

三菱 UE 大形 2 サイクルディーゼル機関新シリーズの開発

Development of New Series in Mitsubishi UE Large Bore 2-Cycle Diesel Engines

神戸造船所 長谷川佳昭^{*1} 岡部雅彦^{*2}

阪口勝彦^{*3}

技術本部 児玉敏雄^{*4}

MHIディーゼルスサービス株式会社 山田知夫^{*5}

現在主流の三菱 UEC-LSII 形機関は 1998 年にシリーズ化を完了し、国内外の主に船用主機関として現在までに 200 台超が就航しており、その良好な就航実績より国内外の顧客から高い評価を得ている。一方継続的な市場ニーズである高出力化や近年の環境規制にこたえるため、現在新たなシリーズとして LSE (E=Economy, Easy operation & maintenance, Environmentally friendly) 形の開発を順次行っている。本機関は LSII 形の同クラス機関に比べて出力率を 15% 増加する一方で燃料消費率を低く抑え、LSII 形機関同様、他ブランド機関との差別化を図っている。LSE 形の開発には、当社が長年蓄積してきたディーゼル機関開発技術と最新の CAE 開発ツールを駆使し、性能・信頼性の課題を克服した。また環境対応では当社独自の水噴射システムも装備可能とし、さらに周辺技術として、トラブルの未然防止と計画的な保守を可能とする、IT 技術を活用した機関診断システムも開発した。

The series of Mitsubishi UEC-LSII engines was completed in 1998. Over 200 engines of this series are in service, mainly as main propulsion engines of the vessels for domestic and foreign operators, and their satisfactory results have been well accepted by those clients. Meantime, we are now developing the new series of LSE (E = Economy, Easy operation & maintenance, Environmentally friendly) type engines, in order to meet the continuous demand for higher power and emission regulations. LSE engines have 15% higher power ratio than the equivalent engines LSII type, while staying at the specific fuel consumption lower than the competitors' engines, as was the case for LSII engines, which is one of the advantages of UE engines. For the development of LSE engines, we are utilizing our competent know-how accumulated during long years diesel engine development history, and the latest CAE simulation tool. This process made it possible to overcome the high hurdle of keeping its performance and reliability. For the future emission regulation, our water injection system is available and engine performance diagnosis system has been recently developed.

1. ま え が き

当社では、1955 年以来 UE 形機関を自社開発・製造しており、現在大形低速ディーゼル機関の市場に残っている 3 ブランドのうちの一つ（他の 2 つは欧州のブランド）として、顧客から高い評価を得ている。

当社では現在、今後の船舶の需要動向や環境対応等の社会的ニーズに対応できる、より高出力・高経済性機関のシリーズとして、UEC-LSII 形機関の良好な就航実績を基本コンセプトとした UEC-LSE 形機関 (E=Economy, Easy operation & maintenance, Environmentally friendly) の開発・シリーズ化を進めており、その最初の機種である UEC52LSE 形機関は当社のライセンサーにて各種の確認・検証試験を経て、本年 4 月に出荷した。

本報では、他社同クラス機関の中で最高の熱効率を実現している UE 形ディーゼル機関の概要と最新シリーズ機種である UEC-LSE 形機関の開発について述べる。

2. UE 形ディーゼル機関の概要と就航実績

図 1 に UE 形機関の出力範囲を示す⁽¹⁾。現在主流の UEC-LSII 形機関の初号機は 1987 年に完成し、その後各種シリンダ

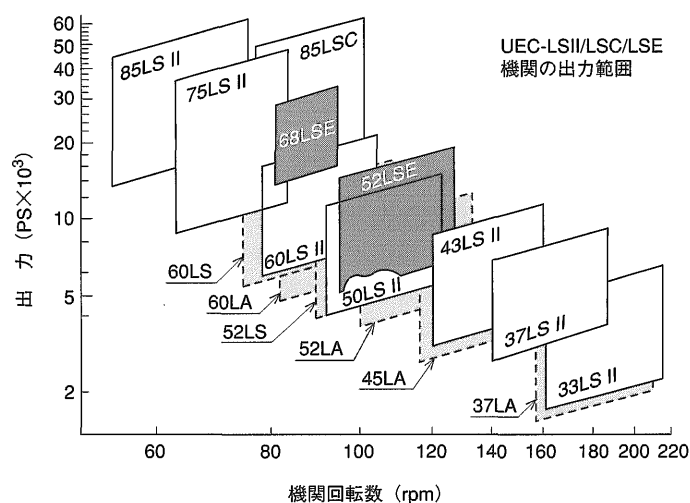


図 1 UE 機関の最新シリーズラインアップ UE 機関は主に船用主機関として 1 120 kW から 46 800 kW までの幅広い製品ラインを持つ。
Output range of UEC-LSII/LSC/LSE engines

ボアサイズをそろえ、最新の UEC-LSE 形機関を含めラインアップは 33LSII から 85LSII まで 10 機種、1 120 kW ~ 46 800 kW までの出力範囲をカバーし、内航船からケープサイ

*1 ディーゼル部サービス技術課主席

*4 高砂研究所燃焼・伝熱研究室長

*2 ディーゼル部UE設計課長

*5 神戸支社専任部長

*3 ディーゼル部UE設計課主席

表 1 UEC 形機関主要目
Principle particular of UEC type engine

形 式	UEC 50LS II	UEC 52LSE	UEC 60LS II	UEC 68LSE	UEC 75LS II	UEC 85LS II	UEC 85LSC
シリンダ数	4~9	4~8	4~8	5~8	4~10,12	5~10,12	5~10,12
シリンダ径 (mm)	500	520	600	680	750	850	850
ピストン行程 (mm)	1 950	2 000	2 300	2 690	2 800	3 150	2 360
行程/口径比	3.90	3.85	3.83	3.96	3.73	3.71	2.78
シリンダ当り出力 (kW/cyl.) [PS/cyl.]	1 445 [1 965]	1 705 [2 320]	2 040 [2 780]	2 940 [4 000]	2 940 [4 000]	3 860 [5 250]	3 900 [5 300]
エンジン回転数 (rpm)	127	127	105	95	84	76	102
正味平均有効圧 (BMEP) (bar)	17.8	19.0	17.9	19.0	17.0	17.1	17.1
平均ピストン速度 (m/s)	8.26	8.47	8.05	8.52	7.84	7.98	8.02
燃料消費率 (g/kWh) SFOC (P1) [g/PSH]	167 [124]	167 [123]	167 [123]	165 [121]	165 [121]	163 [120]	165 [121]

ズバルカー・コンテナ船・VLCC 等の大型船までのあらゆる船種に対応できるようになっている。

表 1 に UE 形ディーゼル機関の現在の主流シリーズである中型～大型 LSII 形機関と現在シリーズ化を進めている最新形 LSE 形機関の主要目を示す。主要目での特徴は、燃料消費率がそれぞれの他社同クラスの機関と比べ 3～4 g/kWh 少ないことと、コンパクト・軽量となっていることである⁽²⁾。

UEC-LSII 形機関は現在までに 200 台以上が就航し最長運転時間は約 10 万時間に達しており、就航各船で順調に稼働している。特に過酷な条件にさらされる燃焼室の強度に関する信頼性やシリンダライナ・ピストンリングの摩耗率、さらに最近のロングストローク機関での課題の一つである主軸受の信頼性については、各顧客から高い評価を頂いており、経済性・信頼性の高い機関である。

図 2 に UEC-LSII 形機関のシリンダライナ・ピストンリングの良好な摩耗実績例を示す。

3. 最新シリーズ機種 UEC-LSE 形機関の開発

3.1 設計コンセプト

UEC-LSE 形機関は正味平均有効圧 (P_{me}) を 19.0 bar、平均ピストン速度 (C_m) を 8.5 m/s とし、UEC-LSII 形機関に比べ、それぞれ約 6% 増大させた高出力機関である。また筒内最高圧力 (P_{max}) を 10% 増加させ 150 bar とし、従来からの UE 形機関の特徴である高熱効率設計を踏襲することにより、高出力化したにもかかわらず燃料消費率は UEC-LSII 形機関と同一とした結果、他社同クラス機関より 3～4 g/kWh 低いレベルの高経済性機関となっている。

シリンダライナ・ピストンリングの設計は、良好な実績が得られている UEC-LSII 形機関での経験を盛込んだ設計とし、それぞれの低摩耗率を狙っている。

開発に際しては、技術本部（研究所）、設計、アフタサービス部門で蓄積している開発技術力・知見を最大限生かし、高い開発目標での信頼性確保の検証を行った。また、船主・造船所双方にとっての経済性を追求した。さらに近年国際的に議論され法制化されつつある排気ガス規制に対応して、NOx

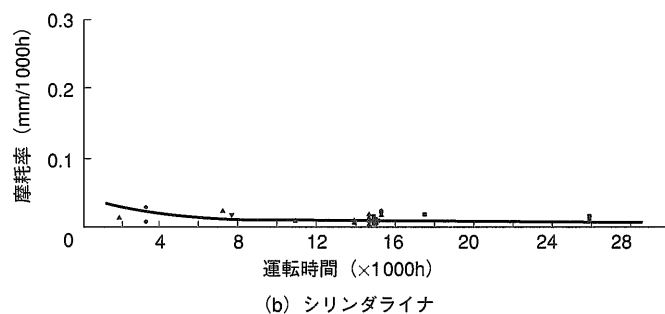
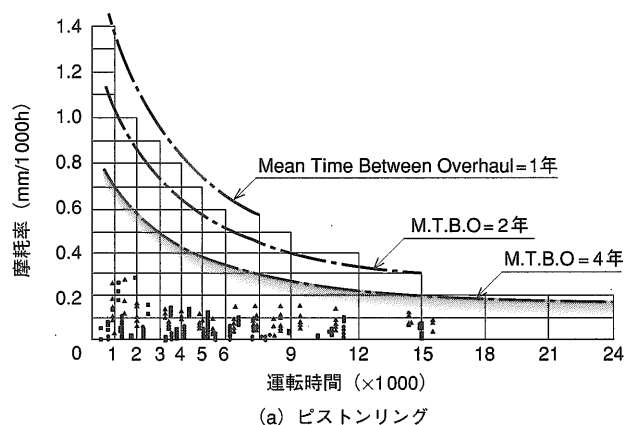


図 2 UEC-LSII 形機関のピストンリングとシリンダライナ摩耗実績
UEC-LSII 形機関の就航後のピストンリングとシリンダライナの摩耗状況を示す
Service result of piston ring and cylinder liner wear of UEC-LSII type engine

排出レベルを標準条件より 50% 程度低減できる当社独自の水噴射装置の装備を可能（オプション）とした、環境に優しい機関でもある。

3.2 信頼性・性能

UE 形機関のような大形機関の開発設計では、試験機関での長時間の性能試験や限界試験が実施しにくいいため、高性能・高信頼性設計を実現するためには、事前検証として精度の高いシミュレーション計算ツールが必要不可欠である。

同機関開発では、社内各製品を支援している技術本部（研

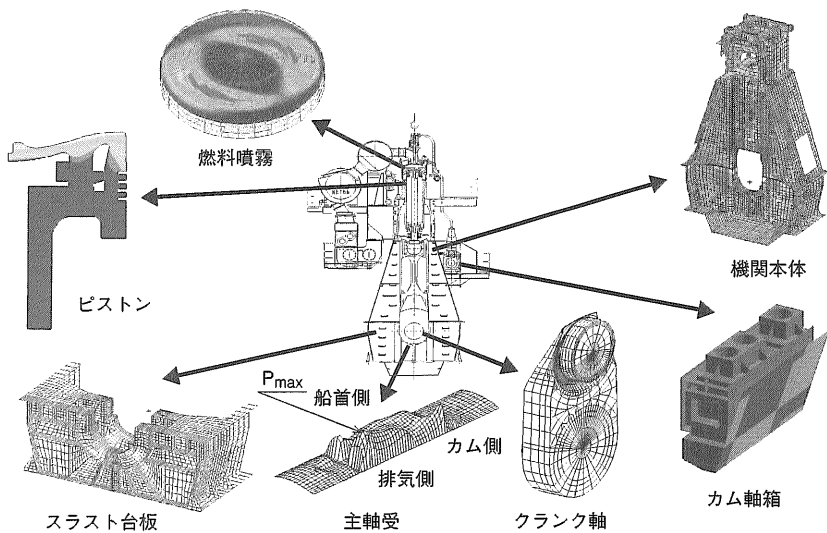


図3 UEC機関開発時におけるCAE適用 UEC機関の開発時にはFEM, CFDを主としたCAE技術を駆使して信頼性の向上を図っている。
CAE application for UEC engine design

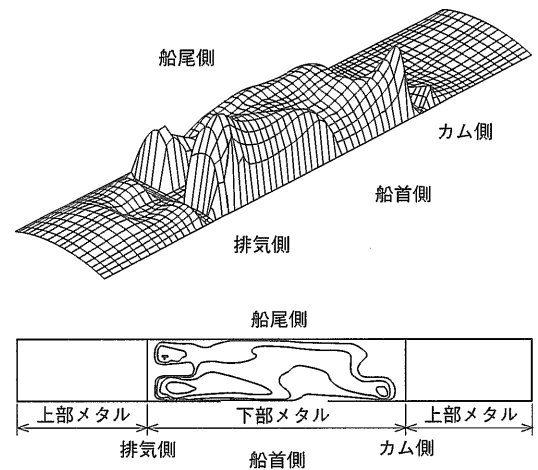


図4 主軸受EHD解析 UEC機関の信頼性評価のためには独自技術であるEHD手法を用い、主軸受の油膜厚さ、油膜圧力まで解析評価している。
EHD (Elasto Hydro Dynamic) analysis

究所)の最新技術や最新のCAE(Computer Aided Engineering)を駆使して事前検証を行っている。同機関開発に使用したシミュレーション計算ツールはどれも世界最先端のものであり、特に軸受油膜圧力計算ツールは競合他社にはない高精度のツールである⁽³⁾。

最新シリーズ機種であるUEC-LSE形機関は、従来機関に対し前述のように高出力化しているため、燃焼室周りの熱負荷が厳しくなるばかりではなく機関本体及び主要運動部の動的荷重も増加している。

これらの課題を克服し機関の最適設計を行うため、当社技術本部内関連研究室と一体で、非定常流動解析等のシミュレータを駆使した開発を行った。その適用例を図3に示す。

3.2.1 燃焼室

燃焼室構成部品に関し、実績のない領域での信頼性評価を行うためには、シミュレータの精度を高める必要があり、以下の手順で評価・設計を行った。

- (1) P_{me} 17~18 barのUEC-LSII形機関での温度計測とシミュレーション計算による熱負荷の逆解析評価。
- (2) UEC-LSII形機関での高 P_{me} 試験($P_{me}=19$ bar相当)及び当社長崎研究所の試験機関での高 P_{me} 試験($P_{me}=21$ bar相当)を実施し、実機での熱負荷の評価。
- (3) 高 P_{me} 機関燃焼室部品について、前記(1)及び(2)の試験結果に基づくFEM計算により設計を最適化。

その結果、 P_{me} が19 barに増加した場合の燃焼室熱負荷を推定し、最高温度を許容値以下とし、安全率を従来機種並みのレベルに抑える形状・冷却方法の最適設計を行った。

3.2.2 本体

P_{me} 、 P_{max} を増加させたことにより機関本体構造への荷重条件が厳しくなっており、十分な安全率を確保した最適設計を行うため、1.5シリンダソリッドモデルでの三次元FEM計算を実施した。筒内最高圧力、最大サイドスラスト力、タイロッド締付力及び運動部慣性力等の主要荷重条件での各部の応力変形を評価し、従来機関並みの応力レベル・変形量に抑え

ることができた。

3.2.3 主軸受

主軸受評価には世界最先端で他社にはない高精度のEHD(Elasto Hydro Dynamic)シミュレーション計算(国際的な会議・学会でも関連論文を发表済)での評価を行い、形状・クリアランスの最適設計を行い従来機種同様ホワイトメタルで十分な信頼性が得られることを確認した。本計算には、機関全体の三次元FEM剛性計算結果と機関全体をモデルとした慣性力・燃焼圧力による力をも考慮している。

図4にEHDによる主軸受の油膜圧力分布計算結果例(円筒状の上下軸受を上部中央で切って展開した図)を示す。

4. 環境対応・IT活用

4.1 NOx低減技術

当社では、近年の世界的ニーズである環境(排気ガス規制)対応技術の研究開発を行ってきている。UEC形機関はLSE形を含め、現状のIMO NOx規制に対し、燃料噴射タイミングの遅延、低NOx燃料弁等の機関最適チューニングで対応可能となっている。

IMOのNOx規制値は5年ごとに見直されることになっており、現状より厳しい規制値になっていくことが予想されているが、当社では予想される次期規制値レベルに対応できるNOx低減技術として、図5に示す“水・燃料層状噴射システム”を開発・実用化している。

本システムを装備すると、図6に示すように、わずかな燃料消費率悪化でNOxを無対策状態から約50%低減させることが可能となる。

UEC-LSE形機関では本システムをオプションとして装備可能な設計としている。

4.2 IT(Information Technology)活用による機関診断システム

IT活用は時代のニーズであり、船の世界でもIT活用の環境は整ってきている。

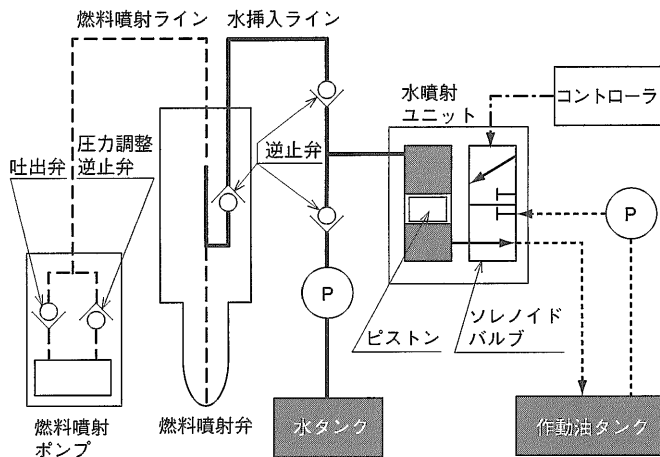


図5 MHI 層状水噴射システムの概要 水を筒内に噴射する技術としてMHI 層状水噴射システムがある。これは既存の燃料噴射弁から水と燃料を交互に噴射することで高いNOx 低減率を実現した。
Outline of stratified fuel/water injection system

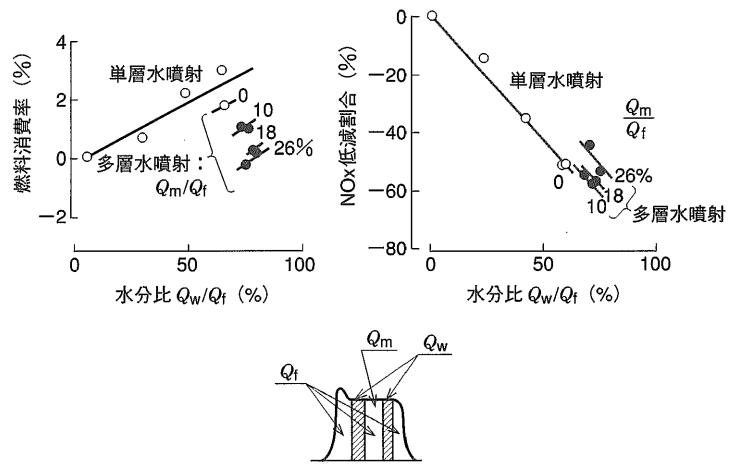


図6 MHI 層状水噴射システムによるNOx 低減率 MHI 層状水噴射システムの場合、燃費を維持して高いNOx 低減率を得ることが可能となる。
Test result of stratified fuel/water injection system

当社では、機関性能の診断機能と部品管理機能を持った機関診断システムを開発した。

本システムは図7に示すように、本船からの機関性能と主要部品保守情報を海事衛星（インマルサット）・インターネットを中継して当社及び当該船運航管理会社へ送信し、そのデータに基づき当社にて機関・部品診断を行う。

機関性能診断機能では機関の主要性能データに基づき、最適運転状態を維持するためのアドバイス、トラブルの事前防止、万が一トラブルが起きた場合の早期対応が可能になる。診断に必要な機関の性能データは、新たなセンサを装備することなく、現状船で計測・記録されているデータを、ソフトと一部部品を装備することで、診断に必要なデータを取捨選択・整理することで対応可能としている。

部品管理機能では、主要部品の経年変化の状況、保守・補修状況の情報を管理することにより部品の寿命予測を行い、当該船運航管理会社への計画的なメンテナンス・部品の補充（予算化）のための情報を提供することができる。

本システムを活用することにより、船の乗組員・船舶運航管理会社・当社間の情報の共有化が可能となり、顧客の運航管理費軽減及び当社の顧客支援業務の向上に役立つものと考えている。

5. む す び

低燃費と信頼性を特徴とするUEC形ディーゼル機関の概要と最新シリーズ機種であるUEC-LSE形機関の開発及び時代のニーズに対応した周辺技術について述べた。

就航船での主機関は、船の安全で計画的な運転に支障を来たさないような信頼性・経済性が要求される。これからも当社の高い技術力を生かし、顧客の満足度をより高くするため

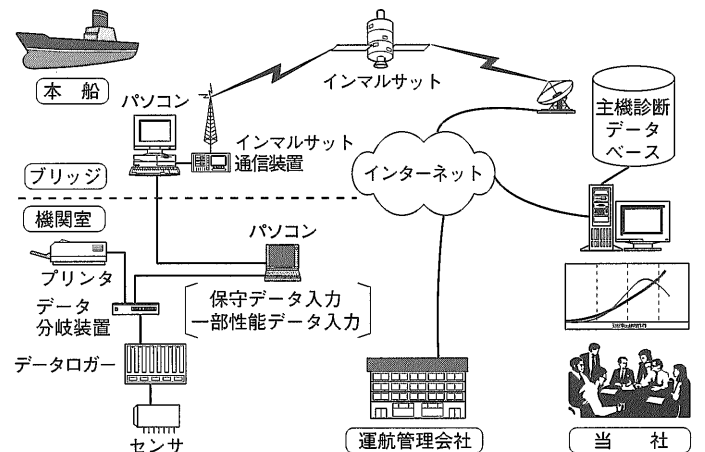


図7 IT活用による機関診断システム 本船からインマルサット・インターネットを中継して当社へ送信された機関性能データと部品保守データに基づく機関・部品診断を行う。
Engine performance and main parts diagnosis system utilizing information technology

に、現状の機関に対しても更に信頼性・経済性を高めていく努力を続けていくとともに、将来のニーズを先取りした機関・周辺技術の開発を行っていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 小野ほか、UEC52LSE形高出力ディーゼル機関の開発、三菱重工技報 Vol.37 No.1 (2000-1)
- (2) Sakaguchi, K., The Mitsubishi UEC-LSII/LSE Engine Development Program, ISME Tokyo 2000 (Oct. 2000)
- (3) Yoshihara, S., Slow speed diesel engine development, Ship Propulsion Systems International Multi-Stream Conference (Lloyd's List event) (Dec. 2000)