

新型高性能三菱ディーゼル S12H 型機関の開発

Development of Mitsubishi S12H High-Performance Diesel Engine

相模原製作所 江頭 英 則^{*1} 川 嶋 基^{*2}
市 原 実^{*2} 金 子 高^{*3}
技 術 本 部 中 川 洋^{*4}

発電機用途を主な向先とするディーゼル機関で、三菱ディーゼルは高性能と高信頼性で好評を博してきた。今回、北米輸出向けを主とする発電機スタンバイ出力 60 Hz 1 000 kW 並びに発展途上国で需要の多いプライム出力 50 Hz 800 kW を主要な対象として、今後のモデル機種となる高出力、高性能の V12 型機関 S12H を開発した。本機関は平均有効圧力を増大させ、同一発電出力の従来機関より小型化を図り、噴射系では内製ユニットインジェクタを搭載した。種々の検討及び試験の結果、平均有効圧力 2.0 MPa にて、燃料 197 g/(kW・h) で NOx 840 ppm を達成した。また、各種耐久試験及び発電セット試験を行い、高い信頼性を確認した。

The Mitsubishi diesel engines have enjoyed a reputation for high performance and good reliability especially for generator applications. The high power, high performance V12 diesel engine S12H has been newly developed, and is used in generator sets with a stand-by output of 60 Hz 1 000 kW, and a prime output of 50 Hz 800 kW, for the North American and the Southeast Asia markets. The S12H is a trend-setting engine that employs mechanical unit injectors in the fuel injection system to make the engine compact, and features increased BMEP. Owing to various technical advancements, a specific fuel consumption of 197 g/(kW・h) and an NOx emission of 840 ppm have been achieved. Furthermore, overload endurance tests, low cyclic endurance tests, and generator set tests have been carried out to prove its high reliability.

1. ま え が き

さがみ中大型機関は発売以来、多用途なアプリケーションにおいてユーザから高い評価を得てきた。一方、近年市場ニーズの更なる多様化に加え、高出力及び低公害性に対する要求は急激に高まりつつある。さらに輸出の発電用が主要な市場である V 形機種では、為替レートの変動に対してもコスト競争力の強い機関が必要である。こうした状況に対して、従来機関の基本構造設計の延長では十分な対応が困難となっており、新型機関の開発に着手した。主要対象を 60 Hz、発電機スタンバイ出力 1 000 kW 及び

50 Hz プライム出力 800 kW としながらも、広範な使用用途にも対応可能なことを考慮し、軽量高出力で高性能をコンセプトとした。S12H は従来機種に対して燃料噴射系にはユニットインジェクタを採用して、一クラス小形の機関を高出力化する次世代の基本モデル機種として開発し、平成 8 年 12 月に販売を開始した。

本報では S12H の開発経緯並びにユニットインジェクタの微少噴射量制御の改善方法に対する検討及び流動解析による燃料室形状の最適化について述べる。

2. 主 要 諸 元

図 1 に S12H 型機関の外観及び表 1 に従来機種と比較した主要諸元を示す。本機関の特徴は、従来の同クラスの発電出力対応機関に対して噴射系を列形燃料噴射ポンプからユニットインジェクタ（以下、UI と称す）へ変更し、新機軸の構造を取入れ高出力化を図り、大幅な軽量小型化を達成した点である。ジャケット水給気冷却仕様で平均有効圧力 P_{me} を従来機種 1.7 MPa から 2.0 MPa へ高め一クラス小形の機関とし、機関重量は 4 700 kgf から

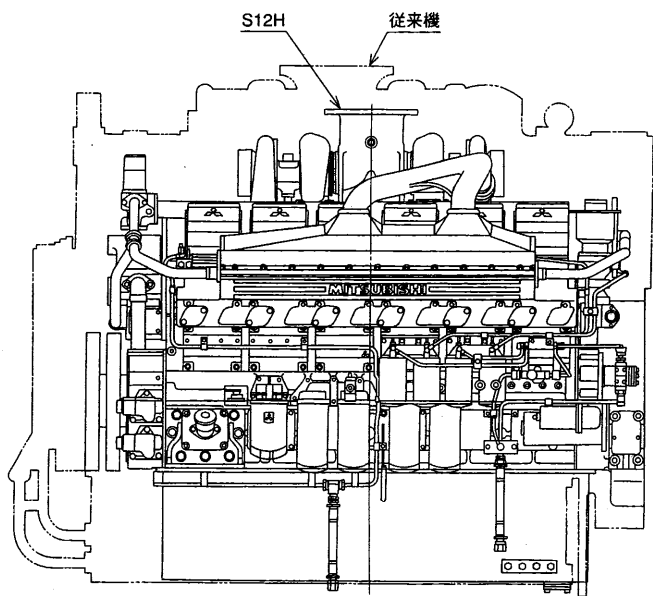


図 1 三菱 S12H 型機関外観 S12H 型機関及び同クラスの従来機の外観を示す。
General view of Mitsubishi S12H

表 1 三菱 S12H 型機関と主要諸元
Specifications of Mitsubishi S12H series engine

項 目	S12H	従来機
形 式	4 サイクル、エアークラ付き 水冷、排気タービン過給	
噴射型式	ユニットインジェクタ	列型ポンプ
シリンダ数-配列	12-60° V	
ボア×ストローク (mm)	150×175	160×180
総行程容積 (l)	37.1	43.4
平均有効圧力 (MPa)	1 800 min ⁻¹ : 2.0 1 500 min ⁻¹ : 2.2	1.7 1.9
占有容積 (m ³)	5.57	6.64
乾燥重量 (kgf)	3 800	4 700

*1 エンジン技術部主査

*2 エンジン技術部大型エンジン開発グループ

*3 エンジン技術部特殊エンジン設計課

*4 長崎研究所内燃機・油機研究推進室主管 工博

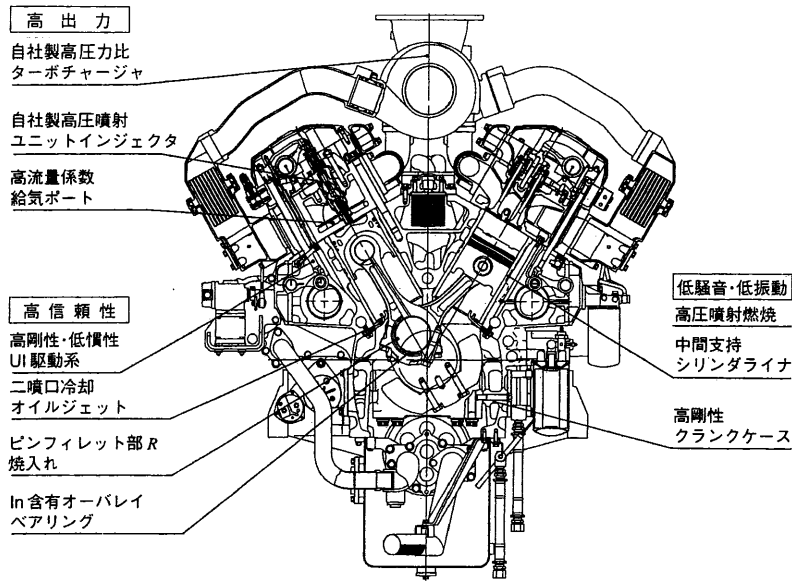


図2 S12H型機関の特徴と構造 高出力、高信頼性とするための主要構造を示す。
Cross section and features of S12H

3 800 kgfへ軽量化した。

また、発電機用途以外の向先に対しても十分に対応を可能とするため、調速用アクチュエータや始動方式並びに各種補助装置に豊富なオプションを設定した。

3. 構造の特徴と信頼性

3.1 主要構造

図2にS12H型機関の断面を示す。UIはシリンダヘッドの給・排気弁各2個とした4弁方式の中央に配置した。また、ヘッドボルトは同心円配置で締付けはトルクと角度法の二重管理とし、ガスシールの信頼性を高めた。図3にシリンダヘッドの断面概略及びポート形状並びにポート性能計測結果を示す。バルブはシリンダ中心に対し30°斜め配置とし給・排気はクロスフローで、特に給気は同クラスのエンジンにおいて初めてヘッド入口が2口の相互に完全に独立させたヘリカルポートを採用し、同一スワール比にて20%の流量係数の改善を達成した。また、燃焼室形状は流動解析(後述)を行い最適に設定した。UI挿入部は銅製チューブを拡管により装着し、ヘッド下面の水穴からの冷却水を強制的に中央部に集め、ノズル周囲の温度を低減させた。UIは、プランジ径14mmで150MPa以上の燃料噴射圧力に対応可能で、このクラス最高レベルの噴射性能を有する設計とした。

カム軸はUI及び給・排気弁駆動用兼用で剛性と駆動系の低慣性重量を考慮し、クランクケース内のヘッド近傍に配置するハイカムシャフトとした。また、カムプロファイル部には浸炭焼入れを実施し、ジャーナル部は大外径の100mmとすることでUIの高圧噴射に対しても十分な余裕を持たせた。

3.2 信頼性

UIの駆動系はカムフォロウ、プッシュロッド及びロッカアームから構成されるが、超高圧の燃料噴射の反力を受けるため、応力を低いレベルに抑ええることが必要である。しかし安易な補強は慣性重量の増加を招き、駆動系部品のジャンプを生じる。また剛性不足の場合には噴射圧力の低下及び噴射終了時の噴射圧反力の急激な低下によりジャンピングが発生する。このためFEMによる各部の強度・剛性検討並びにコンピュータによる振動解析を実施

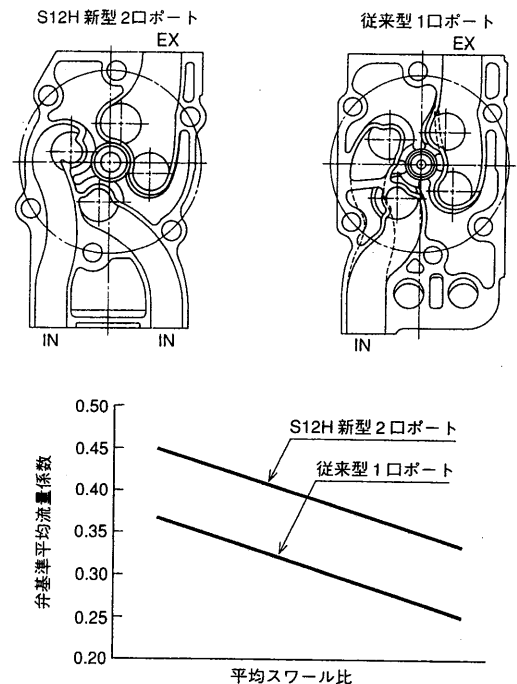


図3 シリンダヘッド断面及び性能計測結果 S12H 新型2口ポート断面と実測ポート性能を示す。
Cross section of cylinder head and inlet port performance

し、形状最適化を図った。図4にロッカアームの応力解析を示す。ロッカアームは形状の変更に加えて、座ぐりによる応力集中箇所を荷重条件が楽であるUI側に移設して高応力を回避した。

クランクシャフトは合金鋼の鍛造品で、ジャーナル部には高周波焼入れを施し、特にピンジャーナルはフィレットのR部にも焼入れを行い疲労強度の向上を図った。

メインベアリング及びコンロッドベアリングは三層メタルとし、オーバーレイ材料には、鉛-すず-銅-インジュウム系の採用でニッケルバリヤを廃止し、インジュウムをケルメット中に拡散させて耐腐食性と耐摩耗性を向上させ、オーバーレイ消滅後も高い耐焼付き性を確保した。

ピストンは冷却空洞付きアルミ合金の鋳造品で、冷却はクランクケースのオイルギャラリに装着された1シリンダ当り2対のオイルジェットからの噴油で冷却空洞及びピストン背面冷却を行い、従来の冷却空洞のみの場合に比べ、トップリング位置で30℃の温度の低減を可能とした。

4. 要素技術

4.1 燃料噴射系

各種の噴射系の中でも、UIは噴射管のないことに基づき種々のメリットを有し、高圧噴射性能を追求する上で有利な噴射系である。その一方で、ポンプ-ライン-ノズル噴射システム(以下、P-L-Nシステムと称す)に対して微量燃料メータリング特性悪化といったUI特有の技術課題がある。

図5に、回転数一定でインジェクタのラック位置を変化させた場合のメータリング特性を示す。噴射量が100mm³/ストローク以下のゾーンにおいて非常にシャープな噴射量変化特性となっている。このような微量域におけるUIのメータリング特性を解明するため噴射系シミュレータを用いて計算検討を実施した。本シミュレータでは燃料噴射を噴射管内の圧力波伝ばに基づく現象として捕え、噴射管内の一次元非定常流の式、吐出弁及び噴射弁の運動

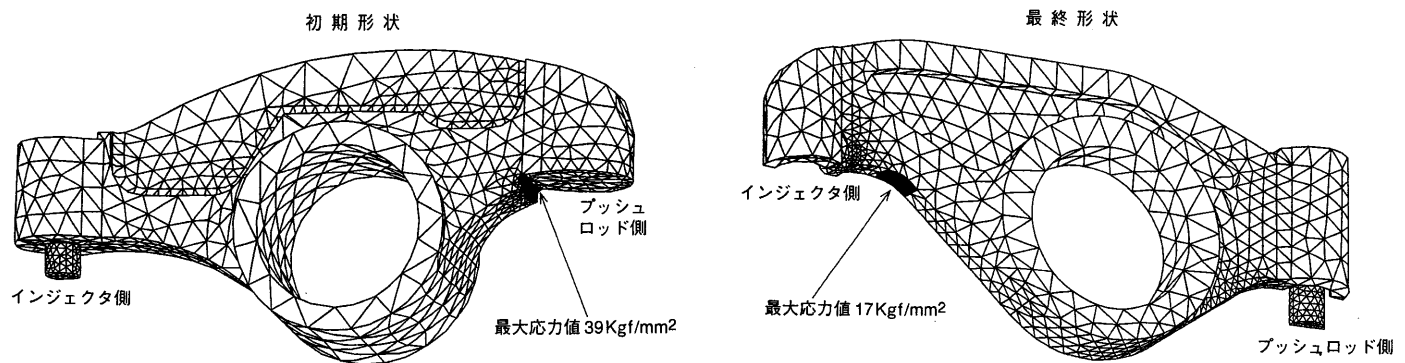


図4 ロッカーアーム応力分布 初期形状と最終形状の応力分布の比較を示す。
Stress distribution of rocker arm

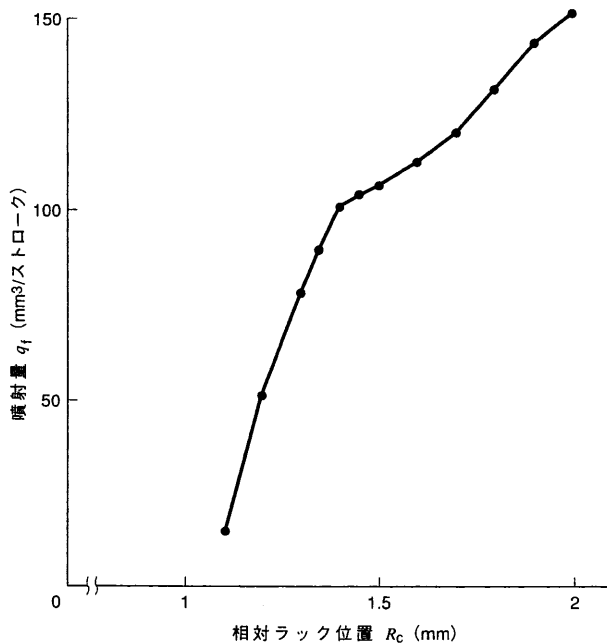


図5 UI噴射量特性(実測)
Delivery characteristics of unit injector (measured)

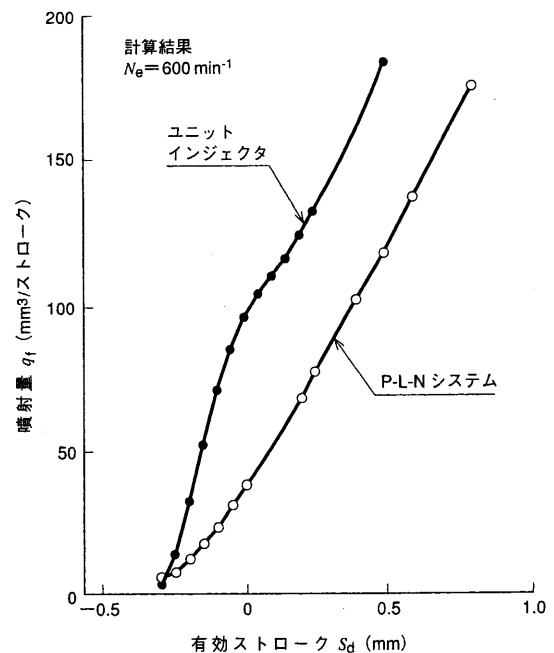


図6 メータリング特性の比較(計算値)
Comparison of delivery characteristics and velocity-pressure diagram (calculation)

方程式を連立させて解く手法を採った。図6に計算結果を示す。有効ストロークに対する噴射過程が両噴射系で大きく異なり、前述した実験結果を裏付ける特性が得られた。この場合の両噴射系の状態点(流速、圧力)に注目すると、UIでは油路長が短いので圧力波伝ば回数が増え、ノズル側の状態点の変化が速く、P-L-Nシステムに比べてノズル側流速が増大している。この結果、同一有効ストロークでUIの噴射量が増大するものと考え、このため改善手法としてはノズル側境界条件変更が有効と考え、ノズル開弁圧低下及びノズル針弁リフト減少(すなわち、リフト制限)の2項目についてシミュレーション計算でメータリング特性改善に対する有効性を確認した。

これらの効果を具体的に実現する手段として2段階開弁ノズルは有効であると考えられ、今後実機搭載に取組み、微量燃料メータリングが重要である船用主機などの用途に対応する予定である。

4.2 燃焼室形状

ディーゼルエンジンにおける燃焼室内の燃料と空気混合には、燃焼室形状が大きな影響を及ぼすため、多次元流動計算プログラムを用いて燃焼室内の燃料噴霧の分散と混合気形成特性を評価し、燃焼室形状の最適条件を追求した。

ここでは、高圧燃料噴射を前提に比較的口径の大きなトロイダ

ル燃焼室について多次元流動計算を行った。燃焼室口径としては $\phi 116$ 、 $\phi 128$ の2種類を対象とした。これらの燃焼室は圧縮比を一定とするため、燃焼室口径に伴って、燃焼室の深さを変更している。

計算は、公開の多次元燃焼流動解析コードであるKIVA-IIをベースとして、噴霧モデル、乱流モデル、燃焼モデルに改良を加えた計算コードを用いた。図7に計算結果を示す。

燃焼室口径が $\phi 128$ の場合のように大きすぎると燃焼室深さが相対的に浅くなり燃料噴霧が底面側にたまりやすくなる。さらに、燃焼室内のガス流速も低くなり燃料噴霧自体の広がりも十分でなくなり、燃焼室内での空気分布に対する燃料の分散が不十分となる。

一方、燃焼室口径が $\phi 116$ のように、燃料噴射圧力に対して適正であると、燃料の分散は適度に燃焼室キャビティ外へも広がりながら燃焼室キャビティ内へバランス良く発達しており噴霧同士の干渉もない。したがって、燃料と空気の混合が良くなり、良好な燃焼状態が得られる。

本機関では、以上のような多次元燃焼流動解析により設定した燃焼室形状を採用することにより、高い燃焼性能を実現している。

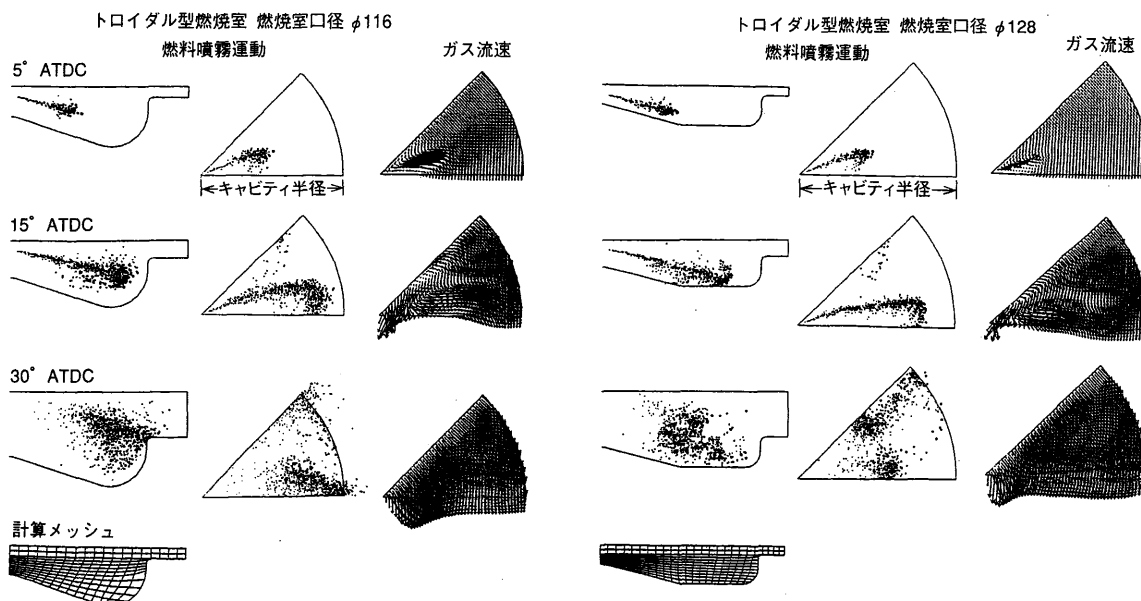


図7 燃料室内の燃料噴霧運動及びガス流動計算結果 燃焼室形状による燃料室内の燃料噴霧運動及びガス流動の差異を示す。
Prediction of spray movement and gas velocity in combustion chamber

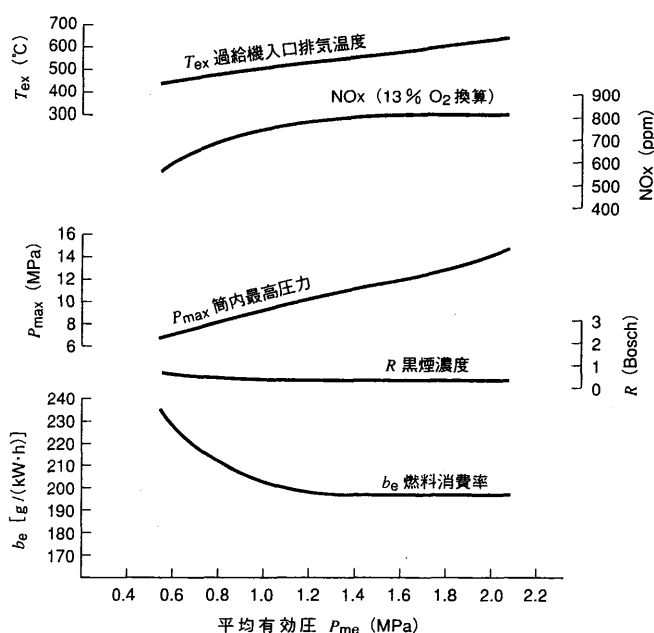


図8 機関性能 機関回転 1800 min⁻¹の実測機関性能を示す。
Engine performance curve at speed of 1800 min⁻¹

表2 S 12 H 発電機セット主要諸元
Specification of S 12 H generator set

項 目	新セット	従来セット
発電機出力 (kW)	60 Hz	1 000
	50 Hz	900
重 量 (kgf)	7 850	9 340
ラジエータ放熱面積 (m ²)	2.68	3.27
共通台板重量 (kgf)	480	1 170

ドルから過負荷・過回転域までの繰返しであるローサイクル耐久試験を行った。耐久試験は UI 単体試験を含め 2 500 h 行ったが、特記すべき不具合の発生もなく、本機関が高い信頼性を有することが確認できた。

5.3 発電セット検証結果

本機関は、初期の投入市場を主に発電機市場としているため、開発試験の初期から機関単体検証と並行して発電セットの検証を行った。表2に発電セットの主要諸元を示す。計測は発電機の負荷投入、遮断時の特性及び信頼性に関する応力計測を主に行い、従来機以上の性能・信頼性を確認した。特に従来の発電セットの実績から、フライホイールハウジングやオイルパンには機関単体試験より高応力が発生することが予想され、あらかじめ解析により補強を行い、フライホイールハウジングで応力振幅を従来機に比し平均 30 % 低減した。

6. あ と が き

S 12 H 型機関の特徴・主要構造、要素技術並びに試験について述べた。本機関は UI と高性能の新形状給気ポートなどを採用した今後の開発のモデル機種と位置付けられる。性能的には、筒内最高圧力に余裕が大きく、詳細なマッチング試験を進めることにより今後更に高性能化が図れると考えられる。

なお本機関は検証の結果を踏まえ、フィールドフォローを十分行うことにより、代表機種としてユーザの期待にこたえていく所存である。

5. 実機試験結果

5.1 機関性能

図8に S 12 H 型機関の性能試験結果を示す。定格点 $P_{me}=2.0$ MPa において、燃料消費率は 197 kg/(kW·h) で、NOx に 840 ppm (13 % O₂ 換算) と目標性能を満足する性能を得た。また、排気温度も許容範囲内であり、筒内最高圧力及びターボチャージャ回転数は設計限度に対して余裕が大きく、今後さらに詳細なマッチングを行い更なる性能改善の余地があることが分かった。

5.2 耐久試験

本機関では、実際のフィールドの使用条件に対して十分な信頼性を有することを確認する目的で、連続過負荷耐久及びローアイ