

## 8. 代替燃料層状燃焼エンジンに関する研究

担当機関 経済産業省 独立行政法人 産業技術総合研究所 後藤新一

重点強化事項 大気環境 研究期間 平成10年～平成14年度  
研究予算総額 121,429千円

### 研究の背景と目的

近年、自動車用エンジンの低燃費化と低公害化の研究開発が進められているが、依然として自動車による公害問題が残っている。将来の排気ガス規制強化を想定して、既存のエンジンシステムにとらわれない低公害な新しいエンジンシステムの開発が必要になってきている。これまで産業技術総合研究所では、代替燃料として供給流通体制が整っているLPG燃料に着目し、軽油着火によるLPG-軽油デュアルフューエルエンジンおよびLPGリーンバーンエンジンの研究開発を行ってきた。本研究ではさらにリーンバーンと層状燃焼を活用し、ディーゼルエンジンと同等以上の熱効率を有するとともに低公害な将来型のエンジンシステムの研究開発を行い、公害問題の解決の方策を提示したい。

具体的には、中大型ディーゼルエンジンに代替燃料を利用し、ディーゼルエンジンと同等以上の高い熱効率で、かつ自動車用排気ガス長期規制値の半分以下のレベルを達成できる層状燃焼エンジンシステムの研究開発を行い、都市における環境改善に寄与する。代替燃料としては、主にLPGとDME(ジメチルエーテル)について検討する。

### 研究の成果

混合気成層化を実現するには、燃焼室形状、スワール強度および燃料噴射条件などの最適設計条件を確立することが重要である。実機による実験でこれらのパラメータを細かく検討することは困難であり、コンピュータシミュレーションは設計指針の確立に大変重要な手法といえる。本研究では、まず、シミュレーションにより燃焼室形状による混合気形成過程や燃焼特性を調べ、燃焼室設計のための最適条件を提案した。シミュレーションには米国ロスアラモス研究所で開発されたエンジン燃焼解析プログラムKIVA-3コードを用いた。図1にバルブオーバーラップ期間(-21.0～14.0 ATDC)および吸気行程における、吸気ポートおよびシリンダ内部の、空気流動の計算結果を示す。オーバーラップ期間において、燃焼室内の空気流動に大きな変化はない。これは、吸排気いずれのバルブリフト量も小さいため、どちらのポートもガス交換が確認できた。クランク角度が進行し吸気バルブが大きくりフトすると、シリンダ内に吸入された作動ガスは大きなタンブルを形成した。以上、吸気行程では、バスタブ型燃焼室のスワールが若干強くなるが、燃焼室形状の違いが空気流動パターンに及ぼす影響はほとんどなかった。

図2に燃焼生成物CO、および燃焼ラジカルOH、NOの空間分布の計算結果を示す。燃焼室内の平均ガス温度は、バスタブ型燃焼室の方がドックディッシュ型よりも若干上昇し、上死点後も高い温度を持続した。したがって、OHおよびNO濃度もバスタブ型の方が増加したことがわかる。一方、ドックディッシュ型のシリンダ内平均ガス温度は、上死点後の減少割合がバスタブ型よりも大きい。すなわち、高温滞留期間がバスタブ型よりも短く、燃焼火炎後方にて発生するOH濃度がバスタブ型よりも減少したと示唆される。その結果、NO濃度も減少したと考えられる。

一般に、COは不完全燃焼の結果生成され、COが多く生成されると、燃焼効率は減少する。燃料が不

完全燃焼する最も大きな原因は、燃料、空気および燃焼生成物などにより構成される予混合気の不完全な混合であるが、もう一つの原因に、燃焼室壁と混合気との相互作用が挙げられる。すなわち、未燃混合気が低温である燃焼室壁にふれると、急激に燃焼温度が低下し、燃焼酸化反応がその時点で停止する。したがって、燃焼室表面積のより広いバスタブ型では、燃焼室壁付近でCO濃度が増加すると考えられる。以上、混合気成層化を実現するため、KIVA-3コードにより燃焼室形状、スワール強度および燃料噴射条件などを変化させてシミュレーションを行い、燃焼室形状による混合気形成過程や燃焼特性を検討した結果、吸気行程では、バスタブ型燃焼室の方がスワールが若干強くなるが、燃焼室形状の違いが空気流動パターンに及ぼす影響はほとんどないこと、ドッグディッシュ型燃焼室のCO、OHおよびNO濃度は、バスタブ型よりも減少するため、排ガス低減の観点から、ドッグディッシュ型燃焼室の方がLPG直噴エンジンの燃焼室として適していることなどが明らかとなった。

上記より、大まかなLPG直噴エンジンの設計指針が得られたが、さらなる熱効率の向上を目標に、セタン価向上剤をLPGに添加したLPGディーゼルエンジンの開発を行った。ディーゼルエンジンは燃費と耐久性に優れているが、NO<sub>x</sub>やPMの排出が多く問題となっている。ディーゼル車に対する排出ガス規制は年々強化されており、様々な排出ガス低減対策が研究、開発されている。ガス代替燃料の利用は、その改善策の一つとして考えられ、これまで数多くの研究報告例があるが、LPGをディーゼルエンジン用燃料とした例は少ない。n-ブタン:i-ブタン=70:30のLPGに、Di-t-butyl peroxide (DTBP)をセタン価向上剤として添加した物を供試燃料とし、三菱自動車製の2tトラックに搭載されている4D33型エンジンにてエンジン性能および排気特性の検討を行った。エンジン主要諸元を表1に示す。図3にエンジン性能試験結果の一例を示す。LPG燃料自体の弾性から高速回転時には実噴射開始時期が遅れる。したがって高速回転時にも十分な出力が得られるように、燃料噴射開始時期を5deg.進角した。NO<sub>x</sub>排出濃度は軽油と比較し最大で30%低減可能であった。また、吐煙濃度は高負荷時に若干排出されるが、全負荷域で軽油運転時よりも大幅な低減が可能であった。

図4に各燃料の噴霧発達過程を示す。全ての燃料において、濃色の噴霧本体と、噴霧が発達するにつれて淡色の部分が、観察された。軽油噴霧の場合、淡色部が観察されるのは噴射開始後6.00msec経過後で、インジェクタ先端および噴霧の発達方向に対してより下流側の噴霧外周部分であった。その後、この淡色部は時間経過とともに拡大した。しかし、LBFの場合は、噴射開始後3.78msec時に、すでに淡色部が観察された。その発生部分は軽油のそれと同様であるが、噴霧上流での淡色部は軽油の場合よりもより顕著で、体積の膨張も急激であった。この淡色の部分は、気化した燃料が存在し得る部分と考えられる。したがって、軽油はより温度の高いインジェクタ先端部および噴霧の外側から気化が始まると考えられる。一方、LBFの場合、気化の開始位置は、およそ軽油の場合と同じであるが、気化していると考えられる部分の割合は、軽油よりも大きい。これは、LBFの約77%を占める主燃料が液化ガスであり、沸点が軽油よりも低いためと考えられる。したがって、この良好な気化特性からエンジン燃料では排気中の炭化水素排出量に対して優位に働くと考えられる。

比較のため100%ブタンの噴霧も観察した。ブタンの場合、噴射開始後約2.67msecの時点で、すでに気化したと思われる部分が観察された。三種の燃料中、最も早く、かつ急激に噴霧本体の濃度も薄くなっており、液化ガス100%という気化特性の良さを裏付けるデータであった。

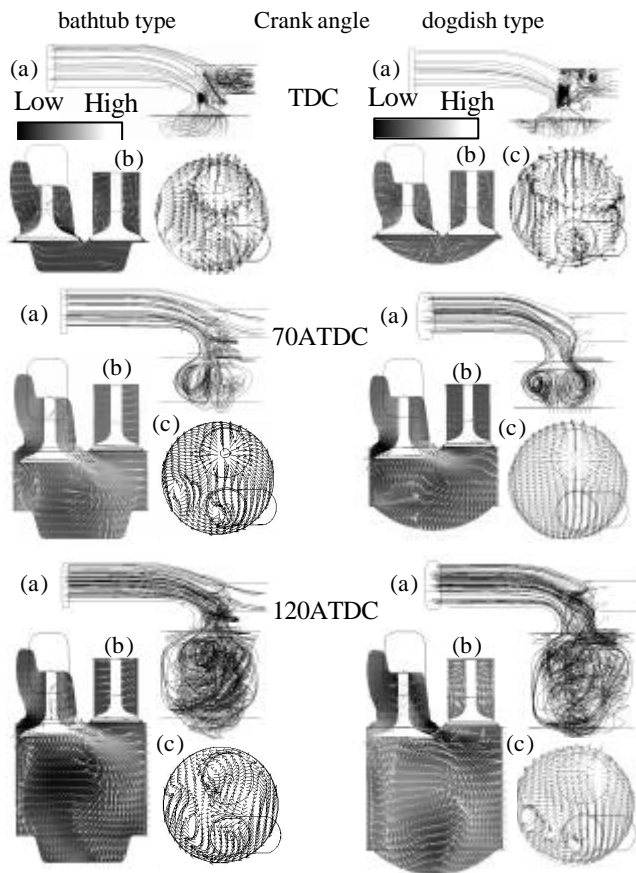
図5に試作トラックの外観を示す。主な改造箇所は燃料供給系、排気ラインに集中し、軽油用に変えて、LPG燃料タンク、LPG用耐圧配管を取り付けた。LPGタンクにはポンプが内蔵されており、燃料供給システムを加圧している。これにより、LPGは液状で燃料噴射ポンプまで供給される。また、LPG自身は硫黄分を含まず、触媒被毒の恐れがないことから、酸化触媒および脱硝触媒による排ガス浄化を検討するために、これらを装着した。燃料噴射についてはエンジン試験同様にECU内のROMの指示値を書き換えるこ

とにより変更した。この試作トラックはG13モード試験を合格し、ナンバを取得している。総走行距離は平成14年3月までに、1号車は約70000km、2号車は約50000kmを達成した。軽油運転と同等の走行が可能であり、また、現在まで燃料噴射ポンプなどに焼きつき等の不具合は生じておらず、燃料の潤滑性能は保たれている。

本研究テーマの今後の発展性を考慮し、分配型燃料噴射ポンプを使用した DME ディーゼルエンジンの性能および排気特性、特に燃料噴射タイミングや EGR が NO<sub>x</sub> 排出量に及ぼす影響について検討した。その結果、シール剤の交換および若干の改良で、分配型燃料噴射ポンプにて DME を噴射することが可能であった。また、燃料温度を低下することで中回転域程度までは軽油と同程度の実質燃料噴射開始時期が得られた。ただし、アイドル時および高回転域では、さらなる燃料噴射開始時期の最適化が必要であった。さらに、無煙燃焼が可能なことから、高負荷域でも EGR による NO<sub>x</sub> 低減が有効であったが、さらなる低減には EGR パイプ径の拡大および燃料噴射開始時期の詳細な最適化が必要であることがわかった。

## 研究のまとめ

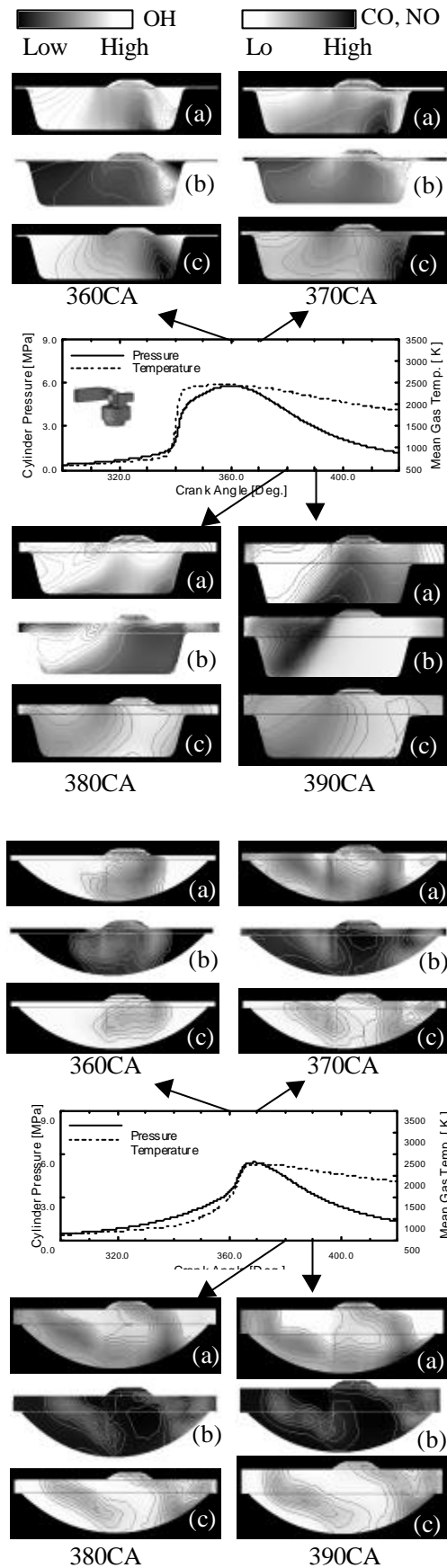
中大型ディーゼルエンジンに代替燃料を利用し、ディーゼルエンジンと同等以上の高い熱効率で、かつ自動車用排気ガス長期規制値の半分以下のレベルを達成することで、都市における環境改善に寄与することを目的とし、層状燃焼エンジンシステムの研究開発を行った。シミュレーションでは層状燃焼時の燃焼室形状の大まかな設計指針が得られたが、より理論的に熱効率の高いディーゼル燃焼に着目し、LPG にセタン価向上剤を添加することでディーゼルエンジンへの適用を実現した。このとき、軽油運転時と同等の熱効率を達成し、NO<sub>x</sub> は最大で 30% の低減、吐煙濃度は高負荷時に若干排出されるのみで大幅な低減が得られた。また、今後の発展性から、近年ディーゼル代替低公害燃料として注目されているジメチルエーテル(DME)によるディーゼルエンジンの性能も検討し、燃料温度の低下および EGR の採用がエンジン性能の向上に有効であることが明らかとなった。



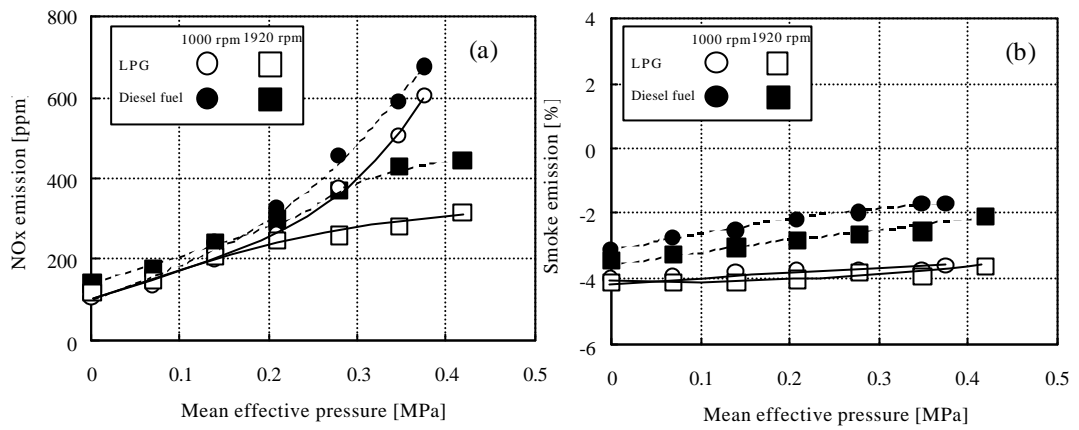
**Fig.1** Flow fields in overlap period and intake process  
(a) Streamline (b) , (c) Velocity field

**Table 1** Engine specifications

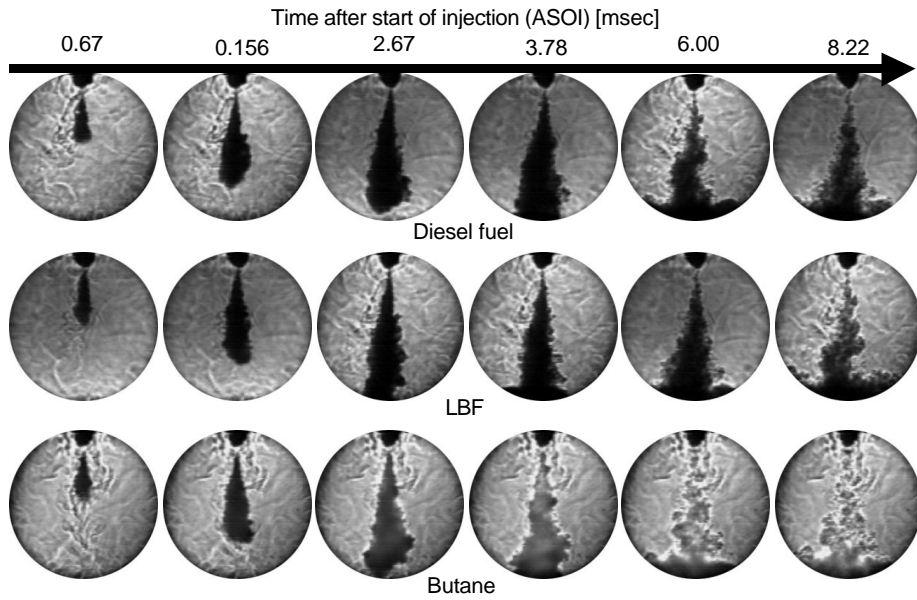
Type	4 cycle, Diesel
Valves	OHV, 2 valves
Fuel delivery	Direct injection
Bore x Stroke	108 x 115 mm
Displacement	4214 cm <sup>3</sup>
Compression ratio	17.5
Rated output	125 PS / 3200 rpm
Injection pump	Rotary distributor pump



**Fig.2** Distribution of (a) CO, (b) OH and (c) NO Concentration



**Fig.3** (a) NOx emission and (b) smoke emission with LPG diesel fuel operation



**Fig.4** Comparison of spray growth processes fueled with (a) diesel fuel, (b) LBF and (c) butane



**Fig.5** An external view of the prototype trucks developed in this work

### 研究発表

発表題名	掲載法 / 学会等	発表年月	発表者
(誌上発表)			
・ Performance and Emissions of a DI Diesel Engine Operated with LPG and Ignition Improving Additives	SAE Paper	2001. 9	Alam、後藤、杉山、梶原、森、金野、本橋、大山
・ CFD study of an LPG DI SI Engine for Heavy Duty Vehicles	SAE Paper	2002.5	Hyun、小熊、後藤
・ Atomization Characteristics for various Ambient Pressure of Dimethyl Ether (DME)	SAE Paper	2002. 5	小熊、Hyun、後藤、金野、梶谷
・ Spectroscopic Investigation of the Combustion Process in DME Compression Ignition Engine	SAE Paper	2002. 5	小熊、Hyun、後藤、金野、大山
・ Spray Characteristics of LPG Direct Injection Diesel Engine	SAE Paper	2003. 3	小熊、後藤、杉山、梶原、森
・ Development of Retrofit DME Diesel Engine Operating with Rotary Distributor Fuel Injection Pump	SAE Paper	2003. 3	木下、小熊、後藤、杉山、梶原、森、渡邊
(口頭発表)			
・ ディーゼルエンジン用セタン価向上剤添加 LPG 燃料の開発	自動車技術会春季大会	2001. 5	杉山、梶原、相良、森、Alam、後藤、本橋、大山、金野
・ LPG ディーゼル燃料用潤滑性向上剤の評価	日本エネルギー学会創立 80 周年記念大会	2002. 8	杉山、梶原、森、福本、後藤

### 工業所有権

特許等の名称	願書年月日	公告番号	公告期日	登録番号