

特集

燃焼と環境

内燃機関の環境対策技術

Environmental Protection Technology of Internal Combustion Engines

村山 正*

Tadashi Murayama

1. まえがき

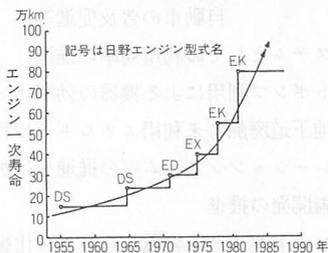
内燃機関は、各種の熱エネルギー変換装置の中でも広く各分野で使用されて居ることは言うまでもない。とくに、自動車を中心とする運輸交通に関しては年々使用台数と走行距離が延びて来て居り、それにともなう各種の公害は深刻な社会問題であって、その対策は当面の急務である。

自動車の原因となって惹き起される公害には排出ガスに起因するものの外に、騒音、振動、あるいは電波障害などがあるが、ここでは本特集の趣旨に従って、とくに自動車用エンジンを中心として、その排出ガス規制ならびに対策技術について概説する。

2. 自動車用エンジンの省エネ、省資源、低汚染化の傾向

環境対策上大きな効果があり、これからも地道な努力の経続が必要なのは省資源、省エネルギー技術であろう。

図-1は、国産のトラック用エンジンの寿命がここ30年程の間にどのように延びて来たかを示すものである。図のたて軸は、車を購入してから最初にオーバーホールをしなければならなくなるまでに走行出来る距離を示すものであるが、1955年には15万kmであったものが、その後、数々の改良を重ねることによって、現在

図-1 トラックエンジンの寿命ののび³⁾

* 北海道大学工学部教授

〒060 札幌市北区北13条西8丁目

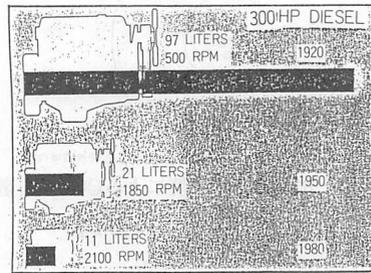
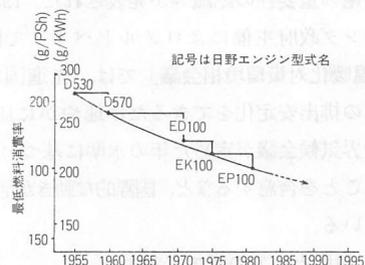


図-2 ディーゼルエンジンの小型・軽量化

は80万kmやがては100万kmにまで寿命が延びようとしている。

図-2は、1920年以降、300馬力のディーゼルエンジンがどのように小型、軽量化して来たかを示すものであり、回転数増加、吸入効率の向上、摩擦損失の低減に加えて、過給機の装着によって、機関の寸法、重量とも、1950年から80年までの30年間に半減して居ることが示されている。

このように、各方面の永年の努力の結果として、エンジンの長寿命化、省資源化が大きく進んで来て居るのであるが、一方、省エネルギーに関しても、めざましい向上がなされて来た。すなわち図-3は、燃料経済性の向上を示すものである。図のたて軸は、最低燃料消費率（1馬力1時間当りの燃料消費量g/PS-hr）であり、1955年当時210g/PS-hr（正味熱効率率30%）であったものが、現在は150g/PS-hr（42%）を切るよ

図-3 トラックエンジンの燃料経済性向上³⁾

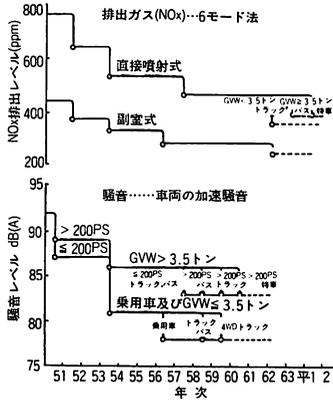


図-4 我が国における排ガス、騒音規制の経過

うに成って来た。(船用の大型エンジンでは、正味熱効率53%をこえたものもある。)

勿論その一方では、低汚染化に対する懸命な努力が続けられて来て居る。図-4は、我が国における排ガスおよび騒音規制の経過を示すものであるが、低汚染型エンジンの実現に向けてなされて来た努力の跡をうかがい知ることが出来る。

3. 自動車の保有台数および走行距離の増加

しかし、この間に日本の経済規模は大きく拡大し、また物資の輸送は自動車によって集約的に行なわれるようになって来た。

図-5は、昭和40年以降の自動車保有台数の増加を示すものであるが、21年の間に保有台数は6.5倍に増加して居る。また図-6は、昭和46年以降の走行距離の伸びである。

これらの結果、自動車用燃料の消費量も大幅に増加して居る。すなわち、図-7に示すように昭和46年から62年までの16年間にガソリンの消費量は1.7倍、軽油

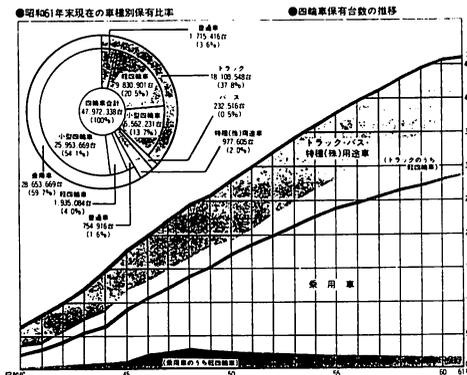


図-5 我が国における自動車保有台数の推移⁴⁾

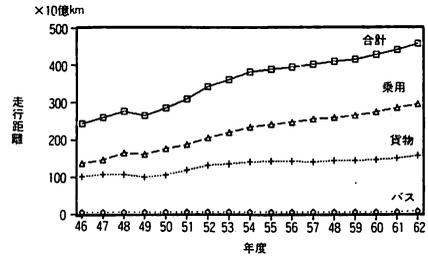


図-6 自動車走行キロ数の推移⁵⁾

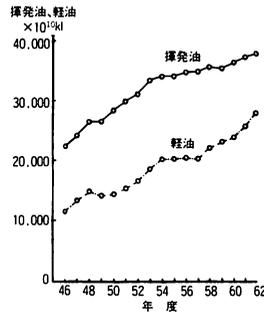


図-7 燃料消費量の推移⁶⁾

消費量は2.4倍に増えて居り、とくにディーゼル機関を搭載するバス、トラックの伸びが著しいことが明らかである。

図-8は、昭和60年度における車種別のNOxおよび浮遊状微粒子(パーティキュレート・マター、PM)排出量への寄与を示すものである。図において、燃料経済性にすぐれる直接噴射式ディーゼルエンジン(DIエンジン)を使用するトラックのNOxおよびPMに対する寄与が大きいのが明らかである。なお、沿道大気中の浮遊状物質に対するディーゼル自動車の寄与は約30%となっている。

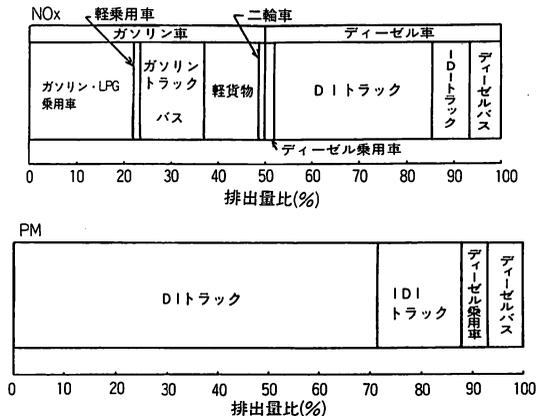


図-8 昭和60年度NOxおよびPM排出量の車種別寄与率⁷⁾

このような状況の中で、永年に亘る規制強化の結果として低減の一途をたどって来たNO_xの濃度が、ここ数年再び増加する傾向を示して居り（図-9）とくに東京、横浜、大阪などの大都市圏でその傾向が著しい。

一方では、エンジン駆動コ・ジェネレーションシステムの急速な普及も始まって居り、排ガス規制の強化が必然であるが、それに対してどのように対処するかについて、各方面での真剣な検討が続けられている。

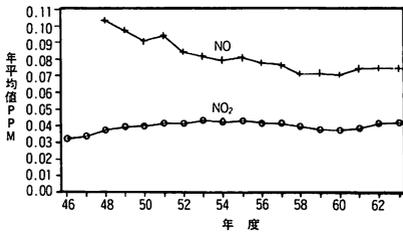


図-9 NO_x濃度の推移¹⁾

4. ガソリンエンジンの排気対策^{1),2)}

従来、ガソリンエンジンの排気対策としては、可能な限り希薄な混合気での安定した急速燃焼を確保しな

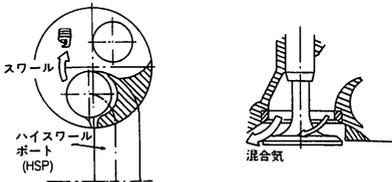
がら、これに排気再循環（EGR）を組み合わせてNO_xの低減を図り、酸化触媒によってCO、HCを低減して規制値をクリアすることが行われて来た。その為に吸気系統に工夫をこらしてスワール（吸気旋回流）を強化したり、あるいは、副室式の層状給気方式により副室中の濃混合気に点火し、ガスの噴出により室内に供給された希薄混合気に着火して、その燃焼を促進するCVCC方式、更には2本の点火プラグを装備して火炎伝播距離を短縮し燃焼期間の短縮を図りながら、希薄混合気の着火確率を大きくして燃焼のサイクル変動を低減するNAPS-Z方式など、いくつかの方式が考案され実用化されて来た。（図-10）

しかし最近では、高性能で安定性にすぐれた三元触媒（後述）とO₂センサーとが開発され、空燃比制御によって理論空燃比近傍での燃焼を行なわせて、三元触媒を機能的に作動させ、それとEGRとを組み合わせる方式が主流に成って来て居る。ただし乗用車の一部とガソリントラックにおいては、EGRと酸化触媒とを組み合わせたシステムも使用されて居るが、規制の強化にともなって、三元触媒方式に移行して行くものと考えられる。ただし、高負荷で使用される頻度の多いトラック用エンジンにおいては、触媒の熱耐久性の向上が一つの課題であろう。

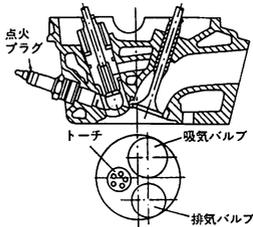
4.1 エンジン改良による低汚染化

前述したような希薄混合気での安定燃焼をも含めて高出力、高効率でしかも低汚染は燃焼室の開発がなされて来ている。

エンジン諸元のうちで排出ガスに対して影響を及ぼすのは、行程容積、ストローク/ボア比（S/V比）、燃焼室形状、圧縮比、ピストントップランド回りの寸法あるいはバルブタイミングなどである。たとえば、行程容積が大きくなるとS/V比が小さくなるので、未燃炭化水素（HC）は減少しNO_xは増加する。またS/V比はロングストロークほど小さく成るのでHCが減少し、熱損失の低減にともなってNO_xはやや増加する。ピストントップランドとシリンダとの隙間やピストンリング溝の付近の混合気は燃焼のさい火炎が到達しにくいのでHCの排出量を増加する。なお、HCは排気系で酸化され、酸化は高温なほど促進されるので排気マニフールドを積極的に保温することなども行われている。一方、燃料供給装置としては、従来の気化器に代って、電子制御燃料噴射方式が用いられ、マイコンによるエンジンの総合集中制御が行われるようになって来ている。



(1) マツダ安定燃焼方式の燃焼室とインテークポート形成



(2) 本田CVCC-II方式燃焼室



(3) 日産2点点火方式燃焼室

図-10 ガソリンエンジンの各種低汚染型燃焼室²⁾

4.2 EGR (排ガス再循環)

排気の一部を吸気系に戻して燃焼室内に再循環させることによって、混合気中の不活性ガスの割合を増加させ、燃焼温度を低下させてNO_xの生成を抑制することが出来る。しかし一方では、燃焼速度が低下して燃焼が不安定になりやすいので、これとエンジンの改良とを組み合わせ、高効率で低NO_xな燃焼の実現を目指している。図-11はEGR装置の1例である。

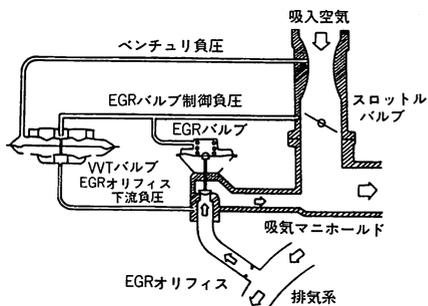


図-11 EGR装置²⁾

4.3 三元触媒

三元触媒は、一つの触媒により理論空燃比付近でH₂C、COのCO₂、H₂Oへの酸化とNO_xのN₂への還元を同時に行うものであって(図-12)空燃比のフィードバック制御との並用によって、図-13に示すような狭い空燃比範囲でエンジンを運転しながら排気の後処理

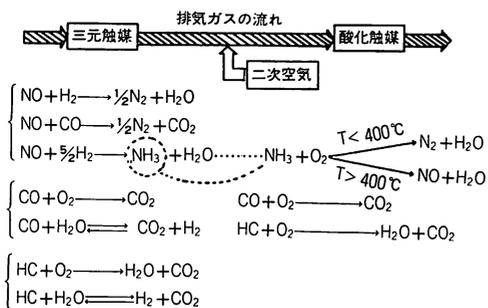


図-12 三元触媒の機能+酸化触媒システムにおける反応²⁾

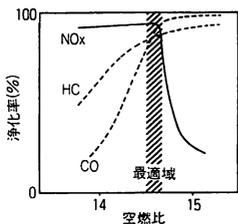
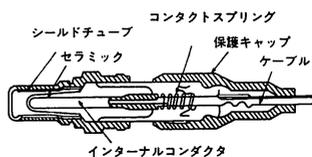


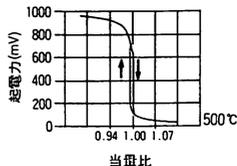
図-13 三元触媒の浄化特性²⁾

を行うものである。触媒としてはPt/Rhが多く用いられているが、1部ではやや低価格のPd/Phも用いられている。触媒担体はそのほとんどがモノリス型であってセラミックス材が広く使用されているが、最近では一部にメタル製のものも実用化されている。

4.4 O₂センサーと空燃比のフィードバック制御
電子制御式燃料噴射装置やフィードバック式気化器を用いて、O₂センサーにより検出した排ガス中の酸素濃度から空燃比を判断して、燃料供給量が理論空燃比となるような制御がなされている。



O₂センサーの構造



O₂センサーの特性

図-14 O₂センサーの構造

O₂センサーとは、図-14に示すようにジルコニア管の外側(排ガス)と内側(大気)とのO₂濃度差によって、ジルコニア管に酸素イオンが通過して起電力が生ずる性質を応用したものであって、理論空燃比付近でO₂濃度が急変して起電力が大幅に変化することを利用して、空燃比の電子制御を行なっている。

4.5 ブローバイガス、およびガソリン蒸気の放出防止

ブローバイガスは、圧縮から膨張行程にかけて、ピストンリング部からクランクケースにリークする高濃度のHCを含むガスであるが、これは全量を吸入空気とともに再燃焼させている。また主に燃料タンクの大气開放部から直接に放出される低沸点成分は、燃料タンクの大气開放部を活性炭入りの容器に連結して吸着させ、エンジンの作動により吸入させて、ガソリン蒸発による大气汚染を防止している。

5. ディーゼルエンジンの排気対策^{1),2)}

前述のように、都市部の環境汚染に対して最も寄与度の高いのは、直接噴射式(DI)ディーゼルエンジンを搭載するトラックである。

表1 EPAの排ガス規制スケジュール

規制開始 を定める 年	パティ キュレート (g/BHP. hr)	NOx (g/BHP. hr)	備 考
1987	—	10.7	
1988	0.60	6.0	最初のパティキュレート規制
1991	0.25 0.10	5.0	市街バス以外 市街バスのみ
1994	0.10	5.0	すべてのHeavy-Dutyディーゼル車

米国EPA（環境庁）では、表1のように、バス、トラック用ディーゼルエンジンのパティキュレートおよびNOxに対する規制を公示したが、一方、東京都においては、コ・ジェネレーション用の燃料消費量25 l / hr以上のディーゼルエンジンに対して、NOxの排出許容濃度を300ppm (O₂=%において)として、平成4年までにその実用化を目指している。しかし一般にNOxとパティキュレート (PM) はトレードオフ的な関係にあるので、その同時低減を行なって厳しい排出基準に対処して行くのはきわめて困難な問題である。

一般にNOxは、燃焼初期の急激な発熱により生成されるので、初期の熱発生を出来るだけ低く抑えることが必要であるが、一方でPMは燃焼の後期、すなわち拡散燃焼期における燃料と空気との混合不足により発生する。従って、初期の急激な発熱を押えながら燃焼の後期を活性化して、なるべく短期間に燃焼が終了するような工夫が必要である。従ってNOx低減の観点からは燃料のセタン価は高い方が良いが、PM低減のためにはセタン価はやや低目の方がぞましい。

5.1 燃料噴射時期の遅延

図-15に示されるように、燃焼室形式の如何に拘らず、噴射時期をDIエンジンで上死点前8°位、IDIエンジンで上死点位まで遅らせることによって、燃焼の温度、圧力を下げてNOxを低減することが行われて

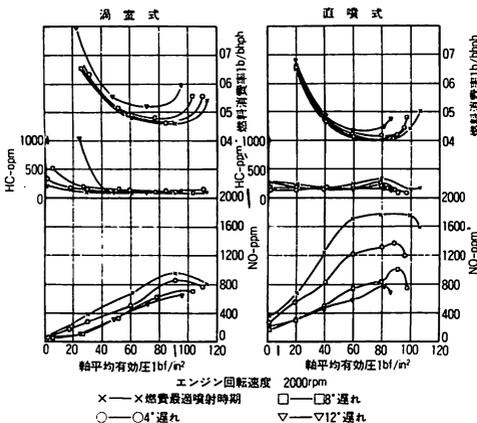


図-15 噴射時期遅延が排出ガス等に及ぼす影響²⁾

いる。しかし一方では始動性が低下し、燃費、吐煙も悪化するので、噴射時期を可変にしたり、燃焼室内のスワール（吸入渦流）あるいはスキッシュ（押し込み渦流）を強化したり、さらには噴射圧力を高くして、噴霧の微粒化と混合を促進するなどの、いくつかの手法と組み合わせるのが普通である。

5.2 燃料噴射系による低汚染化

噴射圧を高くして燃料噴霧の微粒化を強化し、空気と燃料との混合を促進すると共に、噴射率を高めて燃焼を早期に終了させようとする試みが盛んになされている。また、ディーゼルエンジンにおけるHC生成の一つの要因として、噴射終了後のあとだれがあるので、噴射弁先端のサックボリュームを小さくすることも行われている。なお、小型エンジンで使用されている分配型の噴射ポンプでは、噴射時期の回転数、負荷に対する制御、また噴射率制御が容易であるが、可変噴射時期、高圧噴射あるいは電子噴射などによるNOxとPMとの同時低減も研究されている。一方、主噴射に先立って少量の燃料を噴射し、これと高圧噴射とを組み合わせ、燃焼初期の衝撃的な発熱を押えながらNOxの排出傾向を抑制しようとする試みもなされている。

5.3 燃焼室系による低汚染化

IDIエンジンでは、副室の容積、形状、連絡孔の大きさや噴出方向、あるいはピストン頂面の形状、そして噴射弁の位置と噴射方向などが、排気に対する影響因子であるが、DIエンジンでは、ピストンキャビティの形状と諸元、それとスワールやスキッシュさらに噴射系とのマッチングによって排気エミッションの低減を行なうべく、多くの実験が行われて来た。それらの中で、キャビティの入口径を小さくしたりエントラント形によれば、燃焼後期にある種の攪乱を与えること

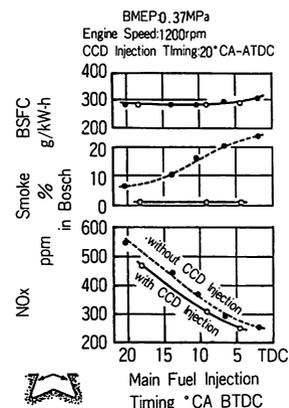


図-16 燃焼後期攪乱の効果⁸⁾

が出来るので、噴射時期遅延と組み合わせると低NOx、低吐煙化を実現することが出来る。

筆者らは、DIエンジンに対してCCDと名付ける小さな燃焼室を取り付け、そこから燃焼の後期に少量の燃料を噴射して燃焼を活性化することを試み、NOxの若干の低下とともにPMの大幅な低減が得られることを見出して、実験を続けている。(図-16)

5.4 吸、排気系による低汚染化

吐煙低減のためには、たとえば排気タービン過給による吸入空気量の増加が有力な一手段である。低速で所定の吸気圧を確保しながら、高速時には余分な給気あるいは排気を逃がす、いわゆるウエストゲート式あるいは、機関回転速度に応じてタービンの流路面積を変えて、タービンを常に最良の状態に運転しようとする可変容量型タービン(VGT)の装備も行われているが、吸気温度の上昇を防ぐために、これにインタークーラーを組み合わせるのが普通である。なおスワールに関しては、機関の回転速度に応じてその強さを変化する可変スワール方式も試みられる。

5.5 EGR

ディーゼルエンジンにおいても、ガソリンエンジンと同じように、一部ではEGRの装備がなされている。これは低負荷運転時の対策としては有効であるが、高負荷運転時には空気量が不足するので、かえって吐煙が増加することにもなる。また多量のEGRはすすおよび燃料中の硫黄分によってエンジン各部の腐食摩耗を惹き起すので、燃料中のS分の低減とエンジン各部の表面処理、材質および、潤滑系の改良などが研究されている。

5.6 パティキュレート・トラップ

パティキュレートをフィルタに捕集する方式が検討

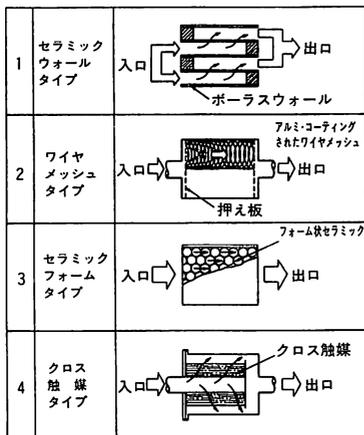


図-17 各種のパティキュレート・トラップ²⁾

されているが、この場合には、バーナや電気ヒータなどで捕集したパティキュレートを再燃焼することが必要となる。再燃焼のためには600℃以上の温度が必要であり、燃焼のコントロールがむずかしい問題である。トラップにおける燃焼制御、トラップの耐久性、信頼性など解決すべき問題が残されている。図-17は、各種のパティキュレート・トラップを示すものである。

6. 低公害エンジンの技術開発

以上、従来型のエンジンにおける各種の低汚染技術について、その概略を述べて来たが、一方では、低公害エンジンについての色々な研究が進められている。すなわち、ガソリンおよびディーゼルタイプのメタノールエンジン、圧縮天然ガス(CNG)を燃料とするエンジン、水素エンジン、ガスタービン、あるいはスターリングエンジンなどである。これらの中で、CNGエンジンを搭載する自動車は、世界の各地でかなりの台数が実際に使われて居り、メタノール自動車もフリーテストが実施されている。また、ブラジルではかなり早くからエタノール自動車が使われている。しかし、これらのエンジンを我が国で実用化する場合には、燃料のコストが高く、供給システムが未整備であるなど解決すべき問題が多く残されている。

7. あとがき

年々厳しくなる一方の排気規制、たとえば1994年のEPAの規制をクリアするためには、上述したようなエンジン関連の対策技術だけでは不十分であって、潤滑油消費量を低減して、それに起因するパティキュレートを防ぎ、燃料の低硫黄化によりサルフェートの排出を低減すること、あるいは、排気脱硝技術の開発や、信頼性の十分なトラップの開発など、取り組まなければならない課題は多い。技術の進展が切望される。

引用文献

- 1) 日本における自動車排ガス規制と対策 1989 JSME-KSME ジョイント・シンポジウム資料 齊藤 孟
- 2) 自動車工学便覧, 第3編(社)自動車技術会編.
- 3) エンジンのロマン 鈴木 孝 プレジデント社
- 4) 1987日本の自動車. 日本自動車工業会
- 5) 運輸省「陸運統計要覧」昭62年度
- 6) 通産省「昭和63年~67年度, 石油供給計画」
- 7) 環境庁大気保全局 資料(平成元年12月)
- 8) 日本機械学会論文集55巻, 517号(1989-9) p2919 村山 他