

# 放電ギャップ拡大による SI4 サイクルエンジンの燃焼改善

平島 繁紀\*・井川 翔太\*\*

## Combustion improvement of the SI4cycle engine with an expansion of discharge gap

Shigeki HIRASHIMA \* and Shota IKAWA \*\*

### Abstract

From the viewpoint of global warming, the internal combustion engine encounters serious problems such as CO<sub>2</sub> from exhaust gas. We reported the effect of combustion improvement by new ignition method DDI (Direct Discharge Ignition), however, the effect of SG (Spark Gap) remains. So, we adopted DDI method by which discharges are generated transversely between central electrode and cylinder-block to clarify the effect of SG. The experimental results show that the best spark gap exists for DDI method, and it has the possibility of combustion improvement.

**Key Words :** SI4cycle engine, Direct Discharge Ignition, Spark gap, Combustion improvement

### 1. 緒言

CO<sub>2</sub>の低減など、自動車に代表される内燃機関を取り巻く環境は、さらに厳しいものとなっている。CO<sub>2</sub>の低減には、より希薄な混合気を着火させ、なおかつ、それに見合うエンジンの出力を得ること、つまりエンジン内の燃焼効率を上げることが不可欠である。

本研究室ではこれまで、ガソリンエンジンの従来の点火方式 (CON 方式) に比べ、より良い燃焼効率を実現する新たな点火方式であるダイレクトスパーク方式 (DDI 方式) という点火方式を用いた研究を行ってきた。<sup>1) 2)</sup>

これまでの報告では、プラグ中心電極からピストンヘッド間において DDI 方式を適用させ、その効果について考察を行ったが、回転速度の変化に伴う点火時期の変化によって、放電ギャップの拡大範囲が制限されていた。

そこで、DDI 方式の放電ギャップに着目し、その有用性を確認すべく、装置の改良を行った。変更点はこれまでの DDI 方式に対し、側弁式のエンジン構造に着目し、ピストンヘッドに放電させるのではなく、シリンダーヘッド側に放電させる方法をとった。このことにより、放電ギャップを確実に固定し広げることが可能となった。

その結果、DDI 方式における放電ギャップ拡大により、ガソリンエンジンの燃焼効率改善に至る可能性が得られたのでここに報告する。

### 2. ダイレクトスパーク方式 (DDI 方式)

通常の点火方式は接地電極を有するスパークプラグにより混合気に点火し燃焼させるものである。これに対し DDI 方式では、中心電極のみのスパークプラグを用いてピストンヘッドを接地電極とするものである。<sup>3)</sup>つまり、燃焼室内に突き出した中心電極とピストンヘッドの間に形成される燃焼室を縦断する長いスパークにより火炎核を形成し混合気に点火し燃焼させる点火方式である。そのため、DDI 方式の方が、放電ギャップを CON 方式より広く

とることができ、発生する火炎核も大きくなり火炎伝播がより速く起きる事が考えられる。火炎伝播がより速く起きれば、シリンダー内の圧力の上昇も大きくなり、ガソリンエンジンの燃焼改善に繋がると考えられる。

### 3. 実験装置の改良点

#### 3-1 エンジンヘッド

昨年度の DDI 方式を採用した試験方法は、図1に示すように接地電極を取り外したスパークプラグをピストンの真上に設置し、ピストンヘッドを接地電極とするものであった。しかし、この点火方法では点火時期の設定により放電ギャップの値も決まってしまう、双方の値を独立して設定することが困難であった。また、エンジンの回転数が高くなれば、点火時期におけるピストンヘッドの位置も進角してしまい、その分放電ギャップも狭まってしまう問題もあった。

そこで、本研究では放電ギャップを確実に固定し広げることが可能な新たなエンジンヘッドの作製を行った。図2に、本研究で採用した変更後の点火方法概略図を示す。以前のようにピストンヘッドに放電させるのではなく、シリンダーヘッド側に放電させる方法をとった。そのことにより、

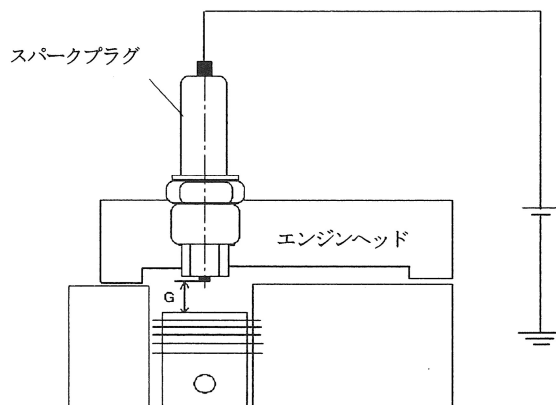


図1 以前の点火方法概略図

\* 機械工学科 ( Department of Mechanical Engineering )

\*\* 専攻科生産工学専攻2年 ( Advanced Production Engineering Course, 2nd grade )

エンジンの回転数とは無関係に放電ギャップが固定できるようにした。また、スパークプラグの取り付け位置での燃焼室内の厚みを大きくとることにより、より大きくギャップを広げることが可能になった。

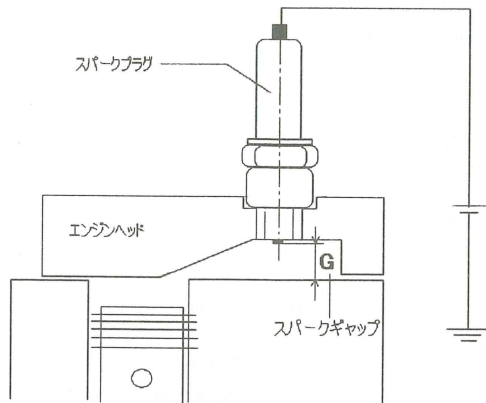


図2 変更後の点火方法概略図

図3に、実際にプラグの取り付け位置を変更し、作製したアルミ製のエンジンヘッドとDDI方式用に加工したスパークプラグの写真を示す。



図3 エンジンヘッドとDDIプラグ

3-2 気化器 (キャブレター)

以前まで使用していたキャブレターは発電機用エンジンの標準のものを使用していたため空燃比が固定され、調整ができなかった。そこで、本研究では比較的的空燃比を調整しやすいカート用のものに取り替えた。それにより、A/Fの調整が容易に行えるようになった。

3-3 圧力センサー

以前まで使用していた圧電式圧力センサーでは、スパークプラグ高電圧によるノイズの干渉が大きく圧力データの変動が大きかった。そのため、正しい圧力データを測定することが困難であった。そこで、本研究ではノイズの干渉が少ないひずみゲージ式の圧力センサーを使用し、配線もノイズの影響を極力受けないようにした。

その結果、ノイズの干渉を少なくすることができた。

4. 実験装置

本実験で使用するエンジンは、ガソリン4サイクルエンジンの単気筒97ccのホンダG101をベースとし、改良したものである。図4に実験装置の概略図を表1にエンジンおよび発電機の主要諸元を示す。

エンジンの出力軸は発電機のローター軸と直結されており、発電機に電気負荷を加えることでエンジンの負荷運転を行う。また、発電機の軸末端にロータリーエンコーダを取り付けており、その信号を点火時期制御装置とパソコンに分配している。得られたクランク角信号とエンジンヘッド部に取り付けた圧力ピックアップにより、パソコン上でp-θ線図を描画させる。排気管の途中にはA/F計を取り付け、運転時の空燃比値をモニターできるようにしている。燃料タンクには並行して、燃料消費量測定用のビューレットを取り付けており、コックにより切り替えができるようにしている。

表1 エンジンおよび発電機 諸元表

エンジン形式	単気筒4サイクル、側弁式
排気量	97cc
燃料供給方式	キャブレター式
圧縮比	6.5:1
最高出力	1.3kW/3600rpm
発電機形式	二極界磁回転型、 ブラシレス交流発電機
相数	単相
定格出力	900VA(交流)、100W(直流)
定格電圧	100V(交流)、12V(直流)
定格電流	9.0A(交流)、8.3A(直流)
回転数	3600rpm

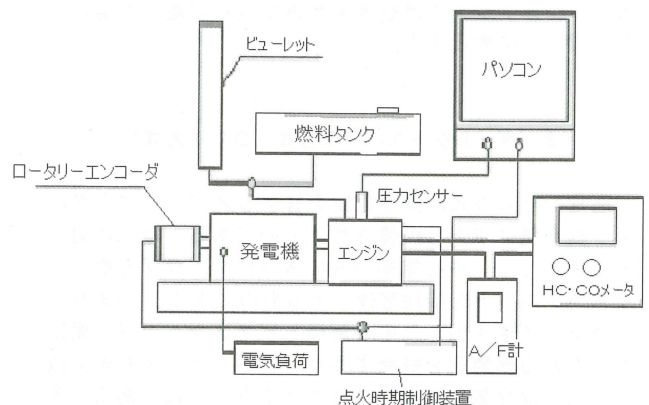


図4 実験装置概略図

5 実験方法

実験においては、発電機に電気負荷装置（電気ヒーター）を接続する。空燃比、点火方式、電気ヒーターのワット数により負荷の条件を設定し、排気管出口より排出ガス中の成分（HC, CO）の測定、燃料消費時間の測定、エンジン回転数の測定を行った。同時に、コンピュータに接続されたロータリーエンコーダ、及び圧力ピックアップより得られたデータより、燃焼解析ソフトウェア上で指圧線図を描く。なお、燃料消費率はビューレットにより5mlの消費時間を計測した。

点火方式は、CON方式とDDI方式のスパークプラグを使用し、燃焼状態を測定し比較する。加えて、先に述べた測定項目の他に燃焼状態を比較する項目として、エンジンの希薄燃焼限界である lean limit の測定も行った。

DDI方式のスパークギャップはエンジンヘッドとプラグとの間にスペーサーを挟むことにより拡大する。ギャップの大きさは、1mm→2mm→3mm→4mmと順に拡大して測定を行った。尚、4mmより大きなギャップでは、安定した放電が得られなかった。

以上の条件を設定の上、複数回測定を行い、実験で得られたデータをもとに、燃焼状態の解析を行った。また、エンジン回転角に対してどのような割合で燃焼したのかを評価する熱発生率を求めることにした。

DDI方式で実際にシリンダ側に放電していることを確認するため、アクリル製のエンジンヘッドを使用した。その様子を図5に示す。

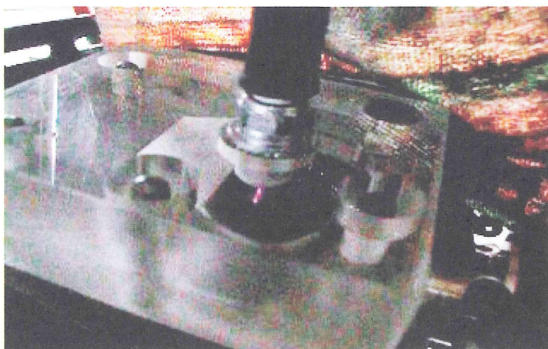


図5 DDI方式による放電の様子

6. 実験結果および考察

6-1 燃料着火性の比較

放電ギャップを拡大することによって、期待される効果として着火性の向上が考えられる。その着火性の評価の方法として、CON方式とDDI方式の各ギャップでの lean limit の測定を行った。lean limit とは、エンジンを希薄燃焼させ、エンジンストールが起こる時点を運転限界と考え、その時点での空気過剰率のことをいう。

その方法として点火時期を固定したまま、空気過剰率を  $\lambda = 1$  より希薄側 ( $\lambda > 1$ ) に変えながら運転限界を調べた。空気過剰率を希薄にするにあたっては、燃料の量を絞ることにより行なった。その他の実験条件は、無負荷、BTDC-30°である。その結果を図6に示す。

同一の点火時期（BTDC-30°）において、従来方式の希薄運転限界値よりも DDI 方式の方が拡大しており、着火性が向上していることを示している。また、ギャップを広くするほど、希薄運転限界が広がっていることも確認でき、放電ギャップの拡大の効果が得られたといえる。

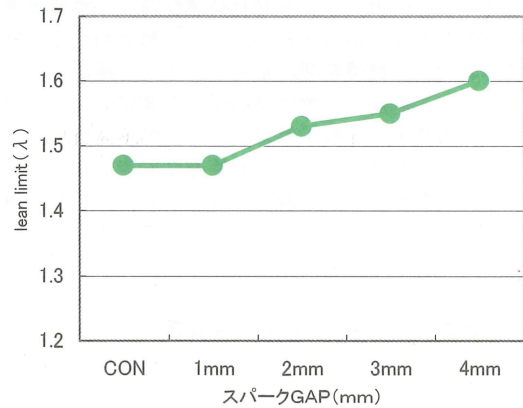


図6 lean limitの比較

6-2 回転速度の比較

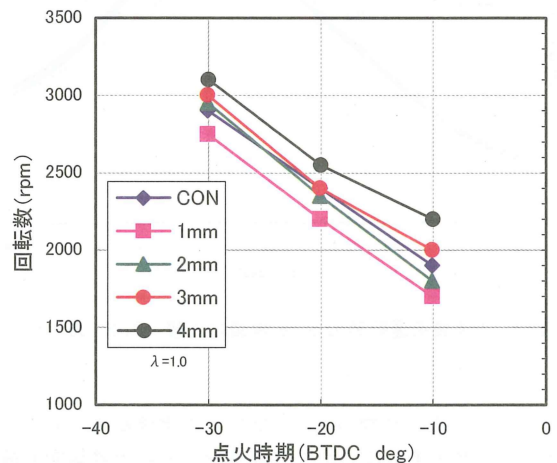


図7 無負荷運転時の回転速度の比較

同じ点火時期や負荷の運転条件であるならば、その時のエンジン回転数をみることにより、ある程度、エンジンの燃焼状態を比較することができる。エンジンの回転数が上昇すれば、それだけエンジン運転時の燃焼時間が短縮されたということになり、燃焼改善に繋がると考える。

そこで、CON方式とDDI方式の各ギャップでのエンジン無負荷回転速度の比較を行った。なお、いずれも空燃比は理論値 ( $\lambda = 1$ ) とし、点火時期を上死点前角 (BTDC) -30°、-20°、-10° と変更し、測定を行った。

図7は、その回転速度の変化を示したものである。点火時期を進めるにつれ回転速度も上昇するが、どの点火時期においてもギャップを大きくすれば回転速度も上昇していることがわかる。つまり、ギャップの拡大により、それだけ

燃焼期間が短縮されていることを意味する。また、どの点火時期においてもギャップ 3mm 以上で CON 方式のものより高い回転数を得ており、ギャップ 4mm ではどの点火時期においても最も高い回転数が得られていることがわかる。

6-3 燃焼圧力上昇率の比較

放電ギャップの拡大により無負荷運転時での燃焼改善の効果を確認することができたが、さらに無負荷時と同様に負荷時においても燃焼期間が短縮されるのか確認を行った。その方法として燃焼時の燃焼室内圧力を測定し、 $p-\theta$  線図による圧力上昇率の比較が考えられる。燃焼室内の圧力がより速く上昇すれば、それだけ燃焼速度も速くなっているということである。その比較を行なうため、3/4 負荷運転時での CON 方式と DDI 方式の各ギャップでの圧力上昇率の比較を行った。

① BTDC-30°, A/F=14, 3/4 負荷

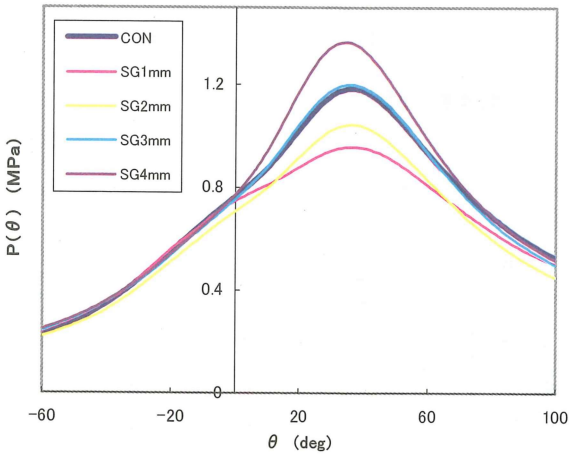


図 8 3/4 負荷運転時の  $p-\theta$  線図の比較 (BTDC-30°)

図 8 は、点火時期が BTDC-30° での実験結果である。ギャップを拡大するにつれて燃焼室内圧力の上昇傾向も最大値も大きくなっていることがわかる。したがって、負荷時においても、ギャップの拡大による燃焼期間の短縮が図れることが確認できた。また、こちらも無負荷時と同様にギャップ 3mm 以上で CON 方式のものより高い圧力上昇率を得ていることがわかる。

② BTDC-40°, A/F=14, 3/4 負荷

図 9 は、点火時期が BTDC-40° での実験結果である。BTDC-30° の時と同様にギャップを拡大するにつれて圧力上昇率も高くなっている。また、CON 方式の圧力上昇率は BTDC-30° の時とあまり違いはないが、DDI 方式の圧力上昇率は高くなっている。特にギャップの小さい場合に著しい。加えて、ギャップが 1mm~4mm では圧力上昇率の差も小さくなっている。つまり DDI 方式においては、ある程度、点火時期を進めた方が燃焼状態が良いと考えられる。そこで、点火時期を BTDC-50° に設定したがうまく運転できなかった。

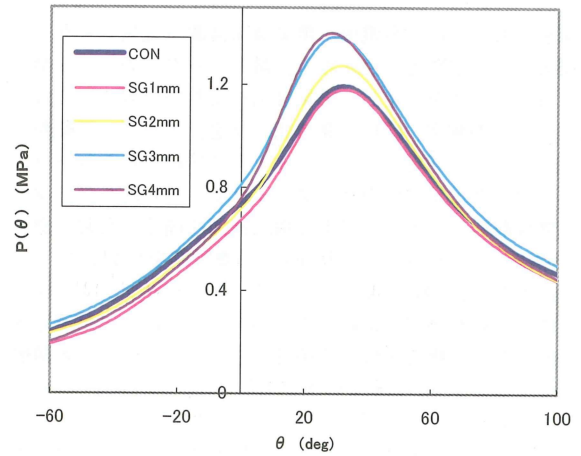


図 9 3/4 負荷運転時の  $p-\theta$  線図の比較 (BTDC-40°)

6-4 熱発生率の比較

圧力上昇率を基に熱発生率を求めることができる。<sup>4)</sup> 熱発生率とは、エンジントルクの源となる実質的な熱量の生成速度のことであり、この値を比較することにより燃焼室内の熱量の移り変わりを比較する。

① BTDC-30°, A/F=14, 3/4 負荷

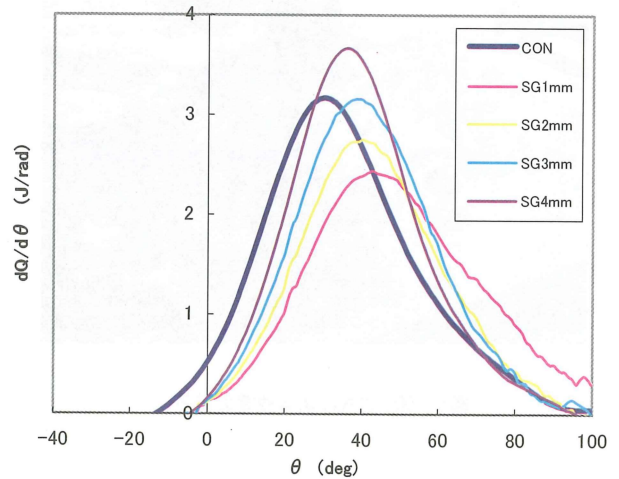


図 10  $dQ/d\theta-\theta$  線図の比較 (BTDC-30°)

図 10 は、点火時期 BTDC-30° での熱発生率を比較したグラフである。ギャップを拡大するにつれて熱発生率も高くなっており、ギャップ拡大の効果が顕著に表れている。また、CON 方式と DDI 方式の熱発生率のピークを比較すると、DDI 方式の方がいずれのギャップにおいても遅れている。しかし、熱発生率の上昇傾度を比較すれば、ギャップが 3mm 以上の場合では CON 方式より大きく上昇している。つまり、DDI 方式は CON 方式に比べ、燃焼が開始されるまでの期間は長いですが、一度燃焼が開始してしまえば、燃焼完了までの時間は短縮されると考えられる。

②BTDC-40° , A/F=14, 3/4 負荷

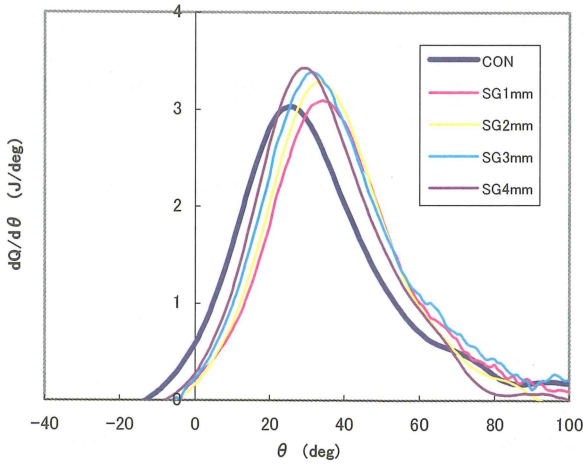


図11 dQ/dθ-θ線図の比較 (BTDC-40°)

図11は、点火時期BTDC-40°での実験結果である。こちらの場合もギャップを拡大するにつれて熱発生率も高くなっている。また、p-θ線図での比較と同様に、点火時期を進めると、DDI方式の各ギャップの熱発生率の差が小さくなっていることがわかる。

6-5 燃料消費時間の比較

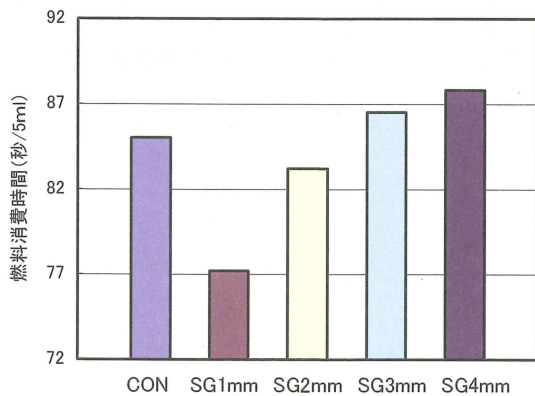


図12 燃料消費時間の比較 (BTDC-30° , 無負荷, 2500rpm)

図12に、CON方式とDDI方式の各ギャップでの燃料消費時間の比較を示す。その際のエンジンの運転条件は、点火時期BTDC-30° , 無負荷, 回転数2500rpmとし、燃料が5ml消費されるまでの時間を測定している。

DDI方式のギャップが広がるにつれて、燃料消費時間も長くなっていることが見て取れる。つまり、ギャップの拡大により燃焼効率が改善され、燃料消費率が向上したと考えられる。この場合も、DDI方式のギャップが3mm以上ではCON方式より良い結果が得られている。

燃料消費率が改善したという事は、燃焼により必然的に発生する二酸化炭素CO<sub>2</sub>の排出量を抑えることに繋がる。

6-6 排出ガス成分の比較

一般に、4サイクルガソリンエンジンの排出ガス成分のうち、生物に有害なガスとしてその減少が望まれているものとして、一酸化炭素CO, 未燃炭化水素HCなどが上げられる。そこで、その2つの排出ガス成分の濃度を測定し比較を行った。その際のエンジンの運転条件は、燃料消費量の測定時と同じく、点火時期BTDC-30° , 無負荷, 回転数2500rpmとしている。

①排出ガス成分 CO (一酸化炭素) 濃度

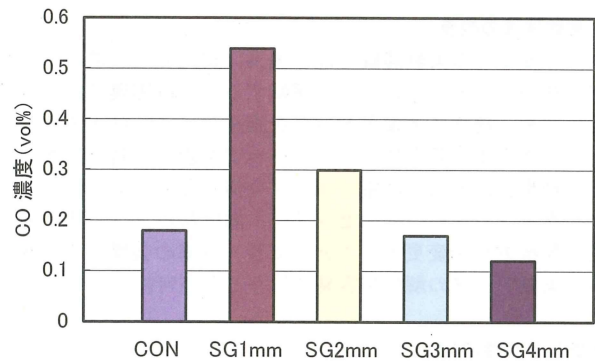


図13 排出ガス成分 CO 濃度 (vol%) の比較

図13より、DDI方式のギャップを広げるにつれ、CO濃度も低減されていることがわかる。しかし、CON方式とDDI方式を比較すると、最大ギャップであるSG4mmの場合でもあまり改善されたとはいえない。

②排出ガス成分 HC (未燃炭化水素) 濃度

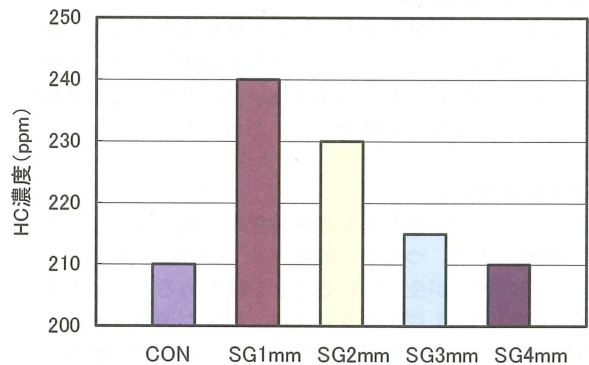


図14 排出ガス成分 HC 濃度 (ppm) の比較

次に、HC濃度の比較を図14に示す。CO濃度の時と同様に、DDI方式のギャップを広げるにつれ、HC濃度も低減されていることがわかる。しかしながら、HC濃度においても、最も低減率の高いSG4mmとCON方式の値とが同じ値になっており、DDI方式によりHC濃度が低減されたとはいえない。

DDI方式の最大ギャップにおいてもCON方式よりCO, HC排出量の低減ができていない事について、考察する。それは、熱発生率の比較で述べたように、DDI方式がCON方式

に比べて燃焼の開始までに掛かる時間が長いことに起因すると考えられる。燃料の不完全燃焼が原因となり、排ガス成分の HC, CO は生成されるため、CON 方式と比べ燃焼開始までの期間は長い燃焼時間自体は短い DDI 方式とそれと対照的な CON 方式の燃焼過程の違いによってこの様な結果が生じたのではないかと考える。

## 7. 結言

今回の報告をまとめると以下の通りである。

### ①実験装置の改良

昨年度までの実験装置では、確実に安定した放電ギャップを維持したままエンジンを運転することは困難であった。そのため、確実に放電ギャップを維持し、より拡大することのできるよう新たにエンジンヘッドを設計し製作した。その結果、より広い放電ギャップを得ることができた。また、キャブレター、圧力センサー、燃焼解析ソフト及び周辺の配線方法を変更することにより、以前の装置よりも格段に実験データの解析を容易に行うことが可能になった。

### ②燃料着火性の向上

放電ギャップの拡大により、希薄運転限界(lean limit)が広がっていることが確認でき、燃料着火性の向上を確かめることができた。

### ③エンジン回転速度の向上

同じ点火時期、負荷、空燃費の運転条件であるにもかかわらず、ギャップの拡大により回転速度も上昇していることを確認した。すなわち、ギャップの拡大により、それだけ燃焼期間が短縮されていることを確かめることができた。

### ④燃焼圧力上昇率の向上

放電ギャップを拡大するにつれて燃焼室内圧力の上昇傾向も最大値も大きくなっていることが確認できた。すなわち、負荷時においても、放電ギャップ拡大による燃焼期間の短縮が図れることを確かめることができた。

### ⑤熱発生率の向上

放電ギャップの拡大により熱発生率も高くなっていることが確認できた。つまり、放電ギャップの広い方がより大きなエネルギーが生じていることを確かめることができた。また、DDI 方式は CON 方式に比べ、燃焼が開始されるまでの期間は長い、一度燃焼が開始してしまえば、燃焼完了までの時間は短縮されていることが実験結果よりいえる。

### ⑥燃料消費率の向上

放電ギャップの拡大により、燃料消費時間も長くなっていることが確認できた。つまり、ギャップの拡大により燃焼効率が改善され、燃料消費率が向上したことを確かめることができた。

同じ運転条件において、燃料消費率が改善されれば、燃焼により必然的に発生する二酸化炭素 CO<sub>2</sub> の排出量の抑制に繋がる。

### ⑦排出ガス成分の低減

放電ギャップが拡大されるにつれ、CO 濃度、HC 濃度共に低減されていることが確認できた。

しかし、CON 方式と DDI 方式の値とを比べると、DDI 方式の方が優れているとはいえ、その原因として熱発生の過程の違いが考えられる。

これらのことから、放電ギャップの拡大により、エンジンの燃焼効率の改善を確認することができた。

## 8. 謝辞

今回の研究にあたり、DDI 方式エンジンヘッドの加工をお願いした本校、機械工学科浅尾教員、ならびに、圧力センサー等の配線の調整をご指導いただいた電気電子工学科加島教員に感謝を申し上げる。実験に際して本科生の栗原君に協力を頂いた。

## 9. 参考文献

- 1) 平島, 梅原:「点火方式変更によるガソリンエンジンの燃焼改善(第1報)」, 北九州工業高等専門学校研究報告, 第39号, p1-6
- 2) 平島, 藤田:「点火方式変更によるガソリンエンジンの燃焼改善(第2報)」, 北九州工業高等専門学校研究報告, 第41号, p1-6
- 3) 平島, 橋ほか:「TDI 点火方式による内燃機関の燃焼促進」, 内燃機関, 第33巻, 415号, p9-16, 山海堂
- 4) 田坂英紀ほか:「内燃機関」, 森北出版株式会社, p57-58

(2009年10月6日 受理)