

〔総合講座ながれより〕

内燃機関におけるシミュレーション技術

Computer Simulation Technology for Internal Combustion Engines

*日産自動車(株)総合研究所 久保賢明[†]
Masaaki KUBO

1 はじめに

近年、コンピュータの目覚ましい発達とともに CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値計算流体力学) の手法が盛んに用いられるようになってきた。とりわけ市販の汎用流体解析ソフトの登場によってより手軽に計算できるようになってきたため、製造業を始めとした多くの分野において設計や研究に活用されるようになってきた。しかし、実際には例えば乱流にあるモデル化した式を取り入れるなど、計算時間の短縮や解の収束性向上のために計算精度を犠牲にしている場合もあり、必ずしも万能なツールであるとは未だ言えないのが現状である。とはいえ、活用できる範囲を明確にして賢く用いれば強力なツールとなることはいまや多くの人たちに認められつつあるといっているだろう。ここでは、CFD の現状での使われ方、とりわけ筆者はガソリンエンジンに携わっている関係から、内燃機関における CFD に限定し、その現状について概説する。

2 内燃機関における CFD 技術

内燃機関において CFD の活用範囲は広く部品単位にまで話をすると実に多くの部分で活用されているが、ここではエンジンの性能を予測するために使われる話に限定する。この場合、大きく分けて、(1)筒内流動、(2)噴霧、(3)燃焼(排気)に分けられる。多くの分野で用いられているいわゆる

“ながれ”の計算は(1)の筒内流動の計算であり、(2)噴霧、(3)燃焼(排気)はいわゆる物理モデルを基本的な流れの計算の(1)に組み込む形で使われる。以下にそれぞれについて説明する。

(1) 筒内流動

基本的には、圧縮性流動場を表す Navier-Stokes の式を用いて後に示す噴霧や燃焼に用いる化学種の保存式を加えて計算する方法である。表 1 にその例を示す¹⁾。実際に計算機内で解く場合には計算領域を有限の格子に分割し、離散化し上記方程式を解いてゆくことになる。この離散化する方法には差分法 (FDM: Finite Differential Method)、有限体積法 (FVM: Finite Volume Method)、有限要素法 (FEM: Finite Element Method) がある。ここでは、エンジンシミュレーション用の格子として図 1 に例を示す。

内燃機関の筒内流動のような極めて乱れの大きな場においては、非常に微小な渦が多く発生していると考えられるが、実際にこの渦を表現する大

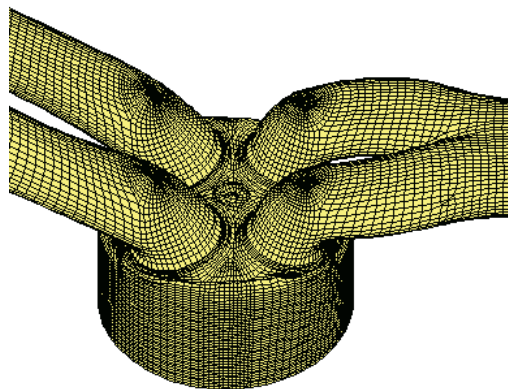


図 1 格子作成例

* 〒237-8523 横須賀市夏島町 1 番地

[†] E-mail: m-kubo@mail.nissan.co.jp

表 1 基本方程式

	時間項	対流項	拡散項	外力・その他
(質量保存)	$\frac{\partial \rho}{\partial t}$	$+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)$	$= 0$	
(運動量保存)	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)$	$+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)$	$= -\frac{\partial}{\partial x_i} p$	$+\frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij}$
(エネルギー保存)	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho l)$	$+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i l)$	$= -\frac{\partial}{\partial x_i} h_m J_i + \tau_{ij} \frac{\partial}{\partial x_i} u_i$	$+\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial}{\partial x_i} T \right) - p \frac{\partial}{\partial x_i} u_i + \dot{Q}_c$
(化学種保存)	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_m)$	$+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_m)$	$= -\frac{\partial}{\partial x_i} J_i$	$+\dot{R}_m$
(状態方程式)	$p = \rho RT$			

ここで、 u_i :速度成分、 p :圧力、 x_i : i 方向距離、 l & h :エンタルピー、 K :熱伝導率、 Y_m :化学種 m の質量分率、 D :物質拡散係数、 J_i :拡散量 [$J_i = \rho D \sum \{h_m \partial (\rho m_i / \rho) / \partial x_i\}$], τ :温度、 $\dot{Q}_c$:化学反応による生成熱量、 R :化学反応による生成量、 ρ :密度、 τ :粘性によるせん断力 [$= f(\eta_i)$], η_i :乱流有効粘性係数、 $i, j (= 1, 2, 3)$: x, y, z 方向成分、 m :化学種の成分

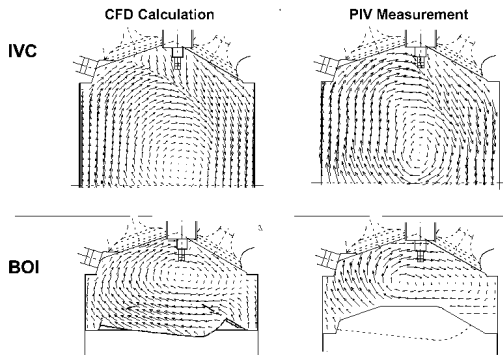


図 2 乱流モデルを用いた計算例
(実験結果との比較)

きさの格子を形成し、計算をすることはいくら計算機的能力が向上してきた現在においても極めて困難である。このように乱流を伴う流れ場については、現在ほとんどの計算で何らかの乱流モデルを使用している。もちろん研究レベルでは乱流モデルを用いない方法 (DNS: Direct Numerical Simulation) も取り組まれている。最も一般的で解の安定性も良いのが $k-\varepsilon$ モデルと呼ばれているもので、ほとんどの汎用流体解析ソフトでは標準的に用いている。とりわけエンジンのような場では、解の安定性の良さから多く用いられている。この方法で計算した例を図 2 に示す²⁾。右半分に実際の可視化エンジンにて PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて流動場を計測した結果が示されている。これはサイクルごとのばらつきを平均化して示しており平均化すると流動

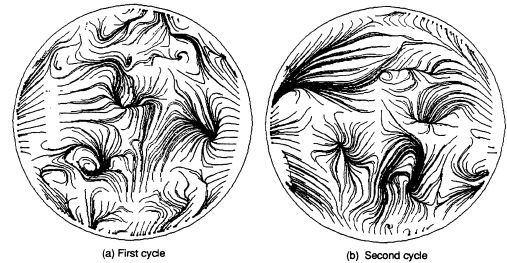


図 3 LES を用いたシリンダ内流れの計算例
(サイクルごとの違い)

場を比較的精度よく計算できていることがわかる。しかし、実際のエンジンは乱流の非常に強い場でありかつサイクルごとの変動も大きい。一方この $k-\varepsilon$ モデルでは平均化されて計算されてしまう。これに対して、ある程度の渦スケールを捕らえるいわば中間的な解法である LES (Large Eddy Simulation) を用いた試みも行われている。この手法によって、サイクルごとに変化する流れ場の様子まで捉えることができるようになってきた。図 3 にその一例を示す³⁾。

(2) 噴霧の物理モデルと混合気シミュレーション技術

近年、ガソリンエンジン・ディーゼルエンジンともに燃費の向上と排気性能の向上を狙って、エンジンの燃焼室に直接燃料を噴射する直噴エンジンが開発され実用化されている。これをシミュレーションで行うには、気体の中に燃料という液体を噴射するいわゆる気液 2 相流を解く必要が

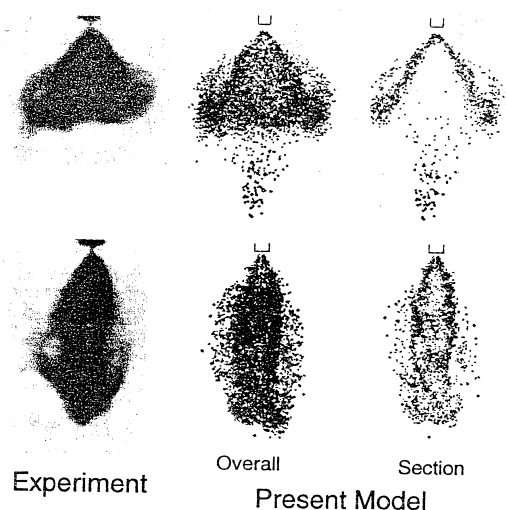


図4 DDMによる噴霧シミュレーション
(上;周囲圧力大気圧,下;周囲圧力0.6MPa)

ある。それに伴い、噴霧の物理モデルを用いる、一口に噴霧モデルといっても噴霧が形成される過程、微粒化した液滴が気化する過程、噴霧が壁面に衝突し付着したり跳ね返ったりする挙動を全てモデル化する必要があり極めて複雑である。とりわけ、噴射弁によって微粒化するメカニズムが違うためにそれを表すために、液体の状態から分裂して微粒化する過程の分裂モデルや噴霧の内部で衝突することをモデル化した衝突モデルといったものがいくつも提案されている。微粒化した粒子の取り扱いについては、一般的に粒子を全て表現することは非常に困難なので噴霧粒子をいくつかのグループに代表させるパーセルという概念を導入することにより比較的簡単に計算している。計算はこの代表液滴に質量や、運動量、エネルギーなどの情報を与え、保存式をラグランジュ的に解いてゆくいわゆる DDM (Discrete Droplet Model) 法が主として用いられている。この方法で噴霧のシミュレーションを行い実験結果と比較した例を図4に示す⁴⁾。これは、燃料噴射弁として直噴ガソリンエンジンに比較的良く用いられている渦巻き噴射弁(スワールインジェクタ)の例である。このように、いくつかの仮定を置いているものの、ある程度噴霧形状を計算で予測でき

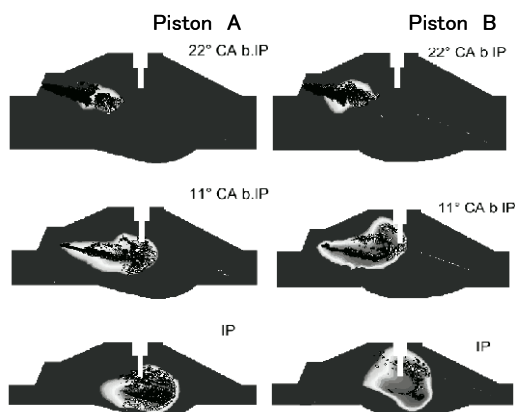


図5 ピストンの形状違いによる混合気形成の違いを計算した例(2000rpm,IMEP:2.0bar)

るようになってきている。図5は(1)での流動場に(2)の噴霧を入れたときに形成される混合気形成場を計算で求めた結果である³⁾。直噴ガソリンエンジンの開発においては、火花点火する位置において適切な濃度の混合気分布しており、なおかつ不必要な燃料混合気を燃焼室内に拡散させないことが低燃費と排気性能を実現するキーファクターとなるので、これらの混合気解析がある程度予測できれば、設計期間の短縮や、設計開発業務における実験に取って代わるいわゆる計算機実験の世界に大きく近づくことになる。現在、まったく取って代わられる精度はないにしてもある程度の予測ができるレベルにまで来ていると考えられ、多くの自動車会社ではこの技術を活用している。(3) 燃焼(排気)の物理モデル⁵⁾

燃焼のモデルに関しては、燃焼の形態によって大きく2つに分けられる。1つはディーゼル燃焼に代表される拡散燃焼を主とした燃焼で高温高压場において酸素と出会うとアレニウス型の化学反応を起こし自着火するモデルであり、この反応速度に影響を与えるものによっていくつかのモデルが提案されている。ディーゼル燃焼において広く用いられており、比較的限られた運転条件においてはある程度の精度が得られ、NOxの予測も可能となってきている。もう1つはガソリンエンジンのような火花点火エンジンに代表される火

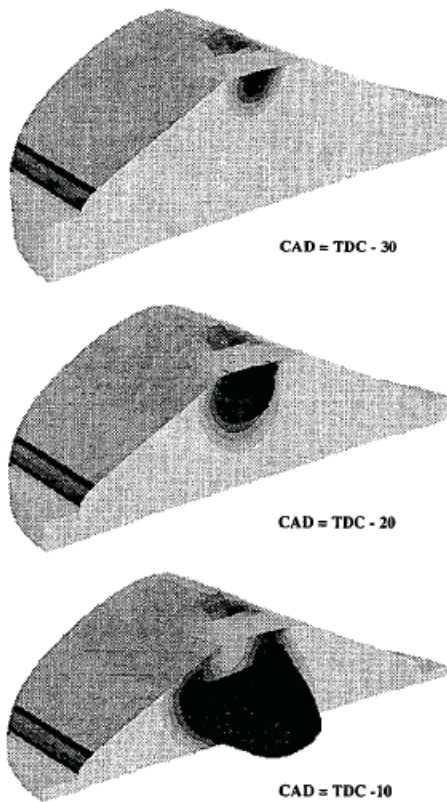


図6 火炎伝播シミュレーションの例

炎伝播を主とした燃焼で予混合乱流燃焼モデルと呼ばれている。これについては実際のエンジンの観察から極めて強い乱流における乱流火炎の様相を呈しており、火炎先端部は極めて複雑なしわ構造を有しており、またサイクルごとのばらつきも大きいことからそのモデル化が極めて困難である。その中で、モデル化した例として乱流火炎面は局所的に層流火炎面で成り立ち、乱流火炎速度を火炎の総面積と層流火炎速度の積として表す Flamelet の概念や、しわを定量値としてしわ度 Σ の輸送方程式を解く、すなわち Coherent Flamelet Model⁶⁾ の概念に基づくモデルが多い。しかし、いずれの場合も、未燃炭化水素の発生源とされる壁面における火炎のクエンチは計算されず、逆に火炎が壁面近傍で増速してしまうといった問題点が残っている。この問題があるため、研究レベルでは解決されたモデルの開発が行われて

いるが、実用レベルにまでは至っていないのが現状である。

3 おわりに

CFD が内燃機関に使われ始めて 20 年以上の月日が経ったと言われているが、ここ数年においてそのシミュレーション技術は飛躍的に向上してきた。そして、その背景には冒頭で述べたコンピュータの急速な進歩もさることながら、常に新しい乱流モデルの開発や物理モデルの開発に多くの研究者が注力し、高精度化された物理モデルが出てきたこともあると思われる。燃焼モデルに関しては若干実用化には問題が残っているものの研究レベルでは多くのモデルが開発されており近い将来にエンジンの設計に活用され、完全な計算機実験が実現し、非常に短い開発期間で高性能エンジンの設計ができるようになるかと筆者は確信している。

引用文献

- 1) 高木：CFD をベースとした内燃機関の CAE モデルの開発と適用の現状, *Engine Technology* **3** (2001) 52-60.
- 2) K. Naitoh et al. : Large Eddy Simulation of Premixed-flame in Engine based on the Multi-Level Formation and the Renormalization Group Theory, SAE920590.
- 3) M. Breuer et al. : Tumble Combustion System for Direct Injection Gasoline Engine *JSAE Spring Convention Proceedings* No.40-01 20015305.
- 4) M. Nagaoka et al. : A Deforming Droplet Model for Fuel Spray in Direct-Injection Gasoline Engines SAE2001-01-1225.
- 5) 西脇：エンジン燃焼のモデリングとシミュレーション, 日本機学会関西支部 第 2 回秋季技術フォーラム (2001).
- 6) J. M. Duclos et al. : 3D Modeling of Combustion and Pollutants in a 4-Valve SI Engine; Effect of Fuel and Residuals Distribution and Spark Location SAE961964.