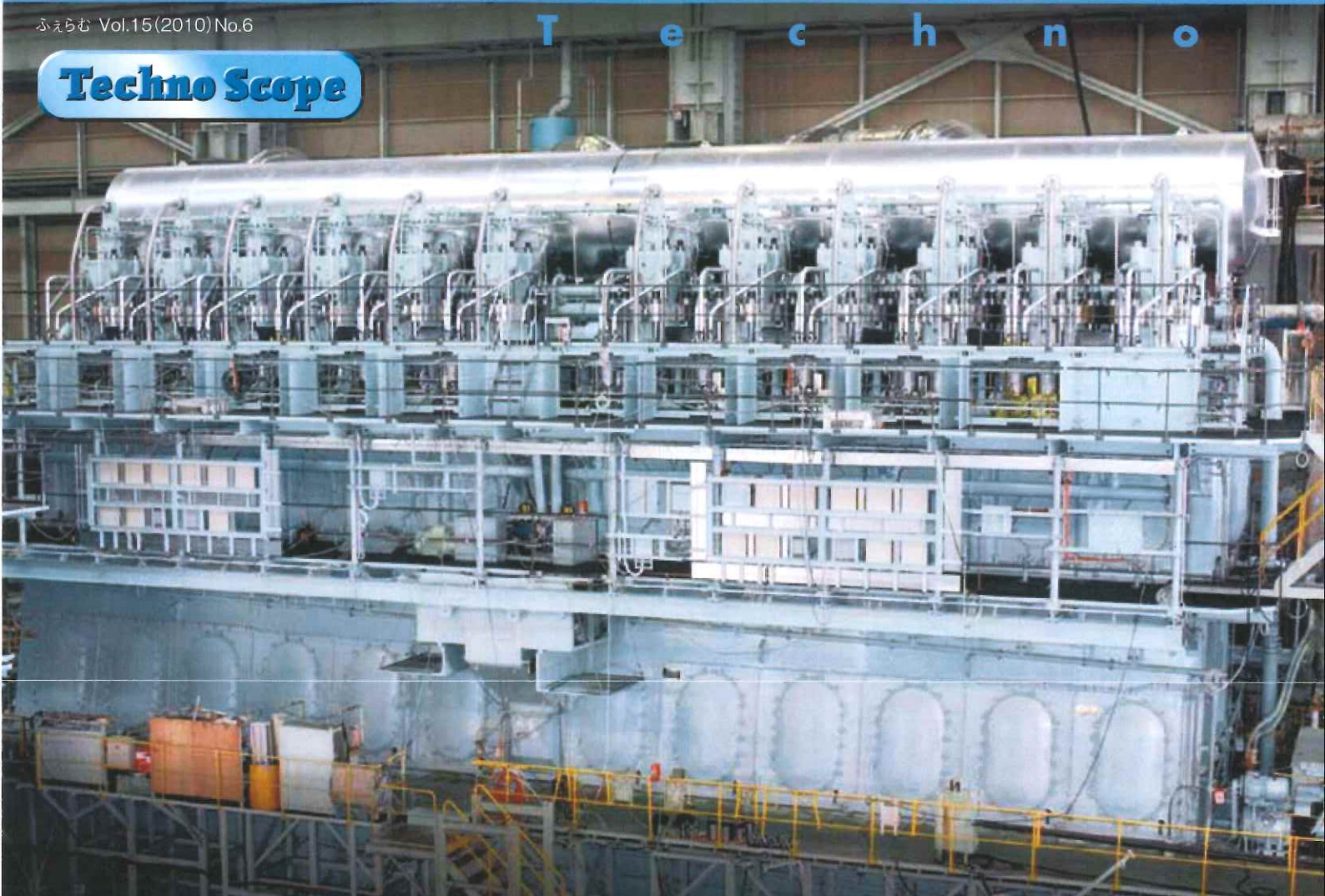




進化する船舶用ディーゼル機関

船舶の大型化に伴い、主機関として多く採用されているディーゼル機関の高出力化、省エネルギー化が進み、最近では環境技術の導入が進んでいる。大型船のディーゼル機関の重量は、大きいもので約2000トンにも及び、高強度の鍛鋼品や鋳鋼品が精密に組み立てられている。今回は大型船舶に使用されるディーゼル機関と部品を中心に紹介する。

世界最大級の馬力を誇る三井-MAN B&W 12K98ME型ディーゼル機関（型式名称の12は気筒数、98はボア寸法をcmで表す）出力93,360馬力（68,640kw）、機関寸法：高さ15m、長さ27m、重量約2000t

多くの大型船舶に使われるディーゼル機関

島国日本では、歴史の中にさまざまな船が登場し、大きな役割を果たした。1853年、東京湾・浦賀沖に現れたのは黒船であった。煙を吐く蒸気船の姿は当時の日本人を驚かせ、時代が大きく動くきっかけとなった。明治維新後、政府は貿易の振興を図るため、国策事業として海運業と造船業を支援し、造船技術は大きな成長を遂げた。また戦後の高度経済成長期には造船業は日本のお家芸となり、世界にその名をとどろかせた

時は移り、リーマンショック以降停滞が続く世界経済の中にあっても、長期的に見れば世界の海上物流のニーズは今後も増加していくものと予想される。なかでも新興国の経済発展などを受け、コンテナ船やタンカーによる物流需要は、今後もいっそう高まることだろう。

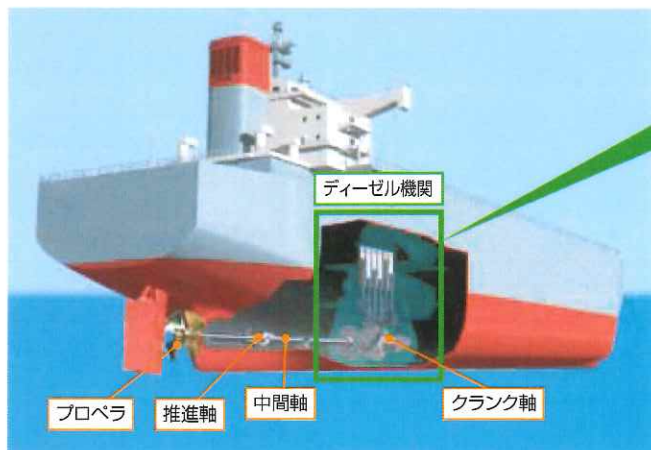
これらの大型船舶の推進機関の主流は、ディーゼル機関であ

る。推進機関の種類には、ディーゼル機関、蒸気タービン、ガスタービンや、電気や原子力などがある。ディーゼル機関は、1893年にドイツ人のルドルフ・ディーゼルによって完成されたもので、燃料をシリンダ内で燃焼爆発させてクランク軸を回転させる内燃機関であり、他の推進機関に比べ燃料の消費率が少なく効率がよい特徴がある。

1950年代ごろまでのディーゼル機関は、高品質重油が必要だったためあまり普及していなかった。第2次大戦後、C重油を予熱することで使用可能な低速ディーゼル機関が開発された。その後、ディーゼル機関の大型化が進み、1970年ごろから4万馬力を超えるような大出力のディーゼル機関が製造されるようになった。

現在の大型船といえば、VLCC (very large crude carrier) と呼ばれる大型オイルタンカーやコンテナ船などが代表的だが、そのほとんどがディーゼル機関を採用している。

■大型船舶に搭載されるディーゼル機関の位置



■低速で力強く推進する2ストローク機関

船舶のディーゼル機関は、大きく分けて低速（毎分50～300回転程度）、中速（毎分300～1000回転程度）、高速（毎分1000回転以上）に分類される。船舶でも、自動車のディーゼルエンジンと同様に吸気、圧縮、燃焼、排気のサイクルで動力を得る。

大型船舶では、低速で回転する2ストロークのディーゼル機関が主に使われる。2ストローク機関では、ピストンの1往復の間に1回爆発する。巨大なシリンダが複数あり、大きな翼面を持つプロペラを低速で回転し、エネルギー効率がよく、さらに強力な過給機*と組み合わせることで熱効率は50%を超えるといわれる。また、ピストンの上下運動がクランク軸の回転運動へ変換され、そのままプロペラへ直結し、減速歯車が不要なため、重量、保守、騒音振動などの面で有利である。

2ストローク機関に対し、2往復の間に1回爆発する4ストローク機関がある。比較的小型の船舶（高速艇、プレジャーボート、漁船など）では、自動車と同様、軽油を燃料とした4ストロークの高速ディーゼル機関が使用される。

■高出力化、排出ガス規制のニーズに対応

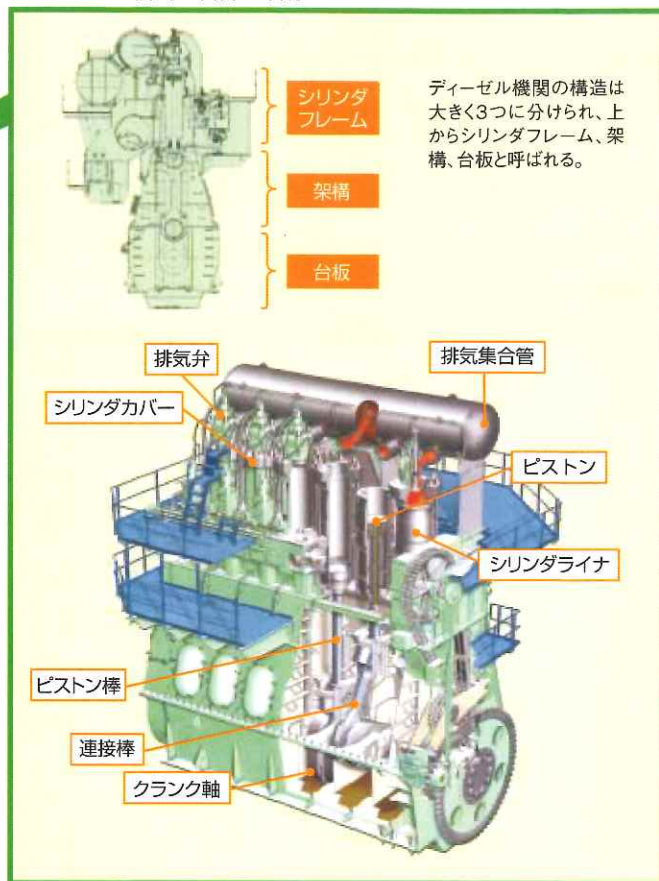
船に搭載されるエンジンの出力（サイズ）は、その船に求められる最高速度により決まり、船の中でもコンテナ船は高速性が最も要求されるため、大きいエンジンを搭載することになる。

現在製造されている低速ディーゼル機関のボア（シリンダ内径）は26～98cm程度であり、大型コンテナ船には98cmボアの大機関がよく用いられている。

コンテナ船やタンカーは、高い経済性が要求されるため、外海に出ると、輸送時間短縮をめざし能力いっぱいの速度を出して運転することも多いという。しかも、長い航海の間、時には2週間

* 過給機 シリンダからの排出ガスのエネルギーを使って、新たな空気をシリンダ内に加圧して送り込む送風機である。過給機の原動力は、ディーゼル機関の排ガスエネルギーを利用して、タービン構造の回転機を回すことによって得られる。

■ディーゼル機関の各部の名称



■最近の大型船舶用ディーゼル機関の例

大型コンテナ船用次世代型主機関として開発された「三井-MAN B&W 12K98ME機関」は、世界最大級の電子制御船舶用ディーゼル機関である（三井造船が、ライセンスであるMAN DIESEL社との技術提携のもとに製造・販売、2ページ写真参照）。すでに2006年に1番機を搭載したコンテナ船が就航した。

大きな特徴として、従来のカム軸をなくして燃料噴射・排気カムタイミング・シリンダ注油を電子制御によって行っていることが挙げられる。これにより、燃料油やシリンダ油の消費量低減が図れ、排気ガスに含まれるNOxやばい煙の削減が可能である。また、従来より最低回転数を下げて運転することができ、狭い水道や港湾内航行などにおける操船性が向上した。

この船に搭載された電子制御機関は「ME機関」と呼ばれ、燃料噴射と排気弁駆動に油圧サーボシステムを採用し、これらの油圧アクチュエータが電子制御される。



世界最大級のディーゼル機関を搭載した大型コンテナ船

■ディーゼル機関の製造工程



架構や台板の溶接工程。曲げやよじれに強い構造ができあがっていく。



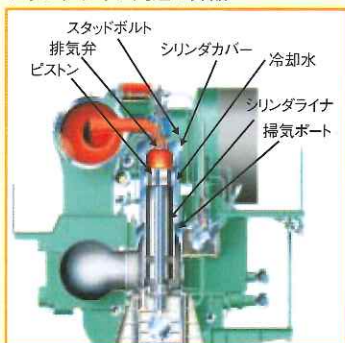
機械加工では、大型部品にもかかわらず高い寸法精度が求められる。

■高い要求特性に応えるシリンダライナ



シリンダライナは、シリンダカバーとフレームに挟まれるようにボルトで固定され、ライナ下部は自由に熱膨張できるようになっている。ライナ内面はピストンと摺動するため、コルゲート加工およびホーニング加工により、周方向に非常に浅い溝が作られ、保油性が高められている。材料にはねずみ鋳鉄（片状黒鉛鋳鉄）が使われる。

シリンダライナ周辺の部品



内面のホーニング加工のようす



ねずみ鋳造（片状黒鉛鋳鉄）の組織 (×200)



従来の鋳鉄製シリンダフレームに比べ大きな軽量化が図れる、厚鋼板による溶接型シリンダフレーム。従来に比べボルト結合点数が削減されるため、シンプルでコンパクトな構造となり、約30%の軽量化が見込めるという。

が、これまでもディーゼル機関は大きく進歩してきており、これ以上の大幅な効率向上は難しいと言われている。そのため、排気エネルギーをパワータービンで回収するシステムの導入などが検討されている。このように、電子制御機関や電力回収システムの適用により、ディーゼル機関の総合的な熱効率向上が図れるものと期待されている。

ディーゼル機関の主な部品と鉄鋼材料

ディーゼル機関の各部は、大きく3つに分けて上からシリンダフレーム、架構、台板と呼ばれる各ブロックから構成される。どのブロックにも大量の鉄鋼材料が使用されており、各部品への高い要求特性に応じて、各種の材料が使い分けられている。使用される部品と材料の例を以下に紹介する。

最も上部にあるのがシリンダフレームであり、巨大なシリンダが数多く設置され、ピストンが組み込まれている。ピストンの上下動により、空気を吸入、圧縮し、圧縮熱によって燃料の着火点以上の温度になると、高圧の燃料を噴射すると、燃料は着火して爆発し、その圧力でピストンを押し下げて動力を得る。

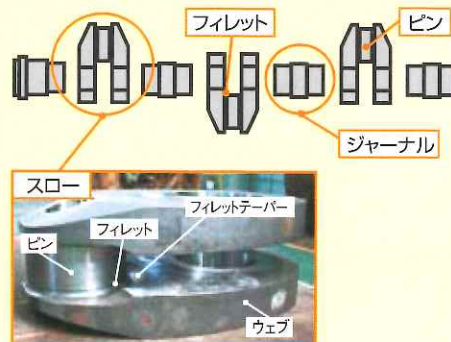
シリンダやピストン周辺の部品には、運転時の高温に耐えられるような強度や、摺動部品としての耐摩耗性、軽量化などが求められる。このような部品には、Cr-Mo鍛鋼品、鋳鋼品、ねずみ鋳鉄（片状黒鉛鋳鉄）などが使われている。

も港によらずに航行し続けることもある。こういった過酷な条件の下では、信頼性確保が大変重要である。

最近のディーゼル機関では、原油価格の高騰や環境規制の強化に伴い、燃料油や潤滑油の消費量削減や排ガス対策実施のために、船舶の運航状態に対して最適運転が可能な電子制御機関の導入が進んでいる。

今後も高出力化や排出ガス削減のニーズは高まると思われる

■クランク軸と各部位の名称



■クランク軸の製造工程



材料の高清浄度を確保する製鋼工程(左)。クランク軸材料を製造する8,000tプレスでは、約300tの大型鍛鋼品を作っている(右)。



クランク軸の切削は、組立て後に回転しながら行う。自重による変形などを折り込み、仕上りサイズを想定して作業を進める。



切削後のスローは超音波探傷装置で自動検査される。

シリンダ(気筒)は高温にさらされる部分であり、高い耐熱性が要求される。このうちシリンダカバーには、内部に冷却水が循環するための冷却水通路を設ける必要があり、鍛鋼品が使われる。シリンダライナは、高い強度および耐摩耗性がバランスよく両立されていることが求められる。材料にはボロンを添加した片状黒鉛鉄が使われ、シリンダ径の内面に高精度加工(ホーニング加工など)が施される。また、シリンダライナ摺動面は、燃料の重油に含まれる硫黄分により腐食しやすく、これを防ぐためシリンダライナの温度は硫酸露点より高く保たれている。

ピストンリングには、耐熱性ととも高い耐摩耗性、耐焼き付き性が必要となり、最近の高出力化によりこの傾向は顕著である。そこで、球状黒鉛鉄やCV(Compacted-Vermicular)黒鉛鉄などの本体に、耐摩耗性溶射皮膜を適用することにより耐久性の向上が図られている。

ピストンの動きを伝えるピストン棒には鍛鋼品が用いられ、浸炭焼

き入れまたはイオン窒化などが適用され、表面が硬化されている。

シリンダフレームの下には、架構、台板と呼ばれるブロックがある。ピストン棒および接続棒には、強度に優れた鍛鋼品が用いられる。接続棒は、台板の内部でクランク軸へとつながり、ピストンの上下運動がクランク軸を回転させる。

ディーゼル機関の高出力化に伴い、シリンダなどの部品は大型化、重量化し、ディーゼル機関の構造全体には疲労、振動、変形等の問題が発生する。そこで架構や台板(厚鋼板などで構成される)の構造や形状を工夫し、剛性の向上が図られている。

大きさと精密さを併せ持つクランク軸

ディーゼル機関の中でも、下部に設置されているクランク軸は、ピストンの上下運動を接続棒を介して回転運動に変換する重要な部品である。

クランク軸は、製造方法によって「組立型」と「一体型」に大別される。一般に組立型は、低速2ストローク機関に使用され、一体型は4ストローク機関に使用される。製造方法でみると、組立型では、ジャーナル(回転軸)とスロー(コの字型)をそれぞれ製作し、これを焼き嵌めにより組み立てていく。

焼き嵌めでは、それぞれのパーツを1つずつ積み重ね、約400℃に加熱してから嵌め込む。組立だけでも数時間以上かかる場合もある。スローには鍛鋼品または鋳鋼品、ジャーナルは鍛鋼品が使われる。一体型は、バー材から特殊鍛造によって成形される。

大型船舶に使用される組立型クランク軸は、大きいものでは長さ24m、重さ380tにもなる。低速機関とはいっても、運転時には1分間に約100回転するため、クランク軸はどうしてもたわみやすい。クランク軸は回転の中心となるため、真直度が高く、軸中心の振れを最小に抑えることが必要である。そのため、表面の切削加工にはきわめて高い精度が要求される。ピンおよびフィレット部は連接棒のすべり軸受けと接する箇所、曲げ応力やねじり応力が繰り返し作用するため、とくに高い疲労強度が求められる。また表面粗さは最小に抑えられる。実際、クランク軸の切削寸法は100分の1mm単位の誤差しか許されない。300t以上という大型の製品でありながら、同時に精密機械のような寸法精度が求められるのである。

クランク軸の材料では、高い疲労強度が求められる。そのためクランク軸材料では、不純物元素を低減し清浄化することが極めて重要である。材料の製鋼プロセスでは、取鍋精錬や真空脱ガスなどの工程により、りん、硫黄などの低減や、鋳込み時の温度



中型船舶向けの一体型クランク軸は特殊鍛造により作られる。材料は、以前は450MPa級炭素鋼などが多かったが、最近は低合金鋼の比率が高まっている。また950MPa級の高強度材料の使用が進んでいる。疲労強度向上のため高周波焼入れ、窒化、ショットピーニングなどが適用されることがある。

制御などが適用されている。

最近では船舶の大型化、カーゴスペース拡大に対応して機関のコンパクト化ニーズが高まっている。それに伴い、クランク軸には、いっそうの高強度化が求められている。すでに一体型クランク軸の一部では、引張強さ950MPaという高強度材が使用された例もある。高強度化と同時に、信頼性向上へのニーズは今後ますます高まると思われる。クランク軸は、機械加工の後に寸法検査や非破壊検査が行われるが、今後さらに非破壊検査基準などの品質管理の重要度が高まって来ることが予想される。

環境技術の優位性で世界をリードする

国際的な海上輸送から排出されるCO₂は、世界全体のCO₂排出量の約3%に相当すると言われる。今後世界の海上物流ニーズが増加すれば、さらにCO₂排出量も増大する傾向にある。

ディーゼル機関の排出ガス規制については、国際海事機関IMOにおいて議論され、世界共通ルールとして実施されており、すでに次期規制の枠組みが承認されている(第58回海洋環境保護委員会MEPC58による)。すでに日本の造船業界では、産学官連携の下、技術的優位性を生かしNO_x削減技術の開発を進める戦略をとっている。

ディーゼル機関には排ガス処理、クリーンエネルギー燃料の使用、高効率化、省エネ化などがさらに求められることだろう。海運・造船は国際的産業であり、国際競争力を維持しなければならない宿命を背負っている。将来を見据えた技術の優位性を生かし、日本は高品質で環境技術にすぐれた船舶を提供することにより、今後も確固たる地位を守ってほしいものである。



ディーゼル機関は、搭載される船の種類や最高速度によって仕様が決まる。現在は、シリンダボア50cm程度の中型エンジンの需要が高まっている。組立工場では、生産性の高いラインを整備し、高い信頼性とコストダウンを両立している。

●取材協力 三井造船(株)、(株)神戸製鋼所
●文 杉山 香里