

海に信号はなくても船舶は電動化する*

Large Vessels are electrified while Cruising without Traffic Signals

木船 弘康¹⁾
Hiroyasu Kifune

The reason for electrifying ship propulsion systems is significantly different from the electrification of an automobile power train in terms of mechanism, control, and introduction purpose. This paper summarizes the business and technical backgrounds unique to ships and describe the motives for electrification. In addition, it will outline the characteristics of electrified ships.

KEY WORDS

Power Train

Ship, Diesel Electric, Hybrid [E]

1 はじめに

筆者は職業柄、船舶の電気推進化に関する意見を求められたり、質問を受けたりすることが多くある。これらの質問に答える際に悩ましいのは、「自動車との単純比較」と「電動化に対するある種の思い込み」が前提にある場合が多いことである。移動体であること、動力源をもつこと、将来的に自動運転が期待されていること、などの類似する部分はあるが、本質的な部分で大きく異なっている。そこで、本来的に技術論に終始したほうが筆者自身は楽ではあるものの、読者諸氏の正當なご理解を得るためにも、「自動車との違い」から論を進めたい。なお、本稿は20トン未満の小型船(舟艇ともいう)は対象とせず、大型船(20トン以上)を主対象とする。

1.1 ビジネスモデルの違い

(1) 購買層の違い まず読者諸氏に伺いたい。『心と体を震わす2万kWエンジンの鼓動、極限まで磨き上げたプロペラ、高い保針性。20万デッドウェイトタンカー、デビュー！ 今度の土日はお近くの〇〇造船へ』というTV-CMを観たことがあるだろうか？ 筆者は心の底から観てみたいと思うが、たぶん、これまでも、これからのないだろう。そう。大型船舶の世界には自家用車に相

当するジャンルがないのである。艦船・巡視船を除き、ほぼ100%がB to Bである。これは個人の趣向が船舶の性能や外装内装に影響を与える余地が極端に少ないことも意味する。

(2) 運用の違い トラック等の貨物車を運用する配送サービスを提供する運送会社は、基本的に自社で車両を保有していることが多いと思われる。しかし海運業では、船主(船舶の所有者)とオペレータ(運航会社)は必ずしも一致しない。船舶の管理業務(保守整備)や船員の手配(マンニングともいう)まで別会社である場合がある。よって実際の運航者である船員の要望がストレートに船舶の建造に反映される機会は多くない。

(3) 製造の違い 自動車製造業はマスプロダクトのメリットを追求し続けた業界の一つであろう。しかし大型船舶は基本的に一品一様のオーダーメイドである。もちろん、同形船と呼ばれる基本仕様が同じ船舶を連続建造する場合は、一部の行程管理や調達においてメリットは多少ある。一方で、同形船であっても船主や投入航路、建造時の規制によって少しずつ仕様が異なることは当然であり、まったく同じ船はこの世に存在しないといつてよい。よって大量生産方式の前提である仕入れコストの削減は一部のみに見出される。

1.2 大きさの違い

(1) 主機エンジンの違い 船舶の大きさや最大船速の設定によって定格出力は異なるが、近年の超大型コンテナ船では8万kWを超える低速(70~90rpm)ロングストローク2サイクル

* 2020年9月4日受付

1) 東京海洋大学 学術研究院海洋電子機械工学部門
(135-8533 江東区越中島2-1-6)
E-mail: kifune@kaiyodai.ac.jp

ディーゼルエンジンが主機として搭載されることがある。エンジン単体で1,000~2,000トン、高さ15m、長さ24m、排気量は22,000L、単機熱効率が50%に達する一方、一日の燃料消費量は100~200tonにもなる。エンジンは減速ギヤなしでプロペラを駆動するため、動力伝達効率も高い。船内でピストン抜き作業をする必要があるため、機関室高さはエンジン高さの倍は必要になり、機関室空間も大きい。

(2) **環境への影響度の大きさ** 本年7月にモリシャスで起きた燃料油流出事故が環境に甚大な影響を与えたことはご存知のとおりである。1997年1月に日本海で発生した重油タンカー・ナホトカ号の事故も長期にわたって日本海沿岸を汚染し続けた。大型船舶が事故を起こすと、その環境への影響の大きさと回復までの時間の長さは途方もない。こうしたリスクを常に負う海運会社は、新規技術のメリットをチラつかされても、長年の実績がある“枯れた技術”から容易に移行できるものではない。

(3) **価格の違い** 船舶の大きさや船種によって船価は異なるが、一隻当たり数億円から数百億円になる。大手海運会社は別として、数十億円はくだらない船舶を自己資金のみで調達できる船主は稀であろう。金融機関を使えば、金利の支払いだけでも莫大である。しかも運賃は常に国際競争価格であり、例えばバラ積み貨物船の傭船スポット価格は、2019年9月の運賃を基準にみると2020年2月には1/6近くまで下落するなど、陸上運送では考えられないほど景気変動の影響を受ける。

1.3 動作環境の違い

(1) **タイヤとプロペラ** 自動車を電動化する最大のメリットは、制動時に運動エネルギーを電力として一時的に回収する仕組みをもつことに他ならない。これが技術的に可能なのは、タイヤが路面とほとんど滑ることなく圧接しており、車体の運動エネルギーを回生動力として取り出しやすいからである。船舶ではプロペラが開放流体の中で回転しており、流体の速度に対するプロペラ前進速度が大きく、スリップが大きい。このプロペラで回生を得るということは、船体周囲の流体によってプロペラを回転させることとなる。そもそも前進用に最適設計されたプロペラでは、面圧の発生方向が逆転した状態となるため、動力回収と

いう点で明らかに効率が悪い。

(2) **交通環境** ご存知のとおり、海上に信号はない。よって航行中に加速減速を繰り返すことがなく、そもそも回生エネルギーが生じる余地はほとんどない。したがって、船舶では回生エネルギーを電池に吸収させて次の加速時に有効利用するというハイブリッド自動車と同じアイデアは基本的に成立し得ない。

(3) **流体密度** 海水の密度は空気の約790倍あり、一定速度を維持するのに相応の動力を必要とする。船型、船種、航行速度、気象海象条件によっても異なるが、一般には空気抵抗による推力消費は全体の十数%程度とされる。例えば参考資料によると⁽¹⁾、全長300mの満載状態のタンカーが16.2knot(≒30km/h)で航走する際、水から受ける抵抗の内訳は、造波抵抗(7%)、表面粗度抵抗(6%)、粘性圧力抵抗(19%)、摩擦抵抗(68%)である。

(4) **使用燃料** 船舶で使用される燃料油は重油である。陸域で使用される燃料の質が改善されるに従い、残渣油としての性格の強い船用燃料油の質は相対的に低下してきた。しかも採油地によって特性が異なる。動粘度が高く、スラッジ成分の多い燃料油を使いながらエンジンのご機嫌を保つためには、複雑なプラントに関する熱力学的理解はもちろんのこと、燃料油性状に関する理解、保全管理、故障への緊急対応力など、広範な知識と経験が船舶機関士には求められる。スタートボタンを押してレバーをドライブに入れればすぐに走り出せる自動車とは、やはり違うのである。

2 船舶推進システムの電動化の分類

以上述べたように、自動車と船舶では前提とするビジネス環境、動作環境が異なるため、船舶の推進システム(自動車のパワートレインに相当)を電動化する理由も異なる。その詳細は後述するが、ここでは電気推進システムの簡単な分類を紹介する。ただし、これらの大分類に漏れるシステムをもつ船舶も複数あり、網羅的に解説できないことをあらかじめご了承ください。

2.1 ディーゼルエレクトリック方式

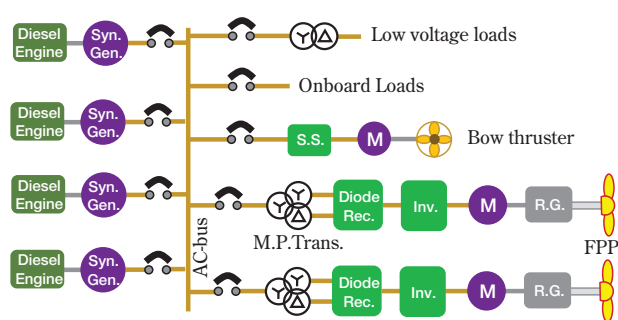
ディーゼルエレクトリック(DE: Diesel Electric)方式とは、ディーゼルエンジンを原動機としながらも、その回転動力でプロペラを駆動する

のではなく、いったん電力に変換し、電動機により再度回転動力に変換してプロペラを駆動する方式を指す。自動車の世界のDEとの違いは、電池を併用しないことである。大型船舶の電動化においてDEは主流といえる。DEはプロペラの違いによって大きく二分類できる。

(1) FPP 搭載船 FPP(Fixed Pitch Propeller)はその回転数に応じて単位時間当たりに押し出す水量が変わるため、推力の制御(すなわち船速の制御)は回転数によって実現される。DEではプロペラを推進用電動機で駆動するため、電動機の可変速制御が必要となる。このため、インバータを含む電力変換器群が使われる(図1)。

発電電力は推進用動力のみならず船内電力需要も満たすため、常時60 Hzの三相交流電力が供給されている。このときにDEで課題となるのが電源電圧歪みである。インバータに直流電力を供給するため60 Hzの三相交流電力を直流変換しなければならない。この変換器がダイオード整流器であれば低コストであるが、高調波源となり、船内電源系統および各種電気機器の動作に悪影響を及ぼしかねない。船級承認を受けるための規制値を満足することも必要である。そこで歴史的には多パルス化トランスが採用されており⁽²⁾⁽³⁾、発電機電圧が高圧(6.6 kV/11 kV)の場合は降圧変圧器としても機能する⁽⁴⁾⁽⁵⁾。一方、近年ではダイオード整流器に代わりAFE(Active Front End)のAC-DC変換器の採用事例も増えており、この場合は多パルス化トランスではなく、ローパスフィルタが用いられる。

(2) CPP 採用船 CPP(Controllable Pitch Propeller)は翼角制御が可能であるため、同じ回転数でもプロペラ翼角の違いによって押し出し水量を変化させることができる。回転数と翼角の両方を制御して推力制御ができる点でプロペラ航空機と同じといえる。ただし、実際の運用の現場では、推進軸回転数を一定に保ったまま、プロペラ翼角の変更によってのみ推力制御を行う場合が多い。つまりDEでCPPを採用する場合、推進用電動機は一定回転数のままとするため、回転数制御のための高価なインバータが不要となる⁽⁶⁾。推進用電動機としては誘導電動機が用いられ、単巻変圧器で構成される始動補償器やサイリスタを用いた



S.S.:ソフトスタータ, Inv.:インバータ, M:電動機, M.P. Trans.:多パルス化トランス, R.G.:減速ギヤ

図1 ディーゼルエレクトリック推進システム例

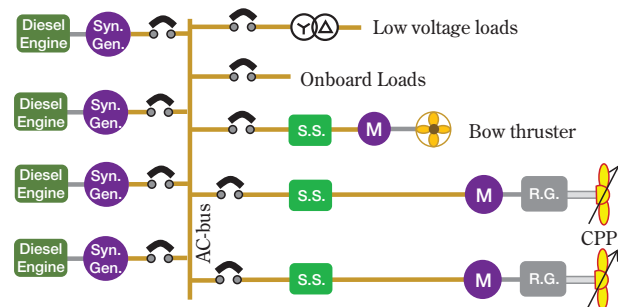


図2 ディーゼルエレクトリック推進システム例

ソフトスタータで始動する場合が多い(図2)。比較的低コストでDE化できるため、わが国では数千トン以下の内航船に採用がみられる⁽⁷⁾。

2.2 ハイブリッド方式

(1) ディーゼル主機+電動機 例えば図3のように推進軸がプラネタリギヤやクラッチ等を通じて主機と電動機に接続されており、双方あるいはどちらか一方の動力を選択することができる仕組みがある⁽⁸⁾⁽⁹⁾。このときの電動機は発電機電力を推進軸に取り込むため、PTI(Power Take In)動作である。一方、推進軸から電源系統に電力を取り出す動作をPTO(Power Take Off)といい、このときの電動機を「軸発電機」と呼び、1960年代後半から一般商船への本格的な採用がなされている⁽¹⁰⁾。

この場合、軸発電機に加えてフルブリッジのサイリスタコンバータ・インバータ、ならびに同期調相器のセットが採用される事例が多い。

(2) ディーゼル主機+電動機+電池 図3に電池を組み合わせた仕組みが図4であり、一部のタグボートに採用された⁽¹¹⁾。構成機器だけを見ると、ハイブリッド自動車と似た仕組みが出来上がるが、エネルギーフロー制御の概念が異なる。紙

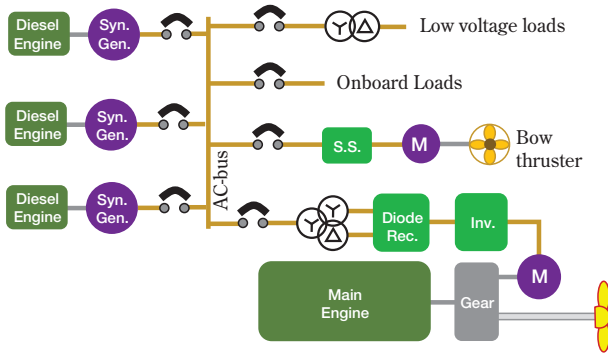


図3 ハイブリッド推進システム例

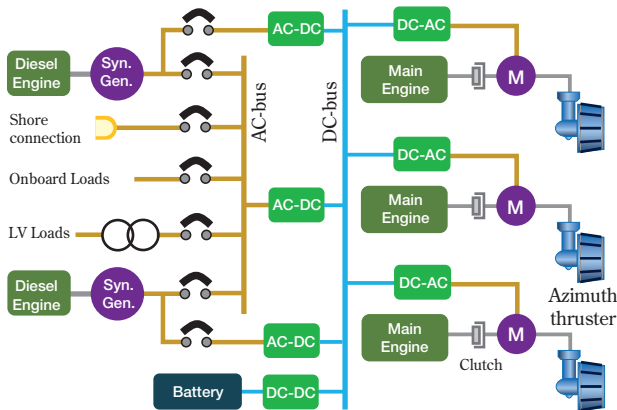


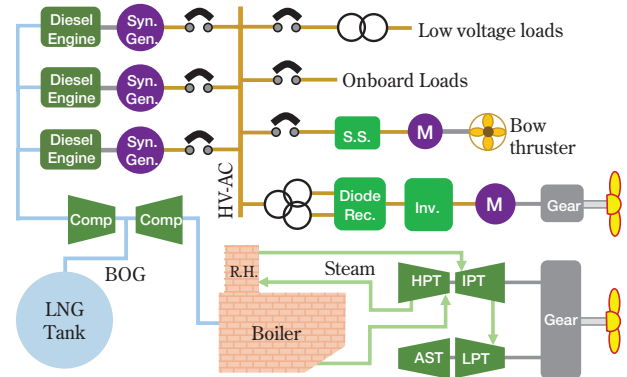
図4 ハイブリッド推進システム例

幅の関係で詳述できないが、①電池は負荷急増時のトルクアシスト用、②低速航行時の電池推進 (EV 走行に相当) 用電源、という点は自動車と共通する。一方、ハイブリッド自動車の省エネの根幹をなす「回生による充電」はなく、③専用岸壁に係留中に陸上電源システムからのみ充電、という点が特徴となる。

(3) 蒸気タービンシステム+ディーゼルエレクトリック 蒸気タービンシステムによって生み出される回転動力と DE システムによって生み出される回転動力を推力として利用する仕組みが一部の LNG 運搬船に採用されている⁽¹²⁾。発電機エンジンの排ガス熱量のみならず、エンジンジャケット冷却系に捨てられていた低温熱エネルギーまでも蒸気タービンシステムに余すことなく取り込むことで、システム全体の燃料消費を低減する仕組みである(図5)。

2.3 電池推進

液体燃料と比べてエネルギー密度が各段に低い電池のみで長距離・大出力航行するのは不可能である。よってこれまでに電池推進化された大型船



Comp: BOG 圧縮機, R.H.: 再熱器, HPT: 高圧タービン, IPT: 中圧タービン, LPT: 低圧タービン, AST: 後進用タービン

図5 蒸気タービンとのハイブリッド推進システム

はすべて短距離航行フェリーである。なかでも特徴的な船を二つ挙げる。

(1) 陸上電源システムへの配慮 2010年に就航した Ampere⁽¹³⁾は、片道6kmの距離を20分で航行するRO-ROフェリーである。船内に520kWh×2セットの電池を搭載し、着岸時のわずか10分で一航海分の電力量を急速充電する(図6)。充電時にフェリー棧橋近辺の電源システムに負荷変動ショックを与えないよう、各棧橋に260kWhの電池を配備し、低速で充電するとともに、陸と船のバッテリー間で急速充電を行う。船内の機器はAC-busリンクとなっており、推進用電動機は一定速で駆動し、CPPにより推力の制御を行う。

(2) 可変電圧DCバス e-Oshima⁽¹⁴⁾は300kWh×2セット電池を搭載しており、三相440Vの陸上電源を船上設置のAC-DC変換器に引き込むことで充電する(図7)。船内機器はDC-busリンクとなっており、その電圧はリチウムイオン電池のバンク電圧そのままであることから、SOCによって電圧が変動する。まさに大規模なEVである。

3 電動化の利点と欠点

次に電動化の利点と欠点を解説する⁽¹⁵⁾。

3.1 利点

(1) 機関室レイアウトの設計自由度向上 大規模輸送によるコストメリットを出すため、カーゴスペースは大きくするが、流体抵抗を軽減するため船首と船尾は絞った形状となる。プロペラを駆動する大型の主機を含む動力プラントは当然のことながら船尾の船底付近に配置せざるを得ないが、最も狭隘な場所でもあり、最適化には限界があっ

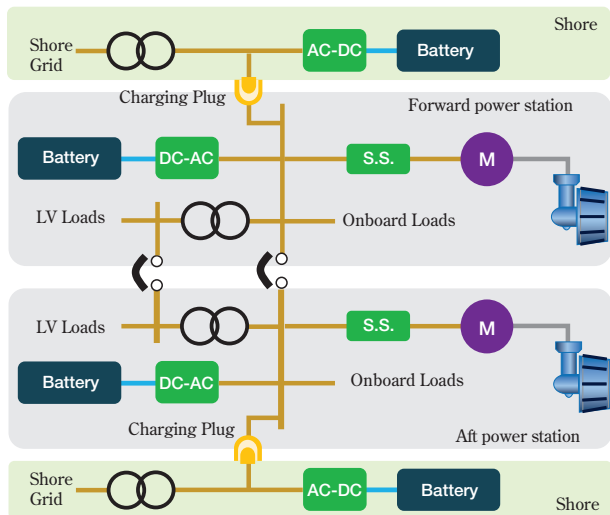


図6 電池推進システム例

た。DE方式では、発電機原動機の軸出力と推進軸とのアライメントを考慮しなくてよい。このことが機関室のレイアウトに革命的な自由度をもたらすことになり、船尾形状の改善が可能となった。その結果として、抵抗軽減すなわち必要動力の減少を実現できる⁽¹⁶⁾。日本のDE化した一部の内航船舶では、バドックフロー⁽¹⁷⁾と呼ばれる船型を採用することで、燃費節減を謳っている。

(2) 静粛性向上 推進軸を駆動する主機の軸アライメントの設計施工は、造船所エンジニアにとって山場の一つである。主機は架台と呼ばれる強固な構造により船体に揺るぎなく据え付けられる。すなわち主機振動は船体に伝達されやすく、固体伝搬音として騒音の原因となる。一方、DE化すると、発電機セットを防振ゴムの上に置くことが可能となり、船体に伝わる振動が軽減される⁽¹⁸⁾。

(3) 冗長性向上 一機一軸の推進システム構成では、主機にトラブルがあると停船の憂き目に会い、航行海域によっては衝突、座礁の危険がある。一方、DE化船では、複数台の発電機を備え、電動機巻線の二重化等の工夫を施すことにより、機器の単一故障が航海の継続に甚大な影響を与えるリスクを低減できる⁽¹⁹⁾。このとき、仮に出力が1/2になっても、推進力は船速の3乗に概略比例することから、船速低下は20%程度となる。

3.2 欠点

(1) 高い建造費 推進システムが複雑になる分、建造費は高くなる。船価に関する情報はなかなかオモテには出ないが、1%の船価上昇が数千万円

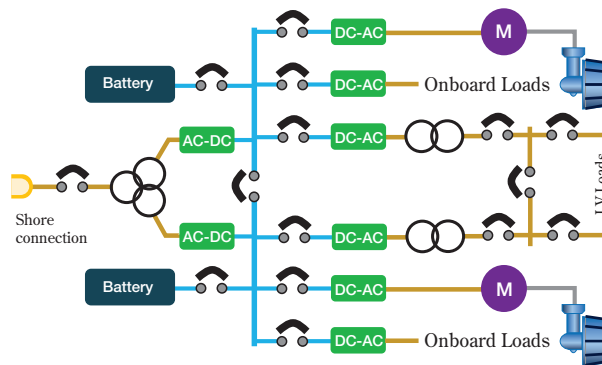


図7 電池推進システム例。動力プラントは船首側(Forward)と船尾側(Aft)に分けて配置されている

というビジネスの世界では、DE化に伴う建造費の増加は容易ならざる事態である。国の内外を問わず、推進システムの電動化案件の多くは公的な補助との縁が強い。

(2) トラブル対応 はるか数百マイル沖を航行中の船舶に深刻なトラブルが発生しても、JAFは駆けつけてくれない。船員は自らの技量により問題を解決、改善あるいは局所化することで次の港を目指すことになる。ここにインバータという一見どこが故障したのかわかりにくい装置があったとすれば、船員のみならず、船主やオペレータも心穏やかではない。高度に電化を図れば、電気機器に関する専門家を乗船させる必要もあり、運航コストも高くなる。

(3) 低いエネルギー伝達効率 従来推進システムでは、ディーゼルエンジンの出力を100%とすると、中間軸、推進軸を通じてプロペラへ伝達される動力は98~96%といわれる(図8)。一方、DE化すると、エンジン出力は同期発電機、多パルス化トランス、整流回路、インバータ、推進用電動機、ギヤを通じて動力が伝達されることとなる⁽²⁰⁾。エネルギーの伝達損失はプラントの定格出力や負荷率によっても大きく異なるが、エンジン直接駆動と単純比較すると、効率で勝ち目はない。ただし効率低下への対策も複数ある。

3.3 伝達効率の改善対策

(1) 発電機運転台数制御 ディーゼルエンジンは負荷率の減少とともに熱効率も低下するため、ディーゼル直接駆動方式では、減速航行時の効率が低下しやすい(図9)。DE方式では、負荷に応じて発電機の運転台数を適切に調節することで発電機の効率を低下させずに運用が可能である⁽²¹⁾。

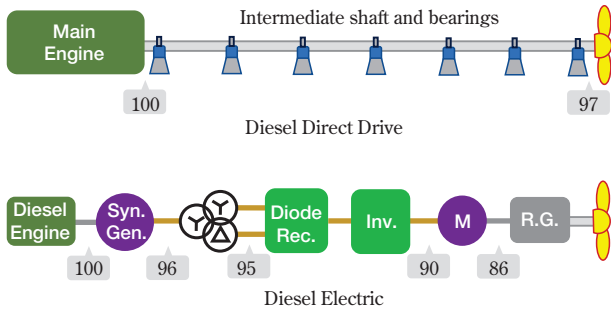


図8 プロペラへのエネルギー伝達

(2) 発電機エンジンの可変速制御 一般に発電機エンジンは周波数を一定に保つため、一定速で運転することが運命づけられる。しかし、負荷の大きさにより可変速制御が可能であればエンジンの燃料消費特性を改善できることが指摘されている⁽²²⁾。これを実現するのがDC配電システムである⁽²³⁾。可変速発電機に直接AC-DC変換器を接続し、全電力を直流電力として取り出してDC busへと供給する。部分負荷での運転が長い船舶では有効な手段の一つとなる。

(3) 流体抵抗軽減 DE化に伴う船尾形状の改善は船体の流体抵抗軽減に大きな効果をもたらす。またコスト増とはなるが、二重反転プロペラ⁽³⁾⁽⁹⁾を使うことでプロペラ水流を整流し、積極的な効率向上を狙ったシステムもある。

4 電動化された船

さまざまな課題を乗り越えてなお、電動化が選択された船種がある。これらについて解説する。

4.1 LNG船

輸送中のLNGは極めて断熱性の高い特殊なタンクに積み込まれるが、加冷はしていない。このため外部より侵入した熱によりLNGが気化する。この気化ガス(BOG: Boil Off Gas)によりタンク内圧力が高くなり過ぎるのを防止するため、ガス抜きが必要となる。LNG船はこのBOGを主燃料としており、歴史的にはボイラ+蒸気タービンシステムが導入されてきた。このため他のディーゼル駆動船と比べると著しく船価が高く、運航する機関士も「タービンエンジニア」と呼ばれて特別な知識と経験が必要であった。どの世界も人の育成には相応の時間を要するもので、LNG需要の増加は深刻な運航者不足を招くリスクをはらんだ。

2000年以降、Wärtsilä社から4サイクルのデュ

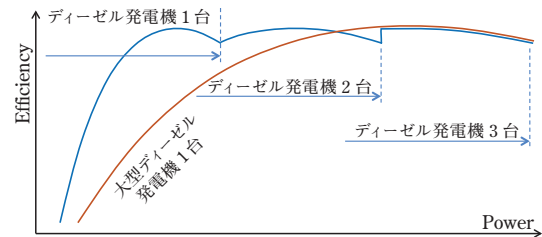


図9 発電機の運転台数制御と効率

アルフューエル(天然ガス+パイロット燃焼用の重油を利用する)ディーゼルエンジンが実用化された。船用主機として採用するには定格出力が若干不足すること、高い冗長性をもたせることなどの理由から⁽²⁴⁾、これを発電機原動機として複数台搭載したDE方式のLNG船が建造されるようになり、2010年代前半にかけて韓国造船所を中心として多くの電気推進LNG船がデリバリされた。ところが2010年代中頃からガス焚き2ストロークエンジンがMAN ES社およびWIN GD社からリリースされると、複雑で高価な電気推進は倦厭され、電気推進LNG船の建造は減少した。

これとは別に、近年では天然ガスを燃料とした船舶の建造が注目を集めている⁽²⁵⁾(電気推進ではない)。この理由は、重油に比べて天然ガスのCO₂排出量が少ないこと、排ガスからのSO_x対策が不要であること、などが主要因となっている。

4.2 大型クルーズ客船

緊急避難的に高速航行ができる性能はもたせていても、造波抵抗が顕著になるほど船速を出すと船体動揺も大きくなり不快となりやすい。よって通常航海時は余裕をもった航海速度で航走する。つまり推進力としては、大半が部分負荷である。

乗客と乗組員合わせて数千人(2020年現在で世界最大のSymphony of the Seasは8,000人超)が生活するクルーズ客船は、さながら移動する町であり、あらゆる生活インフラの維持に大電力を必要とする。船内にはプールやスポーツジム、遊園地など派手なアトラクションのほか、レストラン、映画館、コンサートホール、図書館、バー、スパが複数存在し、エンジンの振動や音とは無縁でなければならない。機関室空間を圧縮し、客室空間を最大化することも重要である。これほどまでにDE化に適する船種は他にないといってよく、100,000 GT以上の客船で電気推進ではない船を見つけることは難しい。

5 将来動向

5.1 AC 配電と DC 配電

船内の電源系統は基本的に三相交流による AC 配電が主流であるが、船種によっては、DC 配電への移行が現実味を帯びる可能性もあり、世界中の電気機器メーカ、造船所、船級協会などが新規需要の取り込みを活発化している。こうした中、もともと建造費が桁違いな海洋資源開発に関する船舶や海洋構造物、ならびに艦船では DC 配電の採用事例が増える可能性がある。しかし一般商船においては、よほどの価格破壊か IMO(国際海事機関)や IEC(国際電気標準会議)による何らかの劇的なルール変更でもない限り、当分の間は AC 配電が主流であろう。

5.2 電動化の意味付けと動機付け

船舶の電気推進化にあたり NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)や JR TT(鉄道・運輸機構)の補助があった時代には電気推進船の建造はあったが、補助が終わると採用事例は途端に減少した。電動化によるメリットは建造費の増加を十分に上回ることがないと船主が判断しているからに他ならない。もちろん、先に紹介した LNG 船や大型クルーズ客船に加えて、調査船や特殊作業船など、電気推進化の利点を享受している船舶は他にもある。しかし、本質的に燃料節減のみを主目的として電気推進を採用する事例は少なく(もちろん IR 活動の一環として、大々的にエコを謳うが)、制御性や静粛性といった要素が重要な意味をもっている。これらの性能が評価される船種においては、今後も DE 化が続くであろう。

6 むすび

本稿は本来筆者が得意とする詳細な技術論を避け、大型船舶における電動化の真の姿を捉えることを主眼として、略説を試みた。このため読者諸氏の技術的知的欲求を満たすだけの内容に至らなかった可能性があり、予めお詫びする次第である。また、多分に筆者の偏った見方が反映されているため、強いご関心のある方は、参考文献等をご確認いただければ幸いです(できるだけオープンアクセスの文献を参照している)。

末筆ながら、本稿の構想から執筆に至るまで根気強くご指導いただいた会誌編集委員の荒木幹也先生

に感謝いたします(本稿タイトルも荒木先生による)。

参考文献

- (1) 船舶海洋工学シリーズ⑩「船舶性能設計」, 成山堂書店
- (2) Dinesh Kumar, et al.: A Comprehensive Review of Maritime Microgrids: System Architectures, Energy Efficiency, Power Quality, and Regulations, IEEE Access, Vol. 7, p. 67249-67277, 2019, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2917082
- (3) Furuta Tetsuya, et al.: Development of Electric Propulsion Chemical Tanker with Contra-Rotating Propeller(CRP), IHI Engineering Review, Vol. 40, No. 2, p. 49-53 (2007)
- (4) Marco Cupelli, et al.: Power Flow Control and Network Stability in an All-Electric Ship, Proceedings of the IEEE, Vol. 103, No. 12, p. 2355-2380 (2015)
- (5) E. Sofras, et al.: Developing a new methodology for evaluating diesel - electric propulsion, Journal of Marine Engineering & Technology, Vol. 13, No. 3, p. 63-92 (2014)
- (6) 749GT 型ダブルハル黒油タンカーの開発, SRC News, No. 76 (July 2008)
- (7) 電気推進システムの今後の展望, JR TT 内航船舶技術支援セミナー資料(2017)
- (8) 森哲也ほか: 次世代カーフェリーの省エネ化への取組み, 三菱重工技報, Vol. 44, No. 3, p. 34-38 (2007)
- (9) Naoki Ueda, et al.: The First Hybrid CRP-POD Driven Fast ROPAX Ferry in the World, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, Vol. 41, No. 6, p. 1-5 (2004)
- (10) 加納寛治ほか: 船舶とう載の各種軸発電システムの実例, 日本船舶機関学会誌, Vol. 16, No. 9, p. 149-156 (1981)
- (11) Paul Jammer, et al.: Conversion of Kotug's RT Adriaan to become Europe's first hybrid tugboat, International Tug and OSV, Barcelona Spain, Day 3, Paper No. 3, May (2012)
- (12) 齋藤英司ほか: LNG 船用ハイブリッド推進プラント STaGE の紹介と洋上発電プラントへの応用, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 54, No. 2, p. 6-11 (2019)
- (13) DNV-GL web site, <https://www.dnvgl.com/news/seatrade-award-for-dnv-gl-classed-ampere-world-s-first-fully-electric-vessel-24038>
- (14) 西田英幸ほか: 送迎船向け全電気推進システムの概要, 第 89 回マリンエンジニアリング学術講演会, S44, p. 121-122 (2019)
- (15) 木船弘康ほか: 船舶用電動力応用システムの技術動向, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 4-S10-4, IV45-50 (2017)
- (16) 藤井昭彦ほか: スーパーエコシップの技術—ツインポッド船型の性能について, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 46, No. 3, p. 113-118 (2011)
- (17) 山田英城ほか: 運航経済性向上を実現させた内航電気推進船の省エネ技術, IHI 技報, Vol. 50, No. 4, p. 28-32 (2010)
- (18) 富田展久: 機関防振装置と電気推進船への適用事例紹介, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 50, No. 2, p. 24-28 (2015)
- (19) 堤大輔: 電気推進システムの現状と動向, 日本船舶海洋工学会誌, Vol. 66 (2016)
- (20) Hiroyasu Kifune, et al.: Overview of Electric Ship Propulsion and Fuel Consumption, Journal of JIME, Vol. 54, No. 4, p. 95-100 (2019)
- (21) Jan Fredrik Hansen, et al.: History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends, Proceedings of the IEEE, Vol. 103, No. 12, p. 2229-2242 (2015)
- (22) O. J. Simmonds: DC: Is it the alternative choice for naval power distribution?, Journal of Marine Engineering & Technology, Vol. 12, No. 3, p. 37-43 (2014)
- (23) R. D. Geertsma, et al.: Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments, Applied Energy, Vol. 194, No. 15, p. 30-54 (2017)
- (24) 岩淵文雄: ガス機関技術の系統化調査, 国立科学博物館 産業技術情報センター
- (25) Masaki Adachi, et al.: Economic analysis of trans-ocean LNG-fueled container ship, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 19, p. 470-478 (2014)