

希薄層状燃焼エンジンの着火性に関する研究*

— 希薄燃焼天然ガスエンジン用 —

近藤 克哉¹⁾ 吉田 勝哉²⁾ 鈴木 真人³⁾

A Study on Ignition Characteristics at Stratified Lean Combustion Engine

— Aiming a Natural Gas Lean Burn Engine —

Katsuya Kondou¹⁾ Katsuya Yoshida²⁾ Makoto Suzuki³⁾

The final purpose of this study is to develop a lean burn engine for natural gas as the main fuel, by making ignition certainly with the aid of small amount of hydrogen as the source fuel. A constant volume combustion schlieren observation experiment was conducted to get basic knowledge about the ignitability and the following results were obtained. The ignition characteristics were slightly improved when the direction of the ground electrode was positioned towards the upstream direction, and good characteristics were obtained when the number of the ground electrode was increased. But the superiority of the ignition performance by increasing the number of the ground electrode was not observed by the experiment using four-cylinder direct injection gasoline engine under the condition of idling operation.

KEY WORDS: Heat engine, Hydrogen, Natural gas, Spark plug, Ignition, Flame Propagation (A1)

1. まえがき

エネルギー資源の枯渇軽減, 地球温暖化防止に対する関心の高まりから, 自動車用エンジンには燃料消費量と CO₂ 排出量の更なる低減が求められている. ガソリンを筒内へ直接噴射し火花で点火して, 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⁽¹⁾が実用化されている. 現在, 主流となっていないが, 優れた面をもつ方法と考えている.

一方, 米国におけるシェールガス革命以降, 非在来型の天然ガスを効率良く生産することが可能になった. また, メタンハイドレートの開発も大きく進展し, 日本近海の海底下にも賦存していることが確認されている. 天然ガスを燃焼させた場合, 発熱量あたりの CO₂ 排出量は石油に比べ 20~30% 低減可能で, 化石燃料の中では環境に対する負荷が小さいことから, 自動車用エンジンの代替燃料として注目されている.

希薄混合気燃焼の場合でも, 天然ガスの利用が期待され, 基礎からエンジンシステムまで幅広い研究が進められている⁽²⁾⁽³⁾. 本研究は, 代替燃料とされる天然ガスを主燃料とし, 微量の水素を着火源とした超希薄層状燃焼エンジンを目指している. これらの技術は, 希薄や希積の影響による着火の悪化や強い流動による吹き消えなど, 点火系に厳しい環境である.

エンジンの基礎研究として, 定容燃焼器を用いた研究報告も多い⁽⁴⁾. ここでは, 超希薄層状燃焼を安定的に実現するため,

定容燃焼器を用いて空気中に水素を噴射したときの着火性について, 点火プラグの接地電極方向, 接地電極形状, 中心電極径, 接地電極数の違いが着火に及ぼす影響を調べた. 続いて, 超希薄層状燃焼天然ガスエンジン実機試作の知見を得るため, 台上に設置した筒内直接噴射ガソリンエンジンに外部診断器及び排気ガス測定器を接続し, 定容燃焼器実験で得られた結果を評価した.

2. 定容燃焼器によるシュリーレン観察実験

2.1. 実験装置および方法

図 1 に定容燃焼器シュリーレン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.

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, 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.

燃料供給系は 2 系統になっている. 微量の H₂ を火種とした, 天然ガスの主成分である CH₄ の超希薄燃焼実験が可能である. 今回の実験では, 空気の導入口は真上から中心部に向けて設け, リザーバ (容積 75.36 cm³) 内に貯えた H₂ の噴射口は接続方向に向け, その延長上に点火プラグがある. 実験手順は, 燃焼器内を真空にした後, 空気 (0.20MPa) を導入し静止状態にした後, リザーバ内の H₂ (0.22MPa) を噴射し, 点火した. タイミング制御系は, タイマ, 定電圧装置で構成され, 噴射時間 (電磁弁を開いている時間) を 30ms, 点火時間 (噴射終

*2016 年 8 月 4 日受理. 第 48 回全国自動車短期大学協会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)

了から点火するまでの時間)を20msとした。イグニッションコイルは一般の自動車エンジン用を用いた。点火プラグはNGK製である。光学・撮影系は、高圧水銀灯で発生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、凹面鏡で反射させた光線が収束するところにナイフエッジを置く。燃焼器の中に密度変化を伴う現象が起きると、鮮明な画像が得られる。デジタルビデオ撮影装置はKodak社製のEKTAPROで、撮影速度は1000fps、撮影継続時間は2.1sである。ビデオモニターで観察した。

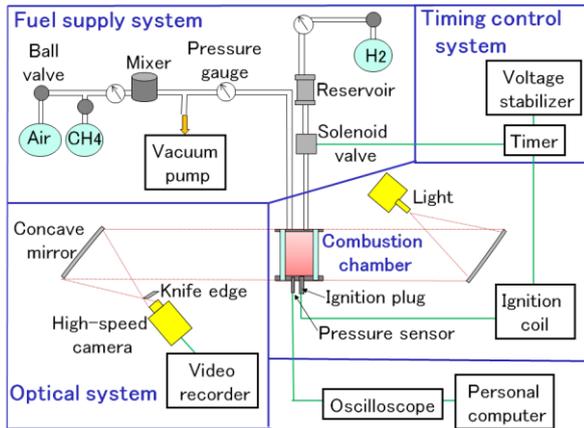


Fig. 1 Constant volume combustion schlieren apparatus

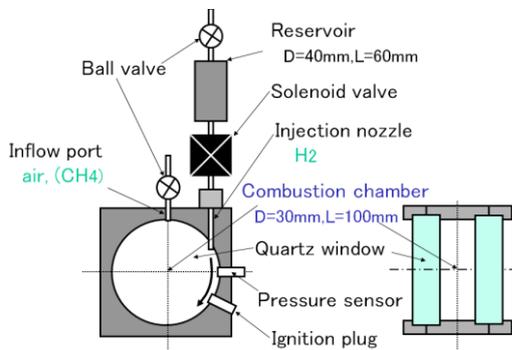


Fig. 2 Constant volume combustion chamber

2.2. 実験結果および考察

(1) 接地電極方向が着火に及ぼす影響 (燃焼器)

流動場において点火プラグの接地電極方向が火炎核の形成に影響を与えることが報告されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本燃焼器の場合、 H_2 を噴射した際、燃焼器内壁を下方に沿う流れが発生するので、この条件下で接地電極方向が着火に及ぼす影響を調べた。使用した点火プラグはBKR5E(ニッケル製, 中心電極直径 $D_{ce} = 2.5\text{mm}$, 接地電極数 $N_{ge} = 1$, 接地電極幅 $W_{ge} = 2.75\text{mm}$)である。接地電極方向は、 H_2 が流れる方向に対して 90° ごとに変化させ、上流方向($\theta = 0^\circ$)、直角方向($\theta = 90^\circ$)、下流方向($\theta = 180^\circ$)の3種類とした。図3に点火時刻から3ms後までの画像を示す。

すべての接地電極方向で着火が確認され、静止予混合気では火炎が球状に伝播するのに対し、火炎は初期の段階から変形しながら伝播している。 H_2 の噴射が影響していると考えられる。 $\theta = 0^\circ$ の場合、成長初期には火炎が火花間隙部にとどまり、火炎の状態からも流れの影響が少ないように見える。これは接地電極部がガス流れの障壁となり、中心電極付近の流速が遅く電極が冷め難くなり、火炎の成長を妨げないことが要因と考えられる。

一方、 $\theta = 90^\circ$ では、火炎は成長初期から下流方向に流され、成長も遅い。 $\theta = 0^\circ$ の場合と比較すると、火花間隙部における流れが早くなり、冷却が促進されることが考えられる。また、 $\theta = 180^\circ$ の場合は、 $\theta = 90^\circ$ と同様に流れの影響を受けて、火炎は下流方向に流され、火炎の成長は $\theta = 90^\circ$ に近い。

以上、点火直後の火炎の形成は、接地電極方向による影響を観察した結果では、 $\theta = 0^\circ$ の場合が比較的良好であることがわかった。

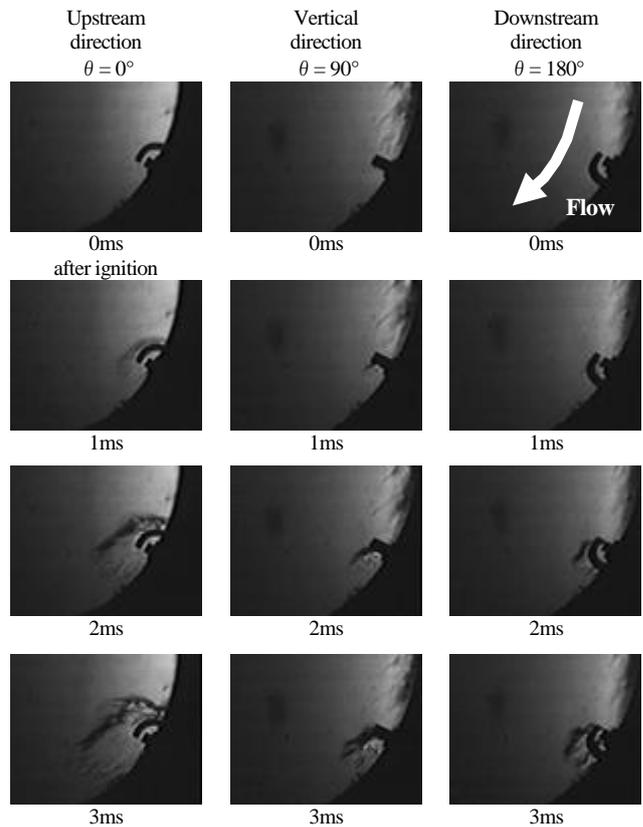


Fig. 3 Influence of the direction of ground electrode
Spark plug = BKR5E, (air = 0.20MPa, $H_2 = 0.22\text{MPa}$)

(2) 接地電極形状が着火に及ぼす影響 (燃焼器)

つぎに、BKR5Eをベースにして接地電極形状を修正加工して、4種類について着火性を調べた。

①接地電極の両端から2.3mmの位置に、くぼみ(幅2.0mm)を設けたもの(ウェーブ型)。②接地電極外側の終端から

1.5mm 間隔で 3 箇所ドリルで凹み（直径 1.5mm）を設けたもの（ディンプル型）．③接地電極の幅を 1.4mm に狭めたもの（幅狭型）．④接地電極の幅を 2.89mm に広げたもの（幅広型）．図 4 に点火時刻から 3ms 後までの画像を示す．

無加工の点火プラグ BKR5E と比較して、ウェーブ型やディンプル型では差が認められなかった．また、幅狭型では火炎の成長が遅いようで、これは H₂ 噴射の流れによる冷却の影響と考えられる．一方、幅広型に関しては、流れの抑制効果が現れたと見え、着火性が僅かながら改善されている．

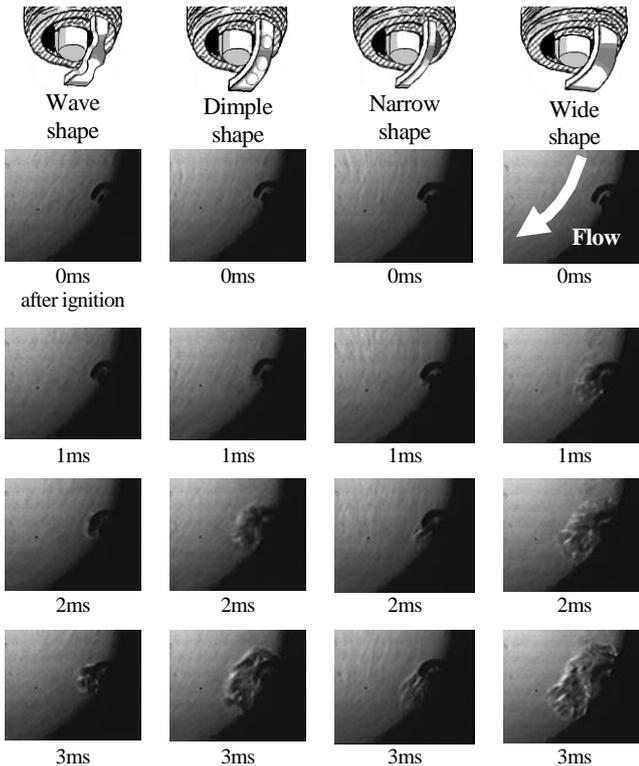


Fig. 4 Influence of the shape of ground electrode

Spark plug = modified BKR5E, (air = 0.20MPa, H₂ = 0.22MPa)

(3) 中心電極径が着火に及ぼす影響（燃焼器）

つぎに、中心電極径の違いによる影響を調べた．先述した BKR5E に加え、PFR5G-11（プラチナ製、Dce = 0.79mm, Nge = 1, Wge = 2.84mm）、IFR5J11（イリジウム製、Dce = 0.62mm, Nge = 1, Wge = 2.87mm）の 3 種類で比較した．接地電極方向は、比較的安定した着火特性が得られる $\theta = 0^\circ$ とした．実験条件は前出の条件と同一である．図 5 に点火時刻から 3ms 後までの画像を示す．

総じて、中心電極径が細くなると初期火炎の形成が良くなる傾向がある．これは、電極先端部の表面積が小さくなると、冷却作用が小さくなるためと考えられる．なお、中心電極が細い方が電極先端部に放電が集中するため、火炎が成長しやすいと考えられるが、本実験では顕著な差は認められなかった．

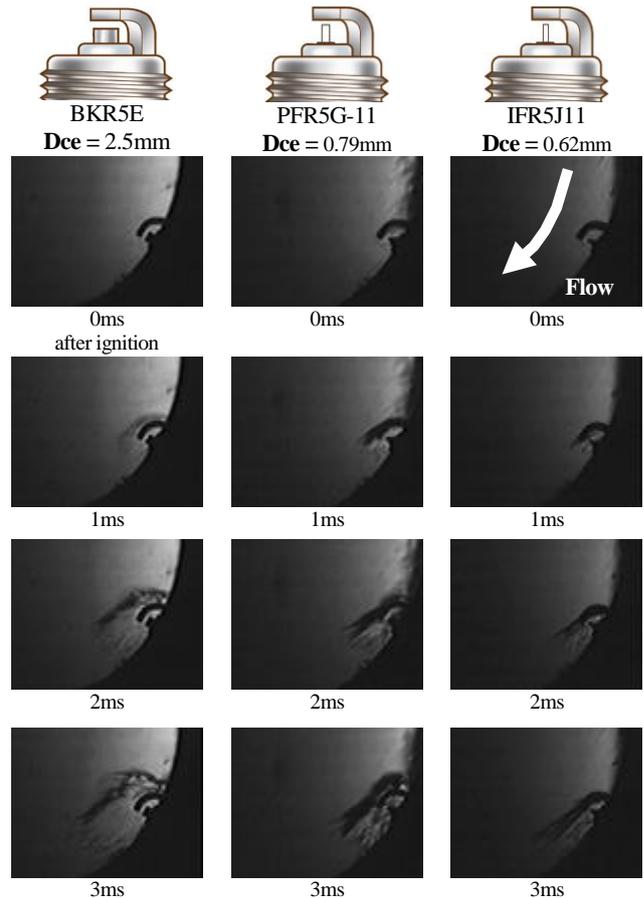


Fig. 5 Influence of the diameter of center electrode

(air = 0.20MPa, H₂ = 0.22MPa)

(4) 接地電極数が着火に及ぼす影響（燃焼器）

上述では、接地電極数が 1 本の場合について、接地電極の方向、形状および中心電極径による影響を調べた．接地電極の方向については H₂ の流れ方向に対して、接地電極を上流方向 ($\theta = 0^\circ$) に設けた場合に着火性能が良くなる傾向が認められた．これより、点火領域近傍のガスの流れを抑制することにより、着火性が向上する効果が期待された．ここでは、点火領域の流れに影響を及ぼすと思われる点火プラグの接地電極数の違いによる影響を調べた．供試比較したのは BKR5EK（ニッケル製、Nge = 2, Wge = 3.04mm）、BKUR5ET（ニッケル製、Nge = 3, Wge = 2.83mm）、BKR5EQUPA（プラチナ製、Nge = 4, Wge = 2.43mm）の 3 種類である．図 6 に点火時刻から 3ms 後までの画像を示す．

先に述べた接地電極数が 1 本の場合に比べると、明らかに着火性が良くなっている．さらに、接地電極数が多くなるほど初期の火炎成長が改善している．エンジン整備で点火プラグを交換する場合、接地電極方向が常に $\theta = 0^\circ$ の方向になるよう装着することは困難である．しかし、接地電極数が 4 本の点火プラグを使用した場合、どの角度で締め付けても安定した着火特性が期待できる．実用性を考えた場合、多極点火

プラグを使用することにより電極消耗が分散し耐久性が向上するメリットがある。コストが高くなるマイナス面はあるが、着火性向上による効果を考えた場合、有益性が勝ることが期待できる。

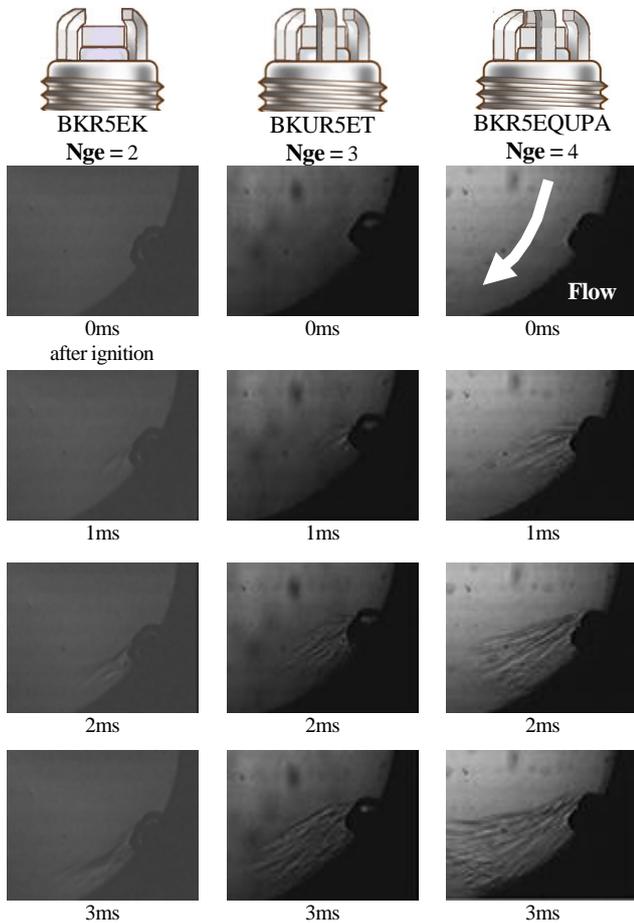


Fig. 6 Influence of the number of ground electrode
(air = 0.20MPa, H₂ = 0.22MPa)

3. 台上ガソリンエンジンによる評価実験

3.1. 実験装置および方法

天然ガスを主燃料とする超希薄層状燃焼エンジンを実現させるためには、圧縮行程で噴射した微量の H₂ が、点火プラグ近傍に適切な可燃濃度を持つ混合気となって存在し、それを確実に点火することが重要となる。そこで、超希薄層状燃焼天然ガスエンジン実機試作の前段階として、点火直前の筒内流動環境が類似すると考えられる筒内直接噴射ガソリンエンジンを供試エンジンに用い、接地電極の方向および接地電極数が着火に与える影響を調べた。使用した点火プラグは、供試エンジン指定の BKR5EKUD (ニッケル製、Nge = 2, Wge = 3.00mm) である。

表 1 に供試エンジンの諸元を示す。

Table 1 Specification of the test engine

Item	4G93-GDI
Displacement (cc)	1834
Bore × Stroke (mm)	81.0 × 89.0
Number of cylinder	In line 4
Combustion chamber	Pentroof × Ball in piston
Compression ratio	12.0
Valvetrain and Number of valve	DOHC-4 valve
Ignition	Spark
Fuel supply system	Cylinder direct injection
Fuel injection pressure (MPa)	5.0

図 7 に筒内直接噴射ガソリンエンジン実験装置の構成を示す。このエンジンは吸気ポートが直立し、ピストン頂面が湾曲していることが特徴で、これにより低負荷時に吸入された空気は真上からシリンダ内に流れ込み、シリンダの吸気側の壁面に沿って下降した後、ピストン頂面で方向を変えてタンブル流を生成しながら空気のみ状態で圧縮される。点火直前にピストンに向かってガソリンを噴射し、筒内のタンブル流に乗せ、気化させながら点火プラグ近傍に運ぶことにより希薄層状燃焼が行われる。供試エンジンを中心に、トランスミッション、ECU、燃料供給装置、冷却装置、メータを台上に配置した MEGACHEM 製ベンチエンジンを使用した。

実験方法は、供試エンジンを暖機した後、OBD2 (On Board Diagnostics 2) 用に設置された DLC (Data Link Coupler) と DENSO 製のスキャンツール (DST - i) を接続し、P レンジでアイドリング運転を行った。なお、エンジン ECU によるアイドリング制御が機能している。1 分間のエンジン回転数、冷却水温度、点火時期、吸入空気量、エンジン負荷を PC に取り込み記録した。NGK 製点火プラグの接地電極方向は、エキゾーストバルブ側に向けた状態を $\theta = 0^\circ$ として、時計周りに 90° 間隔の 4 箇所と比較した。

また、排気ガス測定器 (HORIBA 製 MEXA-324J) にて触媒通過前の排気ガスを 10 分間連続計測し、1 分ごとに CO および HC 濃度の記録を行った。エンジン冷却水温度が上昇し冷却用電動ファンが作動した場合は、電動ファンが停止してから記録を行った。

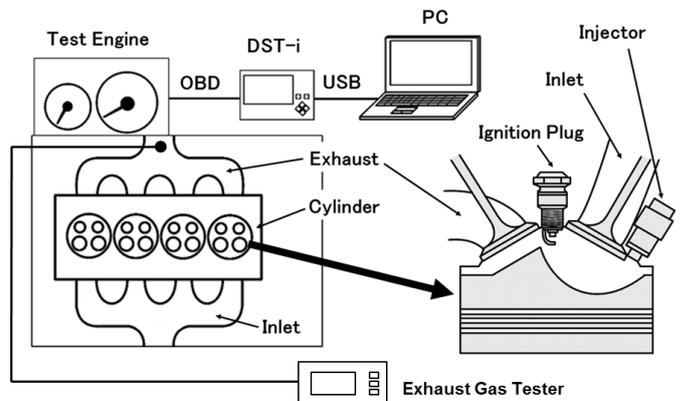


Fig.7 Cylinder direct injection gasoline engine apparatus

3.2. 実験結果および考察

(1) 接地電極方向が着火に及ぼす影響 (エンジン)

まず、接地電極方向が着火に与える影響を調べた。点火プラグは、BKR5EKUDの接地電極片側を削り取り1本に修正したものをを用いた。図8にPレンジ、アイドリング運転1分間のDST-iエンジンデータの一例を示す。

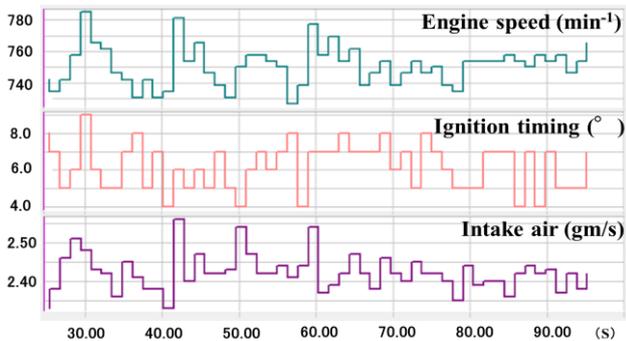


Fig. 8 DST-i engine data

エンジン回転が変化すると、それを一定に制御するために、点火時期を4~9°進角または遅角させたり、ISCVを動かしてバイパスバルブからの吸入空気量を2.3~2.6gm/s増減させていることがわかる。これらのデータをもとに検討した。

図9に点火プラグの接地電極方向を90°ごとに变化させた時のアイドリング最高回転数 Ne_{max} 、アイドリング最低回転数 Ne_{min} およびアイドリング最高回転数と最低回転数の差 Δne の関係を示す。

接地電極が流れの上流方向 ($\theta = 0^\circ$) または下流方向 ($\theta = 180^\circ$) にある場合、 Ne_{max} が高く、 Δne が大きい傾向にあるが、大きな差は見られない。燃焼器と異なり、実際のエンジンでは、ピストンが上下に摺動して吸気と圧縮を行うため、燃焼室内流動に乱れが生じ、湾曲頂面ピストンによるエキゾーストバルブ方向からのタンブル流の他、インレットバルブ方向からの流動も生じていると考えられ、これらが影響したものと考えている。

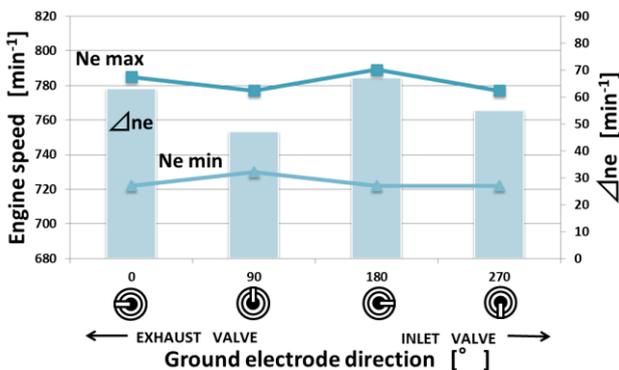


Fig. 9 Influence of engine speed by the direction of ground electrode BKR5EKUD (single ground electrode)

(2) 接地電極数が着火に及ぼす影響 (エンジン)

つぎに、接地電極数が着火に与える影響を調べるため、点火プラグ BKR5EKUD の接地電極数が2本の状態で評価した。図10に接地電極方向を90°ごとに变化させた時のアイドリング最高回転数 Ne_{max} 、アイドリング最低回転数 Ne_{min} およびアイドリング最高回転数と最低回転数の差 Δne の関係を示す。

接地電極数が2本の場合、1本の場合と比較すると Ne_{max} は比較的安定しているが、 Ne_{min} は1本の場合と同様の変動が見られ、多極化による明確な着火性能の優位性は見られなかった。

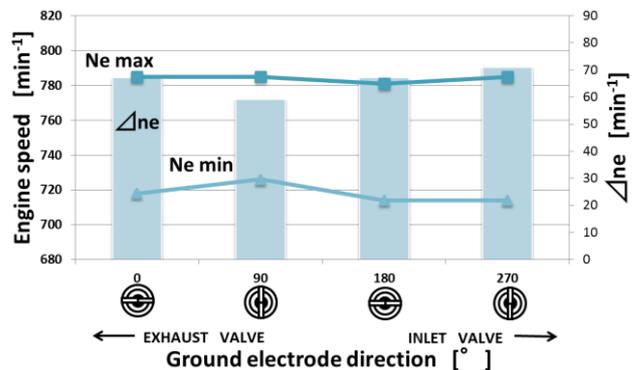


Fig. 10 Influence of engine speed by the direction of ground electrode BKR5EKUD (double ground electrode)

(3) 接地電極方向が排気に及ぼす影響 (エンジン)

排気ガス中のCO、HC濃度を測定することで、接地電極方向の違いが着火に与える影響を調べた。COの値は空燃比が小さく燃料が濃い場合に上昇する。一方、HCの値は失火により未燃焼ガスが排出された場合に上昇する。使用する点火プラグは、BKR5EKUD (single ground electrode) である。

図11に点火プラグの接地電極方向を90°ごとに变化させた時のCO、HC測定結果を示す。

O₂ センサのフィードバック制御が働き、燃料噴射量が微増減しCOの値が増減するため、失火の影響を受けるHCの値で検討した。

燃焼室内で点火プラグにより着火された炎は、次第に燃え広がっていくが、燃焼室内の流動により吹き消えが発生した場合、着火性能が低下して燃焼ガス温度に到達せず、炎の温度は低下し消えてしまいHCの値が上昇することになる。

今回、接地電極方向が、エキゾーストバルブ方向からのタンブル流の障壁となる位置 ($\theta = 0^\circ$) の場合、HCの値が比較的良好である。しかし、明確な差異は認められない。

今回は簡易的に排気ガス性能を確認するため、整備工場一般的に使用されている排気ガス測定器を使用した。今後はガスクロマトグラフなどで詳細な成分を確認する必要がある。

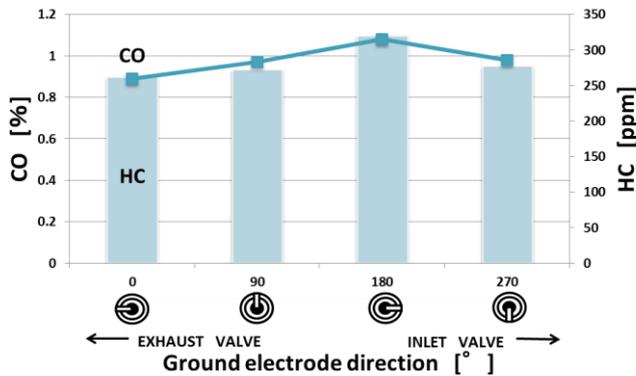


Fig. 11 Influence of exhaust emission by the direction of ground electrode BKR5EKUD (single ground electrode)

以上、実機エンジンのアイドリング運転による評価実験では、定容燃焼器シュリーレン観察実験と一致する傾向が得られなかった。これは、アイドリング回転制御機能が働くため、着火性能の差による影響が表出しにくくなったためと考えられる。アイドリング回転制御機能が働かない中～高負荷の運転条件下での評価については、さらに検討が必要である。

4. まとめ

天然ガスを主燃料とする微量水素直接噴射エンジンをめざしている。点火プラグの接地電極が着火に及ぼす影響を検討し、以下の結果を得た。

- (1) 定容燃焼器シュリーレン観察実験によると、点火プラグの接地電極方向は流れ上流方向にある場合、着火性が比較的良好である。
- (2) また、接地電極数を増やすと、初期の火炎成長が改善し、明らかに着火性が良くなる。
- (3) 筒内直接噴射式4気筒ガソリンエンジン実験によるアイドリング運転評価では、接地電極の方向および接地電極の多極化による着火性能の優位性は認められない。
- (4) これは、アイドリング回転制御機能が働くため、着火性能の差が出現しにくくなったためと考える。

謝 辞

本研究の遂行にあたり「一般財団法人 東京自動車技術普及協会」の助成金を頂きましたことに感謝の意を表します。また、専攻科学生の松浦大君（現：株式会社ホンダ四輪販売新潟）、加藤克仁君（現：新潟トヨペット株式会社）に協力を頂きましたことを記し、謝意を表します。

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) 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）
- (6) 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）