

# DME圧縮着火機関の燃焼特性

職業能力開発総合大学校東京校 鈴木 達 明  
 米 谷 宏 明  
 職業能力開発総合大学校 福 谷 格

Combustion Characteristics of A Compression Ignition Engine with DME

Tatsuaki SUZUKI, Hiroaki YONETANI, Itaru FUKUTANI

**要約** DME（ジメチルエーテル）は自己着火性の指標となるセタン価が高く、軽油の約7割程度の発熱量を有し、燃料分子中における酸素含有率の高さや、炭素-炭素結合を持たない構造であるため、ディーゼル代替燃料として用いることにより、既存のディーゼルエンジンを大幅に改良することなく、高い熱効率を維持しながらも無煙運転が可能になる。また、DMEは沸点が低いため、燃料の噴射と同時に燃料の分解が促進されることが推察され、このような良好な燃料分解性から噴射時期を遅角させることにより、低いNO<sub>x</sub>排出特性と高い熱効率の維持の両立が可能になることが実験的に明らかになった。一方で、低沸点であるDMEの問題点として、燃料系における漏れ量の増大があげられるが、漏れ量の低減策として燃料の低圧噴射により回避される。このような低圧噴射や予混合吸入による新たな燃料供給方法をも試みた結果、DME圧縮着火機関における良好なエンジン性能と排出ガス特性が得られた。予混合圧縮着火燃焼においては、低負荷域における高い熱効率を得られるものの、過早着火により運転領域が制限されることがわかり、本研究では予混合圧縮着火燃焼に対し、窒素吸入や低圧縮比化により燃焼の改善を図ることにより、運転領域の拡大が可能になることがわかった。

## I まえがき

近年、地球環境の保全とエネルギー資源の枯渇問題が社会的な関心として高まる中、内燃機関においては排出ガスの浄化とともに、熱効率の改善が要求されている。中でも、ディーゼルエンジンは高い熱効率を得られるため、エネルギー資源の観点から有効であるが、一方で既存の技術で軽油を使用した場合には、十分な排出ガスの浄化が困難であることも実状である。このような中、圧縮着火機関において、良好な排出ガス特性が得られるディーゼル代替燃料としてDME（Dimethyl Ether）が注目されている<sup>(1)</sup>。1995年にDMEの低コストな製造方法が発表されて以来、現在までに、大型機関、小型機関等を用いたDMEエンジン

の研究が進められている<sup>(2)(3)</sup>。

他の内燃機関用の燃料と比べ、DMEの優位点は、自己着火性の指標となるセタン価が高いために圧縮着火機関の燃料として適していることや、燃料分子中の酸素含有率が高く、炭素-炭素結合を持たないので、無煙運転が可能であることなどがあげられる。しかし、DMEは低沸点であることや潤滑性に欠ける性質を持ち、燃料系において、ベーパーの発生や漏れさらに磨耗等の問題があげられる<sup>(4)</sup>。このようなDMEの性質から、DMEを圧縮着火機関に用いた場合、燃料噴射後、早期に燃料の分解が促進されることが考えられ、燃料噴射圧力の高圧化等による積極的な物理的微粒化を必要としないものと考えられる。低粘度であるDMEの高圧噴射は、かえって燃料漏れ量の増大を意味す

Table 1 The physical and chemical properties of DME

	Unit	DME	Gas-oil
Chemical formula		CH <sub>3</sub> -O-CH <sub>3</sub>	-
Lower heating value	MJ/kg	28.8	42.7
Cetane number		>>55	40-50
Stoich. A/F ratio		9.0	14.6
Ignition temperature	°C	235	250
Boiling point	°C	-24.9	180-370
Kinematic viscosity [1] <sup>*</sup>	mm <sup>2</sup> /s	<1	3
Vapor pressure [20°C]	MPa	0.51	-
Specific density [g] <sup>*</sup>		1.59	-
C ratio	%wt.	52.2	86
H ratio	%wt.	13	14
O ratio	%wt.	34.8	0

ることとなり、DMEの噴射圧力を低下させた場合でも、ペネトレーションが弱くなりながらも、燃料の分解と燃焼が逐次進行するため、NOxの悪化が少ないものと考えられる。

そこで、本研究では、圧縮着火機関にDMEを用いた場合の熱効率及び排出ガス特性を調査した。また、DMEの沸点が低く、燃料の分解が早い特性に着目することによって、DMEのシリンダ内低圧噴射による燃料供給が可能であると考えた。そこで、燃料噴射圧力(=噴射ノズル開弁圧力)を低減させた場合について検討した結果、熱効率に大きな悪化が見られず、排出ガス特性が改善された。さらに、DMEを予混合吸入した場合のエンジン諸性能及び有害排出ガス抑制の可能性について検討した結果、NOxの大幅な低減が可能になった。また、過早着火を抑制する手法について、その可能性が示唆されたので報告する。

## II DMEの燃料性状

表1にDMEの代表的な性状を示す。DMEは常温常圧では気体であり、低圧(約0.5MPa)で液化するため、燃料貯蔵等に関する取扱いはLPGと同じように管理できる。圧縮着火機関用の燃料として特質すべき点は、低発熱量は軽油の約7割程度あり、低い着火温度と高いセタン値を有することである。また、DMEは2個のメタン基が酸素原子を介して結合している最も単純なエーテル化合物であるため、炭素-炭素結合がなく酸素含有率が高いので、ディーゼルエンジンで問題とされるすすや微粒子の大幅な低減が期待できる。

一方、DMEは低粘度であるために、燃料系における漏れや潤滑が不足することや、体積弾性係数が温度及び圧力の影響を受けやすいことなどが問題点としてあげられる。特に、DMEは低沸点であるため、燃料

噴射後速やかに燃料の分解が促進されることが予想されるので、DMEは軽油に比べ微粒化されやすく、ペネトレーションが低減するものと思われる。このため、低圧噴射においても局部的に理論空燃比を形成しやすく、着火性を維持できるものとする。

## III 実験装置及び実験方法

表2に供試エンジン諸元を、図1に実験装置概要を示す。エンジンは直接噴射式水冷4サイクルディーゼルエンジンを用い、テストベンチに設置した。吸気入口には、吸気時の脈動と圧力損失を防ぐためレシーバタンクを設け、層流流量計にて吸入空気量を計測した。DMEはN<sub>2</sub>ガスで加圧し、フィード圧Pf=2.9MPaとした。DMEの温度は、燃料噴射ポンプの座金温度を測定することにより管理した。また、燃料噴射ポンプ及びノズル部における潤滑を目的として、添加剤(Hitec580)をDMEに対して100ppmの割合で混合した。シリンダ内圧力及びデリバリパイプ内圧力は圧電式ピックアップにより測定した。排出ガスは直接サンプリング法により、THCをFID法で、COをNDIR法で、NOxをCLD法で測定し、スモーク濃度はボッシュ式により測定した。燃料噴射時期はデリバリパイプ内の圧力変化によって確認した。

Table 2 General specifications of test engine

Type of engine	4-stroke cycle DI-Diesel engine
Cooling system	Water cooled
Number of cylinder	1
Bore × Stroke	78×80mm

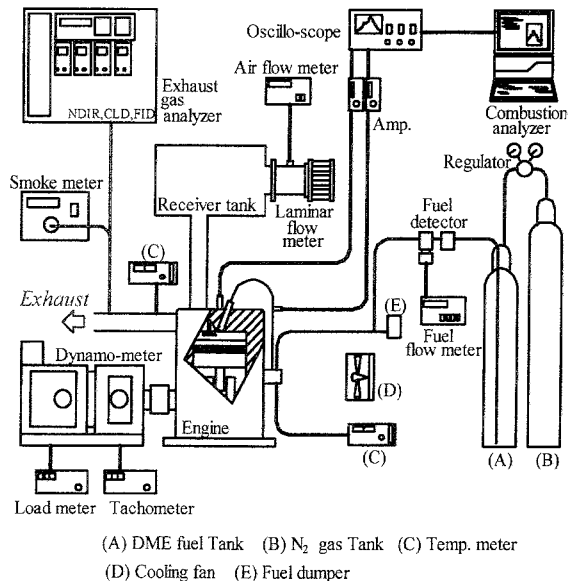


Fig. 1 Test equipment used

実験は、全て定常運転で行い、予め軽油を用いた場合のベースディーゼルエンジンの基本性能を把握し、次にDMEをニートで用いて（以下DME運転と呼ぶ）、燃料噴射時期及び燃料噴射圧力がエンジン諸性能と排出ガス特性に及ぼす影響を検討した。さらに、DME予混合吸入の実験では、供給熱量一定のもとで圧縮比及び酸素濃度を变化させ過早着火の抑制手段の検討を行った。

## IV 実験結果及び考察

### 1 圧縮着火機関におけるDMEの適用

DMEの沸点は軽油に比べ著しく低く、飽和蒸気圧は常温において0.41MPaであり、フィード圧が飽和蒸気圧を下回る場合、燃料供給経路においてベーパーの発生が考えられ、安定した燃料供給を行うためには、フィード圧の設定が重要である。予備実験として、フィード圧を变化させた場合の燃料噴射ポンプ温度と燃料噴射量の関係を検討した結果、フィード圧 $P_f=2.4\text{MPa}$ 以上で噴射量特性の再現性が安定し、燃料噴射量は、燃料噴射ポンプの温度上昇とともにフィード圧の設定値に関係なく徐々に低下することがわかった<sup>(5)</sup>。また、DMEの液比重は温度の上昇とともに低下し、約60℃以上でその値は著しく低下する特性を有する<sup>(6)</sup>ため、燃料噴射ポンプの温度が高い場合では、要求燃料噴射量が得られない。この結果、フィード圧を $P_f=2.9\text{MPa}$ 以上かつ燃料噴射ポンプ温度55℃以下に保つことによって、DMEの要求燃料流量を満たしながら、安定した燃料供給が可能であることがわかった。

### 2 正味熱効率及び排出ガス特性（ベースディーゼルエンジンとの比較）

図2は、DMEを用いた圧縮着火機関において、エンジン回転速度 $n=2000\text{min}^{-1}$ 、燃料噴射圧力 $IP=20\text{MPa}$ 一定のもと、正味熱効率 $\eta_e$ 及びTHC、NOxの排出ガス濃度の変化を、それぞれ供試エンジンの基となったディーゼルエンジンの性能と比較して示している。DME運転時における燃料噴射時期は、 $IT=5\sim 10\text{deg. BTDC}$ において、最も高い熱効率が得られることが実験的に確認されていることから、ここでは、燃料噴射時期を $IT=10\text{deg. BTDC}$ に設定した。DME運転における正味熱効率は、低負荷域においてわずかに低い値を示すものの、中・高負荷域では改善されている。排出ガス特性においては、NOx、THCは全ての負荷域

において低減することができ、吐煙はない。なお、THC濃度は金野らの式によって補正した。

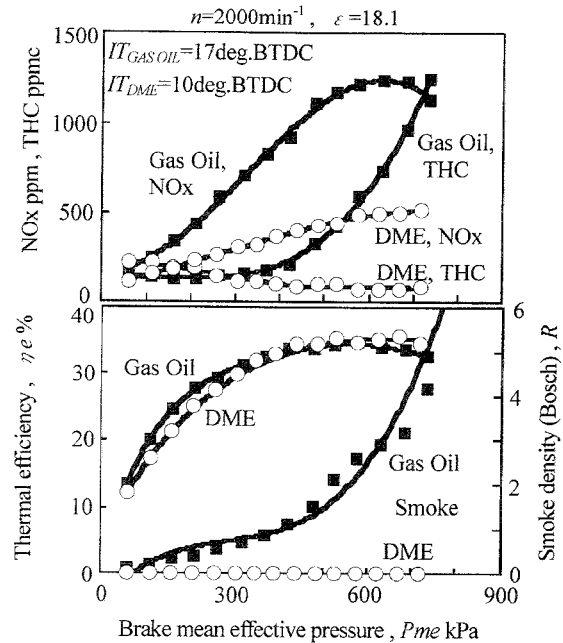


Fig. 2 Effects of DME fueled on engine performance

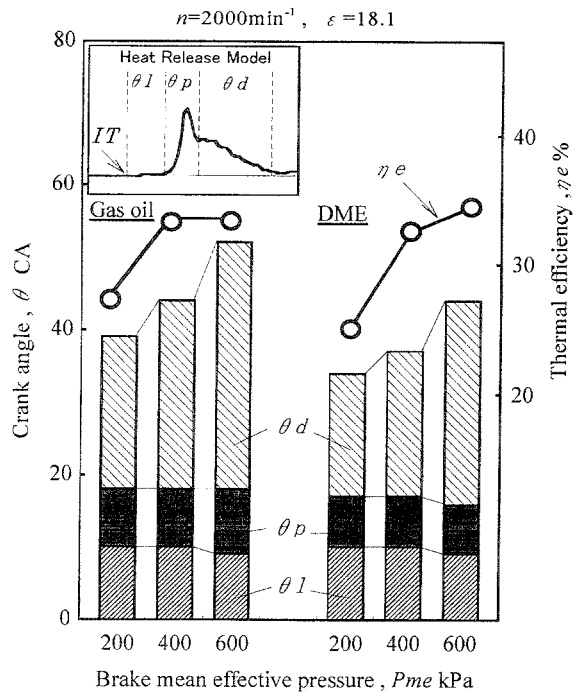


Fig. 3 Relationship between combustion periods and BMEP

図3は、図2の実験にもとづいて記録した燃焼状態を、図中のモデルに示すような熱発生率曲線のように、着火遅れ期間 $\theta_1$ 、予混合燃焼期間 $\theta_p$ 、拡散燃焼期間 $\theta_d$ で整理している。ベースディーゼルエンジンの燃焼状態に比べ、DME運転ではこの噴射時期の場合、拡散燃焼期間が短縮した結果、全体として燃焼期間を

短縮することができた。拡散燃焼期間が短縮されていることから、後燃えが少なく、空気利用率が改善されたと考えられる。燃焼開始後に噴霧された燃料は早期に分解され、逐次燃焼が進行したため、THC濃度からわかるように、未燃焼成分が少なくなったと推察される。このようなDMEの速やかな燃焼により、燃料噴射時期を遅角させた場合でも正味熱効率が改善されたと考えられる。一方、DME運転の予混合燃焼期間における熱発生率の最大値はいずれの負荷域においても同程度の値となっている。これは、前炎反応の進行した混合気が急激な燃焼を抑制し、平均火炎温度が低下することによるNOx生成の抑制効果をもたらしたと考えられ、この時、DME運転時のPmaxが低下していることから裏付けられる。

### 3 燃料噴射圧力の及ぼす影響

DMEの体積弾性係数は温度及び圧力に影響するため、燃料噴射圧力の高圧化は燃料系における漏れ量の増大を意味する。このため、燃料噴射圧力の低圧化によって、高い熱効率の維持と良好な排出ガス特性が可能ならば、DME圧縮着火機関における燃料系の開発が容易に行えるなど期待できる。

ここでは、DME低圧噴射の実用的に有効な手段へのアプローチとして、既存の供試エンジンの燃料系を用いた場合の燃料噴射圧力が燃焼特性及び排出ガス特性に及ぼす影響について検討した。予備実験において、いずれの燃料噴射圧力においても、良好な排出ガス特性と燃焼特性が得られる燃料噴射時期は、IT=5~10 deg.BTDCに存在することが解ったため、高い熱効率が維持でき、かつNOx排出量が低減できる燃料噴射時期IT=5deg.BTDC一定に制御し、燃料噴射圧力を変化させた。

図4はエンジン回転速度 $n=2000\text{min}^{-1}$ において、燃料噴射圧力IP=5~15MPaに変化させたときの正味熱効率 $\eta_e$ 及びTHC、NOx濃度を示している。低負荷域におけるNOx濃度の値にほとんど差は見られないが、中・高負荷域にかけて燃料噴射圧力の増加にともないNOx濃度の増加が見られる。また、THC濃度は、燃料噴射圧力を高くした場合、低負荷域では著しく悪化する。中・高負荷域ではその値に大きな差は見られないが、高負荷域において、燃料噴射圧力を低くすることによりわずかに増加する傾向がある。このようなTHC及びNOxの改善効果は、同一負荷条件において、DME噴射量が燃料噴射圧力に関係なく一定であることから、燃料噴射圧力を低くした場合でも、DMEの

良好な燃料の分解性及び着火性により、燃料の活性化が進行していると考えられる。また、いずれの燃料噴射圧力においても同程度の正味熱効率が得られているが、高負荷域では、燃料噴射圧力IP=5MPaの熱効率はわずかに低い値となった。これは、高負荷運転による燃料噴射量増加にともない、燃料噴射期間（噴射ノズル開弁期間）が増加したことによるものと考えられる。

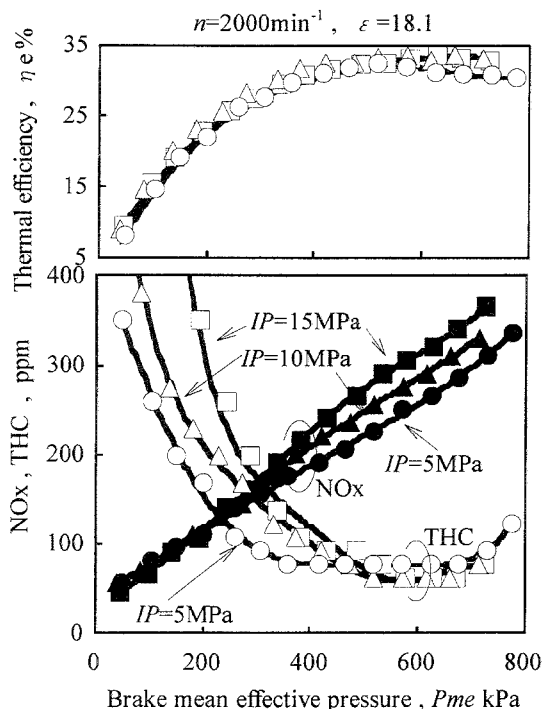


Fig. 4 Effects of injection pressure on thermal efficiency, NOx and THC

図5に図4の実験における燃焼状態を示す。いずれの負荷においても、燃料噴射圧力IPの低下により着火遅れ期間 $\theta_l$ が短縮された。また、燃料噴射圧力の低下は、予混合燃焼期間 $\theta_p$ における熱発生率を低下すると同時に、その燃焼形態は拡散燃焼が支配的である。この拡散燃焼期間 $\theta_d$ における熱発生率線図は、燃料噴射圧力の低下とともに、その形が台形を呈する。DMEが噴射される雰囲気圧力が高い場合、燃料噴射圧力が高いほど噴射角が大きくなることが報告されていることから、ここでも同様に、高い燃料噴射圧力によるDMEの物理的微粒化促進とペネトレーションの増加により、予混合的な希薄均一混合気となり、着火遅れ期間の増大をもたらしたと考えられる。燃料噴射量の少ない低負荷域においては、燃料噴射圧力の増加は、着火遅れ期間の増大と予混合燃焼が支配的になる傾向が顕著に現れ、強いペネトレーションによる混合気の壁面付着や、可燃限界を越えた薄い混合気形成

等の影響により、THC排出量の増大をもたらしたと推察される。一方で、DME燃料噴射圧力の低圧化は、弱いペネトレーションのため混合気形成が空間的に不均一な状態でありながらも、減圧沸騰や含酸素等の影響により燃料の活性化が促進されながら逐次燃焼が行われるものと考えられる。このような層状的な混合気形成による燃焼形態では、局部的に理論空燃比の混合気を形成し、着火遅れ期間の短縮が可能になったものと考えられる。この結果、予混合燃焼期間における急激な燃焼が抑制され、平均火炎温度の低下によりNO<sub>x</sub>が低下したと考えられる。

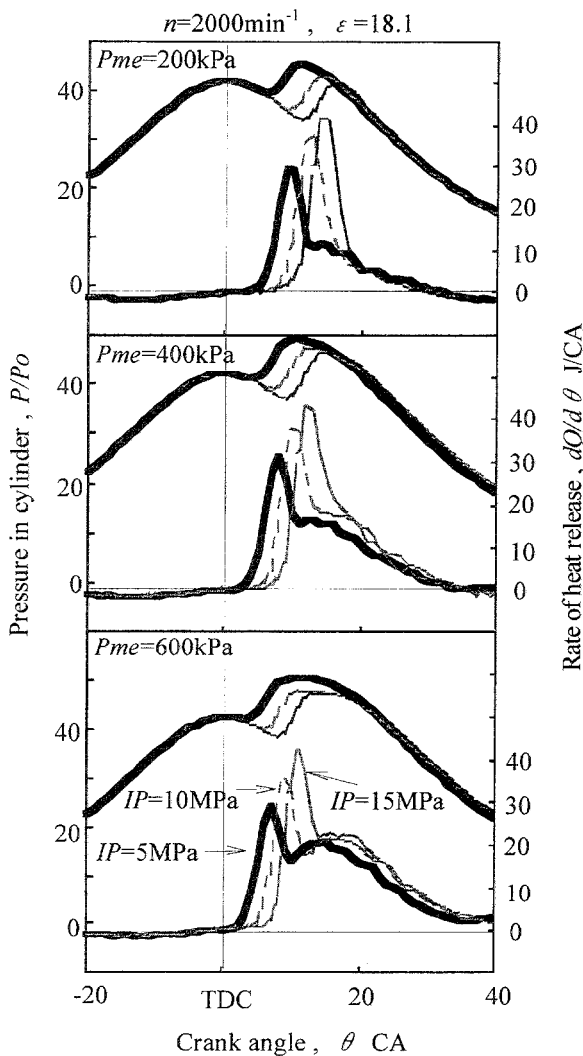


Fig. 5 Cylinder pressure and rate of heat release with reducing injection pressure

図6には図5の実験における燃焼状態を燃焼期間で整理して示している。図より、いずれの負荷においても、燃料噴射圧力IPの低下により、着火遅れ期間 $\theta_1$ の短縮と拡散燃焼期間 $\theta_d$ の増大が顕著に現れている。また、同一負荷の場合、燃焼期間全体に対して燃料噴

射圧力の影響がそれほど見られない。これは、DMEの燃焼が後燃えの少ない速やかな燃焼を生じると同時に、シリンダ内温度に大きく依存していることが考えられる。一定負荷、一定燃料噴射量では、燃料噴射圧力の低下は燃料噴射期間の増加を意味し、高負荷域におけるわずかなTHC濃度の増加の原因として、燃料噴射期間の増加が、未燃焼成分の排出に結びついたものと考えられる。

このようにDMEは、燃料噴射圧力を低下させた場合においても速やかに燃焼するため、噴射時期を遅角させた場合、予混合燃焼期間における熱発生率の増加が見られないことが実験的に確認されている。

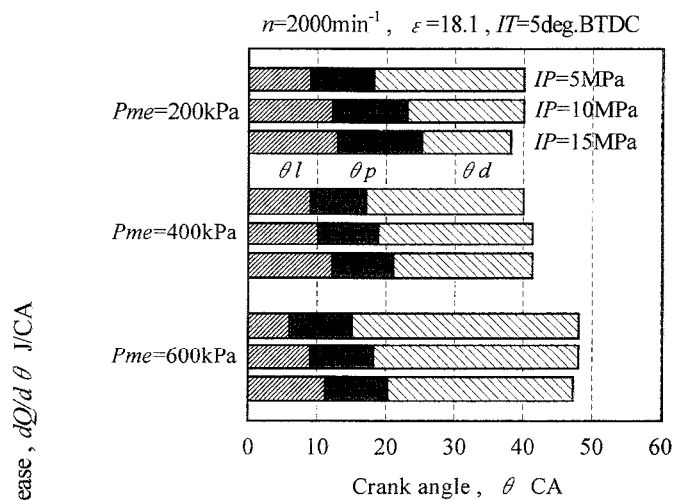


Fig. 6 Comparison of combustion periods on each injection pressure

以上の結果から、圧縮着火機関に対してDME噴射圧力を低圧化した場合、燃焼制御を容易に行うことができ、熱効率を維持しながらも、排出ガス特性の改善が可能であることから、DME噴射圧力の低圧化は、燃料系において実用的でありかつ有効であると考えられる。

#### 4 DME予混合吸入による検討

DME圧縮着火機関用燃料系の簡素化を長期的な目標において、DME低圧噴射の確立の前段階として、DMEの燃料噴射時期は圧縮上死点前に限定する必要はなく、DMEが容易に噴射できる吸気行程後期や圧縮行程初期の検討も必要と考え、これによって生じるDMEの過早着火の運転領域を把握するため、DMEを吸気管より予混合吸入した場合の燃焼状態と排出ガス特性の検討を行った。ここでは、DMEの燃焼は、温度の依存性が大きいことが考えられるため、DME予混合吸入時において、圧縮比を変化させ、過早着火を抑制させることによる運転領域の拡大を図った。

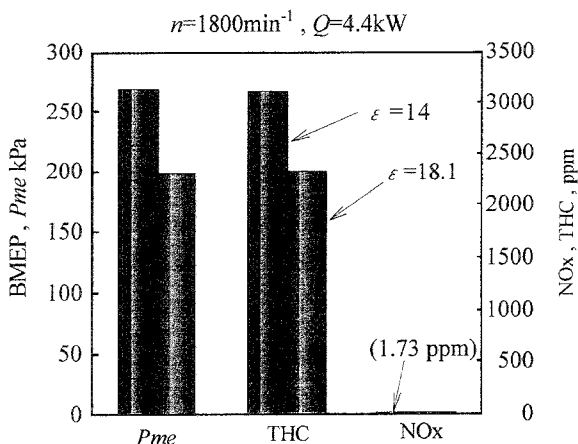


Fig. 7 Effects of compression ratio on BMEP and exhaust emissions

図7に供試エンジンにDMEを予混合吸入した場合のエンジン性能を示す。実験に用いたエンジンの圧縮比は $\epsilon = 18.1$ と $\epsilon = 14$ である。いずれの圧縮比においてもエンジンに供給した熱量 $Q=4.4\text{kW}$ （空燃比 $A/F=25.8$ ）、エンジン回転速度 $n=1800\text{min}^{-1}$ 一定である。供給した熱量は圧縮比 $\epsilon = 18.1$ における運転限界の値である。図より、同じ供給熱量にもかかわらず、圧縮比 $\epsilon = 14$ における正味平均有効圧 $P_{me}$ は、圧縮比 $\epsilon = 18.1$ の場合よりも増加している。これは圧縮比の低下により過早着火による熱損失が低減され、運転領域が拡大したことを意味している。NO<sub>x</sub>は、いずれの圧縮比においても大幅な低減が可能になり、均一予混合圧縮着火機関の特徴として、平均火炎温度が著しく低下し、空間的に大きな温度差を生じないことが考えられる。また、THCは、いずれの圧縮比においてもDMEを吸気管から予混合吸入しているため、シリンダ内直接噴射の場合よりも多く排出される。特に、圧縮比が低い場合は、燃焼温度の低下が、クエンチ領域の増大に結びついたものと思われ、THC排出量も増大している。いずれの圧縮比においても、DMEを吸気管から予混合吸入した場合、シリンダ内直接燃料噴射の場合と比べて同程度の熱効率が得られ、NO<sub>x</sub>においては特に良好な特性が得られた。

図8に図7の実験における燃焼状態を示す。また、図9に図8の熱発生率において、図中モデルに示すような低温反応期間 $\theta_L$ 、抑制期間 $\theta_I$ 、高温反応期間 $\theta_H$ に整理した場合の燃焼期間を示す。着火温度の低いDMEの燃焼は、低温反応期間から高温反応期間まで短期間で行われ、いずれの圧縮比においても上死点前で燃焼反応が完了する。また、圧縮比を下げることで、高温反応期間がわずかに長くなっているものの、

低温反応期間、抑制期間及び熱発生率に大きな差が見られない。これらの熱発生率の時期は、圧縮比を下げることで上死点側に遅角していることから、燃焼開始時期が極めて温度に依存していると推察される。このように、圧縮比を減少させる場合のように雰囲気温度を制御することによって、その燃焼形態に大きな差を与えずに過早着火の遅角が可能になるため、運転限界領域が広がることがわかった。

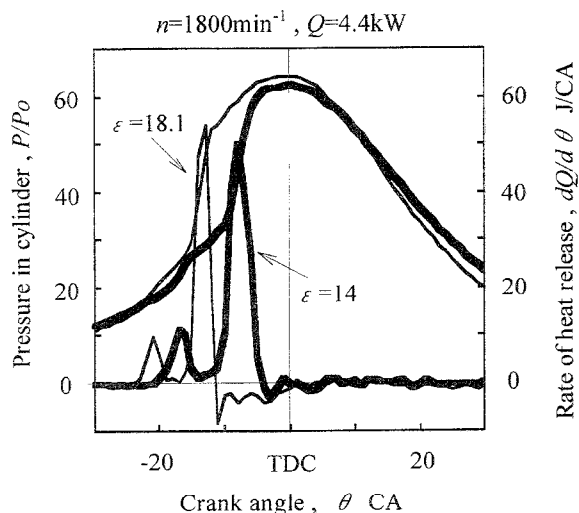


Fig. 8 Comparison of combustion characteristics on DME homogeneous charge

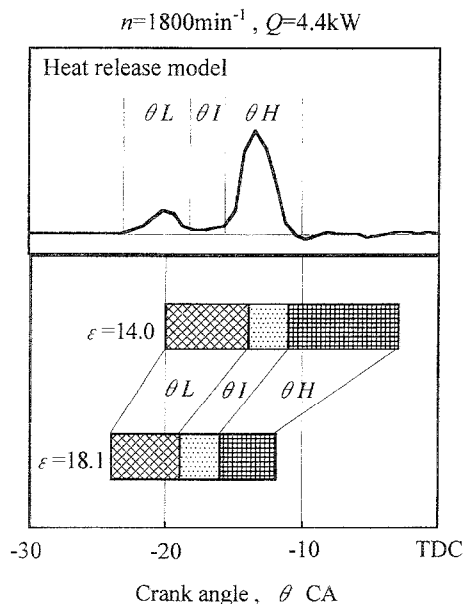


Fig. 9 Comparison of combustion periods on DME homogeneous charge

また、DME予混合圧縮着火燃焼において、過早着火を抑制する一手法の試みとして、N<sub>2</sub>ガスをシリンダ内に投入し、シリンダ内酸素濃度を低減させた実験を行った。図10にN<sub>2</sub>ガス投入時のDME予混合燃焼の

燃焼状態を示す。いずれも圧縮比  $\varepsilon = 18.1$ 、エンジン回転速度  $n = 1800 \text{ min}^{-1}$  である。低温反応期間  $\theta_L$  における燃焼状態に大きな差は見られないが、抑制期間  $\theta_I$  及び高温反応期間  $\theta_H$  の燃焼期間が長くなりながら、高温反応期間においては、熱発生率の最大値が抑えられている。このような傾向から、低温反応期間は温度に依存していると考えられるのに対して、抑制期間及び高温反応期間では、低酸素化による酸素濃度制御により、DMEの活性が抑えられ、前炎反応が蓄積されながらも、緩慢な燃焼形態が可能になったと考えられる。このように、抑制期間、高温反応期間の燃焼期間がいずれも長くなり、高温反応期間の熱発生率が上死点側に遅角することにより、運転領域を拡大させることも可能であることを確認した。

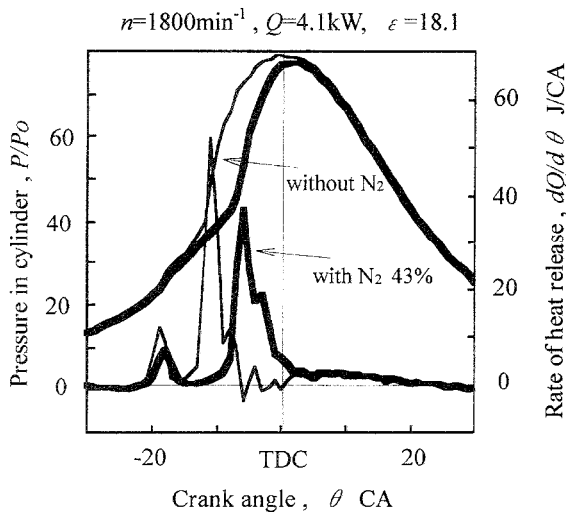


Fig.10 Comparison of combustion characteristics on DME homogeneous charge

## V まとめ

圧縮着火機関にDMEを用いた場合の検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) DME運転では、既存のディーゼルエンジンの燃料噴射時期よりも遅角することにより、ベースディーゼルエンジンの正味熱効率を維持しながらも、 $\text{NO}_x$ 濃度やスモーク濃度を大幅に低減することが可能である。
- (2) DME燃料噴射圧力の低圧化は、着火遅れ期間を短縮でき、予混合燃焼期間の熱発生率を抑制し、拡散燃焼期間が支配的となり、 $\text{NO}_x$ 低減が可能になる。
- (3) DME燃料噴射圧力の低圧化により、混合気形成

が層状的になり、燃料の活性化及び燃焼が逐次進行すると考えられ、THC低減が可能になる。

- (4) DME予混合圧縮着火は、温度依存性が高いと考えられ、雰囲気温度及び酸素濃度の制御によって運転領域を拡大する可能性を持つ。

## [参考文献]

- (1) 梶谷, 中山: DMEを用いたディーゼルエンジンの可能性と問題点、自動車技術 Vol52, No.7, 1998, pp.49-55.
- (2) 鈴木, 米谷, 福谷: DMEを用いた低圧噴射圧縮着火機関の燃焼特性, 自動車技術会学術講演会前刷集 9939910, 1999, pp.13-16. または, S.C.Sorenson, et al.: Performance and emissions of a 0.273 liter direct injection diesel engine fuelled with neat dimethyl ether. SAE Paper 912420, 1991.
- (3) T. Fleisch, et al.: Demonstration of ULEV emissions on a Navistar diesel engine fuelled with dimethyl ether. SAE Paper 950061, 1995.
- (4) S.Kajitani, et al.: Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct-Injection Diesel Engine Operated with DME. SAE Paper 972973, 1997.
- (5) 鈴木, 米谷, 福谷: 圧縮着火機関におけるDMEの適用, 自動車技術会学術講演会前刷集 9838912, 1998, pp.9-12.
- (6) 三菱ガス化学株式会社: ジメチルエーテルカタログ
- (7) 廣安, 西田, 吉崎: DME噴霧の混合気形成と着火・燃焼特性, 日本機械学会 RC151 来世紀対応型非定常燃焼機構の解明とその応用研究分科会研究報告書, 1998, pp.60-67.