船用ディーゼル機関の故障診断， 運転条件決定のための燃焼シミュレーション (第一報 エキスパート・システム)*

龍 永 生** 嶽間沢 秀 孝***
廣 安 博 之****

The Combustion Simulation for Diagnosis and Decision of Running Condition on Marine Diesel Engine
(The First Report: Expert System)

by Y. S. Long, H. Gakumasawa, H. Hiroyasu

In this paper, an expert system for deciding running condition and diagnosing faults of medium and large-sized diesel engines are presented. The system consists of three parts. First is the transient data acquiring part by which the necessary parameters of the engine can be acquired through the A/D transforming circuits, Second is the simulative calculation part by which we can able to calculate subsequent spatial and temporal history of most of the parameters, such as burning rate, local temperature, NO emission and soot etc, and according to this information, the best running condition for marine diesel engines can be decided. By comparing the experimental with calculated values for the engines, it is revealed that the model predicts with good accuracy engine performance and with reasonable accuracy nitric oxide emissions. Third is the expert diagnostic part, which is still not completed because of lacking of the data.

1. まえがき

現在、大型の船用2サイクル低速ディーゼル機関は、正味熱効率が50%を超え、同時に安価な低質燃料油が使用できること等で、船舶の主機関として圧倒的なシェアを獲得している。この熱効率が50%を超えた現在、燃焼の改善による熱効率向上は、シリンダー内最高圧力を現状レベルに抑え、正味平均有効圧力も現状レベルを維持した場合には、サイクル的にほぼ限界に近づいている。

一方、船舶から排出される排気ガスによる大気汚染が無視できないレベルに達しているとの認識から、IMO〔国際海事機関〕では、2000年以降に起工される船舶に搭載されるディーゼル機関に対して、NOxをこれまでのレベルの約70%に削減する

ための議定書を採択した。この規制値自体は決して厳しいわけではないが、そのポイントはNOxを低減した結果として、NOxとトレードオフ関係にある燃費の悪化が船用機関の運行費用アップを招くことである。このため、燃費を悪化させない低NOx技術の導入が必要不可欠となっている。これに打ち勝つための一つの方法は、新しい燃焼方式、噴射系の開発である。これについて、ヤンマーディーゼル(株)は、総噴孔面積を確保し噴射圧力を増加させずに噴射期間の短縮と微粒化特性を向上させる小噴孔径多噴孔化のノズルと深皿燃焼室を組み合わせることにより、シリンダー内最高圧力や燃料の噴射圧力を増加させることなく低燃費とNOx低減を同時に実現する等圧燃焼技術を船用エンジンに採用した⁽¹⁾。また、船用機関メーカーのバルチラ社が考案した改良燃焼方式(Low NOx燃焼という)は、圧縮による筒内圧力を上昇させ、燃焼による圧力上昇と同じ程度にして、燃料噴射時期遅延などの従来の方法と異なり、燃費の悪化を招

* 原稿受付 平成13年8月20日

** 近畿大学大学院

*** 近畿大学工学部

**** 正会員 同上

くことなくNOxを低減することが可能となった⁽²⁾。

もう一つの方法は，診断と運転条件決定のエキスパート・システムを利用して，燃料の種類と運転モードを陸の近海と陸から遠く離れた洋上で変化させ，NO_xに最適なものと，熱効率に最適な運転モードを合わせて高度にコントロールすることである。NO_x発生量に大きな影響のある着火特性，燃焼特性も燃料によって幅広く変化し，また，水噴射，エマルジョン等による場合にも，最適な運転条件を見出さねばならない。また，燃焼に関与するパラメータとして，燃料噴射時期，燃料噴射圧の可変，圧縮比の最適化，排気弁系の可変化が上げられる。

2. 診断と運転条件決定のエキスパート・システム

上記の最適運転モードに加えて，エンジンの故障診断の早期発見は重要な問題である⁽³⁾。ところが，現在，大型船舶の乗組員の削減及び乗組員の技術的能力の低下から，これまでのように船舶の機関室だけにエンジンの運行を任せておくわけには行かなくなっている。しかし，最近のIT技術(Information Technology)の発展により，なにも船舶の機関室でエンジンを運行しなくても，地上で最適な運転条件を決めて，それを船舶に指令してやればよい。本研究の最終目的はそこにあり，船用ディーゼル機関の最適運転と故障診断のエキスパート・システムの構築と運営にある。

このシステムは3つの部分から成り立っている。第一は各シリンダー内の燃焼圧力，噴射管の圧力，その他のパラメータの測定とA/D変換によるデータの取り込みである。データは燃料性状および各気筒について，運転期間の代表を採取する。図1に示すようなデータをすべてに記録するには限度があるので，最大どのくらいを平均化するかが問題である。第二は，入力条件をもとに，噴射率，熱発生率のシミュレーション計算により，最高燃費の運転条件とNO_xあるいは他の有害排ガス低減のための最適な運転条件の決定である。得られた燃料性状，噴射性能等の入力条件により，熱効率，熱発生率，排気特性を以下に示す燃焼シミュレーションによって計算する。それらのフローチャートを図2に示す。第三は，正常運転時のデータと現在のデータを比べることにより，早期の故障診断を行うシステムである。図2に示した結果をもとに，例えば図3に示すようなキー・ファクターの運行条件を決定する。これらの詳細については続報で報告予定である。

3. 燃焼シミュレーション

ディーゼル機関内の噴霧燃焼では，燃料の微粒化，蒸発，空気との混合そして着火と複雑な過程を経たのち，燃焼が進行していく。そしてその燃焼では，局所的に不均一な酸素濃度と温度分布のもとで，すすの生成と再燃焼およびNOの生成が行われる。ここで述べるモデルは熱発生モデル，排

図1 リアル・タイム・データ取込

図2 シミュレーション計算と解析システムのフローチャート

図3 キー・ファクターの関連

気生成モデルおよび燃焼室内の噴霧挙動モデルより成り、機関の出力は液滴の蒸発計算および燃焼割合の計算などの熱発生モデルで求め、熱発生モデルで計算した温度や酸素濃度履歴をもとに排気生成モデルでNOおよびすすの排出量を求めた、さらに、噴霧の挙動等の軌跡表示を三次元で表示できるようにした。

熱発生モデルでは、まずノズルから噴出した噴霧に追い越しが無いとして、図4に示すように時間的かつ空間的に分割した多くの要素に分ける。このとき同時刻に噴出した噴霧は、その燃料質量が均等に分割されるように要素の大きさを選ぶ。これらの要素内の噴霧は実験的に求めた到達距離の式に基づき移動するが、その間の運動量は保存され、速度の減衰に見合うだけ周囲から空気が流入すると考える。空気と混合した噴霧は蒸発を開始し、ある着火おくれ時間の後に着火する。今、一つの要素に注目して現象を説明すると、図5に

図4 噴霧の分割

図5 一つの要素内の蒸発・燃焼現象

示すように、ノズル近くの燃料噴射直後の要素には多くの燃料微粒子があり、ノズルから離れるに従って、空気が流入し、蒸発が起こる。したがって、これらの要素内には、液体燃料滴、蒸発した燃料と空気があることになる。噴射からある時間たつと着火が起こるが、それと同時に要素は膨張し、さらに新しい空気が入ってきて蒸発が進行し燃焼が継続されることになる。

着火後の要素内噴霧の燃焼過程を図6に示す。要素内で着火が起こると、すでに生じている混合

図 6 要素内の燃焼メカニズム

気は微小時間の間に燃焼を行う。燃料蒸気が燃焼するのに十分な空気があった場合には、着火直後の燃焼が終わった後、要素内には燃焼生成物と液体燃料滴と空気が存在し、次の微小時間の間に高温の気体につれて燃料の蒸発が起こると同時に要素内には周辺から空気が流入し、この間に蒸発した燃料が燃焼する(図6のAの過程)。この場合に燃焼は可燃混合比の中で、混合比と燃焼割合を仮定しておき、その割合で燃焼が進むとした。蒸発した燃料と空気の量的な関係で、空気または燃料蒸気のいずれかが要素内に残る。空気が残る場合は次の微小時間の間に前述の過程が繰返されるが、燃料蒸気が残る場合(図6のBの過程)では、周囲から流入してきた空気に見合う燃料蒸気のみが理論混合比で燃焼するとする。初期の燃焼の間空気が不足している場合ではやはりBの過程で燃焼が進行する。このように要素内の噴霧は初期の燃焼期間を過ぎた後、空気流入量律速または蒸発量律速の燃焼をするが、各々の要素はその時々要素内の条件によりいずれかの燃焼過程を繰返しながら燃焼を終了する。

各要素の燃焼を総合すると、燃焼室内での熱発生率を計算することができ、それから燃焼室内の圧力変化を求めることができる。また、それぞれの要素の温度履歴や燃料蒸気、燃焼ガス量、空気量などを求めているため、これをもとに平衡計算により燃焼ガスの組成を計算することができる。またNOについては拡大ゼルドビッチ機構による非平衡計算を行う。すすについては要素内の燃料蒸気からの一次反応による生成と、酸素との二次反

図 7 プログラムの流れ図

応による再燃焼を考慮して計算を行う。

さらに、三次元的に表示できる噴霧の軌跡表示から、各種の形状のディーゼル燃焼室内での噴霧の分散の様子、液体燃料温度分布、蒸気温度分布、および排ガスなどの挙動および質量分布を視覚的に分かりやすく表現できるようにした。

これらの燃焼シミュレーションおよびモデルについては、第2報で詳細に述べる。

4. 計算結果の例と実験結果の比較

以上述べたような方法でモデル化し、図7に示すような流れ図に従って計算を行った。これらの計算結果は、実測値と比較して検討を加える必要がある。自動車用ディーゼル機関においては、すでに両者の比較を行い、条件を変化させた場合でもかなり良く合うことがわかっている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、同じ手法が大型低速の船用ディーゼル機関に適合できるかは問題である。そこでメーカーの実験結果や、すでに公表されているデータを用いて計算を行った。しかし、計算に必要な条件を明示している論文は少なく、限られた例からの計算結果になっている。

4.1 MAN-B&W K90MCの例

計算に使用した機関の諸条件⁽⁷⁾は表1で示すような2サイクル大型船用エンジンで，表2で示すような運転条件である．図8，9，10，11は，それぞれ本プログラムを用いて，計算したエンジンの最高燃焼圧力，エンジン出力，燃料消費率および排気ガスNO_xの結果及び実験結果を示してい

表1 MAN B&W K90MCのエンジンデータ⁽⁷⁾

Bore	900 mm
Stroke	2550 mm
Connecting Rod Length	3510 mm
Compression Ratio (Geometric)	21.7
Number of Injection Holes	12
Injection Hole Diameter	1.65 mm

表2 運転条件⁽⁷⁾

Load	%	30	50	75	85	100
Speed	rpm	62.9	74.6	85.3	89	94
Inj.Tim	deg	0	+1	+1	0	+2
P _{inj}	bar	1.39	2.0	2.93	3.19	3.73
T _{inj}	°C	32	29	36	39.6	45
P _{exh}	bar	1.19	1.85	2.72	2.95	3.35
T _{exh}	°C	289	284	284	298	330
Fuel	kg/h	263	419	617	686	836

図8 シリンダー内の最大燃焼圧力

る．図8，9，10の実験結果はすべてメーカーの公表した実験結果であり，エンジン速度，負荷範囲内で計算結果は実験結果と良く一致している．図10の低負荷時において燃料消費率の計算値が実験

図9 各運転状態のエンジン出力
(実験：正味，計算：図示)

図10 各運転状態の燃料消費率
(実験：正味，計算：図示)

図11 NO_xの実験値と計算値

結果より低くなるが，これは計算の燃焼モデルは単純な燃焼のみを取り扱っており，実エンジンでなされる低負荷時の性能向上等を考慮していないためと思われる．しかし全運転条件範囲内に対してエンジンの性能が正確に予測できることがわかる．また，図11は表2で示した運転条件範囲内エンジン排ガスの一つNOxの実験結果と計算結果を示している．図より各運転条件のエンジン速度の違いによる誤差を考えに入れば，計算結果と実験結果はかなりの精度で一致することがわかる．図12はシリンダー内の圧力と熱発生率の計算結果である．実験データがないため，計算の結果のみ示した．

4.2 高崎らの実験結果と計算例

表3に示すような高崎ら⁽⁸⁾の実験用エンジンの条件を用いて，中型2サイクルエンジンのセンター噴射，サイド噴射の例を計算した．センター噴射の圧力，熱発生率およびサイド噴射の圧力，熱発生率はそれぞれ，図13(a)，(b)，14(a)，(b)に示している．図より，本モデルは2サイクルの大型，中型低速船用機関の燃焼シミュレーションにも十分使用できることがわかる．また，本研究の最終目的は前述のように船用ディーゼル機関の最適運転と故障診断のエキスパート・システムの構築と運営である．最適運転状態を決めるため，運転条件入力の簡単さ，計算の速さ，計算結果の正しさなど正しさなどが非常に重要なポイントである．本プログラムは簡単な入力により燃焼に関与するパラメータとして，燃料噴射時期，燃料噴射量，エンジン回転数，燃料蒸発率などを入力して，計

表3 エンジン緒元および運転条件⁽⁸⁾

	サイド噴射	センター噴射
Bore	190mm	190mm
Stroke	350mm	350mm
Connect length	569.5mm	569.5mm
Comp. ratio	14	14
Engine speed	400 rpm	400rpm
Swirl ratio	1.0	1.0
Nozzle diameter	0.23mm	0.23mm
Nozzle number	8	8
Fuel	Diesel fuel	Diesel fuel
Spray quality	520 mg/st	570 mg/st
Injection timing	-3° ATDC	-4° ATDC
Injection Dura.	17 deg	20 deg
Sweeping Pres.	0.2600 (MPa)	0.2600 (MPa)
Sweeping Temp.	313.15 (K)	313.15 (K)
Sweeping Den.	2.894 (kg/m ³)	2.894 (kg/m ³)

(a) Pressure

(b) Heat Release

図13 センター噴射の例 (Speed: 400rpm
Injection Timing:-3ATDC Injection
Duration: 17deg)

図12 シリンダー内の圧力と熱発生率
(100 % Load)

図14 サイド噴射の例(Speed: 400rpm Injection Timing: -4ATDC Injection Duration: 20deg)

算時間はノート・ブック計算機で約5分である。図15は噴射時期の変化により燃料消費率とNO_xの影響を示している。これにより燃料消費率とNO_xの最適運転が判断できることになる。

5. まとめ

これまで開発した4サイクルの燃焼シミュレーションと同じ現象論モデルを用いて、2サイクル低速大型船用機関に対して、入力条件をもとに、噴射率、熱発生率とNO_xあるいは熱効率に最適な運転条件の決定のシミュレーション計算を行った。このシミュレーションの特徴は、噴霧燃焼の基本となる現象を他の基礎実験で求めておくことにより、機関性能を予測できるということである。例として2サイクル低速中型、大型船用ディーゼル機関について計算した結果は、計算条件と同じ機関の実測値と比較したところ、かなりよく合うこ

図15 噴射時期の影響(Speed: 94 rpm Mass: 836 kg/h) Injection duration: 28deg

とがわかった。すなわち、本モデルは中型、大型2サイクル低速船用機関の燃焼シミュレーションにも十分使用できることがわかったので、今後、いろいろな条件を変化させた場合、機関性能がどう変化するかについて研究し、噴射率、熱発生率のシミュレーション計算とNO_xあるいは熱効率に最適な運転条件の決定と故障の診断できるエキスパート・システムの開発を進めていくつもりである。

参考文献

1. Yoshikawa, S. and Suzuki, M., Engine Technology, Vol.01, No.05, November 1999, p.12.
2. 日本船用機関学会 第194回ディーゼル委員会 & 第1回船用機関の燃料とエミッションに関する小委員会 資料, 1996.
3. Wang Zhong and Gao Zongying., SAE Paper930596.
4. Arai, M. Tabata, M. Hiroyasu, H. and Shimizu, M., SAE Paper No.840275, 1984.
5. Long Yongsheng, Gakumasawa, H. and Hiroyasu, H., SAE paper No.2000-01-1887.
6. Yoshizaki, T. Nishida, K. and Hiroyasu, H., SAE Paper No.930612.
7. Rakopoulos, C.D., Hountalas, D.H. and Agalitis, N., SAE Paper No.1999-01-0227.
8. 高崎講二・ほか5名, 日本機械学会論文集(B編), 63巻613号(1997-9), p.3165.