

安原 純平 原 慎也 鈴木 敏郎 宮寄 洋彰 山本 大介

要旨

燃料ポンプは燃料噴射システム(以下、FIシステム)を構成する部品の一つで、燃料を噴射するインジェクタへ燃料を圧送する役割を担っている。FIシステムを搭載する小型二輪車の台数は、排気ガス規制の強化に対応するため、特に中国やインドで増える傾向にある。一方、これらの地域では燃料に含まれる土壌成分などの粉体(以下、燃料中ダスト)の量が多いことが知られている。燃料中ダストは燃料ポンプの上流にあるサクシオンフィルタですべて捕捉することができず、一部が燃料ポンプ内へ流入する。これにより燃料ポンプの構成部品であるボデー、インペラ、カバーポンプが摩耗し、その結果必要な燃料流量を吐出できなくなる懸念がある。

そこでまず、基礎試験としてダスト耐久試験を実施し、摩耗と燃料流量の推移を調べ、燃料ポンプのダスト摩耗現象について考察した。次にその結果をもとに市場における必要最低限の燃料流量に至るまでの走行距離(以下、摩耗寿命と呼ぶ)を予測可能か検証した。ダスト耐久試験では燃料中に粒径を制御した試験ダストを投入し、燃料ポンプを連続作動させた際の摩耗量と燃料流量を測定した。その結果、試験初期には燃料流量は低下したが、一定の時間で安定した。その際の燃料ポンプのボデー、インペラ、カバーポンプの摩耗量の変化および燃料流量の変化は、そこを通過したダストの粒径および総数と相関があることが分かった。そしてダスト耐久試験で得られた燃料ポンプ通過ダストの粒径および総数と、燃料流量との相関を一般式化し、流量低下予測カーブと名付けた。市場における摩耗寿命の予測可否を調べるために、流量低下予測カーブに対して市場における燃料ポンプ通過ダストの粒径および総数を当てはめて予測した走行距離に対する燃料流量の推移と、市場から収集した燃料ポンプを用いて実測した走行距離に対する燃料流量の推移とを比較した。これらは同等の推移を示したことから、市場における燃料中ダストの粒径と濃度を事前に調査して流量低下予測カーブに当てはめることで、その市場での摩耗寿命を予測し、設計に反映できると考えられる。

Abstract

Fuel pumps are one of the constituent parts of fuel injection systems; their role is to supply pressurized fuel to the injectors, which then spray fuel into the intake port of the cylinders. In order to comply with stricter emission standards, the number of compact motorcycles featuring fuel injection systems is increasing, particularly in China and India. However, it is also known that fuel in these regions contains high volumes of dirt and other granular contaminants. Contaminants cannot be completely captured by the suction filter positioned upstream in the fuel pump. Some will flow through into the pump, causing wear in components such as the body, impeller, and pump cover. This situation poses the risk that a pump may become unable to supply fuel at the necessary flow rate.

As a first step, we conducted contaminant durability testing, investigating the correlation between wear and fuel flow rate to make observations about fuel pump contaminant wear phenomena. Based on these results, we evaluated whether it is possible to predict the vehicle mileage until the fuel flow rate reaches the minimum level, i.e. the wear life. Contaminant durability testing was conducted by continuous pump operation using particles of controlled diameters and the fuel itself. Fuel flow rates were measured during the test and wear amount was measured after the tests. The results showed that fuel flow rate decreased initially but stabilized as testing continued. It was found that a correlation exists between the changes of wear amount in the fuel pump body, impeller, and cover pump as well as the changes in the fuel flow rate on one hand, and the particle diameter and total number of the contaminants which flowed through on the other. The correlation between the contaminant particle diameter/total number through the fuel pump and the fuel flow rate obtained through the contaminant durability testing was converted to a general expression. This general expression was designated as the "flow rate decrease prediction curve." In order to investigate whether or not the wear life can be predicted, the fuel flow rate correlation with vehicle mileage was predicted by applying the actual contaminant particle diameter and total number to the "flow rate decrease prediction curve". This was compared to the fuel flow rate trends by mileage measured using fuel pumps which had been actually used. As the two showed similar trends, it can be considered that the wear life can be predicted. Accordingly, design adjustments can be made by surveying the real-world fuel contaminant particle diameter and density in advance and applying it to the "flow rate decrease prediction curve".

1 はじめに

FIシステムを搭載する小型二輪車の台数は、排気ガス規制強化に対応するために、今後特に中国やインドで増えると予想されている。一方でこれらの地域では、すでにFIシステムが浸透している地域と比較して、燃料中ダストの量が大幅に多いことが知られている。そのため燃料中ダストにより燃料ポンプの構成部品であるボデー、インペラ、カバーポンプが摩耗し、それにより燃料流量が低下することが懸念される。燃料流量が車両要求値に対して不足した場合、混合気の空燃比が異常となり、エンジン性能低下や排気ガス中の有害ガスの増加につながる可能性がある。

燃料ポンプのダスト耐久性を向上させるための対策には、摩耗箇所であるボデー、インペラ、カバーポンプの耐摩耗性を向上させる^[1]他、サククションフィルタの燃料中ダストのろ過特性を向上させるといった手法が考えられる。これまでは、ダストを含む燃料で耐久試験を行い、基準以下に流量低下した場合には前記の対策手法を施して再試験を行い、合格するまでこれを繰り返していた。しかしこの手順では開発に時間がかかるだけでなく、その対策手法がコストも含めて最適かどうか分からないという課題があった。そこで本報では、燃料ポンプのダストによる摩耗のメカニズムを明確にし、燃料中のダスト濃度から流量低下の推移を予測可能にすることで、最適な仕様を設計時に選択可能とすることを目的とした。まず燃料ポンプのダスト摩耗現象を理解するための基礎試験としてダスト耐久試験を実施した。燃料中に粒径を制御した試験ダストを投入し、燃料ポンプを連続作動させた際の摩耗形態、燃料流量を測定することで、通過したダストの粒径、総数と、燃料流量との相関を明らかにした。この試験で得られた燃料ポンプ通過ダストの粒径および総数と、燃料流量との相関を一般式化し、流量低下予測カーブと名付けた。次に、この結果をもとにして市場における摩耗寿命を予測可能か検証した。市場にお

ける燃料ポンプ通過ダストの粒径および濃度を、前記の流量低下予測カーブに当てはめて予測した燃料流量の推移と、市場で使用中の燃料ポンプを用いて実測した燃料流量の推移とを比較した。

2 試験方法

2-1. 燃料ポンプ

FIシステム、燃料ポンプアセンブリおよび、今回試験対象とした燃料ポンプの構成を図1から図3に示す。エンジンへ燃料を供給する仕組みとしてFIシステム(図1)を用いる目的は、正確な量の燃料を供給することで、混合気の正確な空燃比を実現して燃費向上や排気ガス規制対応をすることである。構成部品の一つに燃料タンク内に位置する燃料ポンプアセンブリ(図2)があり、その役割は燃料ホース、インジェクタ内の燃料圧力を規定値に保つことである。燃料圧力が保たれた状態でインジェクタ先端が一定時間開くことで、正確な量の燃料が噴霧される。燃料ポンプアセンブリは燃料圧力を発生させる燃料ポンプ、燃料圧力を一定にするためのプレッシャレギュレータ、そして燃料中ダストを捕捉するためのサククションフィルタなどから構成されている。燃料ポンプはインペラ(羽根車)を回転させることで燃料吸入口から出口穴の間で燃料圧力を昇圧する(図3)。燃料ポンプアセンブリの性能はプレッシャレギュレータ下流の燃料ホース内の燃料圧力と燃料流量の関係で表現することが一般的である(図4)。図4の実線は燃料ポンプアセンブリの特性を示し、一点鎖線は燃料ポンプ単品の特性を示す。燃料ポンプ単品では出口側の圧力が上がるに従い流量が低下する。燃料ポンプアセンブリでは高圧時にプレッシャレギュレータが作動することで、余分な圧力を燃料タンクに開放し、制御圧力(図4の黒破線)で一定となる。燃料ポンプアセンブリは新品の状態(図4の青線)では、最大車両要求流量(図4の緑破線)においても燃料圧力はプレッシャレギュレータの制御圧を保持できる。燃料ポンプ

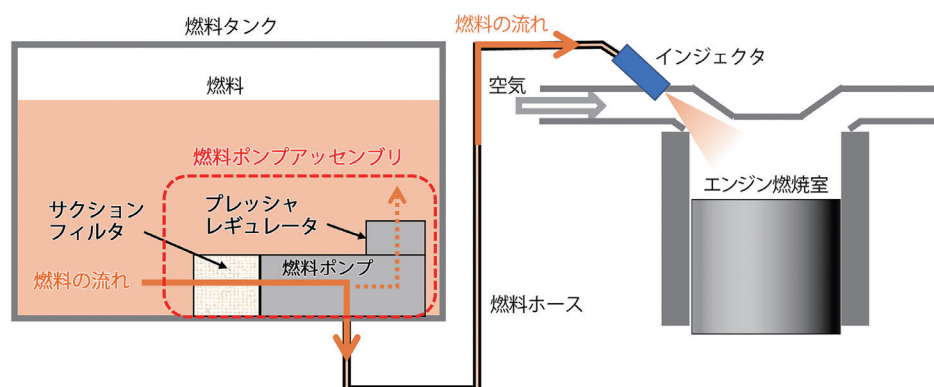


図1 燃料噴射システム(FIシステム)の概略図

アッセンブリでは、サクシオンフィルタを通り抜けた燃料中ダストによりボデー、インペラ、カバーポンプが摩耗し、それにとともに性能低下がおこる。図4の赤線のように想定以上の性能低下をすると、車両ではインジェクタが開弁、閉弁を繰り返す中で燃料圧力がプレッシャレギュレータ制御圧まで昇圧されないため、インジェクタの開弁時間制御による燃料流量の調整を正確にできなくなる。そのため、燃料ポンプが性能低下した場合でも、最大車両要求流量時の燃料圧力をプレッシャレギュレータ制御圧で保持できる必要がある(図4の黄線)。

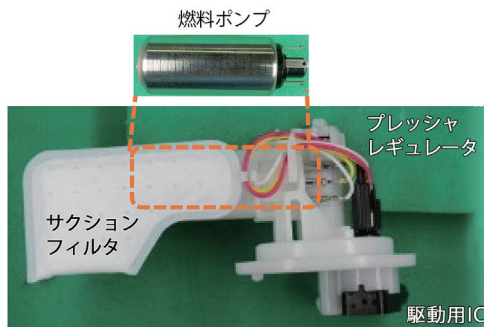


図2 燃料ポンプアッセンブリ

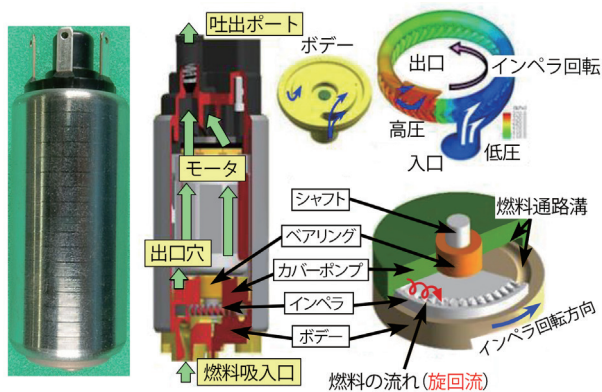


図3 燃料ポンプの構造と燃料を昇圧する原理

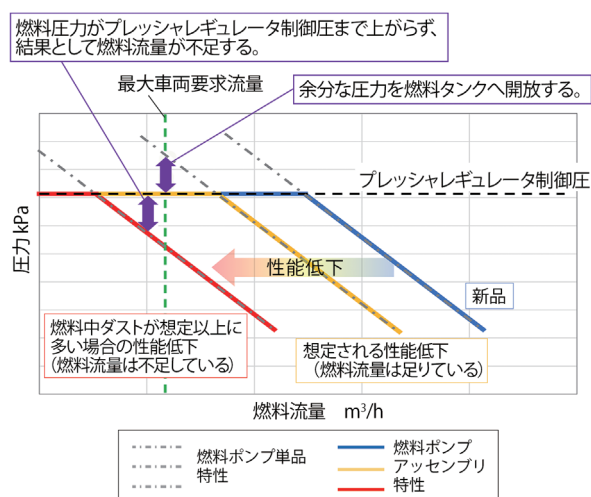


図4 燃料ポンプアッセンブリの性能(圧力流量特性)

2-2. 試験ダスト

JIS Z 8901に規定されている試験用粉体1の3種(けい砂)を用いて分級を行い、最大粒径を4種類に制御した試験ダストを作製した。試験ダストの粒径分布を図5に示す。最大粒径が小さいものから順に、粒径A、粒径B、粒径C、粒径Dと名付けた。

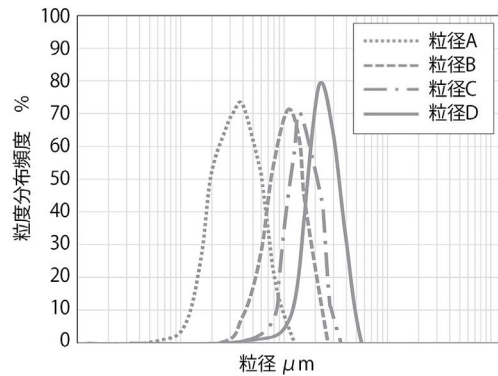


図5 試験ダストの粒径分布

2-3. ダスト耐久試験方法

燃料ポンプのダスト耐久試験機の概略を図6に示す。試験槽に燃料油、試験ダストを投入し燃料ポンプを作動させた。燃料ポンプの作動電圧は搭載車両のシステム電圧とした。また燃料圧力は燃料ポンプアッセンブリのプレッシャレギュレータ制御圧とした。サクシオンフィルタを用いていないため、試験ダストを攪拌機で均一分散した燃料油が燃料ポンプ内を直接通過する。流量計(東京計装P-771-00-TW-R1)とパーティクルカウンタ(PAMAS S4031FUEL)を用いて、それぞれ燃料流量と燃料中試験ダストの粒径分布(粒径ごとの濃度)の試験中の経過を測定した。各粒径の試験ダストにおいて、試験を3回ずつ行った。

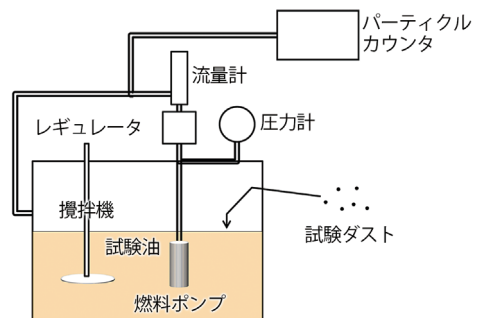


図6 ダスト耐久試験機の概要

ダスト耐久試験後に燃料ポンプを分解し、ボデー、インペラ、カバーポンプの摩耗量を形状測定機により測定した。図7中の摩耗箇所と記した部分を測定し、それぞれの摩耗量の合算

値を“ポンプ摩耗量”と定義した。また、ダスト耐久試験の結果から得た燃料ポンプ通過ダストの粒径および総数と、燃料流量低下量との相関を近似式化して流量低下予測カーブとした。

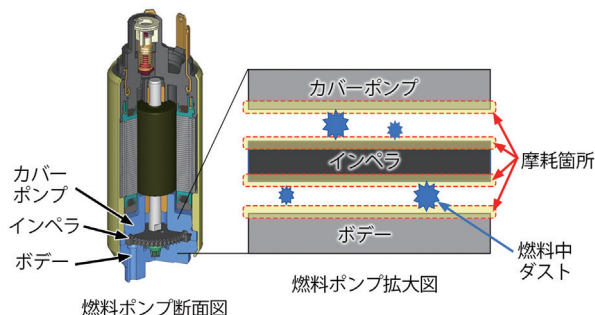


図7 燃料中ダストによる燃料ポンプの摩耗箇所とポンプ摩耗量

ダスト耐久試験のポンプ通過ダストの総数は燃料体積（ポンプ流量×試験時間）とダスト濃度より下記式（1）にて計算した。

$$M_d = c_d \times Q_d \quad (1)$$

M_d はダスト耐久試験中に燃料ポンプを通過したダストの総数であり単位は個である。 c_d はパーティクルカウンタにより測定されたダスト耐久試験中のダスト濃度であり、単位は個/ m^3 である。 Q_d はダスト耐久試験中に燃料ポンプを通過した燃料体積の総数であり単位は m^3 である。

2-4. 実市場における摩耗寿命予測

実市場で使われている車両の燃料タンク中の燃料油と燃料ポンプを用いて、次の手順で調査を行った。まず、燃料タンク中の燃料油のダストの粒径を実測し、総数を計算で求めた。これを流量低下予測カーブに当てはめて、走行距離に対する燃料流量推移を予測した。一方、実市場の車両の燃料ポンプで燃料流量を実測し、走行距離に対する燃料流量推移を求め、先の予測値と比較した。以下、詳細な手順を説明する。

まず、市場での燃料ポンプ通過ダストの総数を（2）式より各粒径に対して計算した。

$$M_m = c_f \times \alpha_s \times Q_f \times \frac{D_v}{v_v} \quad (2)$$

M_m は任意走行距離における燃料ポンプ通過ダストの総数で単位は個である。 c_f はタンク内燃料中のダスト濃度であり、単位は個/ m^3 で示す。市場の車両の燃料タンク内の燃料をパーティクルカウンタにより実測した平均値である。 α_s はサクシオンフィルタのろ過効率である。パーティクルカウンタによりろ過前、ろ過後の粒径分布を測定し各粒径ごとのろ過効率を計算した。 Q_f は燃料ポンプの燃料流量であり寸法公差中央品の燃料流量を使用した。単位は m^3/h である。 D_v は車両走行距

離であり単位はkmである。 v_v は車両速度であり市場平均を想定した値を用いた。単位はkm/h である。市場の燃料ポンプの燃料流量については、前記の実市場で使われている車両の燃料ポンプ単体の燃料流量を実測した。走行距離は当該サンプルが搭載されていた車両の走行距離メーターから読み取り、走行距離1万Kmごとに区切り、走行距離の平均値、流量の平均値から走行距離と燃料流量の推移を得た。

3 結果と考察

3-1. ダスト耐久試験結果

図8にダスト耐久試験時の試験時間と燃料流量変化を示す。燃料流量は試験開始時には大きく低下したものの、一定時間後に変化は小さくなる傾向が見られ、最終的に安定した。安定後の燃料流量について、試験ダスト粒径が大きいほど低下量が大きくなった。図9に試験ダスト粒径と試験後のポンプ摩耗量の関係を示す。試験ダストの各粒径ごとに3回測定し、平均値を示した。この結果より試験後のポンプ摩耗量は投入したダスト粒径と相関があることが分かった。

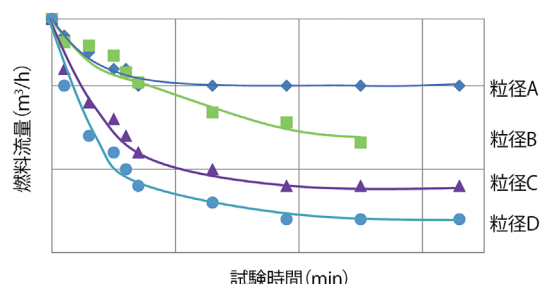


図8 試験時間と燃料流量の推移

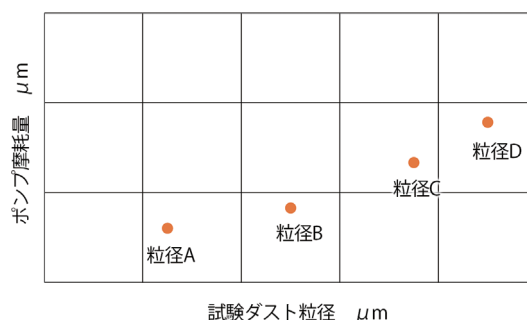


図9 試験ダスト粒径とポンプ摩耗量（平均値）の関係

以上の結果より燃料中ダストによる燃料ポンプの摩耗現象を考察した（図10）。試験初期にはダストがボデーやインペラ、カバーに強く押し付けられ、その結果急激に摩耗が進行する。しかし摩耗が進むに従いクリアランスが増加することで、ダストはインペラを摩耗させるほどの力で押し付けられず、摩耗量および流量はダストの粒径に応じた値で安定する。流量が

安定した際の摩耗量は通過ダストの粒径の関数になると考えられる。

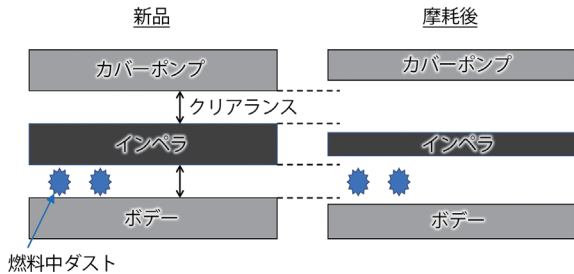


図10 燃料中ダストによる燃料ポンプの摩耗箇所

3-2. 実市場における摩耗寿命予測

図8に対して(1)式から計算したポンプ通過ダスト総数を当てはめることで、粒径ごとのポンプ通過ダスト総数と流量低下量の関係を求め、図11に示した(流量低下予測カーブ)。

(2)式を用いて計算した各距離でのダスト通過総数から、流量低下予測カーブを用いて予測した燃料流量の推移と、市場で使われている車両の燃料ポンプで実測した燃料流量との比較を図12に示す。双方の流量低下傾向は類似していることから、本手法による流量低下の予測手法は実測と整合すると考えられる。

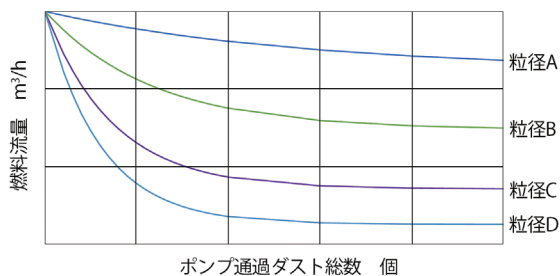


図11 ポンプ通過ダストの総数と燃料流量の関係

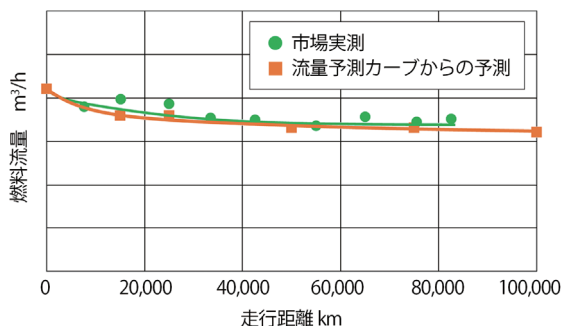


図12 市場の燃料ポンプを実測した走行距離に対する燃料流量推移と流量予測カーブから予測した走行距離に対する燃料流量推移

本手法を用いれば、将来FIシステムを展開する市場の燃料中のダスト濃度を測定して(2)式に代入することにより、燃料流量低下量を予測することが可能になる。この結果がもし車両の最大要求流量を満たさない場合には、サクションフィルタのろ過効率 α_s を向上させる、もしくは燃料ポンプの耐摩耗特性を向上させるといった手段を、設計段階で、しかも定量的な目標値を定めて実施することが可能になる。

4 おわりに

排気ガス規制強化にともない、FIシステムを採用する小型二輪車の販売地域は拡大している。各地域における燃料中ダストによる燃料ポンプの摩耗、流量低下を設計段階で予測する手法を検討した。その結果、下記2点の知見を得た。

1. 本報で使用した燃料ポンプのダストによる摩耗、流量低下は通過ダストの総数が増えてもその粒径により一定のところで安定する。
2. 本報で使用した燃料ポンプの流量がダストにより低下し安定するまでの挙動は一般式化することができ、これを流量低下予測カーブとした。これを用いることで市場の走行距離に対する流量推移を予測することができる。

上記2点の知見より、FIシステムを展開する市場の流量低下を予測し対策することが設計段階で可能となった。

■参考文献

- [1] 金子ら：アルミ陽極酸化被膜に対するDLC成膜技術の開発
ケーヒン技報Vol.1(2012) p.13-18

■著者



安原 純平
Jumpei Yasuhara
生産技術本部
材料技術部



原 慎也
Shinya Hara
生産技術本部
材料技術部

鈴木 敏郎
Toshiro Suzuki
愛三工業㈱
設計品質統括部

宮崎 洋彰
Hiroaki Miyazaki
愛三工業㈱
二輪事業部

山本 大介
Daisuke Yamamoto
愛三工業㈱
第2製品開発部