新潟原動機におけるIMO NOx 規制対応技術*

田 貝 哲 哉** 三 村 敬 久*** 後 藤 悟***

1. はじめに

船舶からの排出ガス規制については、2005年5月にIMO MARPOL ANNEX VIが発効され、その後の見直しにより、2008年10月のIMO MEPC58にてさらに厳しい規制が採択された。その結果、新造船に対するNOx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、今後も誠実に取り組むところである(図1)。本報告は、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ものである。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析的に調査した。さらに、III次規制に対する手段としての

後処理技術およびガス機関の開発について簡潔に紹介する。

2. IMO NOx II 次規制対応戦略

IMO NOx 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。NOx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等があるが、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 NOx II 次規制対応技術は、NOx排出率低減技術と熱効率向上技術の双方により構成される。

大型中速ディーゼル機関におけるNOx低減の取り組みは、Kawakamiら¹⁾により実施され、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、NOx排出量を設計する上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、NOx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り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。

図2にサバテサイクルとディーゼルサイクルの、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3s、3d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 $S4s > S4d$ となる。排出熱量はA-1-4-B-Aの面積で示されるから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 $T3s > T3d$ であり、NOxが筒内温度の上昇により生成されることを

図1 IMO NOx I 次規制対応状況

*原稿受付 平成22年12月22日.

** 新潟原動機株式会社 技術センター

***正会員 新潟原動機株式会社 技術センター
(太田市西新町125-1).

図2 ディーゼルサイクルとサバテサイクルの比較

考えれば、サイクル論からディーゼルサイクルにより NO_x が低減されることが明らかである。

3. 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、ボア 280mm, 単気筒当たりの出力が370kWの4ストローク中速ディーゼル機関である(表1)。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徴を有す。以下の実験は、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 始めに、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、Kawakami 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り達成するために、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。これにより、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まとめる。

3.2.1 噴射期間短縮 75%負荷における燃料噴射率を図3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(Case1)を新たに設計した。2つの燃料噴射率による機関性能を図4に示

表1 供試機関の主要目

Bore x Stroke	280 x 390 [mm]
Engine speed	800 [min ⁻¹]
Rated output	370 [kW/cyl.]
BMEP	2.3 [MPa]

図3 噴射率の変更

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図5に示す。噴射期間を短縮した Case1 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 Case2 とし、さらに遅らせた場合を Case3 とした。

燃料噴射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、Case2 および Case3 の 100% 負荷では、燃焼圧力

図4 噴射期間短縮による熱効率向上

図5 噴射時期遅延によるNO_x排出低減

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、燃料噴射時期の遅角の影響を大きく受けて、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 更なる低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徴は、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合せることによって、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中から選定可能な範囲で圧力比を設定した。次に、圧縮行

図6 ミラーサイクル適用時の吸気タイミング

図7 ミラーサイクル化によるNO_x排出低減

図8 II次規制対応策適用時の機関性能

程終わりの筒内圧力を一定に保つべく、図6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。

図7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、排出ガス特性の変化を示す。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%の燃料消費率向上が確認された。

4. 実機試験による検証

これまでに、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り検証した結果を図8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、定格負荷においては悪化させることなく、さらに低負荷域の改善を実現している。

図9 定圧燃焼サイクルの実現

図10 爆発度とIMO NO_x 値の関係 図11 IMO NO_x II次規制対応状況

図12 内航船へのSCR脱硝装置搭載例

図13 ガスエンジン転換によるNOx排出低減

図9に100%負荷におけるp-V線図を比較すると、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具現化されていることが確認された。ここで、爆発度とNOx排出率との相関を図10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NOx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り、IMO NOx II次規制への対応を図った結果を図11の白抜きプロットにて示す。NOx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. IMO NOx III次規制への対応

更なるNOx排出率低減の目標として、IMOではIII次規制を審議している。III次規制におけるNOx排出率の低減率は、現行規制値に対して約80%であり、対応策として排気後処理および代替燃料利用の研究が進められている。ここでは、これらの技術に関して新潟原動機が過去に取り組んだ実績と今後の展望について述べる。

5.1 排気後処理 排気後処理のうち選択接触還元(SCR)脱硝については、既に欧州にて実績が有り、装置単独で80%以上のNOx排出率低減が可能であることから、III次規制対応技術として有望な技術の筆頭である。新潟原動機では、1990年代初頭に開発された陸用脱硝装置の技術を応用して、1993~1994年には船用脱硝装置のフィールド試験を行い、翌年には同様の脱硝装置を採用した低速機関を納入した実績が有り、十分なNOx低減効果を確認している³⁾。また、III次規制対応のために、最新のSCR脱硝装置との組合せによるフィールド試験を2010年に実施している。

ここで、SCR脱硝装置を4サイクル低速機関と組合せた場合のレイアウトの一例を図12に示す。4サイクル機関が収められる機関室は狭隘なため、脱硝装置の大きさは制限される。このため、排気煙道の途中に追加された脱硝反応器(Converter)は、可能な限り効率を高くして、外形寸法を最小にした。このとき、SCR脱硝装置の能率を表すSV値は約9000h⁻¹と設定された。脱硝反応器の要素試験の結果、この様な条件下においても80%以上の脱硝率が得られることが確認されており、これを前述の中速機関に適用すればIII次規制を満足することは可能である。

5.2 代替燃料の利用 代替燃料の利用としては、従来の液体燃料から天然ガス等の気体燃料を利用する方法も有効である。これまでガスエンジンは、陸用発電およびコージェネレーションのキーハードとして稼働されてきた。希薄燃焼ガスエンジンの場合、比熱比の小さな燃料ガスを吸気と共に導入するため、圧縮終わりのガス温度が低くなることと、筒内に燃料リッチとなる領域が無いため部分的な高温場が発生しないことから、NOx排出レベルは低く、ディーゼルエンジンと比較すると、図13に示されるように1/10以下と低い⁴⁾。したがって、ディーゼル機関をガス機関に転換することにより、III次規制をクリアできる可能性がある。ただし、ガスエンジンは急激な負荷操作に弱いという特徴がある。船用主機関として利用する場合、急速負荷操作への対応が要求されるが、このときに生じる過給機の応答遅れに伴う空気不足によって、燃料過剰によるノッキングまたは失火を誘発することがある。このため、荒天時の海上での位置制御や、急加速による船速アップが要求される場合には、機関の安定動作という点において問題が懸念される。すなわち、実用技術開発、とりわけ、船の操作要求に応えるための技術開発が今後の課題である。

6. おわりに

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み合わせることにより, 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.
2. 開発された NO_x 低減技術は, 機関の回転速度に依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. 開発された NO_x 低減技術と SCR 脱硝技術を組み合わせることにより, 来るべき III 次規制に対応することは可能である.

謝辞

本研究の一部は, 国土交通省および社団法人 日本船用工業会が日本財団の助成を受けて行っている「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. 記して謝意を表します.

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
- 3) K. Yaguchi et al. "High NO_x Reduction System Mounted on 500 GT Class Vessel" ISME Yokohama '95, (1995), 92-98
- 4) S. Goto et al. "Development of Advanced Gas Engine 22AG with High BMEP, High Efficiency, Ignited by Micro-pilot MDO" 23rd CIMAC World Congress, (2001), 941-956