

■ 技術報告 ■

ディーゼルエンジンのNO_x対策の現状Current Technique on NO_x Control of Diesel Engine

八 木 康 雄*

Yasuo Yagi

1. まえがき

省エネルギーと公害対策，一つのエンジンをとっても，省エネルギーのための熱効率の向上と，公害対策のための排気有害成分の低減はトレードオフの関係にある。

今，大きな波となって打ち寄せている地球環境保全も，地球温暖化防止のためのCO₂抑制技術については，短期的には省エネルギーと燃料の転換が最重要課題であり，これも一方で地球規模の大気汚染や酸性雨の対策とは，相い反する部分もある。

ディーゼルエンジンはもともと高温高圧の空気の中で液体燃料が自己着火し，液体表面近傍に形成された燃料—空気の混合境界層の中で理論混合比あたりの部分に高温火災面を形成して燃焼するので，本質的にNO_xの生成を抑制しにくい燃焼形態である¹⁾。

よく，ディーゼルエンジンは将来，生き残れるのかと言われているが，ディーゼルエンジンは小形から大形に至るまで，原動機として高い熱効率をもっており，ガスタービンの効率や燃料電池の重量，価格面を考えると，ここで述べるような排気ガス対策に努力し，まだまだ重要な役割りを背負わなければいけない原動機である。

2. NO_xの低減方策

2.1 排気有害成分

ディーゼルエンジンから排出される有害成分の主なるものは，NO_x，SO_x，HC，COであり，さらに，黒煙（スス）が少量含有されている。ガソリンエンジンと比較するとCOやHCの排出量は少なく，SO_xは低硫黄燃料を使うことにより低減できるので排気ガス対策としては，NO_xと黒煙が対象として重要であるが，排気成分解析が非常に難しく，今だ基礎技術の開発

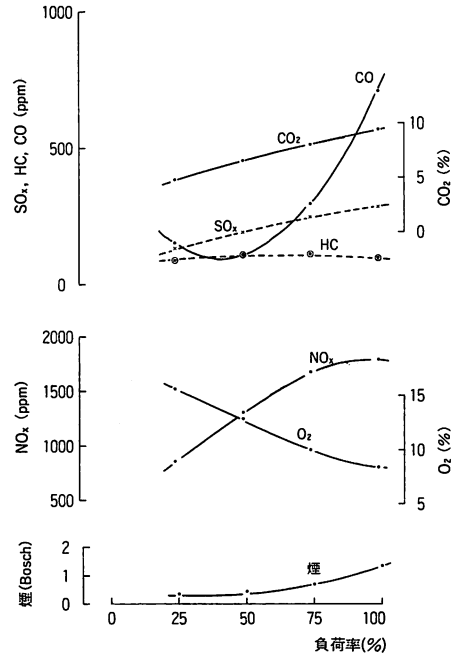


図-1 ディーゼルエンジンの排気ガス性状例

を必要としている。

図-1に200kWクラスの定置用ディーゼルエンジンの排気ガス成分の測定結果を示す。成分の変化の傾向や絶対値は個々のエンジンにより相当異ってきており，本測定値もバラツキの平均値を採用したものである。

2.2 NO_x低減方策

ディーゼルエンジンのNO_xを低減する方策は，エンジン本体と排気ガスの後処理であり，エンジン本体でのNO_x低減の基本原理は燃焼火災の温度を低下させることが一番であり，さらに，酸素濃度の低下や低窒素燃料の使用があげられる。

方策を系統的に分類すると

① 発生源対策

燃料噴射時期遅延（タイミングリタード）

給気温度低下

* 福島工業高等専門学校機械工学科教授
〒970 いわき市平上荒川字長尾30

② 燃焼系対策

排気ガス再循環 (EGR)

エマルジョン燃料……水, 蒸気

水噴射……シリンダ内, 給気管内

ガス化燃焼

③ 後処理対策

再燃システム

アンモニア触媒脱硝

3. NO_x低減策の現状

エンジン本体でのNO_x低減策は、一方で燃料消費を悪化させ、熱効率を低下させるので、NO_x低減と燃料消費向上はトレードオフの関係にあり、実用段階での妥協点選択を難しくしている。以下にNO_xの具体的抑止対策の現状を述べることとする。

3.1 燃料噴射時期遅延 (タイミングリタード)

300kWクラスのディーゼルエンジンを用いて燃料噴射時期を15°~3°と変えたときのNO_x低減と燃料消費率悪化の関係を図-2に示す。

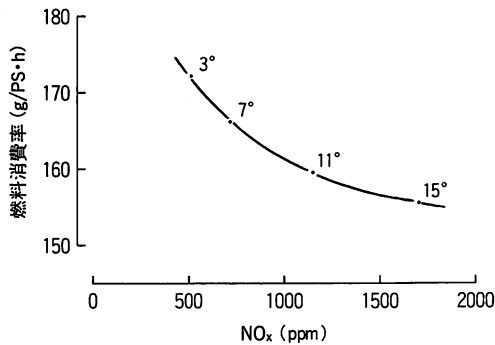


図-2 燃料噴射時期遅延によるNO_x変化

燃料噴射時期遅延はNO_x低減に大いに効果があるが、排気色の悪化、燃費の増大、出力低下を伴い、さらに始動性悪化やピストンの熱負荷増大を考えると、クランク角度で2~5度が限度であり、NO_xは10~30%の低減が期待できる。

定置用ディーゼルエンジンの大気汚染防止法による全国規制値950ppmへの対応はこの燃料噴射時期遅延で可能である。

3.2 給気温度低下

シリンダ内の燃焼ガス温度を低下させる目的で、給入空気温度を低下させてやると排出NO_xは低減する。

図-3は2000rpmの単筒エンジンで、燃料の噴射量と噴射時期を一定にしておいて実験した結果である。

給気温度の低下による効果はNO_xの低減をもたら

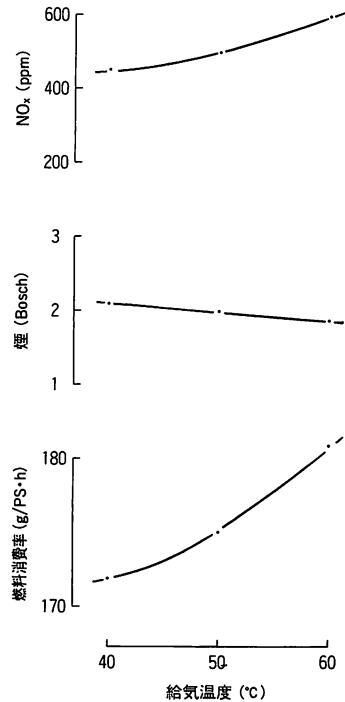


図-3 給気温度低下によるNO_x低減

すと同時に燃焼性能上での受熱期間の短縮をもたらす、燃料の消費率が向上する。また排煙は悪化するが、空気過剰率が增大するために、わずかの悪化におさまっている。一般的には、エンジンにもよるが、給気温度10°Cの低下に対してNO_x低減40~50ppmが期待できる。

3.3 排気ガス再循環 (EGR)

EGRは排気ガスの一部をバイパスさせて、給気系配管内に循環させてやるものであり、その結果、給入空気が暖められ、かつ酸素濃度が低下し、シリンダ内の燃焼が影響を受けて、排出NO_xが低減される。

しかし、ディーゼルエンジンの場合は、排気ガス中に黒煙を含有しているために、潤滑油や吸気系の汚れが発生したり、シリンダライナやピストンリング、動弁系の摺動部の摩耗量が增大する。

中大形ディーゼルエンジンの場合、EGR用の循環パイプとして排気ガスタービン入口の比較的高い圧力での排気ガスを再循環させたり、又は排気ガスエコノマイザー出口の比較的低圧低温の排気ガスを再循環させたりする。前者の場合には、排気ガスタービンを流れる燃焼ガス流量が減るために、排気ガス圧力が低下し、給排気ガス交換時のポンピング損失が低減し、燃料消費率が良くなることがあり、後者の場合は、低い

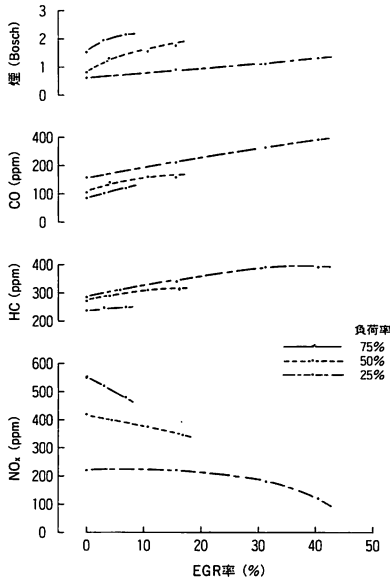


図-4 EGRによるNO_x低減効果

温度条件で給気と混合させることができるために、ターボ過給機の熱負荷低減ができる。

吸入空気重量流量に対するEGRガス重量流量の比率をEGR率とすると、吸入空気量の余裕の大きい低回転側では、EGR率は40%程度までとれるが、吸入空気量に余裕のない高回転側では、EGR率は、25

～30%までしかとることができない。EGRを実用化していくためには循環排気ガスのトラップ装置や摺動部品の耐久性の検討、潤滑油の助燃剤やフィルターの対策を必要とする。図-4に150kWクラスのディーゼルエンジンでタービン入口排気ガスを過給機のコンプレッサー出口に戻す試験データを示す。

3.4 エマルジョン燃料

燃料に水分を加える。あるいは、シリンダ内に水の噴射をすることにより、水の蒸発による潜熱の発生、さらに質量増加により、燃焼領域のガスの熱容量が増加することにより火災温度が低減する結果、NO_x生成反応が抑制され、排出NO_xが低減される。しかし、一方で、エンジンのチューニングによっては、燃料消費率が良くなかったり、悪化したりもする。

エマルジョン製造方法としては、タンク内で水を攪拌する方法と蒸気を直接にライン内に注入する方法がある。燃料に水分を加える場合、均一に分散させるため、乳化油にしているが、このとき、軽油・A重油では、乳化剤が必要となる。この乳化剤（一種の界面活性剤）は油中水滴形エマルジョンと水中油滴形エマルジョンの両方があり、燃焼試験上は今のところ、差は見られない。エマルジョン燃料製造装置の一般的フローを図-5に示す。

この装置は500kWクラスのディーゼルエンジン用

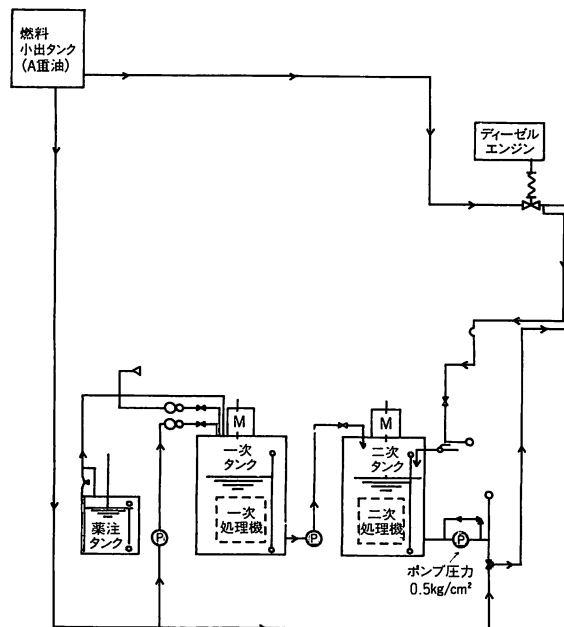


図-5 エマルジョン燃料製造工程

であり、A重油燃料に自動的に水（10～30％）と界面活性剤（1/600～1/1200）を加え、エマルジョン燃料をつくり、供給するフローである。

燃料小出タンクからの燃料はエンジンに直接投入される系統とエマルジョン処理を行う系統に分離する。これは、水の量や気温によるエンジンの始動不良を防止するために始動時に水を混入させないと同時に、エンジン停止後の水による燃料系統のさび発生を防ぐためにエンジン停止前に燃料系統により水を切る必要があるからである。本フロー図では、エマルジョン処理を行うタンクを2台設置し、ここを通過した燃料は直接5ミクロン程度の油中水滴形エマルジョン燃料となり、ディーゼルエンジンに供給される。これらの燃料処理過程は自動的に行われるものであり、定期的なNO_x濃度検知による燃料噴射弁の清掃が必要となる程度である。ライナーやピストンリング、吸排気弁の摩耗量が増大すると言われているが、充分な定量値はまだ得られていない。

図-6にエマルジョン燃料を使用したときのNO_xの低減の効果を示す。水混入率が増加するに従い、NO_x低減率も向上し、水混入率15％でNO_x低減率も15％程度になる。

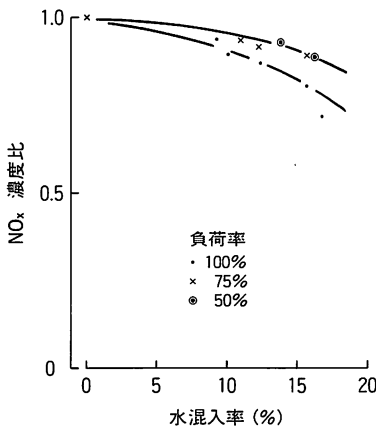


図-6 エマルジョン燃料の水混入率とNO_x

3.5 水噴射

水噴射の実施方法として、給気管内に噴射する方法とシリンダ内に直接噴射する二種類がある。

① 給気管内への水噴射

給気管内へ噴射できる水の量は給気温度に相当する水蒸気の飽和が限度であり、他の水噴射方法と比較しても少ない。500kWクラスのディーゼルエンジンで実験した結果では6～8％程度のNO_x低減しか得ら

れなかった。

② シリンダ内への水噴射

燃料と独立して水をシリンダ内に噴射するための弁を設け、燃料の燃焼期間中に火災に対して水を噴射する方法と水を燃料噴射弁の先端に燃料噴射前に導き、燃料噴射と同時に水が一つの燃料噴射弁からシリンダ内に噴射される方法がある。これらの方法は乳化剤やエマルジョン燃料製造装置はいらないが、シリンダヘッドに水噴射弁をつけたり、水噴射の制御装置を必要とする欠点がある。

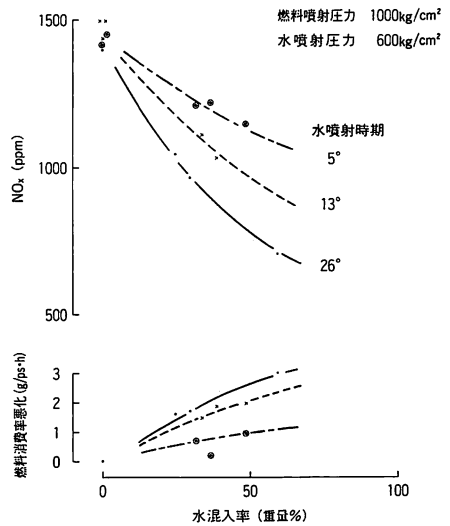


図-7 水噴射によるNO_x低減

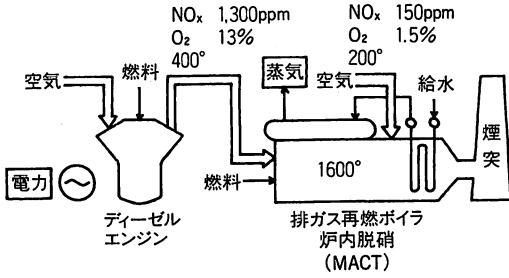
図-7は大形2サイクルエンジンで水噴射がNO_x発生に及ぼす効果を示したものである。この場合の水の供給方法は油と独立であり、油を噴射する前に水を噴射した方が効果が大きい。水の添加量30～50％に対して、35～45％のNO_x低減が期待できる。しかし、同時に燃料消費率の悪化や排煙濃度の悪化も生じるので注意する必要がある。

3.6 再燃システム

ディーゼルエンジンの排気ガスを還元炉で無酸素状態にした後で排ガス再燃用ボイラに導き、空気と燃料で追焚きし、炉内脱硝を行ってNO_xの排出を低減させようとするものである。三菱重工業(株)のMACTシステムの例を図-8に示す。

C重油燃焼の大形ディーゼルエンジンで実用化されており、ディーゼルエンジンで排出されたNO_x1300 ppm (O₂=13%) がボイラ出口で150～200ppm (O₂=1.5%) 程度まで低減されている。

ボイラは炉内雰囲気温度が1600～1700℃で毎日の起



MACT:Mitsubishi Advanced Combustion Technology

図-8 排気再燃脱硝システム

動・停止を行うような仕様のために耐火物の選択が重要となっている。また蒸気/電力比がガスタービン又はそれ以上となっている。

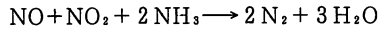
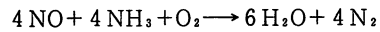
3.7 アンモニア触媒脱硝

現在、実用化されている排ガス脱硝技術はアンモニアを還元剤とした選択還元法が中心であるが、設備費が高く、高価なアンモニアを使用するため、運転経費が高いのが欠点である。この選択還元法はディーゼルエンジンの排ガスの中にアンモニアを注入した後、触媒反応器に導き、ここで、排ガス中のNO_xとアンモニアが反応し水と窒素に変換する。

触媒は酸化チタン (TiO₂) を主成分 (70—75%)

とし、五酸化バナジウム (V₂O₅) や酸化タングステン (WO₃) を用いたものが主流である。

アンモニアがNO_xと反応する式は、



アンモニアとNO_xは1 : 1で反応する。

触媒は排気ガス温度により反応速度などが異なってくるが、脱硝率を決定することにより触媒量当たりのガス量いわゆるSV値を決定している。実用上のSV値は、現在のところ80%脱硝の場合で2000~8000 (Nm³/h/m³)。このとき、脱硝装置の排気ガス圧力損失は100~150mmAqに取る。

脱硝装置のフローを図-9に示す。

アンモニアガスはボンベより、直接に接続される場合と、溶液を利用するときは蒸発器を経由して接続される場合がある。

フローに示すアンモニア注入量の制御系統はエンジンの負荷とNO_x排出量の関係がエンジンにより既知の場合であり、排気ガス温度を検知して、温度スイッチによりアンモニアガス遮断弁を開にし、エンジンの負荷信号により、アンモニア注入量を演算し、モーターバルブによりアンモニア量をフィードフォワード制御するものである。

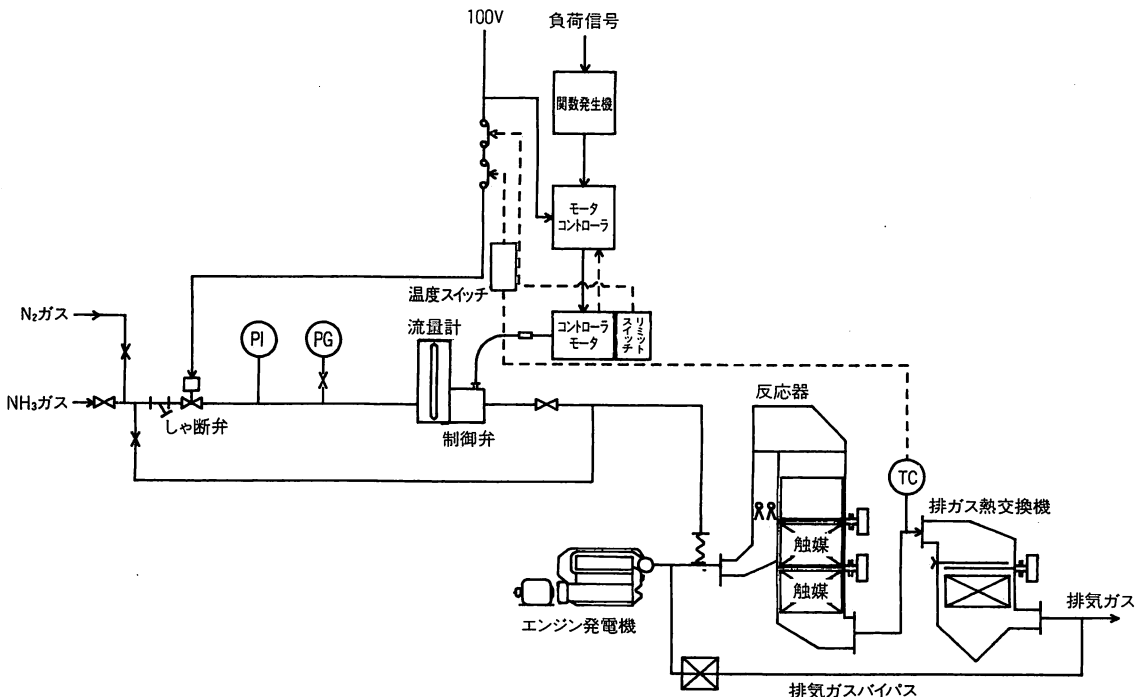


図-9 アンモニア触媒脱硝装置システム

脱硝率が80%程度までなら、この負荷信号によるアンモニア量制御で十分であるが、80~90%と高脱硝率となるときは、燃料消費量と反応器入口のNO_x濃度の検出値を湿度換算した修正値の両方からアンモニア注入量を演算して、制御しなければならないので制御装置が高価になる。

実負荷運転を行うにあたっては、同一触媒でも排気ガス温度により脱硝率に変動があるので、触媒の反応速度が良好な排気ガス温度範囲でエンジンを運転し、30%負荷以下の連続運転はなるべく行わないようにし、かつ、排気ガス温度を350°C以上に保持できるようにエンジンの負荷は安定させることが重要である。触媒寿命については、使用年数の増加と共に触媒の性能は低下する傾向にある。性能低下の進行度はエンジンの使用燃料や運転状況により異なる。現状では、10000~20000時間の運転後の定期的な交換が必要である。

未反応のリークアンモニアについては、触媒性能の低下と共に増加するので、脱硝率と同じく触媒交換の判断基準である。

4. まとめ

ディーゼルエンジンのNO_x対策の現状について述

べた。ディーゼルエンジンは他の原動機と比較して熱効率が高いばかりではなく、エンジン寿命も長い。

しかし、最近の環境対応上では、排気ガスの浄化の展望が不明瞭で、ここで述べたNO_x以外にも、パーティキュレートやススの問題をかかえていると言っ

た。21世紀にディーゼルエンジンがエネルギー供給の先兵としての地歩を固めていくためには、「生まれて100年近くになっても良くわかっていない工業製品なんて他には考えられない」と言われぬように燃焼メカニズムの解明をはじめとして、地球に歓迎されるエネルギー源としていく必要を痛感する。

尚、本稿をまとめるにあたり三菱重工業(株)のエンジン関係者に大変御世話になった、誌上をかり、改めて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 平田賢; 序論-21世紀のエネルギー供給, コージェネレーション基礎セミナーテキスト, 日本コージェネレーション研究会

協賛行事ごあんない 第4回日中石炭・C1化学シンポジウム論文募集

〈主催〉 日本学術振興会石炭利用技術第148委員会, 中国科学院山西煤炭化学研究所

〈日時〉 平成5年5月25日(火)~27日(木)

〈会場〉 関西大学100周年記念会館
(吹田市山手町3-3-25)

〈募集対象〉 ①石炭科学(一般), ②石炭ガス化,
③石炭液化, ④石炭利用技術,
⑤C1化学, ⑥燃焼

〈申込期限〉 11月14日(土) 厳守

〈備考〉 発表時間は、25分(質疑応答を含む)の口頭発表の他にポスター発表も設けます。

登録料は、30,000円です。

〈申込方法〉

- 1) 講演題目(英文), 2) 研究場所(英文), 3) 発表者氏名(講演者に○印付記, 英文と日本語併記),
- 4) 申込者氏名, 5) 申込者連絡先(機関名, 所属, 郵便番号, 住所, 電話番号), 6) 200字程度の講演概要,
- 7) 口頭かポスター発表かの希望, 以上ご記入の上, 下記宛お申し込み下さい。

〈申込先〉

大阪大学工学部応用化学科 野村 正勝教授
〒565 吹田市山田丘2-1
TEL 06-877-5111 (内線4261)
FAX 06-877-6028

〈発表講演の採択〉

採択論文は、12月18日(金)迄に連絡します。