ガソリン噴射システム用の熱線式
空気流量計の吸気脈動特性*大 山 宜 茂^{*1}, 平 沢 宏 太 郎^{*2}, 西 村 豊^{*1}
大 須 賀 稔^{*1}, 藤 枝 護^{*1}Pulsating Flow Characteristics of Hot-Wire Air Flow Meter
for Gasoline Fuel-Injection SystemYoshishige OHYAMA, Khotarou HIRASAWA, Yutaka NISHIMURA,
Minoru OHSUGA and Mamoru FUJIEDA

Pulsating flow characteristics of hot-wire air flow meters for gasoline fuelinjection systems were investigated to analyze simple methods of measuring data processing. It was clarified that backward flow components due to pulsation are detected as forward flow by the probe in the conventional meters, increasing errors. The errors due to pulsation can be reduced by using a meter with a hot-wire probe located in a bypass passage, compensating aerodynamically forward and backward flow components.

Key Words: Fuel Injection, Intake System, Air Flow Meter, Hot Wire, Pulsation

1. ま え が き

ガソリン噴射システムに広く用いられている^{(1)~(11)}熱線式空気流量計は周知のように、逆流時も正流時と同じような測定値を出力するので、吸返しおよび気柱振動に伴う脈動によって、流量計が取付けられている吸気通路に逆流が生じる場合、測定値の平均が実際の空気量より大きくなりやすい⁽¹¹⁾。また、空気流量計がスロットルバルブから離れて装着されると、脈動成分の影響を受け、両者の流量に時間的な差が生じる⁽¹⁰⁾。

脈動が大きいときの信号処理に関しては、圧力センサを取付け、ソフト的に正方向、逆方向の脈動成分を分離し、時間的な差を補償する方法⁽¹⁰⁾などが提示されているが実験室的な解析にとどまっている。

よって、本報告では、脈動時の熱線式空気流量計の特性を解析し、ガソリン噴射システムに適用できる簡便な処理法を検討することにした。

2. 解 析

2・1 吸気脈動による逆流 気柱振動に伴う速度変動は±20 m/sに達するときがある⁽⁷⁾。空気流量計は通常、吸気弁から離れたエアフィルタ側に取付けられるので、この影響を受ける。この関係を図1の単純モデルの場合について例示する。図1において、各所の圧力を p_1, p_2, p_3 、速度を u_1, u_2 とすると、

$$p_1 = a_1 \frac{du_1}{dt} + b_1 u_1 + p_2 \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$p_2 = a_2 \frac{du_2}{dt} + b_2 u_2 + p_3 \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = k(u_1 - u_2) \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここに、 a_1, b_1, a_2, b_2, k : 定数
が成立する。ここで、 p_1 = 一定、 p_3 = 一定、 $a_1 = a_2, b_1 = b_2, u = u_1 - u_2$ とすると

$$a_1 \frac{d^2 u}{dt^2} + b_1 \frac{du}{dt} + ku = -a_1 \frac{d^2 u_2}{dt^2} - b_1 \frac{du_2}{dt} \cdots \cdots \cdots (4)$$

となる。式(4)において、 $b_1 = 0$ とし、 u_2 が正弦状に変化したときの $u_1 = u + u_2$ の変化を計算した結果を図2に示す。

ピストンの往復動に伴う速度 u_2 の変化に、気柱振

* 平成4年7月14日 第10回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成4年6月1日。

*¹ 正員、(株)日立製作所日立研究所 (〒312 勝田市高場2520)。

*² (株)日立製作所日立研究所。

動に伴う速度変動 u が重畳し、流量計のところの速度 u_1 となる。ここで、 u_2 の振動数 ω が固有振動数 ω_n より小さいときは、図 2 (a), (b) のような波形、 $\omega > \omega_n$ のときは、図 2 (c) のごとく波形になる。 $\omega = \omega_n$ のときは、共振で、 u_1 の振幅が増大する。

このように、往復動の速度 u_2 が負にならない（吹返えしかない）ときでも、 u_1 （すなわち空気流量計の通路の速度）が負になるときがある。

2・2 吸気管内における圧力、速度の伝ば 管出口端の速度がステップ的に変化したときの入口端から $L/2$ の箇所の圧力 p 、速度 u の変化を模式的に示すと図 3 のごとくなる。速度 w に対し、 u は正、負に振れる。したがって、 w が w_0 から零に変化するとき、図 3 (b) のごとく、 $u < 0$ 、すなわち逆流が生じる。管長を L 、音速を a とすると振動の周期は $4L/a$ である。圧力 p と速度 u との間には

図 1 吸気系モデル

図 2 u_1, u_2 の時間的変化

$$\frac{\partial p}{\partial x} - \rho \frac{\partial u}{\partial t} \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{a^2} \frac{\partial p}{\partial t} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 t : 時間

x : 管入口からの距離

ρ : 密度

a : 音速

の関係が成立する。

いま図 4 に示すごとく、主通路を分岐するバイパス通路に熱線プローブを配置する場合は、絞り前後の S_1, S_2 の面内において、式 (6) がそのまま成立する。絞りによる圧力損失分 $-\rho \cdot w_v^2/2$ が式 (5) の右項に加算される。ここに、 w_v は、流量計の絞り部の速度である。

2・3 バイパス通路内の流れ

バイパス通路の入口、出口の圧力は、 $\rho \cdot w_v^2/2$ の差をもって変動する。いま $w_v = 0$ とすると、通路内の速度の時間的平均は零であるが、入口、出口端の速度 w_1, w_2 は空気の圧縮、膨張によって正、逆に変動する。この影響を回避する

図 3 w がステップ的に変化するときの p, w の時間的変化

ためには、入口、出口端から等長の箇所にプローブを配置すればよい。

図1において、 $u_2=0$, $p_2=p_3$ とすると、

$$\frac{dp_1}{dt} = a_1 \frac{d^2 u_1}{dt^2} + b_1 \frac{du_1}{dt} + k_v u_1 \quad \dots\dots\dots (7)$$

が成立する。これをバイパス通路にあてはめると、 a_1 , すなわち長さが大きくなり、途中の容量 k_v が小さくなるほど、速度 u_1 が振動しやすくなる。

いま、流量計の下流の吸気管の圧力を p_{b2} とすると、式(6)から

$$w_v - U = \lambda_1 \frac{dp_{b2}}{dt} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 λ_1 : 定数

w_v : 流量計の絞り部の速度

U : 吸気管の出口速度

また、絞り部の定数を β_1 とすると、絞り部7の上流の圧力 p_{b1} , 下流の圧力 p_{b2} に関し、

$$p_{b1} - p_{b2} = \beta_1 w_v |w_v| \quad \dots\dots\dots (9)$$

が成立する。一方、バイパス通路の速度を u_b とすると、

$$p_{b1} - p_{b2} = \beta_2 u_b |u_b| \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 β_2 : 定数

が成立する。式(9), (10)を式(8)に代入すると、

$$u_b = \beta_3 \left(U + \lambda_1 \frac{dp_{b2}}{dt} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

式(11)からわかるように、バイパス通路内の流れは、吸気管の出口速度のほかに、吸気管の圧力 p_{b2} の変動の影響を受ける。

バイパス通路内の任意の点の速度を v_b とすると、バイパス通路の入口の速度 u_b と、 v_b との間には、

$$v_b = u_b - V_1 \frac{dp_{b2}}{dt} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 V_1 : 定数

の関係が成立する。式(12)を式(11)に代入すると、

$$v_b = \beta_3 \cdot U + (\beta_3 \cdot \lambda_1 - V_1) \frac{dp_{b2}}{dt} \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。ここで、 $\beta_3 \cdot \lambda_1 = V_1$ になるように、バイパス通路内でのプローブの配置を選定すると、 $v_b = \beta_3 U$ となり、 v_b は、吸気脈動に伴う、正、逆流の影響を受けず、吸気管の出口速度 U のみの関数となる。すなわち、吸気脈動の影響を空力学的に補償し、プローブによって、 U を正しく測定することができる。

3. 実験的検討

3・1 実験装置の概要 表1に示す諸元のエンジンを供試した。図5に示すごとく従来化器が取り付けられているところに熱線式空気流量計を取付けた。エアフィルタは通常の化器のものである。熱線プローブとしては、径 $5\mu\text{m}$ のタングステンあるいは 0.6mm の径のセラミックポピンから構成された市販のプローブを用いた。

バイパス通路の径は 8mm , 長さは 50mm である。また絞りの径は 45mm である。

机上実験ではエンジンの代わりに真空ポンプを用い、バタフライバルブを回動して吸気脈動をつくった⁽¹⁾。

3・2 圧力、速度の変動 図6(a)に回転数 1000rpm のときのエアフィルタ内の圧力を示す。フィルタがないときに対し、フィルタがあるときは気柱振動に伴う圧力変動が速度変動に伴う圧力変動に重畳し、圧力が正になるときがある。図6(b)に、主通路内の速

表1 エンジンの諸元

	4 cycle 4 cylinder
Swept volume	1952cm^3
Bore X stroke	$85 \times 86\text{mm}$
Compression ratio	8.5

図4 バイパス通路内にプローブを有するモデル

図5 実験装置

度変動を測定した結果の一例を示す。脈動に伴う速度変動が重畳しており、 S_3 の部分で逆流が生じている。図2(a)に類似した変動で、変動のサイクル2回おきに逆流が生じている。

机上実験において、主通路とバイパス通路の速度変動（バイパス通路の出口に容量があるとき）を測定した結果の一例を図7に示す。

バイパス通路の長さが50 mm程度と小さいときは、2.3節の式(9)、(10)からも推測されるように主通路

(a) エアフィルタ内の圧力

(b) 主通路内の速度

図6 圧力、速度の時間的変化

図7 主通路、バイパス通路内の速度の時間的変化

とバイパス通路の速度の変動の位相は同じである。

3.3 測定値の平均 図8に真空ポンプを用いた実験装置で得られた結果の一例を示す。振動数に対する平均測定値は固有振動数120 Hzの1/2の振動数、および固有振動数の付近で高くなっている。メイン通路に5 μm のプローブを配置した場合とバイパス通路に市販のプローブを配置した場合を比べると後者のほうが変化割合が多くなっているが、傾向は同じである。

このように、真空ポンプを用いた吹返しを伴わないときでも、吸気脈動によって、空気流量計の通路に逆流が生じ、熱線プローブがこれを正と測定し、測定値のほうが大きくなる。バイパス通路の測定値が大きくなっているのは、バイパス通路入口の圧力変動によって、通路内の空気が呼吸運動し、正、逆に変化し、バイ

図8 振動数に対する測定値の平均

図9 バイパス通路内のオリフィスの影響(1)

パス通路の入口に設けた熱線プローブが、これを検出するためである。このとき、速度は圧力の時間微分で変動するので、位相は同じである。

以上、吹返しが無い場合でも、測定値が大きくなり、また、バイパス通路にプローブを配置した流量計でも、プローブの配置の箇所を適当に選定しないと、吸気脈動の影響を受けることがわかった。

3・4 バイパス通路内のオリフィスの影響 図9

にプローブとオリフィスの間の距離がプローブの出力に及ぼす影響を示す。オリフィス径が零のときは、速度の平均値が零であるにもかかわらず、逆流を検出して、出力の平均は距離が増大するほど大きくなる。オリフィス径が1.4 mm程度になると、距離の影響は受けなくなる。入口、出口側からの空気の圧縮に伴う速度がプローブのところで釣り合うようになるためである。

図 10 バイパス通路内のオリフィスの影響(2)

図 11 バイパス通路にプローブを有するときの測定値の平均(1)

図 10 にオリフィス径と測定値の関係を示す。オリフィス径が小さくなると、逆流の影響を受け、測定値の平均が空気量に比べ大きくなる。ここで、エンジン回転速度が1000 rpm のときは、吹返しの逆流の影響で、オリフィス径が大きいときでも、測定値のほうが大きい。図 10 の場合はバイパス通路の出口側に容量が5.2

図 12 バイパス通路にプローブを有するときの測定値の平均(2)

図 13 プローブの出力の時間的变化

cm³のサージタンクがあり、サージタンクがあると、入口、出口の圧力のバランスが遅れるので、速度変動が大きくなり、誤差を小さくするためにはオリフィス径を4 mm以上にする必要がある。

3・5 プローブの配置箇所の影響 図11に示すごとく下流にサージタンクを有するときは、エンジン回転数2 000, 3 000 rpmのときの測定値の平均が大きくなる。このとき、バイパス通路の長さを大きくすると、2 000, 4 000 rpmの測定値が大きくなる。3 000 rpmでは位相がずれて、逆流が抑えられ、測定値が1に近づく。

出口端にサージタンクがなく、プローブを通路の中央に配置すると、測定値の平均は、図12に示すごとく、ほぼ空気量に合致する。図13に、プローブの出力の変動を示す。サージタンクがある場合は変動が大きいが、サージタンクを除去すると、変動は小さくなる。

以上、プローブの配置箇所を適当に選定すると、図12の○印のごとく、エンジン回転数2 000 rpm以上の測定誤差が小さくなる。しかし、脈動に伴う圧力変動、速度変動の影響を回避できても、低回転時のエンジンの吹返しを、プローブで正の信号として検出し、図12に示すごとく測定値の平均が大きくなる。吹返し分だけ出力を負に変換して平均化することによって、測定値を合致させることができる。

4. ま と め

ガソリン噴射システム用の熱線式空気流量計に関し、吸気脈動が測定値に及ぼす影響を検討した結果を要約する。

(1) バイパス通路内の流れは、吸気管の出口速度のほかに吸気管の圧力の影響を受ける。

(2) 吹返しを伴わないときでも、吸気脈動によって流量計の通路に逆流が生じ、熱線プローブがこれを正と測定し測定誤差が大きくなるときがある。

(3) バイパス通路のオリフィス径が小さくなると逆流の影響で誤差が大きくなる。

(4) バイパス通路の中央にプローブを配置することによって、吸気脈動の影響を回避することができた。

(5) 低回転時のエンジンの吹返しをプローブで正と測定し測定誤差が生じる。

文 献

- (1) Nishimura, Y., ほか4名, Hot Wire Flow Meter for Engine Control System, *SAE Paper*, No. 830615(1983).
- (2) Sumal, J. S., ほか2名, Bosch Mass Air Flow Meter: Status and Further Aspects, *SAE Paper*, No. 840137(1984).
- (3) Follmer, W. C., Frequency Domain Characterization of Mass Air Flow Sensor, *SAE Paper*, No. 880561(1988).
- (4) Tanimoto, K., ほか2名, Switching Controlled Thermal Mass Air Flow Sensor, *SAE Paper*, No. 890298(1989).
- (5) Heintz, F., ほか1名, Application Possibilities and Future Chances of "Smart" Sensors in the Motor Vehicle, *SAE Paper*, No. 890304(1989).
- (6) Loseing, K. H., ほか2名, Mass Air Flow Meter-Design and Application, *SAE Paper*, No. 890779(1989).
- (7) Duelli, H., Berechnungen und Versuche zur Optimierung von Ansaugsystemen für Mehrzylinder Motoren mit Einzelzylinder-Einspritzung, *Fortschr.-ber., VDI Reihe, 12-85*(1987), 1-200.
- (8) 日本機械学会, 機械工学における流体関連脈動, P-SC 10 流体関連分科会成果報告書, (1980).
- (9) 八田・ほか2名, 内燃機関計測ハンドブック, (1979), 11-53, 朝倉書店.
- (10) Haug, F., Zur Instationären Gemischbildung bei Saugrohreinspritzung-Teil 1, *MTZ*, **52**(1991), 252-254.
- (11) 大山・ほか3名, 吸気脈動が熱線式空気流量計の特性に及ぼす影響, 自動車技術会 1992 年度春季大会・学術講演会前刷集, (1992-5).