

## 技術解説

九州大学大学院工学研究科  
機械科学専攻 教授

村瀬 英一

Eiichi Murase



## リーンバーンとパルスジェット点火

Lean Burn and Pulsed Flame Jet Ignition

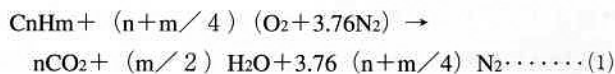
## 1 緒言

現在の自動車用ガソリンエンジンの最大の課題は、エネルギー問題と環境問題を同時に解決することである。エネルギー問題とは、有限なエネルギー資源である石油から、如何に効率よく仕事を取り出すかである。このことは、地球温暖化の原因と言われている二酸化炭素の排出抑制にもつながる。一方環境問題とは、主に一酸化炭素 (CO)、炭化水素 (HC)、窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) の排出抑制である。COは体内組織への酸素運搬機能の阻害 (一酸化炭素中毒) を引き起こす。HCは、未燃あるいは一部酸化した燃料であるが、NO<sub>x</sub>と共存すると、太陽光により光化学反応を起こし、オキシダント (主にオゾン) を生成して、いわゆる光化学スモッグの原因となる。さらにNO<sub>x</sub>は、肺に対する直接的な毒性を示し (肺水腫)、また雨滴に溶解して酸性雨の原因ともなる。

そこで、これらのエネルギー問題と環境問題を同時に解決する一つの有望な手法として、希薄混合気の使用がある。すなわち「リーンバーン」である。ここで紹介するパルスジェット点火は、リーンバーンにおける希薄混合気の実的な点火と燃焼促進に有効と考えられる新しい点火方式である。

## 2 リーンバーン

石油系の燃料 (炭化水素系燃料) は、炭素原子Cと水素原子Hから成っており、一般にC<sub>n</sub>H<sub>m</sub>で表される。その空気中における燃焼 (酸化反応) は次の化学式で示される。



式(1)は、燃料を構成している炭素と水素が完全に酸化される際の物質の関係を表している式であり、この時の物質の関係性を化学量論 (Stoichiometry) という。ガソリンの場合、m/nの値はおよそ1.87であり、式(1)から化学量論における燃料に対する空気の質量の比を求めると、約14.6となる。すなわち、ガソリン1kgと空気14.6kgを混合させて燃焼させると、お互いに過不足無く酸化反応が起きるとい

うことである。この量論関係より空気が多い混合気を希薄混合気といい、希薄混合気による燃焼をリーンバーン (希薄燃焼) という。ここで混合気の濃度を表すパラメータとして、当量比φがある。これは、(化学量論における燃料に対する空気の質量比) / (実際の混合気における燃料に対する空気の質量比) で定義される。よって、化学量論の混合気の当量比は1になり、希薄混合気では1より小さくなる。また、燃料が化学量論より多い場合を過濃混合気といい、当量比は1より大きくなる。

## 2.1 リーンバーンと熱効率

希薄混合気による燃焼、リーンバーンがなぜ効率よく燃料が持つ熱エネルギーから仕事を取り出すことができるかを考える。

ガソリンエンジンは、熱力学のサイクル論では、オットーサイクル (等容サイクル) で表現される<sup>1)</sup>。これは、断熱圧縮—等容受熱—断熱膨張—等容放熱で構成されるもので、これから次の関係式が導かれる。

$$\eta = 1 - (1/\epsilon)^{\gamma-1} \dots \dots \dots (2)$$

ここでηは熱効率で、燃料が持つ熱エネルギーのどれだけが仕事に変換されたかを表わすパラメータであり、この値が大きいく程、熱エネルギーの利用度が高いことを表す。εは圧縮比、γは比熱比 (定容比熱に対する定圧比熱の比) である。式(2)は、オットーサイクルの熱効率が、圧縮比と比熱比のみの関数であり、どれだけの熱エネルギーが加わったか、温度が何度まで上がったか、などには無関係であるという重要で興味深い関係性を示している。そして、圧縮比と比熱比が大きいくほど熱効率が高くなるのがわかる。

しかし、一般の自動車用ガソリンエンジンの圧縮比は、ノッキングという現象のため、高くても10前後どまりである。ノッキングとは、異常燃焼のひとつである<sup>1)</sup>。正常な燃焼の場合、スパークプラグのギャップ間への火花放電により火炎核が形成され、その後燃焼室壁面に向かって、火炎面と呼ばれる燃焼反応帯が伝ばして行き、燃焼室内の全混合気を燃焼させる。その際、火炎面の伝ばとともに、そ

の前方にある未燃の混合気は断熱圧縮を受け、温度と圧力が高くなる。そのような断熱圧縮を受けた燃焼室端部にある未燃の混合気が、勝手に燃焼を始めることがある。これを自着火というが、温度と圧力が高い場で自着火を起こすので、残りの混合気は爆発的に燃焼して急激な圧力上昇を起こし、燃焼室内に大きな振幅の圧力波が往復することになる。この圧力振動の結果、エンジンから「カラカラ」という金属音が聞こえてくる。これがノッキングである。ノッキングが強くなると、最後にはピストン等の焼損に至ることもあり、避けなければならない現象である。これに対しては、自着火が起きにくい燃料（オクタン価が高い燃料）の使用などで対処しているが、ガソリンを使用する限り、現状では圧縮比を上げることには限度がある。

次に比熱比の問題であるが、酸素や窒素などの2原子分子の比熱比は1.40と大きく、原子数が多い多原子分子ではそれより小さくなる<sup>2)</sup>。よって、主に窒素と酸素から成る空気の比熱比も1.40となる。すなわち、混合気が希薄になるほど空気の割合が大きくなり、それに伴い比熱比も大きくなる（1.40に近づく）。このことが、リーンバーンの熱効率が高くなる大きな理由である。また、同じ燃料量に対して空気量が多くなるということは、吸気管にある絞り（スロットル）の開度が大きくなり、空気をエンジンシリンダに吸入する際のポンプ損失が低減することになる。更にリーンバーンは燃焼温度が低いので、壁面への熱損失も小さくなる。これらの理由により、リーンバーンは燃料が持つ熱エネルギーから、効率よく仕事を取り出す一つの有力な手法となる。

## 2.2 リーンバーンと窒素酸化物

COとHCは、共に燃料を完全に燃焼させることにより排出を低減させることができる。ところが窒素酸化物NO<sub>x</sub>（ガソリンエンジンでは主として一酸化窒素NO）は、空気中の窒素と酸素、それに燃焼による高温によって主として生じる（サーマルNO）<sup>1)</sup>。よって化学量論付近の混合気を用いると、COとHCの排出は抑えられるが、火炎の温度が高いので多量の窒素酸化物を排出することになる。一方、リーンバーンは燃焼温度が低いので、窒素酸化物の排出を抑えることができる。すなわち、希薄混合気を完全に燃焼させると、CO、HC、NO<sub>x</sub>の排出を同時に低減できることになる。

以上より、リーンバーンはエネルギー問題と環境問題を一挙に解決する有望な手法であることがわかる。しかし希薄混合気は点火が難しく、かつ燃焼速度が遅いため、安定して燃焼させることが難しい。ここで紹介するパルスジェット点火は、希薄混合気の確実な点火と燃焼促進に有効と考えられる新しい点火方式である。

## 3 パルスジェット点火による燃焼促進

### 3.1 定容燃焼容器による燃焼実験

ここでは、大気圧・室温状態の混合気を定容燃焼容器に充てんした場合の燃焼実験結果から、パルスジェット点火の燃焼促進効果を示す<sup>3)~8)</sup>。実験に用いた定容燃焼容器は内径100mm、幅30mmの偏平円筒状で、両側面に観測窓を配置している（図-1）。燃焼室上部にイグナイタを取り付け、また下部には混合気の導入口が設けられている。点火のタイミングなどは、コンピュータからのパルスにより制御し、また圧力変換器からの信号はAD変換を行い、直接コンピュータのメモリに書き込んだ。実験には、大気圧、室温状態、当量比 $\phi = 0.8$ のメタン-空気の希薄混合気を用いた。

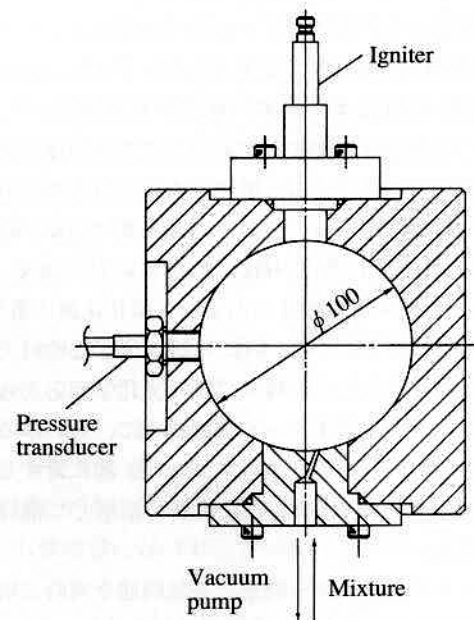


図-1 定容燃焼容器

#### 3.1.1 パルスジェットイグナイタ

パルスジェットイグナイタの概要とキャビティ部の詳細を図-2に示す。イグナイタは一般のスパークプラグと同程度の大きさで、小さなキャビティとオリフィスを有する。キャビティ内にはのみ過濃混合気を導入し、キャビティ内で通常の火花放電を行わせて、キャビティ内の過濃混合気を燃焼させる。その結果、オリフィスから化学的に活性な不完全燃焼生成物を含むジェットが燃焼室内に噴出し、燃焼室内の希薄混合気を点火する。キャビティへの過濃混合気の導入は、ガソリンエンジン用の燃料噴射弁を用いた。噴射された過濃混合気は、燃焼室からの逆流を防ぐためのチェックバルブ、テフロン製の絶縁体、中空の中心電極（外径2mm、内径1.5mm）を通してキャビティ内へ噴出する。（なお、中心電極のキャビティ側の先端は閉じられており、図-2に示すように、側面に設けられた噴出口（直径1mm×

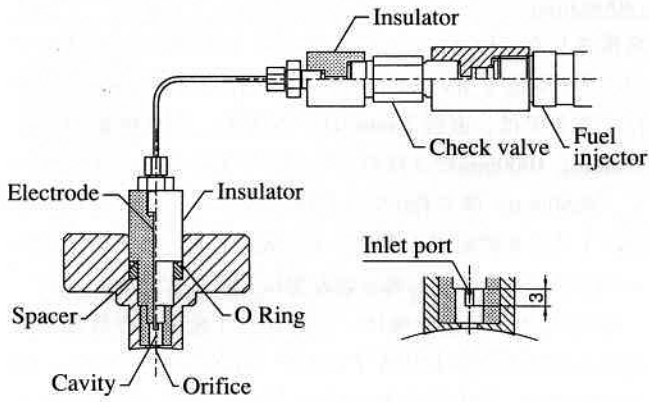


図-2 パルスジェットイグナイタとキャビティ部詳細

2個) から過濃混合気がキャビティ内へ噴出するようにした。

キャビティはテフロン製で、容積は37~500mm<sup>3</sup>、オリフィス直径は2.5~4.0mmである。またキャビティ内へは、当量比 $\phi_c=1.5$ のメタン-空気の過濃混合気を0.1MPa(ゲージ圧)で噴射し、燃料噴射弁作動パルスの幅を50ms、点火時期(燃料噴射弁作動パルスの立上りから火花放電開始までの時間で定義した<sup>4)</sup>)を50msとした。すなわち、燃料噴射終了と同時に火花放電が開始するようにした。

### 3.1.2 燃焼圧力とシュリーレン写真

図-3に火花放電からの燃焼室内の圧力変化(ゲージ圧)を示す。図中、Spark ignitionは市販のスパークプラグによる点火であり、以後これを「通常点火」と称する。図-3はオリフィス直径を2.5mmと一定とし、キャビティ容積を37、170、500mm<sup>3</sup>と変化させた場合の結果である。図-3より、パルスジェット点火は通常点火に比べて圧力の立上りが早く、かつ高い圧力上昇率を示しており、燃焼促進効果が確認される。図-4に燃焼の高速度シュリーレン写真を示す。シュリーレン写真とは、密度変化の情報が得られる撮影法

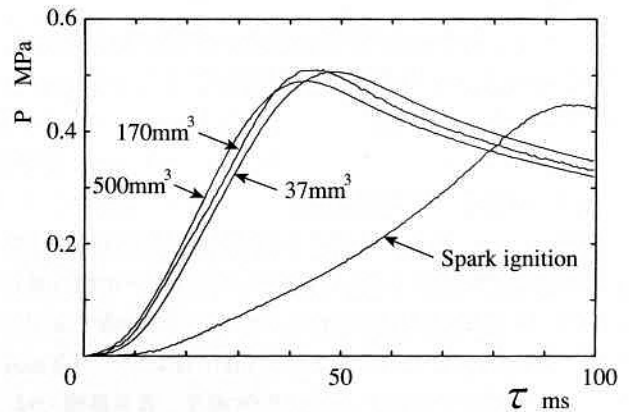
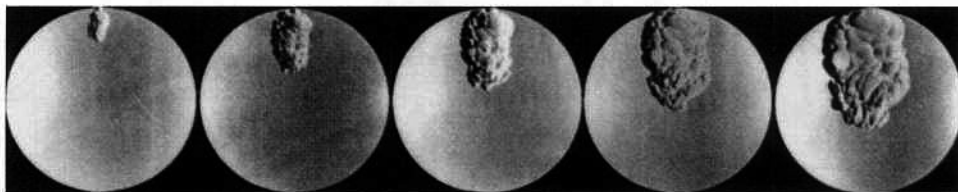


図-3 火花放電からの燃焼室内の圧力変化

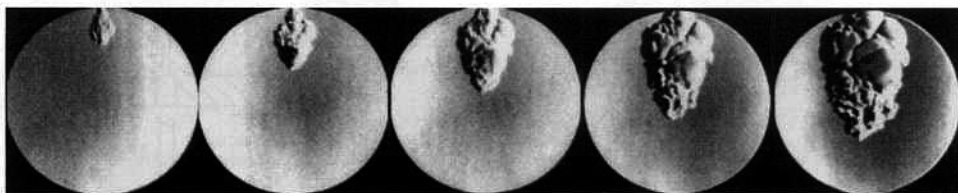


通常点火



キャビティ容積: 37mm<sup>3</sup>

オリフィス直径: 2.5mm



キャビティ容積: 170mm<sup>3</sup>

オリフィス直径: 2.5mm

図-4 通常点火とパルスジェット点火による火花放電後1, 3, 5, 7, 9msにおける燃焼の高速度シュリーレン写真

の一つで、火炎のような急激な密度変化を伴う現象の観測に用いられる<sup>9)</sup>。図-4より、通常点火では火炎がほぼ球状に層流で伝ばしているが、パルスジェット点火では、オリフィスから噴出したジェットにより、燃焼が乱流状態で進行しており、燃焼が促進されている様子が観察される。

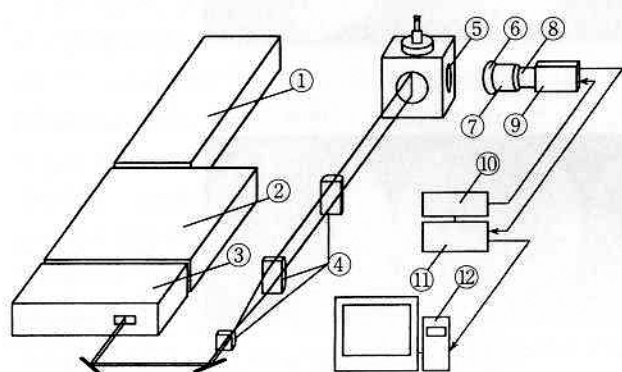
以上、パルスジェットは希薄混合気の点火と燃焼促進に有効であることが確認されたが、次にその点火機構を調べる目的で、ジェット内のラジカル（活性化学種）の計測を行う。

### 3.2 ラジカル蛍光計測によるパルスジェットの点火機構

ここでは、炭化水素系燃料の燃焼で重要な役割を果たしているOHラジカルの蛍光計測を行い<sup>10)~12)</sup>、パルスジェットの点火機構を調べる。

#### 3.2.1 平面レーザー誘起蛍光法

一般に、レーザーにより分子を電子励起準位の特定の振動・回転準位に遷移させると、低いエネルギー準位へ遷移する際に特定波長の蛍光を放つ。その蛍光を計測するのがレーザー誘起蛍光法（LIF）である。LIFではレーザーの励起波長の選定が重要であるが、ここでのOHラジカル計測では、 $X^2\Pi - A^2\Sigma$ 遷移における（1，0）バンド、波長283nmを吸収線とし、（0，0）バンド、波長310nm付近の蛍光を計測対象とした<sup>11)</sup>。またOHラジカルの2次元分布を得るために、レーザー光をシート状にして計測する、平面レーザー誘起蛍光法（PLIF）による計測を行った。実験装置の概略を図-5に示す。計測では、YAGレーザー①の第二高調波



- |                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| ① Nd:YAG laser           | ② Dye laser         |
| ③ UVX harmonic generator | ④ Cylindrical lens  |
| ⑤ Combustion chamber     | ⑥ Band-pass filter  |
| ⑦ U-V lens               | ⑧ Image intensifier |
| ⑨ CCD camera             | ⑩ Gate controller   |
| ⑪ Frame memory           | ⑫ Personal computer |

図-5 平面レーザー誘起蛍光計測における実験装置

(400mJ/pulse @532nm) を励起光源として色素レーザー②を共振させた。色素レーザーから発せられた可視光からU-Vパッケージ③を用いてU-V光（12mJ/pulse @283nm）を得た。ここでは、直径7mmのU-V光を、焦点距離70mm、500mm、1000mmの3枚のシリンドリカルレンズ④を用いて、幅60mm、厚さ約0.5mmの平行なシート状にして、オリフィスから噴出するジェットに入射した。なおレーザーシートはジェットの中心軸を含む面に一致させた。

OHラジカルの蛍光像は、入射レーザー光からの散乱を除去するためにバンドパスフィルタ（中心波長307.8nm、半値幅14.1nm、最大透過率20.5%）⑥と、ゲート機能付きイメージンシファイヤ⑧を介しCCDカメラ⑨に取り込んだ。CCDカメラからの信号は画像メモリ⑪に保存され、コンピュータ⑫で画像処理を行い解析した。なおイメージンシファイヤのゲート時間はゲートコントローラ⑩で制御し、コンピュータで点火時期との同期を取った。イメージンシファイヤのゲート時間は、OHラジカルの自発光の影響を除くため、100nsとした。

#### 3.2.2 燃焼容器

OHラジカルの蛍光計測に用いた定容燃焼容器を図-6に示す。PLIFによりラジカルの蛍光を計測するには、レーザー光入射用の窓とそれに垂直方向に蛍光観測用の窓が必要となる。よって、燃焼室は直径60mmの相貫体に近い形状で、向かい合う4面に直径60mmの観測窓を設けた。観測窓は、U-V光を透過させるために石英製とした。燃焼容器上部にはイグナイタ、下部には混合気の導入口が備わっている。なお燃焼室には当量比 $\phi = 0.8$ のメタン-空気の希薄混合

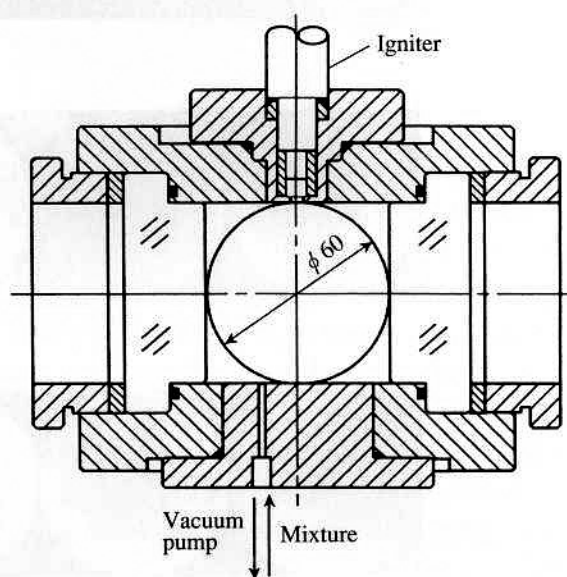


図-6 OHラジカルの蛍光計測に用いた定容燃焼容器

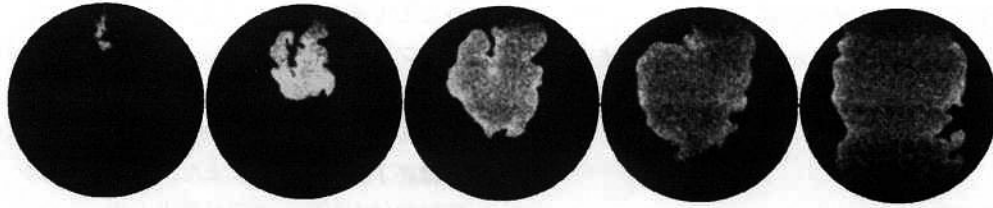


図-7 火花放電後1, 3, 5, 7, 10msにおけるOHラジカル蛍光像  
観測領域：直径60mm

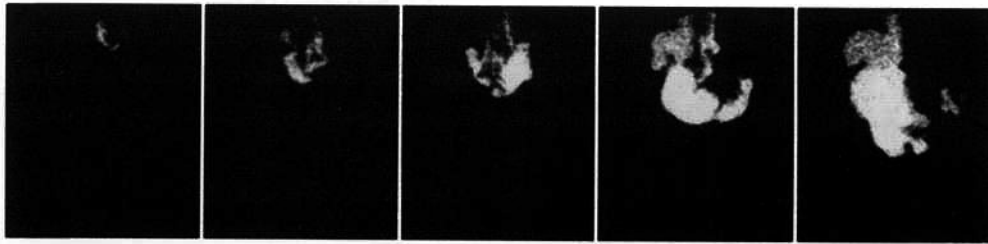


図-8 火花放電後0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5msにおけるOHラジカル蛍光像  
観測領域：25×30mm

気を充てんした。また、パルスジェットイグナイタは、キャビティ容積 $170\text{mm}^3$ 、オリフィス直径 $2.5\text{mm}$ のものを用い、キャビティへは、当量比 $\phi_c=1.5$ の過濃混合気を噴射した。

### 3.2.3 OHラジカルの蛍光像

図-7, 8にOHラジカルの蛍光像を示す。図-7は、火花放電後10msまでの観測窓全体からの像であり、図-8は、更に詳細に観測するために、火花放電後1.5msまでを拡大した像である。図-7より、火花放電後3msで、ジェット内部のほぼ全域において蛍光が強くなっていることがわかる。また火花放電後5msでは未燃域と既燃域の境界において蛍光が強く、火花放電後7ms以降では既燃域での蛍光が弱くなっている。図-9にOHラジカル蛍光面積の火花放電からの時間変化を、また図-10に、面積平均したOHラジカル蛍光強度の火花放電からの時間変化を示す。図-9の縦軸は、蛍光面積を観測領域の全面積で割って正規化してある。また比較のために、キャビティ内へ燃焼室内と同じ当量比 $\phi_c=0.8$ の希薄混合気を噴射した際のデータも載せている。図-9より、 $\phi_c=1.5$ の方が $\phi_c=0.8$ に比べOHラジカルの蛍光領域が広く、過濃混合気の使用により、より多くのOHラジカルが生成されていることがわかる。図-10より $\phi_c=1.5$ では火花放電後3msで平均発光強度が最も強く、その後時間の経過とともに弱くなっている。一方 $\phi_c=0.8$ では、火花放電後5ms付近で平均発光強度が最も強く、その後は弱くなり、火花放電後10msでは $\phi_c=1.5$ との差はほとんどなくなっている。これは、オリフィスから噴出したジェットが燃焼室内の希薄混合気を巻き込み、燃焼が進むが、 $\phi_c=1.5$ では火花放電後3ms付近、 $\phi_c=0.8$ では火花放電後5ms付近までジェットの活性度が持続した後、通常の火炎伝ばに推

移したためと考えられる。また、通常の火炎伝ばに推移するまでは、 $\phi_c=1.5$ の方が $\phi_c=0.8$ に比べ平均発光強度が強いことがわかる。

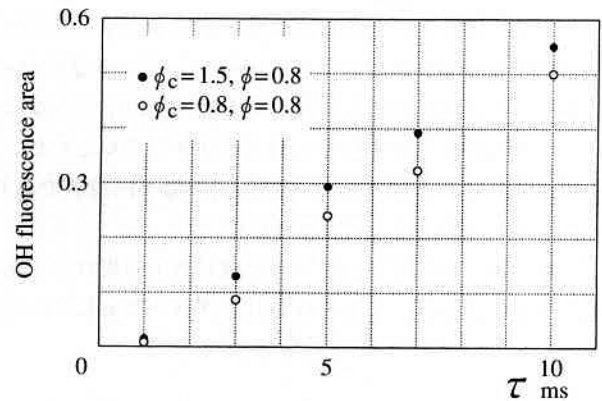


図-9 火花放電からのOHラジカル蛍光面積の変化

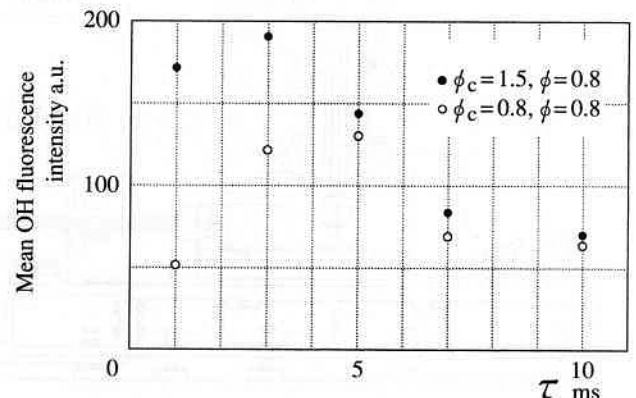


図-10 火花放電からの面積平均OHラジカル蛍光強度の変化

### 3.3 高温・高圧下における燃焼実験

ここでは、エンジン内の燃焼に近い状態、すなわち、混合気をピストンで圧縮して、高温・高圧にした燃焼実験<sup>13)</sup>~<sup>15)</sup>について述べる。

#### 3.3.1 急速圧縮装置

実際のエンジンの燃焼場にできるだけ近く、かつ各種因子の影響を基礎的に把握するための実験装置として急速圧縮装置がある。急速圧縮装置とは文字どおり、ピストンで混合気を急速に圧縮し、圧縮終了後はピストンをその位置に固定し、燃焼実験を行うものである。また、燃焼することにより更に燃焼圧がピストンに働くので、それらに打ち勝つだけのピストン固定力が必要となる。ここでは、カムを利用したコンパクトな急速圧縮装置を試作した<sup>16)</sup>。装置本体は図-11の右から、蓄圧部、カム駆動ピストン部、カム部、圧縮ピストン部、燃焼室より成る。また混合気を作り、装置に供給するための予混合容器を備えている。

急速圧縮装置の動作原理は次の通りである。空気ポンペ⑬に圧縮空気を蓄えておき、隔膜⑭をDCソレノイド⑯で駆動される針⑮によって破碎することにより噴出した圧縮空気、カムに連結した直径160mmのカム駆動ピストン⑪を駆動する。カム⑦はリニアローラウェイ⑧上に乗っており、カム駆動ピストンよりロッド⑨を介して駆動される。圧縮ピストン③は直径115mmで、ローラフォロア⑥およびロッド④を介して、カム曲線に沿って上方へ押し上げられ圧縮を行う。カム部の長さは220mmで、リフト量は95mmであり、カム曲線は最大躍動と最大加速度が小さくなるように、滑らかな特性を持つ5次のポリノミアルとした。また燃焼室①は、直径70mm、幅23mmの偏平円筒状であり、イグナイタは燃焼室上部に取り付けた。

圧縮比は、ローラフォロアと圧縮ピストン用ロッド結合部のネジによって、もしくはシリンダベース部にシムを挟

むことで調整でき、ここでは10.6とした。また隔膜には、セロファン(厚さ $35\mu\text{m}$ )を3枚重ねて使用し、空気ポンベ内の圧力は、 $0.37\text{MPa}$ (ゲージ圧)とした。装置の動作タイミングはコンピュータで制御し、点火のタイミングは圧縮終了直後とした。また、燃料はメタン-空気混合気で、圧縮前は大気圧・室温状態とした。

図-12に市販のスパークプラグを使用した場合の隔膜破碎パルス発生時からの燃焼室内の圧力変化(ゲージ圧)を示す。燃料は、当量比 $\phi=0.65$ のメタン-空気の希薄混合気である。隔膜破碎用のパルス発生から、針が駆動して隔膜が破碎するまでに、数十ミリ秒を要するため、約60ms後から圧縮が始まり、その後約35msで圧縮が終了し、その直後に点火、燃焼していることがわかる。

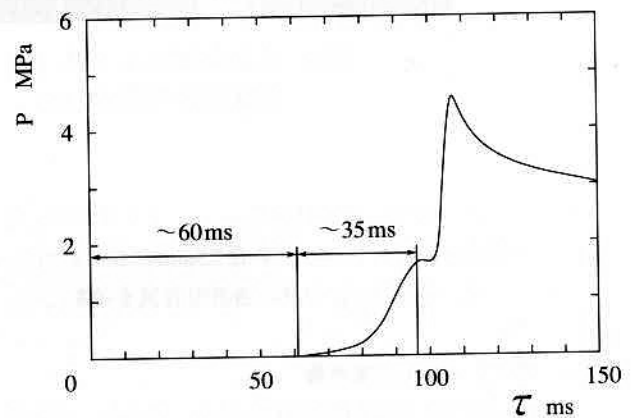


図-12 隔膜破碎パルス発生時からの燃焼室内の圧力変化

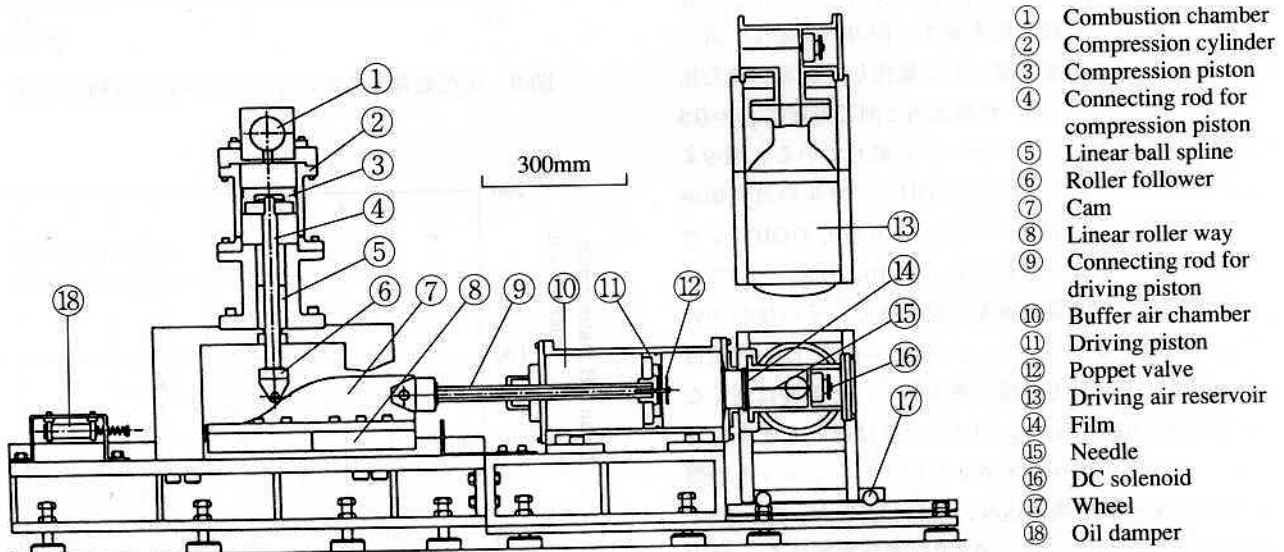


図-11 カムを利用した急速圧縮装置

### 3.3.2 パルスジェットイグナイタ

実験に用いたパルスジェットイグナイタの概要とキャビティ部の詳細を図-13に示す。これは、大気圧・室温での実験で用いたもの(図-2)を、よりコンパクトにして、且つキャビティをセラミックス製としたものである。キャビティ容積を500と250mm<sup>3</sup>、オリフィス直径を4.0と2.5mmとした。また高圧下での火花放電を可能にするため、接地電極は図-13に示すように、直径1.0mmの針状電極をキャビティ側壁に設け、火花放電間隙を1.0mmとした。

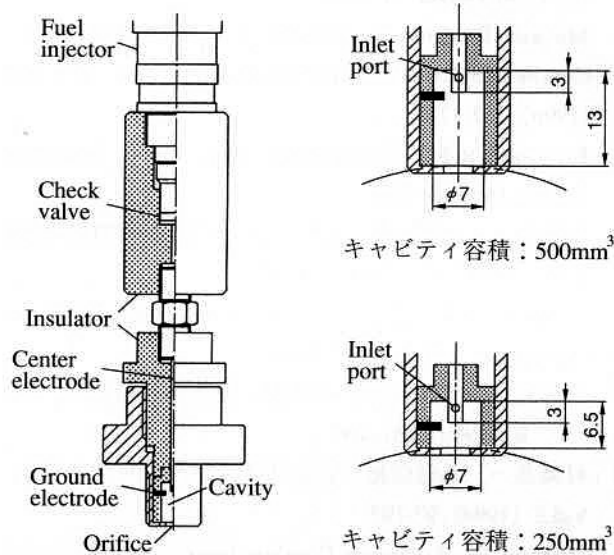


図-13 高温・高圧用のパルスジェットイグナイタとキャビティ部詳細

### 3.3.3 燃焼圧力とシュリーレン写真

まず希薄可燃限界について、パルスジェット点火と市販のスパークプラグによる点火(通常点火)との比較を行った。希薄可燃限界は、混合気が点火して、その後燃焼が持

続的に起こる、一番希薄な混合気の濃度を表す。通常点火では、当量比 $\phi=0.62$ 付近から点火、燃焼しない確率が高くなり $\phi=0.60$ では点火しなくなった。一方パルスジェット点火は、 $\phi=0.60$ では確実に点火、燃焼し、その圧力波形にも大きなばらつきは見られなかった。さらに $\phi=0.57$ 付近まで当量比を下げると、点火の確率が50%程度まで落ち、圧力波形のばらつきも大きくなった。そして $\phi=0.55$ 付近でほとんど点火しなくなった。このように、高温・高圧場において、パルスジェット点火による希薄可燃域拡大の効果があることが確認された。

次にパルスジェット点火と通常点火が、ともに確実に点火できる当量比 $\phi=0.65$ において、両者の比較を行った。パルスジェット点火は、キャビティへの噴射圧を2.06MPa(ゲージ圧)、噴射期間を5msとし、火花放電は圧縮終了直後に行った。図-14に火花放電からの圧力変化(ゲージ圧)を示す。どの条件においても点火後、若干圧力が減少している。これは圧縮で燃焼室内の混合気の温度が上がっているため、燃焼室壁面への熱損失が大きく、その量が燃焼による発熱を上回るためである。図-14よりオリフィス直径

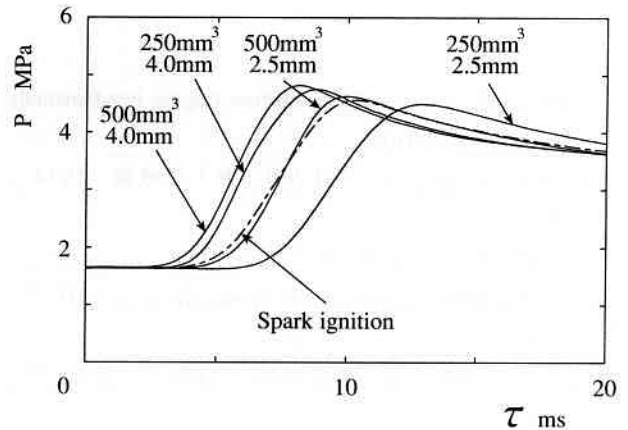
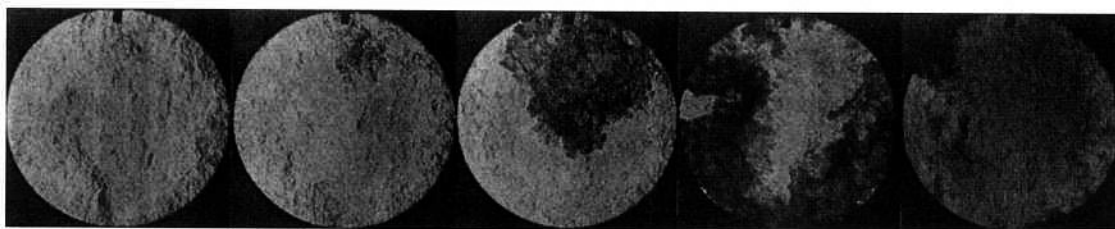
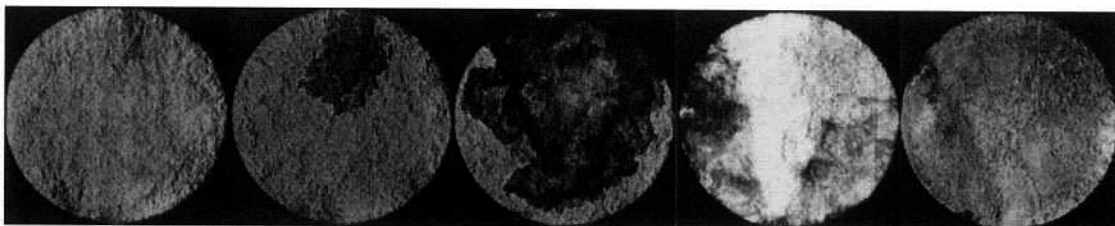


図-14 火花放電からの燃焼室内の圧力変化



通常点火



キャビティ容積：500mm<sup>3</sup>

オリフィス直径：4.0mm

図-15 通常点火とパルスジェット点火による燃焼の高速度シュリーレン写真  
コマ間隔：2.0ms

が4.0mmの場合、パルスジェット点火は通常点火より圧力の立上りが早く、かつ高い圧力上昇率を示していることがわかる。しかし、オリフィス直径が2.5mmになると圧力の立上りが遅れる結果となった。これは、オリフィス部での熱損失が大きかったためと考えられる。またその影響の度合いもキャビティ容積の大きさに異なることなどから、キャビティ容積とオリフィス直径の選択の重要性が明らかになった。また図-15に当量比 $\phi=0.65$ での、通常点火とパルスジェット点火の高速度シェリーレン写真を示す。ここでキャビティ容積は $500\text{mm}^3$ 、オリフィス直径は4.0mmである。図-15より、パルスジェット点火による初期燃焼領域の拡大効果と燃焼促進効果が確認できる。

#### 4 結言

リーンバーンにおけるパルスジェットの点火および燃焼の促進効果を定容燃焼容器、並びに急速圧縮装置を利用した燃焼実験により明らかにした。今後平面レーザ誘起蛍光法におけるレーザの波長を変えることによりCHなど、他のラジカルの挙動を調べ、さらに詳細な点火機構を明らかにしていきたい。

#### 参考文献

- (1) Heywood, J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals (1988), McGraw-Hill.
- (2) 森康夫, 一色尚次, 河田治男, 熱力学概論 (1974), 養賢堂.
- (3) Oppenheim, A.K., Beltramo, J., Faris, D.W., Maxson, J.A., Hom, K., Stewart, H.E., SAE Trans., 98, Sec.3 (1990), 175-182.
- (4) 村瀬英一, 小野信輔, 花田邦彦, 仲原彰治, 遠藤浩之, Oppenheim, A.K., 機械学会論文集, 58-546, B (1992), 561-567.
- (5) 村瀬英一, 小野信輔, 花田邦彦, 多良文宏, Oppenheim, A.K., 機械学会論文集, 58-556, B (1992), 3795-3801.
- (6) 村瀬英一, 小野信輔, 花田邦彦, 松本正和, Oppenheim, A.K., 機械学会論文集, 59-568, B (1993), 3994-4000.
- (7) Murase, E., Ono, S., Hanada, K., Oppenheim, A.K., SAE Paper, No.942048 (1994).
- (8) Murase, E., Ono, S., Hanada, K., Oppenheim, A.K., Combustion Science and Technology Vols.113-114 (1996), 167-177
- (9) Fristrom, R.M., Westenberg, A.A., Flame Structure (1965), McGraw-Hill.
- (10) 村瀬英一, 小野信輔, 花田邦彦, 尹正虎, 機械学会論文集, 64-617, B (1998), 312-319.
- (11) Hanson, R.K., 21th, International Symposium on Combustion (1986), 1677-1691.
- (12) 村瀬英一, 花田邦彦, 尹正虎, 機械学会論文集, 65-630, B (1999), 451-456.
- (13) 村瀬英一, 小野信輔, 花田邦彦, 燃焼の科学と技術, Vol.2 (1994), 97-103.
- (14) Murase, E., Archivum Combustionis, Vol.15, No.3-4 (1995), 173-185.
- (15) 村瀬英一, 小野信輔, 花田邦彦, 尹正虎, Oppenheim, A.K., 機械学会論文集, 62-594, B (1996), 801-807.
- (16) 村瀬英一, 小野信輔, 花田邦彦, 内燃機関, Vol.31, No.395 (1992), 9-13.

