PITOT 管流量計によるエンジン脈動流計測の解析*

中 村 博 司^{*1}, 浅 野 一 朗^{*2}
足 立 正 之^{*1}, 千 田 二 郎^{*3}Analysis of Pulsating Flow Measurement of Engine Exhaust
by Pitot Tube Flow MeterHiroshi NAKAMURA^{**}, Ichiro ASANO,
Masayuki ADACHI and Jiro SENDA^{**} HORIBA, Ltd., Emission Analysis R & D Dept.,
2 Miyano Higashi, Kisshoin, Minami-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 601-8510 Japan

Pitot tube flow metering technique has been used to measure pulsating flow from a vehicle's engine exhaust. In general, flow metering techniques that utilize differential pressure measurements based on the Bernoulli's theory likely to show erroneous reading when measuring an average flow rate of pulsating flow. The primary reason for this is the non-linear relationship between the differential pressure and the flow rate, i.e. the flow rate is proportional to the square root of the differential pressure. Thus, an average of the differential pressure does not give an average of pulsating flow. In the present study, fast response pressure transducers have been used to measure the pulsating pressure as raw as possible. Then, the pulsating differential pressure is converted to flow rate keeping the pulsation not averaged. An average of the flow rate is then calculated in flow rate domain in order to maintain the linearity of before and after the averaging. The peak amplitude of a pulsation measured here was about 1 800 LPM at the average flow rate of 70 LPM when an engine was idling. This measurement has been confirmed by measuring the pulsation with a gas analyzer. The result here implies large amount of back and forth gas movement in the exhaust tube. Such amount of pulsation can cause maximum five times higher erroneous result with the pressure domain averaging when compared to a flow rate domain averaging.

Key Words: Pulsation, Oscillatory Flow, Flow Meter, Exhaust Flow Measurement, Pitot Tube

1. 結 論

エンジン排ガス中の汚染物質の低濃度化やパワートレインの複雑化にともない、従来の試験設備を用いた汚染物質の排出質量計測や瞬時燃費計測は非常に困難になってきている。このような状況から、代替となる計測手法が数多く提案されてきており、それらの手法の中で排ガス流量の計測は重要な役割を占めるようになってきている^{①②}。

一方、エンジン排ガスの特徴として、(1) 流体の温度が低温から高温まで変化する、(2) 流量が数十リットル毎分から数千リットル毎分まで大きく変化する、(3) 流量が瞬時に変化する、(4) 流体中の組成が大きく変動する、(5) 多量の水蒸気、粉塵を含む、(6) 流体の脈動が大きい、などがあげられ、一般的なガス流量測定技術を用いて排ガス流量を直接測定するのは非常に困難である。

特に、エンジン排ガスはアイドル時には逆流を含む大きな脈動流を生じるために、逆流を計測できないベンチュリー流量計や、オリフィス流量計、カルマン流量計などでは正確な計測が不可能である。本研究では、逆流の計測が可能である排ガス流量計のひとつとして Pitot 管式流量計を採用し評価を行った。Pitot 管式流量計は構造が単純であり、応答も速く、高温で水蒸気を含む流体の測定が可能であるが、脈動流体の計測時に大きな誤差を生じると報告されている^{③④}。本研究では、Pitot 管流量計の脈動流計測の検証および誤差の解析を行い、脈動流を正確に計測する手法を開発した。

* 原稿受付 2003年9月1日。

^{*1} 正員、(株)堀場製作所(☎601-8510 京都市南区吉祥院宮の東町2)。^{*2} (株)堀場製作所。^{*3} 正員、同志社大学大学院工学研究科(☎610-0321 京田辺市多々羅都谷1-3)。

E-mail: hiroshi.nakamura@horiba.com

2 おもな記号

Q_{EX} : 排ガス流量 [L/min]

K : Pitot 管校正係数

dP : Pitot 管差圧 [kPa]

D_{EX} : 排ガス密度 [kg/m³]

P_{EX} : 排ガス圧力 [kPa]

T_{EX} : 排ガス温度 [K]

f : 脈動周波数 [Hz]

N : エンジン回転数 [rpm]

M : エンジン気筒数

V_p : 脈動流速の振幅 [m/s]

V_{pmax} : 管断面における振幅の最大値 [m/s]

V_{pave} : 管断面における振幅の平均値 [m/s]

V_a : 脈動流速の平均流速 [m/s]

R : 排気管の半径 [m]

R_x : 排気管の中心からの距離 [m]

V_{Rx} : R_x における管断面における振幅 [m/s]

3. 実験装置および方法

図1に、Pitot 管を用いた実験装置を示す。Pitot 管は内径 30mm の配管に取り付けられており、Pitot 管自身は外径 6mm、内径 4mm の円筒管で配管中央より 11mm の位置に $\phi 2$ mm の全圧孔が 2 つあるものを使用した。また、配管壁面に $\phi 2$ mm の静圧孔を設け、全圧孔と静圧孔の差圧を、外径 6mm、内径 4mm、長さ 5m の配管を通じて差圧計によって測定した。流量を標準状態に換算するために、流体の温度、絶対圧力をそれぞれ計測した。

Pitot 管式流量計の流量演算は、Pitot 管の差圧が正の時は式 (1)、差圧が負のときは式 (2) を用いた。ここで、Pitot 管の校正係数 K および K' の値は、正方向および逆方向の定常流を用いて、ベンチュリー流量計のひとつである SAO(Smooth Approach Orifice)流量計で校正し算出した。

$$Q_{EX} = K \times \sqrt{\frac{dP}{D_{EX}}} \times \frac{P_{EX}}{101.3} \times \frac{293.15}{T_{EX}} \quad (1)$$

$$Q_{EX} = -K' \times \sqrt{\frac{|dP|}{D_{EX}}} \times \frac{P_{EX}}{101.3} \times \frac{293.15}{T_{EX}} \quad (2)$$

使用したエンジンは、1.6L、4 気筒のガソリンエンジンで、アイドル状態時の排ガス脈動流量を計測した。また、アイドル状態の脈動を正確に計測するために、Pitot 管の差圧を計測する差圧計は、応答周波数が脈

動周波数よりも十分に速い 2kHz であるものを使用した。

Fig. 1 Schematic of Pitot tube flow meter

4. 実験結果と考察

4.1 Pitot 管式流量計による脈動流計測

図2に、定常流量を Pitot 管式流量計で測定した時に発生する Pitot 管の差圧と、SAO 流量計で測定した基準流量との関係を示す。流量が正方向の時は Bernoulli の定理から導かれる (1) 式に表したとおり、差圧の平方根と流速が直線関係となっている。これに対し、逆方向の流れに対しては流体の粘性による流れの剥離がおこるため Bernoulli の定理は適用できないが、剥離によって発生する負圧の平方根が流速と直線関係になっていることがわかる。それぞれ Pitot 管の差圧の平方根が流量と直線関係になっていることが確認できたため、以下の試験にはこうして得られた Pitot 管校正係数を用いて評価を行った。

Fig. 2 Calibration result of Pitot flow meter

Fig 3 Exhaust flow at idling measured by Pitot flow meter.

図3に、Pitot 管式流量計によって、エンジン回転650rpm のアイドル状態での排ガス流量を測定した結果を示す。排ガス圧力および排ガス流量ともに正弦波に近似した出力が得られており、また試験中におけるエンジン回転数から式(3)より計算した脈動周波数21.7[Hz]と同等の周波数が検出されている。

$$f = \frac{1}{2} \times N \times \frac{1}{60} \times M$$

(3)

また、Pitot 管によって測定した脈動流量は平均流量が約 70 [L/min]であるのに対し、振幅は、±900 [L/min]にもなっていることが観測された。

4.2 エンジン脈動流の解析

図4に、Pitot 管式流量計によって観測された逆流を含むエンジン脈動流量が妥当であることを確認するために使用した装置を示す。使用したエンジンはガソリンエンジンであり、理論空燃比($\lambda=1$)に制御されているために排ガス中の O_2 濃度はほぼゼロであるが、脈動によって逆流を生じている時には、大気中の O_2 を排気管から吸い込み、排気管出口からある距離までは O_2 が逆流しているはずである。この逆流の距離(L)をジルコニア式 O_2 計によって測定した。

Fig 4 Schematic of backward flow evaluation test.

Fig 5 Distance of backward flow penetration in engine exhaust tailpipe.

図5に、排気管出口からの距離における O_2 濃度を示す。この結果から、逆流による排ガスの逆方向への移動距離は、本実験条件において約 0.3 [m]であることがわかる。図6に、理想的なエンジン脈動波形における脈動振幅のモデルを示す。ここで、 V_p は脈動速度の振幅、 V_a は脈動流の平均速度を表している。逆流距離の計測と本モデルを用いて、 V_p を算出する。

このとき、逆流による移動距離は、逆流速度を脈動周期の半周期分積分することによって式(4)のように表される。

$$L = \int_0^{T/2} (V_p \sin(\omega t) - V_a) dt$$

(4)

$$= \frac{1}{f} \left(\frac{V_p}{\pi} - \frac{V_a}{2} \right)$$

よって、脈動速度の振幅は、式(5)で表される。

$$V_p = \pi \left(Lf + \frac{V_a}{2} \right)$$

(5)

試験結果から逆流による移動距離は $L=0.3$ [m]、脈動周波数 $f=21.7$ [Hz]、平均流速は、別報により報告している CO_2 トレース法によって測定したアイドル時の平均流量(70[L/min])より $V_a=1.285$ [m/s]として計算すると、 $V_p=22.5$ [m/s]となる。ここで、図4に示したように、逆流によって吸い込まれる O_2 の移動距離は、配管のほぼ中央で測定したために上記の V_p 値は、配管中の流速分布における振幅の最大速度 V_{pmax} であるとみられる。これに対し、Pitot 管式流量計では平均流量を計測しているために、振幅の平均速度 V_{pme} を見積もった。

乱流のときの円筒管内の流速分布は指数法則の式 (6) によって表される. この式を円筒管の全断面にわたって積分し, これを円筒管の断面積で割ることにより平均速度と最大速度の関係は式 (7) で表される.

$$\frac{V_{px}}{V_{pmax}} = \left(1 - \frac{r_x}{R}\right)^{1/n} \quad (6)$$

$$V_{pave} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} V_{pmax} \quad (7)$$

ここで n は Re 数の関数で表される値であり, 流速が 22 [m/s] のときの試験排気管におけるレイノルズ数 (Re 数) は約 44900 であり, この時 $n=68$ とすると, 脈動速度の振幅は $V_{pne}=18.46$ [m/s] と計算できる.

Fig. 6 A modeled flow rate with strong pulsation as a function of time.

図 7 に, Pitot 管式流量計によって測定したエンジン脈動流の波形と, 上記の計算によって得た振幅の平均速度 V_{pne} および脈動流の平均速度 V_a によって算出したエンジン脈動波形のモデルとを比較した結果を示す. ここで, 比較のため脈動波形のモデルは配管の断面積を乗じることにより流量に換算している. それぞれの脈動の振幅はほぼ一致しているため, Pitot 管式流量計のエンジン脈動流量の測定結果は, 脈動の計測として妥当なふるまいであることが判断できる.

Fig.7 Comparison of pulsation flow between the Pitot tube measurement and the calculation from backward flow penetration.

4.3 Pitot 管式流量計の脈動流計測誤差

Pitot 管式流量計やベンチュリー流量計は, 差圧を流量に換算する際に差圧の平方根をとるため, 差圧と流量は非直線関係にある. 図 8 に, 差圧の計測値と算出される流量の関係, および脈動計測時の誤差メカニズムを示す. 図から分かるように, エンジン排ガスの様に脈動が大きい流量を測定する場合, 脈動による差圧の平均を流量に換算すると, 脈動流自身の平均値よりも高めの測定誤差を生じることになる. 実際に, エンジン排ガスを Pitot 管式流量計によって測定するとアイドル状態で約 3~6 倍の測定誤差が生じる場合があると報告されている [9,10].

この差圧の平均化による誤差が流量に与える影響を確認するために, 2kHz の応答周波数を持つ差圧計で測定した差圧波形を 1 次の低域通過フィルタに通し, 任意に応答周波数を遅くした差圧波形を流量に換算するときに生じる測定誤差を検証した.

Fig. 8 Relation between differential pressure of Pitot tube and averaging error mechanism.

図9に、2kHzの応答周波数の差圧計によって測定したPitot管の差圧と流量、および応答周波数を1.6Hzにしたときの差圧と流量の波形を示す。差圧波形は応答が遅くなることにより振幅が減少し平均化された波形となっているのに対し、それを流量に換算すると、流量の振幅が減少しているのと同時に、平均流量が高めにオフセットしていることが確認できる。

Fig 9 Averaging error of Pitot flow meter

図10に、2kHzの応答周波数を持つ差圧計で測定した差圧波形を1次の低域通過フィルタに通し、遮断周波数を2kHzから0.2Hzまで変化させたときの差圧波形より計算した平均流量値を示す。アイドル時の脈動周波数である約20Hz以下の応答周波数で測定誤差が極端に大きくなっており、応答周波数が0.2Hzではその測定値は実流量の平均値の約5倍にもなっていることが確認できる。また、この試験結果ではアイドル時の脈動周波数である20Hzの応答周波数の測定系を用いた場合でも約30%の測定誤差を生じている。この測定誤差は、脈動流体の平均流量およびその振幅によって変化するが、本試験で用いたような一般的な小型ガソリンエンジンより発生する脈動流体（平均流量が約70L/min、振幅が約900L/min）を5%以内の測定誤差にするためには脈動周波数の5倍以上の応答周波数を持つ測定系（Pitot管から差圧計までの導圧管を含む全測定系）が必要であることがわかる。

Fig 10 Influence of frequency response of differential pressure sensor on Pitot averaging error.

5. 結 論

- (1) Pitot 管式流量計を用いて逆流を含むエンジン排ガスの脈動流量を計測するのに成功した。
- (2) 1.6L のガソリンエンジンの排ガスにおいて、アイドルの時の平均流量が約 70 [L/min] であるのに対し、脈動流の振幅は±900 [L/min]にもなっていることが観測された。
- (3) 本試験で用いたような一般的なエンジンより発生する脈動流体（脈動周波数が約 20Hz、平均流量が約 70L/min、振幅が約±900L/min）を応答周波数が約 0.2Hz の測定系をもつ Pitot 管式流量計で測定した場合、平均化による誤差は 500%にもなることが確認できた。
- (4) Pitot 管式流量計を用いてエンジン排ガス流量を測定する場合には、想定される脈動周波数よりも充分に応答の速い差圧計と組み合わせる必要がある。

文 献

- (1) D. B. Nagy, J. Loo, J. Tulpa, P. Schroeder, R. Middleton, SAE paper 2000-01-0793.
- (2) D. J. Luzenski, K. T. Bedsole, J. Hill, D. B. Nagy, S. S. Decarteret, SAE paper 2002-01-0047.
- (3) K. Inoue, M. Ishihara, K. Akashi, M. Adachi, K. Ishida, SAE paper 1999-01-0150.
- (4) M. Guenther, M. T. Sherman, M. Vaillancourt, D. Carpenter, R. Rooney, S. Porter, SAE paper 2002-01-0046.
- (5) M. Guenther, T. Henney, W. M. Silvis, S. Nakatani, D. Y. Wu, SAE paper 2000-01-0792.
- (6) 成瀬由希夫, 依田公一, 公開特許公報, 特開平 10-318810.

- (7) H. Nakamura, N. Kihara, M. Adachi, K. Ishida, SAE paper 2002-01-0612.
 - (8) H. Nakamura, N. Kihara, M. Adachi, S. Nakamura, K. Ishida, JSAE Review 24(2003), 127-133.
 - (9) 松山裕, 実用流量測定, (1995), 181, 財団法人省エネルギーセンター
 - (10) W. Silvis, J. Williamson, N. Kreft, A. Alajbegovic, SAE paper 2003-01-0782
-