

# 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

永岡真

## 3D Simulation of Fuel Behavior in Port-Injection Gasoline Engines

Makoto Nagaoka

### 要 旨

ポート噴射ガソリンエンジン内の燃料挙動を予測するための多次元モデルについて解説する。現在、この分野で標準的に用いられている燃料噴霧モデルは、噴霧液滴をラグランジェ的に模擬する離散液滴モデル（DDM）である。まず、DDMについて解説し、近年、ガソリンエンジンに適用するために行われている微粒化、壁面衝突、液膜流動、多成分蒸発などのモデルの研究・開発を紹介するとともに、その問題点も明確にする。また、これらのモデルを利用する上で注意すべき要点と

して、境界条件とDDMの限界について記す。さらに、実機への応用については、今のところわずかの例しかないが、現状の燃料挙動モデルがどこまで応用され得るかを検証した報告例を示す。吸気ポート内の燃料付着が多いために、単発の燃料噴射の三次元計算によって筒内の混合気形成を予測することは困難であるが、噴射燃料の吸気管付着を予測、解析するためのツールとして活用できると考えられる。

### Abstract

Multidimensional models to predict fuel behavior in an intake port-injection gasoline engine are explained. The discrete droplet model (DDM) is widely used for engine fuel simulations. The DDM is a kind of Lagrangian particle model and extended to apply to gasoline engines. Recent progresses in the submodels of the DDM, which are atomization, wall impingement, wall film flow, multicomponent vaporization models and so on, are introduced. The

limitations of such these models are commented. Although there are only a few applications to a real engine, a report on the validations of the fuel behavior models is introduced. Because of a lot of port-wall-wetting fuel, it is difficult to predict the in-cylinder mixture distribution via one cycle single fuel injection calculation. However, the calculation of the fuel behavior in the intake port is practically usable to analyze the injected fuel wetting.

キーワード

ガソリンエンジン，多次元モデリング，計算流体力学，噴霧モデル，シミュレーション，燃料噴射

## 1. はじめに

自動車用エンジンの基本性能は、出力、燃費、排気エミッションの三つから評価される。一般の普及型エンジンは、それら三つに対する基準を同時に満足しなければならない。環境問題の観点から、近年のエンジンでは、その出力性能を維持しつつ、燃費すなわちCO<sub>2</sub>と未燃炭化水素(HC)や窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)などの排気エミッションをさらに低減することを目指して開発されている。

エンジンに課せられた問題を解決するためには、制御、触媒、材料などの技術以上に、エンジンの基本となる燃焼そのものを改善することが本質的に重要である。エンジンの燃焼は間欠的であり、空気流動、液体燃料からの混合気形成、そして、着火、火炎伝播と一連の非定常現象が非常に短時間に行われる。このため、その現象の全容を把握することが極めて困難であり、これほど普及した現在でも未解明の部分が多くある。

数値流体解析は、エンジン内の現象を明らかにする手段として期待され、10年以上にわたり技術開発が進められている。計算流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)を基盤とし、原理的には、与えられた境界条件と初期条件の下で、計算領域内の物理量の変化を予測することができ、任意のパラメータをかえた仮想実験が可能である。したがって、単に現象を解析するだけではなく、エンジンの開発期間とコストを低減することも期待されている。しかし、数値計算は、あくまでもモデル(模型)を通して物理現象を模擬するものであり、通常、現象のモデル化や数値計算の過程において、現実の現象との差が少なからず含まれてくる。したがって、その誤差を実用的に許容できる範囲に留め、かつCPU時間などの計算機資源を最小限とすることが、CFDを実際の設計に活用していくために不可欠である。

エンジンの三次元CFDシミュレーションは、1980年代に数多く報告されるようになり、その後10年余りを経た現在において、少なくとも定常流については、CAE(Computer Aided Engineering)ツールとして利用できるようになっている。例えば、吸気系開発におけるポート形状などの設計困

りが流量やスワール、タンブル特性に与える影響を定量的に評価・解析した斎藤らの報告などがある<sup>1)</sup>。

こうした中で、エンジンの多次元シミュレーションへの要求、あるいは興味は、空気流動のみならず、燃料も含めたものへと移っている。燃料を含めた計算からエンジン内の燃料付着や混合気形成を予測することで、エンジン開発における排気エミッションや燃費低減の指針を得るための多くの情報を得ることができる。ところが、燃料噴射弁から噴射された燃料を扱うためには噴霧モデルが必要となるが、その現象は冒頭で述べたように非常に複雑であり、未解明な部分も多くあるためそれを表現する数理モデルは、現状では未だ研究段階にある。

吸気管内での燃料の壁面付着は、筒内への燃料供給時間に遅れをもたらし、ポート内に形成された液膜流の一部は、気化せず液相として直接筒内へ流入するために、エンジンの冷間時や過渡運転時における未燃HCの増加や運転性能と燃費の悪化を引き起こす。

吸気管内における燃料の供給法や制御方法を最適化するために、ポート内の燃料挙動を把握することが重要であることから、実験では、高速度カメラ<sup>2,3)</sup>やサンプリング<sup>4-6)</sup>、Phase Doppler Particle Analyzer(PDPA)<sup>7,8)</sup>、Laser-Induced Fluorescence(LIF)<sup>9,10)</sup>法などにより吸気ポートから筒内へ入るまでの液滴と液膜の計測が行われている。

また、計算機上での燃料挙動シミュレーションでは、現象論的に扱うモデルが多く検討されている。その中で最も簡単な燃料挙動モデルとしては、燃料噴射制御へ直接用いられている $X\text{-}\tau$ モデル<sup>11,12)</sup>がある。ここで、 $X$ は噴射された燃料の内、ポート内に残留する燃料割合、 $\tau$ は吸気管内に堆積した燃料が筒内へ流入する時定数である。これら二つのパラメータを与えることで、時々刻々の筒内へ流入する燃料量を推定し、筒内の空燃比(A/F)が一定となるように噴射量を制御する。 $X\text{-}\tau$ モデルによる燃料制御でエミッションを評価した報告<sup>13)</sup>や、パラメータスタディにより定常時の燃料挙動<sup>14)</sup>や、過渡運転時のA/F応答<sup>15)</sup>の

検討をした報告がある。また、より詳細にかつ精度よくシミュレーションをするために、ポート、バルブ、筒内を領域に別け、ガス、噴霧、液膜流の三流体を取り扱うモデルによるA/F過渡応答のパラメータスタディがなされている<sup>16-18)</sup>。さらに、それは1次元モデルへと拡張されている<sup>19)</sup>。

上記 $X$ ,  $\tau$ は、通常、実験による適合から決定されるが、物理的な意味を持たせているものの、非常にマクロなものであり、その値が実際の現象と対応しているかは曖昧である。現象論モデルでは、パラメータスタディをするにしても、経験的な部分が多くあり、その一般性が少なく、現象を定性的に理解するための利用が主となる。また、現象をより詳細に扱うために、ポート壁とバルブ壁を区別したり、1次元モデルへ拡張したとしても、実際の吸気ポートやバルブ形状の影響を評価するには限界がある。燃料の詳細な付着ヶ所を知り、噴射弁の取付け位置や吸気ポート形状などの実際の設計指針を得ることは、三次元計算により可能となる。また、三次元計算でのモデル化は通常、現象論モデルに比べ、より細部の現象を記述し、かつできる限り一般性のある形で表される。このため、現象論モデルでは入力となる上記の燃料付着率 $X$ は、三次元計算では逆に出力となる。すなわち、三次元計算でこの値を決めることが可能である。

本稿では、多次元計算においてガソリンエンジンに適用されている噴霧と液膜流のモデリングについて概説し、エンジンへの応用、展開について最近の報告を概観する。

## 2. ガス流動

エンジン内のガス流動、特に吸気流を取り扱うためには、バルブを通過する気流が高速であるため三次元圧縮性Navier-Stokes方程式を解く必要がある。ただし、実際には、計算機性能の制約によりアンサンブル平均化されたNavier-Stokes方程式と乱流モデル、そして理想気体の状態方程式が基礎式となる。乱流モデルには、通常 $k-\varepsilon$ モデル<sup>20)</sup>が用いられる。ガス流動の従属変数は、密度、速度ベクトル、エネルギー、圧力、温度、乱れエネルギーとその散逸率、そして、燃料蒸気の質量割合で

ある。燃料蒸気に対しては、取り扱う化学種の数の輸送方程式を解くことになる。

方程式の解法には、様々な方法が用いられており、それぞれの特徴がある。最近では、空間二次精度以上の差分スキームを用いることが常識である。計算法の詳細については、紙面の都合上割愛するが、代表的な論文を示すので、個々の文献を参照していただきたい<sup>1, 21-25)</sup>。

## 3. 噴霧モデル

現在、エンジン関係の燃料噴霧モデルとして最も標準的なのは、液滴をラグランジェ的に計算する方法であり、離散液滴モデル (Discrete Droplet Model; DDM)<sup>26)</sup>、Lagrangian Droplet Eulerian Fluid (LDEF)<sup>27, 28)</sup>法、Discrete Parcel Technique<sup>29)</sup>などと呼ばれる。

DDMはLos Alamos研究所で開発された反応流計算ソフトCONCHAS-SPRAY<sup>30)</sup>、KIVA<sup>29)</sup>、KIVA-II<sup>21)</sup>などに組み込まれ、ソース公開の形で普及し、また、ほとんどのエンジン関係のCFDソフトでも採用されているため、世界中で標準的なモデルとして用いられている。モデル式の詳細はLos Alamos研究所の報告書などを参照されたい。

ガソリン、ディーゼルエンジンともDDMの骨格は同様であり、異なるのは物性値と境界条件のみである。

まず、DDMにおける「パーセル (parcel)」について解説する。パーセルとは、噴霧内に多数存在する個々の液滴を直接解くことは計算機の能力上困難なため、これを適当な数にグループ化した液滴群とみなすことができる。パーセル内の液滴の状態量 (液滴径、速度、温度) はすべて等しいとし、各パーセルについて液滴の挙動を時間発展的に解くことで噴霧挙動を模擬する。

一方、別の解釈として、噴霧液滴の確率密度関数 $f$ から導出する考え方がある。

$$f = (\vec{x}, \vec{v}, r, T, t) \quad (1)$$

ここで、 $f dv dr dT$ は、時刻 $t$ 、位置 $x$ において、速度 ( $v, v + dv$ )、半径 ( $r, r + dr$ )、温度 ( $T, T + dT$ ) の範囲に存在する液滴の数密度を表す。 $f$ を時間発展的に解くとしても、8次元 ( $x, v, r, T$ )

の従属変数であるため、これを直接離散化して解くことは計算機の能力上不可能である。そこで、連続的な分布関数  $f$  を以下の離散的分布関数  $\tilde{f}$  に置き換える。

$$\tilde{f} = \sum_{p=1}^n N_p \delta(\vec{x} - \vec{x}_p) \delta(\vec{v} - \vec{v}_p) \delta(r - r_p) \delta(T - T_p) \quad (2)$$

これにより、噴霧は  $n$  個の「パーセル」で表され、各パーセルには  $N_p$  個の液滴が存在することを表している。この場合、 $N_p$  は実数である。結局、パーセルとは、液滴が存在する確率数密度を表していると解釈できる。DDM は決定論的に方程式を解く気流とは異なり、確率的 (Stochastic) なモデルである。

計算結果の表示において、しばしば計算された液滴を表示するが、これは噴霧内の液滴すべてを表しているわけではないので、噴霧濃度の粗密をそこから正確に読み取ることはできない。液滴がその位置に存在する確率が 0 でないということを示しているだけで、噴霧濃度などを評価する場合には、パーセル内の液滴数という「重み」をつけて評価しなければならない。

液滴挙動の支配方程式は、位置、速度、粒径、温度に対する常微分方程式で記述され、パーセル内の液滴数は分裂や合体がなければ変らない。液滴の質量、運動量、エネルギーの変化分は、ガス側への生成項となる。さらに、DDM では、乱れ、抵抗力、蒸発、微粒化、分裂、合体、伝熱等を表現するサブモデルが別途必要である。

#### 4. 噴霧サブモデル

これまで、DDM の応用とサブモデルの評価・開発は、ほとんどディーゼル噴霧に対してなされてきた。しかし、ディーゼルとガソリンエンジンでは、噴霧形成過程や周囲の環境などが大きく異なるため、それらのモデルが必ずしもガソリンエンジンに適用できるとは

限らない。典型的なポート噴射ガソリンエンジンの噴霧とディーゼルエンジン筒内の噴霧の比較を Table 1 に示す。

##### 4.1 微粒化モデル

液滴の微粒化に対する代表的な無次元パラメータ、ウエーバー数  $We$  は、以下の定義で与えられる。

$$We_g = \frac{\rho_g U^2 2r}{\sigma} \quad (3)$$

ここで、 $\rho_g$ 、 $U$ 、 $r$ 、 $\sigma$  は、それぞれガスの密度、液滴とガスとの相対速度、液滴半径、表面張力係数である。

ガソリン噴霧はディーゼル噴霧に比べ、その粒径は一桁大きく、速度は小さい。また、周囲の温度、圧力も非常に異なる。このため、液滴に対して、周囲空気の相対速度がかなり大きくないと (例えば 50m/s 程度)、空力的な作用による変形・分裂は重要でない。例えば、最も低速の分裂形態であり、動圧による液滴の変形から分裂する Bag 分裂の臨界ウエーバー数は 12 程度である。これによれば、標準状態の静止空气中を速度 20m/s で飛翔する n-heptane の液滴は、530 $\mu$ m で安定粒径となる。すなわち、Bag 分裂ではこれ以下の粒径にはなり得ない。実際には、この条件におけるガソリン用噴射弁からの噴霧の Sauter Mean Diameter (SMD) は 150 ~ 200 $\mu$ m 程度であり、ほとんどの液滴が空力的には安定な液滴といえる。このことから、ガソリン噴霧の微粒化は、噴射後の周囲のガスからの力によるものではなく、さらに

Table 1 Comparison between gasoline and diesel sprays at engine steady operating condition.

	Gasoline	Diesel
Fuel pressure	Low (0.3MPa)	High (tens to 200MPa)
Injection velocity	Low (about 20m/s)	High (a few hundreds m/s)
Sauter Mean Diameter (SMD)	Large (100 to 200 $\mu$ m)	Small (a few tens $\mu$ m)
Surrounding gas pressure	Atmospheric	High (a few MPa)
Surrounding gas temperature	Atmospheric	High (over 900K)
Wall surface temperature	350 to 550K	450 to 650K

(注)ガソリン噴霧でも補助空気導入などにより微粒化を促進する噴射弁では、その粒径はディーゼル並みのものもある。

上流の噴射管内における燃料の流れ自体がもつ擾乱や、場合によってはキャビテーションなどによって支配されていると考えられる。

Reitzらは、Bag分裂、境界層剥離（BLS）分裂、そして、空力せん断による表面波不安定成長からの分裂をモデル化し（WAVEモデル）、ディーゼル噴霧へ適用している<sup>31, 32</sup>。しかし、これらは空力作用による分裂しか考慮していないため、ガソリン噴霧の噴口からの微粒化過程を表現することはできない。

KIVA-IIに組み込まれたTAB（Taylor Analogy Breakup）モデル<sup>33</sup>も、同様の問題があるが、このモデルの最大の功績は、液滴の変形度を表す変数をモデル化したことにある。それ以前のモデルでは、液滴は剛体球として取り扱われていたが、TABモデルでは、液滴を振動楕円体とし、その変形に以下のバネ-質点系の線形振動モデルを適用した。

$$\ddot{y} + C_d \frac{\mu_\ell}{\rho_\ell r^2} \dot{y} + C_k \frac{\sigma}{\rho_\ell r^3} y = C_F \frac{\rho_g U^2}{\rho_\ell r^2} \quad (4)$$

ここで、 $y$ 、 $\mu$ はそれぞれ、無次元変位量、粘性係数であり、添字 $\ell$ は液相を表す。 $C_d$ 、 $C_k$ 、 $C_F$ は、モデル定数である。また、噴口での境界条件として、液滴の変形度と変形速度を与えられる点でも、潜在的な適用範囲はWAVEモデルより広いといえる。さらに、TABモデルをベースに液滴の変形が大きくなった時の非線型性を考慮したDroplet Deformation and Breakup（DDB）モデル<sup>34</sup>が提案されているが、ガソリン噴霧での評価はされていない。

現状では、いずれのモデルでも上記の理由により、ガソリン噴霧の噴口での微粒化（一次微粒化）過程は表現できないため、噴口では平均粒径と粒径分布、液滴の速度と噴霧角を与える必要がある。しかし、噴霧形成後に、バルブ付近など気流との相対速度の大きい場所での液滴分裂（二次微粒化）過程に対しては既存のモデルでも機能するため、実際の解析ではそれを含めて計算を行う方がよいであろう。

一方、DDMにおける分裂の取り扱い、直接液滴を分裂させ、新たに別の粒径の液滴を発生さ

せるのではなく、パーセル内の液滴径を均一にし、質量を保つためにパーセル内の液滴数を調整する（合体モデルも同様）。これは、計算する液滴数を無制限に増やさないための便宜的な取り扱い方であり、実際の現象とは対応していない。また、WAVEモデル<sup>32</sup>では、Blobと呼ばれる噴口径に等しい粒径の液滴を噴口で与え、分裂がある程度進むと小粒径のパーセルを派生させる方法が使われているが、噴霧中心軸のコア部分を表現するには十分とは言い難い<sup>35</sup>。

微粒化は噴霧形成において最も重要な過程であり、ガソリン噴霧に適用できるモデルを開発することが今後の重要な研究テーマの一つである。最近、空力分裂ではなく、噴射ノズル内のキャビテーションが微粒化を支配しているという考えからのモデル化が提案された<sup>36</sup>。ノズル内の流れを分裂モデルに反映させることは、ガソリン噴霧の微粒化モデルには不可欠であると考えられる。

#### 4.2 壁面衝突モデル

DDMは、ガソリンとディーゼルエンジンで同様であるにもかかわらず、これまでガソリンエンジンへ適用されなかった理由の一つが、まさに壁面という「壁」があったからである。ポート噴射エンジンの場合、燃料はポートやバルブ壁に多く衝突し、一部は飛散し、残りは付着、液膜を形成する。したがって、壁面衝突後の噴霧、液膜を予測するモデルなしでは、燃料挙動のシミュレーションは不可能である。

先に、ディーゼルエンジンを対象とした壁面衝突モデルがNaberら<sup>37</sup>によって提案されたが、そのモデルもまたガソリンエンジンへ適用するには無理がある。Table 1に示すように吸気ポート内とディーゼルエンジン筒内では、その壁温は大きく異なる。壁温によって衝突時の液滴挙動は大きく異なることが、古くから単滴の実験等で知られている。壁温が高い場合には衝突時の壁面との伝熱が、衝突後の液滴挙動に大きく影響することが示されている<sup>38</sup>。現状では、衝突モデルは、モデル化の元とした仮定、または実験条件によって、その適用範囲が限定されると考えた方がよいであろう。

壁面衝突モデルでは、(1)衝突後の飛散（または、

反射), (2)衝突時の微粒化, (3)液膜形成, (4)壁面蒸発の4つの過程をモデル化することが必要である。壁面衝突時の液滴の挙動は非常に複雑であり, その詳細を扱おうとすればするほどモデル化は複雑かつ困難となる。特に, 同じ液滴状態でも, 衝突する壁面状態(温度や濡れ状態以外にも表面や界面張力, 粗さなど)が異なれば, 液膜形成過程も異なる。最初に壁面が乾いていても, 後から衝突する液滴は先に衝突した燃料で表面が濡れているため, 同一の噴霧内でもその挙動は刻々と変化する。また, 壁面の材料特性まで考慮したモデル化などは極めて困難である。実用的なモデル化という観点では, 一般性を欠いても簡単に現象を表現できるモデルが望まれる。すなわち, 実用的には単滴の詳細な挙動ではなく, 噴霧全体の平均的挙動を記述できれば, 現状の多次元シミュレーションに用いる上では十分である。DDMをベースとして計算する場合, 壁温が比較的低温, 壁面との伝熱を無視できるとすると, 必要なのは衝突前の粒径, 速度から衝突後の粒径, 速度を与える式であり, 両者が必ずしも単滴の挙動として一致している必要はない。

筆者ら<sup>39)</sup>は, ポート噴射ガソリン用の噴射弁を用い, ポート壁温相当に加熱したアルミ板に噴霧を衝突させる実験を行い, モデル化を試みた。衝突後飛散する液滴は, 壁面に形成された液膜の分裂から生じることを仮定し, 衝突噴流の理論<sup>40)</sup>を液滴に置き換えることで, 以下の液滴径のモデル式を提案した。

$$\frac{r_2}{r_1} = aWe_n^{-b} \quad (5)$$

ここで, 添字1, 2は, それぞれ衝突前後を表し,  $We_n (= \rho v_n^2 r / \sigma)$  は, 衝突前の壁面法線方向速度を用いた液滴ウエーバー数である。 $a, b$ は定数であり, 実験から  $b = 0.36$  が得られている。他の実験結果もこの式で整理できる。例えば, Parkら<sup>41)</sup>は, Naberら<sup>42)</sup>の実験結果を整理すると,  $b$ の値がほぼ等しい  $b = 0.333$  となることを報告している。

筆者らのモデルは, 式(5)の他に衝突前のウエーバー数と壁面入射角度から衝突後, 飛散する液

滴のウエーバー数と平均飛散角度を与える実験式から構成されている。

平板に衝突・飛散する噴霧の分布を実験と三次元計算とで比較した結果をFig. 1に示す。衝突後の噴霧挙動が, 衝突角度を変えた場合でも良く再現されている。

内藤ら<sup>43)</sup>は単一液滴の変形をTABモデル同様に楕円体の振動に限定することで, 非線型の振動方程式を導き, 衝突時の液滴状態からその後, 安定(付着)か, 不安定(微粒化)かを与えるOval-ParabolaTrajectories (OPT)モデルを提案している。

最近, ディーゼルでも冷間始動時を対象とし, 常温壁での実験から導出したモデルが提案されている<sup>44-46)</sup>。しかし, 筆者らが, Baiらのモデル<sup>45)</sup>をポート噴射エンジン用の噴霧へ適用した結果では, 壁面衝突後の液滴挙動のよい一致はみられなかった。このことは, ディーゼル噴霧とガソリン

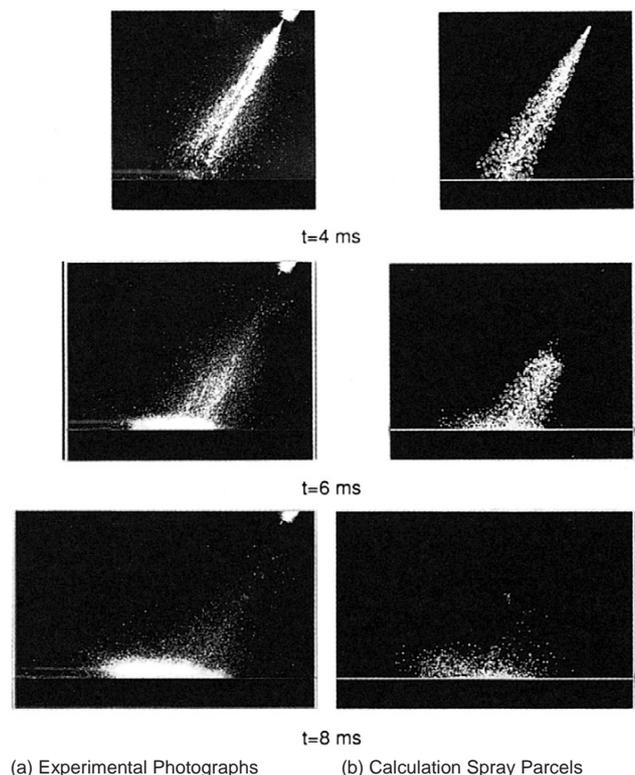


Fig. 1 Comparison between simulation and experimental observation of spray impinging on flat plate.

噴霧の挙動の相違がモデルに反映されていないことを表しており、前述のようにモデル化の元とした実験条件に近い対象に、その適用範囲が限定されることを示している。

#### 4.3 燃料蒸発モデル

蒸発モデルは混合気形成を予測する上でキーとなる部分である。ほとんどの計算では、燃料は単成分の扱いをしており、ガソリンは通常、平均炭素数が近いn-heptaneやiso-octaneで代表される。しかし、単成分と多成分では、Fig. 2に示すように蒸発特性が異なるため、定量的に混合気形成過程を予測する上では、多成分モデルが必要である。ディーゼルエンジンでは、2成分を考慮した多次元蒸発モデルの報告がある<sup>47)</sup>。また、ガソリンの蒸発計算では、1次元までの現象論的なモデルの検討がされている<sup>48)</sup>。

液滴内の濃度、温度は均一とし、気液界面での相平衡に理想溶液を仮定したRaoultの法則を適用することで、以下の蒸発率の式が得られる。

$$\dot{m}_i = \left( Y_{is} + \frac{Y_{is} - Y_i}{B} \right) \dot{m} \quad (6)$$

$$\dot{m} = 2\pi r \rho_\ell D_m Sh \ln(1+B) \quad (7)$$

$$B = \frac{\sum_i Y_{is} - \sum_i Y_i}{1 - \sum_i Y_{is}} \quad (8)$$

ここで、 $\dot{m}_i$ 、 $Y_{is}$ 、 $Y_i$ 、 $D_m$ 、 $Sh$ は、それぞれ、化学種*i*の蒸発率、飽和蒸気質量割合、蒸気質量割合、平均拡散係数、シャーウッド数である。

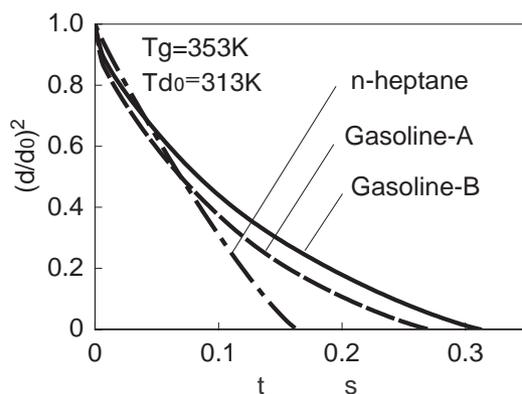


Fig. 2 Droplet diameter squared histories of single and multicomponent fuels.

燃料蒸発量だけの予測には、100以上のすべての燃料成分について計算する必要はなく、軽質から重質、すなわち沸点の異なる数成分だけで代表できると考えられる。与えられた燃料の蒸留特性に対し、計算機上でその燃料の蒸発特性を模擬する代表成分の割合を算出し、それを用いて三次元計算を行うことができる。

著者ら<sup>50)</sup>の計算結果では、性状の異なるガソリンの蒸発特性を模擬するためには、少なくとも三種以上の代表成分で扱う必要があることが示されており、これを用いて吸気ポート内の燃料挙動の三次元計算が行われている(後述)。

#### 4.4 液膜流動モデル

液膜流モデルについては、ディーゼル、ガソリンの相違はない。しかし、液膜モデルの開発は比較的最近のことである。壁面に衝突した液滴が付着した場合、壁温が液体の飽和温度以下の時に液膜が形成される。したがって、液膜モデルはエンジンの冷間時または、吸気ポート内壁に付着した燃料に対して必要となる。液膜流動の支配方程式は、噴霧モデルのそれとは別に壁面上での液膜厚さ(質量)、運動量、エネルギーの保存式で記述される。

液膜モデルには、大きく二つの取り扱いがある。一つは、液膜厚さを壁面格子上でオイラー的に解く方法<sup>46, 51, 52)</sup>と、もう一つは、DDMの延長で液膜をパーセルとして、ラグランジェ的に扱う方法<sup>53-56)</sup>である。後者はDDMの取り扱いの中で噴霧と液膜を統一的に扱えるため前者に比べ簡便である。この手法により、著者らが定常の軸対称放射状液膜流の液膜厚さを検証した結果をFig. 3に示す。ラグランジェモデルでは、計算量が多いことと、時間平均量としての流量の保存性が厳密に満足されない、という問題点がある。

#### 4.5 その他のサブモデル

その他の主なサブモデルとしては、衝突・合体、乱れとの相互作用などがある。

液滴の衝突・合体は、液滴の数密度が高く、液滴間の相対速度が大きくなければ生じないので、大粒径で比較的液滴数の少ないガソリン噴霧では、今のところ重要ではない。実際、著者らがポート噴射条件の自由噴霧を対象に合体モデルの有

無を比較したところ、噴霧特性に有意な差は得られなかった。また、これとは別に、O'Rourkeらの合体モデル<sup>28)</sup>では、衝突頻度を要素体積から与えるため液滴数密度が低い場での計算格子依存性が大きいという問題がある。

乱れと液滴の相互作用として、KIVAコード<sup>29)</sup>では、乱れによる液滴の分散と液滴の存在により乱れが抑制される効果がモデル化されている。しかし、現在のDDMでは本質的に構造的な渦を表現できないため、せん断層内での渦により巻き上げられるリガメントなど、噴霧周辺部の詳細な形状を十分に表現できない。しかし、雰囲気圧が大気圧程度であれば液滴径が小さくない限り、液滴と空気の運動量の差は大きいと、気流の乱れによる噴霧全体への影響はそれほど重要ではないと考えられる。

その他、液滴の抵抗係数、熱伝達率、物質伝達率に対し、定常流中での球の実験式を適用していることも少なからず改良の余地がある。これに対しては、ポイド率による抵抗係数の修正<sup>28)</sup>やTABモデルを用いて液滴の変形に応じて抵抗係数を動的に修正するモデル<sup>57)</sup>などが提案されているが、この辺のことが噴霧全体の挙動にどの程度寄与するのは、十分検証されていない。

#### 4.6 境界条件

境界条件とモデル定数を変えて、噴霧挙動がどのように変わるかを比較することは、モデルの感度や適用範囲を把握する上でもよい演習となる。噴

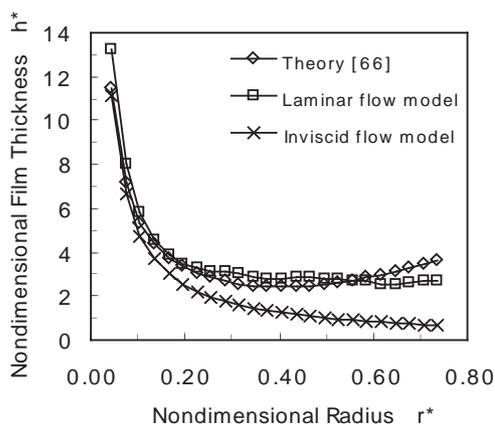


Fig. 3 Comparison of liquid film thickness of axisymmetric radial flow.

霧挙動の物理的な解析は、こうした演習をし、実験との検証を踏まえた上で、なされるべきものである。なぜなら、噴霧の境界条件やモデル定数の選択は、多くの場合、計算結果に大きく影響するため、十分な配慮が必要となる。

噴霧計算では、噴口において以下の境界条件が必要である。

- (1) SMD
- (2) 粒径分布
- (3) 噴射速度ベクトル
- (4) 噴射(広がり)角
- (5) パーセル数

微粒化モデルが適当ならば、(1)と(2)が(場合によっては(4)も)不要となる。ただし、それらは上記の物理的に直結する量からモデル定数という間接的なパラメータ量へと置き換わっているに過ぎず、実験を再現するためには、しばしばモデル定数の調整を必要とするのが現状である。ガソリン噴霧には、前述のように現状の微粒化モデルは適用できないので、上記五つの入力が必要である。大抵、それらは定容器内での計測結果と経験式から与えられる。実際には、それらは空間的、時間的に分布があり、粒子流束や粒径の空間分布などは、後述のポート付着箇所などに比較的敏感であることがわかってきており、より現実に近いシミュレーションには、きめ細かい境界条件設定が必要となる。

将来的には、これら噴射条件はノズル内の流れシミュレーションと結合して与えるようになっていくであろう。

#### 4.7 DDMの限界と拡張

噴霧モデル概説の最後に、DDMの限界について記す。サブモデルの問題点については、既にいくつか記したが、それ以外に本質的に以下の限界がある。

- (1) 現状の標準的な扱いでは、パーセル数(計算液滴数)を無数に増やしても、実際の噴霧中の液滴と一対一に対応しない。
- (2) 計算上ポイド率が0以下となった場合に計算が破綻する。
- (3) 液滴径が格子間隔以上では、モデルの物理的意味がなくなる。

(1)の問題は、冒頭に述べたようにパーセルが確率的なものであるという点で、実用的にはそれほど問題ではないのかも知れないが、計算結果の解釈において誤解を招く点で留意すべきである。

通常の流れ計算と同様に、用いる計算格子は計算精度を確保するために、ある程度細かくする必要がある。しかし、逆に格子間隔を細かくしていた場合には、上記(2)、(3)の問題が生ずる。例えば、気流の解像度を上げるために境界層を分解する場合、吸気ポート壁面での典型的な最小格子間隔は数 $\mu\text{m}$ となる。そこに数十 $\mu\text{m}$ の液滴が飛んできた場合、格子間隔の十倍以上の液滴に作用する周囲ガスの影響や液滴に完全に含まれてしまった要素内の物理量を計算することは、DDMで取り扱うことができない。

計算結果の格子依存性をチェックし、結果が変わらなくなるまで格子間隔を小さくすることは、上記の問題に直面するため、DDMによる計算の格子の収束とその解の物理的意味自体が疑問となる。

これらの問題は、これまで計算機の能力が低く、比較的粗い格子でしか計算されていなかったために、ほとんど問題視されていなかった。内藤は、数値計算上の一つの取り扱いとして、DDMに新たに「パーセル半径」という考えを導入することで、計算格子に対するDDMの問題点の解決策を提示している<sup>58)</sup>。

今後より詳細で精度の高い結果を得るためには、従来のDDMだけを利用することでは不十分であり、基本的に異なるモデルの開発が必要となるであろう。

## 5. ガソリン機関への応用

エンジン内の燃料挙動は、冷間始動や過渡応答時の排気エミッションに直接影響を及ぼすため、これを予測・解析することが重要となっている。また、これに対する設計要素としての吸気ポート形状や噴射系レイアウトなどを効率的に設計・開発するツールとしても、数値計算の有効活用が期待されている。

前章に記したようにガソリン噴霧を対象にしたサブモデルが提案され、実機形状でのデモンストラーション計算は行われているが、その燃料挙動

を実験と比較し、検証した例はほとんどない。また、現状の三次元計算では、計算時間の制約上多サイクルにわたる計算は実用的に困難である。1サイクルのみ(単発噴射)の計算では、前サイクルまでに堆積した燃料分布が未知であるため、これを考慮しない計算が前提となる。この前提の下での計算結果が、定常運転状態の実機とどう対応するのかについても、ごく最近まで明らかとなっていなかった。

筆者ら<sup>56)</sup>は、実機のポート噴射ガソリンエンジン内の燃料挙動解析に対して、現状の三次元計算が適用できる範囲を実験的に明らかにし、燃料分布の実験と計算との比較、およびポート・筒内の燃料分配などについて解析している。

斎藤、今竹ら<sup>4,5)</sup>によって開発された計測用エンジンでは、油圧駆動により吸排気弁を任意に作動・停止でき、作動停止前の状態を保存して、ポートと筒内の燃料を別個に全量サンプリングすることができる。実験装置の概略図をFig. 4に示す。これを用いてエンジンの定常運転状態である連続燃料噴射、吸気弁定常作動の条件と、計算と同様の単発噴射、吸気弁1回作動の条件でのポート、筒内の燃料量の計測を行った。

燃料を1回のみ噴射した場合と毎サイクル噴射させた場合の噴射燃料の吸気ポート内燃料残留割合の比較をFig. 5に示す。運転条件を変えても1回の噴射量のうちポート内に残留する燃料割合の単発噴射と連続噴射での差は1割以内である。単発

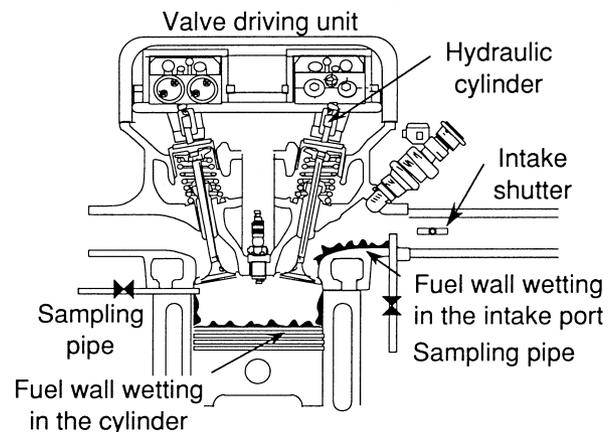


Fig. 4 Experimental apparatus to measure the fuel mass in a cylinder and intake port.

噴射と連続噴射時では、壁面の濡れ状態が全く異なるにもかかわらず、実際には、ポート内残留割合の差としてはそれほど大きくないことがわかる。

この実験結果から、燃料の壁面付着がない単発噴射の数値計算でも、壁面付着のある通常運転時の燃料挙動、特に1サイクル内に噴射された燃料がポート内に残留する割合と直接筒内に入る割合などを解析できることがわかる。しかし、筒内に直接流入する燃料量が噴射量の半分程度であることから、少なくとも前サイクルまでの燃料分布を考慮しない限り単発噴射の計算では筒内混合気分布を予測することは困難である。

実機エンジンに対する数値計算の検証例を示す<sup>5,6)</sup>。計算格子をFig. 6に、各クランク角に対する燃料パーセルおよび蒸気分布をFig. 7に示す。蒸気濃度は投影方向の最大値を示す。

大半の噴霧はバルブステムから傘部に衝突するが、一部はヘリカルポートの突起部と連通路に衝突、付着する。ヘリカルポート内の速度は、Swirl Control Valveが閉じている場合（SCV閉）の方が大きいいため噴霧はより内側に曲げられ、突起部への付着はSCV閉の方が多くなる。Fig. 8に蛍光剤を混入させた燃料を用いたポート内付着燃料の可視化写真と計算で得られた吸気弁閉時の液膜

分布を示す。ヘリカルポートの突起部、バルブステムからバルブ傘部の外側に燃料が付着している様子が一致している。

この計算で得られた筒内混合気形成過程の傾向は、SCV閉でより均質となり、SCV開では逆成層な分布となるという古野らの実験結果<sup>5,9)</sup>と矛盾しない。しかし、計算では、吸気60°ATDCにおいて、古野らが計測した筒内水平断面位置には燃料液滴は達しておらず、蒸気濃度についても定量的な比較はできない。これは前サイクルまでに堆積

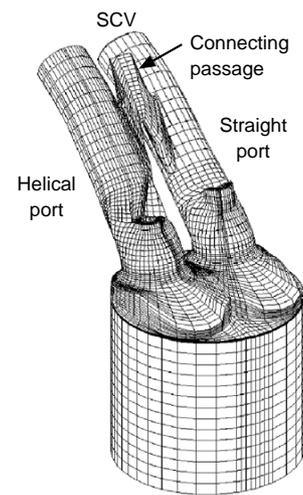


Fig. 6 Computational grid (77,365 cells).

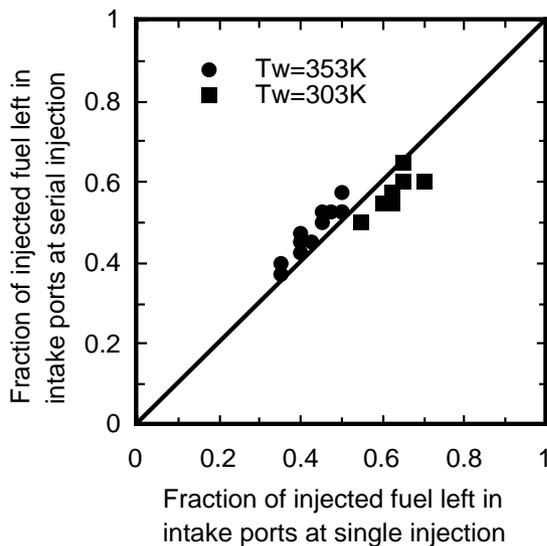


Fig. 5 Correlation between single and serial injections for residual mass fraction of injected fuel in intake ports (half load).

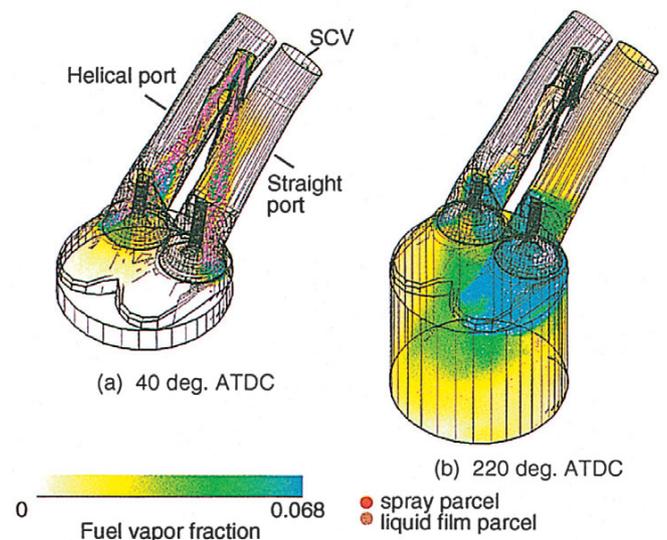


Fig. 7 Fuel spray, vapor and liquid film distributions (SCV closed,  $T_w = 353K$ ).

しているポート内燃料が、そのサイクルに噴射された燃料より先に筒内に流入していることによるものと考えられ、1サイクルの計算で解析できる限界を示している。

Fig. 9にポート内残留燃料割合の比較を示す。実験値には気液の区別はない。また、実験はガソリンでの計測結果であるが、計算の方はn-heptaneを用いた結果である。計算ではSCV開閉でポート内残留燃料割合の差はみられないが、気液の内訳で

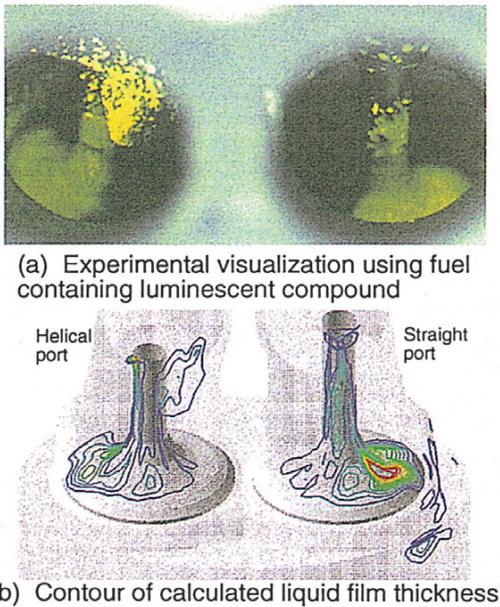


Fig. 8 Comparison of fuel wetting port and valve walls.

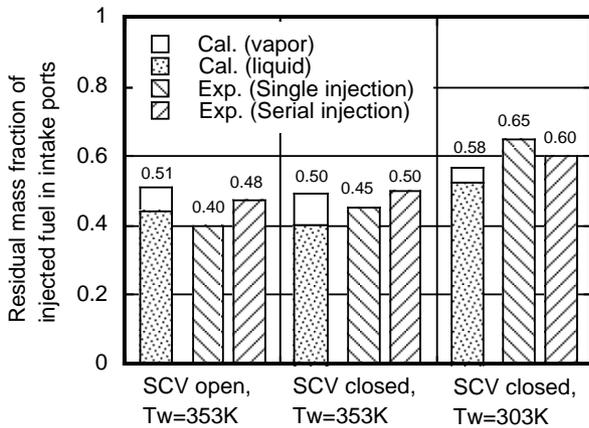


Fig. 9 Comparisons between calculation and experiment of residual fuel in intake ports.

は、SCV閉はストレートポート内の蒸気量が多く、液相の量は少ない。また、壁温が低いとポート内残留燃料が増加する傾向は実験と一致している。

さらに、ポート、筒内の燃料を定量計測した実験結果と計算の結果を合わせて解析することで、エンジン定常運転時における、燃料の噴射から燃焼に至るまでの分配量が得られることが示されている (Fig. 10)。

燃料蒸発モデルを多成分に変えた場合の実機検証も行われている<sup>50)</sup>。ガソリンを三成分の混合燃料で模擬した場合とn-heptane単成分でのポート内燃料付着量の比較をFig. 11に示す。計算結果

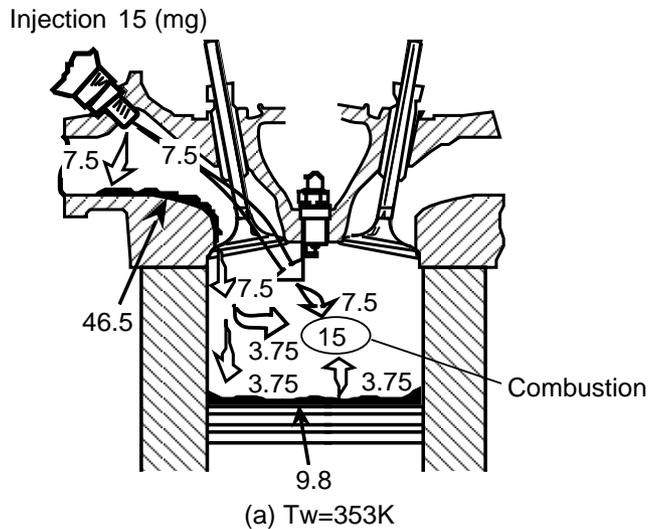


Fig. 10 Injected fuel distribution at engine steady operating condition ( SCV closed ).

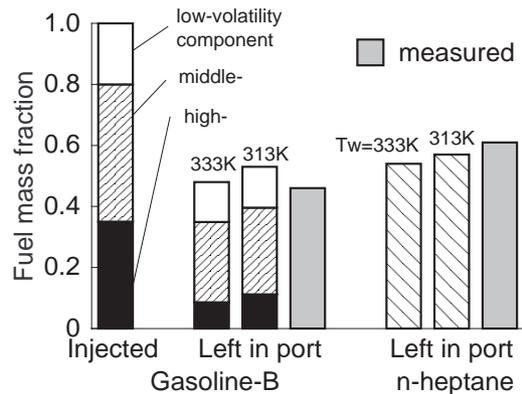


Fig. 11 Comparison of mass fraction of port-wetting fuel.

でも、実験と同様ガソリンの方が蒸発量が多いため、ポート内付着燃料量が少なくなることが示されている。

## 6. おわりに

ポート噴射ガソリンエンジンの燃料挙動シミュレーションに対し、その燃料挙動モデルを中心に解説し、最近の応用例を紹介した。

さらに広範囲に噴霧モデル全般を知りたい方は、やや古いがFaethのレビュー<sup>60-62)</sup>を、実験も含めたポート噴射エンジンの噴霧特性に関する最近の解析についてはZhaoらのレビュー<sup>63)</sup>を参照されたい。

現状のガソリン噴霧のシミュレーションでは、1サイクルのみの計算でエンジン筒内の混合分布を予測することはできないが、ポート内燃料挙動、すなわち、壁面への燃料付着の問題に限定すればかなり有効なツールとなる。定性的な現象を理解するための利用はもちろんであるが、噴霧特性や壁面温度、ポート形状などの設計因子がポート内燃料付着に与える影響を解析することができる。

一方、現状のDDMの抱える問題点の解決や、ガソリン、ディーゼルエンジン共通で適用できる微粒化、壁面衝突モデルの開発など、今後も噴霧モデルの改良の余地は多い。また、現在注目されている筒内直噴ガソリンについては、燃料の雰囲気条件がポート噴射とディーゼルエンジンの中間であり、噴射弁も現在は、ポート噴射とは異なるスワール弁が多く用いられているため、既存のモデルで対応できるか十分検証されていない。DDMでホロコーン状の噴霧を扱う難しさは、現在でも未解決の問題である<sup>64)</sup>。特に、噴口からの液膜とその微粒化過程のモデル化は難しく、最近、既存モデルの評価と改良が試みられている<sup>58, 65)</sup>が、実機での検証と応用は今後の課題である。

燃料挙動モデルが改良され、発展していくことと、三次元燃料挙動シミュレーションが、現象を解析するためのツールとして果たす役割は今後も変わらない。さらに今後、三次元シミュレーションが利用される場合は拡大し、解析ツールから一段進んで、設計・開発に活用されるCAEツール、すなわち部品単位での仮想試作 ( Virtual Prototyping )

という観点での利用へと展開していくと考えられる。また、別の視点では、エンジンの完成前に制御方法を評価、開発するためのリアルタイムシミュレータ、バーチャルエンジン<sup>67)</sup>の構築に必要な情報 ( ガス流動や燃料挙動モデルなど ) を提供することも期待できる。

## 参 考 文 献

- 1) 斎藤ほか, 自動車技術会論文集, 25-4(1994), 57 ~ 62
- 2) Shin, Y., Cheng, W. K. and Heywood, J. B. : SAE Tech. Pap. Ser., No.941872, (1994)
- 3) Shin, Y., Min, K. and Cheng, W. K. : SAE Tech. Pap. Ser., No.952481, (1995)
- 4) Saito, K., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.950044,(1995)
- 5) Imatake, N., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.971639, (1997)
- 6) Schurov, S. M. and Collings, N. : SAE Tech. Pap. Ser., No.952485, (1995)
- 7) Kelly-Zion, P. L., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.952480, (1995)
- 8) Brenn, G., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.950512, (1995)
- 9) Almkvist, G., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.952483, (1995)
- 10) Johnen, T. and Haug, M. : SAE Tech. Pap. Ser., No.950511, (1995)
- 11) Hires, S. D. and Overington, M. T. : SAE Tech. Pap. Ser., No.810495, (1981)
- 12) Aquino, C. F. : SAE Tech. Pap. Ser., No.810494, (1981)
- 13) Shayler, P. J., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.961996, (1996)
- 14) Sches, C., Guilain, S. and Maroteaux, F. : SAE Tech. Pap. Ser., No.972992, (1997)
- 15) Rose, D., Ladommatos, N. and Stone, R. : SAE Tech. Pap. Ser., No.940382, (1994)
- 16) Servati, H. B. and Herman, E. W. : SAE Tech. Pap. Ser., No.890566, (1989)
- 17) Iwano, H., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.912348, (1991)
- 18) Curtis, E. W., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.961186, (1996)
- 19) Chen, G. and Aggarwal, S. K. : SAE Tech. Pap. Ser., No.960074, (1996)
- 20) Jones, W. P. and Launder, B. E. : Int. J. Heat Mass Transfer, 15(1972), 301 ~ 314
- 21) Amsden, A. A., et al. : Los Alamos National Laboratory Report, LA-11560-MS, (1989)
- 22) Adamson, B., et al. : COMODIA, 90(1990), 431 ~ 437
- 23) Wakisaka, T., et al. : COMODIA, 90(1990), 487 ~ 493
- 24) Nagaoka, M., et al. : Proc. 4th Int. Sympto. Comput. Fluid Dynamics, (1991), 849 ~ 854
- 25) Naitoh, K. and Kuwahara, K. : J. Fluid Dynamics Research,

- 10(1992), 299 ~ 325
- 26) Gosman, A. D. and Johns, R. J. R. : SAE Tech. Pap. Ser., No.800091, (1980)
- 27) Dukowicz, J. K. : J. Comp. Phys., 35-2(1980), 229 ~ 253
- 28) O'Rourke, P. J. and Bracco, F. V. : J Mech E., C404/80(1980), 101 ~ 116
- 29) Amsden, A. A., et al. : Los Alamos National Laboratory Report, LA-10245-MS, (1985)
- 30) Cloutman, L. D., et al. : Los Alamos National Laboratory Report, LA-9294-MS, (1982)
- 31) Reitz, R. D. and Diwarkar, R. : SAE Tech. Pap. Ser., No.870598, (1987)
- 32) Reitz, R. D. : Atomization and Spray Tech., 3(1987), 309 ~ 337
- 33) O'Rourke, P. J., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.872098, (1987)
- 34) Alloca, L., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.941895, (1994)
- 35) Beatrice, C., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.950086, (1995)
- 36) Arcoumanis, C., Gavaises, M. and French, B. : SAE Tech. Pap. Ser., No.970799, (1997)
- 37) Naber, J. D. and Reitz, R. D. : SAE Tech. Pap. Ser., No.880107, (1988)
- 38) Wachters, L. H. J. and Westerling, N. A. J. : Chem. Engineering Sci., 21(1966), 1047 ~ 1056
- 39) Nagaoka, M., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.940525, (1994)
- 40) Ibrahim, E. A. and Przekwas, A. J. : Phys. Fluids, 3-12(1991)
- 41) Park, K. and Watkins, A. P. : Int. J. Heat and Fluid Flow, 17-4(1996), 424 ~ 438
- 42) Naber, J. D. and Farrel, P. : SAE Tech. Pap. Ser., No.930919, (1993)
- 43) Naitoh, K., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.940526, (1994)
- 44) 千田ほか, 日本機械学会論文集B, 60-578(1994), 341 ~ 348
- 45) Bai, C. and Gosman, A. D. : SAE Tech. Pap. Ser., No.950283, (1995)
- 46) Stanton, D. W. and Rutland, C. J. : SAE Tech. Pap. Ser., No.960628, (1996)
- 47) Ayoub, N. S. and Reitz, R. D. : SAE Tech. Pap. Ser., No.950285, (1995)
- 48) Chen, K. C., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.941877, (1994)
- 49) Chen, G. and Aggarwal, S. K. : SAE Tech. Pap. Ser., No.960074, (1996)
- 50) 宮川ほか : 自動車技術会講演会前刷集971, (1997), 321 ~ 324
- 51) Bai, C. and Gosman, A. D. : SAE Tech. Pap. Ser., No.960626, (1996)
- 52) 吉川ほか : 日本機械学会論文集B, 61-590(1995), 34 ~ 41
- 53) Wakisaka, T., et al. : COMODIA 94, (1994), 403 ~ 409
- 54) 内藤, 高木 : 自動車技術会講演会前刷集952, (1995), 235 ~ 238
- 55) O'Rourke, P. J. and Amsden, A. A. : SAE Tech. Pap. Ser., No.961961, (1996)
- 56) 永岡ほか : 日本機械学会論文集B, 63-611(1997), 2557 ~ 2563
- 57) Liu, A. B., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.930072, (1993)
- 58) Naitoh, K. and Takagi, Y. : SAE Tech. Pap. Ser., No.962017, (1996)
- 59) 古野ほか : 自動車技術会論文集, 24-3(1993), 10 ~ 15
- 60) Faeth, G. M. : Prog. Energy Combust. Sci., 3(1977), 191 ~ 224
- 61) Faeth, G. M. : Prog. Energy Combust. Sci., 9(1983), 1 ~ 76
- 62) Faeth, G. M. : Prog. Energy Combust. Sci., 13(1987), 293 ~ 345
- 63) Zhao, F-Q., Lai, M-C and Harrington, D. L. : SAE Tech. Pap. Ser., No.950506, (1995)
- 64) MacInnes, J. M. and Bracco, F. V. : SAE Tech. Pap. Ser., No.902079, (1990)
- 65) Fan, L., et al. : SAE Tech. Pap. Ser., No.972883, (1997)
- 66) 東, 星野 : 日本機械学会論文集B, 50-452(1984), 982 ~ 989
- 67) Kimura, A. and Maeda, I. : Proc. IEEE Int. Sympo. CACSD, (1996), 157 ~ 163

## 著者紹介



永岡真 Makoto Nagaoka

生年 : 1962年。

所属 : 燃焼研究室。

分野 : エンジン内の流れと噴霧の数値解析とモデリング及び非構造格子による圧縮性流体の計算法の研究。

学会等 : 日本機械学会会員。

1992年 自動車技術会論文賞受賞。

1996年 SAE Arch. T. Colwell Merit Award。

1997年日本機械学会東海支部奨励賞受賞。