中空円すい噴霧の解析*

野木利治^{*1}, 大山宜茂^{*1}, 山内照夫^{*1}

An Analysis of Hollow Cone Spray Patterns

Toshihâru NOGI, Yoshishige OHYAMA, and Teruo YAMAUCHI

A study was conducted on hollow cone spray which was injected from a pintle-type and swirl-type injector. The effects of the surrounding pressure and liquid temperature on the spray patterns are discussed experimentally and analytically. The calculated results which are based on the hollow cone spray model including the effects of surface tension, centrifugal force and liquid density almost coincide with the experimental results.

Key Words: Fuel, Spray, Injector, Vapor, Atomization

1. 緒 言

燃焼器に用いられている燃料噴射弁には大きく分けて二つの方式がある。一つは燃料に旋回流を与えながらノズルより燃料を噴出させるうず巻形、他の一つはノズルとピントル先端との間の環状すきまから燃料を噴出させるピントル形である。うず巻形では、旋回力によって燃料液膜を薄い中空円すい形状にしているのに対し、ピントル形では、円すい形状のピントル先端部によって、液膜を中空円すい形状にしている。いずれの場合も、液膜を薄くすることによって燃料の微粒化を図っている。

上記の燃料噴射弁の噴霧特性に関しては、すでに数多くの研究が行われているが⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、実際の使用条件下での噴霧特性を対象としたものは少ない。減圧雰囲気における噴霧特性はピントル形噴射弁を対象とした谷らの報告⁽²⁾があるが、現象を解明しつくすまでには至っていない。

そこで、本報告では、うず巻形およびピントル形の燃料噴射弁において、雰囲気圧力、燃料温度が中空円

すい噴霧の形状に及ぼす影響を検討した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置の概略 図1に実験装置の概略を示した。噴射弁をアクリル製の透明容器の上部に取付けた。タンク内にためた燃料を、噴射弁に供給した。タンク内の空気圧力を調圧弁によって調整し、燃料圧力を一定にした。透明容器内の圧力は、真空ポンプによって任意に設定することができる。噴霧の撮影にはス

図1 実験装置の概略

* 昭和62年8月28日 第15回液体の微粒化に関する講演会において講演、原稿受付 昭和62年12月17日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所日立研究所 (〒312 勝田市高場2520)。

トロボとカメラを用いた。噴射弁は、ピントル形、うず巻形（噴霧広がり角の異なるもの2種類）の3種類のものを供試した。燃料は市販のガソリンを用いた。

2・2 実験方法 容器内の圧力（雰囲気圧力）を15～101 kPaの範囲で変化させた。また図1の装置を恒温槽内に設置し、恒温槽内の温度を $-40\sim 20^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化させた。燃料圧力を300 kPaとした。噴射弁の開弁時間を6 msとした。

3. 実験結果および結果の検討

3・1 雰囲気圧力が噴霧形状に及ぼす影響 図2は室温（ 20°C ）における噴霧の形状を示したものである。図2に示されているように、ピントル形では雰囲気圧力 P_s が低くなると、噴霧が広がらなくなり、28 kPaのときに顕著である。このときの噴霧には気泡の発生が確認できた。さらに P_s を15 kPaに低下させると噴霧は再び細かい球状に分裂している⁽²⁾。一方、うず巻形では、 P_s が28 kPaでみられたピントル形における噴霧の広がらなくなる現象は顕著にみられない。うず巻形のほうがピントル形に比べて、雰囲気圧力の噴霧形状に及ぼす影響が小さいことがわかった。雰囲気圧力の低下とともに噴射差圧が大きくなり、噴出速

度も大きくなる。本実験の範囲では、その変化は約20%である。噴射差圧を一定となるように雰囲気圧力の低下とともに噴射圧を低下させた実験においても同様な結果を得ている。本実験の範囲では噴出速度の変化が噴霧形状に及ぼす影響は、雰囲気圧力の影響に比べて小さい。

3・2 燃料温度が噴霧形状に及ぼす影響 図3に燃料温度 T_f を20, -20°C に変化させた場合のピントル形の噴霧の形状を示した。 20°C では噴霧は円すい形状に広がっている。 -20°C では、噴霧は広がらなくなる。

図4に燃料温度 T_f を $-20, -30^{\circ}\text{C}$ に変化させた場合のうず巻形の噴霧の形状を示した。 T_f の低下とともに、噴霧は広がらなくなるが、その傾向はピントル形に比べると顕著でない。

図5は噴霧広がり角をピントル形と同程度にしたうず巻形の噴霧の形状を示した。 T_f が -30°C においても、噴霧は広がっている。

以上より、うず巻形はピントル形に比べて、低温時において噴霧が広がらなくなる現象が顕著でないことがわかった。

図2 噴霧の形状

4. 噴霧形状の計算

4.1 計算法 燃料噴射弁から噴出する燃料噴霧の形状を解析するため、図6に示した計算モデルを用いた⁽⁴⁾。厚さ b_0 、平均半径 r_0 なるリング状ノズルから周速 C_{u0} を成分としてもつ速度 C_0 で噴出している中空噴霧を考える。

図6の中空噴霧の微小部分に対して、従来より噴霧の解析に用いられている運動量、角運動量、エネルギー保存の式を考える⁽⁴⁾。

(1) 運動保存量

$$\dot{r} = \frac{C_u^2}{r} - \frac{Z\sigma}{\rho r b} \quad \text{.....(1)}$$

(2) 角運動量保存

$$rC_u = r_0C_{u0} \quad \text{.....(2)}$$

(3) エネルギー保存

$$C^2 = C_x^2 + C_u^2 + C_z^2 = C_{x0}^2 + C_{u0}^2 \quad \text{.....(3)}$$

C : 噴出速度

C_u : 周方向速度成分

r : 噴霧の半径

ρ : 液体の密度

(a) $T_f = 20^\circ\text{C}$ (b) $T_f = -20^\circ\text{C}$

図3 噴霧の形状 (ペンシル形)

(a) $T_f = -20^\circ\text{C}$ (b) $T_f = -30^\circ\text{C}$

図4 噴霧の形状 (うず巻形)

(a) $T_f = -20^\circ\text{C}$ (b) $T_f = -30^\circ\text{C}$

図5 噴霧の形状 (うず巻形)

表1 雰囲気圧力とガソリン密度の関係

surrounding pressure	gasoline density
40 kPa	440 kg/m ³
60	680
101	740

表2 温度に対する表面張力、動粘度の変化

temperature	surface tension	kinematic viscosity
-40°C	$3.00 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$	$1.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
-30	2.88×10^{-3}	1.17×10^{-4}
-20	2.75×10^{-3}	0.95×10^{-4}
20	2.25×10^{-3}	0.62×10^{-4}
40	2.00×10^{-3}	0.54×10^{-4}

図6 計算モデル

図7 雰囲気圧力 P_s と蒸気含有率 V_g/V_L の関係

C_x : 軸方向速度成分

C_r : 半径方向速度成分

σ : 表面張力

以上, 式(1)~(3)によって, 噴霧形状を求めた。

4.2 計算条件 図7に雰囲気気圧 P_s と蒸気含有率 V_g/V_l の関係を示した⁽³⁾。圧力を30~100 kPaまで変化させた。圧力を低下させるにしたがい, 液体分 V_l に対する蒸気成分 V_g が多くなることがわかる。

表1に雰囲気気圧とガソリンの密度の関係を示した。雰囲気気圧を大気圧より低くすると, ガソリン蒸気が発生し, 噴射弁から噴出するガソリンの密度は見掛け上小さくなる。

表2にガソリンの温度を変化させた場合の表面張力, 動粘度の変化を示した。温度を低くするにしたがい, 表面張力, 動粘度が大きくなる。

表3に示した噴射弁に対して計算を行った。噴射弁として, ピントル形, うず巻形を対象とした。表3中の()内の数字は, 噴霧広がり角を小さくした場合である。

4.3 計算結果

4.3.1 雰囲気気圧が噴霧形状に及ぼす影響 図8に雰囲気気圧 P_s を変化させた場合の噴霧形状を示

した。図8(a)のピントル形, 図8(b)のうず巻形ともに, P_s が101, 41, 28 kPaと小さくなるにしたがい, 噴霧の広がり角が小さくなる。これは, 式(1)の液体の密度 ρ が小さくなるためである。また, 図8(a)のピントル形のほうがその傾向が顕著である。 P_s が15 kPaと小さくなると, 噴霧は再び広がり, ノズルからの液体の噴出方向に近づく。これは, 蒸気によって液膜が分裂し, 式(1)の表面張力 σ が小さくなるためである。本計算では P_s が15 kPaの場合, ノズル出口およびその下流で σ を零とした。

4.3.2 燃料温度が噴霧形状に及ぼす影響 図9に燃料温度 T_f を変化させた場合の噴霧形状を示した。 T_f を小さくすると, 噴霧は広がらなくなる。これは, T_f の低下とともに, 表面張力, 動粘度が大きくなるためである。動粘度が大きくなるにしたがい, 噴出速度が小さくなり, 本実験の範囲(-40~20°C)で, 約10%変化する。噴出速度の低下を考慮しない解析結果と比較すると, 噴出速度変化の影響は-20°C以下で無視できないことを確認している。図9によれば, ピントル形はうず巻形に比べて, T_f が低下するにしたがい, 噴霧が広がらなくなる現象が顕著である。図9(c)のように, 噴霧広がり角を小さくしても, うず巻

表3 計算条件

	pintle type	swirl type
construction
r_i	3.0×10^{-4} m	4.3×10^{-4} m
r_a	3.8×10^{-4} m	5.0×10^{-4} m
r_o	3.4×10^{-4} m	4.6×10^{-4} m
C_{u0}	0 m/s	9.0 m/s (7.47)
C_{x0}	19.7 m/s	18.0 m/s (18.7)
C_{r0}	3.4 m/s	0 m/s

図8 噴霧の形状 (雰囲気気圧 P_s の影響)

(a) ピントル形 (b) うず巻形 (c) うず巻形

図9 噴霧の形状 (燃料温度の影響)

図10 噴霧半径の実験値と計算値の比較

形は温度の影響を受けにくい。

図 10 に軸方向距離 $x=20$ mm における噴霧半径の実験値と計算値の比較を示した。雰囲気圧力 P_0 および燃料温度 T_f を変化させた。実験値と計算値は比較的良く一致している。

5. あ と が き

雰囲気圧力を 15~101 kPa, 燃料温度を $-40\sim 40^\circ\text{C}$ まで変化させた場合の燃料噴射弁から噴出する中空円すい噴霧の形状を検討した結果, 表面張力と遠心力を考慮した中空円すい噴霧モデルに蒸気存在による液膜の密度の変化を追加することによって, 噴霧の形状を簡単に求めることができ, かつ実験結果と計算結果

は比較的良く一致することがわかった。

本研究を遂行するにあたって終始ご協力いただいた(株)日立製作所佐和工場, 日立研究所および自動車機器研究組合の各位に深甚な謝意を表する。

文 献

- (1) 齊藤・ほか 2 名, 第 8 回液体微粒化講論, (昭 55), 61 p.
- (2) 谷・ほか 3 名, 第 11 回液体微粒化講論, (昭 58), 7 p.
- (3) 山田・小林, 自技会学術講演会前刷集, 862 (昭 61).
- (4) Euteneuer, G. A., *Forsch. Ing.-Wes.*, Bd. 22 (1956), 109 p.
- (5) Tanasawa, Y., Muto, N. and Saito, A., *Proc. 1st ICLAS*, (1978), 117 p.
- (6) 齊藤・ほか 4 名, 自技会学術講演会前刷集, 842 (昭 59), 395 p.