

環境にやさしく、 進化する船舶用エンジン



近年、船舶への環境負荷低減要求が強くなっている。段階的にNOxやCO₂、さらにはSOxに対しても厳しい排出規制が課せられ、これに対応した船舶用ディーゼルエンジンの研究開発が積極的に進められている。なかでも中型船舶に主に使用される4ストロークディーゼルエンジンは、狭いエンジンルームのなかで、エンジンの性能を向上させながら、コンパクトである必要があり、技術的なハードルは高い。新しい環境規制に対応し開発が進む技術の動向を紹介する。

写真提供：新潟原動機(株)

写真提供：深田サルベージ建設(株)

強化される船舶への環境規制

近年の環境意識の高まりから、船舶からの排出ガスについても規制すべきという声が強くなっている。1990年代より国際規制を求める議論が活発になり、2005年から国際海事機関(IMO)による一次規制が始まった。規制は2000年以降建造された新造船についても遡って適用されている。その後、規制値は段階的に引き上げられている(図1)。

NOx(窒素酸化物)の排出規制については2011年より二次規制が全世界で実施されており、その内容は2005年の一次規制値から20%の削減が課せられている。そして2016年から指定海域において三次規制が始まっており、一次規制値から80%の排出削減が要求され、非常に厳しい内容となっている。SOx(硫黄酸化物)についての規制は、燃料油に含まれる硫黄分が現在3.5%以下となっているが、2020年からは0.5%以下に制限される。現在使用されている重油ではこれを満たす事ができないため、油種の変更や重油の製造方法の変更などの対応方法が検討されている。CO₂についての規制は、EEDI*規制値を段階的に強化し、2015年からフェーズ1が実施されている。その内容は2013年～2014年の規制値に比べ10%削減となっている。さらに2020年からは20%のCO₂排出削減が要求される。

このような厳しい規制が課せられているため、近年、船舶用ディーゼルエンジンは環境性能と運転性能を兼ね備えた機構・技術の開発が積極的に続けられてきた。

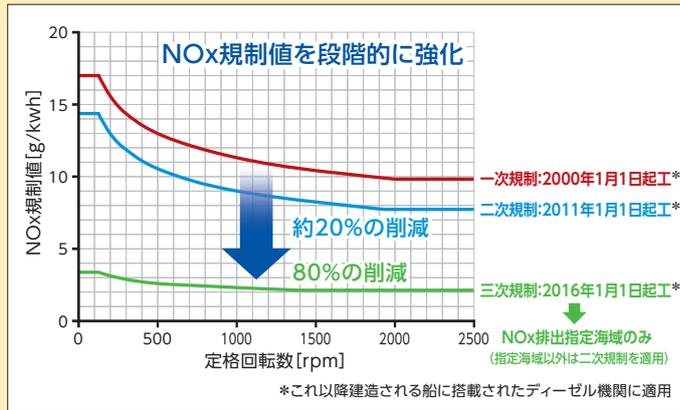
船舶用ディーゼルエンジンは熱効率がが高く、大型のものでは過給機との組み合わせで熱効率が50%を超えるものもあり、さらに燃料は低質で廉価な重油を使用しているため、優れた省エネルギー・ローコストを実現している。輸送原単位当たりのCO₂排出量がトラック等と比べ低いことから、陸上輸送から海上輸送への転換、いわゆるモーダルシフトが注目されている。現在、内航船による輸送は石灰石や石油製品、鉄鋼等の産業基礎物資が中心であるが、最近ではトラックドライバー不足が深刻化するなかで、トラックで輸送されている貨物の海上輸送が検討されつつある。

環境にやさしい輸送を実現している船舶であるが、近年の厳しい環境規制に対応するには、一層の改善が必要となっている。これまで船舶用エンジンは洋上でトラブルに乗組員が対応できるようにシンプルな構造でつくられてきたが、従来の船舶用エンジンの構造や考え方の見直しを迫られることとなっている。

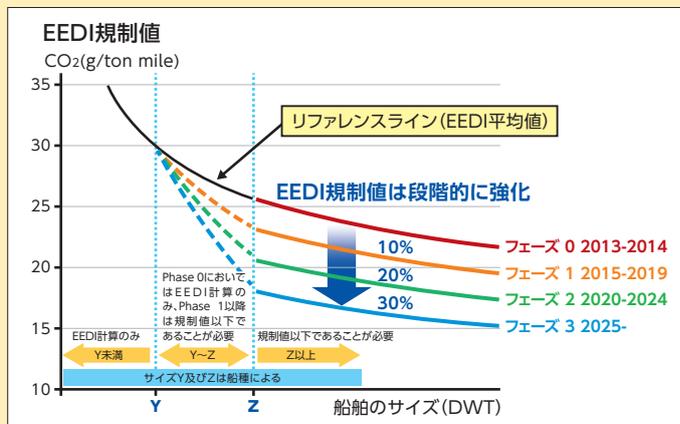
*EEDI(Energy Efficiency Design Index):エネルギー効率設計指標「1トンの貨物を1マイル運ぶ際に排出されるCO₂グラム数」を新造船の仕様と海上試運転の結果から見積もる。

■海洋環境保護関連の規制(図1)

●NOx排出規制



●CO₂排出規制



●SOx規制

	2015年1月	2015年7月	2020年
一般海域	3.50%		0.50%
指定海域 北海・バルト海、 米・加沿岸200海里、 米カリブ海	1.00%	0.10%	

●指定海域

黄色で記した指定海域はより厳しい規制が課せられる。



(一財)日本海事協会資料より

環境規制に対応した技術開発

船舶には沿岸部を主に航行する内航船と、外洋を航行する外航船があり、内航船に主に使用される中型船舶では4ストロークディーゼルエンジンが、外航船に主に使用される大型船舶では2ストロークディーゼルエンジンが主に使用されている。

主に中型船舶に搭載されることの多い4ストロークディーゼルエンジンは、吸気～排気工程までにピストンが2往復(すなわち4回移動)するエンジンで、2ストロークディーゼルエンジンに比べ、燃焼をコントロールしやすく、低燃費で排出ガスが比較的クリーンという特長がある(図2)。中型船舶に限られた設置スペースのなかで、エンジンの性能を向上させながら軽量小型である必要があり、技術的なハードルは高い。

排出ガスのなかでもNO_xは燃費とトレードオフの関係にあり、NO_xを低減すると燃費は悪化するという、相反する特性を両立させなければ規制には対応できない。一般的にディーゼルエンジンから発生するNO_xは、着火までに噴射された燃料が急激に燃焼する拡散燃焼期間に、空気中の窒素と酸素が反応して生成するサーマルNO_xが大部分を占めている。そのため燃焼温度、燃焼ガスの滞留時間、酸素濃度を抑えることがNO_xの低減につながる。そこで広く用いられているのがミラーサイクルと高

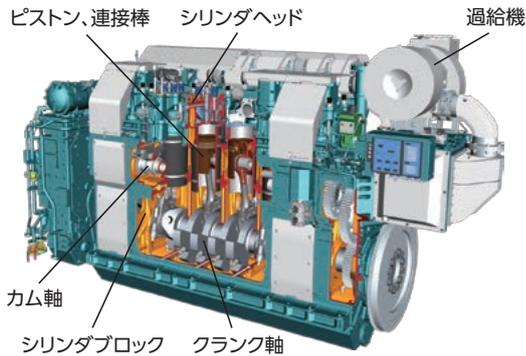
圧力比過給機の組み合わせである。ミラーサイクルとは吸気弁を早いタイミングで閉じることにより、燃焼温度を低下させてNO_x生成を抑えるものである。これにより給気期間は短縮するが、その分必要な空気量を供給するために、高圧力比過給機を組み合わせる。

さらにミラーサイクルに低負荷域と高負荷域で吸気弁の開閉タイミングを最適化する可変吸気バルブタイミング機構を付加したり、過給機に、排気流入量を制御するウェストゲート機構や吸気圧力を制御するエアバイパス機構(図3、4)を組み合わせ、燃費向上とスモーク(排煙色)の低減を図っているエンジンもある。

また燃料噴射の噴射時期や噴射量の制御が向上すれば、排出ガスの抑制に効果を発揮するため、電子制御化が進んでおり、さまざまな電子制御燃料噴射装置が実用化されている。

2016年より指定海域で始まっているNO_xの三次規制に対しては削減値が80%と、もはやエンジン単体での対応では達成不可能となっており、新たな対応技術の開発が必要となっている。例えば尿素を還元剤としたSCR(Selective Catalytic Reduction, 選択式還元法)は有力な方法として開発が進み、NO_x低減率は高い。ただし船内での設置スペースが限られているため小型化が必要となっている。これに対しても、エンジン

■4ストロークディーゼルエンジンの構造例(図2)

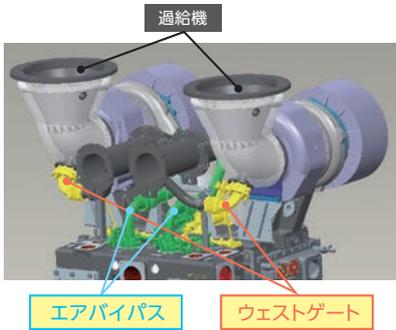


主な仕様

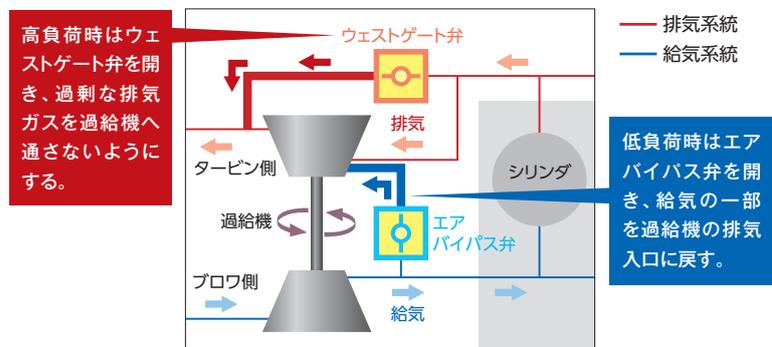
機 関 項 目	単 位	仕 様
回 転 数	min ⁻¹	800
シ リ ン ダ 径	mm	280
ス ト ロ ー ク	mm	390
定 格 出 力	6 L kW	2220
幅	mm	5900
高 さ	mm	3200

資料提供:新潟原動機(株)

■過給機に付加されたウェストゲート機構とエアバイパス機構(図3)



■ウェストゲート弁とエアバイパス弁の動き(図4)



自体のNO_x排出量が低減すれば、後処置を行うSCRの小型化が図れることから、エンジンの性能向上も依然として重要となっている。

シミュレーション技術を活用した小型・軽量化

環境規制への対応から、ディーゼルエンジンの小型・軽量化が進められている。エンジン本体の重量の低減は燃費改善やCO₂排出量の削減につながるため、各エンジン部品の材料の高強度化や形状の最適化が行われている。

シリンダブロックやシリンダヘッド、ピストン等のエンジン部品の多くは鋳鉄铸件で製造されている。同程度の強度を有する鋳鉄材でも、球状化率の違いにより材料特性および铸造性が異なるため、用途に応じて、片状黒鉛鋳鉄や球状黒鉛鋳鉄、CV(コンパクトドパーミキュラ)黒鉛鋳鉄が使用されている。とくに球状黒鉛鋳鉄は肉厚を薄くしても強度が確保できるため使用が増えている(図5)。

クランク軸はエンジンの中でも主要な部品であるが、1960年頃までは450 MPa級の炭素鋼が主流であったが、現在では800 MPa以上の低合金鋼等が使用されている。最近では950 MPa以上の高強度材も適用されており、高強度化が進展している。またエンジンの小型化や高出力化に伴い、クランク軸にはより高い疲労強度が求められており、高清浄度鋼製造

技術によって介在物を低減し、高疲労強度化が進められている。また加工においては、クランク軸を全面機械加工とし、質量ばらつきを低減しているエンジンもある(図6)。

また、近年ではシミュレーション技術を活用して部品の形状最適化等を行い、軽量化が図られている。2010年に世界でも最高水準の低燃費を実現した環境対応型エンジンは、エンジンの骨格を成すシリンダブロックの铸造木型の三次元寸法計測を行い、形状と肉厚などを調査して精度を向上させ従来比30%の軽量化を図ったり(図7)、クランク軸のアーム形状を有限要素解析(FEM)を用いて最適化を図り、必要なねじり、曲げ剛性を確保しながら従来比15%軽量化している。

研究開発が進む天然ガス燃料化

2020年から始まるSO_x規制に対しては、低硫黄燃料油を使用する方法や海水で排気中のSO_xを除去するスクラバ等を設置する方法が検討されているが、いずれもコストがかかるうえ、中型船舶等にはスクラバを設置するスペースがないなどの問題もある。2020年からはCO₂の排出規制も現状の10%削減から20%削減に引き上げられる。これらのすべての規制に対応できる技術として期待されているのが天然ガス燃料化である。天然ガスへ燃料を転換すると、燃料中に硫黄分を含んでいないためSO_xは排出されず、NO_x排出量も大幅に削減できるうえに、

■エンジン部品の鋳造(図5)



シリンダブロックは、従来は片状黒鉛鋳鉄 (FC300) が採用されることが多かったが、近年は軽量化のため球状黒鉛鋳鉄 (FCD500) の採用が増えている。



大物鋳込み

資料提供：新潟原動機(株)

■エンジン部品の加工、組立(図6)



クランク軸の加工
エンジン部品は1/1000の精度で加工されている。



4ストロークディーゼルエンジンの組立の様子

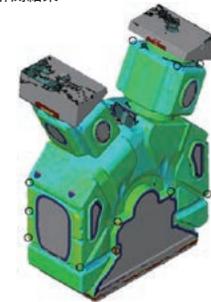
■部品軽量化の例(図7)

● 鋳造木型の三次元寸法計測



計測状況

計測結果



鋳造木型と図面形状との相違 (mm)

※色合いの違いが鋳造木型と図面形状との相違を表している

CO₂排出量、ばい煙や微粒子排出物なども低減できる。

天然ガスを燃料とするガスエンジンは、陸上用の発電設備として広く実用化されている。幾つかの方式があるが、船舶用4ストロークディーゼルエンジンにはデュアルフューエル方式が採用されることが多い。これは天然ガスだけでなく、従来の重油も燃料として使用でき、通常はディーゼル運転、指定海域ではガス運転と切り替えられ、効率的な運航ができる。天然ガスを燃料とした場合、ノッキング(異常燃焼)等が問題となるが、ガス運転時はガス供給弁やパイロット油噴射弁を電氣的に制御して、天然ガスと空気の比を適切な範囲に保ち、ノッキングを防いでいる。一方、ディーゼル運転時は燃焼噴射弁を機械式とし、従来のエンジンと同等の信頼性を確保している。

このデュアルフューエルエンジンを搭載した、日本初の天然ガス燃料船が運航を始めている(図8)。本船の天然ガス供給方法は陸上のタンクローリーよりホースを用いて船舶へ供給する「Truck to Ship」方式で行われている。

天然ガス燃料化については未解決な課題も少なくない。今後、燃料の供給インフラの整備が必要であることや、産地によって性状が異なる天然ガスを使用すると、ノッキングを起こす可能性があるため、現在は使用する燃料性状を限定して対処している。

強化される規制に対して、どの対応技術が決定打となるのか、各社模索が続いているが、いずれにしても環境性能がエン

ジンを選ぶ際の重要な要素の一つとなっていることに間違いはない。高い環境性能を持つ日本製4ストロークディーゼルエンジンは現在、海外から多くの注文を受けている。数ある技術をどう組み合わせ、いかに早く市場に投入していくか。時代が求める環境性能を実現したエンジンが、今後、世界の海で活躍していくことになるのだろう。



写真提供：(株)ウイングマリタイムサービス

日本初の天然ガス燃料船(図8)

現在、横浜港においてTruck to Ship方式でLNG燃料の供給を受けながら運航している。

- 取材協力 新潟原動機(株)
- 文 藤井美穂