エンジン吸気ポート内燃料液膜流解析シミュレーション*

吉川 康雄^{*1}, 中田 勉^{*2}, 伊東 輝行^{*1}
高木 靖雄^{*1}, 河崎 照文^{*3}, 川部 隆平^{*3}Numerical Simulation System for Analyzing Fuel Film Flow
in Intake Port of Gasoline EngineYasuo YOSHIKAWA, Tsutomu NAKADA, Teruyuki ITOH,
Yasuo TAKAGI, Terufumi KAWASAKI and Ryuhei KAWABE

A numerical model for film flow analysis was developed in which three-dimensional film flow behavior is treated as two-dimensional flow on curved surfaces, and the three-dimensional curved surfaces are projected onto imaginary flat planes to transform the three-dimensional equations into two-dimensional ones. This model is combined with a gas flow model and a spray model to form a numerical simulation system for analyzing fuel film flow in the intake port of gasoline engines. The qualitative validity of the system was verified by comparison with a fuel film flow formed in the intake port of a real engine.

Key Words: Liquid Fuel, Gasoline Engine, Fuel Injection, Computational Fluid Dynamics, Numerical Analysis, Film Flow, Intake Port, Combustion Chamber

1. はじめに

自動車の排気清浄化および燃費向上は、環境問題の重要な課題である。ガソリン機関において、これらの性能に影響を与える一因として、吸気ポート内での燃料液膜の形成が挙げられる。

一般的な市販のマルチポート燃料噴射型のガソリン機関においては、吸気ポート内で噴射された燃料の多くは燃焼室内に直接流入するが、一部はポート、バルブ壁面に付着し液膜を形成する。この液膜は、機関の排気特性、燃費のみならず、加速応答性や冷間時始動性等の諸性能にも影響を与える。

シミュレーションの観点からは吸気ポート内の気流(1)、燃焼(2)、燃料噴霧(3)(4)のモデル化は広く行なわれているが、このような壁面に形成された燃料液膜挙動の予測モデルの研究は、あまり行なわれていない。そこで、著者等は、燃料液膜モデルを開発し、エンジン吸気ポート内燃料液膜流解析システムを構築した。

2. 記号

B	運動量補正係数 [式(11)]
C_d	空気抵抗係数 [式(2)]
d_{drop}	液滴直径
$F_{air}^{\xi}, F_{air}^{\eta}$	気液界面における摩擦力の ξ, η 方向成分
$F_{wall}^{\xi}, F_{wall}^{\eta}$	液固界面における摩擦力の ξ, η 方向成分
g_x, g_y	加速度の x, y 方向成分
h	液膜厚さ
l, m	実曲面上の格子と投影平面の なす角度の方向余弦
$\dot{m}_{dep}$	単位時間単位面積当たりの壁面に 衝突する液滴の質量
p	圧力
Re_d	飛翔液滴に関する Reynolds 数 [式(3)]
t	時間
v_x, v_y	液膜速度の x, y 方向成分
$v_{dep}^{\xi}, v_{dep}^{\eta}$	壁面に衝突する液滴の速度の ξ, η 方向成分
v_{ξ}, v_{η}	液膜速度の ξ, η 方向成分
$v_{\xi}'(h)$	液膜速度の厚さ方向分布
V_a	気流速度
V_d	液滴速度
x, y, z	投影平面の座標

* 原稿受付 1995年2月17日。

^{*1} 正員, 日産自動車(株) (〒237 横浜須賀町夏島町1)。^{*2} 日産自動車(株)。^{*3} 正員, (株)日立製作所 (〒319-12 日立市大みか町7-2-1)。

ξ, η	実曲面上の座標
ν	空気の動粘性係数
ρ	液体の密度
ρ_{air}	空気の密度
φ	実曲面上の格子の2辺のなす角度

3. 基礎式およびシステム構成

マルチポイント燃料噴射型ガソリン機関においては、燃料は吸気ポート内に設けられた燃料噴射弁より液滴状の噴霧として噴射される。この噴霧は吸気ポート内の気流に影響され、一部は液滴ないし蒸気の状態で燃焼室に流入する。また、一部は、液滴の状態でポートの内壁面や吸気バルブ壁面に衝突し付着する。付着した燃料は液膜を形成し、重力および気流との剪断力によって、壁面上を移動する。

このような吸気ポート内の燃料の挙動を記述するためには、

- 1) 吸気ポート・燃焼室内ガス流動モデル
- 2) 燃料噴霧モデル
- 3) 燃料液膜モデル

が必要である。

3.1 吸気ポート・燃焼室ガス流動モデル 本研究では、吸気ポートおよび燃焼室内のガス流れの計算には、市販のガス流動解析コード FLOTRAN⁽⁵⁾を用いた。このコードは、非構造格子上の定常ガス流動場を有限要素法によって解く。乱流モデルには $k-\epsilon$ モデルを用いている。

ガソリン機関の吸気ポート内に噴射される燃料噴霧の速度は数 m～20 m 程度であり、燃料噴霧がガス流動に与える影響は比較的小さいと考えられる。そこで、本研究ではガス流動から燃料噴霧への影響は考慮するが、燃料噴霧からガス流動への影響は考慮しないこととした。

3.2 燃料噴霧モデル 燃料噴霧の計算には、噴霧を有限個の代表液滴群で扱う離散液滴モデル (DDM)⁽⁴⁾を用いている。ガソリン機関の吸気ポート内の燃料噴射は、通常、常温雰囲気中への低速噴射であるので、本研究では液滴の分裂、結合、蒸発等は考慮せず、移動のみの計算を行なうこととした。

液滴群の挙動は次式で表わされる。

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{3}{4} C_d \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho} \frac{1}{d_{\text{drop}}} (v_a - v_d) |v_a - v_d| \quad (1)$$

$$C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\text{Re}_d}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{Re}_d = \frac{d_{\text{drop}} |v_a - v_d|}{\nu} \quad (3)$$

3.3 燃料液膜モデル 本研究で新しく開発した燃料液膜モデルでは、三次元現象である液膜挙動を効率的に表現するため、液膜流を曲面上の二次元流として扱い、液膜の厚さおよび流速はその二次元曲面上の1価関数として表わすこととした。

厚さ方向の速度分布の影響は、平均流速に対する液膜厚さ方向速度分布の補正係数(運動量補正係数)を導入することによって表わす。解析の対象であるガソリン燃料は擾乱波のない薄く広がる液膜を形成するので、速度分布形は液膜内で相似と考えられ、よって単一の運動量補正係数値で液膜全域の計算が可能であると考えられる。

液膜に作用する力には、気流の剪断力および壁面との摩擦力を考慮した。気流の剪断力を求めるための気液界面摩擦係数には対数則に基づく平板の摩擦係数⁽⁶⁾を用い、壁面との固液摩擦力は層流を仮定し速度勾配に比例するものとした。表面張力および壁面との親和力は、ガソリンでは流動に及ぼす影響は小さいと考えられるため、本モデルでは扱わなかった。

さて、液膜を厚さ方向に均一な二次元流として扱う場合でも、流路壁の形状は一般に三次元曲面であるので、流れとしての液膜は三次元性を有し、液膜流を記述する方程式は三次元の式となる。本研究では、曲面である流路壁を仮想の平面に平行投影し、実際の液膜流動を投影平面上の二次元液膜挙動に変換する手法を開発した。また、吸気系は複雑な形状の構造物から成っており、これらの全ての流路壁を一つの平面に投影して表現することは困難である。そこで、設計図面(平面図、立面図等)のように複数の投影面を設定し、これらを組み合わせて用いることにより、流路形状に即した液膜流の解析を行なうこととした。

この手法では、投影平面上の基礎方程式の関係を導くために、実曲面上の座標と投影平面上の座標とを定め、実曲面上の基礎方程式を投影平面上のそれに変換する。まず、座標の関係を求める。図1に示す座標系において、実曲面上の座標 (ξ, η) と投影平面上の座標 (x, y) は、曲面上の微小平面 $(\Delta\xi, \Delta\eta)$ と投影平面のなす角度 (θ, ψ) によって次式のように関係づけられる。

$$\Delta x = \cos \theta \cdot \Delta \xi = l \Delta \xi, \quad (4)$$

$$\Delta y = \cos \psi \cdot \Delta \eta = m \Delta \eta$$

ここで、 $l = \cos \theta$ 、 $m = \cos \psi$ である。曲面上の流速(液膜平均流速)についても同様に、

$$v_x = l v_\xi, \quad v_y = m v_\eta \quad (5)$$

と表わすことができる。一方、 $\Delta \xi$ と $\Delta \eta$ が実曲面上でなす角度 φ の正弦は次式で与えられる。

$$\sin \varphi = \sqrt{l^2 + m^2 - l^2 m^2} \quad (6)$$

図1 実際の曲表面と投影平面の関係

これらの関係式を用いて、曲面上の質量保存式および運動量保存式を投影平面に変換することにより、以下の基礎式が得られる。

質量保存式は次のようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{\sin \varphi} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sin \varphi}{1} h v_x \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\sin \varphi}{1} h v_y \right) \right\} = \frac{\dot{m}_{\text{dep}}}{\rho} \quad (7)$$

x および y 方向の運動量保存式は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (h v_x)}{\partial t} + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sin \varphi}{1} h v_x^2 \right) \\ & + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\sin \varphi}{1} h v_x v_y \right) \\ & = \frac{p}{\rho} \bar{l} + h g_x + \frac{m}{\rho} (\dot{m}_{\text{dep}} v_{\text{dep}}^x + F_{\text{air}}^x - F_{\text{wall}}^x) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (h v_y)}{\partial t} + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sin \varphi}{1} h v_x v_y \right) \\ & + \frac{1}{\sin \varphi} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\sin \varphi}{1} h v_y^2 \right) \\ & = \frac{p}{\rho} \bar{m} + h g_y + \frac{m}{\rho} (\dot{m}_{\text{dep}} v_{\text{dep}}^y + F_{\text{air}}^y - F_{\text{wall}}^y) \end{aligned} \quad (9)$$

z 方向の運動量保存式は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{p}{\rho} \left(\bar{n} - \bar{l} \frac{\sqrt{1-l^2}}{1} - \bar{m} \frac{\sqrt{1-m^2}}{m} \right) \\ & = B h v_x^2 \frac{\partial}{\partial x} \frac{\sqrt{1-l^2}}{1} + B h v_y^2 \frac{\partial}{\partial y} \frac{\sqrt{1-m^2}}{m} \\ & + B h v_x v_y \left(2 \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\sqrt{1-l^2}}{1} h g_x + \frac{\sqrt{1-m^2}}{m} h g_y \end{aligned} \quad (10)$$

運動量補正係数 B は次のように定義される。

$$B = \frac{\int_0^h [v_{\xi}'(h')]^2 dh'}{v_{\xi}^2 h} \quad (11)$$

厚さ方向の速度分布は、一次元流れの場合、ジェット流れの様に粘性のみが支配的な場では h' の線形関数となり、重力のみが支配的な場では一様流となる⁽⁶⁾。これらに対する B の値は、線形関数では 1.333、一様流では 1.0 となる。本研究では、両者の中間的な粘性と重力との双方の影響がある場を想定し h' の二次関数となる速度分布を仮定した。これに対する B の値は 1.2 となる。

3.4 システム構成 3.1～3.3 節の各モデルは、吸気ポート内の燃料液膜の挙動を表わすための個別のモデルである。これらを図 2 に示すデータの流れをもつよう組み合わせることで、吸気ポート内燃料液膜流解析システムを構築した。

システムの実行においては、まずソリッドモデルによって計算格子を生成し、この格子を用いて吸気ポート、燃焼室内の定常ガス流動場を計算する。次に、格子とガス流動場を用いて、その中に燃料を噴射した際の噴霧挙動を計算し、噴霧の壁面への付着位置、量を求める。最後に、格子、ガス流動場、噴霧の付着情報から、壁面に付着した液膜の拡がりを計算する。

図2 システム構成

4. モデル、システムの検証

4.1 燃料液膜モデルの検証 傾斜平板上に燃料噴射弁を用い定常的にガソリンを噴射することによって形成した燃料液膜の挙動の、実験と計算との比較によって、液膜モデルの妥当性の検証を行なった。

図3に実験装置のレイアウトを示す。傾斜平板の下端において、幅5mmのゲートを設け、このゲートを通過する燃料液膜を一定時間リザーバに導くことによりゲート位置における流量を求める。このゲートを下端に沿って移動することにより、平板下端左右方向の燃料液膜流量分布を求めた。表1に実験に用いた噴霧の諸元を示す。

実験と計算との結果の比較を図4に示す。計算においては、壁面に衝突する液滴の付着率を導入した。壁面に衝突する液滴は、一部はその地点に付着し、一部はね返り再び飛翔するはね返り現象を起こす。ここで、付着率とは、壁面に衝突する液滴のうち、はね返らずその地点で壁面に付着する液滴の重量割合として定義した。はね返り現象は、液滴および液膜の状態等に大きく影響される現象であることが予測されるが、

図3 傾斜平板による燃料液膜モデル検証実験のレイアウト

表1 傾斜平板による検証実験における燃料噴射条件

Mode of Injection	Intermittent
Cycle of Injection	10 Hz
Duration of Injection	11 ms
Mass of Injection	20 mg / shot
Spray Type	Full Cone
Initial Speed	11 m / s
Sauter Mean Diameter	1.9×10^{-4} m
Cone Angle	4.2° (half value)

図4 傾斜平板に形成された燃料液膜の流量分布

ここでは、一律に付着率0.8と設定することにより、計算値は実験値と定量的な一致が得られている。

4.2 吸気ポート内燃料液膜流解析システムの検証 次に、実際のガソリン機関を用いて吸気ポート内に定常間欠的に燃料を噴射した場合の、吸気ポート内の燃料液膜の挙動の実験と計算との比較によって、図2に示した液膜解析システムの妥当性の検証を行なった。

表2に供試機関の諸元を、表3および図5に噴射噴霧の諸元を示す。供試機関は市販4気筒1.8Lエンジンであり、燃焼室は4弁ペントルフ形状をしている。実験条件は、1200rpm、全開相当の吸入空気量、燃料噴射量とした。

表2 実機検証実験における供試機関の諸元

Type of Combustion Chamber	4-valved, pentroof
Bore x Stroke	82.5 x 86.0 mm
Diameter of Intake Valve	32.2 mm
Intake Valve Lift	10 mm (fixed)
Air Flow Rate	4.0×10^{-3} m ³ / s

表3 実機検証実験における燃料噴射条件

Mode of Injection	Intermittent
Cycle of Injection	10 Hz
Duration of Injection	11 ms
Mass of Injection	29 mg / shot (total)
Spray Type	Full Cone
Initial Speed	14 m / s
Sauter Mean Diameter	2.7×10^{-4} m
Cone Angle	4.2° (half value)

図5 実機検証実験における噴射燃料の粒径分布

図6 計算格子の外観

図6は、計算に使用した計算格子の外観である。格子は、4面体要素を用い、要素点数45968、接点数9306である。DDMにおける液滴群数は最大3000個とした。

4.2.1 吸気バルブシート位置における円周方向の燃料流量分布 円周方向に等間隔に24の流通孔を設けたバルブシート(図7)をシリンダヘッドに埋設し、バルブシートを通過する燃料を吸入ポンプを経てリザーバに導くことにより、吸気バルブシート位置における円周方向の流量分布を測定した。この際、供試機関は、バルブシートが水平となるように設置した。

計算では、流通孔に相当する位置の計算格子の通過流量を積算した。また、衝突液滴のはね返り現象に関しては、実際の吸気ポート内の燃料液滴の衝突は、4.1節の平板の場合の様に単純ではなく、凹面での複雑な挙動であることが考えられるため、付着率については4.1節の検証実験で得られた0.8を用いたが、はね返り量については扱わなかった。

実験と計算との結果の比較を図8に示す。実験における図中の-y方向のピークが、その高さも含め、計

図7 実機検証実験において円周方向の流量分布測定のためのバルブシート

図8 バルブシート位置における燃料液膜の円周方向の流量分布

算において再現されている。しかし、そのピーク位置は、実験が+x軸に対して約-45°であるのに対し、計算では約-90°となっている。

このピーク位置の差異は、衝突液滴のはね返り現象の扱いが原因の一つと考えられる。計算では考慮しなかったはね返り液滴は、実際にはいずれかの方向に再飛翔し一部が壁面に再付着すると考えられる。実験におけるピーク位置、約-45°は、燃料噴射弁からの飛翔方向に近く、衝突位置からののはね返り・再飛翔はこの方向が主であると考えられる。一方、計算においては、実際の液膜と比べ、このような再付着がないため、液膜熱さが薄くなり、付着噴霧の持ち込む運動量に比べ重力の影響が相対的に大きくなったため、約-90°の方向に流れピークを形成したと考えられる。ピーク位置をより定量的に求めるためには、ポート内壁面のような凹面での複雑なはね返り現象を解明・モデル化し、組み込む必要があると考えられる。

図9 燃焼室への燃料液膜の拡がり

図10 吸気ポート壁面での燃料液膜の発達の様子

4・2・2 燃焼室への燃料液膜の拡がり 表2、3および図5の供試機関および燃料噴射系において、定常間欠的に燃料噴射した場合の、吸気ポートから燃焼室ヘッド側壁面への燃料液膜の拡がりの様子を比較した。実験においては、燃料噴射開始後0.5秒から1.8秒までの間の燃焼室の液膜をレーザー蛍光励起法を用いて可視化し、シリンダ下方より観察した。計算も同じ条件で行なった。

図9に、実験と計算の結果の比較を示す。実験結果から、吸気ポートより燃焼室に流入した液膜は徐々に拡がり、燃焼室に凸となっている排気弁に至り、これを回り込むように進む様子が観察できる。計算結果もこの液膜の挙動をよく再現している。

4・3 考 察 以上の実験と計算結果との比較から、燃料液膜モデルの定量的な妥当性および吸気ポート内燃料液膜挙動予測システムの定性的な妥当性が検証されたと考えられる。

定量的な予測精度の向上のためには、はね返り現象の詳細なモデル化が必要であると考えられる。

5. 解析例

本システムを用いた解析例として、4・2節で示した供試機関および実験条件における燃料噴射開始直後の吸気ポート内の燃料液膜の発達の様子を図10に示す。

同図から、次のような液膜の挙動がわかる。噴射された燃料は、吸気ポートの分岐部近傍および両方の分岐管の末端部分に付着し液膜を形成する。この液膜は、時間経過に従い、重力および気流の摩擦力により垂下し、燃焼室に流入する。

このような吸気ポート内の燃料液膜の生成およびその挙動の把握は、実験的には困難であり、本システムのような計算モデルによって容易に行なえることである。このような特徴から、本システムは、ガソリン機関設計検討上の有力なツールとなる資質を有すると思われる⁽⁸⁾。

6. まとめ

三次元現象である燃料液膜挙動を曲面上の二次元流として扱い液膜の厚さおよび流速はその二次元曲面上の1価関数として表現するとともに、曲面である流路壁を仮想平面に平行投影し二次元挙動に変換する手法を用いた燃料液膜モデルを開発した。これを、吸気ポート・燃焼室ガス流動モデルおよび燃料噴霧モデルと組み合わせることで、エンジン吸気ポート内の燃料液膜流解析システムを構築した。

傾斜平板に形成された燃料液膜の挙動、流量分布の実験結果との比較により、燃料液膜モデルの定量的妥当性が検証された。実機ガソリン機関の吸気ポート内における燃料噴射によって吸気ポートおよび燃焼室壁面に形成される燃料液膜の挙動、流量分布の実験結果との比較により、燃料液膜流解析システムの定性的妥当性が検証された。

定量的な予測精度の向上のためには、壁面に衝突した燃料液滴の一部が壁面に付着せずはね返り再度飛翔するはね返り現象の詳細なモデル化が必要であると考えられ、これは今後の課題である。

文 献

- (1) Naitoh, K. ・ 他4名、Numerical Simulation of the Detailed Flow in Engine Ports and Cylinders、*SAE Paper*、No. 900256、(1990)
- (2) Amsden, A.A. ・ 他2名、KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays、Los Alamos National Laboratory Report LA-11560-MS、(1989)
- (3) Naber J. D. ・ 他1名、Modeling Engine Spray / Wall Impingement、*SAE Paper*、No. 880107、(1988)
- (4) 高森 ・ 他4名、自動車用燃料供給系内流れの数値シミュレーション 第4報、機論、56-528、B (1990)、2526-2532
- (5) *FLOTRAN Manual*、Compuflo, Inc.
- (6) 生井、粘性流体の力学、1982、理工学社
- (7) Yoshikawa Y. ・ 他5名、Numerical Simulation System for Analyzing Fuel Film Flow in Gasoline Engine、*SAE Paper*、No. 930326、(1993)