

PFIエンジンにおける噴霧壁面衝突時の燃料付着挙動に関する検討

米澤 崇*
川尻和彦**

Study of Adhesion Fuel Behavior Formed by Spray Wall Impingement in PFI Engine

Takashi Yonezawa, Kazuhiko Kawajiri

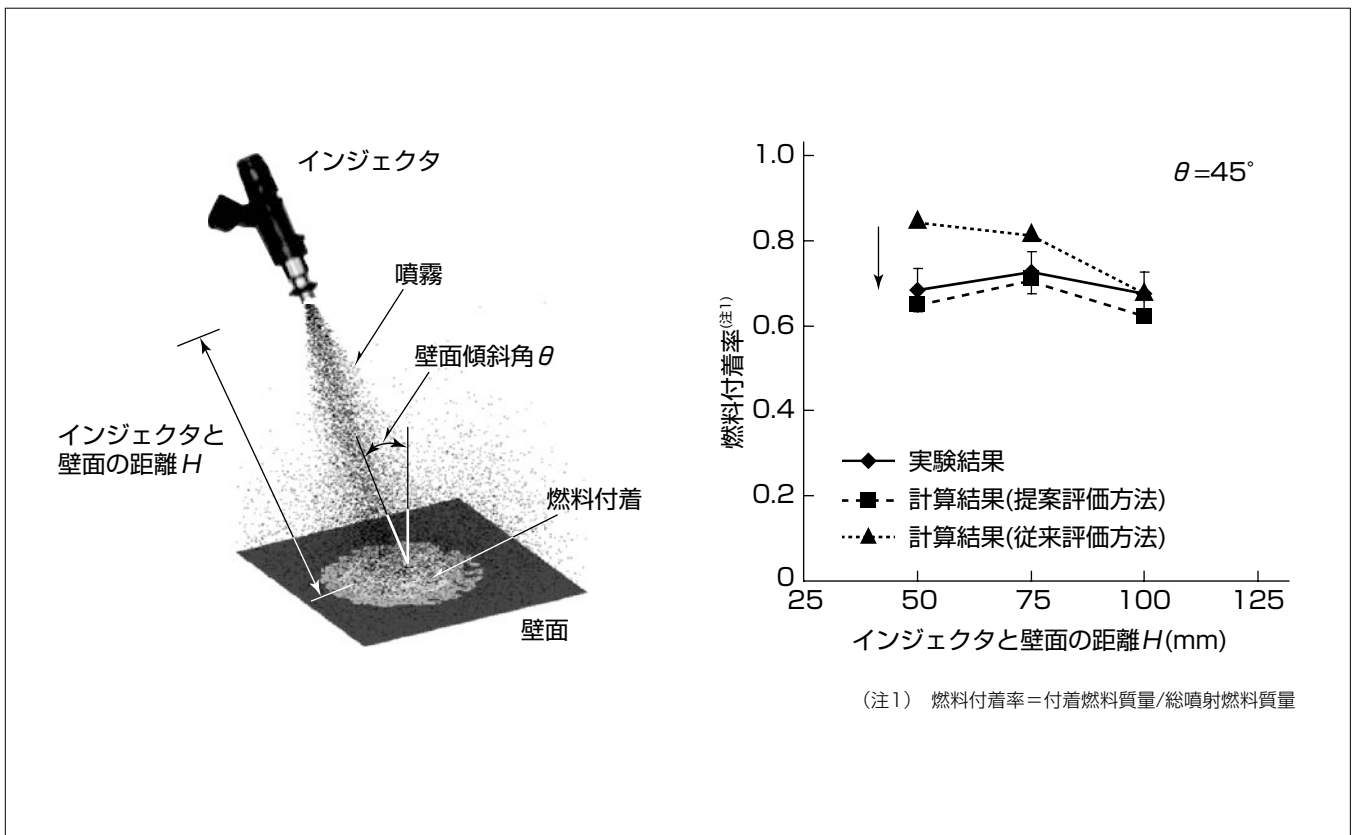
要旨

近年、省エネルギー意識の高まりや地球環境保護の観点から、自動車の燃費向上、排ガス低減が強く求められている。PFI(Port Fuel Injection)エンジンでは、吸気ポート内に噴射した噴霧燃料の一部が壁面に衝突し、付着して蒸発を伴いながら流動する複雑な現象が生じる。壁面に付着した燃料は、燃費や排出ガス特性に大きく影響するため、その挙動を把握することが重要となる。

噴霧が壁面に衝突した際の燃料付着挙動は、壁面衝突時の噴霧液滴の速度や粒径等の条件によって複雑に変化する。このような現象に対してCFD(Computational Fluid

Dynamics)シミュレーションを活用することは、物理現象の把握だけでなく、開発設計期間の短縮や新機能の効果検証にも非常に有効である。

本稿では、自動車用インジェクタからの噴霧燃料の壁面衝突について、燃料付着量特性を数値シミュレーションによって評価する新たな方法を提案し、平板へ噴霧を衝突させる基礎実験と比較することによって検証した。その結果、提案した評価方法によって、従来のシミュレーションでは表現できなかった噴霧衝突角度と壁面燃料付着量の関係を表現できることを確認した。



噴霧壁面衝突時の燃料付着挙動

自動車用インジェクタからの噴霧燃料が壁面衝突した際の燃料付着量について、本稿で提案した数値シミュレーションを用いることによって、従来のシミュレーションでは表現できなかった噴霧衝突角度と壁面燃料付着量の関係を表現できることを確認した。

1. ま え が き

近年、省エネルギー意識の高まりや地球環境保護の観点から自動車の燃費向上、排ガス低減が強く要求されている。PFIエンジンでは、吸気ポート内に噴射した噴霧燃料の一部が壁面に衝突し、付着して蒸発を伴いながら流動する複雑な現象が生じる。壁面に付着した燃料は、燃費や排出ガス特性に大きく影響するため、その付着挙動を把握することが重要となる。

噴霧が壁面に衝突した際の燃料付着挙動は、壁面衝突時の噴霧液滴の速度や粒径等の条件によって、全て付着、全て反射、一部が付着して残りが再飛散(以下“スプラッシュ”という。)といった異なる挙動を示す⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。噴霧燃料の壁面衝突挙動を計算する数値シミュレーション⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾では、衝突条件によって複雑に変化する壁面衝突挙動をモデル化するため、多くの仮定や基礎実験に基づく実験式、定数を用いている。この中で、スプラッシュ時の燃料の壁面付着量、再飛散量を計算するモデルは、液滴が壁面に垂直に衝突する数少ない基礎実験結果⁽¹⁾に基づいているものがほとんどであり、研究例も少ない。

本稿では、自動車用インジェクタからの噴霧燃料が壁面に衝突した際の付着挙動を、数値シミュレーションによって評価する新たな方法を提案し、平板へ噴霧を衝突させる基礎実験によって検証した結果⁽¹²⁾について述べる。

2. 噴霧壁面衝突時の壁面付着量評価方法の提案

従来の壁面衝突挙動シミュレーションでは、スプラッシュ時の壁面付着燃料と再飛散燃料の割合を、液滴衝突時の条件によらず一定としたり⁽⁵⁾⁽⁹⁾⁽¹¹⁾、壁面法線方向の液滴衝突速度が大きくなると再飛散燃料の割合が増加するように定義⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾したりしている。スプラッシュ挙動では、衝突液滴はそのエネルギーとともにいったん壁面上の液膜に取り込まれる。その後、取り込まれたエネルギーの一部が使用されて液滴が再飛散する(図1)。そのため付着燃料と再飛散燃料の割合は、液滴の衝突角度やエネルギーに依存すると考えられる。例えば、衝突液滴の壁面法線方向速度は同じであっても水平方向速度が異なれば、両者の割合は変化する。このような傾向は、液滴の壁面衝突角度を変化

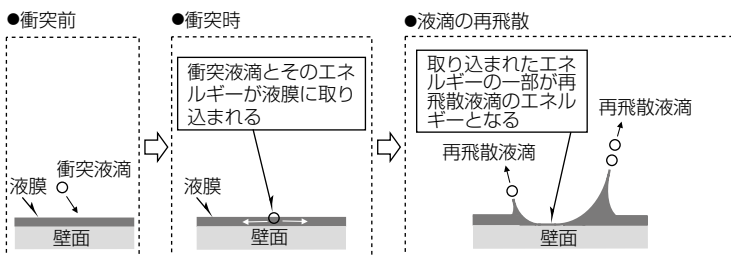


図1. スプラッシュ挙動

させた場合の再飛散液滴量を詳細に調べた基礎的な実験⁽¹³⁾でも報告されている。この実験では液滴衝突の絶対速度が同一であっても、液滴進行方向と壁面法線のなす角 α が 0° 、すなわち液滴が壁面の垂直に衝突する場合には衝突する液滴に対して体積比で数%程度しか再飛散しないが、壁面に斜めから衝突する場合は再飛散量が増加し、 $\alpha = 45^\circ$ では数十%となる。これに対して、従来のシミュレーションでは液滴の衝突角度が変化しても再飛散量は一定で変化しないか、斜めから衝突することによって壁面法線方向速度成分が小さくなり再飛散液滴量が減少し、噴霧液滴が壁面に衝突する角度が変化した場合の壁面燃料付着量を正確に評価することができない。そこで本稿では、噴霧が壁面に衝突する角度が変化した場合のスプラッシュ挙動における付着量特性を評価できる方法を提案する。

スプラッシュ時の壁面付着挙動には、衝突液滴の壁面法線方向だけでなく接線方向の速度成分も影響すると考えられることから、従来考慮されていなかった壁面接線方向速度成分も考慮する。入射液滴の衝突によって再飛散する液滴の質量割合を、入射液滴の壁面法線方向速度 V_{in-n} に基づくウェーバ数 We_{in-n} と接線方向速度 V_{in-t} に基づくウェーバ数 We_{in-t} を用い、式(1)のように表す(図2)。

$$\frac{M_{out}}{M_{in}} = C \times \{ C_n \times We_{in-n} + (1 - C_n) \times We_{in-t} \} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $We_{in-n} = \rho d V_{in-n}^2 / \sigma$ 、 $We_{in-t} = \rho d V_{in-t}^2 / \sigma$ 、 ρ :密度、 d :液滴径、 V :液滴速度、 σ :表面張力である。また、 C 、 C_n は係数で、 C_n は $0 \sim 1$ である。

3. 噴霧平板衝突付着基礎実験による検証

3.1 基礎実験方法

提案したスプラッシュ挙動における付着量特性の評価方法を検証するため、噴霧壁面時の付着燃料量を測定する基礎実験を実施した。基礎実験に用いた装置を図3に示す。この実験では、吸気ポート噴射用マルチホールインジェクタからの噴霧燃料をアルミ平板に衝突させ、付着した燃料質量を電子天秤によって測定した。この際、インジェクタと平板の距離、衝突角度を変化させた。表1に実験条件を示す。実験には、10噴孔2スプレータイプインジェクタを用い、燃料は揮発性の低いドライソルベントを使用した。

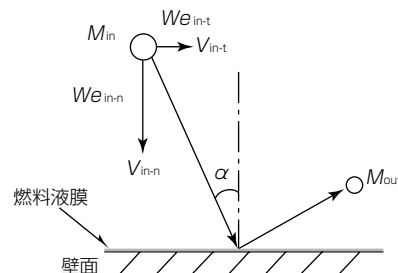


図2. 再飛散液滴の質量

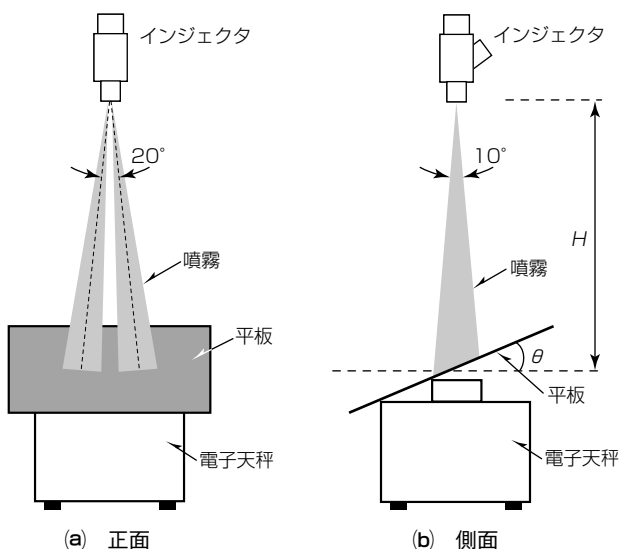


図3. 検証実験装置

表1. 実験条件

雰囲気圧力	0.1MPa
噴射圧力	0.37MPa
燃料	ドライソルベルト
雰囲気温度と壁面温度 T	296K
平板表面の粗さ R	Ra 10 μ m
インジェクタと壁面の距離 H	50, 75, 100(mm)
壁面傾斜角 θ	0°, 45°

3.2 基礎実験結果

図4に、インジェクタと壁面の距離 H と、壁面傾斜角 θ を変化させた場合の結果を示す。図中の縦軸は、燃料付着率(=付着燃料質量/総噴射燃料質量)を表す。インジェクタと壁面の距離 H を変化させた場合、壁面傾斜角 $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ で傾向が異なった。 $\theta = 0^\circ$ では、 H が大きくなると付着量は単調に減少した。 H が大きくなると噴霧粒子の浮遊によって壁面に到達する燃料量が減り、その結果付着量は減少する。一方、 $\theta = 45^\circ$ では、 $H = 50\text{mm}$ より $H = 75\text{mm}$ の付着量が多くなり $\theta = 0^\circ$ の傾向と逆になった。 $H = 75\text{mm}$ に比べ $H = 50\text{mm}$ では噴霧粒子の壁面衝突速度が大きくなり、付着する液滴の増加より再飛散液滴の増加が大きくなり、燃料付着量が減少したと考えられる。これら H と θ の変化に対する結果は、先に述べた単一液滴での基礎実験結果⁽¹³⁾と傾向が一致している。

3.3 数値シミュレーション方法

噴霧液滴壁面衝突挙動は、2章と同様にBai⁽⁵⁾らの液滴衝突挙動モデルを用い、再飛散液滴質量割合の計算に式(1)を組み込んだ。比較のため、従来の壁面法線方向速度に基づいた評価方法⁽⁶⁾による計算もおこなった。式(1)の C 、 C_n は、噴霧液滴が壁面に垂直に衝突する際、計算される再飛散液滴質量割合が従来の評価方法と同等となるよう $C = 0.0015$ 、 $C_n = 0.13$ とした。噴霧液滴挙動は離散液滴モデル(DDM)によってラグランジュ的に計算した。液滴の分裂

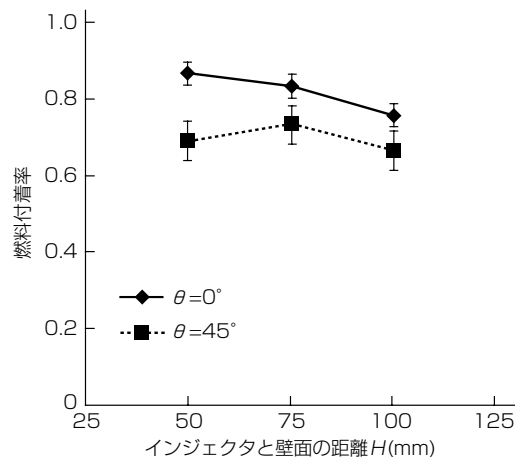


図4. 基礎実験結果

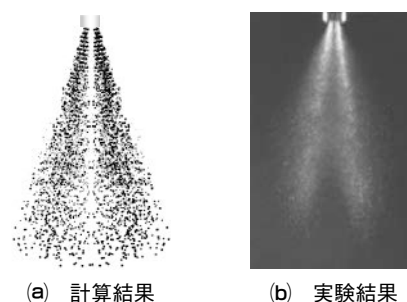


図5. 噴霧形状の比較

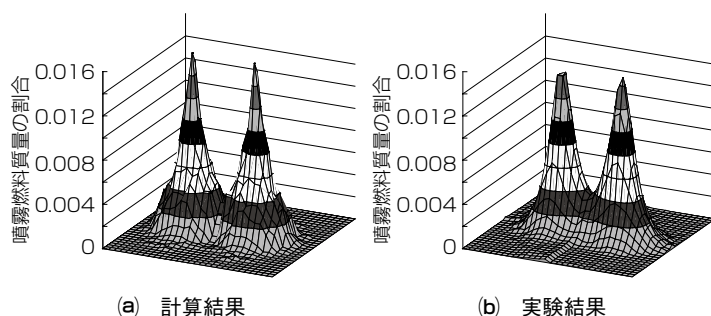


図6. 噴霧分配の比較

モデルにはReitzらの“Bag and Stripping Breakupモデル”を用い、液滴同士の合体は考慮しなかった。このシミュレーションでは、基礎実験に用いたインジェクタ噴霧の噴霧形状、噴霧分配、ペネトレーション、ザウタ平均粒子径に一致するように噴霧液滴の粒子径、速度、方向をあらかじめ与えた。図5に噴霧形状、図6に噴霧分配の計算結果と実験結果の比較を示す。噴霧分配は、燃料噴射位置から100mm下流位置における噴霧燃料質量の二次元分布を示す。

3.4 数値シミュレーション検証結果

図7に実験結果と計算結果の比較を示す。従来の評価方法を用いた場合、壁面傾斜角 $\theta = 0^\circ$ では計算結果は実験結果と一致したが、 $\theta = 45^\circ$ ではインジェクタと壁面の距離 $H = 75\text{mm}$ 以下で一致しなかった。これに対して本稿で提案した式(1)を用い液滴の衝突角度によって再飛散量に変化す

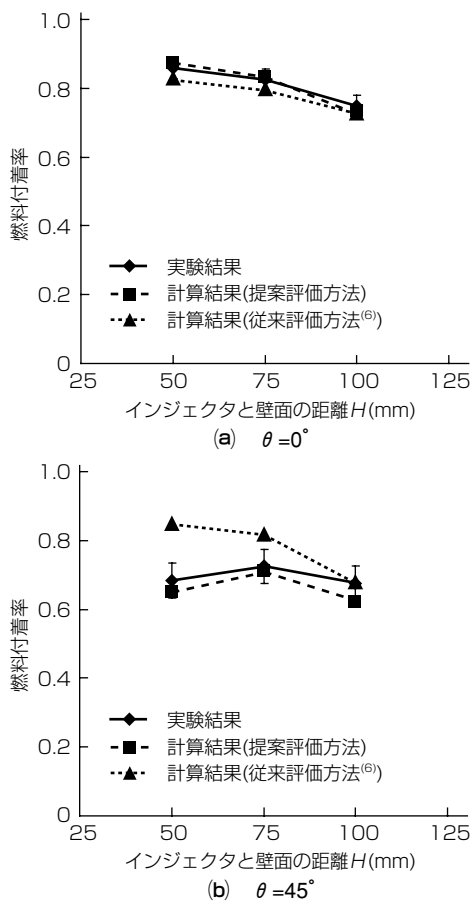


図7. 液滴再飛散質量割合の比較

る影響を考慮することで、噴霧壁面衝突時の燃料付着挙動実験結果と一致した。なお、 $H=100\text{mm}$ 以上でスプラッシュ挙動がほとんど生じないため、両評価法での差が生じなかった。

この結果から、噴霧燃料が壁面衝突した際の燃料付着量について、本稿で提案した数値シミュレーションを用いることによって、従来のシミュレーションでは表現できなかった噴霧衝突角度と壁面燃料付着量の関係を表現できることを確認した。

4. む す び

自動車用インジェクタからの噴霧燃料が壁面に衝突する際の付着量特性を評価する新たな方法を提案し、平板へ噴霧を衝突させる基礎実験による検証をおこなった。得られた結果を、次に示す。

- (1) スプラッシュ挙動時に再飛散する液滴の質量割合について、液滴壁面衝突時の法線方向速度に加えて、接線方向速度を考慮する方法を提案した。
- (2) 提案した付着特性評価方法によって、従来のシミュレーションでは表現できなかった噴霧衝突角度と壁面燃料付着量の関係を表現できることを確認した。

今後、この評価方法を用いた数値シミュレーションを活用することで、燃費向上や排ガス低減を実現する次世代エンジンやコンポーネントの開発に寄与していく所存である。

参 考 文 献

- (1) Yarin, A.L., et al.: Impact of drops on solid surface: self-similar capillary waves and splashing as a new type of kinematic discontinuity, *Journal of Fluid Mech.*, **283**, 141~173 (1995)
- (2) Stow, C.D., et al.: An experimental investigation of fluid flow resulting from impact of a water drop with an unyielding dry surface, *Proc. R. Soc. Lond. A* **373**, No.1755, 419~441 (1981)
- (3) Levin, Z., et al.: Splashing of water drops on solid and wetted surface: hydrodynamics and charge separation, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **269**, No.1200, 555~585 (1971)
- (4) Lindgren, R., et al.: Modeling Gasoline Spray-Wall Interactions and Comparison to Experimental Data, *SAE Technical Paper* 2004-01-3003 (2004)
- (5) Bai, C., et al.: Development of Methodology for Spray Impingement Simulation, *SAE Technical Paper* 950284, No.0096-736x, 550~568 (1995)
- (6) Han, Z., et al.: Spray/wall Interaction Models for Multidimensional Engine Simulation, *Int. Journal of Engine Research*, **1**, No.1, 127~146 (2000)
- (7) Stanton, D.W., et al.: Modeling Fuel Film Formation and Wall Interaction in Diesel Engines, *SAE Technical Paper* 960628 (1996)
- (8) Mundo, C., et al.: Numerical and Experimental Investigation of Spray Characteristics in the Vicinity of a Rigid Wall, *Exp. Therm. and Fluid Sci.*, **15**, No.3, 228~237 (1997)
- (9) Senda, J., et al.: Multidimensional Modeling of Impinging Sprays on the Wall in Diesel Engines, *ASME:Applied Mechanical Review*, **52**, No.4, 119~138 (1999)
- (10) Nagaoka, M., et al.: Modeling Fuel Spray Impingement on a Hot Wall for Gasoline Engines, *SAE Technical Paper* 940525 (1994)
- (11) 吉川康雄, ほか: 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, *日本機械学会論文集*, **B61**, No.590, 3432~3439 (1995)
- (12) Yonezawa, T., et al.: Study of Adhesion Fuel Behavior Formed by Spray-Wall Impingement in PFI Engine, *SAE Technical Paper* 2010-01-0782 (2010)
- (13) 森 敏昭, ほか: 液滴衝突後の液膜界面挙動に関する実験的研究, *混相流研究の進展*, **1**, 57~64 (2006)