直接噴射式メタノール機関の過給時の性能と燃焼特性*

佐藤由雄^{*1}, 野田 明^{*1}, 阪本高志^{*2}Engine Performance and Combustion Characteristics
in a Direct-Injection Methanol Engine with Supercharging

Yoshio SATO, Akira NODA and Takashi SAKAMOTO

Effects of supercharging on a engine performance and exhaust emissions in a spark-assisted direct injection methanol engine were investigated under heavy load conditions. The test results indicated that the supercharging has the effects of improving thermal efficiency, CO and NO_x emissions. The combustion analyses showed that the supercharging suppress a rapid combustion of stratified mixture which include fuel spray drop, and makes contributions to promote premixture with rapid fuel spray evaporating and fuel-air mixing. As a result, supercharging increased heat release during the premixed combustion. In addition, increasing of premixed combustion with the supercharging reduced the deterioration of brake thermal efficiency during the EGR under heavy load conditions. The supercharging with EGR can significantly reduce the NO_x emissions while keeping the high thermal efficiency as direct injection diesel engines.

Key Words: Alternative Energy, Combustion, Thermal Efficiency, Methanol Engine, Stratified-Charge Engine, Supercharging, EGR

1. 緒 言

将来の重量車用動力源として、高効率燃焼の可能性の高い筒内直接噴射式機関が有望であると考えられている。その場合、高負荷を含む広い運転域において有害排気成分を極めて低いレベルに抑えたいうえで、高い熱効率を維持できることが前提となる。

従来、重量車用の直接噴射式機関には軽油が用いられてきたが、燃料噴射量の多い高負荷域では燃料と燃焼方式の特性上、拡散燃焼を回避することが難しく高効率を維持したうえでNO_xとPMを大幅に低減することは極めて難しい。一方、メタノールを用いた直接噴射式機関では、含酸素・無煙燃料の特長と直接噴射成層燃焼の特性を活かした燃焼技術の適用により低NO_x・高効率燃焼が期待できる⁽¹⁾。しかし現状では、高負荷域においてNO_xが増大しやすく、噴射時期遅延や排気ガス再循環(EGR)などのNO_x対策を行うと熱効率が低下してしまい⁽¹⁾、NO_x対策と熱効率の向上を両立させる有効な燃焼技術が見いだされていない。

直接噴射式機関の高負荷における出力の向上と排気低減を行う方法の一つに過給が挙げられる。過給はすでにディーゼル機関などではターボ過給方式として実用化⁽²⁾されている燃焼技術であるが、直接噴射式メタノール機関へ適用した例は極めて少ない。また、これらの適用例⁽³⁾⁽⁴⁾は過給による出力向上を主眼としたものであり、過給が直接噴射式メタノール機関の燃焼特性や熱効率、NO_xの排出に及ぼす影響などについては報告していない。

そこで、本研究では火花点火方式の直接噴射式メタノール機関の全負荷を含む高負荷条件において過給を行い、過給圧力が機関性能と燃焼特性に及ぼす影響を明らかにした。さらに、過給時にEGRを行い過給時のメタノール燃焼の特性を活かした高負荷時の低NO_x・高効率燃焼の可能性について実験的検討を行った。

2. 実験装置および方法

2・1 供試機関 実験には、総排気量3260 cm³、四ストローク四シリンダの直接噴射式ディーゼル機関をメタノール燃料(M100)用に転換した火花点火方式の直接噴射式メタノール機関を用いた。表1に供試機関の主要諸元を示す。燃焼室は通常のトロイダル形であり、燃焼室のほぼ中心に噴射ノズル(均一の6噴孔

* 1997年3月31日 日本機械学会第74期通常総会講演会において講演、原稿受付 1997年7月22日。

*¹ 正員、運輸省交通安全公害研究所交通公害部(☎181-0004 三鷹市新川6-38-1)。

*² 運輸省交通安全公害研究所交通公害部。

ノズル), また, 点火プラグは噴射ノズルから離れた燃焼室の比較的外側に配置されている。

2.2 実験装置 図1に実験装置の概要を示す。過給は供試機関とは独立した可変速モータ駆動のルーツ形過給機を用いて行い, 圧縮した給気の温度を一定に保つため水冷のインタクーラを使用した。また, 供試機関の吸・排気マニホールドの一部を改造してEGR装置を組み込んだ。EGRガスは, EGRバルブを用いて流量調整され, 水冷のEGRクーラを経て室温程度まで冷却して水分を除去した後, 新気と混合して過給機入口に供給した。EGR率は吸入空気流量の減少率で定義した。なお, 図1中の吸気絞り弁は全開とした。排気中の各成分濃度は酸化触媒の入口において, COをNDIR, THCをHFID, NO_x をCLDの各方式により測定した。なおTHC排出濃度はHFID計の未燃メタノール濃度換算を行っていない測定値で示した。燃料は純度99.9%の工業用メタノールを使用した。

2.3 実験条件および方法 機関運転条件は回転速度を1500 rpm, 負荷は正味平均有効圧力が中負荷相当の0.60 MPa, 高負荷相当の0.75 MPaおよび全負荷の3条件とした。全負荷条件は, 過給とEGRを行わない基準運転条件(以下, 「ベースライン」という)における燃料噴射量(88.4 mg/st. cyl.)を一定に保

持した運転条件とした。また, 燃料噴射時期はベースラインにおける噴射時期(19° BTDC)一定とした。過給圧力は, 無過給から最大72 kPaの範囲で変化させた。

過給時の正味熱効率を評価する場合は, 機関単体の出力測定値から過給機の駆動力測定値を差引いた正味出力を算出した。それ以外では, 機関単体の出力測定値から直接, 熱効率を求め(以下, 「機関熱効率」という), 過給時と無過給時の燃焼状態を比較するための指標とした。

給気温度は吸気マニホールド内の温度が38°Cになるように制御したが, 過給を行った場合の給気温度の上昇の影響を調べる目的で, インタクーラを使用しない場合についても実験を行った。さらに, 気筒内の燃焼圧力を測定し, これをもとに熱発生率を算出して燃焼特性の変化を調べた。燃焼開始時期は熱発生率が正になった時期, 燃焼期間は燃焼質量割合で0~90%の期間と定義した。着火遅れ期間は燃料噴射開始から燃焼開始までの期間とした。燃焼変動に関しては, 図示平均有効圧力の変動率(標準偏差/平均値, CP_i と略記する)を用いて評価した。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 負荷の影響 図2に, 中負荷から全負荷の各運転条件において過給時の機関熱効率の変化を調べた結果を示す。

過給圧力を高めていくと機関熱効率は向上し, その効果は負荷が高い条件ほど顕著であり, 中負荷条件(0.60 MPa)における効果はほとんど認められなかった。また, 過給圧力には各負荷条件に応じて最適値が存在し, 負荷が高い条件ほど高い過給圧力を設定できる。この結果から, 過給は全負荷を含む高負荷運転条件への適用が有効であることが示された。

3.2 点火時期の影響 図3に, 全負荷条件において点火時期が過給時の機関熱効率とTHC排出濃度に及ぼす影響を調べた結果を示す。全負荷条件では燃

Table 1 Engine specifications

Type of Fuel	Methanol (M100)
Swept Volume (cm ³)	3260
Engine Type	4-Cylinder / 4-Stroke
Combustion Type	Direct Injection
Combustion Chamber	Troidall
Ignition Assist	Spark Plug / CDI
Bore/Stroke (mm)	95/115
Compression Ratio	16.0
Injection Nozzles	Hole Type (6-Holes)
Injection Pressure (MPa)	24.5

Fig. 1 Schematic of the experimental system

Fig. 2 Engine thermal efficiency during supercharging

料噴射量が多いため、点火時期が噴射開始時期に近すぎる場合は点火プラグ近傍の混合気濃度が過濃となり失火する。そのため、点火時期は燃料噴射期間の後半以降に制限されるが、点火時期を過度に遅らせると混合気が拡散し燃焼が不安定となる。特に、高過給圧力条件では過希薄化の影響により THC 排出濃度が急増した。MBT は、無過給時では -7° ATDC 前後であったが、過給圧力の上昇に伴い 4° CA 程度、進角側に移行する。これらの結果をふまえ、以後の実験における点火時期は、過給圧力にかかわらず高熱効率と低 THC 濃度の条件がほぼ両立する -9° ATDC 一定とした。

3.3 機関性能 図 4 に、過給時の機関性能の変化を全負荷条件において調べた結果を示す。過給圧力の上昇に伴い図示平均有効圧力が増加し機関出力が向上する。着火遅れの変化は比較的少ないが、燃焼期間が短縮し燃焼が速く終了していることがわかる。過給圧力を 70 kPa 程度まで上昇させた場合でも図示平均有効圧力の変動率 CPI の変化が少なく、安定した燃焼が維持され図示熱効率が向上している。過給圧力が 50 kPa 付近からは混合気の希薄化の影響により燃焼速度が緩慢になり、図示平均有効圧力の増加傾向が鈍くなる。

3.4 排気特性 図 5 に、高負荷および全負荷条件における過給時の排気特性を示す。全体的な傾向としてみた場合、過給圧力を図 5 中の範囲まで高めると、 NO_x は無過給時と比べて濃度はほぼ半減する。排出量 (g/h) でみた場合は無過給時の 2/3 程度まで減少した。

過給を行うと、燃料噴霧と空気の混合状態が向上するため CO 排出量が大幅に減少する。空気過剰率が

2.0 より大きくなる過給域では CO と THC 排出量が增大する傾向を示したが、燃料噴射量の多い全負荷条件ではそれらの増加割合は小さい。また、全負荷条件では、 NO_x 排出量がいったん増える領域があるが、過給圧力が 50 kPa 程度以上の高過給域では無過給時を

Fig. 4 Engine performance during supercharging

Fig. 3 Effect of spark timing for supercharging

Fig. 5 Exhaust emissions during supercharging

下回った。

3・5 燃焼特性 図6に、全負荷条件において燃料噴射および点火条件を一定として過給を行い、過給圧力を上昇させた場合の気筒内圧力と熱発生率の経過を示す。

無過給の場合、着火後、熱発生率が急速に上昇し始めるが燃焼の持続時間は短い。これは、燃料噴射量の多い全負荷条件では燃料噴霧の蒸発、混合時間が不足するためである。このような部分的に過濃な領域を含む成層混合気中に火炎が伝ばしていく場合は燃焼初期の伝ば速度は比較的速くなるが、図5のCO排出濃度が高いことからわかるように、燃焼の初期に急速な燃焼が生じると、燃焼の後期では未燃焼部分の燃料噴霧が蒸発・混合が十分に進まないまま火炎に捕そくされるため酸素欠乏を引き起こすためと考える。

図7に、図6の熱発生率から求めた累積熱発生量の変化を示す。図7中に示す各期間は以下のように定義した。

[期間 a]：燃料噴射開始から燃焼開始までの着火遅れ期間

[期間 b]：燃焼開始から熱発生率が最大値を示す燃焼の初期期間

Fig. 6 Cylinder pressure and rate of heat release during supercharging

[期間 c]：熱発生率が最大値を示した以降の燃焼の後期期間

過給圧力を高めていくと、[期間 a] の燃料噴射中は気筒内の温度降下が大きくなり熱発生量としては低下する。これは、燃焼室内の雰囲気気密度の上昇により燃料噴霧の微粒化が早まり、それに伴う蒸発が促進される⁽⁵⁾ためである。[期間 b] では急速な燃焼が抑制され熱発生量が減少する。過給を行うと燃料噴霧内への空気導入が進むとともに燃料噴霧の到達距離が減少し⁽⁶⁾、噴射ノズルより離れた位置にある点火プラグ周辺の予混合気濃度が適正化される。そのため、燃焼初期の火炎伝ば速度が無過給時と比べて相対的に低下したものと考える。[期間 c] に示す燃焼の後期では熱発生量が増加する。ここでは燃料噴霧の未燃焼部分への空気導入と混合が進み、無過給時と比べて予混合燃焼の割合が増える。燃焼途中での酸素欠乏が起こりにくいため燃焼速度が増加し、図4に示したように燃焼の終了時期も速くなる。最終的には累積熱発生量が増大している。

すなわち、過給を行うと、点火プラグ周辺の予混合気濃度が適正化され初期の急速な燃焼が抑制される。また、過給により燃料噴霧への空気導入・混合も促進されるため、燃焼の後期では燃焼途中で酸素欠乏をきたすことなく速やかな燃焼が行える。燃焼形態としては、拡散燃焼の割合が減少し、予混合燃焼を主体とした希薄燃焼の割合が増えるため、COおよびNO_x排出量が減少し、熱発生量が増加する。

3・6 給気温度の影響 過給を行いインタクーラの有・無による給気温度の違いが、機関熱効率とNO_x排出量に及ぼす影響を全負荷条件において調べた結果を図8に示す。空気過剰率一定で比較した場合、給気温度が機関熱効率に及ぼす影響は少ないが、給気温度が高い場合は過給圧力を上昇させてもNO_x排出量は増大する一方で、過給によるNO_x排出量の抑制効果を得ることができない。

Fig. 7 Cumulative heat release during supercharging

Fig. 8 Effect of charging temperature for supercharging

Fig. 9 Rate of heat release and mean gas temperature during supercharging under different charging temperature

図9に空気過剰率が等しく給気温度が異なる場合の熱発生率と筒内平均ガス温度の経過を比較した結果を示す。図9から、給気温度が高い場合は熱発生率の最大値が大きく、燃焼時の平均ガス温度が高くなることからわかる。これらの結果から、過給による NO_x 排出量の抑制効果を得るためには、インタークーラを用いて給気温度の上昇を抑える必要がある。

3・7 EGR時の燃焼特性 上述した過給時の燃焼特性によれば、高負荷でEGRを行った場合でも燃焼悪化を抑えられる可能性がある。そこで、過給時にEGRを行い機関熱効率と排気特性に及ぼす影響を調べた。図10に、全負荷条件において、過給圧力を無過

Fig. 10 Engine performance and exhaust emissions during EGR

給時を含む3条件としてEGRを行い、給気温度をインタークーラとEGRクーラを用いて一定に制御した場合の機関性能と排気特性の変化を示す。

無過給時にEGRを行うとCO排出量が大幅に増大し機関熱効率が悪化した。しかし、過給を行うと機関熱効率の悪化が抑制され、 NO_x 排出量はベースライン(無過給・EGR率0%)時の1/10程度まで低減した。また、EGR率が25%近い多量EGRを行っても燃焼変動率の変化は少なく安定燃焼が得られている。一方、CO排出量は過給を行うことにより低く抑えられ、THC排出量の変化も比較的少なかった。

過給時および無過給時にEGRを行った場合の燃焼挙動と燃焼期間を比較した結果を図11に示す。この場合の給気酸素量は図10に示されているように、過給時にEGRを行った場合(過給圧力: 24 kPa, EGR率: 20%)はベースライン(無過給, EGR率0%)時よりも少ない。それにもかかわらず、無過給時, EGRによって低下した後期の熱発生量は過給を行うことにより過給・EGR率0%時の熱発生量と同じ程度まで回復される。しかも、燃焼の終了期間の変化も少ないことから、燃料と給気の混合促進効果により予混合燃焼の割合が増加し燃焼速度も向上していることがわか

Fig. 11 Cylinder pressure, rate of heat release and cumulative heat release during EGR

る。一方、多量 EGR により、燃焼初期の熱発生が大幅に抑制され、熱発生率のピーク値が減少しそのタイミングも遅れるため効果的な NO_x 低減が行われる。

従来の過給機付き直接噴射式ディーゼル機関では、燃料噴射量の多い全負荷近傍において EGR を行うと軽油燃料の拡散律速燃焼を避けることが難しく、燃焼期間が長くなり PM と熱効率が悪化しやすいため EGR の適用が制限されている⁽⁷⁾。

それに対して、直接噴射式メタノール機関の過給時の燃焼特性によれば、燃料噴射量の多い高負荷において多量 EGR を行った場合でも混合が促進され予混合燃焼の割合が増加し、軽油燃料のような拡散燃焼がほとんど存在しないため、高い機関熱効率を維持したうえで大幅な NO_x 低減が行える。

3・8 正味熱効率と NO_x 排出量の関係 以上の実験結果をもとに、過給圧力と EGR 率を適正化した場合の正味の出力と熱効率および正味出力あたりの CO 、 NO_x 排出量 $[\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$ の関係を全負荷条件および正味平均有効圧力: 0.75 MPa の高負荷条件においてまとめた結果を図 12(a), (b)に示す。

ベースラインと比較して、過給を行った場合は正味熱効率が 38% 近くまで向上した。また、EGR を単独で行った場合は CO 排出量が増大し正味熱効率が悪化したが、EGR 時に過給を行えば CO 排出量と正味熱効率の悪化を抑えたうえで、 NO_x 排出量を $1.0 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$

Fig. 12 Relationship between brake thermal efficiency and NO_x emissions

以下に低減可能であった。さらに、全負荷条件(燃料噴射量一定)では正味出力を約 3% 向上できた。

4. 結 論

火花点火方式直接噴射式メタノール機関の高負荷において過給を行い、過給圧力が機関性能に及ぼす影響を調べるとともに過給時の燃焼特性を解析し、以下の点を明らかにした。

(1) 過給を行うと点火プラグ周辺の予混合気濃度が適正化され、初期の急速な燃焼が抑制される。また、過給により燃料噴霧への空気導入・混合も促進されるため、燃焼の後期では燃焼途中で酸素欠乏をきたすことなく速やかな燃焼が行える。

(2) 過給により拡散燃焼の割合が減少し、予混合燃焼を主体とした希薄燃焼の割合が増加する。そのため、 CO 排出量が大幅に減少し、高過給域では NO_x 排出量が無過給時を下回った。また、熱発生量が増加するため機関熱効率が向上した。

(3) 過給による NO_x 排出量の抑制効果を得るためには、インタークーラを用いて給気温度の上昇を抑える必要がある。

(4) 過給時の燃焼特性によれば、燃料噴射量の多い高負荷において多量 EGR を行った場合でも混合促進効果が維持され拡散燃焼がほとんど存在しないため、正味熱効率と CO 、 THC 排出量の悪化を抑えたうえで正味出力の向上ならびに NO_x 排出量の大幅低減が行える。

文 献

- (1) 佐藤由雄・野田明・阪本高志, 機論, 62-594, B(1996), 383-390.
 - (2) 例えば, Suzuki, T., ほか 2 名, *SAE Paper*, No. 830379 (1983).
 - (3) Neiz, A., *Proc. Int. Symp. Introduct. Methanol-Powered Vehicles*, (1987-2), 3-10.
 - (4) Hilger, U., ほか 8 名, *SAE Paper*, No. 901521 (1990).
 - (5) 森田晃司・大聖泰弘・斉藤孟, 第 11 回内燃機関シンポジウム講演論文集, (1993), 475-480.
 - (6) Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, (1988), 522-562, McGraw-Hill.
 - (7) 例えば, 額額晋・森一俊・酒井健次・箱崎隆三, 自動車技術会学術講演会前刷集 965, 9638266(1996), 193-196.
-