

省燃費・低 NO_x を同時実現する 船舶排出ガス規制対応技術の開発

Development of Emission Control Technology to Reduce Levels of NO_x and Fuel Consumption in Marine Diesel Engines

田 貝 哲 哉 新潟原動機株式会社 技術センター技術開発グループ 博士（工学）
三 村 敬 久 新潟原動機株式会社 技術センター技術開発グループ
後 藤 悟 新潟原動機株式会社 技術センター技術開発グループ グループ長 工学博士

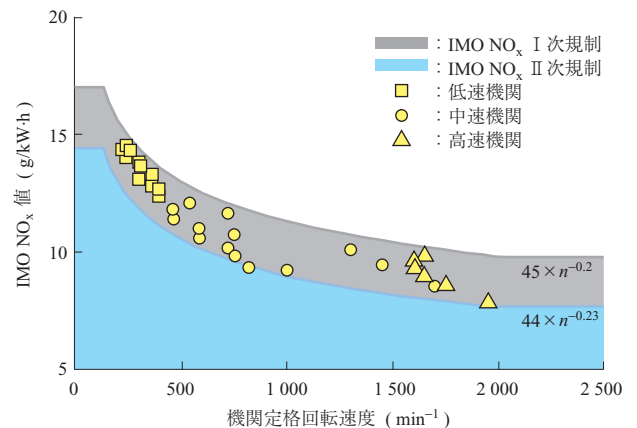
船用ディーゼル機関における排出ガス規制に対応するために開発された低 NO_x 技術を紹介する。本技術は、トレードオフの関係にある NO_x と燃費を同時に低減するものであり、また、定格出力などに制約を受けず、あらゆる 4 サイクルディーゼル機関に適用可能な特長をもつ。開発においては、まずシミュレーションを用いて手法個別の性能に及ぼす影響を検討し、次に実機試験によってこれらの効果を検証した。また、実際の船舶の運行パターンを考慮して、ユーザが得られる燃料消費削減効果について言及した。

To comply with updated emissions regulations, low NO_x combustion technology for marine diesel engines has been developed. Instead of the trade-off relationship between NO_x emission and fuel consumption, this new technology not only has an effect on NO_x emission levels but also simultaneously reduces fuel consumption. Furthermore, it can be adapted for all 4-stroke diesel engines regardless of their rated speed or rated power. At first, a thermodynamic simulation was performed to estimate effects on engine performance, including emission levels, and the efficiency of this technology was also investigated through an engine performance test. Specifically, user benefits regarding fuel economy during ship operation, which was evaluated by measured load patterns with tug boats, are also described in this paper.

1. 緒 言

船舶からの排出ガス規制については、国際海事機関 (IMO) によって 2005 年 5 月に IMO MARPOL ANNEX VI が発効され、その後の見直しによって、2008 年 10 月の IMO MEPC58 においてさらに厳しい規制が採択された。この結果、新造船に対する NO_x 規制は、2011 年 1 月から発効される II 次規制では、全海域について現行 I 次規制に対して約 15～22% 低減を、2016 年から予定される III 次規制においては、排出規制海域 (ECA) において 80% 削減を要求するものとなった。このような社会の要求に対して、新潟原動機株式会社は著しい効率の低下を伴うことなく適切な時期に確実に対応してきており、今後も誠実に取組むところである (第 1 図)。

本稿では、これまで培ってきた排出ガス低減技術を基本に発展させた、次期規制に対応するための低排出ガス技術について、解析的、実験的に妥当性を検証した結果を示す。具体的には、ディーゼルサイクルを実現するための燃料噴射率の最適化と、筒内ガス温度の低下を目的としたミラーサイクル化を実施し、機関性能に及ぼす影響を実験解



(注) $45 \times n^{-0.2}$: IMO NO_x I 次規制値
 $44 \times n^{-0.23}$: IMO NO_x II 次規制値
 n : 機関定格回転速度

第 1 図 IMO NO_x I 次規制対応状況
Fig. 1 Situation of IMO NO_x Tier I compliance

析的に調査した。また、燃費との同時低減について言及し、ユーザが得られる燃料消費削減効果を提示する。

2. IMO NO_x II 次規制対応技術戦略

IMO NO_x II 次規制に対応するため、現行規制値に対して、機関単体で約 20% の低減を狙うためには、エンジン

構成部品の一部を適切に変更する必要がある。NO_x 排出率に影響を及ぼす因子としては、燃料噴射時期や過給圧力などがあるが、燃料消費率の悪化を抑制するために圧縮比や吸排気タイミングを組合せて変更しなければならない。すなわち、IMO NO_x II次規制対応技術は、NO_x 排出率低減技術と熱効率向上技術の双方によって構成される。

大型中速ディーゼル機関における NO_x 低減の取組みは、川上ら⁽¹⁾によって実施され、圧縮行程終わりの筒内圧力と最高燃焼圧力の比で定義される爆発度が、NO_x 排出量を設計するうえでの設計指標として有効であることが示されている。すなわち、NO_x 排出量を低く設定するためには、爆発度を小さくするような機関要目の設計が必要であり、サイクル論からすれば、従来の中型ディーゼル機関がサバテサイクルによって構成されるのに対して、ディーゼルサイクルを指向する必要がある。

第2図にディーゼルサイクルとサバテサイクルの、圧力と体積の関係を表す p - V 線図、温度とエントロピーを表す T - S 線図を、最高圧力と出力が同一という条件下で比較する。ディーゼルサイクルは定圧サイクルとも呼ばれるディーゼル機関の基本サイクルであって、一定圧力のもとで燃焼するサイクルである。最高圧力が等しいという条件から、 p - V 線図上で燃焼終わりを示す点 3_s 、 3_d は同一の圧力となり、出力一定、すなわち、 T - S 線図の 1-2-3-4-1 で囲まれる面積が等しくなるようにすると $S_{4_s} > S_{4_d}$ となる。排出熱量は A-1-4-B-A の面積で示されるのでディーゼルサイクルの排出熱量はサバテサイクルよりも小

さくなり、換言すれば、ディーゼルサイクルの熱効率がサバテサイクルを上回ることになる。また、燃焼終わりの温度は $T_{3_s} > T_{3_d}$ であり、NO_x が筒内温度の上昇によって生成されることを考えれば、サイクル論からディーゼルサイクルによって NO_x が低減されることが明らかである。

3. 機関性能計算による II 次規制対応策の検討

3.1 供試機関

供試機関は、シリンダ径 280 mm、単気筒当たりの出力が 370 kW の 4 ストローク中速ディーゼル機関である。

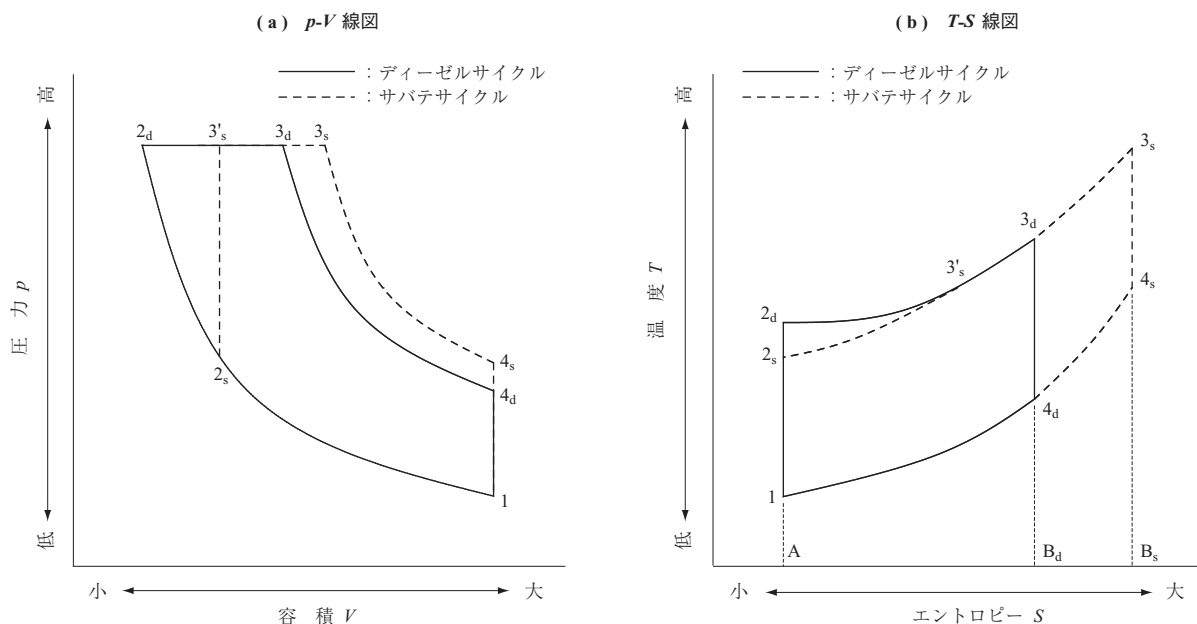
供試機関の主要目を次に示す。

シリンダ径	280 mm
ストローク	390 mm
定格回転速度	800 min ⁻¹
定格出力	370 kW/ シリンダ
正味平均有効圧力	2.3 MPa

吸気カムには可変バルブタイミング機構が備えられており、機関を停止することなく動的に吸気バルブの開閉時期を変更できるという特長をもつ。以下の試験は、船用 3 乗特性に従って、各負荷率の回転速度と出力を設定して行った。

3.2 噴射システムの最適化

はじめに、燃料噴射率が NO_x 排出率に及ぼす影響について調査した。NO_x 排出率低減のための燃料噴射率の設計コンセプトは、川上ら⁽²⁾の提案を踏襲した。すなわち、初期の噴射率を極力小さくして NO_x 排出率を抑制



第2図 ディーゼルサイクルとサバテサイクルの比較
Fig. 2 Comparison of p - V diagrams of the Diesel cycle and the Sabathe cycle

し、相対的に後期噴射を増加して噴射期間を同程度に維持することで燃費の悪化を最小限に抑える。本研究ではこのコンセプトをジャーク式燃料噴射ポンプによって達成するために、噴射期間を基準より短縮しつつ噴射終了時期を合わせる手法を評価した。これによって、実質的には燃料噴射開始時期が遅れるため、筒内最高圧力が低下してディーゼルサイクルに近づくこととなる。

以下に、燃料噴射率の影響を噴射期間と噴射開始時期の2段階に分けて実施した結果について述べる。

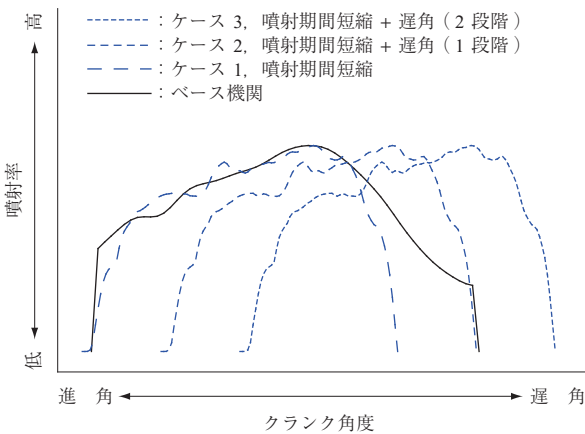
3.2.1 噴射期間短縮

75%負荷における燃料噴射率を第3図に示す。実線で示されるベース機関の燃料噴射率に対して、ピーク値を過ぎた時点から速やかに噴射終了となるような燃料噴射率（ケース1）を新たに設計した。二つの燃料噴射率による機関性能を第4図に示す。噴射率の重心が進角方向へ移動したため、筒内圧力が上昇してNO_x排出率は増加した。一方、燃焼解析の結果から、後燃え期間の短縮による排気温度の低下が確認でき、燃料消費率および排煙濃度は改善された。

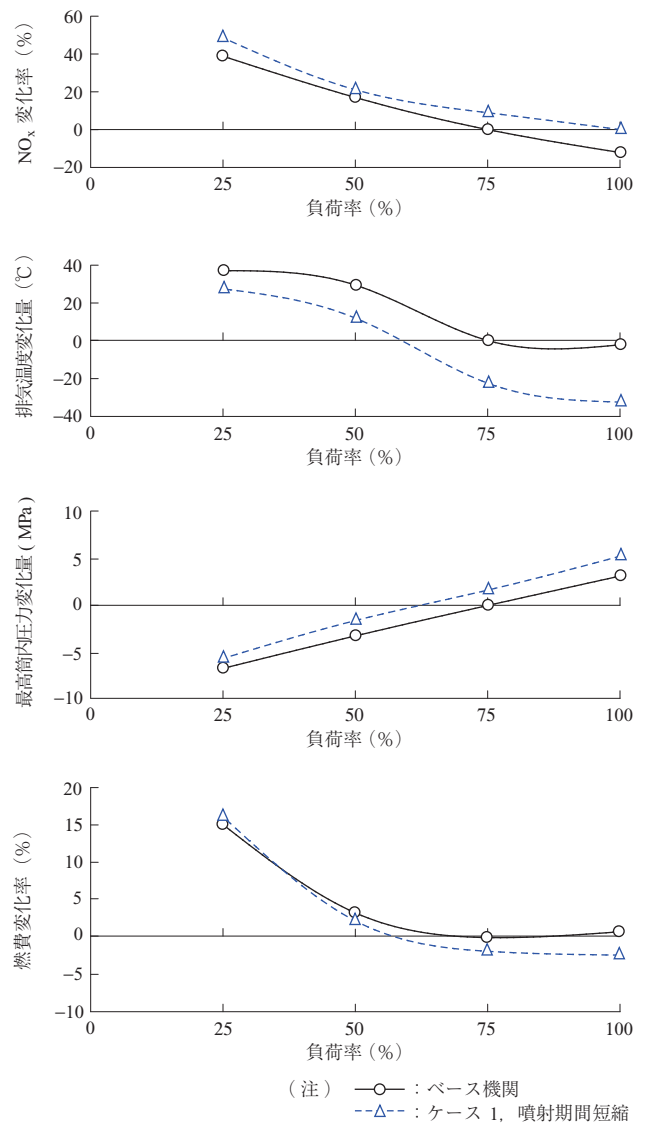
3.2.2 噴射開始時期変更

次に、噴射開始時期を遅角した場合の機関性能を第5図に示す。噴射期間を短縮したケース1の噴射終了時期を、初期の時期と一致するまで遅角した場合をケース2とし、さらに遅らせた場合をケース3とした。

燃料噴射開始時期の遅角に伴って燃焼期間は膨張行程へ移動するため、排気温度および燃料消費率は悪化する。特に、ケース2およびケース3の100%負荷では、燃焼圧力が圧縮圧力と同等かそれ以下であり、燃焼圧力のピーク時期も遅れるために燃料消費率の上昇が著しい。NO_x排出率については、燃料噴射開始時期の遅角の影響を大きく



第3図 噴射率の変更
Fig. 3 Modification of injection ratio



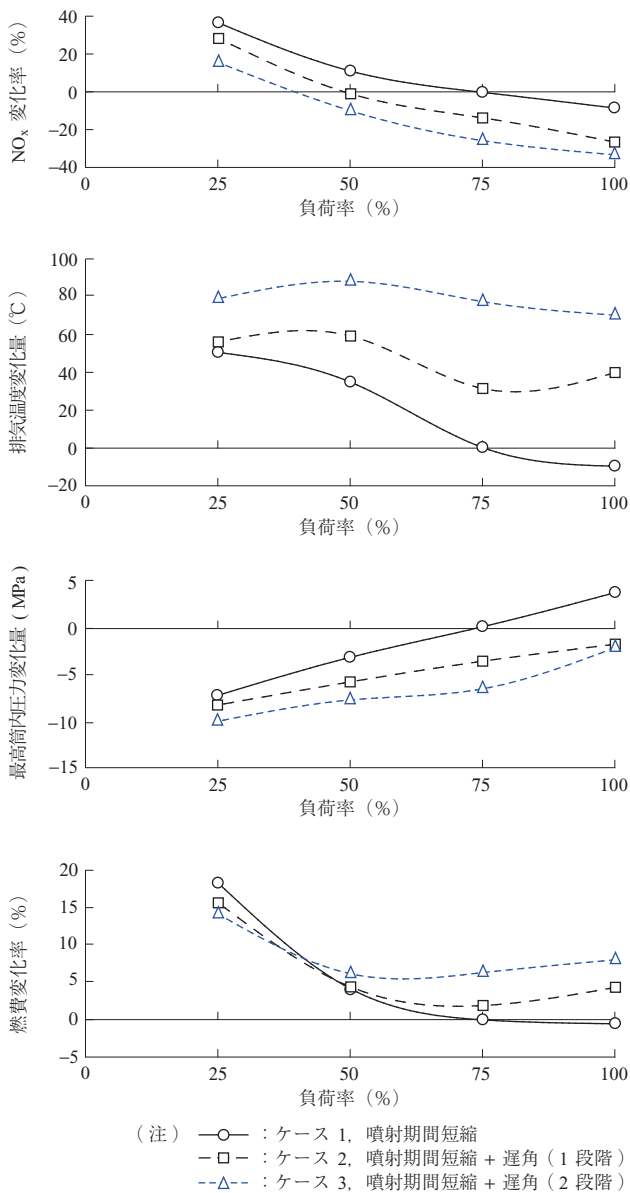
第4図 噴射期間短縮による燃費低減

Fig. 4 Improvement of fuel consumption due to shortened fuel injection duration

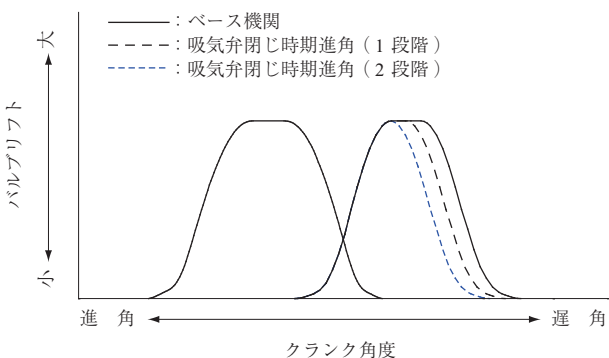
受けて、いずれの負荷においても低減された。75%負荷における低減率は約26%に達する。

3.3 ミラーサイクル化

さらなる低NO_x化の手法として、ミラーサイクル化の導入を検討した。ミラーサイクルの特長は、給気圧力上昇による吸入空気量の増加と吸気弁閉じ時期の変更を適切に組み合わせることによって、同じ仕事を低い筒内温度で達成することにある。ここでは、実機試験での実現可能性を考慮して、まずベースエンジンで使用している過給機シリーズのなかから選定可能な範囲で圧力比を設定した。次に、圧縮行程終わりの筒内圧力を一定に保つべく、第6図に示すように吸気弁閉じ時期を調整した。このようにして設定した過給機圧力比と吸気弁閉じ時期の3通りの組合せに対してNO_x低減率を調査した。

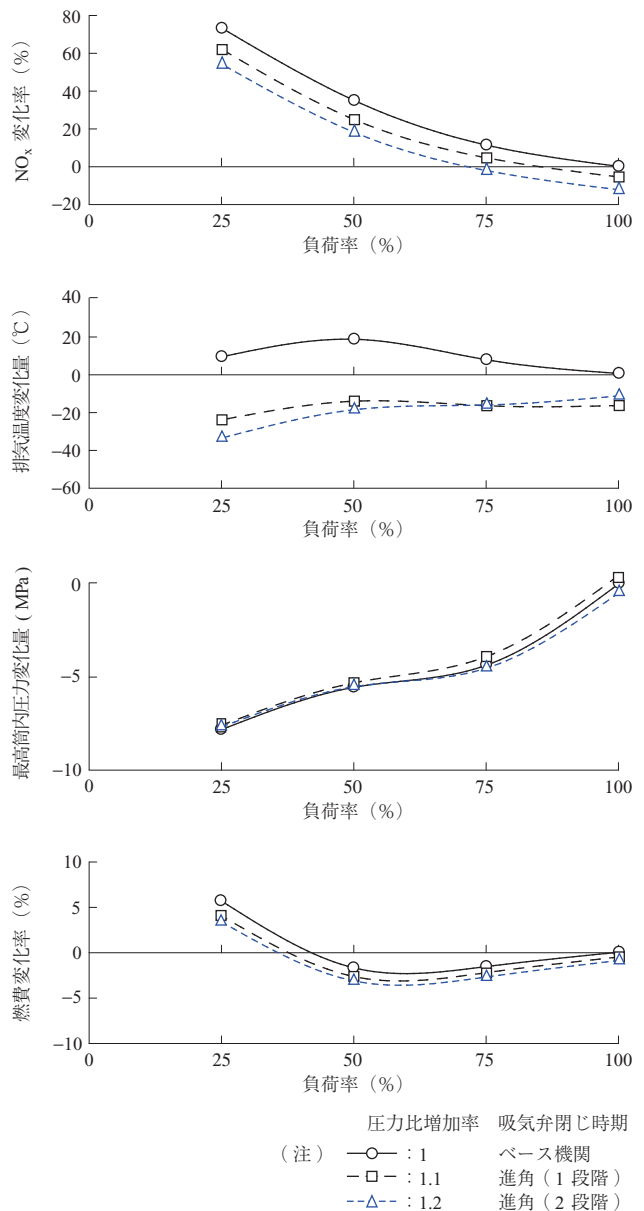


第 5 図 噴射開始時期遅角による NO_x 排出低減
 Fig. 5 NO_x emission reduction through injection timing retard



第 6 図 ミラーサイクル適用時の吸気弁閉じ時期
 Fig. 6 Change in intake valve closure timing when the Miller cycle is applied

第 7 図に、過給機圧力比を初期設定値に対して最大約 20% 上昇させた場合の燃料消費率、排出ガ斯特性の変化



第 7 図 ミラーサイクル化による NO_x 排出低減
 Fig. 7 Simultaneous reduction of NO_x and fuel consumption with the Miller cycle

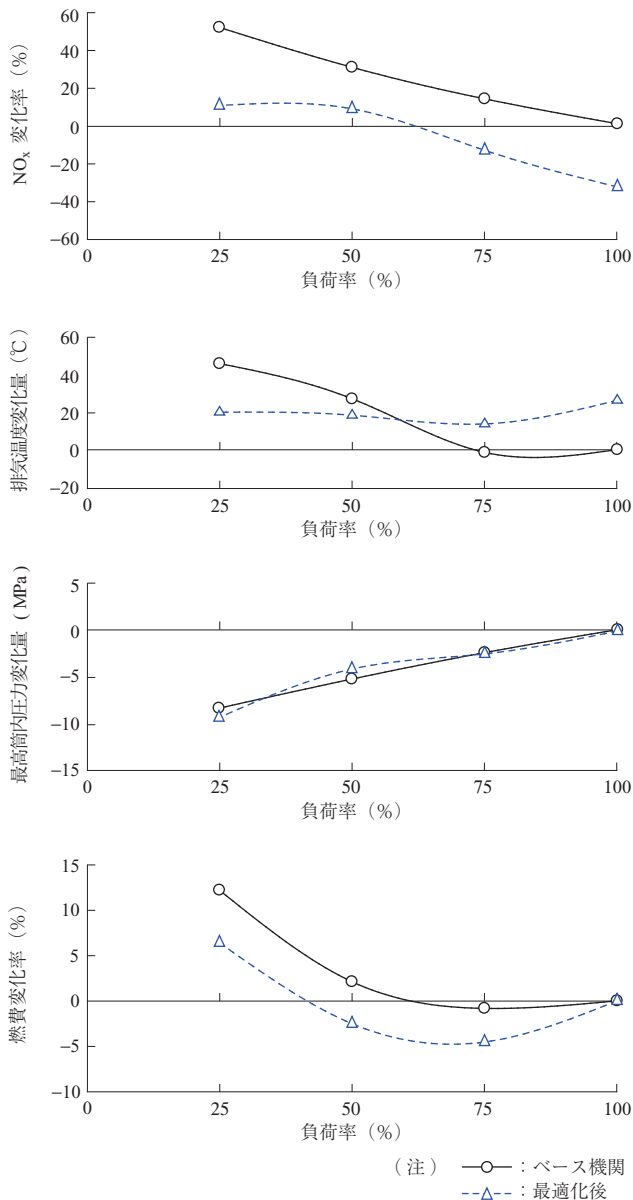
を示す。ミラーサイクル化の程度を強めるにつれて圧縮行程の筒内平均ガス温度が低下するため、これに導かれて燃焼期間の温度も低下する。そのため、NO_x 排出率は負荷によらず大幅に低減されて 75% 負荷では 14% の低減率が達成された。さらに、吸排気時の *p-V* 線図の比較からは低圧仕事の増加が確認され、約 1% の燃料消費率低減が確認された。

4. 実機試験による検証

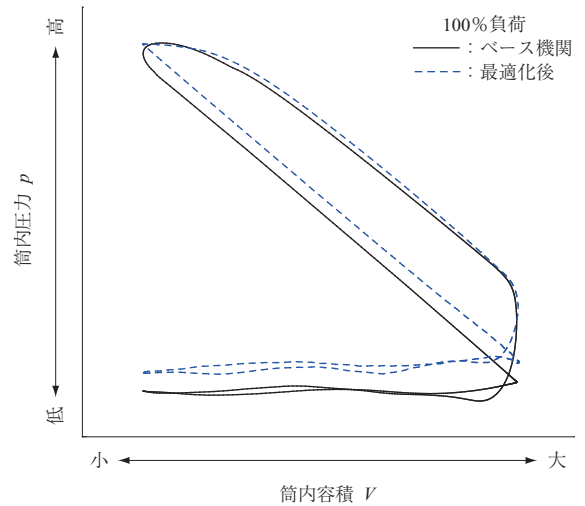
これまで、燃料噴射率、燃料噴射時期およびミラーサイクル化が NO_x 排出率に及ぼす影響について述べてきた。これらの条件を組合せて変更した場合の機関性能を

実機試験によって検証した結果を第8図に示す。ここで、各性能はベース機関の100%における値で正規化している。結果として、NO_x 排出率はいずれの負荷においても著しく低減しており、IMO NO_x II次規制値をクリアした。一方、燃料消費率については、定格負荷において悪化させることなく、さらに低中負荷域の改善を実現している。

第9図に100%負荷におけるp-V線図を比較する。対象とした二つの機関では、圧縮比のほかにストローク長も異なるが、燃焼期間中の筒内圧力変化の比較を容易にするために、筒内容積を行程容積で除して無次元化した。着火時期付近の圧力変化を見ると、要目変更後の線図ではほぼ一定圧力で燃焼が行われており、ディーゼルサイクルが実現されていることが確認された。ここで、爆発度とNO_x



第8図 IMO NO_x II次規制対応策適用時の機関性能
Fig. 8 Engine performance when IMO NO_x Tier II is applied



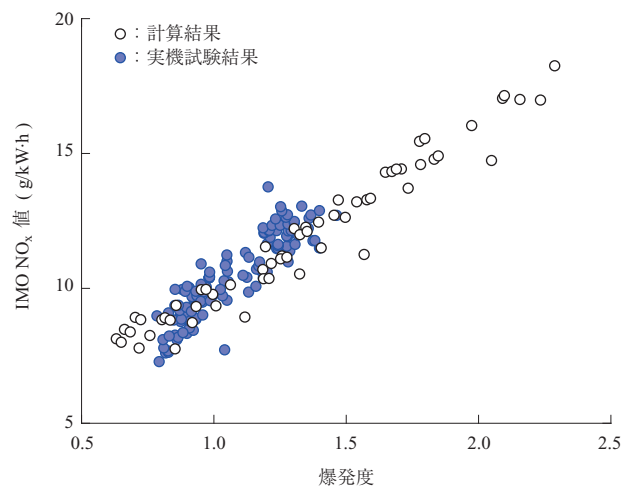
第9図 IMO NO_x II次規制対応策適用時のp-V線図の変化
Fig. 9 Change in p-V diagram when IMO NO_x Tier II is applied

排出率との相関を第10図にまとめると、両者の間には比例関係が成立しており、爆発度がNO_x 排出率を予測するための指標として有効であることを確認できる。

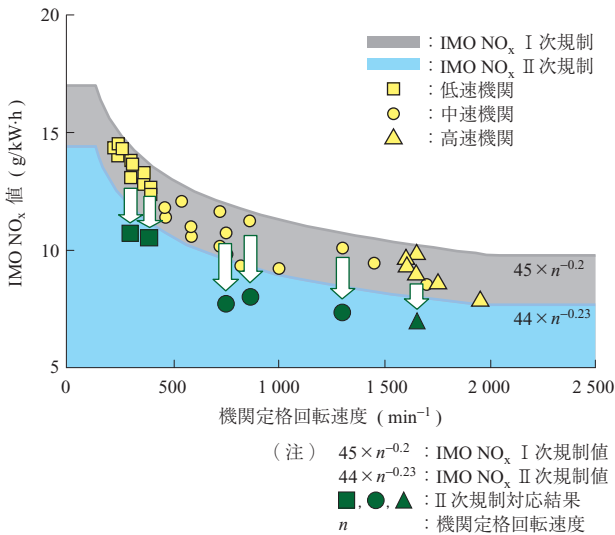
上述の規制対応技術を適用することによって、IMO NO_x II次規制への対応を図った結果を第11図に示す。NO_x 低減要求がより厳しい低速機関から高速機関まで、燃費の悪化を伴うことなく規制値をクリアしており、当社のII次規制対応技術の妥当性および普遍性が検証された。

5. 実際の船舶運航状況を考慮した燃料消費削減効果

本研究で開発された排出ガス規制対応技術は、NO_x 排出を十分に低減させるのみならず、燃費性能も向上させる効果がある。そこで、本技術が適用された機関を搭載した場合に得られる燃料消費量削減効果を、船舶の運航状況を



第10図 爆発度とIMO NO_x 値の相関
Fig. 10 Correlation between P_{max}/P_{comp} and IMO NO_x



第 11 図 IMO NO_x II 次規制対応状況
 Fig. 11 Application of low-NO_x technology to all products

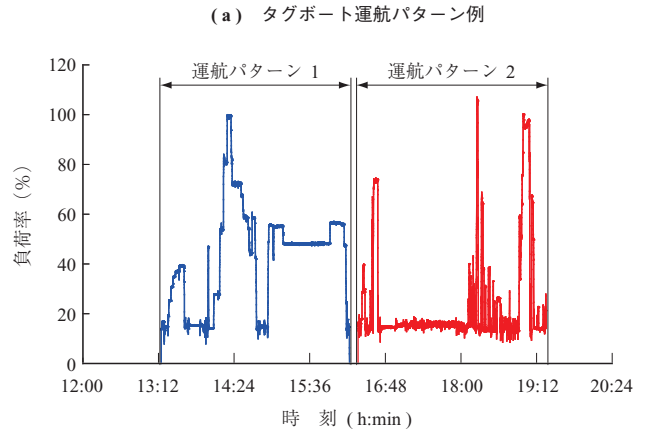
考慮してシミュレートした。検討には、供試機関と同出力クラスの機関が搭載されたタグボートで計測された実運航状況を使用した。

第 12 図にタグボートの実運航状況を示す。第 12 図 - (a) は、機関の負荷状況例を時刻暦に示したもので、機関の起動から停止までを 1 運航として 2 パターンを抽出している。5% ごとに区分けした負荷別の出現頻度を、対応する燃費曲線とともに第 12 図 - (b)、第 12 図 - (c) に示す。一般に、タグボート作業においては低中負荷率の割合が多いことが知られているが、運航パターン 1, 2 ともにこれを裏付ける形となっている。負荷率ごとの頻度と燃費を重ね合わせて、1 運航に必要な燃料消費量を算出して、従来機種と本開発技術適用時を第 13 図に比較する。低中負荷域における大幅な燃費改善の結果として、実運用時には約 6% の燃料消費削減効果、換言すれば、6% の運用コスト削減が推算される。燃費の削減はそのまま CO₂ 排出量の削減を意味しており、本研究の成果は NO_x 排出率低減のみならず温室効果ガス排出量削減の一助にもなる。

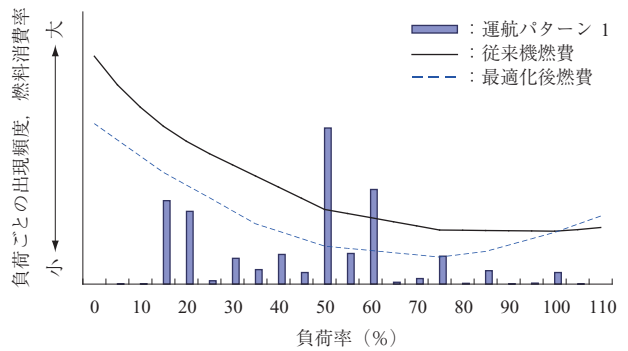
6. 結 言

船用 4 ストローク中速機関を用いて、IMO NO_x II 次規制に対応するための NO_x 低減技術を検証し、以下の知見を得た。

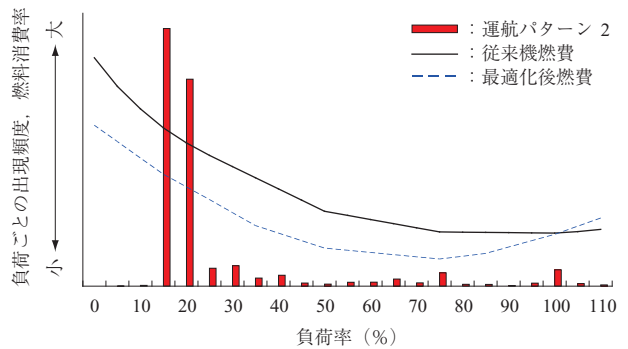
- (1) 燃料噴射率、噴射時期およびミラーサイクル化を組合せることによって、燃費の悪化を伴うことなく II 次規制をクリアすることを確認した。



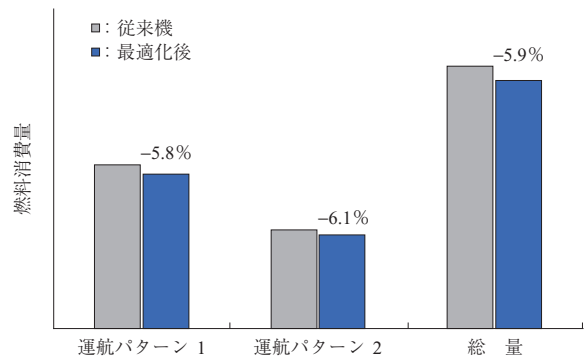
(b) 運航パターン 1 における機関稼働状況



(c) 運航パターン 2 における機関稼働状況



第 12 図 タグボートの実運航状況
 Fig. 12 Measured engine load pattern with tug boats



第 13 図 本開発技術による運用コスト低減効果
 Fig. 13 Reduction of operational costs by the new emission control technology

- (2) 開発された NO_x 低減技術は、機関の回転速度によらず、あらゆる船用機関に有効であり、II 次規制対応の実現性を確認した。
- (3) 本研究の成果をタグボート向け機関に適用する場合、実運航を考慮した燃料消費量は約 6%削減される。

— 謝 辞 —

本研究の一部は、日本財団の助成事業として国土交通省および社団法人 日本船用工業会によって行われている「スーパークリーンマリンディーゼルの研究開発」の一環

として実施されました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) M. Kawakami et al. : Environmental Contribution with Niigata Marine Diesel Engines 25th CIMAC World Congress (2007) Paper No. 28
- (2) M. Kawakami et al. : Investigation on reducing NO_x emission of medium-speed diesel engines 18th CIMAC World Congress (1989) Paper No. D27