

## 連携記事

# 船用大型ディーゼル機関の環境対策技術

## Reduction Technologies of Environmental Pollution in Large Marine Diesel Engine

三井造船(株) 機械・システム事業本部  
機械工場技術開発部 主管

難波浩一 Kouichi Namba

同上 部長

三宅慎一 Shinichi Miyake

### 1 はじめに

中国をはじめアジア諸国や南米諸国の急速な経済成長に伴って、世界的に船腹需要は著しく増加した。今後も、長期的には世界経済の成長と共に海上荷動き量は増加傾向にあると予想される。一方、温室効果ガスの排出削減要求ならびに燃料価格の高騰から船用ディーゼル機関の高効率化が推進されている。また、世界的な環境規制強化の流れに沿って、国際海事機関IMO (International Maritime Organization) では、船用ディーゼル機関の排ガス規制強化について議論され、2008年10月の第58回海洋環境保護委員会MEPC58において、次期規制の枠組みを示した付属書Ⅵの改正が承認された<sup>1)</sup>。これを受けて、各船用ディーゼル機関メーカーは環境対策に関する技術開発を加速させている。

船用大型ディーゼル機関の主要部品には鉄鋼材料が多用されている。最近では、機関の信頼性を維持すると共に、部品の

低コスト化および軽量化が図られている。

ここでは、三井造船および三井造船のライセンサであるMAN Diesel社に着目して、まず船用大型ディーゼル機関の構造と主要部品の材質について簡単に述べると共に、軽量化の事例を示す。つぎに、最近の環境対策に関する船用大型機関の技術開発動向について紹介する。

### 2 船用大型ディーゼル機関の主要部品と使用材料

Fig.1に、船用ディーゼル機関の構造と主要部品の材質を三井-MAN B&W 6S60MC-Cを例にして示す。燃料噴射ポンプと排気弁をカム軸で駆動する従来型の機関である。2ストローク低速ディーゼル機関はクランク軸が直接プロペラ軸に結合される。1回転に1回の燃焼、掃気が下方から上方へと一方向に流れるユニフロー掃気、シリンダ内のピストンの

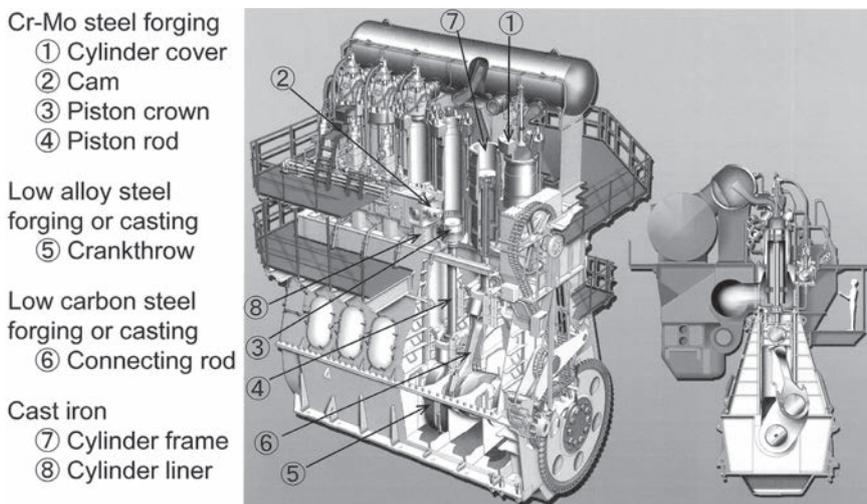


Fig.1 Cut view of Mitsui-MAN B&W 6S60MC-C engine

ストロークが比較的長いことなどが特徴である。シリンダカバー、カム、ピストン冠、ピストン棒などにはCrMo鍛鋼が使われている。接続棒には低炭素鋼鍛鋼もしくは鋳鋼、クランクローには低合金鋼鍛鋼もしくは鋳鋼が使用されている。また、耐摩耗性と強度が要求されるシリンダライナにはボロンを添加した特殊ねずみ(片状黒鉛) 鋳鉄が用いられる。シリンダライナを収めるシリンダフレームはねずみ鋳鉄製である。ピストン冠に取付けるピストンリングでは、CV (Compacted-Vermicular) 黒鉛鋳鉄もしくはねずみ鋳鉄にサーメットを溶射して耐摩耗性および耐焼きつき性を向上させている。

Fig.2は、トポロジ最適化によりシリンダフレームの構造最適化を行って軽量化を達成した例である。Fig.2 (a) の従来型に比べて (b) の最適化デザインでは、天板の余肉厚みが減り、逆にシリンダライナから受ける爆発荷重を上手く分散させるように側板の最薄部厚みが増加しているのが分かる。これにより、従来型に比べてシリンダ1筒当たり13%軽量化することができた。

### 3 船用大型ディーゼル機関のNOx削減技術の開発

船舶からの排ガスに対する国際的な規制は、海洋汚染防止条約 (MARPOL 73/78) 付属書Ⅵに基づき2005年5月から実施されている。2006年からIMOにおいて規制強化の検討が開始され、2008年10月の第58回海洋環境保護委員会MEPC58において、次期規制の枠組みを示した付属書Ⅵの改正が採択された。IMOによる新造船用ディーゼル機関でのNOx規制値<sup>1)</sup>を機関回転数に対してFig.3に示す。今後、規制強化が2011年からの2次規制 (Tier II)、2016年からの3次規制 (Tier III)へと段階的に実施される。低速機関において

は、2次規制により現行の1次規制に対して15%の削減が適用される。さらに3次規制においては、とくに排出規制海域ECA (Emission Control Area) では1次規制に対して80%の低減が要求されている。

2次規制に対しては従来のIn-engine技術の組合せでクリアできる見込みであるが、大幅なNOx低減が要求されている3次規制に関しては、機関の燃焼制御のみでは達成が困難である。現在のところ、選択還元触媒式脱硝SCR (Selective Catalytic Reduction) 法および排ガス再循環EGR (Exhaust Gas Recirculation) システムの2つが有望視されており、2016年の3次規制に向けて各機関メーカーは技術開発に注力している。つぎに、これら2つの方法について簡単に紹介する。

#### 3.1 SCR法

SCR法は、燃焼によって生成したNOxを触媒による還元反応によって削減するもので、還元剤にはアンモニアあるいは尿素が使用される。この方法は、すでに陸上の火力発電設備やゴミ処理施設の排ガス処理法として普及している。一方、船用大型機関に対しては2001年に世界で初めて本格的にSCRが適用された。Fig.4に、MAN Diesel社製6S35MCを主機関とするLPG船にSCR装置を搭載した事例<sup>2)</sup>を示す。本船は就航後にSCR設備を追加したため、機関室の上部に大きな触媒塔、排ガス配管、それらのサポートなどを増設する大幅な改造が加えられた。この例をはじめ、SCRの適用には機関室内の設置スペース上の問題があり、SCR設備の小スペース化が課題である。また、Fig.4の例では過給機の上流側にSCRを設置している。これは排ガス温度が約250℃以下では酸性硫酸の生成により触媒の活性が低下するので、SCR入口の排ガス温度を高くする必要があるためである。一方、SCRの熱容量および容積が大きいことから過給機へ供給される排ガスの温度変化が鈍くなるため、機関制御上の問題が生

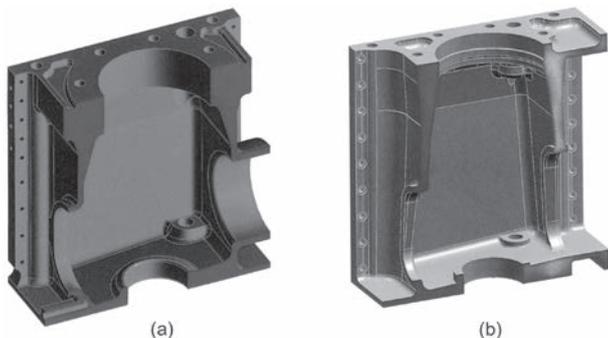


Fig.2 Optimized design of cast iron cylinder frame  
(a) Conventional design  
(b) Optimized design

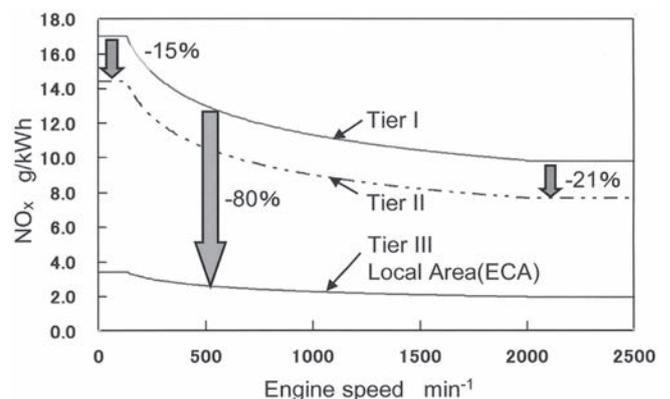


Fig.3 NOx regulation for new ships in revised IMO MARPOL 73/78 ANNEX VI

じることが予想される。そのため、起動・停止時、低負荷運転時、急激な負荷変動時にはSCRをバイパスさせた運転が必要となる。

一方、過給機の下流側にSCRを設置する方法を試みている船用機関メーカーもある。この場合、機関制御上の問題はない反面、低速機関の過給機出口の排ガス温度は約250℃以下と低いため、触媒の劣化対策が課題となる。

### 3.2 EGR システム

EGRシステムは、排ガスの一部を過給機の上流側で新気と混合させて、酸素濃度を下げて掃気することによって、また排ガス中のCO<sub>2</sub>の高い比熱により燃焼ピーク温度を下げることによってNO<sub>x</sub>排出量を低減させる方法である。MAN Diesel社による船用大型機関用EGRシステム例<sup>3)</sup>の概念図をFig.5に示す。排ガスを掃気として導入する前にスラッジの除去および排ガスの冷却が必要である。同社ではEGRシステムの陸上試験は終了して、現在船上での実証試験を実施中である。これらを通じて、ほぼ80%のNO<sub>x</sub>低減が可能な見通しを得ている。

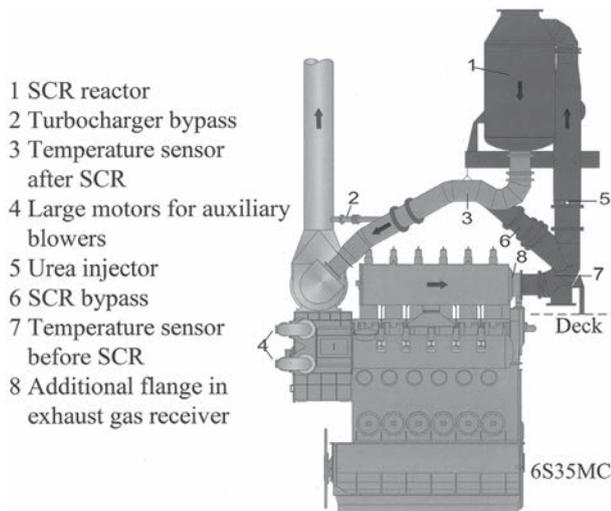


Fig.4 Schematic of SCR system (MAN Diesel)

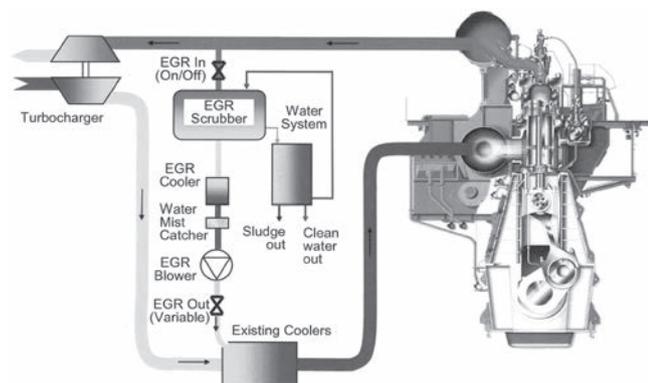


Fig.5 Schematically diagram of EGR system (MAN Diesel)

## 4 船用大型ディーゼル機関の 高効率化

### 4.1 電子制御船用大型ディーゼル機関

船用大型機関において、燃料噴射の電子制御は主に信頼性とコスト面の理由により自動車分野に比べて普及が遅れていた。Fig.6に、2006年に納入した世界最大級の電子制御船用ディーゼル機関である三井-MAN B&W 12K98ME機関の外観を示す。シリンダ直径980mm、出力68640kW、回転数94rpm仕様の大型コンテナ船用主機関である。本機関のような電子制御機関では、従来機関のような燃料噴射ポンプと排気弁を駆動するカム軸を廃して、燃料噴射弁および排気弁の開閉およびシリンダ注油のタイミングを電子制御により行う。その結果、広い負荷範囲における燃料消費率の最適化、シリンダ油消費量の改善、排ガス中のNO<sub>x</sub>および煤煙の削減、機関重量の低減などが可能となった。さらに、従来よりも最低回転数を下げて運転することができるため、狭水道や港湾内航行における操船性が向上した。今後も電子制御機関の需要は増えると予想される。

### 4.2 CO<sub>2</sub>削減技術

国土交通省海事局は、国際海運分野におけるCO<sub>2</sub>削減対策推進のため、平成21年度から4ヶ年計画で、在来船に対して30%の削減を可能とする技術確立を目指す技術開発を補助する事業を開始した。その中、三井造船はディーゼル機関の効率向上廃熱回収の技術分野において、大型低速ディーゼル機関の燃焼最適化技術の開発に参画している。以下では、排ガスからのエネルギー回収による総合的な熱効率の改善技術開発について、その概要を紹介する。

Fig.7に、2サイクル低速大型機関のヒートバランス例を示す。投入燃料発熱量の約25%が排気エネルギーである。最近

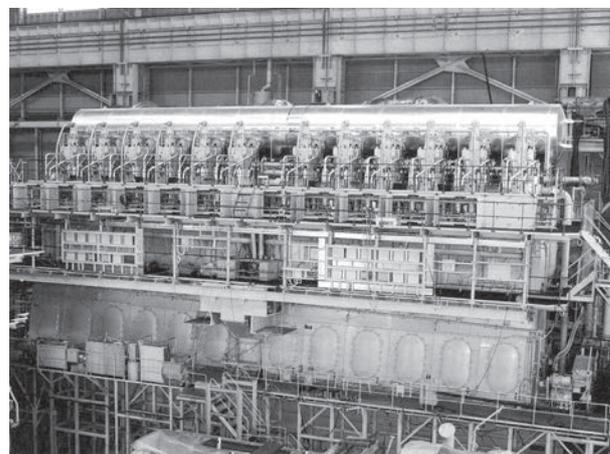


Fig.6 Appearance of Mitsui-MAN B&W 12K98ME engine

の過給機の効率が向上した結果、排ガスが導入される過給機に余剰エネルギーが発生する。この余剰エネルギーを動力として回収することにより総合熱効率を向上させる技術を開発中である。Fig.8は、余剰エネルギーを油圧動力として回収するTHS (Turbo Hydraulic System)<sup>4)</sup>の外観である。過給機の軸端に中間軸を介して減速機を直結し、その出力軸に可変容量型油圧ポンプを取付けて300barの高圧油としてエネルギー回収するものである。2007年に過給機単独の運転試験において、機関出力に対して3%以上の動力が回収できることを確認した。回収した動力は、電子制御機関の油圧動力源あるいはクランク軸に装備した大型油圧モータによるクランク軸駆動補助動力として利用が考えられる。本プロジェクトでは電子制御の試験機関を製作して、このTHSの有効性を検証する。

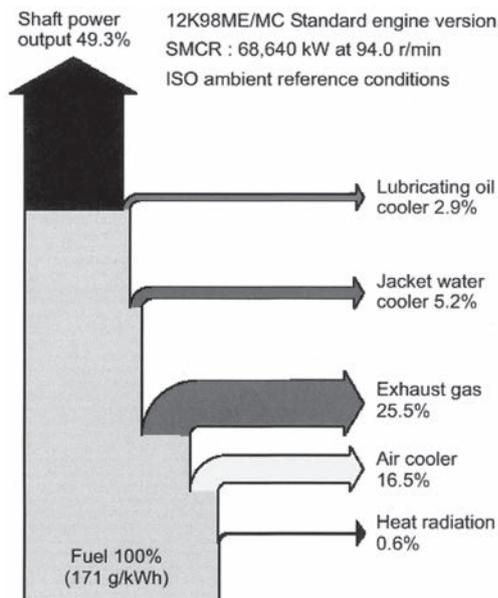


Fig.7 Heat balance of Mitsui-MAN B&W 12K98ME engine

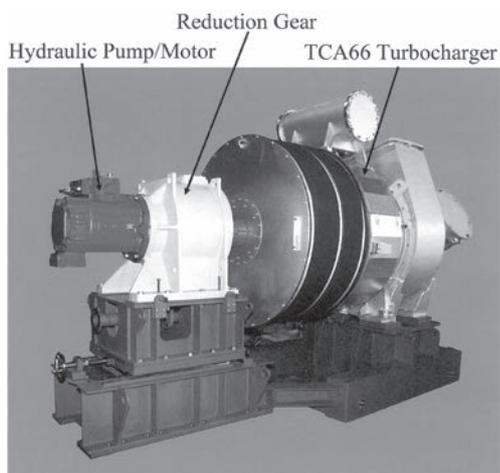


Fig.8 Appearance of THS

つぎに、EGS (Exhaust Gas Separation) システム<sup>5)</sup>による廃熱エネルギー回収について紹介する。EGSの概念図をFig.9に示す。従来の2ストローク低速機関では掃気が一方向に排ガスを追い出す。掃気工程中のシリンダ内のCO<sub>2</sub>濃度および温度分布は層状に不均一な分布をすると推測される。そこで、排気弁直後に排ガス切替え弁を取付けて掃気工程におけるガスの流れを分離する。すなわち、排気弁が開弁直後の高温燃焼ガスを多く含んだ高温ガス、およびその後新気を多く含んだ低温ガスにそれぞれ分離する。高温ガスは過給機に送り、一方低温ガスは冷却して補助ブロウにより掃気管に戻すことによって排ガスエネルギーの有効利用を図るシステムである。Fig.10は、排ガス分離弁試作装置の外観である。本システムを利用すれば、過給機へ導入する高温ガス量が相対的

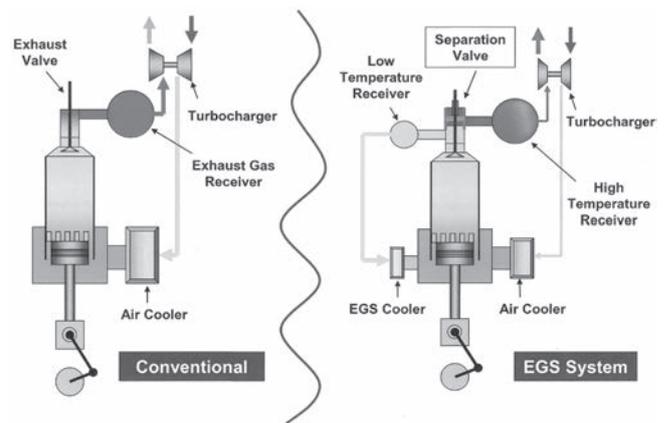


Fig.9 Schematic of EGS system

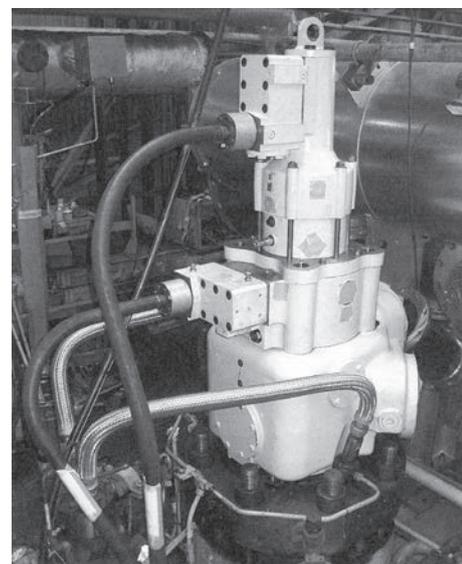


Fig.10 Gas separation valve assembly

に減少するため、過給機のコンパクト化が図れる。さらに、過給機の出口ガス温度が約100°C上昇するため過給機の下流側にSCR設備を設置しても触媒劣化の心配はない、SCR設備のコンパクト化が可能になるなどのNOx対策が容易に行える利点がある。また、THSを組合せることにより総合的な熱効率の向上がさらに期待できる。現在のところ、電子制御の単気筒試験機関において排ガスを高温ガスと低温ガスに分離可能なことを確認した。今後は4気筒電子制御試験機関においてEGSシステムの実証試験を行う。

## 5 おわりに

三井造船およびMAN-Diesel社の船用大型ディーゼル機関を例にして、機関構造と主要部品の材質について簡単に述べると共に、最適化設計による鋳鉄製シリンダフレームの軽量化事例について紹介した。また、船用大型ディーゼル機関において、CO<sub>2</sub>排出削減に向けた機関高効率化に関する技術開発および2016年に実施される世界的なNOx排出規制に対す

る環境対策技術の開発を紹介した。現在、実証試験機関を用いて実用化に取り組んでおり、船用機関メーカーとして環境保全に貢献していきたい。

なお、THSおよびEGSの開発は国土交通省の支援を受け、三井造船と日本海事協会との共同開発として実施中である。

## 参考文献

- 1) 平原祐：日本マリンエンジニアリング学会誌, 43 (2008) 6, 830.
- 2) 佐々木耕, K.Aabo：日本マリンエンジニアリング学会誌, 43 (2008) 3, 382.
- 3) 佐々木耕：ABS環境 세미나講演資料集CD-ROM, (2009)
- 4) M.Ohtsu and K.Shimada：Proc. 25th CIMAC Congress, Paper No.123, (2007)
- 5) M.Takahashi, I.Tanaka and M.Ohtsu：Proc. 8th Int. Symp. on Marine Engineering, Paper No.84, (2009)

(2010年3月10日受付)