# 燃料噴霧シミュレーションの現状と課題

# 高木 正英

# The Present Situation and Issue on Fuel Spray Simulation

by

# Masahide TAKAGI

## 1. はじめに

ディーゼル・ガソリンエンジンにおけるシリンダ 内の3次元噴霧・燃焼シミュレーションは、現在研 究・開発のツールとして使用に耐え得るレベルまで 来つつある。しかし, CAD (Computer Aided Design) からの格子生成等の周辺環境の急速な進歩がある一 方, 市販のシミュレーションソフトを買ってくれば すぐに問題の解答が得られるといった,「万能ツー ル」のレベルにあるとは言い難い。全ての物理現象 がシミュレーションツールとして記述されている訳 ではないことや各種モデルの精度が十分でないこと から、要求されている問題を計算に導入するための 単純化や,条件の設定,計算結果の妥当性の判断は, 未だに使用者の知識や能力に依存しているのが現状 である。そのため、レーザ計測や可視化等による実 験計測側からのシリンダ内現象の把握や、更なる現 象に即したシミュレーションモデルの高度化が望ま れている。

インジェクタからの燃料噴射に関しては DDM (Discrete Droplet Model) もしくは LDEF (Lagrangian Droplet Eulerian Fluid) 法と呼ばれる 噴霧モデルが用いられることが一般的である。しか し,DDM 自体には液滴を離散的に液滴群(パーセル) をラグラジアン的に扱う(いわゆるニュートンの運 動方程式 F=ma を使う)という意味合いしかなく, 噴霧としての取り扱いを考えた時には液滴の分裂, 衝突・合体,蒸発,エンジン内であれば壁面への 衝突等については新たにサブモデルを導入しなけ ればならない。しかし,各モデルは想定された現 象を基にモデル化されているため,計算の対象が そのモデルの想定した現象,条件と合致している のかを考えた上でモデルを選択する必要がある。

本稿ではエンジンシリンダ内噴霧・燃焼シミュ レーション及びサブモデルの現状と課題を示し た後,著者の行った計算結果例を示す。

## 2. エンジン内の物理現象とモデリング

ディーゼルエンジンシリンダ内では、1)空気導入(EGR(Exhaust Gas Recirculation;排ガス再 循環)含む場合も有り)、2)燃料噴射、微粒化、 3)蒸発、4)燃料-空気混合気形成、5)点火、6)燃 焼、7)排気の順で現象が進行している。シミュレ ーションに関しては 1)の空気導入、シリンダ内流 れや乱れをより正確に再現する研究<sup>1)</sup>から、燃 焼・排気までの全てを総合して検討している例<sup>2)</sup> がある。

これらの現象をモデリングする上での注意す べき点は、1)空気導入では、非等方性の高い乱流 場に適用できる乱流モデルであること、またシリ ンダ内の圧縮・膨張を考えると、空気及び排気ガス の密度が空間的には均一で時間的には不均一(非定 常)な場が解けることが必要になる。例えば、圧縮 比(ピストンの下死点(一番下)と上死点(一番上) での体積比)が 15 の場合、密度も元の密度の 15 倍になる。

2)燃料噴射,微粒化では、ノズル内キャビテーシ ョンの影響及びノズル出口での境界条件,噴出直後 の液柱及びその後の液滴微粒化, 粒径分布の確定, 3) 蒸発については、軽油、重油に適用できる多成分 系の蒸発モデル,単一液滴から液滴群への蒸発モデ ルの拡張,4)燃料-空気混合気形成では、液滴-気 相の相互作用,液滴の抗力モデル,5)点火・燃焼に ついては,詳細化学反応機構の研究は行われている が、燃焼モデルの開発までは至っていないことが挙 げられる。7)排気については, NOx (拡大 Zeldovich 機構)以外の排気,とりわけ PM(もしくは dry soot) モデルについては定量化の段階には至っていない。 また,壁面衝突や液滴の合体については更なる改良 が必要であり,シリンダ内の流れ(縦渦;タンブル, 横渦;スワール)が強い場での混合気形成やサイク ル変動(一サイクルごとの空気流動,混合気形成, 燃焼(圧力履歴)のバラツキ)などは、研究は行わ れているが未だ決定打と呼べる解決策らしきもの はない。

#### 3. 噴霧モデル

ディーゼルエンジンは、シリンダ内の高温高圧の 雰囲気中に高噴射圧力で燃料が噴射され燃焼が起 こる。現状のディーゼルエンジンでは、燃料が噴射 している最中に同時に燃焼が生じているが,燃料消 費率や有害排気物質の低減の観点から基本的には できるだけ燃焼が起こる前に燃料と空気は可能な 限り混ぜておきたい。高温高圧雰囲気下では、火は 「勝手」に着いてしまうので, 人為的に制御できる ものは燃焼 (火が着く)前にどのように燃料と空気 をシリンダ内に配置するか、どのように混合気形成 を行うかということになる。そのため、ディーゼル エンジンでは燃料ー空気の混合気形成に関する検 討が長年に渡って続けられている。このことを日常 生活で考えてみると、水撒きをする時にホースから 出る水を効率良く庭に撒くには、ホースの先を摘ん だり、左右に振ったり、霧状になるようなアタッチ メントを付けたりすることに似ている。

以下に混合気形成過程を表す微粒化モデルとし て、分裂モデル、抗力モデルについて概説する。

## 3.1 分裂モデル

液滴あるいは液膜の分裂は噴霧形成において最 も重要な過程であり、そのため分裂モデルの研究 は数多く行われている。分裂モデルは大きく分け て二つに分類でき、一つは液滴周囲から小さな液 滴が剥ぎ取られていくような、境界層剥離や空力 せん断等による表面波不安定成長解析から求めら れるモデル、もう一つは液滴全体が振動し、一定 時間後に全体が分裂する Bag 分裂と呼ばれてい るような液滴の振動タイプのモデルである。

表面波不安定タイプの分裂は,基本的には液柱, 液膜を対象に考えられており, Reitz の Wave Breakup model<sup>3)</sup>, Kelvin-Helmholtz 不安定と Rayleigh-Taylor 不安定の両者をモデル化した KH/RT model<sup>4)</sup>, 液膜の線形安定性解析から求め られた LISA (linearized Instability Sheet Atomization) model<sup>5)</sup>等がある。

液滴振動タイプでは,液滴変形とばね-質点系 の振動が相似であるとした TAB (Taylor Analogy Breakup) モデル<sup>6)</sup>,液滴半球の重心運動で変形 を表した DDB (Droplet Deformation Breakup) モ デル<sup>7)</sup>,液滴を回転楕円体と仮定した SSP (Synsethized Spheroid Particle) モデル<sup>8)</sup>, OSD (Oscillating Spheroidal Deformation) モデル<sup>9)</sup> 等がある。

#### 3.2 液滴抗力モデル

噴霧計算における液滴の運動方程式(ニュートンの運動方程式)は外力として抗力のみを考慮す ると,以下の式で表される。

$$m\frac{du_p}{dt} = C_D \frac{1}{2} \rho_g U_{rel}^2 A_f \tag{1}$$

mは液滴質量, up は液滴速度, CD は抗力係数, Pg は気体密度, Urel は気液相対速度, Af は進行方 向に垂直方向の断面積である。最も一般的なモデ ルは液滴を剛体球と仮定する方法で,液滴のレイ



Fig. 1 Droplet deformation in the TAB model

ノルズ数(Red=pgUrelDp/µg; Dp 液滴直径, µg 気体粘 性係数)を用いて

$$C_{D} = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_{d}} \left( 1 + \frac{\text{Re}_{d}^{2/3}}{6} \right) & \text{Re}_{d} \leq 1000 \\ 0.424 & \text{Re}_{d} > 1000 \end{cases}$$
$$A_{f} = \pi r^{2} \qquad (3)$$

と表される。しかし,実際の液滴は飛翔中に形状が 変化する。液滴振動タイプの分裂モデルを使ってい れば,時々刻々の液滴の変形量を計算しており,そ れを基に液滴にかかる抗力も変更できる。Liu ら<sup>10)</sup> は Fig. 1 に表されるように, TAB モデルの変形量 y(=2x/r)が 0 の時には球の抗力係数を, y=1 の時には 薄円盤の抗力係数として,その間の抗力係数は y に 対して線形近似したモデルを提案している。

$$C_{D} = C_{D0} \left( 1 + 2.632 y \right) \tag{4}$$

*Coo*は剛体球の抗力係数である。また, TAB モデル の変形量に合わせて忠実に抗力を計算するモデルも ある<sup>11)</sup>。抗力係数は液滴の変形, Re 数に合わせて, 解析解,実験結果及び剛体球の *Coo*を用いた線形近 似を使い分けている。液滴の断面積 *A*<sub>f</sub> は TAB モデ ルの変形量 y に対して,液滴が回転楕円体となって いると仮定して,

$$A_{f} = \pi \frac{r^{2}}{1 - 0.5y}$$
(5)

としている。また、液滴密集度による抗力低減効果 についても検討されている<sup>12)</sup>。

### 4. ディーゼル噴霧への適用

ここでは分裂モデルには後述する改良した TAB モデルを,液滴抗力モデルには式(5)の液滴変形 を考慮し,併せて液滴の密集度の影響を含んだモデ ルを用いて非蒸発ディーゼル噴霧に適用した事例 を示す。TABモデルからの改良点は分裂時間を導入 したことである。通常の TABモデルでは,変形量 y が 1 以上になったときに分裂が発生するとしてい る。しかし,これは実際の現象を表していないこと が知られており,新たな条件として以下の式に示す 分裂時間 tou を経過していることを付加している。

$$t_{bu} = C_{ZZ} \sqrt{\frac{\rho_I}{\rho_g} \frac{D_\rho}{U_{rel}}}$$
(6)

Czz は分裂形態に関わる定数, pl は液体密度である。 この分裂時間に併せて,分裂後の液滴径,半径方向 付加速度を元のモデルから分裂時間を組込んだ形



Fig. 2 Schematic diagram of droplet arrangement





に変更している。

液滴にかかる抗力については密集度による低減 効果を考慮した。これには、Virepinteの式<sup>13)</sup>を用 いた。この式は、液滴を上方へ打ち上げた時の液 滴列での抗力低下を求めた実験から導いている。

 $C_D / C_{D0} = 1 - (1 - 0.14) \exp\{-0.053(C - 1)\}$ (7)

$$C = \frac{L_D}{D_p} \tag{8}$$

CはFig. 2に示す液滴中心間距離*L*<sub>D</sub>と液滴径の比 である。なお,式(7)は,気相の計算格子(*x-y-z* 座標系,最小格子サイズ 1mm,総格子点数 45738) とは別に*r-Z*座標系で, *Δr*,*ΔZ*=250μm とした時の 空間内で定義し,液滴径はその空間内でのザウタ 平均粒径(総体積を総面積で割ったもの)を用い た。

抗力低減効果を調べるため,式(7)の組込み の有無による噴霧形状と噴霧内空気過剰率を Fig. 3,4 に示す。噴霧体積は実験<sup>14)</sup>と同様に平行入 射光の透過率 0.8 以下を噴霧と定義し,その最も 先端を到達距離としている。噴霧形状から,抗力 低減効果が半径方向の広がりを大きくし,噴霧到 達距離を若干大きくすることがわかる。これは噴 孔から鉛直方向速度のみを持って噴出した液滴が 分裂モデルによって生じた半径方向の進行を維持 しやすくなることが原因であると考えられる。ま た,その効果によって Fig.4 に示される空気過剰 率は,実験結果とほぼ一致した結果が得られた。



Fig. 4 Effect of drag reduction on excess air ratio

噴霧全体のザウタ平均粒径 D<sub>32</sub>は,式(7)を用いる 方が小さくなる結果となるが,抗力が小さくなるこ とは気液運動量交換を行われにくくすることを表し ているため,相対速度を大きく見積もり,分裂が生 じやすくなることが原因であると考えられる。

次に噴射圧力を変更した時にも,このモデルが現 象を再現できるかについて調べた。Fig. 5 には噴霧 到達距離,空気過剰率の時間変化, Fig. 6 には噴霧 形状(Pin=55MPaの場合,噴射開始後 tinj=2.0, 3.5ms, Pin=133MPa の場合, tini=1.0, 2.2ms) を示す。噴霧 形状は、噴射圧力に依らず若干半径方向の広がりを 大きく評価しているように見える。噴射圧力が高く なると、到達距離、空気過剰率が大きくなることは 再現できている。到達距離は実験結果より若干小さ く評価されているが、噴射圧力による差は実験、計 算ともほとんど変わらない。空気過剰率は Pin=133MPa の場合,実験では噴射終了後に急激に 大きくなっているが、計算では実験結果より若干早 い時間から大きくなり始めている。以上のように, 噴霧形状,到達距離,空気過剰率とも実験との差異 はあるが、抗力低減効果を組み込んだ結果は、噴射 圧力を変更しても現象をほぼ再現している。

#### 5. おわりに

エンジンシリンダ内のシミュレーションについて 現状,課題及び著者の計算結果を概説したが,現象 そのものに関するモデル化の段階から未だに多くの 問題を抱えている。その解決のためには,計算のみ ならず実験による現象の理解も重要になってくる。 なお,紙面の都合で記載できなかったその他のモデ ル等のシリンダ内 CFD の概説を5編<sup>15)~19)</sup>ほど参考 文献として掲載した。本文によってシミュレーショ ンに関して少しでも興味の持てるものになれば幸い である。



Fig. 5 Temporal changes of spray tip penetration and excess air ratio



Fig. 6 Spray shape of each injection pressure

#### 参考文献

- 1)寺地他,定常エンジン吸気流れに対する各種乱 流モデルの考察,自技会講演前刷 No.96-05, 20055663
- 2)例えば, S. Singh, et. al., Validation of engine combustion models against detailed in-cylinder optical diagnostics data for a heavy-duty compression-ignition engine, Int. J. of Eng. Research, Vol. 8, No.1 (2007) 97

- 3)R. D. Reitz, Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays, Atomisation and Spray Technology, Vol.3, No.4 (1987) 309
- 4)M. A. Patterson, et. al., Modeling the effects of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine Combustion and Emission, SAE Paper 980131
- 5)D. P. Schmidt, et. al., Pressure-Swirl Atomization in the Near Field , SAE Paper 1999-01-0496
- 6)P. J. O'Rourke , The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup, SAE Paper 872089
- 7)E. A. Ibrahim, et. al, Modeling of Spray Droplets Deformation and Breakup , AIAA Journal of propulsion and power, Vol.9, No.4 (1993) 652
- 8)K. Naitoh, et .al., Synthesized Spheroid Particle Method for Calculating Spray Phenomena in Direct-Injection SI Engines, SAE Paper 962017
- 9) 永岡,空力変形する単一液滴の非線形だ円体振動 モデル,機論 B 66-647 (2000-7) 1885
- 10)A. Liu, et. al., Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays, SAE Paper 930072
- 11)M. Takagi, et. al, Modeling of a hollow-cone spray at different ambient pressures, Int. J. of Eng. Research, Vol. 5, No.1 (2004) 39

12)高木他,機論 B 投稿中

- 13)J. F. Virepinte, et. al., Experimental and numerical investigation on the drag coefficient of non-evaporating and burning monodispersed droplet streams, Eight international conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS2000, CDROM 1289-1296
- 14)山根他,非定常濃噴霧の微粒化特性と空気導入
  特性に関する研究,機論 B58-550 (1992) 1955
- 15)永岡,ポート噴射ガソリン機関における燃料挙動の三次元シミュレーション,豊田中央研究所 R&D レビューVol.33, No.2(1998.6)23-35 http://www.tytlabs.co.jp/japanese/review/rev33 2pdf/332\_023nagaoka.pdf
- 16)久保,内燃機関におけるシミュレーション技術, ながれ 21(2002)161-164
- http://www.nagare.or.jp/nagare/21-2/21-2-s01. pdf
- 17) エンジンテクノロジー, 山海堂 7-5 (2005-10)
- 18)日本マリンエンジニアリング学会誌 42-1 (2007)
- 19)微粒化, 日本液体微粒化学会誌 11-33 (2002)