

スワールインジェクタによる燃料噴射初期過程の数値解析

Numerical Analysis of Liquid Atomization with a Swirl-type injector

胡 霄 , 森吉 泰生
 (Xiao HU) (Yasuo MORIYOSHI)
 千葉大学大学院 千葉大学
 (Chiba Univ.) (Chiba Univ.)

A swirl-type injector is commonly used in the gasoline direct injection systems. To clarify the very early fuel injection process with a swirl type injector, a numerical analysis of the fuel flow inside the injector and also the break-up process outside the nozzle was carried out. The VOF model which stands on the Eulerian coordinates for problems involving free boundaries was employed to track the free fluid surface of the liquid fuel spray. As a result, a very fine mesh with minimum size of $30\mu\text{m}$ was required to realize the break-up process with an injection pressure of 0.5MPa , and the possibility of a quantitative prediction of the fuel spray formation process using the VOF model was found.

Key words: Numerical analysis, Spray, Swirl-type injector, VOF model.

1. 緒言

筒内燃料直接噴射式ガソリンエンジンは、混合気形成過程を制御して成層燃焼方式を行わせることで、空燃比 40 以上の希薄混合気でも安定した燃焼が実現できる。その結果、従来の機関に比べ 20%前後の燃料消費率低減、出力性能の 6~10%向上、冷間始動時の大幅な未燃 HC の低減などが同時に実現できる⁽¹⁾。このエンジンでは、混合気のシリンダ内の空間分布が燃焼特性に強い影響を与えるため、インジェクタは筒内燃料直接噴射式ガソリンエンジンの成否を決定する重要な部品である。スワールインジェクタ⁽²⁾は、噴霧広がり角が雰囲気圧力によって変化すること、噴霧の到達距離が短いこと、比較的低圧においても噴霧の微粒化がしやすいなどの利点があるので、筒内燃料直接噴射式エンジンに採用されている。

燃料の噴霧形成過程は非常に複雑な現象であり、実験的には、LDV や PDA 法などの定量的な計測法や 2 次元の PIV, LIF, レーザトモグラフィ, シュリーレン法などにより解析が行われているが、3 次元に定量的な計測を行うことは困難で、その解明は十分に行われていない。そこでこれを解明するには、実験的な手法に加え、数値計算が有用である。計算に関しては、従来、分散液滴モデル(DDM)⁽³⁾が主な計算手法として用いられてきた。この方法では、計算量を少なくできるものの、液滴の分裂・合体モデルなどの導入が必要である。ホールインジェクタからの燃料噴霧を対象にした液滴の分裂・合体モデルの研究は多くなされてきたが、スワールインジェクタのように主に液膜から分裂が生じる場合における分裂モデルの検討は十分になされていない。そこで、本研究では現象をより直接的に計算することができる VOF モデルを用いて、インジェクタ内部から分裂過程までの燃料噴霧過程を解析することを試みた。

原稿受付: 1999 年 3 月 26 日

なお、計算には汎用熱流体解析ソフト FLUENT を用いた。

2. 数値解析

2.1 計算モデル

燃料噴霧は自由液面を有する複雑な 2 相流である。液相と気相の界面を解析するために、Hirt⁽⁴⁾らは VOF モデルを開発した。この方法では、計算メッシュは空間に固定され、各時間ステップ毎に変化しないが、自由液面を表すために VOF 関数 F を用いている。VOF 関数 F はセル内液相の占める割合であり、F の値より、次のようにセルの状態を判別することができる。

F=0: セル内に気相のみが満たされている。

F=1: セル内に液相のみが満たされている。

0<F<1: セル内に自由液面が存在している。

流体は非圧縮性で、温度は一定と仮定すると、流れ場を支配する方程式は次のようになる。

①連続の式:

$$\frac{\partial F_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial F_k}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

この式により、 δt 時間内、セル内に流入する液相の量は F の時間変化になる。したがって VOF 法では、自由表面における連続の式として式(2.1)を用いる。

②ナビエ・ストークス方程式(運動量の保存式):

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i u_j = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_j + G_j \quad (2.2)$$

ここで: P: 静圧

g_j : j 方向の重力加速度

G_j : j 方向の外部体積力

μ : 粘性係数

計算は Euler 座標系を用いるため、格子点における各物性値は、各相の占める割合によって重み平均を取って与えている。

VOF 関数 F の対流は体積率の対流であり、数値拡散は自由液面形状を不鮮明にする。これを防ぐために、自由液面が存在するセルにおいて、Donor-Acceptor 法⁽⁴⁾が用いられている。自由液面の形状について、FLUENT では液面形状は階段状に近似される。液面の変形や液滴の分裂などを計算するために、表面張力の影響を考えなければならない。FLUENT では、表面張力モデルとして、Brackbill⁽⁵⁾らが提案した Continuum Surface Force(CSF)モデルが使われている。表面張力を外力の生成項(G_j)として、運動量方程

式に加える。

一方、乱流の影響を考慮するために、k- ϵ 乱流モデルを使用した。壁付近ではメッシュが細かいので、非平衡壁関数⁽⁶⁾を使って、壁面付近の乱流エネルギーとその消散率を計算した。

2.2 計算格子

本計算に用いたスワールインジェクタはゼクセル社製の噴霧角 20° 仕様である⁽²⁾。そのノズル部の拡大図を図 1(a)に示す。噴口の直径が 0.7mm、出口部の長さが 1.5mm である。ニードル全開状態でのリフト量は 0.05mm である。ニードルバルブ摺動部にスワール生成用の斜めの溝が設けてあり、燃料はこの斜めの溝を通して噴射される。溝と中心軸の成す角度 θ が大きいほど、スワールが強くなる。本計算では、実物に合わせて、 θ を 8.9° とした。この時の常温常圧下の噴霧広がり角は約 20° となっている。

スワールインジェクタの内部形状を忠実に再現できるように図 1(b)に示す 3 次元計算格子を作成した。但し、インジェクタは中心軸に関して対称に溝が 6 本(60° 毎)あるので、格子点と計算時間を減らすために、全体の 1/6(中心角 60° 分)を対象に計算格子を作成し、両側の境界面には周期境界条件を適用した。噴口外部における燃料の分裂を考慮するため、噴口から長さ 20mm、半径 5mm の領域を計算対象に加えた。

液滴を表現するためには、メッシュサイズは最小の液滴径より小さくしなければならない。メッシュサイズの影響を調べるために、異なるメッシュサイズの 2 次元計算格子を作成し、計算を行なった。計算条件は、噴射圧力と霧囲気圧力がそれぞれ 6MPa と 0.1MPa であり、計算流体は液相に n-ヘキサン、気相に空気を用いた。これらの物性値を表 1 に示す。噴射期間後の同じ時刻における液相の様子を図 2 に示す。(a)~(c)のメッシュ長さはそれぞれ 60 μ m, 30 μ m, 15 μ m である。

Table 1. Physical properties

	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/m-s)	Surface tension coefficient(N/m)
Air	1.293	1.7 × 10 ⁻⁵	0.0184
C ₆ H ₁₄	677.9	3.1 × 10 ⁻⁴	

Table 2. Boundary conditions

	Pressure(MPa)			Turbulence length scale(mm)	Turbulence intensity	VOF fraction
	Case1	Case2	Case3			
Inlet1	0.5	0.5	6.0	0.8	5% × U	1
Inlet2	0.1	0.05	0.1	1.0	15% × U	0

(U: mean velocity)

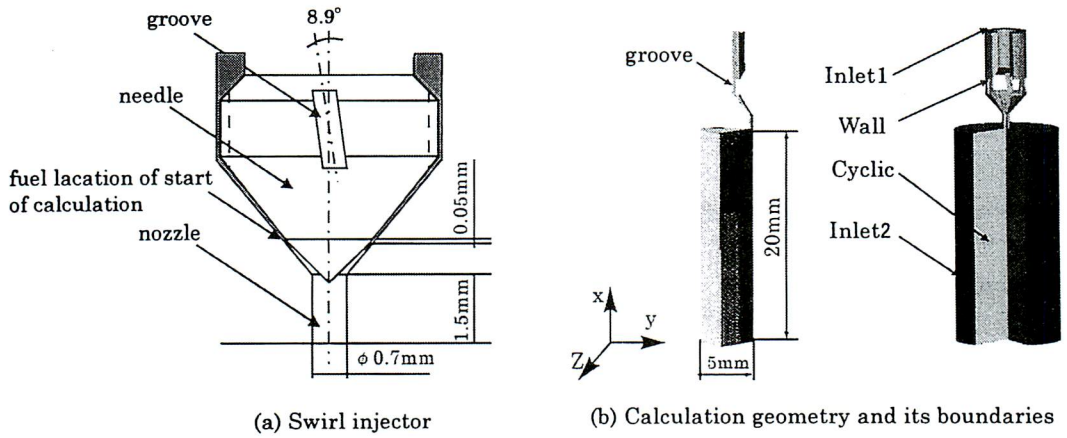


Fig 1. Schematic of swirl injector

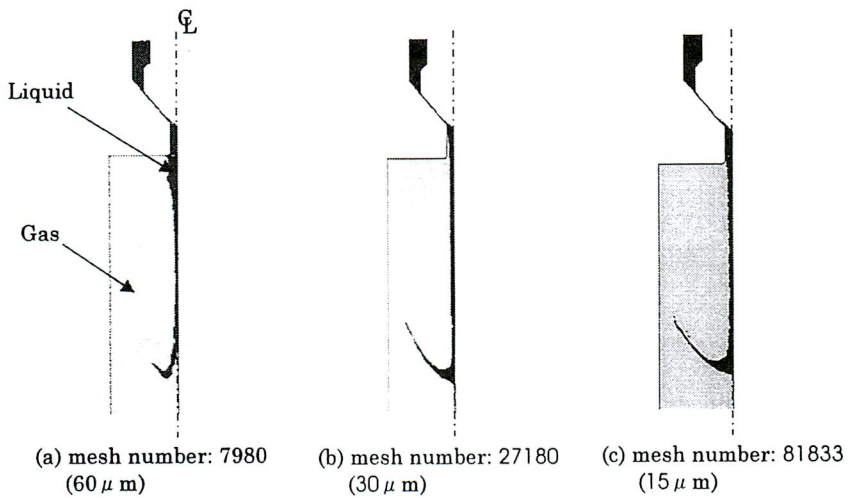


Fig 2. Effect of calculation mesh size

メッシュを $30\mu\text{m}$ 以下にすれば、ほぼ同じ結果が得られた。そこで、計算格子の最小格子長さは $30\mu\text{m}$ にした。図 1 に示したモデルの格子点総数は 168,600 となった。

2.3 境界条件及び初期条件

噴射圧力及び雰囲気圧力の影響を調べるために、計算は表 2 に示すような 3 つのケースについて行なった。図 1(b) に示した Inlet1 は燃料の流入境界であり、圧力境界条件として噴射圧力を与えた。Inlet2 はインジェクタ外部の領域の境界で、圧力境界として雰囲気圧力を与えた。また、Inlet1 及び Inlet2 で乱流エネルギー k はそれぞれ平均流速の 5%、10%、乱流長さスケールは 0.8mm 及び 1mm を与えた。乱流消散率 ϵ は $\epsilon = C_d \frac{1}{2} k^2 / L$ (ここで $C_d=0.09$) の代数式から求めた。今回は、計算開始と同時にニードルリフトが 0 から最大 (0.05mm) になり、計算期間中リフトは変化しないと仮定した。初期条件として、液相が図 1(a) に示した位置から計算を始めることにした。

3. 計算結果と考察

計算結果との定性的な比較を行うため、レーザシート法による噴霧縦断面の可視化実験を行った。噴射圧力 0.5MPa 、雰囲気圧力 0.1MPa とし、噴霧の中心軸

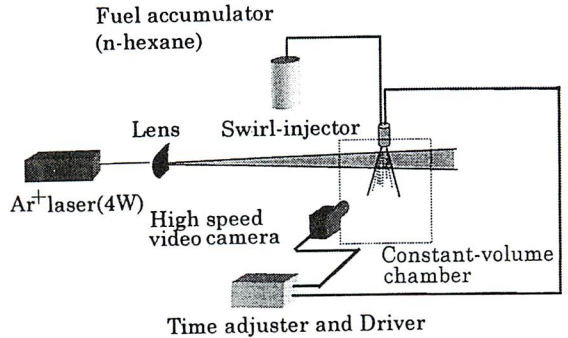


Fig 3. Experimental setup for cross sectional visualization of a fuel spray

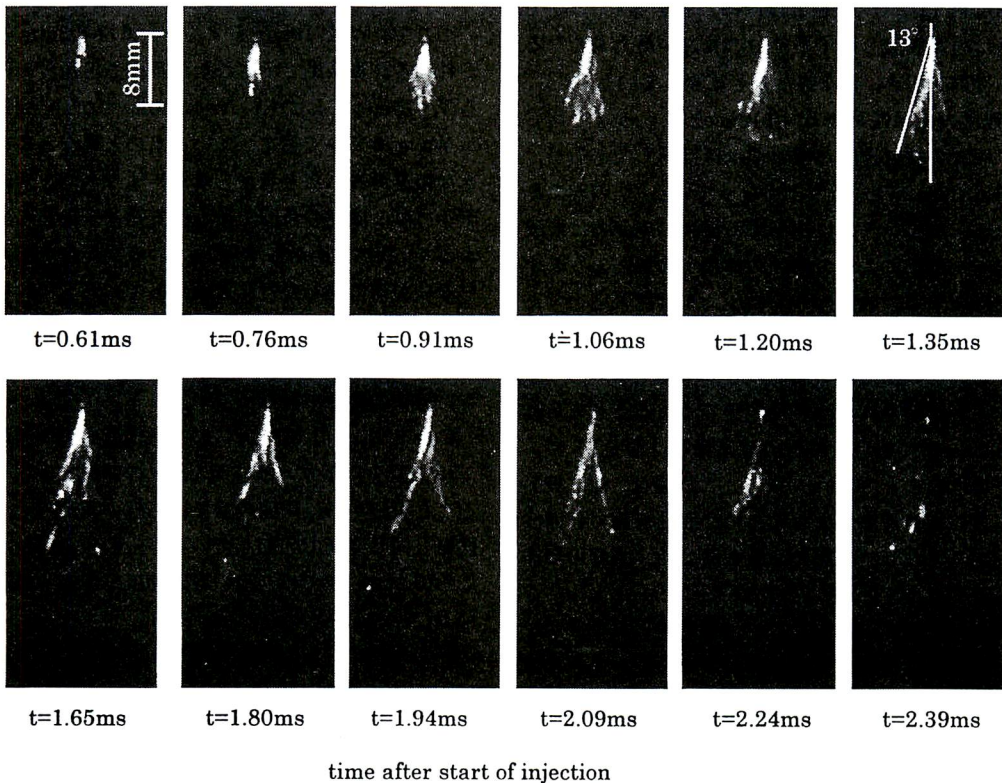


Fig 4. Photographs of a fuel spray (injection : 0.5MPa , environment: 0.1MPa)

を含む縦断面の直接撮影を、図3に示す装置により行った。光源には、全波長発振の Ar⁺ レーザ(出力 4W)を用いた。出射されたレーザービームは平凸レンズを通して、幅 100mm、厚さ 2.3mm のレーザーシートになり、散乱光を高速度ビデオカメラ(撮影速度は 13500fps、空間分解能が 128×128)により撮影した。

噴霧の写真を図4に示す。燃料が噴口で最初に観察された駒の時間を t=0 としてある。図より、最初に液柱状の燃料が噴出された後、ホロコーン状の分布になることが分かる。燃料噴射開始直後(t=0.7ms 付近)の先端部到達距離の時間変化から計算した噴射速度は約 18m/s で、噴射開始後 1.35ms における見かけの噴霧角は約 26° となる。

次に計算結果を示す。図5(a)~(c)は噴霧中心軸を含む縦断面における各ケースの液相部の時間変化を示す。共通して言えることとして、まず噴霧表面で横方向に振動が生じ、振幅が大きくなると、液柱表面が魚の骨状の形となって分裂が生じている。また、最初噴霧は中実であるが、分裂が生じる頃には中空円錐状の分布に変化することが分かる。

実験と同一条件である(a)Case1 の場合の噴霧広がり半角は約 12° で、実験とほぼ同じ値を示す。ここで、噴霧角は噴霧表面と接する部分の長さが最も長くなるように接線を引き、その挟み角と定義している。但し、±2° 程度の任意性がある。(b)Case2 と Case1 を比べると、両者の噴射速度と噴射率はほぼ同じであるが、噴霧角は Case2 の方が大きくなっている。この理由を考えみる。まずコーンに相当する液膜の内側では液膜のスワール運動によって内側の体積が膨張しようとするため減圧する。液膜の外側の圧力が雰囲気圧力であり、内側との圧力差は液膜の旋回による遠心力と釣合っている。この圧力差が高いほど、噴霧が広がろうとする作用が抑制され、噴霧角が小さくになると考えられる。(c)Case3 の場合、燃料の流量係数は約 0.91 で、噴出速度はおおよそ 80m/s である。この場合、液柱表面と空気との相対速度が大きいため、液柱表面で表面波の成長が早くなり、液膜の分裂が激しく、噴霧の到達距離も長くなっていることが分かる。Case1 と比べ、噴射圧が 10 倍以上になっても、噴霧角はほぼ同じであり、噴霧角は雰囲気圧力の影響を強く受けると考えられる。

図6は Case2 で、燃料の分裂が始まった後の噴霧中心断面上の速度ベクトルを示す。噴口での噴射速度はおおよそ 18m/s で、速度は液柱中心軸付近で遅く、表面

付近で早くなっていることが分かる。液流と空気の摩擦により、最初に液面付近で微小な攪乱が発生し、やがて液面付近で渦が形成される。この渦の流れに沿って液膜の表面から液糸が表れ、さらに液糸が液滴に分裂してゆく。その後、液膜の内側で空気がインジェクタ内部に向かって流れ込み、中空円錐状の分布になってゆくことが分かる。

比較のために、Reitz⁽⁷⁾の Wave-Breakup モデルによる最大不安定波長を見積もってみた。このモデルでは、不安定波長 Λ は次の式で表される。

$$\Lambda = a \times 9.02 \times \frac{(1 + 0.45 Z^{0.45})(1 + 0.4T^{0.7})}{(1 + 0.87 We^{1.67})^{0.6}} \quad (3.1)$$

ここで、a: ノズル半径

Z: Ohnesorge 数(= $\mu / \sigma a$)^{0.5})

T: Taylor パラメータ(= $ZWe^{0.5}$)

We: Weber 数(= $\rho W^2 a / \sigma$)

σ : 表面張力

μ : 粘性係数

ρ : 空気の密度

W: 相対速度

ここで、W を 10m/s とすると、 Λ は 8.3mm となり、これは本計算結果で示された波長の 5 倍程度の値である(W=15m/s にしても、 $\Lambda=4.9$ mm となる)。分裂形態が Wave モデルで想定しているものと異なるため、大きな相違が表れたと考えられる。すなわち、Wave モデルでは、液柱の表面で最も不安定な表面波の成長によって、液柱表面から半径 $B_0 \Lambda$ の液滴が飛び出しながら液柱が前に進んで行くと仮定している。これに対し本計算結果では、液柱表面での不安定性による振動が大きくなり、魚の骨状の分布となって分裂が生じており、分裂の形態が異なっている。

Case2 で、t=0.168ms における横断面での速度ベクトルを図7に示す。液柱が 2m/s の速度で旋回していることが分かる。周囲の空気は液柱の表面付近ではほぼ燃料と同じ速度で回転しているが、わずかに離れたところ(0.2mm 位)では、その旋回速度が急激に減衰している。

同じ条件で、中心軸を含む縦断面の圧力分布を図8に示す。ノズル内部で、スワールにより壁付近の圧力が高く、中心付近で低くなっている。液膜の内側と外側との間の圧力差は約 4kPa であり、液膜の旋回による遠心力と釣合っており、噴霧角がスワール速度及び

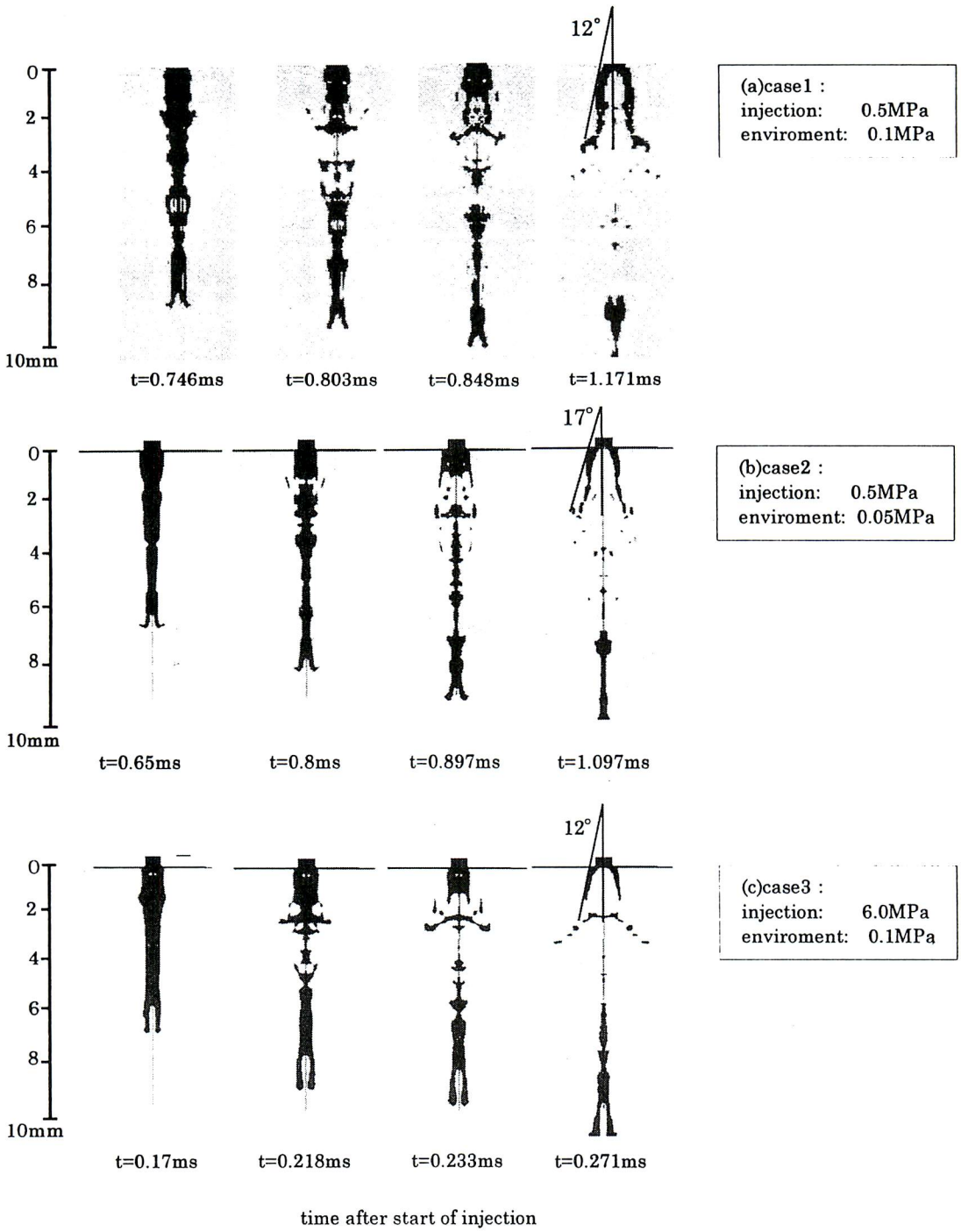


Fig 5. Spray formation process on vertical cross section

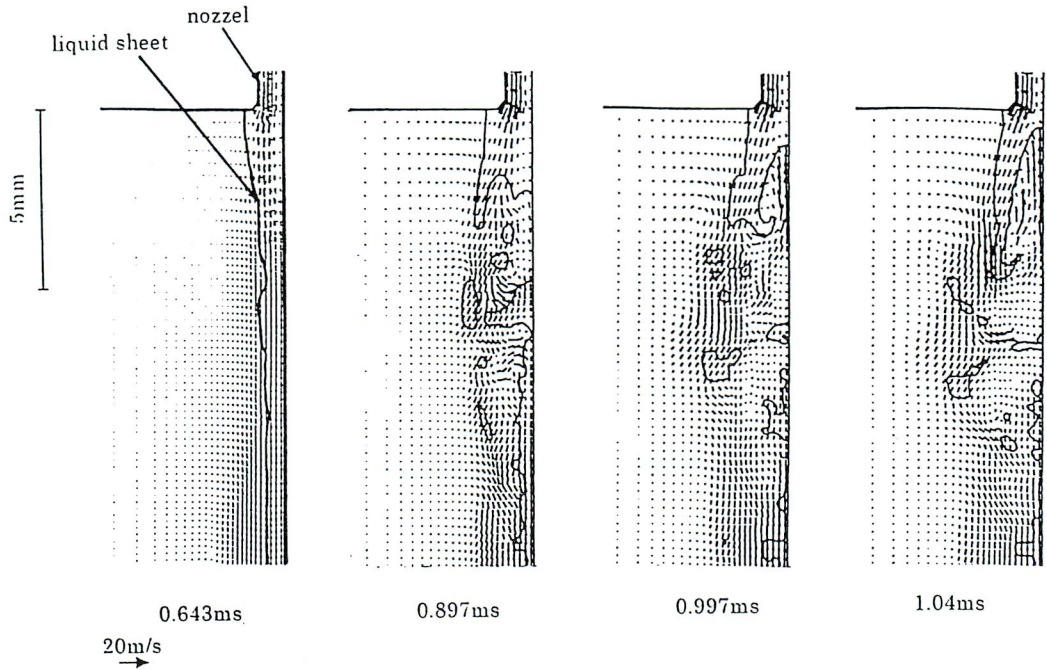


Fig 6. Spatial profiles of velocity and liquid surface on vertical cross sections in case2 (injection pressure: 0.5MPa, environment: 0.05MPa)

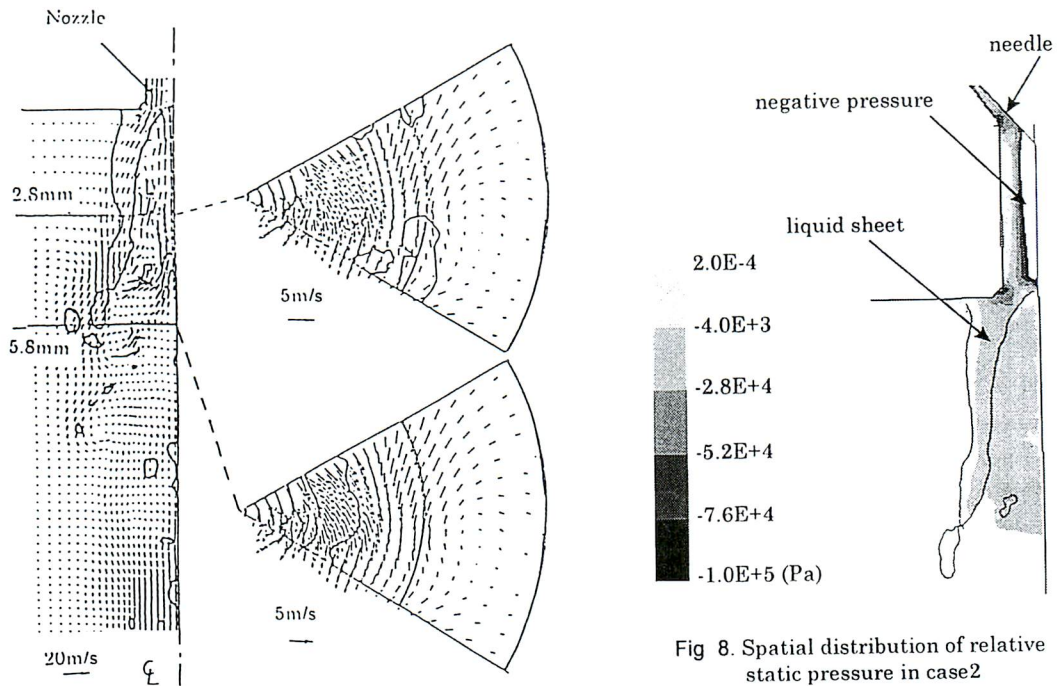


Fig 7. Spatial profiles of velocity and liquid surface on horizontal cross sections in case2

Fig 8. Spatial distribution of relative static pressure in case2

雰囲気圧力から決まっていることが推定できる。また、ニードルの先端部分において、負圧が発生していることが分かる。ここでは旋回流が加速されるため、減圧沸騰が生じる可能性があるが、本計算では、この現象はモデル化されていないため再現できない。

4. まとめ

- (1) VOF モデルを用いて、スワールインジェクタ内部から外部に燃料が噴出される初期過程の数値解析を行うことができた。その際、噴射圧 0.5MPa とした場合の液柱の分裂を計算するためには、メッシュサイズを 30 μ m 以下にする必要がある。
- (2) 噴射初期の過程を計算することにより、最初に中実の液柱が噴出され、その表面が不安定になって魚の骨状の分布となり、液滴へと分裂が生じること、またこの分裂が生じる頃には液相が中空円錐状の分布へと変化することが予測された。
- (3) 噴霧角は雰囲気圧力とスワール強度の影響を強く受ける。雰囲気圧力が高いほど噴霧角が小さくなる。この現象は、高速度ビデオによる直接撮影から検証することができた。
- (4) ニードル先端部で燃料が急速に旋回されるため、減圧沸騰が生じる可能性がある。今後、この現象についてモデル化する必要がある。

最後に、部品の提供を賜りました(株)ゼクセルに感謝致します。

文献

- (1) Y.Takagi: "A New Era in Spark Ignition Engines Featuring High Pressure Direct Injection", Twenty-Seventh Symposium(Int'l) on combustion, (1998)
- (2) 古谷 雄二: "筒内ガソリン噴射用スワールインジェクタの研究", ゼクセルテックレビュー, No.11.1.
- (3) C.T.Crowe, M.P.Sharua and D.E.Stock: "The Particle Source In Cell(PSI-cell) Model for Gas-Droplet Flows", Journal of Fluids Engineering, Vol99, P325-332(1977)
- (4) C.W.Hirt and .D.Nichols: "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics

39, 201-225(1981)

- (5) J.U.Brackbill, D.B.Kothe, and C.Zemach: "A continuum Method for Modeling Surface Tension", Journal of Computational Physics 100, 335-354(1992)
- (6) S.E.Kim and D.Choudhury: "A Near-Wall Treatment Using Wall Function Sensitized to Pressure Gradient", In ASME FED Vol.217, Separated and Complex Flows, ASME, 1995.
- (7) Alex B.Liu, Daniel Mather, and Rolf D. Reitz: "Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel spray", SAE Paper 930072, (1993)



胡 霄

千葉大学大学院自然科学研究科
人工システム科学専攻
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
Tel: 043-251-1111(3183)
Fax: 043-290-3039
E-mail:
usr212@engine4.tm.chiba-u.ac.jp

略歴: 1998年千葉大学大学院電子機械研究科博士前期課程修了, 同年博士後期課程に進学。位相ドップラ解析計(PDA)及び数値解析などを用いて, スワールインジェクタによる燃料噴霧の特性の解明を行っている。



森吉 泰生

千葉大学工学部電子機械学科
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33
Tel: 043-290-3182
Fax: 043-290-3039
E-mail:
ymoriyos@meneth.tm.chiba-u.ac.jp

略歴: 1990年東京工業大学大学院博士課程修了。千葉大学工学部機械工学科助手, 講師を経て, 助教授。エンジン内の熱と流れの数値シミュレーション及びレーザ計測に関する研究に従事。