火花点火ガス機関の希薄燃焼*

池上 詢^{*1}, 塩路昌宏^{*1}, 朱 啓 明^{*2}
佐藤 謙一郎^{*3}, 高柳文成^{*4}Lean-Burning Characteristics
of a Gas-Fueled Spark-Ignition EngineMakoto IKEGAMI, Masahiro SHIOJI, Qi-Ming ZHU
Ken'ichiro SATO and Fumishige TAKAYANAGI

The lean-burning characteristics of a spark-ignition engine homogeneously fueled with natural gas and propane are studied. It was shown that a higher swirl in a deep-bowl chamber significantly suppresses the cycle-to-cycle variation in peak pressure. There is a "window" of the equivalence ratio in which a very low concentration of oxides of nitrogen and an allowable degree of variation can be achieved over a range of loads, provided the ignition timing is correctly regulated with the operating conditions. Based on the test results, it is possible to establish a lean-burning gas engine without the supplementary treatments of a three-way catalyst or exhaust gas recirculation as an alternative to the diesel engine.

Key Words: Internal Combustion Engine, Gas Fuel, Premixed Combustion, Lean Combustion, Pressure Variation, NOx Concentration, Thermal Efficiency

1. まえがき

天然ガスおよび液化石油ガスを往復式内燃機関の燃料として用いる際には、自発着火性が低い点ため点火補助を要する反面、可燃範囲が広く希薄燃焼を実施できる。このため、これらを燃料とする火花点火ガス機関においては、高圧縮比化および希薄燃焼による熱効率の向上を期待できる。窒素酸化物 NOxの排出濃度を低減する立場からみると、希薄燃焼による低い火炎温度のためその生成量を大幅に抑制する方式も見込みがあるため、量論混合比で運転して NOxを三元触媒によって分解する方式に頼らないでよい可能性がある。その立場から、コゼネ用機関として希薄燃焼天然ガス機関がすでに実用化されており⁽¹⁾⁽²⁾、さらに微粒子の発生がないことから大形車両用ディーゼル機関の代替としても注目されている⁽³⁾。

このような希薄燃焼を実施するさいに問題となるのは燃焼変動であって、これには予混合気の一様性、乱れ、スワールが関係する。たとえば、副室を用いてプラグ近傍の点火を確保すると、平均の空気過剰率が2.0を越える条件でも安定して燃焼することが示されている⁽¹⁾。しかし、この場合副室内では燃焼初期の高温のため高い濃度の NOxが生じる可能性があつて、必ずしも NOx低減に有効とはいえない。

そこで本研究では、均一希薄混合気の燃焼による火炎温度低下により NOx濃度を極限まで減少させたい、燃焼限界と燃焼変動をどの程度に抑えることが可能であり、かつその状態で NOxをどこまで低減しうるかを明らかにする。この目的で、スワール強さ、点火時期、圧縮比、吸気絞りなどの影響および熱効率、HC生成量について検討する。これにより、三元触媒を使用せずに低 NOx機関が成立する可能性を示す。

2. 実験装置および方法

試験機関は深皿形燃焼室を持つ無過給水冷四サイクル単シリンダディーゼル機関(シリンダ径 102mm, 行程 106mm)を改造したもので、シリンダヘッドに取付

* 平成4年3月22日 関西支部第67期定時総会講演会において講演, 原稿受付 平成4年9月28日。

*1 正員, 京都大学工学部 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)。

*2 正員, 京都大学大学院。

*3 学生員, 京都大学大学院。

*4 准員, 富士電機(株) (〒290 千葉県市原市八幡海岸通り 7)。

けた乗用車用点火プラグによって混合気に点火した。図1に燃焼室の概略を示す。吸気弁には 120° にわたってシュラウドを設け、取付角度を変化させてスワール強さを加減した。このため、体積効率が約75%以下となり、とくに高回転時に機関性能が悪化した。そのため、高回転数での運転はやめ、ここでは機関回転数1,200 rpm一定として実験した。また、機関圧縮比をガスケットパッキンの厚さによって変更した。

図2に実験装置の概略を示す。燃料には天然ガスNG（メタン 88%, エタン 6%, プロパン 4%, ブタン2%）を主に使用し、比較のためプロパン（純度97.8%）についても実験を行った。これらの燃料は高圧ボンベから減圧して吸気ポートへ定常噴射し、そのさい絞り弁を用いて流量を調節した。燃料流量および吸入空気流量はそれぞれ質量流量計（小島製作所 HFM-201）および層流流量計（司測研 LFE-256）によって測定し、それより混合気の当量比 ϕ を求めるとともに、排気中の酸素濃度を磁気酸素計（堀場 OA-250）によって確認した。また、シリンダ内の圧力 p は圧電式変換器（Kistler 601A）を用いて測定し、各サイクルにおける最高圧力 p_{max} をピークホールド回路により検出するとともにその変動強度を求め、100サイクルの p_{max} の平均値に対する相対標準偏差 δ によって燃焼変動を表した。さらに、排気中の NO および NO_2 濃度を化学発光分析計（ヤナコ ECL-30）により測定し、それらを足し合わせて NO_x 濃度とした。また、HC濃度は全炭化水素濃度分析計（ヤナコ KA-300）を用いて測定し、

図1 試験機関

図2 実験装置の構成

あわせてガスクロマトグラフ（ヤナコ G3800）により組成分析した。

3. 機関性能および排気特性

実験は主として吸気絞り全開として行い、燃料流量を変化させて機関性能ならびに排気特性を調べた。とくに、希薄燃焼時の燃焼変動の増加と窒素酸化物濃度の低減に注目し、それらがいずれも許容値内に収まる条件が存在するかどうか、およびその条件がスワール、点火時期、圧縮比などの設計・運転変数によりどの様に変化するかを明らかにした。なお、冷却水の温度は 50°C 一定として試験した。

3.1 燃焼変動の抑制 まず、燃焼変動の抑制に効果があると思われるスワールを変えて実験を行った。最初、平形燃焼室を用いてその効果を予備的に検討したところ、スワールを強めても希薄燃焼時の激しい変

図3 種々のスワール比 r_s におけるシリンダ内圧力変動 図4 スワール比 r_s による p_{max} のサイクル変動の変化

動をほとんど抑制できなかった。そこで、燃焼室を図1のような深皿形として以後の実験を行ったところ、高いスワール比で安定な燃焼が得られることがわかった。図3は天然ガスを燃料とし、圧縮比 $\varepsilon=11.5$ 、MBT（最大トルク進角）点火の条件で、3種類のスワール比 r_s について測定したシリンダ内圧力経過 p の連続5サイクル分の代表例を $\phi=1.0$ および 0.68 の場合について示したものであり、さらに図4にこの条件における連続100サイクル分の p_{max} の変化を示す。 $\phi=1.0$ ではいずれの r_s についてもさほど大きな変動が認められないのに対し、 $\phi=0.68$ の希薄条件では点火後の圧力上昇がサイクル毎に変動するため、早い点火時期にもかかわらず $r_s=0$ では p_{max} が大きく変動している。しかし、この条件でスワールを強めると変動は抑制され、 $r_s=4.5$ ではほとんど変動が認められない。これはスワールによって乱れ強さが増して火炎核の成長を促進し、点火遅れが揃うためと考えられ、とくに $\phi=0.68$ の希薄条件での無渦流時の大きな変動を大幅に抑制できる。なお、吸気絞り全開でのスワールによる吸入空気量の変化は2.5%以下で、燃焼変動にはほとんど影響しない。

平形燃焼室ではスワールによってほとんど変動が抑制できなかったのに対し、深皿形で大きな抑制効果が得られたことから、混合気濃度の均一化のほか小スケ

ールの乱れが生じるならそれによる点火火炎核の安定化もスワールの作用として重要かも知れない。ただし、スワールを強めすぎると火炎核の伸張による冷却のためかえて点火が不安定になることはよく知られているが⁽⁴⁾、本実験では強いスワールほど燃焼変動が抑制される結果となった。これには、点火栓の取付位置の影響も考えられ、今後の検討を要する。

図5は、同じ条件で種々の ϕ について得られた正味熱効率 η_e 、MBT点火のクランク角時期 θ_i 、 p_{max} の相対変動強度 δ 、および NO_x 排気濃度を示す。希薄混合気ほど δ が増し、燃焼変動が大きくなるが、吸気にスワールを与えることにより失火限界近くを除いて δ を5%以下に保つことができる。この変動強度は通常のガソリン機関と同等であり、ディーゼル機関より静粛と感じられ、実用運転には δ を5%以内に収めれば十分と思われる。なお、失火限界近くの δ が10%を超える場合には、回転変動が増して運転が荒れ、逆に2.5%以下のほとんど変動がない場合はきわめて静粛な運転が得られた。MBT点火時期はスワールによる燃焼期間の短縮とともに遅くなり、また希薄限界に近づくほど早くなる。しかし、いずれの r_s についても $\phi=0.60$ より希薄な混合気では失火サイクルが混入して負荷運転できない。燃焼変動とは逆に、 NO_x 濃度は ϕ の減少とともに急激に低下し、とくに $\phi=0.70$ よりも希薄混合気では100ppm以下に減少する。この ϕ による NO_x 濃度の低下は、 r_s を変えてもほとんど変化しない。また、 r_s とともに燃焼期間は短縮するが、熱損失が増加するため、 η_e は $r_s=2.2$ の条件で最も高い。

3.2 点火時期による変化 つぎに、 NO_x および変動に及ぼす点火時期 θ_i の影響を明らかにするため、スワール比 r_s を2.2とし、 $\theta_i=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ および 30° BTDCとした場合について ϕ を変化させ同様の実験を行った。図6および7に、燃料をそれぞれ天然ガスNGおよびプロパン C_3H_8 とした場合の結果を示す。いずれの燃料についても点火を遅くするほど NO_x 濃度は低くなるが、最高圧力が低くなって相対変動 δ は増加する。したがって、希薄な条件まで高い η_e で負荷運転を行うためには点火を早める必要があり、 θ_i を 20° BTDCより早くすれば $\phi=0.70$ 以下でも δ は5%以内に収まる。ただし、 θ_i を遅くした条件の希薄限界近くで δ が減少するのは、上死点後の燃焼により上昇した圧力が圧縮圧力を越えないためであり、このような場合には失火サイクルが混入して大きな変動が生じるにもかかわらず δ は小さくなり、 p_{max} の相対変動 δ で燃焼変動を正しく評価することができなくなる。またプロパン燃料では天然ガスと比べて大気圧下での可燃

図5 種々の r_s における機関性能、燃焼変動および NO_x 排気濃度

図6 種々の θ_i における機関性能, 燃焼変動および排気特性 (天然ガス燃料)

図7 種々の θ_i における機関性能, 燃焼変動および排気特性 (プロパン燃料)

図8 種々の ε における機関性能, 燃焼変動およびNOx排気濃度

範囲が広いので、より希薄な混合気まで運転ができるとともに、層流燃焼速度が高いため MBT点火の時期が遅くなる。また、同一の ϕ では天然ガスより NOx濃度が若干高いものの、希薄な条件でも熱効率を高くかつ燃焼変動を低く保つことができるので、同じ負荷で比較すると機関性能および NOx濃度は2つの燃料でほとんど差はない。しかし、炭化水素濃度はプロパンの方がかなり高く、いずれの θ_i についても ϕ の減少とともに増加し、希薄限界に近づくとき急増する。

3.3 圧縮比による変化 つぎに、天然ガス燃料で MBT点火とし、圧縮比 ε を9.5から15.5まで変えて同様の実験を行い、機関性能および排気濃度に及ぼす ε の影響を調べた。図8にその結果を示す。天然ガスは耐ノック性が高いので ε を15.5まで高めてもノックのない正常な燃焼を行うことが可能である。 ε の増加とともに図示仕事は増加するが、同時に摩擦損失も増大するため η_e は $\varepsilon=13.5$ 以上にしても正味熱効率は増加しない。また、 ε を高めるほど燃焼期間が短縮するので希薄限界が広がるとともに燃焼変動が減少し、さらにMBT 点火のクランク角時期が遅くなるにもかかわらずNOx濃度は増加する。

3.4 部分負荷性能 以上、絞り全開の条件で燃料流量を減じて希薄燃焼時の燃焼変動と NOx排出濃度を調べ、 $\phi=0.70$ 近傍の混合比では燃焼変動と NOx濃度はともに低くなることを示した。しかし、いずれの条件でも $\phi=0.60$ 以下にすると失火するので、約0.3MPa

図9 絞りによる機関性能
およびNOx排出濃度の変化

以下の負荷運転はできず、そのため出力を制御するには吸気を絞って混合気量を減じる必要がある。そのさいの燃焼変動および NOx濃度の変化を調べるために、天然ガスを燃料とし種々の当量比 ϕ について、絞りにより負荷を変えて測定を行った。図9は、 $\phi=0.68$ 、 0.74 、 0.80 および 1.0 とした場合の正味熱効率 η_e 、MBT点火の時期 θ_i 、 δ 、および NOx排出濃度を正味平均有効圧 p_e に対して示す。また、絞りで等エンタルピー変化が行われると仮定して実測空気流量より吸気圧力 p_i を求め、 p_i によるNOx濃度の変化をそれぞれの ϕ について図中に示した。 ϕ を一定として絞りにより p_e を減じると、NOx濃度は減少するものの絞り損失の増加のため η_e が減少し、さらに圧縮圧力の低下のため δ が増大する。小さい p_e における η_e の減少は ϕ によりほとんど差はないのに対し、 δ は希薄混合気ほど大きく増加する。そのため、 $\phi=0.80$ では無負荷時においても δ は約5%に収まり、このときの NOx濃度は100ppm以下となる。このことから、所定の負荷について絞りに応じて混合比を調節すれば、燃焼変動および NOx濃度をともに低くできることがわかる。

4. 考 察

以上のように、均一混合気吸気の火花点火ガス機関では、希薄燃焼によって NOx排出濃度を大幅に低減で

図10 NOx濃度と燃焼変動を許容
値内に抑える当量比の窓

きるが、その反面燃焼変動が失火限界付近で増加する。図10はこの状況を模式的に描いたものであり、本研究では燃焼変動と NOx濃度をともに低く抑える当量比の範囲<窓>が存在することを種々の運転条件について示した。とくに、絞り全開の条件では $\phi=0.68$ で燃焼変動が5%以内に抑えられ、かつNOxを100ppmまで低減できる。このように大幅に NOxを低減できたのは、深皿形燃焼室内の活発なガス流動によって圧縮行程中に吸気管内に噴射した燃料と空気との混合が十分に進み、燃焼中の混合気が均一となったためであろう。もしも、過濃および希薄状態が共存する不均一混合気では局所的に量論比近傍の高温部が生じ、その部分から NOx が多量に生成したと思われる。このことから、層状給気により局所的に過濃部を作って燃焼変動を抑制し超希薄燃焼を目指す方法も有り得るが、サイクル変動が許し得る範囲でできるだけ均一混合気として上述の<窓>の条件で運転する方が好ましい。とくに、本研究では一般に使用されるガソリンと比べて可燃範囲が広い天然ガスおよびプロパンを燃料とし、希薄な条件での燃焼変動が少ないという燃料の特性を最大限利用した。ただし、ガソリン燃料を十分気化させた場合についても同様の低 NOx化の可能性が指摘されており⁽⁵⁾ 均一混合気希薄燃焼による NOx低減はその他の場合についても成り立つかも知れない。

さらに、以上の実験で排気ガス再循環EGR および三元触媒による排気浄化を行わずとも十分な低 NOxレベルが得られることが示された。したがって、コセネ用機関や中・大形車両用ディーゼル機関の代替として本燃焼方式は非常に有望といえる。そのさい、負荷の変化に対しては前述のような当量比の<窓>を利用し、点火時期を適切に選べば広い領域にわたって燃焼変動

を5%以内に抑え、かつNOx濃度を100ppm以下にすることができる。すなわち、図9において $p_e = 0.55\text{MPa}$ および無負荷の場合には、それぞれ $\phi = 0.68$ および0.80とすればMBT点火時期でもそれらの条件を満足させることができる。中間の $p_e = 0.37\text{MPa}$ では $\phi = 0.74$ で δ が5%となり、その場合NOx濃度は若干100ppmを超える。しかし、図6によると点火時期 θ_i をMBT点火時期よりも少し遅らせれば燃焼変動と機関性能をさほど悪化させないでNOx濃度が大幅に低減できるので、この場合も θ_i の変更によってNOx濃度を100ppm以下にできると考えられる。

そのほか、プロパン燃料についても種々の運転条件について同様の結果が得られる。この燃料は可搬性に優れているので、希薄燃焼ガス機関を車両用へ適用することはより現実的といえる。ただし、希薄燃焼時にはHC排気濃度が量論混合気の約2倍に増加し、三元触媒によって浄化した後と比較してかなり高い値となるので、これを許容値以下に低減するには酸化触媒による後処理が必要となろう。このとき、天然ガス燃料では排気中で検出されたHCの大部分は光化学反応性の低いメタンであり、それ以外の炭化水素はほとんど認められなかった。

また、同じシリンダ容積で希薄燃焼を行なうと絞り全開の条件でも混合気量が少ないため、得られる出力は減少する。そのため、過給を行なうかあるいはシリンダ容積を増す必要がある。前述の実験結果によると、 $\phi = 0.68$ では量論混合気の場合の約(2/3)の負荷となることから、希薄時に本試験機関の定格負荷を得るにはいずれかの方法で約1.5倍の混合気を燃焼させればよい。このうち過給を施す場合、中間冷却をすれば吸入空気温度を一定に保てるので圧縮温度も変化せず、NOx生成量はさほど増加しないと考えられる。一方、後者のように機関を大形化すれば一般にノックしやすくなるが、天然ガスおよびプロパンを燃料とするガス機関ではその問題は小さい。

5. 結 言

以上、火花点火ガス機関の希薄燃焼の特徴を明ら

にするために、天然ガスおよびプロパンを燃料として種々の条件で機関性能および排気濃度を調べた。その結果、混合気をなるべく均一にすれば希薄燃焼によって極めて低いNOx濃度が実現できることがわかった。同時に、燃焼変動も低いレベルに収まる当量比の<窓>が存在することを確認し、中・大形ディーゼル機関の代替として有望であることを示した。得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 深皿形燃焼室を用いてスワールを強めれば、希薄時の燃焼変動を大幅に抑制できる。
- (2) 点火時期をMBTの条件よりも少し遅らせると、正味熱効率の低下および燃焼変動の大きな増加なくNOx濃度を大幅に低減できる。
- (3) MBT点火の条件では圧縮比 ε を高めるほど希薄限界が広がるとともに燃焼変動が減少する。しかし、NOx濃度は若干増加するので、燃焼変動とNOx濃度をともに低くする立場からは $\varepsilon = 11.5 \sim 13.5$ が最適となる。
- (4) プロパンは天然ガスよりもさらに希薄限界が広く燃焼変動は小さい。しかし、等しい当量比に対してはNOx濃度が高いので、結局等しい負荷と比較すると燃焼変動およびNOx濃度の燃料による差はほとんどない。
- (5) 混合比を一定に保って吸気絞りにより負荷を減じると、NOx濃度は減少し、燃焼変動が増大する。その場合、絞りに応じて当量比を増すとともに点火時期を適切に選べば、燃焼変動およびNOx濃度をともに低くして負荷を制御できる。

文 献

- (1) 中園・夏目, 自技論, 23-3 (1992), 3.
- (2) 後藤・伊藤・田辺, 第9回内燃機関合同シンポジウム講演論文集 (1991), 325.
- (3) Fleming, R. D. and O'Neal, G. B., SAE Paper No. 852073, (1985), 1.
- (4) 加藤・ほか3名, 第5回内燃機関合同シンポジウム講演論文集 (1985), 103.
- (5) Lavoie, G. A. and Blumberg, P. N., Combust. Sci. and Tech., Vol. 8 (1973), 25.