管内気流中の液滴群の挙動の検討*

野木利治**, 山内照夫***, 大山宜茂***

A Study on Behavior of Liquid Particles in Air Flow Through Pipes

by Toshiharu NOGI, Teruo YAMAUCHI, and Yoshishige OHYAMA

A study has been made on the characteristics of the transport of fuel particles in air flow through straight pipes and bend pipes. A numerical calculation for such bend pipe flow was computed. The behavior of moving particles was also investigated experimentally, using a nozzle which can inject uniform size liquid droplets continuously. And the amount of fuel impaction on the wall of pipes under different operating conditions was measured. A particles generator was used to generate fuel droplets of about 40~100 microns mean diameter for the laboratory flow system. Effects of droplet size, pipe geometry and air velocity on the fuel impaction on the wall were investigated. The droplet impaction in the pipe flow can be minimized by ultrafine atomization, minimum passage turning angle and air velocity.

Key Words: Internal Combustion Engine, Fuel Injection, Fuel Impaction, Liquid Particles

1. 結 言

ガソリン機関において、気化器、燃料噴射装置などの燃料供給装置から噴出した燃料液滴群の吸気管内における挙動は、シリンダ内の混合気形成に大きな影響を及ぼす。燃料供給装置から供給された燃料液滴群が吸気管の曲り部などの壁面に付着する現象や、吸気管内の燃料の蒸発過程など不明な点が多く、研究が数多く行われている⁽¹⁾⁽²⁾。Trayser らは平均粒径 10 μm 程度の液滴群を管内気流中に供給し、液滴群が管壁面に付着する量を測定しているが、実際のガソリン機関の吸気管内に供給される数十~百 μm の液滴群について、調べていない。

よって、本報では、実際の吸気管を模擬した曲り部を有する、管内を飛ばす液滴群を想定し、曲り部に衝突する条件を計算モデルを用いて解析するとともに、均一液滴群を生成し、曲り部に供給した場合の液滴群の飛跡を観察した。さらに、管内気流中に平均粒径 40 μm , および 100 μm の液滴群を供給した場合

の気流速度、管路形状および粒子径が壁面付着に及ぼす影響を実験的に検討した。

2. 解 析

燃料液滴群の曲り部における挙動を解析するため、図 1 に示す二次元モデルを用いた。

2-1 記号の説明

c_p : 定圧比熱
 D_v : 拡散係数
 L : 蒸発潜熱
 D : 直径
 k : 物質伝達率
 M : 燃料分子量
 m : 液滴質量
 P : 圧力

図 1 計算モデル

* 昭和 60 年 4 月 1 日 第 62 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 59 年 10 月 13 日。

** 准員、(株)日立製作所日立研究所 (〒312 勝田市高場 2520)。

*** 正員、(株)日立製作所日立研究所。

R : ガス定数
 S_c : シュミット数
 T : 温度
 V : 速度
 ρ : 密度
 N_u : ヌセルト数
 P_r : プラントル数
 Re : レイノルズ数
 S_h : シャウツド数
 t : 時間
 ν : 動粘度
 添字
 a : 空気
 s : ノズル
 0 : 初期値
 d : 液滴
 t : 総和

2・2 計算式 曲り管内の空気の流れを明らかにするため、二次元、非圧縮のナビエ・ストークス方程式をSOR法により数値解析した。流れ場の解析結果より液滴の飛しょう軌跡を求めるため、以下の仮定をした。

- (1) 液滴は球であり滴内の温度分布は一様である。
- (2) 蒸発拡散は濃度差のみによる。
- (3) 液滴は半無限気流中にステップ的におかれる。
- (4) 熱ふく射は無視する。

周囲の気体から熱が液滴に加わり、蒸気が液滴表面から外側に流れる。その時の物質移動を表す式として次式を用いた。

$$-\frac{dm}{dt} = \frac{\pi D_d D_v P_t M}{RT} \frac{P_t}{P_t - P_o} S_h \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで

$$S_h = 2.0 + 0.6 Re^{0.5} Sc^{0.3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Re = V_d D_d / \nu \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Sc = \nu / D_v \quad \dots\dots\dots (4)$$

次に液滴の平衡温度を表す式として次式を用いた。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{m C_p \rho_d} \left[\pi D_d k N_u (T_a - T_d) + \frac{dm}{dt} L \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで

$$N_u = 2.0 + 0.6 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

3. 計算結果

3・1 液滴径、液滴の供給位置の影響 図2(1)は液滴径および液滴の供給位置を変化させた場合の液滴の飛跡である。液滴径は10, 30, 100 μm とした。液滴の供給位置は管中心(内径40 mm)および管中心より18 mmの位置とした。液滴径が小さいほど、液滴の飛しょう距離が長くなっており、 $d=10 \mu\text{m}$ では空気流に浮遊している。液滴の供給位置を管中心より曲り部側に移動させることによって、飛しょう距離が長くなる。

3・2 空気流速の影響 図2(2)は図2(1)の条件に対して燃料噴射速度 V_s をほぼ一定として、空気流速 V_a を小さくした場合である。同一液滴径の場合、空気流速が小さいほど、飛しょう距離が長くなる。

3・3 燃料噴射速度の影響 図3は、空気流速 V_a を40 m/s一定として、燃料噴射速度 V_s を変化させた場合である。噴出速度が小さいほど飛しょう距離は長くなっている。

図2 液滴の飛跡

図3 液滴の飛跡

図4 均一粒径液滴生成装置の概略

図5 均一粒径液滴生成装置の駆動回路

4. 実験装置および方法

4・1 液滴の飛跡可視化装置 図4に均一粒径の液滴(約180 μm)を連続的に生成する装置を示す。ノズルは外径 $\phi 2.5$,先端径 $\phi 0.14$ mmのガラス製でピエゾ形振動子によって縦振動が加えられる。振動子は周波数0.2~1 kHz,印加電圧200 Vで励振される。使用流体は水で,タンク上部の空気圧を加減し,液滴初速度 V_s を調整した。振動子駆動回路を図5に示す。供試した曲り管は透明樹脂製で,図1のモデルを想定した,断面が30 mm $\times$ 30 mmの二次元モデルである。

4・2 管内空気流の可視化装置 図6は管内空気流を可視化する装置である。発熱部は線径 $\phi 0.8$ mm,全長320 mmである。発熱部は曲り管上部入口に水平に配置し,発煙剤として流動パラフィンを用いた。

4・3 壁面付着量測定装置 図7に管内気流中に供給された液滴群の壁面付着量の測定装置を示す。空気はベルマウス部,測定部,液サンプル器,液体だめタンク,空気タンクを経て真空ポンプで排出される。空気流速はベルマウス部中心において熱線式流速計で測定した。液滴群は,ベルマウス部下流に設けた液滴群発生装置(超音波振動式)で供給した。壁面付着量測定にはすきま開法形分離法⁽¹⁾を用い,すきまを5 mmとした。供試管路は,実際のマニホールドをモデル化した,内径30 mmの直管および90°曲り管である。測定部の配置は直管では水平のみ,90°曲り管では水平および垂直とした。使用流体は水で,流量0.2~0.4 cm^3/s ,空気流速0~20 m/sの範囲で実験した。液滴群

発生装置から供給した液量と液膜となって流れる液量との比を壁面付着率として整理した。

5. 実験結果および検討

5・1 曲り管部における液滴の挙動 図9は曲り管上流位置より液滴を下方向に噴出した場合の液滴の挙動を示す。図9(1),(2)は液滴の初速度 $V_s=3.3$ m/sで空気流速 $V_a=17$ m/sおよび27 m/sである。空気流速が大きくなると液滴の飛しょう距離が小さくなっている。液滴供給位置はA点である。図9(3),(4)は曲り部上流のD点より供給した場合で,空気流速 $V_a=17$ m/sで液滴の初速度 $V_s=0.9$ m/sおよび1.3 m/sである。初速度 V_s が大きくなると飛しょう距離が小さくなる。また液滴の供給位置を曲り部方向に偏心させると飛しょう距離は長くなる。

5・2 曲り部における空気の流れ 図10は曲り部の空気の流れをスモークワイヤ法で可視化した結果

図8 測定部の形状,寸法

図9 曲り部における液滴の挙動

図6 空気流の可視化装置

図7 壁面付着量測定装置の概略

図10 曲り管内空気の流動状況

図 11 管路形状の影響

図 12 粒子径の影響

図 13 供給位置の影響

で、供試管路として断面が $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ の二次元モデルを用いている。空気流速 $V_a = 21\text{ m/s}$ および 28 m/s である。空気流速が大きいほど、主流は曲り部において、対向壁面に近づいている。

5.3 管内気流中の壁面付着量

5.3.1 管路形状の影響 図 11 に空気流速に対する壁面付着率の変化を示す。液滴群の平均粒径は $40\text{ }\mu\text{m}$ である。直管の場合、空気流速の増大とともに付着率が小さくなっている。これに対し、 90° 曲り管の場合、空気流速 6 m/s 以下では、拡散による液滴群の壁面付着が小さくなり、さらに空気流速が増大すると、壁面付着率が大きくなる。これは、液滴群の慣性によって曲り部において、液滴が壁面に衝突するのが増加するためである。

5.3.2 液滴径の影響 図 12 に、平均粒径 $40\text{ }\mu\text{m}$ 、 $100\text{ }\mu\text{m}$ とした場合の、 90° 曲り管の壁面付着率を示した。液滴径が小さいほど、壁面付着率は小さくなる。

5.3.3 液滴群の供給位置の影響 図 13 は液滴群の供給位置を変化させた場合の壁面付着率を示したものである。液滴群(平均粒径 $40\text{ }\mu\text{m}$)の供給位置を管中

図 14 液滴速度の影響

図 15 水平および垂直配置の影響

心より 5 mm 曲り部内側に偏心させると、壁面付着率が 5 m/s 以上の領域で小さくなる。液滴が空気流速の増大とともに慣性によって衝突しやすくなるが、曲り部内側の液滴ほど、対向壁面への衝突が少ないためである。

5.3.4 液滴速度の影響 液滴群の速度を小さくするため、液滴群発生装置の上流に障害物を設けた場合の壁面付着率の変化を図 14 に示す。液滴群の管軸方向の初速度が小さくなるため、壁面付着率が空気流速 6 m/s 以上でやや小さくなっている。

5.3.5 水平および垂直配置の影響 図 15 は 90° 曲り管を水平および垂直に配置した場合の壁面付着率を比較したものである。液滴群の平均粒径は $40\text{ }\mu\text{m}$ である。垂直配置のほうが壁面付着率が大きくなっている。これは垂直配置では液滴が、重力の影響により、みかけ上慣性が大きくなったと同じ効果となり、曲り部で衝突しやすくなるためである。

6. 結 言

曲り部を有する管内に液滴を供給した場合の液滴の飛跡の計算結果は実験結果と定性的に一致した。液滴が小さく、曲り部の内側で液滴を供給したほうが、壁面への付着が少なくなる。

文 献

- (1) 倉林・柄沢, 機論, 35-275 (昭44), 1474.
- (2) Trayser, D. A., ほか3名, PHASE II Report to EPA office, (1972).

討 論

〔質問〕 志賀 聖一 (群馬大学工学部)

(1) 液滴飛跡のモデルによる予想結果 (図3) と、単一液滴の実験結果 (図9) とは、 v_a , v_s などの条件設定が異なっているが、同一条件にした場合の定量的な一致性はどうか。もし両者に違いがあれば、その要因としてはどんなものが考えられるか。また、これらの飛跡に関する理論および実験結果と、図12~15においてほとんどの燃料が壁面に付着する流速 $v_a = 20\text{m/s}$ という値との関連についてはどうか。

(2) 図12~15において、実験条件によらず $v_a = 20\text{m/s}$ 付近でほとんどの燃料が壁面に付着しているが、実際の機関において、特に気化器を用いた場合には、空気流速は時間的に大きく変動しており、しかも空気流速の高い時ほど供給燃料量が多い。したがって、実際の機関では、アイドリングを含めたほとんどの運転条件において、ほとんどの燃料が壁膜流として供給されていると考えられるがどうか。実際の機関での何らかのご経験などがあればコメントを頂きたい。

〔回答〕 (1) 図1に示した計算モデルと入口空気流速 v_a 、燃料噴出速度 v_s 、管路形状を同一とした場合の計算結果と実験結果の定量的一致は得られなかった。これは、計算による管内空気流れの予想結果が実際の管内空気の流れと異なっているためと思われる。このことはスモークワイヤによる管内空気流れの可視化結果からも確認されている。今後、計算の精度、計算モデルを検討する必要があると思われる。

また、図8に示した円管を用いた場合の実験結果は管内空気の流れが、液滴の飛跡観察条件と異なっている。実験において空気流速 $v_a = 20\text{m/s}$ で燃料がほとんど付着しているのは、管路の三次元性による二次流れの発生、また空気流速より判断すると乱流領域であり、これら空気の流れによって燃料が付着しやすくなっていると考えられる。一方、計算においては二次元モデルとし、空気の乱れについて考慮していない。計算では、燃料の壁面付着に及ぼすパラメータの選定を行うことを目的とした。今後、計算および実験の精度を上げ、同一モデルにおいて定量的な比較を行う必要があると思われる。

(2) 図12~15に示した実験結果は、液滴として水を用いた場合である。実際の機関で用いられているガソリンでは水に比べて気化しやすいため壁面への付着がかなり少なくなることを確認している。気化器において、絞り弁開度が小さい場合では絞り弁における燃料の微粒化によって液滴の粒径は $10\sim 20\mu\text{m}$ 程度となっており、壁面付着は粒径 $40\mu\text{m}$ で供給した場合に比べて少なくなると思われる。さらに、運転条件において、管内空気流速が 20m/s の領域もかなりあること、気化器では吸気管壁などが温水加熱によって液滴の蒸発が促進されていること、吸気管内空気流速が高くなると吸気管内に設けられたベンチュリ管によって微粒化されることを考慮すると、液膜で機関に供給される量は少ないと考える。