

DME を燃料とするクリーンディーゼルエンジンの研究 (第7報)

- 過給と EGR の併用による排出ガス改善効果の解析 -

環境研究領域

鈴木 央一 佐藤 由雄 安 乗一

1. はじめに

DME は燃焼ですすを生成しないため、DME ディーゼルエンジンにおいては、大量 EGR による大幅な NOx 低減が可能となる^{1) 2)}。別報にて発表されている次世代低公害車プロジェクトの大型 DME トラック用エンジンにおいても、大量 EGR を行うことで、ベース状態よりも 50% 以上の NOx 低減が前提とされている。しかしながら大量 EGR を行うと、同時に酸素量が減少するため、抜本的な NOx 低減が可能となるような高い割合 (たとえば 60%) で EGR を行うと、未燃 HC や CO 排出が急激に増加し、燃費も悪化することを既報²⁾で示した。とりわけ高負荷領域ではその傾向が顕著に表れ、NOx 低減に大きな制約になる。

一方、ディーゼル機関における過給は、性能向上と排煙低減がはかれることから、重要な技術であり広く用いられている。とくに PM 排出規制が大幅に強化される 2005 年規制適合ディーゼル機関ではほぼすべてが過給器を備えることになると予想される。

DME エンジンでは PM 排出がきわめて低いことに加えて、通常ディーゼルほどの高圧噴射が望めないことから、過給を行う動機が少なく、DME エンジンにおける過給の効果について研究が行われたケースはあまり見られない。しかしながら、本報告では、大量 EGR を行うと同時に、より多くの空気 (酸素) を燃焼室に導入する手段として過給を用い、燃料消費率や CO 排出の悪化なしに大幅な NOx 低減を図ることを目的とした。

2. 実験装置および実験条件

2.1. 実験装置

図 1 に実験装置構成の概要を示す。供試機関には排気量約 1 L の単気筒ディーゼル機関を用いた。その諸元

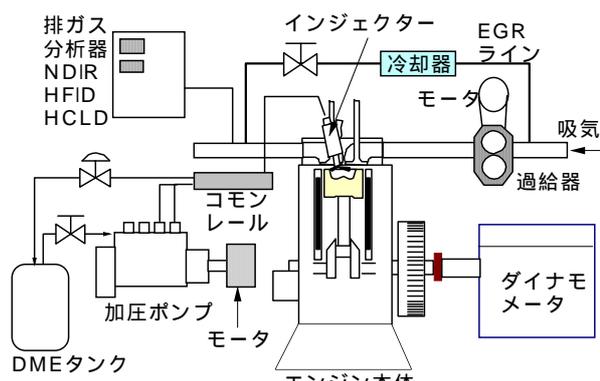


図 1 実験装置概要

表 1 エンジン諸元

Type	4-stroke, 1 cylinder
	Direct injection
Bore & Stroke, mm	108 × 115
Displacement, cm ³	1053
Compression ratio	18.1
Injection system	Common rail
Nozzle diameter / number mm, #	0.5 × 5
Injection pressure, MPa	30

を表 1 に示す。供試機関は噴射系およびそれに伴うシリンダヘッドの微少な加工を除いて軽油を使用するベース状態から変更を加えていない。噴射系は DME 用に試作したコモンレール式で、コモンレール圧力は 30MPa とした。インジェクタは磁歪素子により作動制御されるパイロット弁により、針弁に加わる燃料圧力を制御し噴射制御を行う方式である。ノズル噴孔径は 0.5mm × 5 噴孔とした。吸気系に関して EGR および過給を行った。過給器は容積型加压装置を別途電動機により駆動するものである。EGR ガスおよび過給機により加压したガスは、共に熱交換器により室温相当まで冷却されるが、EGR 率の高い条件においては 3

~5 程度の上昇がみられた。なお、大量 EGR を可能とするため、排気系に無過給時において約 7kPa の排気抵抗がかかる絞りを設定した。

燃料として用いる DME は、工業用(純度 99.9wt%)のものとし、各部の潤滑性確保のため、添加剤(Lubrizol)を 800ppm 混合した。燃料消費量計測については、ジルコニア式空燃比計を用いた排出ガスの空燃比測定、または排出ガス分析計による測定結果からカーボンバランス法を用いて算出した。原理的に精度がよりよいと考えられることから、空気過剰率 < 1.6 では空燃比計、それ以上では排出ガス分析計の値より求めた。なお、排出ガス計測について、CO、CO₂には NDIR、THC には HFID、NO_xには HCLD をそれぞれ用いた。

2.2. 試験条件

運転はすべて定常状態とし、機関回転速度は 1,920rpm 一定とした。負荷率は NA (自然給気)におけるベースディーゼル機関のスモークリミットによる全負荷に対して、40%および 80%とした。過給、EGR なしのベース条件におけるそれぞれの空気過剰率は 3.1 および 1.8 である。燃料噴射時期については、ベース条件で燃費率が最適となった上死点前 9deg.CA (80%負荷) および 6deg.CA (40%負荷)とした。ただし大量 EGR により着火遅れが増大し、燃費悪化がみられた際には、適宜進角させた。過給条件においては、55kPa の過給圧で過給を行った。EGR 率は、EGR を行わないときの吸入空気量 Q、EGR 時の吸入空気量を Q_e としたとき、

$$\text{EGR ratio} = (Q - Q_e) / Q$$

より求めた。また、その際の吸気酸素濃度については、排気ガス中の酸素濃度を測定し、そのガスが EGR 率だけ新気に混ざるものとして算出した。

3. 実験結果および考察

3.1. 過給時の EGR による NO_x、CO 排出挙動

一般にディーゼル機関において、EGR による NO_x 低減効果は吸気酸素濃度と強い相関がある。図 2 は、吸気酸素濃度に対する NO_x および CO 排出量を示している。EGR 率が高まるほど吸気酸素濃度は減少していくので、図の右から左に行くほど高い EGR 率の条件である。図より EGR による NO_x 低減効果については、過給の有無および負荷率の違いはほとんど影響せず、吸気酸素濃度のみが影響する。いずれの条件

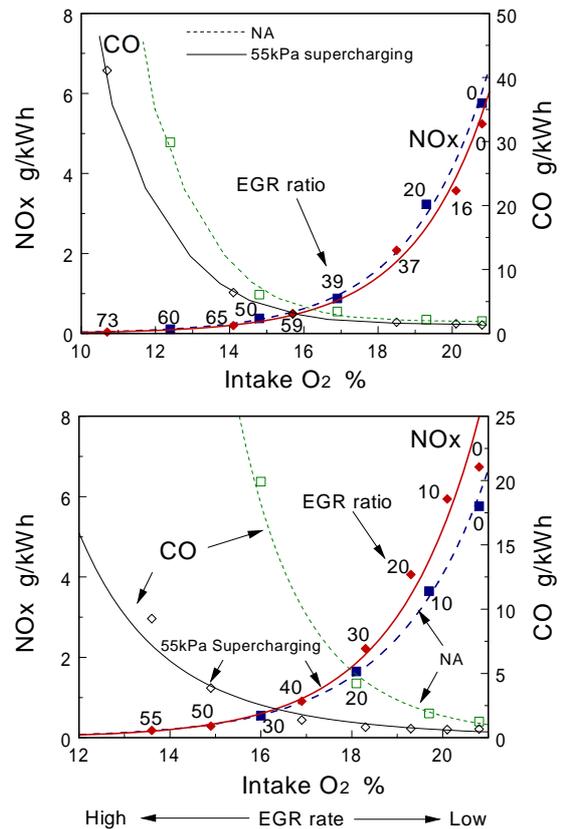


図 2 40%および 80%負荷における吸気酸素濃度と NO_x および CO 排出量の関係

においても、吸気酸素濃度が約 19.2%で NO_x は半減し、同 16%になるとほぼ 1/10、同 14%になると 1/20 のレベルにまで低減できる。40%負荷では、吸気酸素濃度 12%程度 (EGR 率は NA 時 60、過給時 75%)でも運転が可能であったが、その際の NO_x 排出は ppm 濃度で一桁を記録するまでに減少した。以上より、過給 DME エンジンにおいても、EGR による NO_x 低減効果は吸気酸素濃度に依存し、EGR 率が高ければ高いほど NO_x は低減する。しかしながら、高率 EGR により酸素量が減少すると、CO 排出が急増し、EGR の上限となる。40%負荷時においては、過給時に CO 排出がやや抑制されるものの、NA 時との差は大きくない。それに対して、80%負荷時には、NA では吸気酸素濃度 18%程度から CO 排出が急激に増加するが、過給時に同レベルの CO 排出となるのは、吸気酸素濃度 15%のときで、それぞれの NO_x 排出量を見ると、1.7g/kWh と 0.29g/kWh となり、その違いは非常に大きい。このことから、EGR 時に過給を行うことは、特に高負荷時に、より高い EGR 率においても CO 排出を抑制する効果があるといえる。

3.2. が CO 増加などに及ぼす影響

CO あるいは THC の排出は、主にシリンダ内で燃

焼が行われる部分の酸素が不足し、燃料の一部が不完全燃焼、いわば燃焼が悪化することによりおきる。したがって、燃焼室内に酸素が十分あるかどうかを検証することが、排出傾向の把握につながるという。しかしながら、瞬時的な局所空燃比を把握することは容易でないため、その指標として、燃焼室内全体の平均空気過剰率に着目した。図3は に対するCOおよびTHC排出量を40、80%負荷、過給の有無それぞれの場合について示している。いずれも が1に近づくと急激に増加する傾向を示す。COについては40%負荷で、THCについては80%負荷の場合に、より高い排出量となった。過給の有無については、80%負荷では過給を行った場合の方がCOの急増し始める がやや低くなるが、40%負荷では反対で、 の他に、軽負荷の過給時には完全酸化するだけの温度に至らない領域ができると考えられる。こうした違いはみられるものの、大まかな目安として、図中に線で示したが1.7以上あればCOやTHCの大幅な増加を招くほどの燃焼悪化は回避できるという。すなわち酸素濃度に依存するNO_xに対し、CO、THC排出抑制には酸素の量が十分にあるかどうかのポイントとなる。

図4は に対する燃料消費率を、40および80%負荷、過給の有無それぞれの場合について示している。ここではEGRおよびそれにとまなう の違いによる変化を見ることを目的としているため、過給による外部仕事は考慮していない。いずれの条件においても、 > 1.8程度までのEGRであれば燃費率がやや改善するものの、1.5を下回る高EGR率条件ではやや悪化する傾向が見られた。EGRを行った場合、吸気CO₂濃度が高まり比熱比が高くなるため圧縮仕事が低減し、燃費改善につながったと考えられるが、 < 1.5まで低下すると、燃焼悪化にともない燃費率も悪化すると考えられる。したがって、燃費の面からも は1.5~1.6を下回らない方がよいという。

過給とEGR併用時の燃焼挙動について、図5に気筒内圧力および熱発生率を示す。過給の有無によらず、EGR時には着火遅れが大きくなり(ただし、過給・EGR併用時には、噴射時期を進角させたために着火開始は早まっている)その結果予混合燃焼の熱発生率ピークは高くなった。通常のディーゼル燃焼ではEGRにより予混合燃焼が抑制される傾向がある一方、着火遅れ拡大により予混合燃焼最大値が高くなる場合にはNO_x排出が増加する。しかし今回用いた

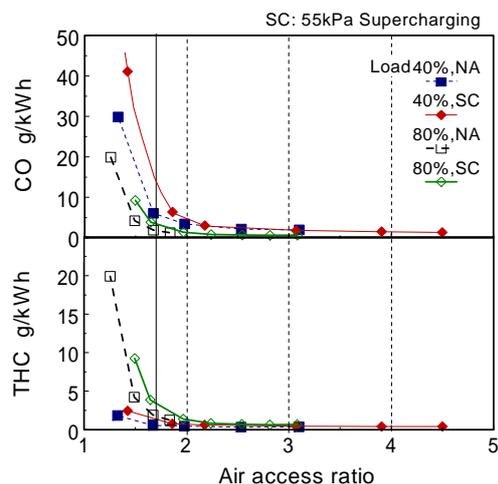


図3 空気過剰率に対するCO、THC排出量

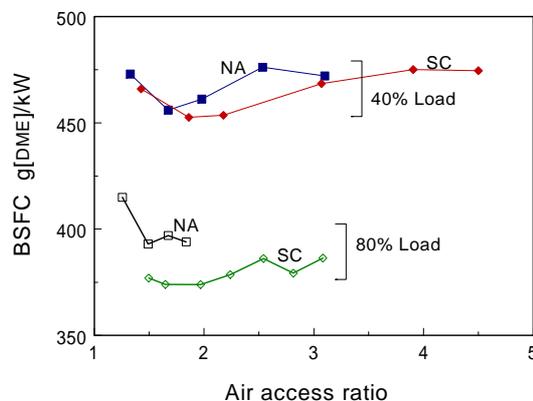


図4 空気過剰率と燃焼消費率の関係

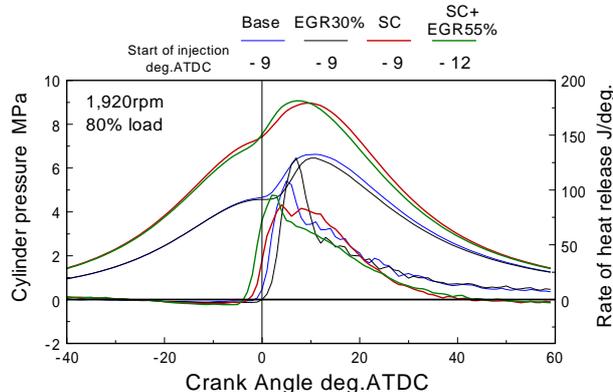


図5 過給およびEGR時の気筒内圧力と熱発生率

DME機関ではそのような傾向は見られない。また、燃焼期間について、過給時には上死点後40deg.CAまでにほぼ終了しているが、NAでは上死点後60deg.CA以降まで熱発生がみられる。一方で、EGRの影響は小さい。過給・EGR併用時のEGR率は55%で、そのときの は1.5でベース時よりも低く、2,000ppmの高いCO排出がみられた条件であるが、熱発生率から燃焼悪化の要因を見いだすことは困難であった。

3.3. と吸気酸素濃度からみた NOx 低減効果の解析と予測

各条件について、EGR 率を変化させることによる吸気酸素濃度と の関係について、図6に示す。吸気酸素濃度が 19.2%以下だとベースよりも 50%以上、16%以下だと 90%以上の NOx 低減が可能となる一方で、燃焼悪化を回避するためには を 1.7 以上とする必要があることから、図で着色した部分にプロットのあることが望まれる。80%負荷の NA 条件では、その領域を通らず、燃焼悪化なしに大幅な NOx 低減を行うことが難しいことがわかる。それに対し、55 kPa 過給を行った場合には、40%負荷の NA 条件とほぼ同じ傾向線上に位置し、限られた領域ながら 90%以上の NOx 低減が可能となり、過給を行うことで高率 EGR による大きな NOx 低減ポテンシャルを得ることができる。また、40%負荷で過給を行うと、より広範な EGR 率で 90%以上の低減が可能となる。

吸気酸素濃度と については、吸気温度や燃料消費率が同等であると仮定した場合、ベース条件から過給や EGR を行った場合について予測計算を行うことができる。ここでは、EGR による NOx 低減がきわめて困難と予想される 95%負荷について、ベース条件のデータから、55kPa の過給と EGR を行った場合の効果を予測することとした。図7にその結果を示す。まず、NA では、EGR なしですでに が 1.7 を下回っている。実際この条件では CO の排出濃度が 1,400ppm となっており、EGR なしですでに CO 急増領域に入りつつあり、EGR による NOx 低減は NA ではほとんど不可能であることがわかる。それに対して、過給時には EGR 率 20%で NOx を 50%以上、同 30%後半では 90%近い NOx 低減が可能と予想され、過給がきわめて効果的であることがわかった。

4. まとめ

DME エンジンにおける過給と EGR 併用時の排出ガス改善効果について以下にまとめる。

1. 過給時には CO 排出が低減できるため、より高い割合で EGR を行っても CO の増加を抑えることができ、とくに高負荷時に大幅な NOx 低減が可能となった。
2. NOx 低減効果には吸気酸素濃度が、燃焼悪化による CO や THC 排出増加には が支配的要因となる。CO 等の増加を抑えるために $\lambda > 1.7$ を維

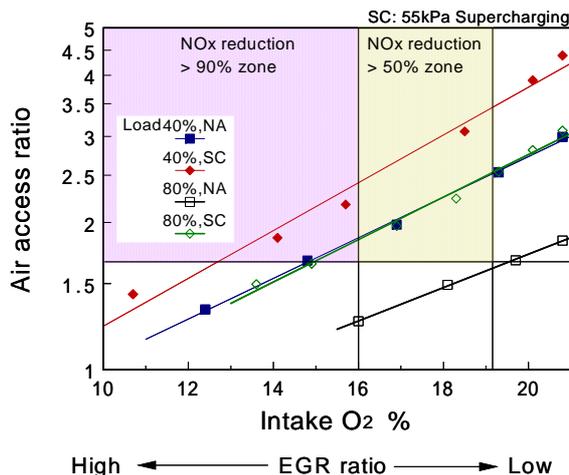


図6 EGR 率による吸気酸素濃度と の関係

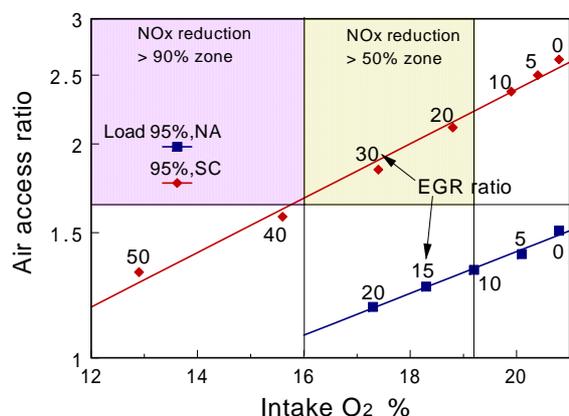


図7 EGR 率による吸気酸素濃度と の関係 (95%負荷時の予測計算)

持しつつ、吸気酸素濃度 19.2%なら 50%、同 16%なら 90%の NOx 低減が可能となる。また、過給を行うと同一の吸気酸素濃度でより高い とすることができる。

3. 上記関係を用いることで、ベース条件のデータから過給と EGR による NOx 低減効果を予測することが可能となり、NOx 低減可能レベルを簡便に把握できる見通しが得られた。

おわりに

本実験を行うにあたり、小林啓樹氏に多くの支援をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 佐藤由雄ほか、第 29 回交通安全公害研究所発表会講演概要 p83-86, 1999
- 2) 安乗一ほか、自動車技術会 2004 年春季学術講演会前刷集 14-04, p17