

## ■ 展望・解説 ■

ディーゼル機関の低NO<sub>x</sub>化の現状The Present Endeavors for Reducing Oxides  
of Nitrogen in Diesel Engines

池 上 詢\*

Makoto Ikegami



## 1. はじめに

ディーゼル機関は極めて高い熱効率をもっているで、船用、自動車用などの輸送機械のみならず農工用、産業用、発電用など広範囲の分野で使われている。燃料には廉価な軽油や重油を使用できるので運転コストはきわめて低い。これから述べる窒素酸化物や微粒子などの大気汚染物質の問題がなければ、単位出力あたりの二酸化炭素発生量の少ないこの種の原動機は地球温暖化の防止の点からみても大変重要であると考えられている。一部ではこれらの大気汚染物質の低減の難しさからディーゼル機関不要論すら出されているが、エネルギー経済や地球温暖化の視点に立つならば、むしろ今こそ高い熱効率をもつこの機関を再認識し、窒素酸化物などを現状のレベルよりも大幅に下げる技術を緊急に確立することが望まれるのではあるまいか。

ディーゼル機関から排出される主要な大気汚染物質は窒素酸化物とすすなどの微粒子である。そのほか、未燃炭化水素、含酸素炭化水素、一酸化炭素などが排出されるが、未燃炭化水素と一酸化炭素のレベルはかなり低く、当面の重要課題は微粒子と窒素酸化物である。その質量濃度のレベルは火炉やボイラーなどに比べるとかなり高く、燃料空気比が広範囲にわたるため三元触媒による後処理方式は適用できず、火花点火機関に比べても排出量は多い。環境保全の立場からディーゼル機関の排気に対して厳しい規制が内外において用途ごとに制定され、年を追って強化される趨勢にある。現時点ではこれらをクリアーする見通しはまだ得られておらず、燃焼の改善や後処理を含め種々の方向から対応が検討されている。ここではそのような現状と見通しについて述べ、参考に供したいと思う。

## 2. 規制の動向

内燃機関に対する排気規制はカリフォルニアや東京で発生した光化学スモッグを契機として自動車について行われたものである。有名なマスクー法として知られるアメリカの連邦規制やわが国（昭和53年）における10モード規制がこれにあたり、乗用自動車あるいは軽量級自動車の火花点火機関がその対象となった。これは生体に直接有害である一酸化炭素と光化学スモッグの原因となる窒素酸化物ならびに未燃炭化水素を対象としているものであり、三元触媒と電子制御の採用によってその規制への適合が図られた。最近ではカリフォルニア州を中心として規制強化の動きがあり、新たな対応に迫られる情勢になっているものの、世界的にみると火花点火機関の排気については一応許容レベル以内に収まっていると現時点では受け止められている。

これに対してバスやトラックなどの重量級ディーゼル車については、わが国では別系統の窒素酸化物とスモークに対する規制が行われており、長い間にわたって少しずつ強化されてきたものの重要な汚染源とみなされている。図-1はその動向を示したもので、騒音規制とともに規制レベルの年次経過が示されている。この規制のスモークとは一定量の排気を吸引したときのフィルタ紙の黒化度であって、黒煙濃度を表している。逆にいえば、スモークを一定濃度に保ったときの窒素酸化物と騒音のレベルの低減を図ってきた歴史がここに示されている。しかし、ディーゼル排気には単に黒煙のみではなく青煙や白煙も含まれており、いずれも環境や健康に有害であるとの認識から、そのような軽質微粒子を含めた微粒子全量に対して規制を行う方向が打ち出された。その典型が米国環境保全局（EPA）から出されている連邦規制である。図-2にそれを示しており、指定された運転モードで試験を行って発生仕事量の重み付き平均値を求め、それに対する微粒子、

\* 京都大学工学部機械工学教室教授  
〒 606 京都市左京区吉田本町

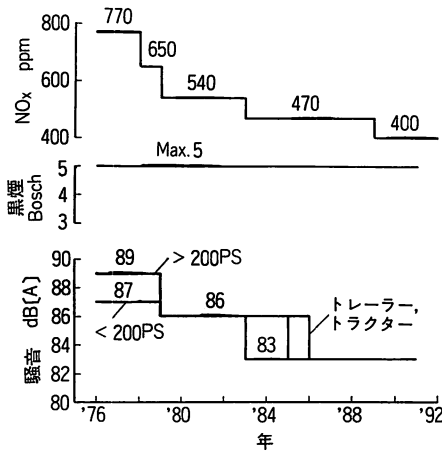


図-1 日本における重量級ディーゼル車の規制動向

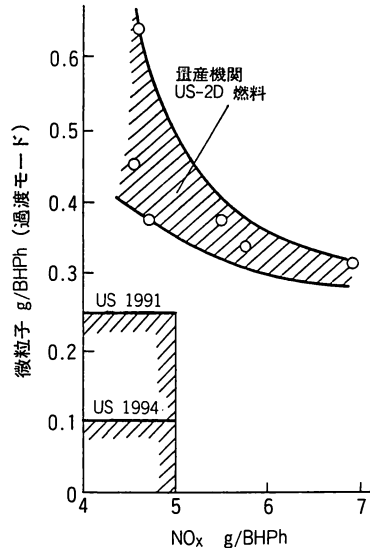


図-3 量産機関の微粒子およびNOx排出レベル  
(W. Cartellieri ほか, MTZ 50-9, pp.440-452, 1989)

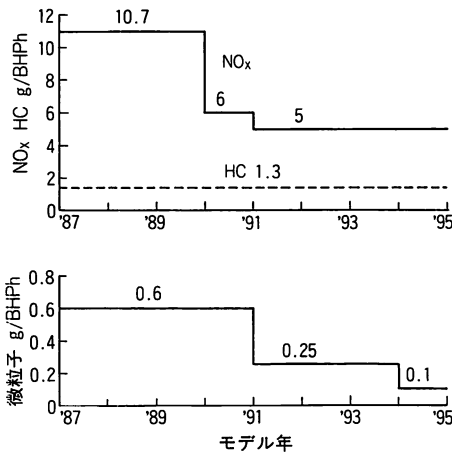


図-2 ディーゼル車に対する米国連邦規制の動向

NOx, および未燃炭化水素HCの排出グラム数を規定したものである。これによると1991年と1994年には極めて厳しい規制となり、現用のディーゼル機関に単純な手直しを加えるだけでは達成の見込みはないといわれている。図-3は91年および94年規制と現在生産中の

ディーゼル機関からの排出レベルを比較したものであり、とくに窒素酸化物の放出を現状の1/3~1/2にするための抜本的対策が必要となっている。わが国でも米国規制に連動して中央公害審議会から同様のディーゼル車に対する規制が発表され、施行が予定されている。

近年エネルギー有効利用の観点から注目されているコゼネレーションシステムについては、昭和62年10月に大気汚染防止法施行令の改正に伴って、定置型ディーゼル機関およびガスタービン機関も規制の対象に含まれることになった。さらに、大都市の特定地域に対してはこれよりもはるかに厳しい指導基準が関係都府県において策定された。図-4はNOxに対する政令および指導基準を示している。これらの規制においては他の発生源と同様に標準酸素濃度補正の考えが取り入

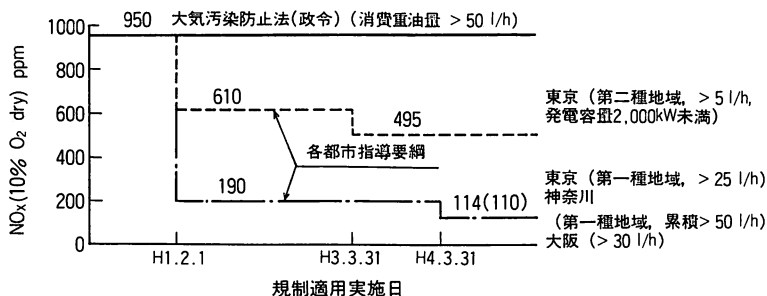


図-4 定置型ディーゼル機関のNOx規制

れられており、排気に13%の酸素があるとして換算したNOx濃度に規制値が与えられている。この特定地域に対する指導基準は自動車用と同等あるいはそれ以上に厳しいものであり、ディーゼル機関の事実上の締め出しであるとさえいわれている。

このほか、ECをはじめ各国でも規制の制定や強化が図られているほか、港湾内の船舶、ブルドーザなどの建設機械などについても排気規制が施行あるいは検討されている。

### 3. 窒素酸化物および微粒子の低減

以上のようなNOxならびに微粒子の低減の方策を説明するまえに、それらの生成原因と関連する燃焼過程について述べる。

周知のように、ディーゼル機関では強く圧縮された高温高圧の空気に燃料を霧状にして噴射し、自発火に

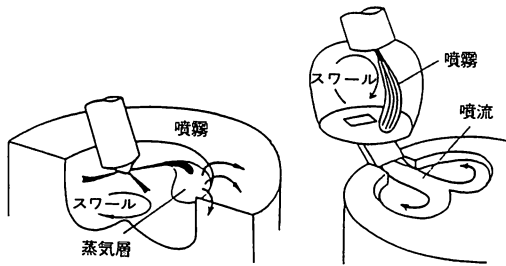


図-5 ディーゼル機関の燃焼室の例 [左；直接噴射(深皿型燃焼室)，右；間接噴射(渦室式)]

よって燃焼を開始させる。図-5は直接噴射式および間接噴射式の燃焼室を示す。いずれの場合も、最初の段階では燃料と空気が予混合された状態で燃焼が進むけれども、主要部分は燃焼室内にできる燃料の塊と空気の塊とが接触して混合しながら進行する拡散燃焼である。濃混合気が局所的な高温に曝されるとむし焼きになって炭素質のすす粒子が析出し、それが高温によって輝く。生じたすすの大部分は燃焼中に燃え尽きだが、最後まで酸化できないすす粒子はシリンダから排出されて黒煙となる。いいかえると燃焼の中後期ではすす粒子を始め燃料や後燃え成分が新気を見出す早さによって燃焼速度と不完全燃焼の度合いが定まる。そのため燃料と空気をできるだけ速やかに混合させることが必要であって、そのためには噴霧の燃料粒を細かくするとともに、短時間で噴射を完了しなければならない。また、高速で運転するほど混合に許される時間が短くなるので、噴射だけでなくシリンダ内に空気を吸い込む段階で空気に旋回(スワール)を与えたり、ピストンの頂部に凹みを設けてそこにガスが入り出すさいの気流(スキッシュ)を利用するなどして混合を促進させる。これらによって燃料の巨視的な空間分布が改善される。また、燃焼中の燃料濃度の不均一を減少させるには乱れによる微視的の混合が大切であり、それを強めることが燃焼促進に有効である。

一方、ディーゼル機関から排出される窒素酸化物の大部分は一酸化窒素NOで、これが燃焼中の高温となった箇所から発生し、その温度とともに指数関数的に増

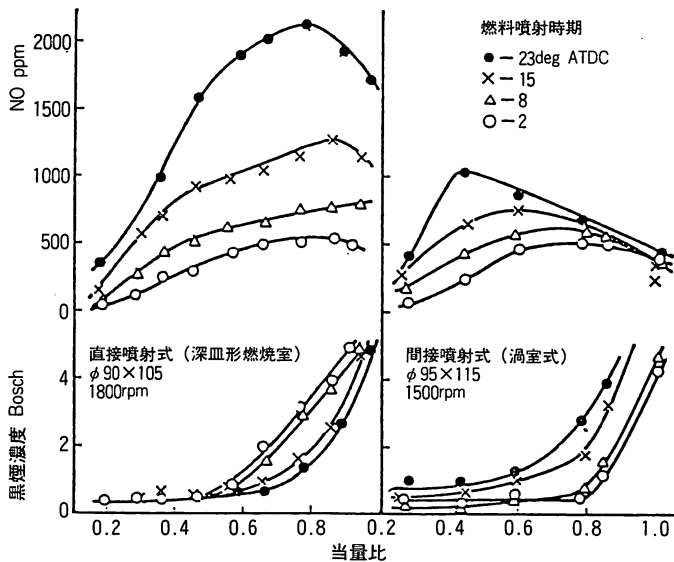
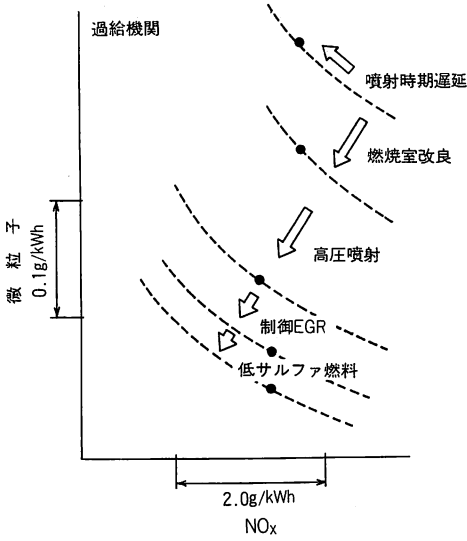


図-6 ディーゼル機関のNO濃度と黒煙濃度



(横田, 佐藤, 自動車技術会シンポジウム, No. 8, pp. 39-44, 1990)

図-7 燃料噴射-燃焼系の改良による有害物質の低減

加する。燃焼中は燃料濃度の不均一とともに温度の空間的不均一があるので指標となる温度を定義することはできないが、定性的には噴射を遅くするとピストンが下降する膨張行程に入って高温から免れ、排気中のNOx濃度は低くなる。逆に噴射を早めると燃焼ガスが圧縮を受けて高温の部分が増すのでNOxは増す。したがって、噴射時期を遅くするのは低NOx化の基本であるといえる。ところが、噴射時期が遅いと圧力-容積線図上で等容部分が減って熱効率の低下をきたし、さらに燃焼に許される時間が減るため燃焼は不完全となりやすく、黒煙や青白煙の増加をきたす。図-3からわかるようにNOxを減らすと微粒子が増す傾向にあるのはこのためである。図-6は噴射時期をパラメータとしてスモーク濃度(黒煙)ならびにNOx濃度を当量比(燃空比を理論燃空比で除した値で空気比の逆数)に対して描いた実験結果の例である。噴射時期を遅くするとそれだけスモークは増すのに対してNOxは減少している。微粒子にはすすのほかに青白煙の原因である軽質粒状物質が含まれており、噴射をある程度以上遅らしてNOxを減らしたとしてもこの成分が増すため限度がある。この軽質粒状物質は捕集した微粒子から有機溶媒で溶出されるものをさし、有機可溶分SOFと呼ばれ、すすなどの不溶解分ISFと区別されている。

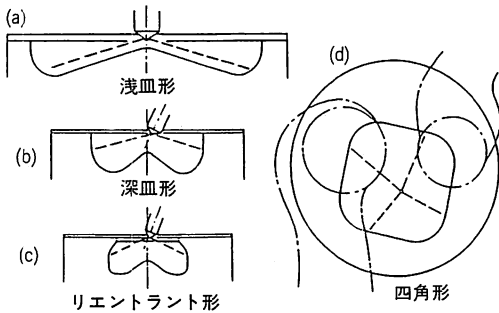
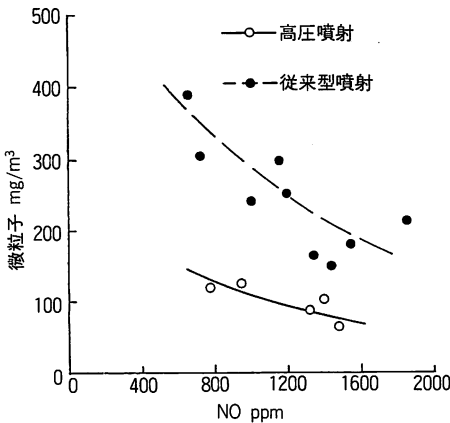


図-8 直接噴射式ディーゼル機関の燃焼室の例

従来のディーゼル機関におけるこのようなNOxと微粒子のトレードオフ関係を外してできる限り無排出に近付けることが燃料噴射-燃焼系の改良によって達成できるかどうかについて現在検討が進められている。図-7はそれらの対策をおおまかにまとめたものである。まず、発生動力を増し機関内部での消費動力を相対に減らすため過給を施してシリンダに多めの空気を供給することを前提として、燃焼室の改良、例えばリエントラント形と呼ばれる燃焼室に変更することによって微粒子の抑制を図り、ついで噴射の高圧化によって一層原点に近づける。そのさい、噴射時期は最適になるように選ばねばならない。リエントラント形を使うと微粒子が減少するのは、スキッシュが強化されて混合促進がなされることと火炎が凹みに閉じ込められてピストンとヘッドの狭い隙間で冷却されることから免れるためである。後者の噴射を高圧化すると細かい噴霧になって燃料と空気の混合が促進され、同時に強力な乱れによって微視的混合を図ることができるため微粒子の低減を図ることができる。高圧噴射に対して必ずしもリエントラント形が適するとはいえず、図-8に示



(池上ほか, SAE Paper No.900440, pp.1-15, 1990)

図-9 高圧噴射による微粒子-NOxトレードオフ曲線の改善

す種々の燃焼室から最適な組合せを選ばねばならない。

噴射の高圧化はとくに重要であって、従来の燃料噴射装置を強化する方法のほかにも、新しい構想あるいは従来コスト面から成り立たないとみられてきた噴射方式についても再検討が行われている。図-9は従来の噴射装置を用いた場合と高圧噴射の場合の微粒子とNO<sub>x</sub>のトレードオフ曲線の例を示す。従来の噴射装置では噴射最高圧力は40~60MPaであったが、これを約2倍にすると同じ排気煙濃度に対してNO<sub>x</sub>の大幅な減少がある。現用されている形式の噴射装置を強化すると100MPaを越える最大噴射圧力が得られ、大形自動車に採用できる見通しとなっているが、これ以上に噴射圧力を高めると噴射装置の駆動動力が増してかえって燃料消費率は増加する。また、自動車用のような負荷と回転速度が大幅に変動する場合には定格点以外の運転条件においても良好な高圧噴射特性が求められ、解決すべき問題が多く残っている。

一層の低NO<sub>x</sub>化を図るには、さらに排気ガス再循環 (EGR) と燃料中の硫黄分を減らすことが必要である。微粒子には燃料中の硫黄分から生じたSO<sub>3</sub>が加水されて生じた硫酸ミストがかなり含まれている。わが国の軽油には硫黄が0.4%程度含まれており、精製段階でこれを0.05%まで減らすことが望ましく、将来はその方向に向かうであろう。つぎに、EGRとは排気の一部を吸気に戻すことによって空気中の酸素分率を下げ、熱容量を高めて低い火炎温度としNO<sub>x</sub>濃度

を下げるものである。負荷に応じてEGR量を加減できるようにすればかなり有効であり、また、条件によっては燃料消費率も減る可能性もある。しかし、システムはかなり複雑となることと、腐食、耐久性の対策が必要になることは避けられない。また、水あるいは蒸気を吸入空気に加え、熱容量を増し低NO<sub>x</sub>化を図る方法も検討されている。

#### 4. 今後の低NO<sub>x</sub>化技術

上述のように、現用のディーゼル機関に即して細かい改善策を積み上げることによってある程度まで対応を図ることができる。しかし、将来求められているレベルにまでNO<sub>x</sub>濃度を収めることができるかどうかについては確実な見通しがあるとはいえず、以下に述べるような方策が検討されつつある。

(1) NO<sub>x</sub>分解触媒 排気に過剰の酸素を含むディーゼル機関の場合に適用できるNO<sub>x</sub>の分解方法としてはアンモニアを添加して触媒で還元する選択アンモニア触媒還元法がある。これはすでに発電用ボイラなどで使われているもので、定置用ディーゼル機関にも使用できるであろう。問題はアンモニアを使うことにあり、ことに車両用としては実施に困難を伴うであろう。そこで、燃料からオンボードで製造する方法についても検討されており、またシアヌール酸や尿素を使う方法も考えられている。このような窒素化合物によらないでもっと直接的にNO<sub>x</sub>を分解する方法としては、

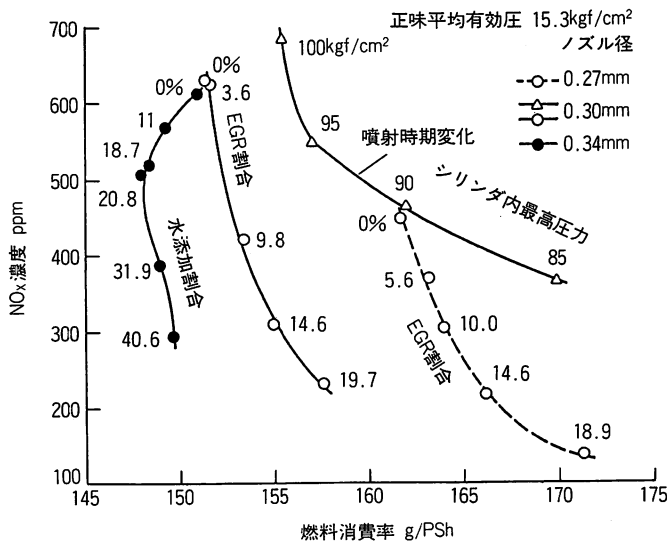


図-10 乳化燃料およびEGRによるNO<sub>x</sub>低減 (平野ほか,日立造船技報, 46-1, pp.1-13, 1985)

火花点火機関の希薄燃焼運転の脱硝に期待されている銅ゼオライト触媒がある。しかし、ディーゼル機関でこれを用いるには排気に微粒子が含まれないことが前提となることに加えて、この種の触媒による直接分解に比較的低温のディーゼル排気でも使うことができ、しかもCOや未燃炭化水素などの炭素化合物の少ない条件においても作動できる高活性触媒を開発できるかどうかにかかっている。

(2) 後処理による微粒子低減 すでに見たようにNO<sub>x</sub>を減らすと微粒子が増加する傾向があるので、排気中の微粒子を直接捕集または除去すればその分NO<sub>x</sub>の低減が期待できる。これにはセラミックス単体などで作られた微粒子トラップを使う方法と通常のハニカム担体の酸化触媒によって微粒子のSOFを分解する方法とがある。また、両者の兼用形としてトラップ機能をもつ酸化触媒も考えられる。微粒子トラップでは、ある量の微粒子を捕集したときこれに外部点火して燃焼させ捕集機能を回復させることが必要である。これは再生と呼ばれており、できる限り低い温度でこの操作ができなければならない。再生中に局部的に高温が発生すると破損につながるため耐久性の確保が重要である。また、炭素粒子の沈着や潤滑油からの添加物などによってフライアッシュの蓄積が起ると耐久性が損われる。さらに、触媒機能をもたせる場合にはSO<sub>2</sub>のサルフェートへの転換率の低いことが要求されており、トラップ法は現時点で十分な見通しがあるとはいえない。これに対して、SOF分解触媒は高圧噴射などによってすす粒子のような不溶解分を少なくした微粒子を酸化させるのでトラップのような再生の問題は少なく、おそらく94年の全米大形自動車規制では高圧噴射とSOF分解触媒の組合せで対応することになろう。しかし、この方法がもともと微粒子濃度の低い中・大形機関を使うコゼネレーションシステムの対策になりうるか否かについてはよく見極めなければならない。

(3) 加工燃料 排気再循環や水噴射によるNO<sub>x</sub>低減が空気側であったのに対し、燃料を加工して火炎の高温を抑制する方法が考えられる。従来から多く試みられてきたのは乳化燃料とメタノール燃料である。このうちメタノールは石炭あるいは天然ガスから作られる加工燃料の一種とみてよく、すすの発生傾向が低

いことと発熱量が小さいために微粒子およびNO<sub>x</sub>はともに少なく、液体燃料であるため可搬性にも優れている。着火性は通常の燃料よりもかなり劣るため、これをディーゼル機関に使う場合は火花あるいはグロープラグによる着火補助を要する。また、アルデヒドや酸などの排出があってそれらの対策が必要となってくる。さらに大きな問題は発熱量の低さに加えてメタノールを生成するさいにエネルギーロスがあることであり、天然ガスからでは25%程度、石炭からでは50%程度の損失となる。したがって、環境安全をとくに要求される大都市などで使用されることはあっても、ディーゼル排気の問題の全面的解決にはつながらないのではないかと思われる。水噴射と乳化燃料は水を混入することによって火炎温度を低下しNO<sub>x</sub>低減を目指すもので、それなりの効果を挙げることができる。図-10にはコゼネ用機関を対象にした実験結果が示されており、ある範囲では燃料消費率の増加なく低いNO<sub>x</sub>濃度が得られる。とくに、水-ディーゼル油の乳化燃料を使うと噴霧内の油滴が微小爆発して燃焼促進にも役立つ可能性があるともいわれている。しかし、乳化された燃料を長時間安定に保持することは難しいため、機関を運転しながら乳化を行う必要がある。また、水噴射や乳化燃料は着火特性を損なうので、とくに中・低負荷で着火の安定化などの対策を要する。

## 5. おわりに

以上、現在のディーゼル機関の低NO<sub>x</sub>化の動向について述べ、残念ながらまだ環境安全の観点からの要請に十分応えられる段階にあるとはいえず、現在種々の角度から努力が行われている状況をご認識頂けたと思う。しかし、ここで述べた各種の技術を積み上げることによって目標に近づきつつあることも確かである。ここでは多くを述べなかったが、熱機関として本来求められている熱効率に犠牲を強いることは愚かなことであるから、その低下を防ぎさらに一層の熱効率の向上を図らねばならない。そのためには従来に増して熱損失ならびに機械損失を減らすように努力するとともに、耐久性信頼性の向上、要素技術の高度化、新素材の活用、高度な電子制御技術の採用などを押し進めなければならない。