ディーゼル燃焼の現象論的モデル*

-バーチャル・エンジン設計工学

廣 安 博 之**

Phenomenological Modeling of Diesel Combustion -Virtual Engine Design Engineering

By Hiro Hiroyasu

Outline and problems of modeling of Diesel combustion, mainly phenomenological modeling were described as virtual engine design engineering. Because of verification of a new combustion system and new technology, the role of modeling (virtual engine design) is very large and useful. Compared to actual Engine tests, modeling (virtual engine design) can accurately predict engine performance that may be difficult to valuate through engine experiments at low cost and in short time.

1. まえがき

ディーゼルエンジンは、その熱効率の高さ、燃料消費率の良さ、耐久信頼性等の利点ゆえ古くから広い分野で利用されている。しかし、近年の排ガス規制をクリアするため、また、さらなる燃費向上のために、1) 新燃焼システムの提案、2) 燃焼室内の燃焼改善、3) 後処理技術、4) 燃料問題等が研究課題として取り上げられ盛んに研究開発が行われている。

ここでは、筆者らが提案している、「バーチャル・エンジン設計工学」を目指して、紙面の都合で、その一端を述べて見たい。エンジン設計工学に関しては、古くから多くの名著があり、各製造会社（設計会社）ですでに設計法が確立している。しかし、上述したように、最近、多くの新燃焼システム、多くの燃焼改善技術が提案されている。また、ディーゼルエンジンが出来てからすでに100年以上たっているにもかかわらず、その燃焼現象に不明な点が多い。

ここで言う、バーチャル・エンジン設計工学(Virtual Engine Design Engineering)とは、机上でエンジンを設計製作し、運転をして、その出力性能、燃費、排ガス性能を予測しようとするものである。もし、これらの技術がある程度完成し、使い物になると、経費的にも、時間的にも計り知れない優位性をもたらす。

ここでは表題に示したように、ディーゼル燃焼に限定して、後処理技術、燃料問題は取り上げない。

また、船用の主機に使用される2サイクル機関については別項に譲るとしてここでは記載しない。

2. 燃焼モデリングの分類

ディーゼル燃焼は図1に示すような複雑な過程を経

図1 ディーゼル燃焼過程

*原稿受付 平成21年02月23日
**正会員 (有)ヒロ技術研究所(広島市中区本町2-6-11, 第7ウエノヤビル6F)

て行われる。これらの過程を数学的にモデル化し、求めるものは熱発生率の予測と排気有害成分の予測である。図に示すように、ディーゼル燃焼を支配する第一の要因は混合気形成であり、これは噴射系、吸気系、燃焼室形状の3者によって左右される。そしてそれらは噴射特性、噴霧特性、空気流動としてモデリング内に記述されなければならない。

このようにして、混合気形成がモデル化されると、次の要因は着火遅れ、ならびに火炎の拡がり、すなわち燃焼率である。燃焼は実際には部分予混合燃焼と部分拡散燃焼が複雑に入り混じって行われ、実験的にもよく解明されていないが何らかの方法でこれをモデル化する。次は燃焼生成物が燃焼室内に拡散して行く形態ならびに燃焼室壁面からの熱の移動問題の記述、そして熱発生率を求めるプログラムを作ることになる。

熱発生率が求まれば筒内圧の変化が求められ、エンジン性能を求めることができる。排気有害成分である窒素酸化物、すす等、未炭炭化水素、CO等の生成ならびに酸化のモデル化については燃焼室内の局所の温度、ならびに混合気の濃度を求めて計算を行う。

以上の要因を全て数学的に記述することは不明なところが多く、現在のところ不可能である。これまで提案されているディーゼル燃焼のモデリングを方法論的に分類すると次の3つに分けることができる。

- 1) 熱力学的モデル (Thermodynamic Model)
- 2) 現象論的モデル (Phenomenological Model)
- 3) 詳細多次元モデル (Detailed Multi-dimensional Model)

2.1 熱力学的モデル これは熱発生率(燃焼率)が、燃料の噴射、蒸発、混合気形成でどのように影響されるかを求めることにある。1956年に発表されたWiebeの燃焼の実験式¹⁾に始まり、1970年頃から電子計算機が現れ始め、計算機によるディーゼル燃焼の解析の始まりであったが、燃焼計算だけで、熱発生率を予測するにはかなりの有用性を持っていたが、排ガス量は計算できない²⁾。そのため、このモデルは役目を終わったと考えてもよいだろう。

2.2 詳細多次元モデル このモデルはエンジン筒内の物理的、化学的過程を支配する全ての基本的な微分方程式を解くもので、筒内での気流速度、乱流特性、燃料や燃焼生成物の濃度、温度などの詳細な三次元構造を明らかにするモデルで、次の4つの方程式を考える。

- (1) 連続の式
- (2) 運動の式

(3) エネルギーの式

(4) 状態方程式

これらの方程式をn種類の成分について、三次元的に解く。

もともとこれは、一成分の乱流流れを解くために1975年頃から開発されたもので、計算流体力学(Computational Fluid Dynamics) (CFD) として開発され、現在ではかなり複雑な境界条件でも解くことが可能になった。その後、これをもとに燃焼現象まで拡張しようとする試みが、米国、Los Alamos National Lab. (KIVA)³⁾、イギリスの Imperial College (Star-CD)⁴⁾、大阪市立大 (GTT)⁵⁾ でなされてきた。しかし、燃焼現象は液体と気体の2成分を非定常に取り扱うため、現象論的にも、実験的にも不明なところが多々あり、前述の4つの方程式を書くことができない。例えば、ノズルから噴出する液体が、どのような機構で分裂し、どのような粒度分布をしており、微粒化した液滴群がどのような運動方程式で空間を蒸発しながら飛んで行くのか、いまだ解くことができない。

しかし、燃焼室内の一成分系の流れ、燃焼室内の空気流動、蒸発ガスの分布などはかなり正確に解くことができる。燃料の微粒化、それらの飛散、噴霧の蒸発過程、噴霧燃焼過程はいまだ理論的に記述できないので、次に示す現象論的モデルとほぼ同じ記述を燃焼室全体をメッシュに分け、全ての箇所ですべて計算を進めている。

2.3 現象論的モデル 燃焼領域、既燃ガス領域、噴霧領域等の現象面での複数領域を考慮して、その領域だけで、時間的変化を考えるものを現象論的モデルと呼んでいる。字に示すごとく、燃焼現象の全てを理論的に記述する代わりに、基礎実験を行い、現象を表す実験式を求めて、時間経過に応じた温度、圧力の変化に対応する基礎実験式を求めて計算を行う。

これまで多くの現象論的モデルが発表されてきたが、最近、学会等で発表されているものをあえて分類すると、次の3種類に分けることができよう。もちろん細かな点は発表者により異なるが、これらの詳細については、各発表論文を参照されたい。

- (1) 噴霧モデル⁶⁾
- (2) ゾーンモデル^{7) 8)}
- (3) 確率過程混合モデル⁹⁾

これらの概要について簡単に述べてみる。

(1) 噴霧モデル 噴霧の基本構成要素である燃料液滴の挙動をもとにして、更に噴霧の分散を考えに入れることによって熱発生率、局所酸素濃度、局所温度履歴を計算し噴霧燃焼時におけるNO_x、すすを中心とした燃焼生成物の生成過程をモデル化している。機関

の出力などは液滴の蒸発計算、燃焼割合の計算などの熱発生モデルで求め、ここで求めた温度や酸素濃度履歴をもとにNO_x、すす、およびCOなどの排出量を求めている。

(2) ゾーンモデル⁸⁾ 筒内のゾーンを空気ゾーン (Zone2)、着火遅れ期間中に形成される比較的混合気の均質度が高いゾーン (Zone1)、着火後に燃料を噴射しつつ燃焼が進行する拡散燃焼主体のゾーン (Zone3) などとゾーンを考え、更に PDF (Probability Density Function) を統合することによって、多段噴射にも、過渡運転時の計算も行おうとするものである。

(3) 確率過程混合モデル. 初期のこのモデルは最初燃料と空気が分離した状態から乱流混合によって遂次均一な状態に近づくまでの過程をディーゼル燃焼の主過程と捕らえ、流体塊が各瞬間においてとりうる状態を確率で表現して、その時間推移を調べるというもので、乱流混合は任意の2つの流体塊の間で等しい確率で衝突することによってなされ、その結果算術平均の状態を2個の流体塊がつくられるとしている。この衝突は定まった頻度で起こるとし、一連の経過により最終的には均一な熱力学的状態に近づくさまを調べる。また、モデルの前提として十分に発達した一様乱流場で幾何学的構造をもたないこと、および各流体塊は各瞬間常に化学的平衡が成り立つことを仮定している。

3. 燃焼モデルに要求される項目

どの燃焼モデルを使用して、バーチャル・エンジンを設計するかは、モデルの使い良さであろうが、次にあげる、計算結果と測定結果がどのくらいの精度で一致するか、計算時間は一サイクルの計算でどのくらいかかるか、また計算に使用する、仮定、定数はどんなものがあるのかなどを検討する必要がある。

3. 1 精度 エンジンシミュレーションは入力条件として、エンジンの緒元と運転条件を入力して、計算を行うが、結果が測定値とどのくらいの精度で一致するかが問題であろう。

3. 2 計算時間 計算時間は短ければ短いだけよいが、詳細多次元モデルでは一サイクルの計算に数時間から数十時間かかる。それに比べ現象論的モデルでは数分で計算が可能で、後に述べる HIDECS では3秒以内で一サイクルの計算が可能になった。

3. 3 モデル定数 計算モデルには、まだ実験的にも解決されていない部分があるので、それらには仮定をもうけてモデル定数を導入して計算を進めなければならない。これらの値は少なければ少ないほどよい。

4. ディーゼル燃焼の現象論的モデル

ここでは、現象論的モデルのうち、噴霧モデルの一つである HIDECS の最近の進展とその概要について紹介する。このモデルを最初に発表したのは1976年のSAEであった¹⁰⁾。それ以来、改良、開発を試みて、現在では正味の一サイクルの計算時間が3秒以内という驚異的な短時間の計算時間で、出力性能 (馬力、熱効率など)、排気性能 (すす、NO_x、COなど) が計算できる。統計熱力学の概念を取り入れ、セルのn次元位相空間を考えることにより、実験的な検証が困難な領域の機関性能と排ガス性能を予測することができる。燃料噴霧領域を互いに独立したセルで定義し、各時刻 (各クランク角度) における液滴/燃料の蒸発/空気との混合/着火/燃焼/エミッションを各セル毎に計算する。ただし、セル間の相互干渉、混合はないと仮定する。

噴霧の粒子径: 噴射条件 (噴孔径、噴射圧など) が異なったときの実験式より求める。

ペネトレーション: 噴射条件の変化による実験式より計算する。

蒸発計算: 単滴の蒸発式を用いる。

噴霧中への空気導入率: 各種条件に応じた空気導入量を計算する。

着火おくれ: 早期噴射の場合は改良 Schreiber モデル¹¹⁾、それ以外はアレニウス型表示を使った Lievengood & Wu モデル¹²⁾ で計算。

燃焼計算: NO 以外は10種類の素反応計算を行う。

熱損失: Woschni の計算式による¹³⁾。

すす: 生成と酸化を Hiroyasu モデルで計算¹⁴⁾。

NO: 拡大 Zeldovich モデルで計算。

などの物理モデルにより、各セル内では均一温度、濃度、圧力として計算し、筒内全体はそれらを合計する。マルチゾーン0次元モデルであることから、その応答性は非常に早く、1サイクル3秒以内で計算結果を導き出すことが可能。さらに、コモンレール噴射システム (多段噴射、高圧噴射など)、EGR システム、PCI 燃焼システム、早期噴射、遅延噴射にも対応して計算することができる。

5. 現象論的モデルによる計算例

噴霧を主体にした現象論的モデル (HIDECS) による計算例を示す¹⁵⁾。

計算対象としたエンジン諸元を表1に示す。機関運転条件は、回転数1000rpm、噴射圧90 MPa、噴射時期-3 deg. ATDC、噴射角度155°、EGR率0%である。以下に噴射量を変化させた場合の計算結果と実験結果を

表1 エンジン諸元¹⁵⁾

ボア×ストローク	115mm×125mm
コン・ロッド長さ	118mm
圧縮比	16.5
燃焼室形状	Φ62mm リエントラント型
噴射ノズル	Φ0.16mm×8孔
スワール比	1.29
吸気弁閉時期	-135 deg ATDC
排気弁閉時期	127 deg ATDC

図2 筒内圧と熱発生率の比較¹⁵⁾
(噴射量: 25.9 mg / stroke)

示す。

図2は噴射量が 25.9 mg の場合の筒内圧力および熱発生率を示したものであり、実線が計算結果、破線が測定結果である。これよりモデルに含まれるモデル定数を適切に設定すると、シリンダ内の燃焼状態をかなりの精度よくシミュレートできることがわかる。ただし、5 deg. ATDC 以降に熱発生において、測定結果と計算結果に一部一致がみられないが、これは対象としているエンジンの燃焼室形状がリエントラント型であるため、燃焼後半に逆スキッシュの影響により、空気導入が促進されることで燃焼期間が短くなるのに対し、シミュレーションではシリンダ内のこのような気流の影響を考慮していないためであろうと考えられている。

図3は噴射量を 15.9 mg, 25.9 mg, 51.9 mg と変化させた場合における図示平均有効圧、筒内圧力のピーク、熱発生率のピーク、着火遅れ、NO_x, Smoke を実験結果と比較したものである。これより噴射量を変化させた場合において、機関性能やNO_xを高精度で計算できていることがわかる。ただし Smoke については、比較できる実験結果が無いため計算結果のみを示している。

機関運転条件が回転数 1000rpm, 噴射圧 90MPa, 噴

図3 燃料噴射量の変化におけるエンジン性能と排気性能の比較¹⁵⁾ 図4 EGR率の変化におけるエンジン性能と排気性能の比較¹⁵⁾

射時期-3deg. ATDC, 噴射角度 125°, 噴射量 25.9mg の場合に、EGR 率を変化させた際の計算結果と測定結果の比較を示す。図4はEGR率がそれぞれ0%, 27%, 46%における図示平均有効圧、筒内圧力のピーク、熱発生率のピーク、着火遅れ、NO_x, Smoke を示したものである。これより計算結果は、EGR率27%におけるNO_xの値が若干低くなっているもののその傾向は測定結果と良く一致しており、Smokeとのトレードオフ関係も十分表現できている。また、図示平均有効

圧に関しても EGR 率の違いをうまく表現できており、モデル定数を固定したまま比較的精度良く、燃焼を模擬することができ、これを使用することによりバーチャル・エンジン設計が可能になったと考えられる。

6. 更なる発展のために

これまで述べてきたように、現象論モデルの基本は（詳細多次元モデルも同じであるが）ディーゼル燃焼の実験的理解にある。以下のことが実験的に解明されれば、ここで目的とする「バーチャル・エンジン設計工学」の更なる進展が望めよう。

1) 噴霧の壁面衝突後の挙動：最近の小型エンジンはボアがかなり小さくなったことと、高圧噴射が進んだので、噴霧の大部分が液中で壁面に衝突する。壁面衝突後の挙動の解明が急がれる。

2) 噴霧中への空気導入率の解明：ノズルから噴射された噴霧中への周囲からの空気導入率、壁面衝突後、着火後の空気導入率を知る必要がある。噴霧中への空気導入率と燃焼率は密接な関係がある。しかし、これらの測定法、測定結果についてはほとんど皆無である。

3) 壁面からの熱移動問題：壁面からの熱損失問題。一時かなりの論文が発表されていたが、最近ほとんどみられない。熱損失がわからないと正味の熱発生率が計算できない。

4) 着火遅れ：実際のエンジンでは着火遅れ期間中、混合気の濃度、雰囲気温度、圧力が時々刻々異なるが、モデリングでは準定常として解いている。

5) すすの生成と再燃焼：すすの生成と再燃焼に関する実験的考察が十分でなく、排気の問題として、一番遅れている分野であり、更なる研究と努力が望まれる。

6) Prompt NO の計算：NO 生成は Zeldovich 機構によるものと、Prompt NO によることは知られており、Zeldovich 機構による NO 生成は、ほぼ完璧に解くことができ、反応温度が正確であれば実験と計算とも良く一致する。しかし Prompt NO については、一部計算された報告はあるが、モデリングの中にはまだ組み込まれた例はない。Prompt NO が 30% ぐらいとの報告もあるので、これらの研究が望まれる。

以上に示したような問題の解明が急がれる。あまり複雑でなく、比較的簡単な実験式で、現象をうまく予測表現する実験式が必要であろう。

7. まとめ

バーチャル・エンジン設計工学の一端として、ディーゼル燃焼のシミュレーション、主として現象論的モ

デルについてその概要を示し、その中の一つとして、筆者らが行っている、噴霧モデルについて、その概要と計算例を示した。最近のこのモデルは、計算時間が出力性能、排ガス性能の計算を含めて、ノートパソコンを用いての計算で 3 秒以下という驚異的な計算時間までになっている。しかも実験結果と計算結果が比較的良く一致するので、バーチャル・エンジン設計として有用であろうと思われる。

参考文献

- 1) Wiebe, I., Verlag der Akademie der Wissenschaften der USSR, Moscow(1956)
- 2) Spinski, J., Uyehara, O. A. Myers, P. S., ASME Paper 68-DGP-11(1968-5)
- 3) Bulter, T. D., ほか 3 名 Los Alamos Sci. Report LA-8129-MS(1979)
- 4) Gosman, A. D. and Johns, R. J. R. SAE Paper NO. 800091(1980)
- 5) Wakisaka, T., et al., COMODIA 2001, (2001), 426
- 6) 廣安, 佐古, 自技会講演前刷, 2009 春期大会, 講演番号: 157-20095245
- 7) Kuleshov, A. S., SAE Paper 2006-01-1385
- 8) 稲垣ほか 4 名, 自技会論, 38, 5, 2007-9, p. 71
- 9) 池上, 塩路, 日機論, 46 巻 404 号 B 編 (昭 55-4)
- 10) Hiroyasu, H. and Kadota, T. SAE Trans. 85 NO. 760129(1976)
- 11) Schreiber, M., et al., Proc. 25th Symp. Combustion (1994), 933-940
- 12) Lievengood, J. C. and Wu, P. C., Proc. 5th Symp. (Int.) Comb. (1955), p. 347
- 13) Woschni, G., SAE Trans. Vol. 76, 1968
- 14) 廣安ほか 3 名, 自技論, 10, 1976, p. 3.
- 15) 荒戸ほか 6 名 自技会論文集 NO. 209-20065759

著者紹介

廣安 博之

東北大学大学院博士課程修了
(工学博士)

広島大学工学部名誉教授

元近畿大学工学部教授

現：(有)ヒロ技術研究所代表

専門分野:ディーゼル燃焼工学,
液体の微粒化