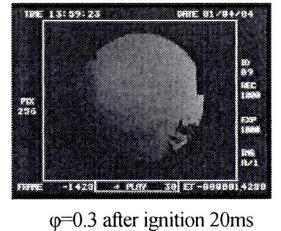
$\phi=0.5$ after ignition 10ms



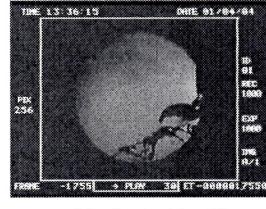
$\phi=0.3$ after ignition 10ms



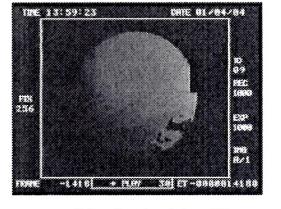
$\phi=0.5$ after ignition 20ms



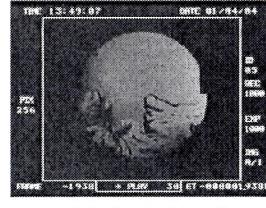
$\phi=0.3$ after ignition 20ms



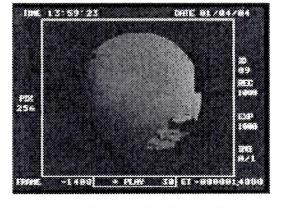
$\phi=0.5$ after ignition 30ms



$\phi=0.3$ after ignition 30ms



$\phi=0.5$ after ignition 40ms



$\phi=0.3$ after ignition 40ms

Fig. 8 The combustion with little hydrogen jet into the methane-air mixture (CH₄=0.2MPa, H₂=+0.02MPa).

通常では点火不可能な CH_4 の超希薄混合気が、 H_2 火炎により点火し、火炎が伝播する様子が観察される。 $\phi = 0.3$ では、 $\phi = 0.5$ と比べると、燃焼の勢いは小さくなっているが、依然として燃焼可能であることが分かる。

3・4. 点火プラグの接地電極方向が火炎核形成に及ぼす影響

超希薄混合気を安定して点火するために、点火プラグの接地電極方向に着目した。

接地電極の方向が火炎核形成に大きな影響を与えることは良く知られている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本燃焼器において、 H_2 を直接噴射した時、燃焼器内壁下面を沿うスワール流動が発生する。この場合において、接地電極方向が初期火炎核形成に及ぼす影響を観察するため、燃焼器内に空気 $P_0=0.2\text{ MPa}$ を導入し静止状態にした後、リザーバ内圧力 $P_0=+0.02\text{ MPa}$ の H_2 を噴射し、点火した。 $t_1=15\text{ ms}$, $t_2=30\text{ ms}$ 、点火プラグは NGK 製 BKR5E (中心電極 2.5mm, ニッケル製、接地電極 1 本、火花間隔 1.1mm) とした。なお、確実なスワール流動を与えるため、リザーバ容量を 75.36 cm^3 から 120 cm^3 に増大して観察した。

点火プラグの接地電極方向は、 H_2 の流れる方向に対して、接地電極が上流側 ($\theta = 0^\circ$)、垂直 ($\theta = 90^\circ$)、下流側 ($\theta = 180^\circ$) となるよう 90° ごとに変化させた。

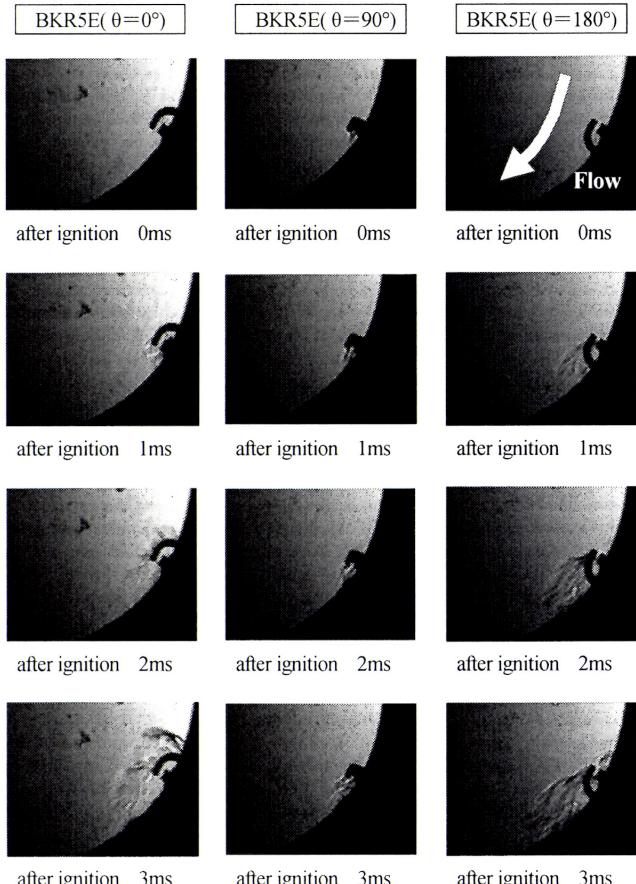


Fig. 9 Influence of spark plug to ground electrode orientations
(air=0.2MPa, $\text{H}_2=+0.02\text{ MPa}$).

図 9 に点火時刻から 3ms 後まで観察した結果を示す。

すべての接地電極方向に関して点火が成功したことが確認できる。 $\theta = 0^\circ$ では、火炎核は成長初期で火花隙間部にとどまり、火炎核表面の状態からも流れの影響をあまり受けていないことが確認できる。これは接地電極部によりスワール流動がプロテクトされたことにより、中心電極付近の流速が遅くなっていることが要因と考えられる。

一方、 $\theta = 90^\circ$ では、火炎核は成長初期より下流側に流れ、火炎核の成長も遅く小さいことがわかる。火花隙間部において $\theta = 0^\circ$ と比較すると流速が早くなっていると推定される。さらに、この流れにより冷却が進み、消炎効果が促進し熱が奪われるため火炎核の成長が妨げられる。

また、 $\theta = 180^\circ$ では、 $\theta = 90^\circ$ と同様に流れの影響を受け、火炎核は下流側に流れているが、火炎核の成長は $\theta = 0^\circ$ と同等に進むことが観察された。

本燃焼器形状において、点火直後の火炎核成長の観点から点火プラグの取り付け角度は、接地電極方向 $\theta = 0^\circ$ が最も効果的である。

3・5. 点火プラグの形状が火炎核形成に及ぼす影響

点火プラグ形状の違いが火炎核形成に及ぼす影響を観察した。使用したプラグは、BKR5E の他、IFR5J11 (中心電極 0.7mm, イリジウム製、接地電極 1 本、火花間隔 1.1mm), BKR5EQUA (中心電極 2.0mm, 白金製、接地電極 4 本) の NGK 製 3 種類について観察した。

実験条件は前出の条件と同一であるが、接地電極方向は、本燃焼器で最も安定した点火が得られる $\theta = 0^\circ$ 一定とした。

図 10 に点火時刻から 3ms 後まで観察した結果を示す。

接地電極が 1 本の BKR5E と IFR5J11 について比較すると、中心電極が細くなることで、初期の火炎核形成が改善できることがわかる。これは、電極先端部の面積を小さくすることで、消炎作用が小さくなり火炎が大きく成長することが可能となるためである。また、電極先端部での放電の散らばりが少なく先端部に集中するため、火炎核が成長しやすいといえる。

次に接地電極を多極化したものと比較した。多極点火プラグを使用する目的は、電極消耗を分散させて耐久性を確保することである。この点火プラグは、交換が比較的困難なエンジンに用いられている。

本実験装置のような H_2 を直接噴射した時に発生するスワール流動下においては、流れの影響がほとんどなく、安定した初期火炎核形成を実現している。また、整備の観点からも、点火プラグ交換時、常に接地電極方向が理想方向 ($\theta = 0^\circ$) に装着することは困難である。しかし、この接地電極が 4 本の点火プラグを使用した場合、どの角度で締めつけが完了しても安定した初期火炎核の成長が期待できる。

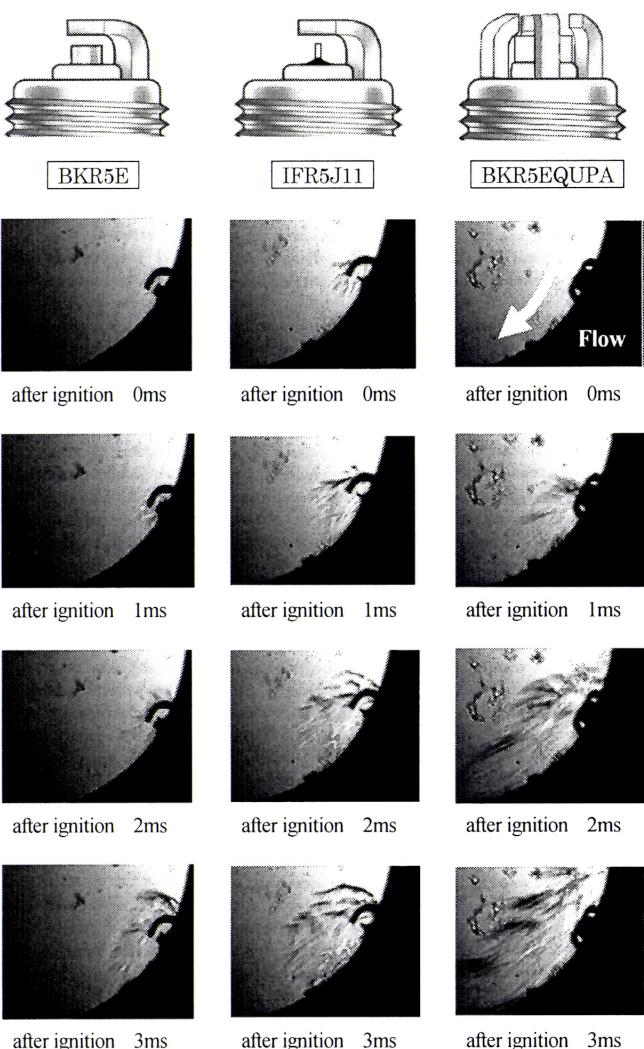


Fig. 10 Influence of spark plug to electrode type

(air=0.2MPa, H₂=+0.02MPa).

謝 辞

本研究の遂行にあたり「財団法人 東京自動車技術普及協会」より助成金を賜りました事を記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 松本宗一ほか：筒内噴射ガソリンエンジンの燃焼特性、自動車技術会学術講演会前刷集, No.965-125, p.101-104 (1996)
- (2) Toshio Iijima and Tadano Takeo : Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity, *Combustion and Flame* 65, p.35-43 (1986).
- (3) Yuichi Goto and Yoshio Sato : Combustion Improvement and Exhaust Emissions Characteristics in a Direct Injection Natural Gas Engine by Throttling and Exhaust Gas Recirculation, *SAE Paper 2001-01-0737* (2001)
- (4) 片岡克己ほか：定容燃焼器を用いた天然ガスエンジンの燃焼特性に関する基礎的研究、日本機械学会論文集, B編 62巻, 596号, p.1638-1643, (1995)
- (5) 本田尚士：環境圏の新しい燃焼工学, フジ・テクノシステム, 1999, 178p
- (6) 石井一洋：流動混合気の火花点火能力に及ぼす接地電極方向の影響、内燃機関シンポジウム論文, 17th, p107-112 (2002)
- (7) 七田貴史：詳細化学反応機構を用いたスパークプラグの着火性予測手法の検討、自動車技術会学術講演会前刷集, No2-13, p.1-6 (2013)

4. まとめ

石油の代替燃料とされる、天然ガスの主成分である CH₄ と H₂ に関して、定容燃焼器を用いた燃焼実験を行った。高速度シュリーレン観察を行った結果、以下の現象を具体的に確認できた。

- (1) CH₄ に比べると H₂ は点火しやすいため、希薄燃焼限界も広く、燃焼速度も早い。
- (2) 点火プラグの近くに少量の H₂ を供給して点火させ、これを火種として CH₄ の超希薄燃焼を行うことが可能である。
- (3) 点火プラグの接地電極方向、および接地電極形状により、初期火炎核形成に違いがあることが認められた。

天然ガスを燃料とする層状吸気・超希薄燃焼エンジンの実現への可能性を検討するにあたって、以上の結果から有効な知見が得られたものと考えられる。