

ディーゼルエンジン車はどこまでクリーンか

To What Extent Can a Diesel Automobile Be Cleaned ?

村山 正*

Tadashi Murayama

1. まえがき

与えられた表題を“ディーゼルエンジン車はどこまでクリーンにしなければならないのか”と読みかえて話を進めて見たい。

一口にディーゼルエンジンと云っても、対象となるのは自動車に限らず、船用、農工建設機械、あるいはコ・ジェネ、ヒートポンプ、発電、定地式など、大きさも使用方法も異なる様々なエンジンについて、それぞれ独自の規制が進められている。また、小型高速エンジンに有効な対策が、必ずしも大型低速エンジンに対して効果的とは限らない。

しかし、対象を自動車用エンジンに限定して考えると、現存する一番厳しい規制は、US-EPA-FIPの1998年ULEV(Ultra low emission vehicle)規制、すなわち、PTM(微粒子)=0.05g/bhp-h、NOx=2.5g/bhp-hであろう。これに対して、現在までに行われて来た色々な努力によって、PTMの規制値には、何とか手がとどきそうなのが実状かと思われるが、NOxに関しては、現在のレベル(1994年の規成値)を半減させることが必要である。このような観点から、現在までに試みられ、あるいは実用化に向かいつつあるいくつかのアプローチを取り挙げて、対策のヒントになりそうな事柄について考えて見たい。

2. エンジンにおける対策

2.1 燃焼室および噴射系統

ここ10年程の間、たとえば、トロイダル型燃焼室をリエントラント型に代え、燃焼室の無駄容積を低減する一方、過給や吸・排気系の改良などの手段を重ねて、燃焼室内における空気流動の最適化を図る一方で、高圧噴射の実現に関する努力が各所で続けられている。

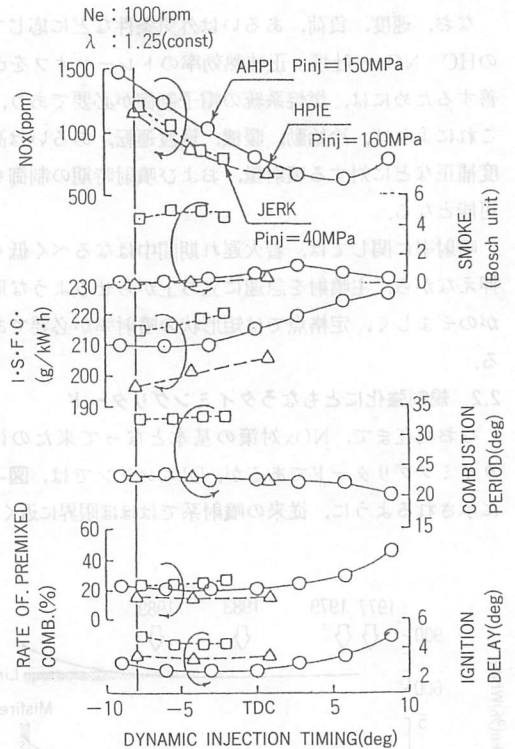


図-1 高圧噴射によるトレードオフの改善

そして、噴射圧力を150~160MPaまで上げることによって、とくに大幅なタイミングリタードを行った場合にも、燃費を犠牲にすることなしに、 $\lambda = 1.5$ 付近までほぼ無煙な燃焼が実現されている¹⁾(図-1)

この場合、騒音、および振動を押さえながら燃費を確保するためには、小噴孔ノズルの採用が必要であるが、この場合、噴射時間が長くなるにも拘らず燃費が悪化しないのは、微粒化と乱れの強化による混合気形成の改善と、それにとまなう燃焼の短縮化によるものである。しかし反面、NOxはほぼ一定に保たれるか、あるいはかえって増加することになる。これは、着火遅れ期間中に噴射される燃料の量、あるいは着火

*北海道大学工学部機械工学科教授
〒060 札幌市北区北13条西8丁目

以前に燃焼室内に準備される混合気の量が増加することに起因するものであって、これに対処するには、初期噴射率を下げるのが有効であり、パイロット噴射と組み合わせて同様な効果を得ようとする試みがなされている。なお、黒煙と同時にSOF（可溶性有機成分）の低減をも実現するためには、噴射終わりにおけるスピル率を改善し、噴射弁のサックおよびホルのボリュームを小さくしながら、適切なスワールの導入によって、噴霧がシリンダ壁の冷所に衝突付着しないようにしなければならない。

なお、速度、負荷、あるいは外気条件などに応じてのHC-NOx-吐煙-正味熱効率のトレードオフを改善するためには、燃焼システムの電子制御が必要であり、これによれば、冷始動、暖機、過渡運転、あるいは高度補正などに対する噴射量、および噴射時期の制御も可能となる。

噴射率に関しては、着火遅れ期間中はなるべく低く抑えながら、主噴射を急速に立ち上がらせるような形がのぞましく、定格点では矩形の噴射率が必要である。

2.2 規制強化にともなうタイミングリタード

なお現在まで、NOx対策の基本となって来たのはタイミングリタードであるが、DIエンジンでは、図-2に示されるように、従来の噴射系ではほぼ限界に近く、

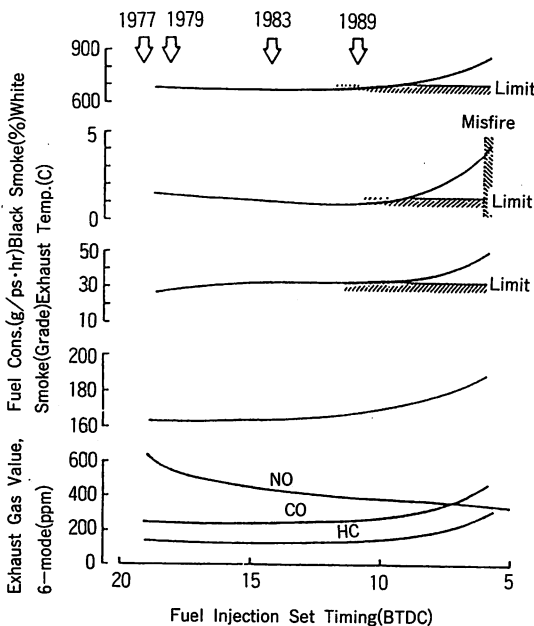


図-2 規制強化とタイミングリタード

これ以上のリタードは、高圧噴射あるいはIDI方式を採用するのであれば困難である²⁾。なお、サーマルNOxの低減に対してはチャージクーリングが効果的であるが、一方では着火遅れの制御が必要となる。

2.3 燃焼後期の攪乱

NOxを増加させずに微粒子を低減するためには、初期にはなるべく混合を抑えて穏やかに燃焼を進行させ、NOx生成の要因となる衝撃的な燃焼をできるだけ抑えながら、燃焼の後期に強力な攪乱を導入して、微粒子を積極的に再燃焼させるのが有効である。このことによって、燃焼率曲線の重心点を燃焼後期に移動させながら、燃焼期間を短く押さえることができる。

そこで筆者らは、直接噴射式機関の燃焼室に小さな攪乱流生成燃焼室 (Combustion Chamber for Disturbance 以下 CCD) を付加することを考えた³⁾。この方式では、燃焼による強攪乱を燃焼場を導入することができ、さらにCCDへの燃料噴射時期および量を変えることによって、攪乱の生成時期と強さを自由に設定することができる。供試システムの性能を図-3に示すが、□印はベースエンジン、△印はCCD

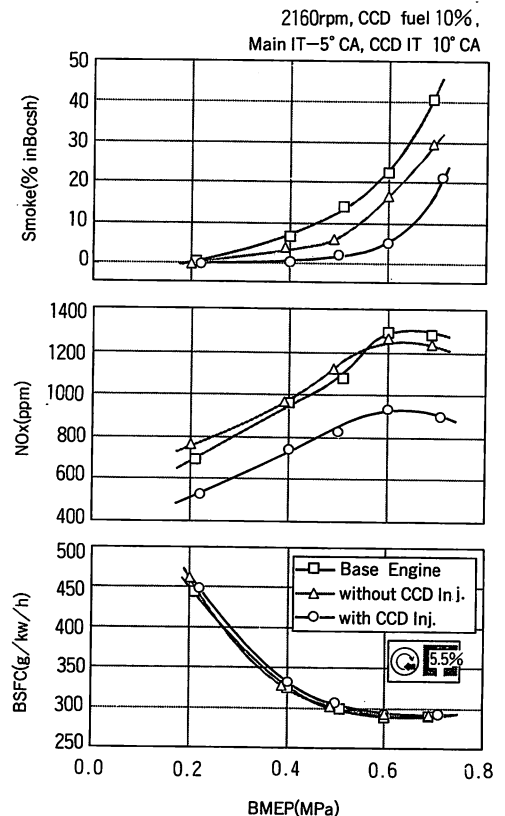


図-3 CCD方式による機関性能

室への噴射を行わない場合、そして○印はCCD噴射を行った場合の性能を、それぞれ示している。図に見られるように、CCDによる燃焼後期の攪乱によって、同一燃費でNO_x、吐煙の大幅な同時低減が得られている。なお、燃焼後期攪乱に関しては、ラノーバ式の空気室、単なる副室の設置、あるいは、副燃焼室からの空気の押し出しなどによっても、類似した効果が得られることが確かめられている。

2.4 OSKA-DH方式⁴⁾

噴霧の先端では、燃料と空気の混合が不十分なので煤が発生しやすい。そこでOSKA-DHエンジンでは、噴霧の先端を燃焼室内に設けた邪魔板に衝突させて、煤の生成と酸化とをコントロールすることを試みている。これによれば、拡散燃焼を活性化して、燃焼期間を短縮することが出来るので、その結果、図-4に示されるように、NO_x、吐煙、HC、および燃料消費率の同時低減が得られている。

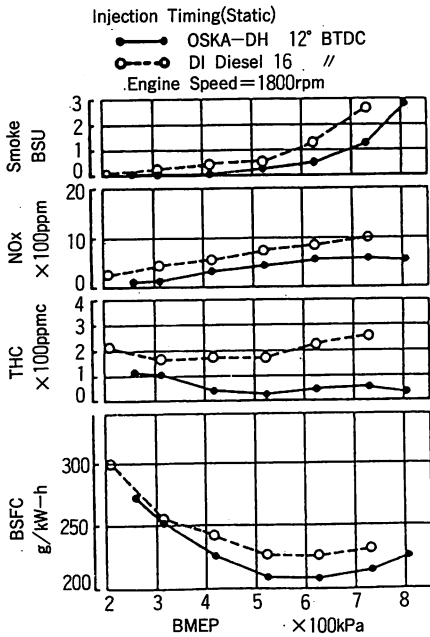


図-4 OSKA-DHエンジンの機関性能

2.5 EGR (排気ガス再循環)

EGRは、すでにヨーロッパにおいて、中小型ディーゼルの一部で実用化されている。ただし、低速、軽負荷時には、吐煙の増加をまねくことなしにNO_xの低減が可能であるとしても、ほとんどの運転範囲では吐煙の増加をもたらすので、これに対処するためには、EGRガスの冷却が必要となる。従ってEGRは、これ

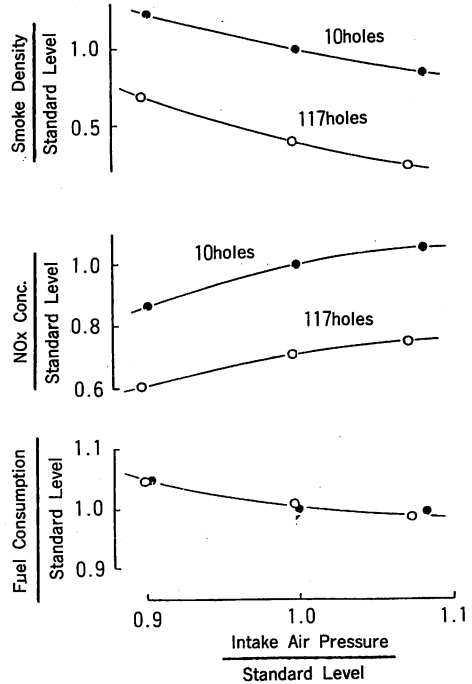


図-5 多孔燃料噴射によるNO_x、吐煙の低減

を電子制御式の噴射率と組み合わせることにより、回転数、負荷、および温度に対応させたフィードバック制御が必要になる。なお、燃焼改善によって吐煙が低減するにつれて、パーティキュレート中のSOF分の占める割合が増加するので、これに対処するためには、後述するように酸化触媒の採用が必要となってくるが、これとフィードバック式EGRとの組み合わせによって、図-5に示されるように、NO_x、吐煙のトレードオフ関係をかなり大幅に改善することが可能である⁵⁾。

ただし、EGRの適用に際しては、潤滑油および潤滑系の見直しが必要である。そして、低温運転時の腐食摩耗を防ぎ、酸化触媒によるSO_xの増加を起こさないためには、燃料中のS分の削減が是非とも必要となる。

2.6 多孔燃料噴射によるトレードオフの改善⁶⁾

一般にNO_xは、燃焼室空間における局所的な高温によって生成されるものと考えられる。そこで、燃焼室内の温度を均一化するならば、燃費を犠牲にすることなく、NO_x・吐煙のトレードオフを改善することが可能である。

図-6は、三井造船において試みられたアプローチであるが、ボア400mmのシリンダに39個の噴射弁、117噴孔からの噴射を行っている。これによれば、2噴射

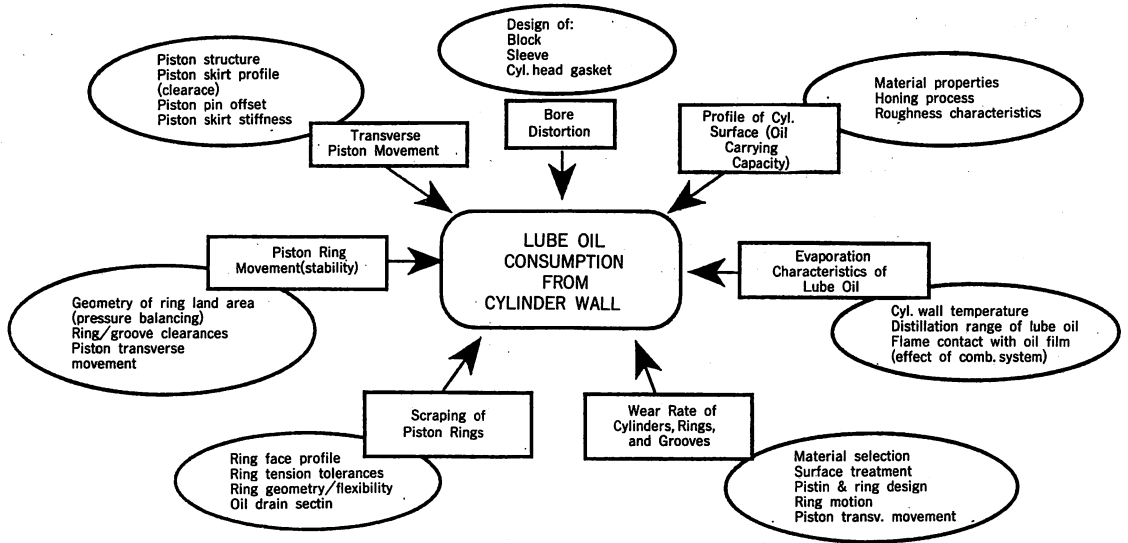


図-6 シリンダ壁を通してのオイル消費に対する影響因子

弁, 10噴孔と比べて, 噴射期間はやや長くなるものの, 燃費を悪化させることなく, 約30%のNO_x低減と60%近くの吐煙低減とが得られている⁶⁾.

2.7 潤滑システムの改良

上記のような, 燃焼, および噴射システムの最適化によって, 燃料からのSOFとDry Sootとが低減するにつれて, 潤滑油からのSOFが微粒子の中で占める割合が増加して来ている. その対策としては, まずは, シリンダ壁を通してのオイル消費の低減が必要であり, 第二には, バルブステム, ターボチャージャ・シャフト, ブローバイ・リターンなどを通して吸排気システムに侵入するオイルの量を, 可能な限り削減することであろう. そして最後には, 酸化触媒などの後処理デバイスの耐久性に対して悪影響を及ぼさないような性状のオイルの開発が必要である. 図-7は, オイル消費に対する影響因子を総括して示したものである⁷⁾.

3. 後処理デバイス

3.1 パティキュレート・トラップ⁸⁾

排気中のパティキュレートを画期的に低減する手法としては, パティキュレート・トラップが考えられている. この場合フィルタ材料としては, メタル・ワイヤ・メッシュ (Johnson Matthey), セラミック・フォーム (Cercona Alusuisse), ムライト・ファイバー・セラミック・コルゲート・ハニカム (松下電器), クロスフロータイプ・セラミック・フィルム (旭硝子), あるいはハニカムタイプ・セラミック・モノリス・フィルタ (日本ガイシ, Corning) など, 色々なものが開発試験されている.

トラップで難しいのはフィルタの再生である. これには, 鉱山用, トンネル工事用ホイールローダなどで試みられている燃焼による自然再生, Volvo, Donaldson, Hussなどで開発が進められてきた電器ヒータ加熱, Iveco/Dereco, MAN, KHD, Zeuna Starker, Webastoなどで試験されているバーナー再生, あるいは排気スロットリングとMn, Cu, Fe, Ce化合物など燃料添加助燃剤により再生温度を下げるThessaloniki/Elboの方法, Mann & Hummel/M. Benzによる触媒コーティング法など, 様々な方式が試みられている. この場合, 触媒なしでは500~600℃である作動温度が, 触媒コーティングで400℃まで下がり, CuまたはMn添加剤の使用により, 220℃まで再生温度を低下させることが出来る. その内のあるものはすでに市販され, また, ドイツ環境省による1500台のバ

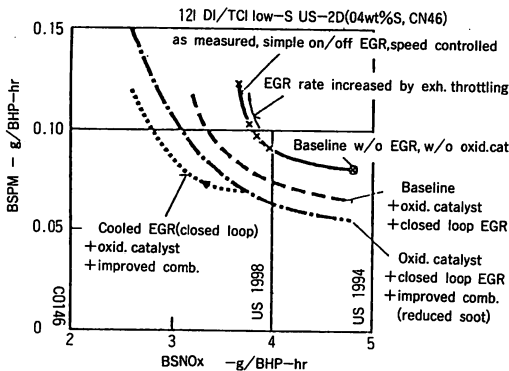


図-7 EGRによるトレードオフの改善

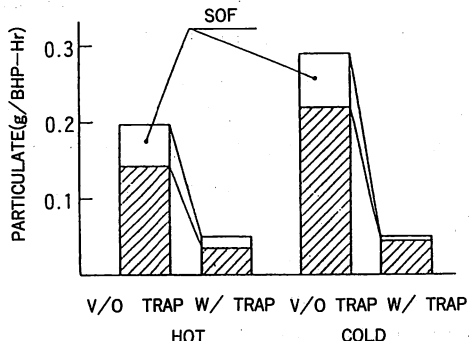


図-8 EPAトランジェントテストにおけるパティキュレート・トラップの効果

スの実車運転，アメリカ各都市におけるフリートテストなどが活発にくりひろげられているが，いずれにせよ，信頼性および耐久性の向上が問題であろう。図-8は，トラップによるパティキュレートの低減を示す一例である。

3.2 酸化触媒 (OCC)

酸化触媒によれば，吐煙，およびNO_xに対して何ら影響を及ぼすことなしに，SOFおよびガス状HCを低減することが出来る。ただし，SO_xの増加を防ぐためには，S=0.01w%以下の低硫黄軽油の使用が必要である。

3.3 SCR (Selective Catalytic Reduction)

最近，排気系におけるNO_x還元触媒に関する研究が盛んに行われている。これには，アンモニアまたは尿素を還元剤とする方式と，銅イオン交換ゼオライト，水素化ゼオライト，あるいは銅アルミナ触媒などによる方式がある。前者は，すでに固定発生源において実用化されており，ACEでも車載型に関する実験が行われているが，これによれば，高い転換率が得られるものの，コストが高く，余剰のアンモニアまたは尿素的処理が必要になるなど，いくつかの困難をともなうものと考えられる。

一方，後者によれば，コスト的には余り問題はなく，SOF，HC，あるいはCOなども還元剤として消費されるので好都合である。ただし前者に比べると転換率が低く，多量のHC，COが必要となる。また，排気中の水蒸気，燃料中のS分の影響など不明な点もあり，活性温度範囲が狭いという難点もあって，今後解明されなければならない問題が多く残されている。しかし最近，岩本らは，白金イオン交換ZSM-5触媒 (pt-Z)を開発して，実際のエンジン排ガスに適用した

場合の活性温度，および水分の影響を評価した結果，図-9のように，CuZに比べて最大活性温度が低く，NO_xの浄化率が高く，そして水分の影響はごくわずかであることを確かめている⁹⁾。

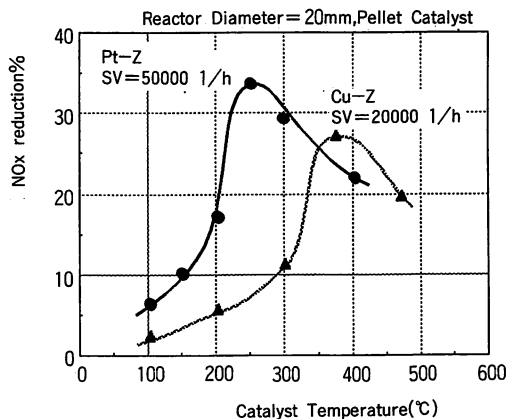


図-9 Pt-Z触媒の性能

4. 燃料サイドからの対策

4.1 改質軽油

硫黄の含有量を0.01w%まで下げ，アロマ含有量を減らし，C/H比を小さくしながら蒸留性状をナロウカットにする一方，セタン価を55程度まで向上させ，含酸素基材を混合する，いわゆる改質軽油の研究が進められている。セタン価に対しては，セタン価1の向上によりNO_xを0.041g/bhp-hr低減できると言う報告があるが，セタン価が高すぎた場合には，燃焼が長引いて，吐煙が発生し，燃費も悪化すると云う結果をまねくので注意が必要である。

なお，含酸素基材を燃料に添加するならば，拡散燃焼の初期における急速な熱分解過程において，有効に酸素を供給することが出来るので，白煙，低温始動性，およびエンジン騒音なども同時に満足させながら，TPMを5~20%低減することが可能とされている。

研究の対象として考えられている含酸素基材には，アロマチック・アルコール，アリファチック・アルコール，ポリエーテル・ポリオール，グリコール・エーテル，メチル・ソーヤート，あるいはデグライムなどがある¹⁰⁾。

なお，ヨーロッパ，とくにフランスにおいては，ナタネ油のメチルエステルを5%混合した軽油が，TOTAL，あるいはELFなどのスタンドにおいて販

売されているが、植物油には10%程度の酸素が含有されているので、この種燃料によって低吐煙な運転の実現が可能である。

4.2 含水燃料

何らかの方法で燃焼室内へ水を導入することによって、燃費を犠牲にすることなく、NO_x、吐煙の大幅な同時低減が可能である。そして、たとえば水エマル

ジョンは、コ・ジェネレーション、あるいは船用主機などにおいて、一部ではかなり長時間のフィジビリティ・テストが行われてきている。

図-10は、高圧噴射の間に生ずる負圧を利用して、燃料噴射系から水を噴射する三菱重工の方式であるが、これによれば、70%の水添加により40%程度のNO_x低減を、燃費を増加させることなしに実現している¹¹⁾。

また、油中水滴型のエマルジョンによれば、水の気化；水蒸気による希釈、マイクロ爆発効果、噴霧貫徹力の増加、噴霧束への空気巻き込みの強化、局所的な高温部分における燃料の熱分解傾向の抑制などの種々の効果によって、図-11に見られるように、低NO_x、低吐煙、しかも高効率な運転が可能である¹²⁾。ただし、C重油のような高粘度油では、マイクロ爆発効果は期待できず、水添加量とともに燃焼期間が長くなり、燃費が悪化することにもなる。

4.3 金属塩水溶液の噴射によるトレードオフの改善¹³⁾

図-12は、各種金属塩および水、酢酸ナトリウム水溶液の噴射による、NO_xおよび吐煙の低減効果を示すものである。いずれも、NO_x低減に対して大きな効果を示し、ナトリウム塩、カリウム塩、およびカルシウム塩の各水溶液では、排気黒煙の低減も同時に認められる。ただし、SOFは若干増加し、ナトリウムに起因する水溶性粒子の増加が原因となってTPMが増加する。

なお、燃焼後期の膨張行程において、尿素水溶液を

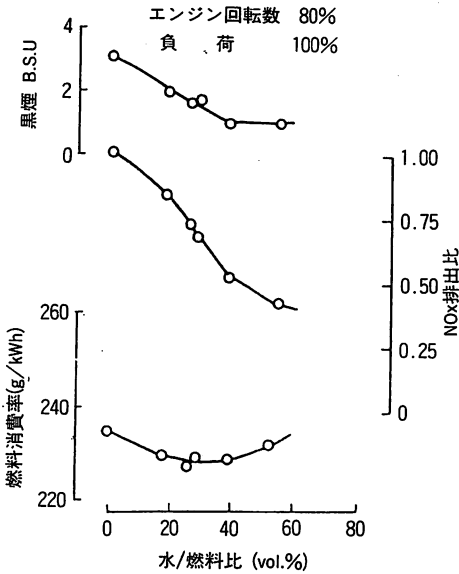


図-10 燃料・水層状噴射システムによる効果

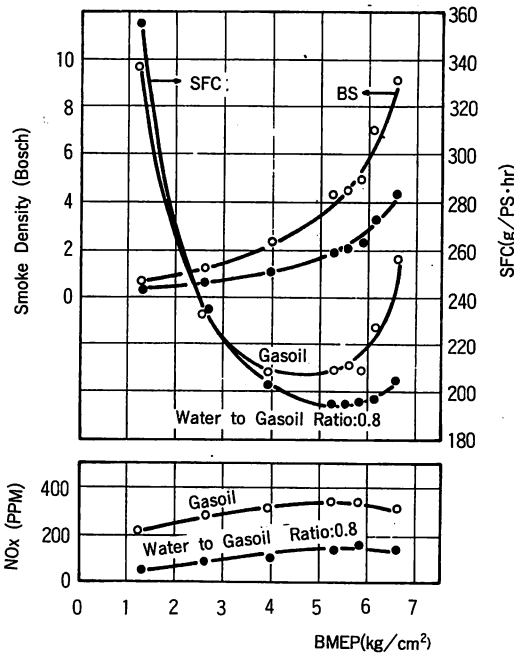


図-11 水・エマルジョンによるトレードオフの改善

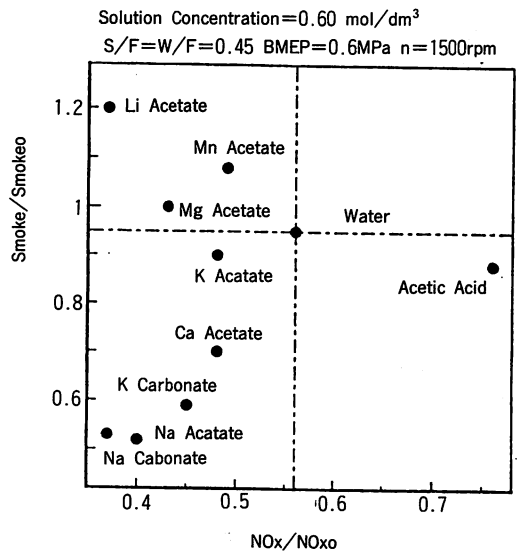


図-12 金属塩水溶液噴射によるNO_xと吐煙の同時低減

燃焼室内に直接噴射してNO_xの急速還元を行なえば、吐煙および燃費を悪化させることなしに、最大60%のNO_x低減が可能である。一方、Texaco社の報告によれば、iso-cyanic-acidを含む添加剤を5%添加することによって、NO_xを40~45%低減出来るとしている。

5. あとがき

以上、現在までに試みられてきたいくつかのアプローチについて概説してきたが、高負荷時のチャージリング、低スワール、高噴射圧と小噴孔径との組合せ、低初期噴射率とシャープカット、セタン価の向上、燃料中のS分の削減、燃焼後期攪乱、冷却式EGR、SCR触媒（これに成功すればEGRおよび酸化触媒は不要になる）、パティキュレート・トラップなどの組合せによって、おそらくはAD2000年位までのディーゼル車の規制強化には対応して行けるのではなかろうか。なお、この場合には、燃料の調量、調時、EGR、あるいは冷却系などに対する閉ループ制御が必要になるものと考えられる。

一方、大型船用、あるいはコ・ジェネレーション用

エンジンなどの排気対策としては、何らかの手段による水の導入が有望であるが、これは追々車両用としても実用化が試みられていくものと考えられる。また、往年の空気噴射なども、とくに大型・低速用としては、今一度見直してみても良いのではなかろうか。

利用文献

- 1) 小森, 他, 自動車技術会シンポジウム No.08 (1990-12).
- 2) 鈴木 石油学会石油製品討論会 (1989).
- 3) 金野, 他, 日本機械学会論文集 57-574B (1991).
- 4) 加藤, 他, 第10回内燃機関合同シンポジウム (1992).
- 5) Zelenka P, et. al, SAE 900602.
- 6) 板根, 他, 日本機械学会・中国四国支部第29期総会講演会 No.915-1 (1991-3).
- 7) Herzog P. L, et. al, SAE 920470.
- 8) 滝沢, 他, 第9回内燃機関合同シンポジウム講演論文集 (1991).
- 9) 岩本, 他, 自動車技術会・学術講演会前刷集 931 (1993-5).
- 10) Liotta Jr. et. al, SAE 932734.
- 11) 井元, 他, 自動車技術会シンポジウム講演論文集 No.9403 (1994-1).
- 12) Murayama T. et. al, SAE 780224.
- 13) 宮本, 他, 日本機械学会RC107研究成果報告書 (1994-4).

協賛行事ごあんない

「International Conference on EcoBalance」について

<主催> (株)未踏科学技術協会, エコマテリアル研究会, 日本LCA研究会

<後援(予定)> 科学技術庁, 環境庁, 通商産業省

<期日> 1994年10月25日(火)~27日(木)

<場所> 科学技術庁金属材料技術研究所
(つくば市千現1-2-1,
Tel 0298-53-1000)

<主要テーマ>

- ・エコバランス分析評価, LCA, それらの方法論

- ・エコバランス評価のためのデータベース

- ・リサイクル可能な材料や製品の設計

- ・環境ラベル, エネルギー政策, 税制等

■問い合わせ先

〒105 東京都港区虎ノ門1-2-8

虎ノ門琴平会館ビル3階

(株)未踏科学技術協会 エコマテリアル研究会

エコバランス国際会議事務局 栗野 常久

Tel 03-3503-4681 Fax 03-3597-0535