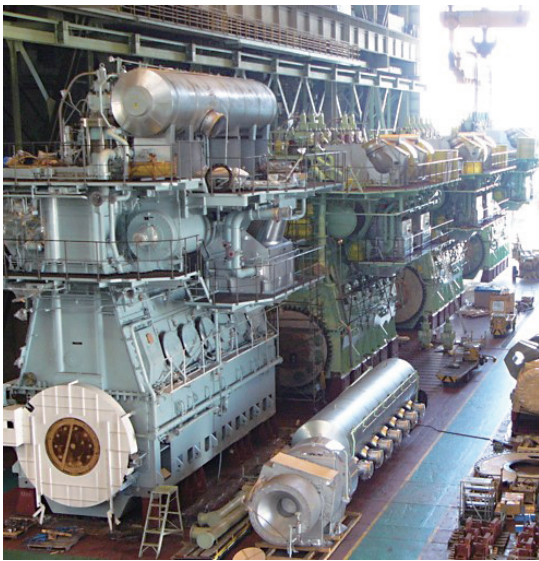


# 経済発展と環境規制の歴史における船用ディーゼルエンジン技術の変遷 — (後編) 環境規制の中でのディーゼル機関と排ガス処理技術 —



藤 林 孝 博 ㊦  
滝 谷 俊 夫 ㊧  
馬 場 真 二 ㊨

## 要旨

過去の世界情勢の変化、燃料の変遷、原油価格の推移、海運の規制動向等を眺めながら、船の動力が如何にして今日の船用ディーゼル機関の姿になったのか、及びその将来展望について、二部構成で考察する。前編では蒸気船からディーゼル船への変遷を述べた。後編では、20世紀初めに登場した船用ディーゼルエンジンがどの様に進化して、大出力、ロングストローク、低回転、低燃費を特徴とする今日のデザインに到達したのかを見ていく。これに関連して日立造船のディーゼルエンジン技術の歴史についても併せて紹介する。前編と同様に、20世紀も経済性の追求がドライバーとなり、船舶設計とエンジン設計が相互に発展した。しかし、21世紀に入ると環境保護が最優先されるようになった。約1世紀に亘って安定を極めた油焚きディーゼルをベースとする船舶推進システムは、地球温暖化防止が世界の最優先課題の一つとなった今日、前編で見た様な大変革が求められる。

## キーワード

ロングストローク、低回転、過給、平均有効圧、出力率、熱効率、燃費、ツインバンク、SCR、CO<sub>2</sub>、正味ゼロ、ネットゼロ

## 1. 緒言

前編では、船舶における動力機関と燃料の歴史を振り返り、ディーゼルエンジンが船舶の主機関として定着するまでの経緯を書き綴った。18世紀の産業革命以来、船舶の動力機関の発展を促したものは、パックス・ブリタニカ時代における遠洋への憧憬と、列強の海洋進出に対する戦略、そして民間事業者の経済観念などであった。即ち、専ら輸送効率を極限まで向上させるために、高性能機関と低コスト燃料を探索した歴史である。しかし、経済発展が進み、自然破壊によって地球上の物質循環に異常が起きていることが露見すると、船用動力の技術において、その方向性にも変化が生じてきた。地球環境問題への一般市民の関心とともに、海洋で多量の排気ガスを放出する船舶に対して環境規制の波が押し寄せた

のである。後編では、ディーゼルエンジンにおける機関性能と燃料コストに対する極限までの追求の軌跡を綴った後、これらの追求と並行した排ガス規制への対応について述べることにする。最後に、これらを踏まえて船用動力の将来展望について書き記すことにする。

## 2. 日立造船におけるディーゼル機関

1881年に「大阪鉄工所」として創業した日立造船株式会社(以降、当社)とディーゼルエンジンの出会いは1913年、B&W型(4ストローク、600馬力)2基を搭載した貨客船「紅丸」の建造であった。1940年には当社独自設計の「大鉄型4Z37」(2ストローク、600馬力)を完成させた。1950年にB&W社と、1971年にはSulzer社と製造ライセンス契約を結び、1983年にはダブルライセンスの利を活かして両社の長所を取り入れた当社独自設計の単気筒2ストローク試験エンジン(ボア450mm、1340馬力)をテスト機として設置し、開発を加速させた<sup>1)</sup>。

㊦ 機械・インフラ事業本部 開発センター

㊧ 機械・インフラ事業本部 開発センター 博士(工学)

初期には商船の主機として4ストロークエンジンが普及しましたが、後に2ストロークエンジンがシェアを拡大していった<sup>2)</sup>。この背景として2ストロークエンジンの幾つかの長所が考えられる。即ち、(1)ストロークの長さにより膨張比を大きく取れたり、低速回転であるために締め切り比を小さくできたりするため、熱効率が高いこと、(2)低速回転であるために減速機無しでプロペラ軸に直結できること、(3)クロスヘッド機構であるために掃気室とクランク室の間に隔壁を設けることが可能で、燃焼残渣がクランク室に入り込むことが無く、C重油等の低廉な燃料を使用できること、の3点である。

1970年代に起きた二度のオイルショックによる燃料価格高騰は2ストロークの普及を加速させ、前編で書いたように、この頃、蒸気タービン船が姿を消していった。こうした変遷を経て、現在の商船の主機関の大半は2ストロークとなった<sup>2) 3) 4) 5)</sup>。

### 3. ディーゼル機関の大出力化

海運業の歴史の中では、運航の経済性向上のために船舶の大型化の要求が増し、造船技術の進歩がこれを可能にしてきた。これに伴い、主機関においても大出力化の努力を続けざるを得ない状況にあった。2ストロークエンジンでは1950年代中期にターボ過給が実用化された<sup>3)</sup>。これにより1950年代前半と比較して、1950年代後半の当社製B&W型機関の平均有効圧は機種平均で一気に1.4倍に増大した。平均有効圧はエンジン1回転あたりの仕事を気筒数とピストンストローク容積で除した値と定義される。即ち、限られた容積の燃焼室空間内で如何に多くの燃料を燃焼させて仕事として回収できるかを表す指標である。この向上にターボ過給とその後段に設けられる空気冷却器が大きく寄与してきた。

1970年代のオイルショックでは、更なる低燃費化の要請に応えるためにロングストローク化が行なわれるようになった。このことは、プロペラの大径化と低回転化を後押しして船舶の推進効率を向上させたと共に、機関単体の熱効率も向上させた。1976年には、B&WのK-GF型の平均有効圧と平均ピストン速度を維持したまま、ロングストローク化を追求した新機種L-GF型が登場し、5-6g/kWhもの燃費率低減を実現した<sup>6)</sup>。排気の抜けの良いユニフロー掃気方式を古くから採用していたB&Wにはロングストローク化が比較的容易であったと考えられる。これに対抗しSulzerもRTA型でユニフローを採用し、B&Wを追従した<sup>3)</sup>。

当時のロングストローク化の具体例として、当社製B&W機関のポアストローク比(S/D)の変遷を表1に示す。表中の値は当時の当社製品カタログに挙がっている機種の平均値である。S/Dはピストンストロークをシリンダ径で除した値であり、1970年代から増加をはじめ、現在では1950年代前半と比較して2.3倍になった。同様に、平均ピストン速度と平均有効圧はそれぞれ1.4倍と4.1倍に増大し、結果として出力率は5.9倍にまで増大したことが分

かる。出力率は平均ピストン速度と平均有効圧の積で定義され、単位を整理すると[W/m<sup>2</sup>]となり、これはピストン断面積あたりの出力を表す指標と言える。この増大は、燃焼室の熱負荷や応力及び摺動部のトライボロジーの問題といった構成部品の信頼性確保との戦いでもあり、これは今後も変わることはないであろう。

表1 当社製2ストローク機関の機関諸元の変遷  
(機種平均値、B&W型)

	S/D [-]	平均ピ ストン 速度 [m/s]	平均有 効圧 [MPa]	出力率 [kW/m <sup>2</sup> ]
1950年代前半	1.91	6.02	0.50	3.03
1950年代後半	1.99	6.17	0.73	4.47
1970年代後半	2.27	6.80	1.17	7.95
1980年代前半	2.48	7.02	1.33	9.33
1990年代前半	3.39	7.67	1.51	11.57
2000年代前半	3.48	8.16	1.85	15.09
2020年	4.32	8.71	2.07	17.99
1950年代前半 と2020年の比	2.3	1.4	4.1	5.9

### 4. ツインバンクエンジンと静圧過給

機関室高さの低い船舶にも2ストロークを適用したいという要請に応えるため、当社は世界で初めて「ツインバンクエンジン」を開発した(図1)。2ストロークエンジン2基を共通台板上で背中合わせに並列結合した構造で、主機の高さ、前後長さ、左右幅が最小化された。また、2基の出力は、減速機を介してクランク軸定格回転数234rpmを60~90rpm(案件に応じて設定可)まで低回転化して、1軸で出力される斬新な機構であった<sup>7)</sup>。左右のエンジンはB&WのK45GF型をベースとし、排気系の配管構造を簡素化する目的で両気筒列(=バンク)からの排気を一旦集合させる構造を採用した。今日で言えば、これは排気集合管であり、静圧過給効果が得られるものである<sup>6)</sup>。

1976年4月に開発開始された本機は、試作1号機、日立B&W 2x6K45GT型ツインバンクエンジンとして翌年10月に起動した。動圧過給と静圧過給の両システムでの諸実験を終え、1978年3月に完成した。当社陸上試験において、本機の静圧条件では従来のK45GF型(動圧過給)に比べて燃費率が14g/kWhも改善した。この主たる要因は、過給機の前段に排気集合管という大きな緩衝空間が存在することで、従来よりも短時間で燃焼ガスをシリンダから排出完了できる様になったことである。このことにより、排気弁開のタイミングを8°遅らせることが可能となり、その分だけピストンの仕事をする距離が延長され、ロングストローク化と同様の効果が得られた<sup>7)</sup>。



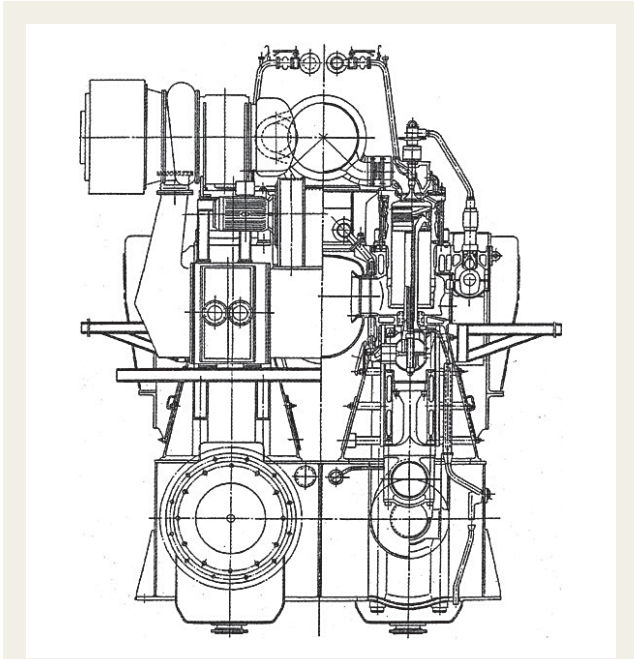


図1 ツインバンクエンジン断面図  
(2xK45GT型; 1978年; 出典: 参考文献<sup>6)</sup>)

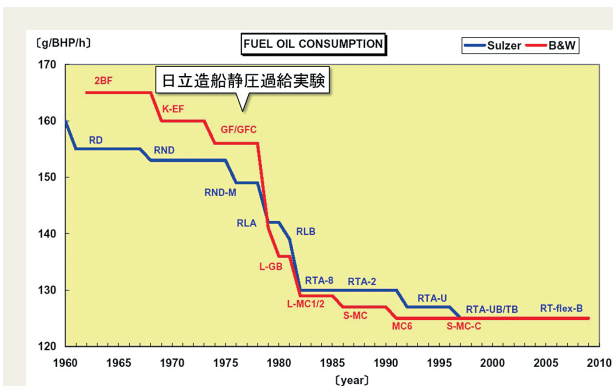


図2 2ストロークディーゼルエンジンの燃費率の変遷 (SulzerとB&Wの場合; 1960~2010年; ここでのBHPは仏馬力 1BHP=0.7355kW; 出典: 参考文献<sup>6)</sup>)

これを受けてB&Wは1978年11月、コペンハーゲンで静圧過給実験を行い、それまでの動圧過給優位の考えを撤回、翌年4月にはCIMAC大会で成果を報告すると同時に、静圧過給方式を採用したK/L-GFCA型を発表した<sup>3)</sup>。その後、他社エンジンも全て静圧過給に淘汰された<sup>6)</sup>。この様に当社はツインバンクエンジンの開発を通じて、静圧過給の優位性を世界で初めて実証し、船用エンジン業界に大きなインパクトを与えた<sup>6)</sup>。図2に2ストロークエンジンの燃費率の変遷を示す<sup>6)</sup>。この時期を境にして燃費率が急激に低下したことが分かる。

8万トンタンカーへのツインバンクエンジンの適用例では、機関室長さで1フレーム、高さで1デッキ縮小し、船全体で燃料消費量を15~20%削減できた。当時、低燃費主機関への換装工事の需要が高く、本機関はLNG船やVLCCの蒸気タービン機関からの換装も見据えたものだった<sup>7)</sup>。ツインバンクエンジンの開発は、信頼性、低廉

燃料油に対する堅牢性、高い熱効率、低速回転という2ストローク機関本来の長所に、省スペース性を新たに付加するコンセプトの開発であったと言える。

## 5. 電子制御エンジンの登場

電子制御に関する研究は古くから行なわれ、1981~1986年に当社の行なった独自の電子制御エンジンの検証実験では、掃排気タイミング等の制御により最大8g/kWhの燃費低減を達成した<sup>8)</sup>。しかし、当時のユーザーにとっては新種の技術であり、興味は引けども信頼獲得に苦戦した結果、電子制御エンジンの市場導入には至らなかった。

本格的な普及は、1997年のMARPOL条約付属書VI第13規則 (NO<sub>x</sub>規制) の採択を待たなければならなかった。この規制は将来にわたって段階的に強化され、やがては低燃費と低NO<sub>x</sub>の両立が困難になることが予測されたためである。電子制御エンジンは、燃料噴射と排気タイミングを自在に制御することによって、この困難を克服するとともに、低負荷でも燃料噴射圧を高く保てるため、カム式機関では困難だった低負荷での燃焼改善 (低燃費と未燃分低減) を可能とした。MAN B&WはME型、WärtsiläはRT-flex型の電子制御エンジンを開発し、当社は2003年に国内初の電子制御エンジンである日立MAN B&W 6S50ME-C7を、2008年には日立Wärtsilä 6RT-flex50Bを完成させた。今日では当社製エンジンのほぼ全てが電子制御式である<sup>1)</sup>。

## 6. 環境規制強化への対応

**6.1 NO<sub>x</sub>規制** 一旦、船舶・海運業界を離れると、1992年にリオデジャネイロで開催された環境と開発に関する国際連合会議 (UNCED) を初めとして、地球環境問題が一般市民の関心事になっていった。

海運業界においても2008年10月に開催されたMEPC58において、NO<sub>x</sub>規制改正が採択され、2016年以降の建造船では2000年比でNO<sub>x</sub>を80%削減すること (Tier III) が義務付けられた<sup>9)</sup>。それ以来、この大幅削減を達成すべく、エンジンメーカー各社が開発に凌ぎを削ってきた。

当社においては、これに先駆けて2007年11月よりTier III適合技術の検討を始め、過給機タービンの上流で脱硝する方式の高圧SCRシステム (HP-SCR) を装備した日立MAN B&W 6S46MC-C7-HPSCRを開発した (図3)。このシステムは、過給機タービン流入前の高温排ガスを脱硝する方式であるため、硫黄分を多く含むC重油 (硫黄分 $\leq 3.5$ 質量%) を用いた運転にも使用可能である。2011年4月、本機は2.9g/kWhという低NO<sub>x</sub>排出を記録し、世界で初めて2ストロークエンジンがTier III適合可能であることを実証した<sup>10)</sup>。その後も当社独自でHP-SCR装置の改良を続け、煤などの粒子状物質 (PM) や硫黄分の混入に弱いとされる排ガス再循環方式 (EGR) と比較して、燃費面での優位性を発揮できるHP-SCRを

当社標準の脱硝装置として2014年10月に商品化を完了した。

また、この時に当社がMAN社と共に構築したHP-SCRエンジンの設計思想は、現在のMAN標準仕様となっており、MANの全ての2ストロークライセンシーの設計に受け継がれている。WinGD社のHP-SCRエンジンもこれに類似した仕様になっている。図4は2大ブランド（ここではMANとWinGDとする）の2ストローク主機関に適用されているTier III対策の技術別世界シェアである。HP-SCRの適用されるケースが過半数を占めている<sup>11)</sup>。この様に当社はTier III適合エンジンの業界標準を築いた。

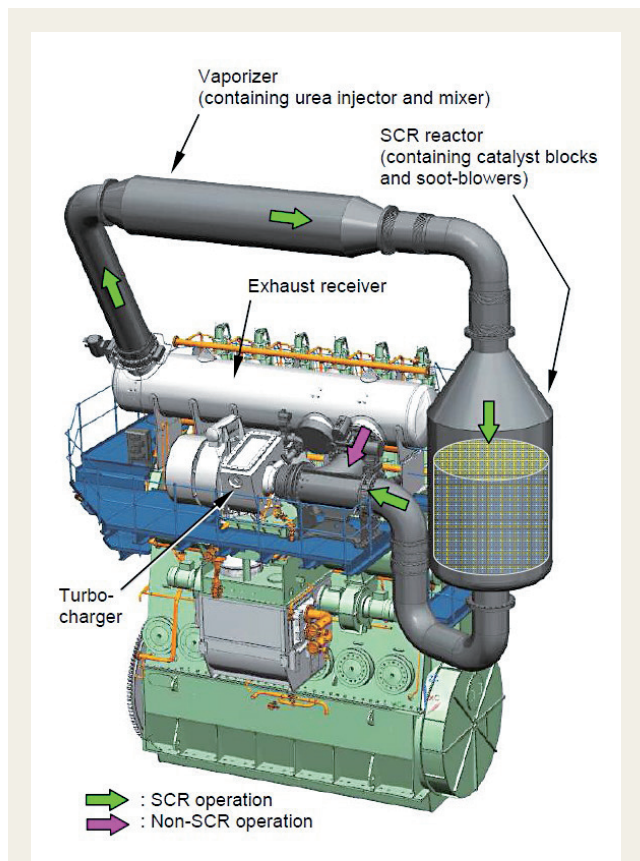


図3 日立MAN B&W 6S46MC-C7-HPSCR型船用2ストロークディーゼルエンジン（2011年；出典：参考文献<sup>10)</sup>）

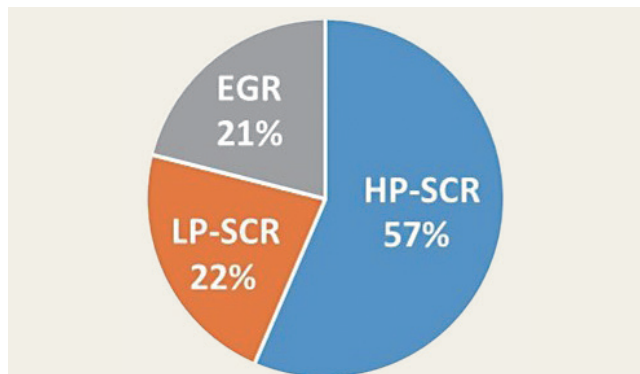


図4 2ストローク主機関のNOx Tier III対策の技術別シェア（MANとWinGD；2020年8月時点での著者調べ；出典：参考文献<sup>11)</sup>）

**6.2 硫黄分規制** SO<sub>x</sub>とPMの規制も始まっており、実際には使用する燃料油中の硫黄分が規制され、海域によって規制値が順次引き下げられている。2015年以降はECA（Emission Control Area、排出規制海域）内で使用される船用燃料中に含まれる硫黄分の上限が0.1質量%に引き下げられた。更に、2020年には、ECA以外の全ての海域で硫黄分の上限値が0.5質量%に引き下げられた。規制に適合する低硫黄燃料油（適合油、硫黄分 $\leq 0.5$ 質量%）の価格は2021年7月平均で約540USD/tであり<sup>12)</sup>、C重油の1.3倍ほど高価である。そのため適合油を使用すれば運航コストが増加することになる。これは燃費が30%も悪化することと同等のコストインパクトである。

本規制では低硫黄燃料での対応の他に代替手段も許されており<sup>9)</sup>、その一つが脱硫装置の利用である。廉価なC重油を燃料として用い、排ガスを船上で脱硫する手段である。特に燃料消費の多い大型船においては、装置コストを加味しても、適合油と比べてコスト削減になると言われている。そのため、2018～2020年頃には脱硫装置業界と修繕ドック業界は就航船への装置追設工事需要に沸いた。

自動車業界では既に軽油の硫黄分の上限が0.001質量%に引き下げられている<sup>13)</sup>。これと比較すると船用燃料油には未だ100～3500倍もの多量の硫黄分が含まれている。そのため、船用エンジンの排ガス処理においては、低硫黄燃料を使用する場合もC重油を使用する場合も、硫黄の問題が付きまとう。

NO<sub>x</sub>規制も硫黄規制もそれへの適合はユーザーにとってコストアップでしかない。故に、規制の最低要件のみを満たしたうえで経済的に最も優れる技術が選択される。ただし、CO<sub>2</sub>排出の削減においては様相が異なる。これについては7章で詳しく述べる。

**6.3 CO<sub>2</sub>規制** 図5は2007年時点の各輸送モードにおける貨物輸送量当たりのCO<sub>2</sub>排出量（gCO<sub>2</sub>/ton\*km）の分布をIMOが調査した結果である<sup>14)</sup>。グラフの上から1番目のCrudeから10番目のRo-Ro/Vehicleまでは貨物商船の船種である。その下のRailは鉄道輸送、Roadは自動車輸送である。船舶の大きさや船種によるばらつきはあるが、海運は、貨物輸送量当たりでは、地球温暖化影響の最も小さい輸送モードであると言える。しかし、世界経済成長に伴って海上荷動き量も増加するため、何も対策をしなければ長期的には海運のCO<sub>2</sub>排出総量は増加してしまう。

こうした理由から、IMOは2011年7月のMEPC62で、船舶のエネルギー効率設計指標（EEDI）の達成の義務化を採択した。これによって、船用エンジンに一層の低燃費化が求められるようになった。従来の燃費低減の動機は経済性の追求であったが、ここに来て環境規制という義務の履行が動機に加わった。EEDIは船舶の設計情報に基づいて推定される載貨重量トン・輸送距離当たりのCO<sub>2</sub>排出量（gCO<sub>2</sub>/ton\*mile）を表す指標である。EEDIの上限は2013年（Phase 0）を基準に、船舶の建



造契約日と完工日に基づいて段階的に引き下げられ、2015年以降(Phase 1)は10%削減、2020年以降(Phase 2)は20%削減、2025年以降(Phase 3)は30%削減という具合に強化される予定である(但し船種と載貨重量によって削減率と適用開始年が若干異なる)<sup>15)</sup>。

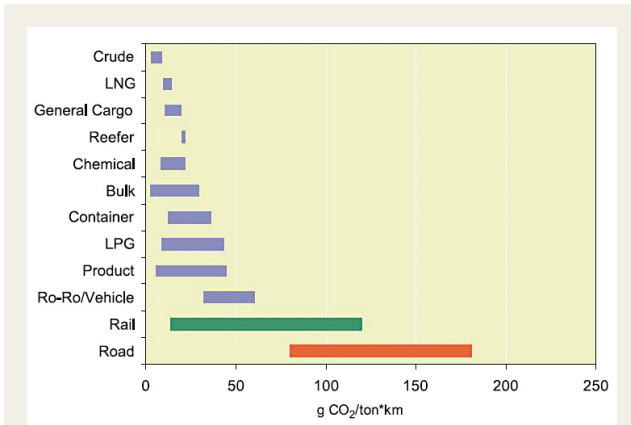


図5 輸送モード別の貨物輸送単位当たりCO<sub>2</sub>排出量の分布 (2007年時点; 出典: 参考文献<sup>14)</sup>)

**6.4 燃料転換の始まり** 今日の2ストロークエンジンの熱効率、ピストンストロークや平均有効圧、許容燃焼圧力などの条件から期待される理論値に近い所まで来ている。これ以上の熱効率改善は、燃焼室部材や軸受けの課題もあり、短期間で劇的に進むことは期待し難い。こうした事情もあって、各種排熱回収システムの開発も盛んに行なわれている。また、従来の重油焼きディーゼル以外の選択肢も現れ始めており、近年のシェールガス革命の恩恵を受けて、CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、PM、NO<sub>x</sub>の発生の少ない液化天然ガス(LNG)を燃料とする2ストロークエンジンの開発も盛んである。

当社においても、2016年に2元燃料2ストロークディーゼルエンジン日立MAN B&W 4S50ME-T9.5-GI-HPSCR型を開発し、翌年に試験運転を完了した。本機はLNGと重油の両方を燃料として使用できるディーゼルエンジンであり、型式から分かる通り高圧SCRシステムが搭載された。LNG燃焼では燃料由来のPMや硫黄成分の発生が少ないため、脱硝触媒が劣化しにくい。触媒の所要量は劣化スピードに基づいて決定されるため、LNG燃焼運転を主とすれば、脱硝触媒の量を少なくすることが可能である。当社の試験運転において、従来の重油燃焼機関と比較して、LNG燃焼ではCO<sub>2</sub>低減24%、SO<sub>x</sub>低減95%、NO<sub>x</sub>低減79%、触媒量削減50%を達成した。今日の排ガス規制への適合と機関室容積の最小化の両方に資する結果である。

## 7. 将来展望

2015年12月にパリで開かれた第21回国連気候変動枠組み条約締約国会議(COP21)でパリ協定が採択された。その後僅か1年足らずで協定の発効条件が満たされ、2016年11月にパリ協定が発効しており、国際社会のGHG

への関心の高さが窺える。パリ協定は温暖化による気温上昇を「産業革命前と比べ2度より十分低く保つ」ことを目標として掲げ、さらに1.5度以内に抑えるよう努力すると明記し、国際社会は温暖化対策の一步を踏み出した。自動車業界は早速、2035年までに内燃機関を動力とする自動車の販売禁止を決めた。各国政府もこれまでとは異なるより高いレベルのCO<sub>2</sub>削減目標を掲げるようになっており、パリ協定目標達成への本気度が窺える。一方、国際海運は対策が出遅れていると指摘されており、CO<sub>2</sub>削減には早急かつグローバルな取り組みが必須である。

本稿の前編では主に経済性がドライビングフォースとなって船舶の動力が変遷してきたことを述べた。もちろん今後も経済性が重視されるに違いないが、後編で述べている様に最優先のドライビングフォースは環境規制となった。今日では、まずは環境規制の要件を満足する技術が選定され、その中で経済性が追求される様になってきている。

大型船舶の耐用年数は約20年と長い。前章で述べたEEDI規制の対象は新造船である。しかし、既存船舶の排出するCO<sub>2</sub>も削減しなければ、海運全体のCO<sub>2</sub>排出の早急な削減が出来ない。そこで、IMOは2021年6月のMEPC76においてOperational Carbon Intensity Indicator (CII) 規制をMARPOL条約付属書VI第28規則として採択した。CII規制は2023年以降、5000総トン以上の全ての船舶に対して適用され、新造船も既存船舶も対象となる。実際の年間燃料消費量から算出されるCO<sub>2</sub>排出量を船舶の載貨重量トン数(船種によっては総トン数)と実際の航海距離で除して得られるCII値を、毎年、主管庁に報告することが義務付けられる。CII規制値は毎年引き下げられ、各船はその達成度合いに応じてA～Eの格付けがされる。低ランク(D、E)の船舶は是正計画の提出と履行が義務化される。また、高ランク(A、B)の船舶への優遇を主管庁、港湾管理者、各ステークホルダーに対して求める条項も盛り込まれている<sup>15)</sup>。この格付け結果は海運業界の顧客である荷主も知る所になるであろう。多くの荷主企業は今や自社のみならず自社の所属するサプライチェーン全体のCO<sub>2</sub>排出を2050年までに正味ゼロにすることを目標としている。従って、ESG購買とも言われるが、荷主企業はCO<sub>2</sub>排出の低い海運会社を起用し、海運会社はCO<sub>2</sub>排出の低い船舶を用船することになるであろう。現在の所、CIIの規制値は毎年2%ずつの引き下げが予定されている<sup>15)</sup>。しかし、それでは気温上昇1.5℃以下に抑えるために必須とされる2050年温室効果ガス(GHG)排出正味ゼロの達成<sup>16)</sup>に到底間に合わない。こういった状況に鑑みれば、CIIの規制値以上の削減を目指す海運会社が現れるのは時間の問題である。つまり、規制への適合は最低限の要件であり、そこに競争優位性は生まれず、規制以上のGHG削減技術・取り組みが今後の競争力の源泉になると予想する。新造船を計画するのであれば、予想される規制レベルの一步先の環境性能で仕込んでおくことが、将来の資産価値低下リスクを最小化するうえで肝要であろう。

船舶においてはディーゼルエンジン全盛の今日であるが、風力推進(帆走)、電気推進、バイオ燃料、水素、アンモニア、大気回収CO<sub>2</sub>から製造される合成メタンや合成メタノール等の利用の為の研究開発が盛んに行われている。本稿で見てきたような船用動力システムの劇的な変化を、我々は早晚もう一度経験することになるだろう。ただし、新技術普及の成否は、それに用いられる燃料・エネルギーの普及状況、政策、新技術に対する使用者の不信感の払拭などが影響することも、本稿が示唆している。また、GHGの排出責任が燃料の使用のみならず、その上流・下流、金融・投資家まで含むバリューチェーン全体に波及する時代になりつつある。因子が多岐に亘るが、これらを考慮して推進システムを選択する必要がある。

## 8. 結 言

19世紀初頭の動力船(蒸気船)の出現からディーゼル船への移り変わり、そして20世紀初頭に初めて大型船舶にディーゼルエンジンが採用されて以降の技術の変遷を当社エンジン開発の歴史と共に振り返った。時代の変化を感じ取り、船舶の推進システムにおいてゲームチェンジを起こした先人たちの偉業を見てきた。開発された技術の斬新さや難度のみならず、それらを短期間で具現化し、市場への強烈的なプロモーションにより事業を興す執念に感銘を受けた。

こうした発展の後に船用エンジンは成熟産業と言われるようになったが、近年の環境規制強化や情報利用技術の発達に代表される競争ルールの急変が、新たな技術開発と事業開発の機会をもたらしている。複数の環境規制の同時強化、その対策技術の選択肢の多さ、海運の先行き不透明感、他セクターの動向、世界情勢、燃料多様化、等々のファクターがあり、先を見通すことが容易ではない今日ではあるが、これらを読み解き、荷主を始めとする海運に関わる全てのステークホルダーにとってベストな船舶動力を提供するために、既成概念に捉われないう斬新な挑戦が必要であると考えます。

当社創業140周年を迎えた今年、創業者Edward Hazlett Hunterのチャレンジ精神を思い起こし、世界の環境意識の追い風に乗って、地球規模の問題解決に貢献していきたい。

### SDGsに貢献する技術

本稿で述べた様に、船用ディーゼルエンジンは経済性と低燃費を追求した結果の結晶である。熱効率は50%を超え、内燃機関単体では最高である。世界の貿易量の約9割は海上輸送である。近年ではSCRを用いたNOx排出の削減や低炭素燃料への転換にも取り組んでいる。当社は船用ディーゼルエンジンの製造・販売・研究開発を通じて、低コストで環境負荷の低い物流の提供に貢献している。

### 謝 辞

本論文は、2017年10月に開催された日本機械学会 関西支部 第18回秋季技術交流フォーラムにおいて発表した原稿を元に、海運業界に関わる最新の情報を織り交ぜて完成させたものです。日本機械学会 関西支部の皆様にはたいへんお世話になり、ここに感謝申し上げる次第です。

当社では古くから船用ディーゼルエンジンを事業として営んでおり、多くの職員がその開発や事業の発展に情熱を注いできました。当社だけでなく、世界中の関係者のたゆまぬ努力によって船用ディーゼルエンジンの事業が成り立っています。本論文を執筆できたのも皆様のおかげであり、感謝の意を表したいと思います。

### 参考文献

- 1) 藤林孝博: エンジン技術の変遷—日立造船の2ストロークエンジン, 日マリ学誌, 第51巻第5号 (2016), 101-102.
- 2) 高崎講二: エンジン技術の変遷, 日マリ学誌, 第51巻第5号 (2016), 95-98.
- 3) J. Dragsted: The First 50 Years of Turbocharged 2-stroke, Crosshead, Marine Diesel Engines, Imprinted by CIMAC, 2013.
- 4) 見上博: タービン船の歴史, 日マリ学誌, 第44巻第4号 (2009), 61-66.
- 5) 関谷義男: 船舶用燃料, 燃料協会誌, 第60巻第655号 (1981).
- 6) 田中春夫, 中村一行: 機械(エンジンおよびプレス機械), 日立造船技報, Vol.72 No.2, 2011.11, 22-32.
- 7) 富田幸雄ほか: ツインバンク機関の開発, 日本船用機関学会誌, 第14巻第8号, 1979年8月, 18-27.
- 8) 馬場真二ほか: 電子制御システムによるディーゼル機関の高効率化, 日本船用機関学会誌, 第31巻第1号, 1996年1月, 35-44.
- 9) IMO: MARPOL Annex VI and NTC 2008 (2013 edition), Regulations 13, 14, 19, 20 and 21 (2013).
- 10) T. Fujibayashi et al: Development of Marine SCR System for Large Two-stroke Diesel Engines Complying with IMO NOx Tier III, CIMAC Congress Shanghai 2013, Paper #29.
- 11) 寄口征彦, 藤林孝博: 高圧SCRを用いたNOx低減技術の紹介と今後の展望, 日本船舶海洋工学会誌, 第92号 (2020年9月), 12-15.
- 12) 日本海事新聞社: バンカー価格, 日本海事新聞, 2021年7月6日版~8月3日版.
- 13) 鈴木央一: ディーゼル重量車における排出ガス規制と対応技術の推移, 日マリ学誌, 第49巻第6号 (2014), 74-79.
- 14) IMO: Second IMO GHG Study 2009, published by IMO in 2009, 129-136.
- 15) IMO: Resolution MEPC. 328 (76), MEPC76決議文書, June 2021.
- 16) IPCC: Global Warming of 1.5°C Summary for Policymakers, IPCC報告書, October 2018.

## 文責者

日立造船株式会社  
機械・インフラ事業本部 開発センター  
藤林孝博  
Tel : 0968-78-2163  
E-mail : fujibayashi@hitachizosen.co.jp

# Progress of Marine Diesel Engine Technology in the History of Economic Growth and Environmental Regulations – Part 2: Diesel Engines and Aftertreatment Technologies in the Era of Environmental Regulations

## Abstract

This two-part article looks at past changes in world affairs, fuels, crude oil prices, and regulatory trends in the shipping industry, and discusses how marine diesel engines came to be used to power ships today and their prospects for the future. Part 1 discussed the transition from steamships to diesel-powered ships. In Part 2, we examine how the marine diesel engines introduced in the early 20th century evolved into today's design characterized by high power, long stroke, low revolution speed, and high fuel efficiency. Side by side with and in relation to this, we look at the history of Hitachi Zosen's diesel engine technologies. As in Part 1, the pursuit of economy continued to be the main driver in the 20th century, propelling the mutual development of ship design and engine design. With the arrival of the 21st century, however, the top priority switched to environmental protection. Ship propulsion systems based on oil-fueled diesel engines, whose stability had been established for almost a century, are now required to undergo a major transition similar to that we discussed in Part 1, in this day and age when the prevention of global warming has become one of the world's pressing issues.

## Authors

Takahiro Fujibayashi (Hitachi Zosen Corporation, E-mail : fujibayashi@hitachizosen.co.jp)  
Toshio Takiya Shinji Baba