3次元数値流体解析技術を用いたスワールノズルの 特性予測手法に関する精度検証*

久保賢明^{*1}, 榊田明宏^{*1}, 飯山明裕^{*1}

Validation of Predicted Characteristics of Swirl Nozzles Using a 3-dimensional CFD Technique

Masaaki KUBO^{*2}, Akihiro SAKAKIDA and Akihiro IYAMA

^{*2} Powertrain and Environment Research Laboratory, Nissan Research Center, Nissan Motor Co., Ltd.,
1 Natsushima cho Yokosuka shi, Kanagawa, 237-8523 Japan

A new technique was applied to the swirl nozzles of direct-injection gasoline engines with the aim of predicting their characteristics with higher accuracy. This new technique is based on 3-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) using a volume of fluid (VOF) model. A new technique using particle image velocimetry (PIV) was also developed to measure the spray at the exit of the nozzle holes in order to obtain experimental data for validation. This technique made it possible to ascertain the cavity factor, which affects atomization characteristics. The calculated results showed relatively good agreement with the measured results. A conventional method, known as Tanasawa's equation, was also compared with the measured results and shown to be accurate.

Key Words: Atomization, Laser, Gasoline Engine, Fuel Injection, Swirl Nozzle, PIV, Computational Fluid Dynamics, VOF

1. 緒 論

スワールノズルは、比較的低燃圧で微粒化できるため、直噴ガソリンエンジンに採用されている例が多い^①。このノズルによって形成される噴霧は、燃焼に大きな影響を与えるため、エンジン性能のさらなる向上のためには、このスワールノズルを最適に設計する必要がある。また、最近では直噴ガソリンエンジンにおける混合気場を3次元の数値流体解析技術(Computational Fluid Dynamics; CFD)を用いて検討することが多くなってきており、噴霧の計算を行う上での境界条件としてノズル出口における粒径や流速を求めることはきわめて重要になってきている。それゆえ、従来より多くの研究が行なわれている。実用的な方法としては古くから用いられているポテンシャル解析法(棚沢らの理論式^②)や、この理論式を実用的な精度で用いるための実験補正式が提案されている。簡易的に予測する手法として現在もお用いられているが、その精度に関して十分な検証が行わ

れていないのが現状である。

予測精度をさらに向上させるために、最近ではノズル内部の流れに関して3次元のCFDを用いることが行われている。しかし、スワールノズルは噴孔出口において空洞が発生し、この空洞発生が微粒化特性を支配する極めて重要な物理現象であるにもかかわらず、燃料と空気の二相流を解く技術がなかったため実際の物理現象に即した計算方法とはいえなかった。最近になり、気液二相流に関する計算技術が発達し、ようやく計算可能となってきた^③。しかしながら、これらの計算法による結果を実験結果と十分比較検証されていがないのが現状である。その理由としては、噴孔出口の空洞率、すなわちノズル出口噴孔径に対する空洞の径の比が、重要であるにもかかわらず、測定することが困難であったためである。

そこで本報では、まず噴孔出口部における流速をPIV(Particle Image Velocimetry)を応用した技術により測定する技術を新たに開発した。この噴孔近傍の流速測定方法に関しては、PDA(Phase Doppler Anemometry)などでは従来計測が困難とされており、今回PIVを用いることにより可能にした。得られた流速と別に計測された流量より間接的に噴

* 原稿受付 2003年3月7日。

^{*1} 正員、日産自動車(株)総合研究所(〒237-8523 横浜賀市夏島町1)。

E-mail: m_kubo@mail.nissan.co.jp

孔出口部における空洞率を求めることができる。計測結果は棚沢らの理論式の結果と比較し精度を検証した。さらに、気液二相流の計算法の1つであるVOF (Volume of Fluid)モデルを用いた3次元の粘性解析を行ない、各種噴霧特性実験結果と比較することにより本計算法の精度を検証した。

2. 主な記号

K: 特性係数

・: 空洞率

C_0 : 流量係数

・: 噴孔出口の噴霧角 deg

S : スワール溝断面積 m^2

r_e : 噴孔半径 m

r_c : 空洞径 m

r_i : 渦室半径 m

Q : 流量 m^3/s

W : 噴孔出口部における軸流成分流速 m/s

U : 噴孔出口部における旋回成分流速 m/s

Fig. 1 Swirl nozzle and spray patterns

Fig. 2 Test nozzle geometries

3. 供試スワールノズル

本報で用いたスワールノズルは、研究用に特別に試作したものであり、ノズル先端にスワール溝の付いたスワールチップを固定したタイプである。図1に概要図を示す。今回10種類のノズルチップを用い、その仕様を表1に示す。変化させたパラメータは、スワール溝の幅、高さ、偏芯量と噴孔径である。代表的な2つのノズルチップの形状を図2に示す。2つのノズルチップから噴射される噴霧は噴霧角度が違ふ。スワール溝の偏芯量が大きく噴霧角度の広いタイプが Nozzle A、偏芯量が小さく噴霧角度の狭いタイプが Nozzle B である。

Nozzle	Eccentric length (mm)	Groove width (mm)	Groove height (mm)	Hole diameter (mm)
	E	B	H	D_h
A	0.75	0.33	0.16	0.7
B	0.375	0.33	0.16	0.7
C	1.05	0.33	0.16	0.7
D	0.75	0.15	0.12	0.7
E	0.75	0.49	0.25	0.7
F	0.75	0.33	0.33	0.7
G	0.75	0.33	0.11	0.7
H	0.75	0.82	0.33	0.7
I	0.75	0.33	0.16	0.5
J	0.75	0.33	0.16	0.8

Table 1 Test nozzle specifications

4. 実験装置および計測方法

実験装置の概略を図3に示す。流速測定には、PIVの計測手法を応用した。 N_2 ガスにて加圧可能なチャンバにノズルを取り付け、高圧ポンプにて昇圧された燃料を供給する。噴射により形成された噴霧は、波長532nmのダブルパルスYAGレーザ(New Wave Research社製、15mJ、発光パルス幅6ns)をシリンドリカルレンズにてシート状にし、断層として可視化する。シートの厚みは0.135mmである。可視化した画像は2台のNTSC方式のCCDカメラに記録する。PIVをもちいた速度の算出には相互相関法を用いた。そのため2枚の画像は、同じ位置を撮影するよう調整された2台のCCDカメラによってそれぞれ1枚ずつ撮影する。記録を行なうフレームの位置、パルスレーザの発光タイミング、およびノズルの駆動タイミングを、パーソナルコンピュータにてTTL信号として発振した後、分配回路によって振り分けることにより制御する。図4に制御方法を示す。カメラ1における1フレーム上のodd fieldの最後と、カメラ2におけるodd fieldの最初に一度ずつレーザを発光する。また、2台のカメラは、わずかな遅れを自由に生じさせることができる。この方法を用いて、従来非常に困難であった2枚の時間間隔 Δt が $0.1\mu\text{s}$ という極めて短い時間間隔の2枚の画像を得ることができるようになった。ただし、この時間間隔が

小さすぎる場合には移動量が小さく誤差が大きくなるため、ここでは $2\mu\text{s}$ を用いた。得られた画像は濃度を用いた相関法にて計算され、速度ベクトルを算出する。本実験では、特別なシーディング材を用いておらず、燃料の液滴群で形成される濃度分布を用いて計測を行った。液膜厚さ方向に3点、進行方向に30点の測定点をとり全ての平均値を取った。なお、空間分解能は $10\mu\text{m}$ 以下であるが、濃度相関を取るための検査領域には 15×15 ピクセル、およそ $150\mu\text{m}$ を用いている。また、2台のカメラによって撮影される画像の微小なずれを補正するため、静止画において相関をとり測定後補正するようにした。可視化する画像の大きさは、噴孔近傍の $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 程度の大きさとした。なお、実験に用いた燃料はシェル石油の LAWS (Low Aromatic White Spirit) である。表2に物性値をガソリンと比較して示す。密度や表面張力がガソリンに近く、揮発性がガソリンより低いため安全性を考慮して選択した。

次に、得られた噴孔出口における流速から噴霧特性にとって重要な空洞率の算出方法を示す。まず、空洞率は以下の式で表わされる。

$$\kappa = \frac{r_c}{r_e} \quad (1)$$

Fig. 3 Experimental apparatus

Fig. 4 Timing control

Property	LAWS	Gasoline
Density (kg/m^3)	793	745
Kinematic Viscosity (m^2/s)	1.12×10^{-6}	2.25×10^{-6}
Surface Tension (N/m)	2.51×10^{-2}	2.25×10^{-2}
Flash Point (K)	319	230

Table 2 Comparison of fuel properties

流量 Q は、1000 回の間欠噴射された燃料の重量を測定する方法を用いた。また、噴霧角度に関しては、噴孔近傍の PIV を用いた測定結果である U と W から以下の式により求めた。

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1}(U/W) \quad (2)$$

空洞率 κ に関しては、軸流速度 W と前述の流量から以下の式にて算出した。ただし、ここでは液膜厚さ方向の流速分布はないものと仮定している。

$$\kappa = \sqrt{1 - \frac{Q}{\pi \cdot W \cdot r_e^2}} \quad (3)$$

なお、空洞率に関する測定誤差については、PIV の測定誤差、流量の測定誤差ならびに液膜方向に速度を一定と仮定していることに基づく誤差が考えられる。そこで、上述のような間接的な方法ではなく、直接ノズル出口の空洞率を可視化で計測することを試みた。ノズル先端部にガラスをはめ込み、後方の光源を通して CCD カメラで撮影した。結果は Nozzle A, Nozzle B の 2 種類を撮影し図5に示す。空洞率は、可視化結果で得られた画像を画像処理することにより算出する。画像輝度に設定するしきい値によって空洞率は変化する。PIV を用いた結果と比較して表3に示す。このことから、PIV を用いた結果は概ね可視化した結果と一致しておりその誤差は最大 7% である。

Fig. 5 Visualized results

	Experimental results	
	PIV	Visualization
Nozzle A	0.74	0.70~0.74
Nozzle B	0.68	0.63~0.68

Table 3 Comparison of visualized results and PIV results

5. 計算方法

5・1 棚沢らの理論式⁹⁾ 非粘性を仮定し、角運動量保存式、エネルギー保存式、連続の式を解くことにより、特性係数 K 、流量係数 C_p 、噴霧角 α を下記のように(1)式で定義した κ を用いた式で表すことができる。

$$K = \frac{S_i}{\pi \cdot r_e \cdot r_i} \quad (4)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{\kappa^2} - 1} - \kappa \cdot \ln \left| \frac{1}{\kappa} + \sqrt{\left(\frac{1}{\kappa}\right)^2 - 1} \right| \quad (5)$$

$$C_0 = \sqrt{1 - \kappa^2} - \kappa^2 \ln \left| \frac{1}{\kappa} + \sqrt{\left(\frac{1}{\kappa}\right)^2 - 1} \right| \quad (6)$$

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\kappa}{\sqrt{1 - \kappa^2}} \right) \quad (7)$$

Fig. 6 Computational grid

Fig. 7 Needle lift condition

5・2 VOFモデルを用いた3次元数値解析手法 図6には Nozzle A の計算に用いた格子を示す。計算領域としては、スワール溝より下流側のノズル内に加えて、ノズル噴孔出口から1mmの大気開放部までとしている。円周方向に6本のスワール溝を有する供試ノズルは周方向に周期的に対象であるため、全体の1/6のみの格子とし、境界条件として周期境界条件を与えた。針弁のリフト量に関する特性は簡易的に図7に示すように与えた。計算開始時において5μm開弁した状態から計算をしているのは、格子のトポロジーを維持するために仮定したためである。計算開始時にはシート部より上流に燃料が、下流に空気がそれぞれ存在すると仮定し、計算開始時に下流側に噴出するとした。計算格子数はノズルの仕様によって差があるが Nozzle A の場合で25,540である。計算には汎用流体解析ソフトのSTAR-CDを用い、乱流モデルには、標準型k-εモデルを用いた。二相流の計算にはVOFモデルを用いた。この方法はHirtら⁹⁾によって提唱されたもので、3次元のNavier-Stokes方程式に加えて、格子内における液相の占める割合をスカラー量として定義している。すなわち格子内が全て流体であれば1、気体であれば0を示す値を定義し、このスカラー量の輸送を同時に解くことを特徴としている。

6. 結果及び考察

6・1 棚沢の理論式と実験結果の比較 棚沢の理論式から得た計算結果と実験結果とを比較し、流量係数に関して図8に、噴霧角度に関して図9に、そして空洞率に関して図10にそれぞれ示す。噴霧角度に関しては、棚沢らの理論式の計算結果が実験結果に対して小さくなっている。また、流量係数と空洞率に関しては、計算結果と実験結果は概ね一致しているが特性係数が小さい、すなわちスワールが強く噴霧角度が大きい場合には実験で得た流量は計算に比較して大きくなり、空洞率に関しては逆に小さくなる傾向を示した。また、特性係数の大きい、すなわちスワールが小さく噴霧角度が小さい場合には実験で得た流量は計算に比較して小さく、空洞率に関しては逆に大きくなる傾向を示した。この理由は、特性係数を小さくして空洞率を大きくし、より微粒化を促進させようとしても実機においては粘性の影響があり、液膜は十分に薄くならず、これにより流量が大きくなるためであると考えられる。

6・2 3次元シミュレーションを用いた結果と実験結果との比較 VOFモデルを用いた3次元の粘性数値解析手法を用いることにより、噴射開始から液膜の発達する過程を計算することができる。ノズル断面における液膜の発達過程をNozzle AとNozzle Bで比較して図11に示す。実験結果と比較検証のため噴射開始時における初期の噴霧の撮影

Fig. 8 Comparison of measured flow coefficient with Tanasawa's theory

Fig. 10 Comparison of measured cavity factor with Tanasawa's theory

Fig. 9 Comparison of measured cone angle with Tanasawa's theory

結果を図中に示す。撮影結果はレーザーシートを光源としたものではあるが、噴孔径は 1mm 以下と小さい上に液膜の状態であるので噴霧全体が撮影されている。両者の Nozzle においても噴射開始時において下向きの液柱が噴出開始後徐々に噴霧角度を形成するよう傘状に広がってゆく定性的傾向が実験結果と計算結果とで比較的良好一致している。Nozzle A は Nozzle B に対して特性係数が小さい、すなわちスワールが強く噴霧角度が大きい。Nozzle A は Nozzle B に比較して噴孔内において液膜が発達するのが早いことがわかる。このことは、Nozzle B の方が微粒化した噴霧を得るのに時間がかかることを示しており、噴霧角

Fig. 11 Cavity development process inside the nozzles

度の大きい噴霧の方が早く微粒化したい場合に適していることがわかる。

次に、噴射開始後十分に時間が経過しノズル内の流れ場が安定した時刻において、流量、噴霧角度、そして空洞率といった計算結果を実験値と比較する。安定した流れ場となった状態の代表的な状態として、噴射開始から 0.5ms 経過した状態のノズル断面における液膜の様子を図 12 に示す。ここで、Nozzle A の空洞率が Nozzle B に比較して大きいことが確認できる。図 13 には、十分発達した上記時刻における噴孔出口部の流速分布を示したものである。比較のため PIV を用いて計測した結果も示す。この結果から、数値計算においても、実験においても誤差を含む要因があるものの、W 方向速度の傾向は概ね一致していることがわかる。

表1に示した全てのノズルに対して、計算値と実験値を比較して噴霧角度、流量、そして空洞率をそれぞれ図 14, 15, 16 に示す。ここで、VOF モデルを用いた数値計算においては、液体と気体の界面は完全に分離されるわけではなく VOF の値は界面近くで 0 と 1 の中間的な値をとる。また、各計算格子で離散的な値を持つため、まず各位置における VOF の値を線形的に補間を行った後に、しきい値 0.7 で気液が分離していると仮定した。しきい値 0.7 は、Nozzle A の実験値に合うように選択したものであり、しきい値を 0.1 変化させると空洞率は 0.01 変化する。しかしながら、概ね

Fig. 12 Developed spray

Fig. 13 Velocity distribution at nozzle exit

Fig. 14 Relation between calculated and measured cone angles

Fig. 15 Relation between calculated and measured flow rates

Fig. 16 Relation between calculated and measured cavity factors

その変化率はノズルが変化しても大きくは変化しないため、相対的な比較のためにしきい値 0.7 を選択した。まず噴霧角度に関して図 14 を見ると、VOF モデルを用いた計算では実験結果に比較して若干小さめであることがわかる。しかしながら、計算値は実験値に対してほぼ全ての結果が $0 \sim 10^\circ$ 小さくなっておりほぼ直線状にプロットされている。一方棚沢らの理論式で計算した結果は、全体に実験値に対して大きな値であるだけでなく、VOF モデルを用いた 3 次元の数値解析手法を用いた場合に比較して相関が弱い。図 15 の流量に関しては、VOF モデルの用いた計算結果が実験値より若干大きめとなっている。これは、上記の噴

霧角度が小さめに計算されていることと関係する。とはいえ、噴霧角度の場合と同様に流量に関してもVOFモデルを用いた計算値と実験値の間には比較的強い相関が見られる。図16に示す空洞率に関しては、前述のしきい値の選定に応じて、多少結果が変化するものの概ね実験値と比較的強い相関があることがわかる。また、比較のために棚沢らの理論式の結果を示すが、VOFモデルを用いることにより実験値との相関がより強くなっていることがわかる。以上のことから、このVOFモデルを用いた3次元粘性解析手法を用いることによりノズル設計上重要である流量、噴霧角、そして空洞率に関して少なくとも棚沢らの理論式に比べてより高い精度で予測可能であることが示された。

7. 結言

PIVを用いた方法により従来困難であったノズル出口近傍の流速測定を行い、実験的に空洞率を求めた。得られた計測結果を用い、従来用いられてきた棚沢の式およびVOFモデルを用いた3次元流れ解析を用いた計算結果の検証を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 棚沢らの理論式から得た計算結果は、流量特性および空洞率に関して概略の傾向を予測できるものの、噴霧角度に関しては概ね小さく計算される。
- (2) VOFモデルを用いた3次元の粘性解析手法を用いた計算結果は、噴霧角度が若干小さくまた流量

係数が若干大きくなるものの、棚沢らの理論式と比較して流量特性、噴霧角度、空洞率の全てにおいて実験結果とより強い相関を得ることがわかり、少なくとも棚沢らの理論式より予測精度が高い。

参考文献

- (1) 伊東輝行・高木靖雄・飯山明裕・村中重夫, 直噴ガンリン機関の燃焼特性解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, 971, No. 9732108, (1997), 337-340.
- (2) Yasushi Tanasawa and Kiyoshi Kobayashi, A Study on Swirl Atomizer, Tech. Rep. Tohoku Univ., 10-1 (1955), pp. 27-58.
- (3) W. M. Ren and J. F. Nally, Jr., Computations of Hollow-Cone Sprays from a Pressure-Swirl Injector, SAE Paper No. 981610 (1988).
- (4) C. Arcoumanis and M. Gavaises, Pressure-Swirl Atomizers for DISC Engines: Further Modeling and Experiments, SAE Paper No. 2000-01-1044 (2000).
- (5) 胡霄・高木正英・森吉泰生, スワールインジェクタによる噴霧形成過程のモデリング, 自動車技術会学術講演会前刷集, 74-02, No. 20025156, (2002), pp. 1-4.
- (6) C. W. Hirt, and B. D. Nicholls, Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics Free Boundaries, J. Comput. Phys., 39 (1981), pp. 201-225.