コペンハーゲン MAN Diesel & Turbo 社 RD センタでの 大型テストエンジンを使用した研究開発*

Morten Kjøl**

Peter Willemoes Jespersen**

1. はじめに

MAN Diesel & Turbo 社のリサーチセンタは 1992 年に開設されました。その中心となるのは、特別に設計された 4 シリンダの 2 サイクルテストエンジンで、MAN B&W 型エンジンの開発に重要な役目を果たしてきました。1992 年以来、テストエンジンは実に 8,500 稼働時間を記録してきました。種々異なった試験がこのテストエンジン上でなされてきました。その範囲は、材料、トライボロジー、燃焼理論のような基礎研究から、エンジン制御装置の実証試験、更に型式承認試験にまで広く互っています。近年では、テストエンジンは EGR(排ガス再循環)のような排出物を削減するシステムの試験に大規模に使われてきました。

1997 年にリサーチセンタは拡張され、エンジンのサブコンポーネントのシュミレーションをするためのテストリグが追加されました。本テストリグにより、エンジンへの損傷の危険を冒さずに、安全な環境で概念やシステムを迅速にテストできるようになりました。テストリグの採用により、新規システムや概念をより早く開発し、試験することが可能となったのです。このお蔭で、システムを実際にテストエンジンに取り付ける前に、製品をある程度まで成熟させることができるようになり、その結果テストエンジンの寿命を延ばすことができました。その後、更に多くのテストリグが追加されています。

2010 年に入り、リサーチセンタは更に拡張されました。3 階が増設され、ここに新事務所、新エンジン制御室及び新規のエミッション測定室が設置されました。R&D 技師は、事務所からエンジン制御室に直接出入りできます。

図1 コペンハーゲンにある
MAN Diesel & Turbo リサーチセンタ

2. テストエンジン - 4T50ME-X

本テストエンジンは、4 シリンダ、口径 50 cm、ストロークは 2,200mm です。

現在テストエンジンの設定は 123 回転./分で 7,080 kW です。

表1 4T50ME-X テストエンジン仕様	
型式	2 サイクル ディーゼル
シリンダ数	4
口径	500 mm
ストローク	2,200 mm
出力	7,080 kW
最大回転数	123 rpm

*原稿受付 平成 22 年 8 月 11 日.

** MAN Diesel & Turbo (デンマーク国コペンハーゲン市)

ME-X という通常と少し異なる呼称は、ハイブリッド式エンジン制御設計を表しています。このエンジンの制御システムは、これまでに何度も変化を遂げてきました。現在は、以下の制御方式が採用可能です。

2-1 ME 排気弁と燃料噴射を油圧作動とした 100% 電子制御エンジンです。

2-2 ME-B 燃料噴射を油圧作動とし、排気弁を機械式作動とした電子制御エンジンです。

テストエンジンはカム軸を装備せず、ME-B 制御では、排気弁のカム作動は油圧でシミュレートします。これは、ME エンジン制御システムによる排気弁アクチュエータの制御によって行うものです。この様に、ME-B のエンジン方式で試験をする場合には ME と ME-B の両方の制御システムが作動する、ということになります。この他で類を見ない仕組みにより、本テストエンジンは、ほんの数時間でこの 2 つのエンジン型式を互いに切り替える事ができるのです。

2-3 ME-GI ME ガスエンジン、図 2 参照。

図 2 ME-GI 方式のテストエンジン

3. テストエンジンの適用

本テストエンジンは広範にわたる開発試験に使用されます。それらのテストは、他では実施できない試験、例えば、エンジンメーカーのテストベッド上でも、就航船のエンジンでも、実施できない種類のテストです。更に、多くのテストは、高い信頼性を確保するために運転条件が厳しく管理されている事が必要となります。これに加えて、テストエンジン上では、常時広範な計測が行われており、これらのデータが絶え間なく記録され、膨大なデータとなっていきます。この計測用セットアップが、テストエンジンの標準セットアップとなります。

有効な計測を確実に実施するために、特殊調整のオプションが加えられています。例えば、給気温度は ISO 参照基準に正確に合致するように調整可能です。

他に、エンジンの破損を引き起こす可能性のあるものや制御不能テスト等のリスクを伴うテストも行われます。

リサーチテストの例としては下記があります：

- 軸受けの油膜計測
- ピストンリング試験
- ライナの材料試験
- 燃費とエミッションの最適化
- 様々な燃焼の研究
- サブコンポーネント試験
- 監視システムと安全システム試験、例えばオイルミスト検出器
- 排出物低減装置
- 過給機
- エンジン制御装置 (ECS)
- 船級協会用 ECS 型式承認試験

4. テストエンジンの計器類

テストエンジンには多数の計測箇所が装備されています。最も重要な計測箇所は SFOC (燃料消費率) を決定するためのパラメータで、このためにエンジントルクと回転数を、燃料消費量と同時に計測します。燃料消費量は、流量計や計量タンクなどの幾つかの独立した方法の組み合わせにより決定されます。SFOC とエミッションの監視をオンラインで計算することにより、そのエンジンの設定を即座に評価することができます。シリンダ最高圧や噴射プロファイルの変更は、直ちに評価できます。

また、本テストエンジンは、燃焼室の計測箇所の幾つかには計器が取り付けられており、ライナ、ピストン、ピストンカバ、排気弁の温度を計測できます。

本テストエンジンには、PMI オンラインの最新版の PMI 自動チューニング¹⁾ が取り付けられています。PMI 自動チューニングは、オンラインでシリンダ圧力曲線を提供します。PMI システムはエンジン制御装置にインターフェースするように設計されており、これにより、エンジンシリンダ圧力 (排気弁タイミングと噴射) が即座に調整できます。

近年になり光学式計測方法が採用されるようになりました。例えば、燃焼の高速記録は、様々な燃焼段階の重要な情報を提供します。記録は主に、始動空気弁の孔を通して行われます。最近、特殊用途のシリンダカバーを開発中です。この特別なカバーにより、多方向の角度から燃焼を撮影することが可能で、完全な燃焼のイメージ

が画像化されます。

図3は高速カメラの機構を示しています。鏡とボアスコープにより、燃焼室内部を撮影することができます²⁾。

図3で、レイアウトと燃焼室の撮影角度が示されています。低温鏡は高温測定実験のみに用いられます。鏡は 665nm より短い波長は反射し、長い波長のものを伝達します。

図3 高速撮影と2色高温測定用の実験用レイアウト

図4は、単一燃料で稼働するエンジンにおいてTDC(上死点)後、3.1度で開始する燃焼の様子を示しています。これらは1秒18,000フレーム撮影された中から選ばれた写真フレームです。写真が示すように、火炎はTDC後6度までは緩やかに拡大し、その後、シリンダー内の旋回運動により、火炎は回転を始めます。TDC後約17.9度から、火炎の燃焼は終了し始めます。

この高速撮影記録は、テストエンジンの計測技術について、開発がどの方向に進んでいるかを示す良い例です。今後、更に多数の計測箇所が追加され、より進歩した方法が適用されるでしょう。

図4 単一サイクル燃焼の様子を高速撮影したもの

5. テストリグ

上述のように、幾つかの理由により、サブコンポーネントの試験が必要です。それらは、新構成部品の機能試験、新規アイデアの試験、計算の境界条件のためのデータ取得、バイオフュエル、エマルジョン、ガスなど新しい燃料に対する装置の反応試験などです。

テストリグの例は：

- 補助ブロワ特性の試験と実証試験のためのテストリグ。図 5 参照。

図 5 テストリグ 1

- ガスエンジン用に新開発のコンポーネントとソフトウェアの試験を 50ME-GI テストリグにて。図 6 参照。

図 6 テストリグ 2

- シリンダ潤滑装置開発用シリンダ潤滑テストリグは現在進行中です。現在リサーチセンタには 4 つの異なる設計のシリンダ潤滑システム用テストリグがあります。
- 二次モーメントコンペンサータプロトタイプ。ME エンジンには二次モーメントコンペンサータを駆動するチェーンドライブが無いので、このエンジン用に電動二次モーメントコンペンサータが開発されました。
- シリンダユニット完備、即ち、燃料噴射弁と排気弁の両方を駆動、加えて電子制御装置を試験するためのリグがあります。ハード、ソフトの

両方が試験できます。すべての ME と ME-B のテストリグの共通する特徴は、初号機以前にプロトタイプとして稼働したものであった、という点です。

以下のシリンダユニットが該当します：

- 50ME-B プロトタイプ噴射装置
- 噴射と排気弁付 50ME テストリグ
- 噴射と排気弁付 90MC-C テストリグ
- 噴射と排気弁付 98ME テストリグ

5.1 98ME テストリグ 98ME テストリグは、本テストリグがどの様に使用されるかを示す良い例です。本リグは、最初の「大形」ME エンジンが製造される以前に組み立てられました。このテストリグからのサービス実績が最新の ME エンジンの設計の基礎となっています。

本 98ME テストリグは排気弁付シリンダユニット完備、圧力ブースタ、及びシリンダ注油器から構成され、これらはすべて、通常のエンジンと同様に、MPC(多目的コントローラ)により制御されています。

初期の ME エンジン型式には、二つの異なる弁が取り付けられていました。一つは排気弁作動用(EIVa)、もう一つは燃料噴射管理用(EIFi)でした。最新の「大口径エンジン」の設計では、これらの 2 つの弁は FiVa (Fuelinjection Valve actuation) と呼ばれる一つの弁に統合されています。

FiVa 弁の試験は下記から成ります：

- 油圧基準点の校正
- 制御ゲインの調整と主スライド弁の位置決め
- 弁の物理的性能確認、つまり主スライド弁の 3 dB 周波数、及び最大速度
- 電源喪失あるいは遮断時の弁の「フェールセーフ」機能の精査
- 弁の内部コントロール力が適切で、弁内部で発生する内部の流体力に抗することが可能であることを確認する
- FiVa が正しく機能していることの確認、つまり、噴射圧の適切な制御、排気弁の動きの制御、圧力ブースタが十分な速さで戻る、等
- FiVa の作動繰り返し、たとえ少量の噴射であっても、安定している事の確認

K98ME test rig

Complete K98ME hydraulic cylinder

図7 98ME テストリグ. (1) 燃料弁(2)圧力ブースタ(3) 排気弁(4) 分配ブロック (5) FiVa 弁 (6) アルファ注油器 (7) 排気弁アクチュエータ

6. MBD FiVa 弁の機能原理

FiVa 弁は、排気弁と噴射の両方の機能を制御する、という意味で Double-acting です。このため、排気弁は噴射と同時に開かず、その逆もまた同様、という設計になっています。

図6 MBD FiVa 弁の断面図です。主スライド弁は油圧で位置決めを行います。

主スライド弁を押し下げる幾つかの油圧ピストン/スプリングは頂部に位置し、スプリングはエンジンの油圧 160–210bar で締められています。

パイロット弁を通して供給される作動ピストンは、下に位置しています。ピストンへに出入りする油の供給を制御することにより、主スライド弁は上下に動きます。

スライド弁が下がっている時、 $P \rightarrow C_{va}$ と $C_{fi} \rightarrow T_{fi}$ が接続され、それにより、圧力ブースタがその始点に戻るのと同時に排気弁が開きます。

スライド弁が上がっている時、 $P \rightarrow C_{va}$ と $C_{fi} \rightarrow T_{fi}$ が接続され、それにより、排気弁は、圧力ブースタが噴射を起こすのと同時に閉まります。

図8 FiVa 弁

実際の動きは CCU (シリンダ・制御・ユニット) により制御されます。望ましい主スライド弁の動きは、フィードバック信号により制御、調整されます。

位置センサーにより、CCU ユニットは主スライドの位置を継続的に把握します。位置センサーは制御信号を発し、その信号は FiVa 弁との位置調整をします。

FiVa の同期タイミングは、チャンネル 48 で見ることができます。エンジン 1 回転に対して 3 つの同期箇所は、1) 噴射 2) 排気弁開 及び 3) 排気弁閉 です。図 9 は FiVa の動きと、排気弁及び噴射作動の関係を示しています。

7. 結論

この記事で、MAN Diesel & Turbo 社リサーチセンタで実施されている 2 サイクルエンジンの研究開発の内容がご理解頂ければ幸いです。

図 9 FiVa の作動シーケンス

参考文献

- 1) CIMAC Congress 2010, Bergen Paper No. 227
Applying close loop control, Auto-tuning to MAN Diesel two-stroke engines. Torbjørn Moeller, MAN Diesel & Turbo
- 2) CIMAC Congress 2010, Bergen Paper No. 40
Imaging and studying of combustion process, Hanne H. Poulsen, Johan Hult and Stefan Mayer MAN Diesel & Turbo

Morten Kjul
1969 年生
MAN Diesel & Turbo 社
シニアリサーチエンジニア
(テストリグ担当)
デンマーク工科大学卒

著者紹介

Peter Willemoes Jespersen
1972 年生
MAN Diesel & Turbo 社
シニアリサーチエンジニア
デンマーク工科大学卒