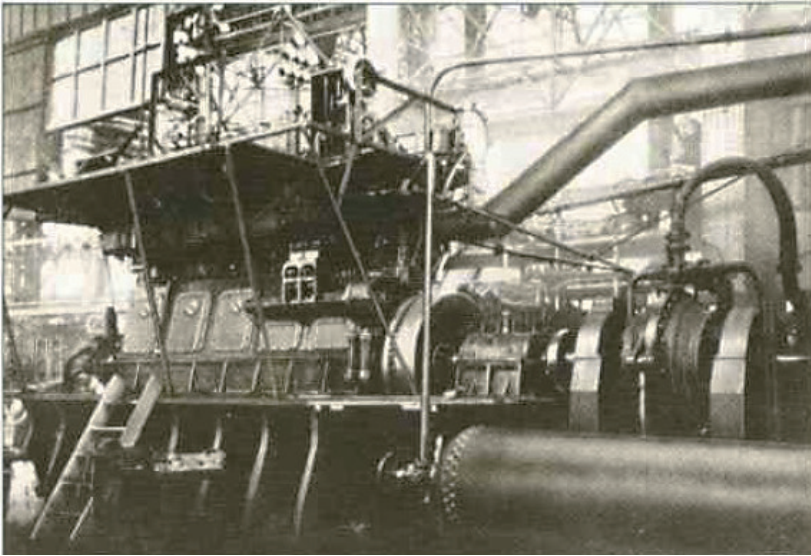


# 経済発展と環境規制の歴史における船用ディーゼルエンジン技術の変遷 — (前編) 船用動力機関の変遷とディーゼル船の登場 —



藤 林 孝 博 □  
滝 谷 俊 夫 □  
馬 場 真 二 □

昭和12年、日立造船の前身である大阪鉄工所桜島工場に内燃機製造部門を設立。以来、人材や設備を整備し、ディーゼル機関の製造を開始（年間生産能力10,000馬力）。昭和15年、独自に開発した大鉄型エンジン1番機4Z37（600馬力）を完成。これは、トロール船に搭載され、日立造船のディーゼル機関製造の第一歩となる。

## 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、18世紀に発明された往復動蒸気機関が熱効率を向上させ、船の動力として使用され始めた頃から話を始める。19世紀初めの動力船の推進システムはパドル式であったが、19世紀中頃には推進力と堅牢性に優れるプロペラ式に変わった。19世紀終わりには高回転の得られる蒸気タービンが船の速力を飛躍的に向上させると共にプロペラに関する科学も発展した。19世紀後半の石油の流通とディーゼル機関の発明により、今日の主流であり経済性に優れるディーゼル船が20世紀初めに誕生した。産業革命以降、この時点までは経済性の追求が船用動力の変遷の主たるドライバだった様である。後編では、ディーゼル機関の大出力化と低燃費化の歴史および近年の環境規制動向について日立造船のディーゼル機関技術を交えて解説し、最後に将来展望を述べる。

## キーワード

蒸気機関, タービン, プロペラ, パドル式, 外輪船, 燃費, 推進システム, クラームント, タービニア, セランディア, フルトン, パーソンス

## 1. 緒言

近年まで船用動力の技術は、その時代の燃料の問題および経済性と共に変遷してきた<sup>1) 2)</sup>。そして、2000年以降はこれらに加えて、環境規制が最優先のドライビングフォースとなりつつある。

本稿では、これまでの世界情勢の変化、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、船の動力がどのように変化して、著者の所属する日立造船株式会社（以降、当社と呼ぶ）が製造する現在の船用ディーゼル機関の姿になったのか、そして、これに基づく将来展望について考えてみたい。前編では、船用動力機関及び推進システムの変遷、並びにディーゼル船の登場について紹介する。

さて、記録に残っている最古の船は古代エジプト時代の壺に描かれた船だと言われているが<sup>3)</sup>、実際には、その遙か昔から人間は水に浮かぶ物体に体を預けて移動に利用していたことは想像に難くない。古代における船舶の発明についてはすでに刊行されている多くの書物に譲り、ここでは近代における動力船の登場から始めることとする。

## 2. 動力船の登場

蒸気機関は18世紀に英国で起こった産業革命のきっかけになった動力機関であり、元々、図1 (a) のようなニューコメンの蒸気機関が、炭坑や鉱山の排水、製鉄の送風機の動力として使われていた。この蒸気機関は、膨張行程で投入される蒸気を復水するために、シリンダ内に水を投入して冷却する。このようにして蒸気が凝縮するときには大気圧が仕事をする機構を実現したのである<sup>4)</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)

### 3. 石油産業の歴史

ところが、この機関ではシリンダごと冷却してしまうので、次行程の膨張仕事の際にシリンダの加熱のために多くの熱エネルギーを消費してしまい、大変効率が悪かった。書き物によっては蒸気の8割を浪費していたとの記述がある。そこで、ワットは図1 (b) のように復水器をシリンダから分離し、回転機構を適用して改良した。制御工学で画的と言われる调速機（遠心ガバナー）は、この時一緒に発明されたものである<sup>4) 5) 6)</sup>。

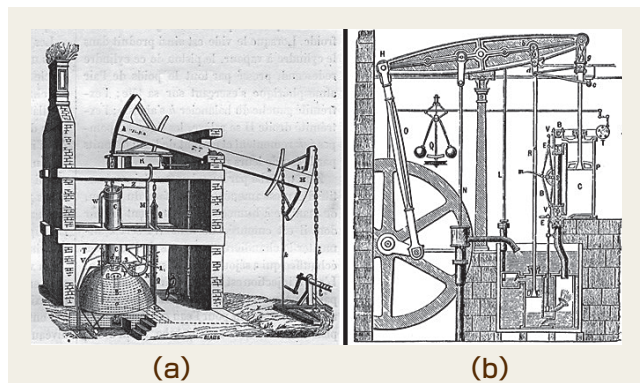


図1 (a) ニューコメンのビーム式大気圧蒸気機関（出典：参考文献<sup>4)</sup>）、(b) ワットが改良した分離復水器と回転機構を有する蒸気機関（出典：参考文献<sup>5)</sup>）



図2 世界初の商用船「クラームント号」  
（出典：参考文献<sup>7)</sup>）

このような蒸気機関を搭載し、1807年に初めて動力船として商用的に成功したのがロバート・フルトンによるクラームント号と呼ばれる乗用船である（全長39.6m幅5.5m）。図2では、ニューヨーク州とニュージャージー州の境界を流れるハドソン川で乗客を乗せて航行し、帆船に乗った人が驚いている様子が描かれており、当時主流だった帆船に代わる新しい時代の乗り物ということが強調されている。クラームント号では、ワットのレシプロ式蒸気機関がパドルを回転させることによって推進した。燃料は松の木を使い、ニューヨークから241km上流のオールバニーまで32時間で走ったと言われている（平均船速7.5km/h<sup>7)</sup>。英国ではスチーブンスンが1814年に最初に蒸気機関車を石炭輸送のために走らせたが、クラームント号はこれに先んじて開発されたものであった。

図3に世界の船舶建造量と原油価格の推移を示す<sup>8) 9) 10)</sup>。船舶建造量に関しては1899年以前のデータが見つからなかったが、1900年以降のデータから外挿補完的に推測すると、動力船の登場したこの頃は今日と比較して非常に少ない建造量、即ち、世界の荷動き量が少なかったことが想像できる。また、20世紀に入ってタービン船が普及し始めたが、ボイラ焚きの燃料には未だ石炭が使われていた。本格的な石油の流通は1870年代前半のペンシルバニア・オイルラッシュにその起源を遡ることができる<sup>11) 12)</sup>。

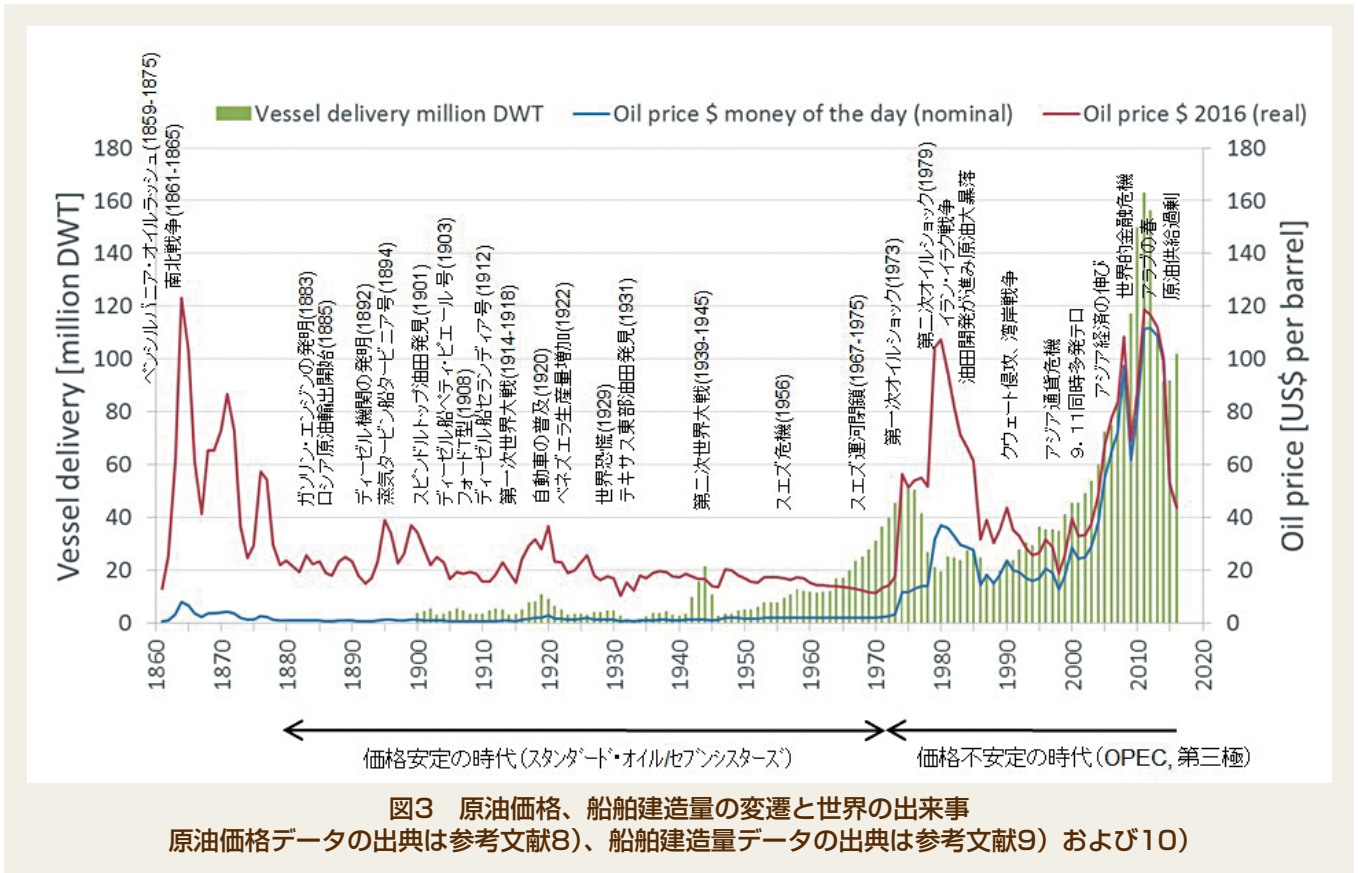
1859年にエドウィン・ドレークがペンシルバニア州タイタスビルで初めて地下石油の採掘に成功し、これを聞きつけたウォール街は石油投資ブームに沸いた。石油の用途がオイルランプしかなかった当時、石油の需要量は僅かだったと考えられ、次々に開始された採掘により原油価格が大きく変動した。その後、米国のスタンダード・オイル社およびそれを前身とするセブンスターズと呼ばれる当時のオイルメジャー7社によるカルテルによって、原油価格は100年近く安定の時代が続いた。その間、第一次世界大戦敗戦によるオスマン帝国の解体で、それまでその支配下にあった地域に英国やオランダの資本が入るようになり、中東地域でも石油採掘ブームとなった<sup>11)</sup>。

1960～1970年代にはセブンスターズから石油利権を取り返すために中東産油国がOPECを創設し、その後OPECが石油の価格と輸出量を操作する様になった。その結果、第一次、第二次オイルショックを皮切りに原油価格が高騰を始め、その後は世界景気とそれを利用した産油量調整により価格不安定の時代となっている。21世紀に入るとBRICsと呼ばれる国々（ブラジル、ロシア、中国など）が急速に石油掘削に力を入れ始め、セブンスターズでもOPECでもない第三極を構成している<sup>11)</sup>。これらに加えて、近年では北米のシェールオイル及びシェールガスという因子も加わり、原油価格の安定が難しい時代になっている。

### 4. 推進システムの変遷

**4.1 プロペラ推進の登場** クラームント号は外輪船と呼ばれ、パドルの抗力を利用した推進装置を持つ船舶であり、文字通り人が櫂を漕ぐのと同様の原理を利用していった。正しくパドルで水面を掻くために喫水を一定に保つ必要があったが、水深が浅くても走れるため穏やかな河や沿岸を航行するには適していた<sup>13)</sup>。現代では、琵琶湖のミシガン号、東京ディズニーランドのマークトウェイン号がこのタイプに属する。また、駆動軸の設計や製造が簡単という利点もあって外輪船が普及していった<sup>13) 14)</sup>。

一方、外輪船には欠点もあった。波浪や流水などによる外輪の破損や、波高や船体の傾きによって左右の推進力が一定に伝わらないことである。艦船においては、



舷側の目立つ場所に大きく露出した脆弱な外輪が敵の攻撃を受けて艦の推進手段を失うことや、艦舷に砲門を設ける余地が外輪によって限られることが欠点であった<sup>13)</sup>。

このような欠点を克服するために、多くのスクリュープロペラ（以降、プロペラ）が考案されていったが、その優位性が認められるようになったのは19世紀の中頃であった。当時外輪式に代わる推進機構を公募していた英国海軍は、プロペラの発明を見出したが、当時の軍首脳らは船底に穴を開けるというイメージをマイナス要因ととらえたため、中々採用されなかった<sup>14)</sup>。そこで1845年3月、英国海軍は外輪式との優劣を決定するために各種試験を行い、最終的に同じ重量、エンジン出力を持つプロペラ船と外輪船に文字通りの「綱引き」をさせたところ、プロペラ船が外輪船を2.8ノットで曳航する結果となった<sup>13) 14)</sup>。これによりプロペラ船の優位性が決定づけられ、以後プロペラは船舶の推進機構として不動の地位を得て現在に至っている<sup>14)</sup>。

**4.2 タービン船の登場** 動力船が普及するにつれて、大西洋を渡るために速さが求められるようになった。1838年に大西洋横断航路会社の間で速力を競い合うブルーリボン賞が設けられた。この頃は蒸気レシプロ機関によるプロペラ推進が主流であったが、19世紀の終わりには平均速度が20ノットを出せるくらいまでになっていた<sup>15) 16)</sup>。蒸気レシプロ機関全盛のこの頃、英国のパーソンズは1884年に高出力かつ高回転数の反動蒸気タービンを発明した<sup>16)</sup>。発電向けに普及し、船内の発電にも用いられた。すると、パーソンズはこれを直接船舶の推進用動力に利用することを考え、1893年の終わりに

実証船の設計を開始した。それから僅か1年足らずで進水させ、蒸気タービンを動力としたこのプロペラ船（全長30.48m、幅2.7m、喫水0.9m、1500馬力、2000rpm）をタービニア号と名付けた。1894年11月に航行試験が行われたが、約50%ものプロペラスリップが発生し、船速は20ノットにも達しなかった<sup>17) 18)</sup>。

当時は適切な減速機の技術が無くタービンとプロペラ軸が直結された推進軸系となっていた。パーソンズは高速回転するプロペラ翼背後でのキャビテーションの発生を疑い、世界初のプロペラ試験水槽を自ら製作、キャビテーション発生の様子を撮像する等をして研究を重ねた。一軸だったプロペラを三軸かつ小径化する改良により、1897年4月、ブルーリボン賞が20ノット程だった時代に、船速34ノット（63km/h）を達成した<sup>17) 18)</sup>。高速回転に大径プロペラが適さないことが世に知られるようになったのはこの頃だと思われる。

1897年6月、ヴィクトリア女王即位60周年記念観艦式にタービニア号が飛入りで現れると当時の最新鋭の艦隊の列を大胆に追い抜いて見せ、その性能の高さを世界に知らしめることに成功した。反対意見も多かったこの企画を成功させたのは、この時船長を務めたパーソンズの会社の営業担当役員だったと伝えられている。その後、タービン船が普及していった<sup>17) 18)</sup>。

**4.3 石炭から重油へ** 前述した19世紀後半に始まった石油の流通を背景として1892年にドイツ人機械技術者ルドルフ・ディーゼルによりディーゼル機関が発明された<sup>19)</sup>。また、石油の流通と共に他の移動体用燃料が石炭から石油に変わっていったように船用燃料も石油に

変わった。石油（液体燃料）には次のような利点があるからである<sup>20</sup>。

- (1) バンカリング（燃料補給）の時間と経費の縮小
- (2) 燃料貯蔵容積と重量の縮小による載貨重量増加
- (3) 投炭要員の廃止による運航コストの削減

1904年、米国液体燃料局が重油・石炭燃焼比較試験を実施し、重油の優秀性を立証した<sup>12)</sup>。正確な時期はわからないが、船用燃料として重油が使われ始めたのもこの頃と考えられる。これによりディーゼル船の誕生する環境が漸く整った。

**4.4 ディーゼル船の登場** ディーゼル機関が発明され、その熱効率の高さが知られるようになると、ついに船舶の主機関としてディーゼル機関が採用されるようになった。世界初のディーゼル船は1903年にフランスの運河を走った内水域小型貨物船ペティ・ピエール号であると言われている<sup>21)</sup>。

ディーゼル機関は、蒸気機関で必要であったボイラが不要なので機関を小型化できるという利点があり、その後、欧州諸国の海軍を中心に潜水艦用原動機として急速に採用されていった<sup>21)</sup>。

1910年には世界で初めて外航船として商用に成功したディーゼル船、オイルタンカーのヴルカス号が就航した。本船の船主であったShell社によれば、当時の同級の蒸気タンカーが11トンの石炭を消費したのに対して本船は2トンの重油しか必要とせず、乗組員数は従来の30人から16人に削減できた<sup>21)</sup>。

1912年には当時造船所だったB&W社（コペンハーゲン）の建造した貨客船セラディア号が就航した。本船は4ストロークディーゼル機関（1050BHP、140rpm）×2基で2軸のプロペラを駆動する方式であり主機関の開発もB&W社が行なった。これ以降B&W社は大型船用ディーゼル機関において不動の地位を築いていった<sup>21)</sup>。

このように、ディーゼル船はこの時すでに実用が始まっており、その圧倒的な熱効率の高さは知られていたが、大きなシェアを取るには時間を要した。例えば、日本では石炭産業への国策的配慮からか燃料が一挙に重油へ切り替わることはなく、本格的に重油が船用燃料として使用されるようになったのは第二次世界大戦後の重化学工業を基盤とする高度経済成長期であった<sup>20)</sup>。

これに加えてディーゼル機関はその複雑な構造・機構のために信頼性・安全性に課題があり、機関管理の面からごく一部の船舶に採用されただけで、1960年頃までは現在のように新造船の殆どがディーゼル船という状況にはならなかった<sup>20)</sup>。ディーゼル機関の熱効率の高さにも関わらず、国の事情や新しい技術に対する不安により採用が進まなかったのである。

図3の世界の船舶建造量に再び目をやると、1945年以降の世界的な戦後復興を背景に右肩上がりでの上昇を始め、海運需要が急速に伸び始めたことがわかる。また、スエズ危機によるスエズ運河閉鎖（1956～1957）および第三次・第四次中東戦争による二度目のスエズ運河閉鎖（1967～1975）によりアフリカケープタウン回りを余儀な

くされたことも影響して、経済性の観点で船舶の大型化が進んだ。1954年時点では、23,000DWT（載貨重量トン）以上の大型船においてはタービン船が主役であり、大型船全体に占めるディーゼル船の割合は20%程度しかなかった。しかし、ディーゼルエンジン技術者らが急成長する大型船のシェアを奪うべくエンジンの大出力化を競い合った結果、1960年には大型船全体の60%がディーゼル船になった<sup>1)</sup>。

その後も、VLCCなどの超大型船に向けたタービン船を残して、徐々にディーゼル船が普及していった。実は当社は1970年から1976年にかけてタービン機関も製造していた。1976年に当社有明工場で製造した、エッソ・タンカーズ社向けの超大型タンカー、エッソ・ジャパン号（40万219DWT）の主機関は当社製のタービン機関であった。しかし、その後二度のオイルショックを経て、燃料コストが急激に上がったため、ディーゼル機関の熱効率の高さと更なる大出力化の努力により、ほぼ全ての商船がディーゼル船となり、今日に至っている<sup>1) 16) 20)</sup>。タービン機関からディーゼル機関に置き換える、いわゆる主機換装工事が盛んに行われたのもこの頃のことであった。

## 5. 結 言

これまで述べたように、1892年にディーゼルエンジンが発明されディーゼル推進の外航船舶が現れたのは1910年代初頭のこと。その後、第二次世界大戦後には海運需要が大きく伸び二度のスエズ運河閉鎖もあって船舶の大型化が進んだ。1970年代には永らく安定していた原油価格が上昇を始め、船用主機関に対しても低燃費化の要請が増大した<sup>2)</sup>。

1980年代には温室効果ガスと地球温暖化の因果関係が明らかとなり、1992年の地球温暖化防止条約UNFCCC採択以来、環境意識および条約や規制を動機とする更なる低燃費化の要請が加わった。これと並行してIMOでは、1980年代後半に大気汚染物質の人体および地球環境への影響の調査が開始され、1997年のMARPOL条約締約国会議において船舶からの大気汚染物質排出防止の為の付属書VIが採択され、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、PM（粒子状物質）の削減が義務付けられた<sup>22)</sup>。

後編では、このような時代の要請の中でディーゼルエンジンがどのように変遷してきたのかを、当社のディーゼルエンジン技術の歴史を交えて振り返ることとする。

### 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NO<sub>x</sub>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。

## 参考文献

- 1) J. Dragsted : The First 50 Years of Turbocharged 2-stroke, Crosshead, Marine Diesel Engines, Imprinted by CIMAC, **2013**.
- 2) 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.
- 3) 山船晃太郎 : 船の考古学, Hi-Story of the Seven Seas, <https://suichukoukogaku.com/ship-archaeology/>, 参照日**2021**年9月9日.
- 4) Wikipedia : History of the steam engine, Wikipedia The Free Encyclopedia, <https://en.wikipedia.org/>, 最終更新**2021**年9月14日06:15UTC版.
- 5) ウィキペディア:ジェームズ・ワット, フリー百科事典ウィキペディア日本語版, <https://ja.wikipedia.org/>, 最終更新**2021**年7月8日10:12UTC版.
- 6) Wikipedia : Beam engine, Wikipedia The Free Encyclopedia, <https://en.wikipedia.org/>, 最終更新**2021**年4月24日23:22UTC版.
- 7) James D. MacCabe, Jr. : Great Fortunes, and How They Were Made, The Project Gutenberg eBook, <https://www.gutenberg.org/files/15161/15161-h/15161-h.htm>, 参照日**2021**年9月10日.
- 8) BP : Statistical Review of World Energy June 2017, 66<sup>th</sup> edition, BP, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html>, 参照日**2017**年10月11日.
- 9) MAN Diesel & Turbo : Long Term Deliveries, MAN Diesel & Turboプレゼン資料 (**2016**), 1.
- 10) Lars Bryndum : Japanese Shipyard Seminar, MAN Diesel & Turboプレゼン資料 (**2017**), 33.
- 11) Sustainable Japan : 石油産業の構造①, ニューラル, <https://sustainablejapan.jp/2016/01/28/oil-production/20901>, 最終更新**2016**/01/28版.
- 12) ENEOS : 石油産業年表, ENEOS, <https://www.eneos.co.jp/binran/document/table/index.html>, 参照日**2021**年9月18日.
- 13) ウィキペディア:蒸気船, フリー百科事典ウィキペディア日本語版, <https://ja.wikipedia.org/>, 最終更新**2021**年6月20日01:06UTC版.
- 14) ウィキペディア:スクリュプロベラ, フリー百科事典ウィキペディア日本語版, <https://ja.wikipedia.org/>, 最終更新**2021**年9月17日01:59UTC版.
- 15) ウィキペディア:ブルーリボン賞 (船舶), フリー百科事典ウィキペディア日本語版, <https://ja.wikipedia.org/>, 最終更新**2020**年7月14日02:35UTC版.
- 16) 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.
- 17) ウィキペディア:タービニア, フリー百科事典ウィキペディア日本語版, <https://ja.wikipedia.org/>, 最終更新**2017**年9月14日11:04UTC版.
- 18) Adrian Osler, Tyne and Wear County Council Museums : Turbinia, Brochure, ASME, <https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/73-turbinia>, 参照日**2021**年9月18日.
- 19) 佐藤一也 : 4サイクルディーゼル機関の歴史と課題, 日本マリ学誌第43巻第5号 (**2008**), 12-20.
- 20) 関谷義男 : 船舶用燃料, 燃料協会誌, 第60巻第655号 (**1981**).
- 21) D. Stapersma : Vulcanus versus Selandia, SCHIP&WERF de ZEE, December **1996**, 52-54.
- 22) IMO : MARPOL Annex VI and NTC 2008 (2013 edition), Regulations 13, 14, 19, 20 and 21 (**2013**).

## 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 1: Evolution of Marine Power Systems and the Advent of Diesel Propulsion Ships

### 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 starts off in the 18th century, when the newly invented reciprocating steam engines improved in thermal efficiency and started to be used to power ships. The propulsion systems for powered ships transitioned from paddle types in the early 19th century to propeller types, which provided superior propulsion and robustness, by mid-century. The late 19th century saw the high-speed rotation of steam turbines increase ship speeds dramatically, coupled with advancements in propeller science. The distribution of crude oil and the invention of diesel engines in the second half of the century led to the birth of today's mainstream, economical diesel-powered ships in the early 20th century. The pursuit of economic efficiency seems to have been the main driver of the evolution of marine power systems from the Industrial Revolution up to this point. In Part 2, we outline the history of power increases and fuel efficiency in diesel engines and the recent trends in environmental regulations while referring to Hitachi Zosen's diesel engine technologies, and finally present the prospects for the future.

### Authors

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

Toshio Takiya            Shinji Baba