超希薄予混合圧縮自着火機関試案*

古谷正広^{*1}, 川島一仁^{*2}, 太田安彦^{*1}

A New Concept of Ultralean Premixed Compression-Ignition Engine

Masahiro FURUTANI, Kazuhito KAWASHIMA and Yasuhiko OHTA

A novel concept is proposed to realize "Ultralean Premixed Compression-Ignition Operation". Compression ignition of lean mixtures has allowed us to overcome the lean limit of flame propagation. Operating mixture strength can be decreased to an equivalence ratio of less than 0.2. Premixed fuel and air, introduced into a cylinder and compressed by piston upstroke motion, will ignite very near the top dead center. A combination of two-component fuel, namely: a low octane liquid fuel injected into a very homogeneous high octane gaseous fuel/ air mixture just before the intake valve, enabled us to control the self ignition timing and pressure rise rate at the onset of hot ignition. For an operating condition of engine speed and load expected in practice an optimal combination of fuel amounts can be found, i. e. the optimal octane value of the total charge and the total amount of both fuels should be selected separately for the best performance. Pure propane and *n* heptane are utilized to demonstrate the feasibility of this concept. Lower fuel consumption and lower CO and NO emissions are also accomplished compared to those of spark ignition engines.

Key Words: Internal Combustion Engine, Ignition, Combustion Products, Lean Burn Engine, New Engine Concept, NO Emission

1. はじめに

現在リーンバーン火花点火機関が実用段階に達している。しかしさらなる混合気の希薄化の要求にこたえようとすると、現在の電気火花放電による点火にも、火炎伝播そのものにも不安が生じる。火花点火機関で希薄限界を大きく延ばすことは困難だろう。ディーゼル機関はもともと希薄燃焼であるが、排気の清浄性の確保を迫られている。この排気の改善がむずかしい原因の一つはシリンダチャージが極端な不均一性をもつということである。ヒューミゲーションなどによって排気性状を改善する⁽¹⁾ 試みもなされているが、いっそこれを極限まで押し進めて全燃料を予混合で機関に供給することが考えられる。そうすると予混合圧縮自着火機関が浮上する。新たにこの方式で運転できる機関をここで提案する。量論近傍の混合気によって生じる自着火熱炎は急激な圧力上昇を与え、ノッキングが起るから、ここで提案する方式ではそれ避けるために必然的に希薄混合気を用いることになり、希薄運転

という本来の意図に沿っている。著者らは既報⁽²⁾で、*n*-ブタンについての圧縮自着火炎を生じさせ得る希薄限界当量比を報告したが、その希薄限界当量比は酸化剤が空気であるときには当量比0.3であり、Ar/O₂擬似空気の場合では当量比0.1と超希薄であった。火炎が伝ばできない希薄な混合気であっても、圧縮自着火であれば十分な酸化反応と熱発生が得られるということである。自着火希薄限界付近の当量比で生じた熱炎の圧力上昇は緩慢で、あたかも火炎伝播によるかのようなものである。このようなことを背景として、火炎伝播が不可能な希薄な当量比の予混合気を圧縮自着火させて作動させる超希薄予混合圧縮自着火機関を考えた。どういふところにこの機関の用途があるのかは現段階では考えていない。機関としての極限はどういうところかを知ろうとしている。

運転条件が変化してもつねに適当なクランク角で自着火を発生させなければ機関として成立しないから、上死点近くで熱炎を発生させたり、許容できる小さな圧力上昇率に抑えるなど、着火を人為的に制御できる工夫がなければならない。

ここではまず予混合圧縮自着火を往復ピストン式機関で起こしてその基本的な挙動を調べ、得られた知見をもとに、リーンバーン火花点火機関の運転域をはる

* 原稿受付 1995年6月1日。

^{*1} 正員、名古屋工業大学工学部 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。^{*2} 名古屋工業大学大学院。

かに超える希薄域で予混合圧縮自着火による内燃機関を成立させるための一手法を提案する。

2. 実験装置および方法

装置の概要を図1に示す。もとの機関は直接噴射式単シリンダ立形空冷四サイクルディーゼル機関(ヤンマーディーゼル:L 60 ADDP, ボア×ストローク: $\phi 75\text{ mm} \times 62\text{ mm}$, 排気量: 273 cm^3)である。燃焼室をパンケーキ形に変更し、圧縮比を14.3(実圧縮比:12.4)に設定した。またシリンダヘッドには火花点火運転が可能のように点火プラグが、シリンダ内圧力と火花発光を採取できるように指圧計(共和電業:PE-200 KWS)とパイレックス製の透過窓が取り付けられている。 n -ヘプタンとiso-オクタンを前もって混ぜ合わせた標準燃料だけをまず始めに吸気管内に電子式燃料噴射弁(京浜工業:06164-P36-00)で噴射して、この機関での自着火の挙動を調べる。超希薄予混合圧縮自着火機関を実現しようとするときには気体のプロパン(純度99%)を吸気管の最上流部から供給し、液体の n -ヘプタンを燃料噴射弁から吸気弁のやや上流に噴射した。用いられた n -ヘプタンとiso-オクタンは薬局方試薬である。液体燃料は吸排気上死点後 25° において定時噴射され、プロパンは連続して吸入される。本来オクタン価はiso-オクタンと n -ヘプタンの体積割合で定義されている。ここでは気体燃料と液体燃料を同時に使用するため、チャージ全体のオクタン価を便宜的にそれぞれの供給燃料のモル比率換算で表示する。プロパンと n -ヘプタンが供給される場合にはモル比換算オクタン価表示に併せて、投入される全燃料に占める

n -ヘプタンのモル濃度を並記する。機関回転速度は600 rpmとした。空気のみを吸入したときの体積効率 η_v は73%である。燃料を加えたときに吸入空気量がやや低下するが、これを補うということはずせず、空気流量を測るにとどめた。機関の始動や出力の計測は交流式電気動力計(特殊電気製造:UAOU-D-260/RAKVH-23)によって行われた。排気ガスに含まれる一酸化炭素と全量未燃炭化水素の濃度はCO-HCアナライザ(堀場製作所:MEXA-324 G)で、一酸化窒素濃度は自動車排気ガス測定装置(堀場製作所:MEXA-C 1)で測定された。黒煙濃度にはボッシュ式スモーク濃度計(ディーゼル機器:DSM-10 B)が用いられた。自着火の際に低温度炎が発生しているかどうか知るために、冷炎に対する波長395 nm(HCHO 相当)を透過する干渉フィルタ(光伸光学)と光電子増倍管(浜松ホトニクス:R 5600-03 形:分光感度波長域185~650 nm)を用いて発光の履歴を得た。熱炎の同定は赤色ガラスフィルタ(東芝化成:R-62:透過波長域590 nm~)と上述のR 5600 光電子増倍管の組合せにより観測される590~650 nmの赤色光を検出することによった。ここでは冷炎と青炎とを分離して同定するという事はしていない。実験データはシリンダヘッド温度が 80°C のときに採取された。

3. 実験結果および考察

3.1 標準燃料による予混合圧縮自着火の挙動

比較の基準を作るために、上述の機関を用い、プロパンを吸入してまず火花点火運転を行った。設定当量比は0.6, 0.7, 0.9, 1.1である。点火時期はそれぞれの当量比でのMBT タイミングである。燃焼変動率を調べてはいないが、当量比0.6付近で安定に運転することができなくなった。図2に当量比0.7で火花点火運転したときの圧力履歴と、それに加えて、空気のみを

Fig. 1 Schematic of Experimental Apparatus

Fig. 2 Spark-ignited Operation of a Lean Propane Fuel ($\phi=0.7$)

圧縮したときの圧力履歴を併せて示す。このときの点火時期は 30° bTDC である。圧力履歴から良好な燃焼が得られていると知られる。

予混合ピストン圧縮自着火現象は混合気の温度、圧力、燃料のオクタン価、混合気の当量比などによって支配される。上述の火花点火実験に続いて、燃料のオクタン価と混合気の当量比を変え、同じ仕様で予混合圧縮自着火を生じさせ、それぞれの条件下での圧力と発光履歴を採取して、どういう自着火になるかをあらかじめ知っておく。

まずオクタン価 80 の標準燃料で当量比を 0.5, 0.7,

Fig. 3 Autoignitions of 80 ON-Standard Fuel ($\phi=0.5, 0.7, 1.1, 1.5, 1.9$)

Fig. 4 Autoignition Closer View of 80 ON-Standard Fuel Mixture ($\phi=0.7$)

1.1, 1.5, 1.9, 2.3 に設定して予混合圧縮自着火させた。図 3 に当量比 0.5, 0.7, 1.1, 1.5, 1.9 での圧力を示す。当量比 2.3 では熱炎は明確には観測されなかった。図 4 は図 3 中の当量比 0.7 の圧力と青色光履歴を上死点近傍で拡大したものである。図 4 には発光は下に振るよう描かれている。比較のため、空気のみを圧縮したときの圧力履歴を併せて描いた。青色光は 14° bTDC 付近で出始め、そのとき空気のみを圧縮した場合よりも圧力が上がる。その後圧力、発光ともにいったん縮退する。これら圧力と青色光の履歴に現れる挙動、特に縮退の挙動は圧縮自着火冷炎に特徴的なものである。その後 4° bTDC 付近から発光は再び強くなり、それに呼応して圧力は大きく上昇する。これらの着火前での青色光と圧力の履歴は、それが負の温度係数域で発現する低温度炎自着火過程の挙動であることを示している。オクタン価 80 の場合に最も早く熱炎が発生する当量比は 1.1 で、それより希薄になっても過濃になっても熱炎の発生は遅れる。

次に、オクタン価 0 の標準燃料、*n*-ヘプタンを圧縮

Fig. 5 Autoignitions of *n*-Heptane, 0 ON-Standard Fuel ($\phi=0.5, 0.7, 1.1, 1.5, 1.9, 2.3$)

自着火させた。設定した当量比はオクタン価 80 のときと同じく、0.5, 0.7, 1.1, 1.5, 1.9, 2.3 である。圧力と青色光の履歴を図 5 に示す。ここで設定した当量比すべてで熱炎が発生している。オクタン価が低くなれば熱炎が発生する当量比の範囲が広がることがわかる。熱炎発生時期と当量比との関係はオクタン価 80 での傾向とほぼ同じである。

図 6 は図 3 と図 5 でのそれぞれの当量比における熱炎の圧力上昇率を示す。ここでの圧力上昇率は熱炎による圧力上昇分をその上昇期間で割ることによって求められた。図 4 のように圧力履歴が振動している場合には、熱炎以降の圧力履歴を外挿することによって圧力上昇率が評価されている。当量比が 0.5 から 1.5 の範囲であれば、当量比が高くなるに従って圧力上昇率は大きくなっていき、かつオクタン価が違っても当量比が同じであればほぼ同じ値を取る。

さらに当量比 0.7, オクタン価 40 の標準燃料を圧縮自着火させた。このときの熱炎による圧力上昇率は 5.04 MPa/°CA でオクタン価が 0, 80 での値に近い。オクタン価が大きくなれば着火遅れが長くなるが、当

量比が同じであれば熱炎での圧力上昇率はほぼ同じになることが確認され、燃料のもつ化学エネルギーが十分に放出されていることをうかがわせる。

図 7 はオクタン価 0 と 80 の標準燃料での図示平均有効圧力である。どちらのオクタン価でも当量比 1.1 で最低値を取り、希薄もしくは過濃になるに従って図示平均有効圧力は大きくなる。オクタン価零で当量比 1.1 で得られる熱炎の圧力上昇率は当量比 0.5 のときの約 2 倍であるが、図示平均有効圧力は逆に当量比 0.5 の約半分になる。これは当量比 1.1 での熱炎の発生が上死点よりもずっと前にあるためである。自着火が上死点近くで生じないと機関として実用にならないことがわかる。

このように得られた圧縮自着火の挙動は急速圧縮機で得られるものと同じ性質を有し、一般性のあるものと認められる。量論ないしはそれよりやや濃い当量比では熱炎の圧力上昇が激しく、ノッキング状の音も出ていて機関本体に対しても好ましくないことが確認される。

より希薄な混合気で自着火運転することを考えながら図 5 のオクタン価 0, 当量比 0.5 での圧力履歴をみると、さらに希薄な混合気でも熱炎が得られそうである。熱炎は得られても軸出力が得られなければ機関としては成り立たない。オクタン価 0, 40, 80 のそれぞれで軸出力が 0 になる当量比を探した。オクタン価 0 の場合には当量比 0.2 付近で、オクタン価 40 では当量比 0.3 付近で軸出力はほぼ 0 になった。オクタン価 80 では当量比 0.4 付近で軸出力を安定に計測することができなくなった。この当量比近傍で軸出力が 0 になると思われる。図 8 にオクタン価 0 での圧力と青色光の履歴を示す。熱炎の圧力上昇は緩やかになっているものの圧縮上死点前に発現してしまっている。軸出力が 0 であっても熱炎が発生していないのではなくその発

Fig. 6 Pressure Rise Rate of Standard Fuel Mixture Autoignition

Fig. 7 Indicated Mean Effective Pressure obtained in Standard Fuel Mixture Autoignition

Fig. 8 Lean Limit Autoignition Behavior of *n*-Heptane Mixture ($\phi = 0.2$)

生時期が軸出力を取り出すには不適当であるにすぎない。この当量比であっても、熱炎の発生を遅らせることができれば軸出力を得ることができる。図6の当量比と熱炎での圧力上昇率との関係を用いれば出力を制御することが可能となる。

3・2 気体プロパン/液体 *n*-ヘプタンによる予混合圧縮自着火機関 オクタン価と当量比とを独立に調節することによって、熱炎の発生を制御することを試みた。機関に対するチャージのオクタン価はオクタン価の高い燃料と低い燃料との投入比率によって変えて、チャージの当量比は燃料の全投入量によって調節する。ここではオクタン価の高い燃料としてプロパンが、オクタン価の低い燃料として *n*-ヘプタンがあげられている。プロパン単独のオクタン価は112 RONである。ここで気体燃料であるプロパンを用いたのは、超希薄予混合圧縮自着火の主体となる燃料を定義どおりの予混合とし、吸入する希薄混合気濃度の均一性を重視したからである。

図9は当量比を0.21とし、オクタン価を20(全燃料中の *n*-ヘプタンのモル濃度を82.3%)としたときの青色光と圧力の履歴である。熱炎の圧力上昇は緩慢であるが、圧縮上死点付近で発生している。ここでの正味平均有効圧力は0.11 MPaとなった。

内燃機関として成り立つためには、広い出力の範囲で運転できるのでなければならない。まず熱炎の発生時期は圧縮上死点近傍から移動させるわけにはいかないから、これを固定しその状態で出力が出るようにする。つまり燃料の量を増やす。図6で示したように熱炎の圧力上昇率を高くするためには混合気の当量比を上げればよい。当量比が0.7よりも希薄な場合には当量比を上げれば熱炎の発生が早まるのであるから、当量比を上げると同時にオクタン価を上げなければ熱炎の発生時期を圧縮上死点近くにする事ができない。

Fig. 9 Premixed Compression Ignition Operation using Gaseous Propane and Liquid *n*-Heptane

図10にそのようにしたときの圧力履歴を示す。図10中のBはオクタン価43、当量比0.28(全燃料中の *n*-ヘプタンのモル濃度を61.5%)に、図10中のCはオクタン価50、当量比0.34(全燃料中の *n*-ヘプタンのモル濃度を55.2%)に設定している。図10中のAは図9で示したものと同じである。冷炎はいずれの場合でもほぼ12° bTDCで発生している。正味平均有効圧力は図10中のBは0.17 MPa、Cでは0.21 MPaとなり、順次軸出力を向上させることができた。このとき出力の調整は熱炎発生時の圧力上昇率を変えるということと同義となる。

図2で示したように、熱発生が圧縮上死点より前に始まっても軸出力は得られるのであるが、熱発生・圧力上昇がより急激となって好ましくない。また等容度も下がる。図3で示したように、オクタン価80、当量比0.5のときには熱炎が圧縮上死点より前で発生する。そこで、これ以下のオクタン価と当量比の範囲で図示平均有効圧力と当量比との関係をみたものが図11であり、プロットされている値はその当量比での最大図示平均有効圧力である。この値はノッキング状の圧力上昇が生じない範囲のものである。当量比を上げ

Fig. 10 Pressure Rise Rates depending on Power Output

Fig. 11 Operating Range and Power Output of Premixed Compression Ignition Operation

Fig. 12 Fuel Consumption of Premixed Compression Ignition Operation

ると図示平均有効圧力は高くなっていく。標準燃料の圧縮自着火では着火時期が制御されていなかったが、それとは異なり、このように着火時期が適当なところに制御されたものでは図示平均有効圧力は火花点火運転時と同じように妥当なものとなっている。

図 11 中の点 A であるオクタン価 71, 当量比 0.42 での正味平均有効圧力 0.33 MPa (図示平均有効圧力 0.55 MPa) を 4/4 負荷とし、以下 3/4, 2/4, 1/4, 0/4 負荷になるようにオクタン価と当量比を調整してみた。この実験では軸出力そのものが本質的な意味をもっているわけではないので図 12 にはそれぞれの図示平均有効圧力と図示燃料消費率の関係を示した。図 12 には火花点火運転したときのものも併せて描いてある。同じ図示平均有効圧力を得るのであれば、圧縮自着火運転を行ったほうが明らかに燃料消費率は少ないことがわかる。このとき同時に排気中の黒煙、一酸化炭素、一酸化窒素、炭化水素濃度を計測した。図 13 は一酸化炭素、一酸化窒素、炭化水素濃度の図示平均有効圧力に対するプロットである。炭化水素濃度はメタン換算で表示されている。比較のために火花点火運転を行ったときの結果も示してある。一酸化炭素と一酸化窒素の濃度は火花点火運転を行ったときよりも低い。特に、一酸化窒素濃度は数けたのオーダーで低い。炭化水素濃度は当量比が高くなるに従って高くなってゆく。燃焼が不完全で未燃炭化水素の濃度が高くなるのであれば一酸化炭素濃度も未燃炭化水素と同じ傾向にならなければならないが、逆に少なくなってゆく。ここで提案する方式では自着火が生じたところでは燃焼はほぼ完全であり、局所的に自着火に至らなかった部分の燃料が未燃炭化水素として出ているようにみえる。未燃炭化水素濃度については今後の課題とするが、ここでの燃焼室の形状、圧縮比、燃料の組合せなどに改善の余地があろう。プロパン/*n*-ヘプタンでの圧縮

Fig. 13 Exhaust emissions of Premixed Compression Ignition Operation

自着火運転時の黒煙濃度はここで設定したどの条件においてもほぼ 0 であった。

ここでは高オクタン価気体燃料にプロパンを用いているが、メタンや天然ガスでもこの方式で運転が可能になると思われる。低オクタン価の液体燃料としてここでは純物質を用いているけれども、石油系の多成分のものでも運転は可能であろう。これらの点については改めて検討したい。また 600 rpm 以外の回転速度についても問題なく運転できる。

この方式で現実の機関を構成するとき、あるサイクルの着火時期の情報をもとに次のサイクルでの上死点近傍着火を目指して制御がなされるということになって、少なくとも 1 サイクルの制御遅れが出るのが欠点となる。負荷変動の大きな用途には向かないかもしれない。

上死点近傍での着火をそのサイクルで実現可能な超希薄予混合圧縮自着火機関を成立させるまた別の手法を現在考えている。

4. おわりに

希薄な予混合気を吸気管に供給し、圧縮自着火によって着火させて作動させる超希薄予混合圧縮自着火機関を提案した。排気ガスの清浄性を確保し、混合比の希薄性を維持し、熱効率も既存のものより高い機関を実現するための一試案である。将来の内燃機関を考えるうえで機関として成立する希薄限界がどの程度であ

るかを、実機に近いもので確かめておくという意味もある。

チャージの総当量比とチャージの全体的なオクタン価を独立に変化させることにより、希薄域での予混合圧縮自着火を制御して、当量比 0.2 程度まで軸出力を得ることができる超希薄機関の一例を示した。同じ出力を得るには予混合圧縮自着火運転を行ったほうが火花点火運転を行ったときよりも燃料消費率は低く、排気ガスの一酸化炭素、一酸化窒素、黒煙の濃度はすべて低い。ただし未燃炭化水素の濃度は火花点火運転を行った場合よりも高くなった。

もともとは、高オクタン価の気体燃料を発熱の主体となる燃料として十分均一な希薄予混合気の形で吸入し、低オクタン価の液体燃料を微粒化してそれに混ぜて、シリンダ内で圧縮自着火による多点点火をねらった。つまり、主体となる気体燃料より少量の低オクタン価液体燃料を供給して、その量を調節することで着火時期の制御をしようとした。つまり発熱の主体は予混合吸入気体燃料とし、制御手段として少量の低オクタン液体燃料を使うことを考えていた。しかしながら現実には両燃料はともに発熱の主体となると同時に着

火時期を決めるファクタとして使わなければならないことになった。しかし、それはここで運転可能な機関出力を広く取ったためであって、圧縮比を上げるなどして、吸入される高オクタン価気体希薄予混合気が単独でも着火しやすい条件を与えれば、低オクタン液体燃料の量は減って、もともとの構想に近づく。ここではこの試案での一運転例を示したにすぎない。当量比とオクタン価という意味は均質吸入高オクタン気体燃料/ポート噴射低オクタン液体燃料の組合せとほぼ同じ意味である。ただし、シリンダ内における着火現象としては「均一気体予混合気+微粒化液体燃料」と、「気・液もしくは液・液二燃料完全予混合気」とでは着火の様相は同じではないようである。そうした着火の詳細については改めて報告したい。

文 献

- (1) Alperstein, M., ほか 2 名, Fumigation Kills Smoke — Improves Diesel Performance, *SAE Trans.*, **66**(1958), 574-595.
- (2) 福田聡史・西村佳晃・日比野光宏・古谷正広・太田安彦, ピストン圧縮自着火の希薄限界と不活性ガス, 機講論, No. 943-1(1994), 229-231.