

エンジン吸気系の圧力脈動に関する研究

守 屋 勇 輝* ・ 林

寛** ・ 栗 原 伸 夫***

Pulsation Characteristics of Manifold Pressure in Automotive Engine

Yuki MORIYA*, Hiroshi HAYASHI** and Nobuo KURIHARA***

Abstract

The pressure pulsation in manifold of automotive engine has been investigated for intake-air control. The electronically controlled throttle spreads, and the variable intake valve is being attempted to apply more. This study is to find the control indices for the improvement in the intake air efficiency. As a candidate of the control indices, the pressure pulsation in manifold, namely resonant vibration, was extracted by the simulation using GT-POWER * which is the general-purpose model of the engine. In addition, the engine experiments were carried out. The pressure sensors were installed in the manifold and the inlet port of 4-cylinder engine. The pressure pulsation which generated in the inlet port and propagated to the manifold against the air flow, was able to be detected successively.

Keywords : Intake air control, Manifold pressure, Pulsation measurement, Automotive engine

1. はじめに

今日、地球温暖化の防止が社会問題となっており、自動車から排出される二酸化炭素の低減について、様々な観点から取り組まれている。ガソリンエンジンはこれまでも、燃費低減・排気抑制をはかるために、燃料制御系はキャブレタ式→単点噴射式→多点噴射式→筒内噴射式と、アクチュエータを次第に燃焼室へ近づける技術を開発してきた。そして、吸気制御系はスロットルをアクセルペダルと切り離す電子制御式に変えてきた。しかし、このスロットルによ

る絞り損失がエンジン効率低下（10%～15%減）の要因とされ、最近、スロットルの役割を燃焼室の吸気弁に代行させる動きが進んでいる。可変吸気弁の開弁時期（タイミング）、開弁時間（イベント）、上下動量（リフト）、さらには絞り弁開度との適合と操作量が多く、運転条件に応じて吸気量を最大にする制御が課題となっている。

本研究では、エンジン汎用シミュレータを用いて、操作量の多い可変吸気弁制御において吸気脈動の発生が吸気制御の指針となる可能性を探ることとした。まず、シミュレーションで操作量と吸気脈動の関係を明らかにし、次にエンジン実験でマニホールド圧力の計測により抽出可能であることを確認した。

平成 21 年 12 月 14 日受理

* 大学院工学研究科機械・生物化学工学専攻博士前期課程・2年

** 大学院工学研究科機械・生物化学工学専攻博士前期課程・1年

*** システム情報工学科・教授

2. エンジン汎用シミュレータによる 脈動特性の検討

2.1 エンジンモデル構成

エンジン汎用シミュレータの中でも高精度とされる GT-POWER (CD-adapco 社製) を用いた。GT-POWER は物理モデル及びモデリング機能により幅広いエンジンシステムの性能解析に用いることができるシミュレータである。シミュレーションに試用するエンジンモデルは配管、分岐管、弁、シリンダ、エアクリーナーなどの要素を組み合わせたモデルとなる。それぞれのモデルは、連続の式、エネルギー保存式、エンタルピー式、運動量保存式が適用され、ブロック線図でプログラミングできるものである。これを用いて吸気弁作動による吸気量と吸気管圧力の特性を調べることにした。GT-POWER を用いて構築した 4 気筒エンジンのシミュレーションモデルを Fig.1 に示す。

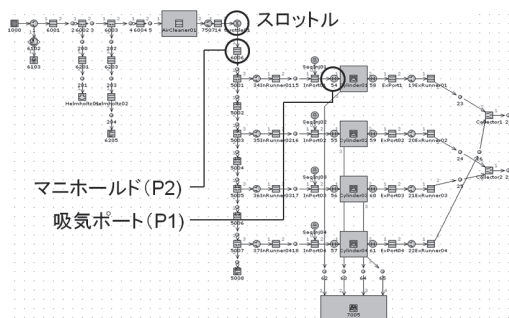


Fig.1 GT-POWER model for engine simulation

2.2 スロットルの操作

GT-POWER を用いて、所定のスロットル開度でクランク角度に応じて吸気弁を作動させ、シリンダへ流入する吸気量の動きを求める。Fig.2 に示すように、吸気行程においてシリンダへ流入した空気は充满後に反動して逆流現象が発生し、空気の一部が逆流して吸気管へ戻っている。

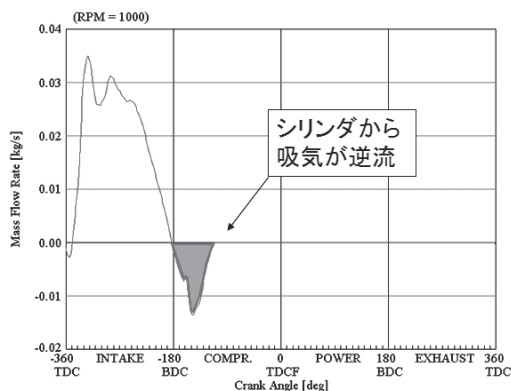


Fig.2 Suction backflow characteristic

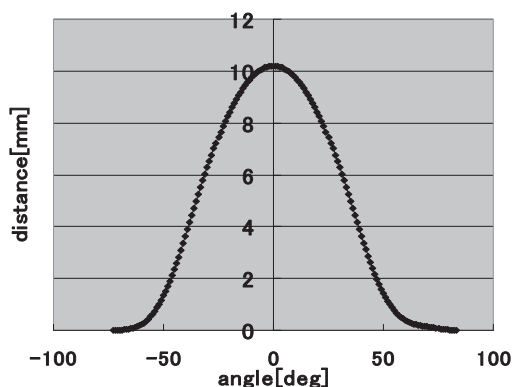


Fig.3 Action of an intake valve (Default)

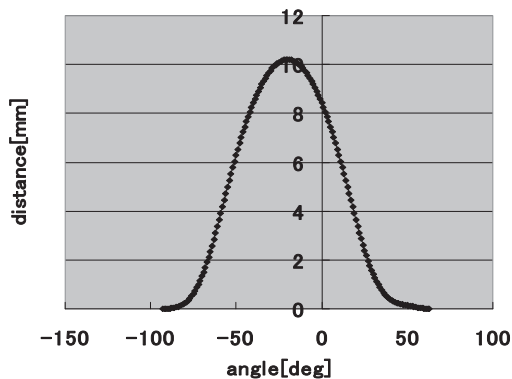


Fig.4 Action of an intake valve (Timing-20%)

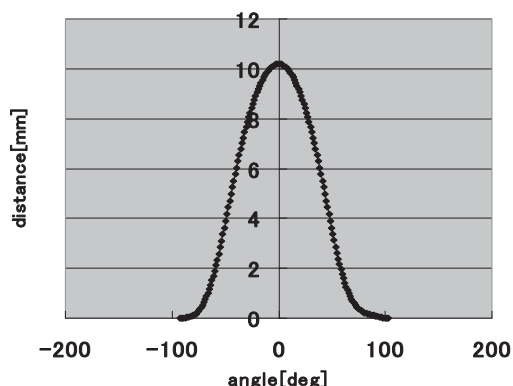


Fig.5 Action of an intake valve (Event+20%)

このときの吸気弁の動作を表したものが Fig.3 となる。操作量に変化を加えていない為、これをデフォルトとする。可変吸気弁の操作量はタイミング量、イベント量、リフト量の3つから成るが、今回の実験ではタイミング量とイベント量のみの調節を行った。

タイミング量は、Fig.4 の様に位相をずらすことで開弁時期をコントロールする。Fig.5 はイベント量を調節することで吸気弁の開閉時期をコントロールする。

シリンダに流入される空気量を（1）式により算出した。

$$\sum_{i=0}^{n-1} F_{g,i} \times T_{s,i} \quad (1)$$

タイミング量、イベント量の操作量の組み合わせをエンジン回転数ごとに -20%～20% までの測定を行い、どの操作量の吸気量が最も多いかを調べたグラフを Fig.6 と Fig.7 に示す。この結果から吸気量はイベントに依存して増えることが確認される。

2.3 吸気圧力特性のシミュレーション

次にスロットルを所定の開度に設定し、クランク角度に応じて吸気弁を作動させ、シリ

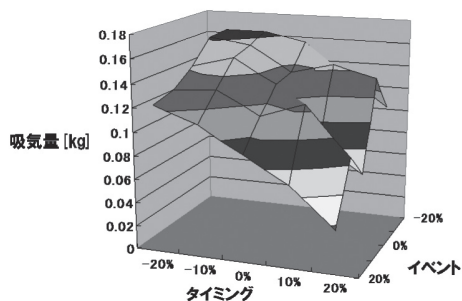


Fig.6 Intake-air flow vs timing and event of variable valve (1000rpm)

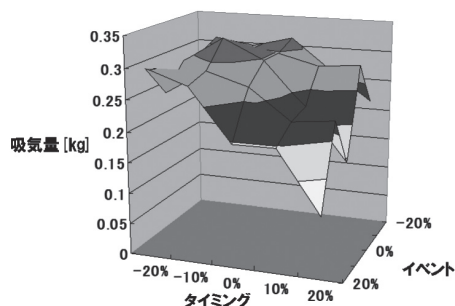


Fig.7 Intake-air flow vs timing and event of variable valve (2000rpm)

ンダへ流入する吸気量、吸気ポート圧力（P1）とマニホールド圧力（P2）の動きを求めた。Fig.2 で示したように、ピストンの下降に伴って空気がシリンダへ吸引されるが、その一部は逆流して吸気管へ戻る。ここで、吸気行程の変動に重畳して脈動が見られる。吸気量は、流入／逆流の行程を経てシリンダへ供給され、このとき発生する脈動の大きさと係わるようである。

Fig.8 では、吸気行程（INTAKE）において吸気脈動、つまり吸気ポートに生じる共鳴振動が吸気ポート圧力（P1）に大きく現れ、マニホールド圧力（P2）にも僅かに観察される。

エンジン回転数ごとに各操作量の当該気筒の

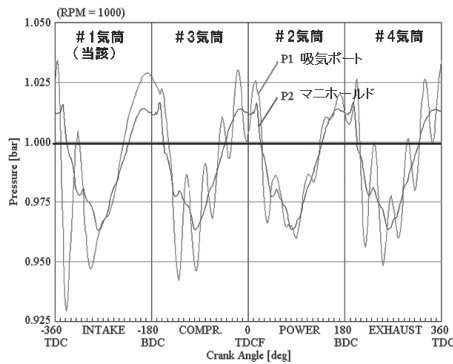


Fig.8 Simulated value of intake pressure

振幅を求め、Fig.9とFig.10に吸気量と脈動振幅の関係を示す。Fig.9とFig.10から脈動振幅[bar]が増大すると吸気量[kg]も比例して増えることがわかる。エンジンで各吸気ポートごとに圧力センサを取り付けることは困難であることから、この吸気ポートの圧力脈動をマニホールド圧力から抽出する方法が必要となる。

Fig.8において、吸気ポート圧力(P1)の変動がさらに上流側のマニホールド圧力(P2)へと伝播する様子が位相差から確認される。

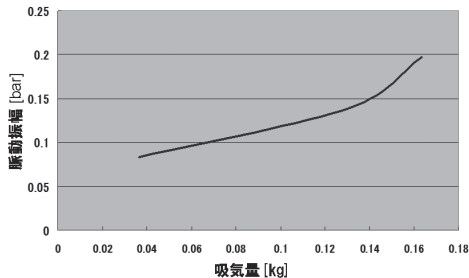


Fig.9 Relation between intake-air flow and pressure pulsation (1000rpm)

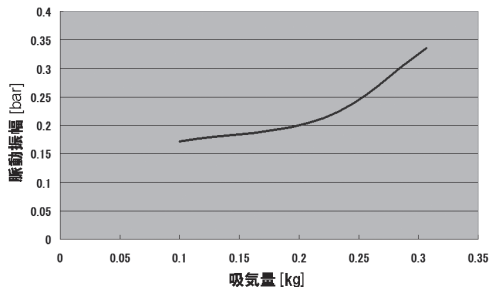


Fig.10 Relation between intake-air flow and pressure pulsation (2000rpm)

ここで、当該吸気ポートではクランク角度-360[deg]から-180[deg]まで位相が進み、それ以降は遅れる。つまり他の3つのポートで発生した脈動はマニホールドを介して伝播するためである。次にエンジン実験において、Fig.8で得られたような吸気脈動を、制御用に利用されるマニホールド部の圧力信号から検出できるかどうかを調べる。

3. エンジン実験による吸気脈動検出

3.1 供試用ガソリンエンジンと実験システム

試用する供試用ガソリンエンジンをFig.11に示す。エンジンの仕様として直列4気筒16バルブ、1500ccとなる。このエンジンのシリンダ直前の吸気ポート(P1)とマニホールド中央部(P2)に穴を開けて低圧計測用圧力センサ(Kistler社製、0-5bar/0-10VDC)を設置

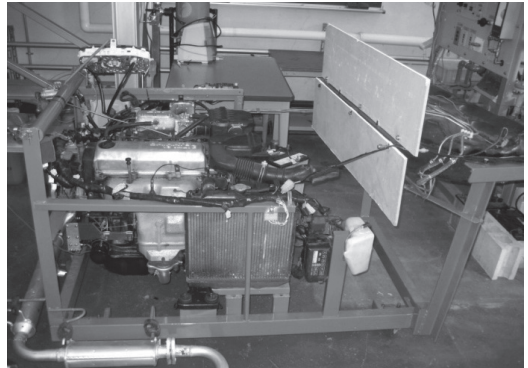


Fig.11 Gasoline engine

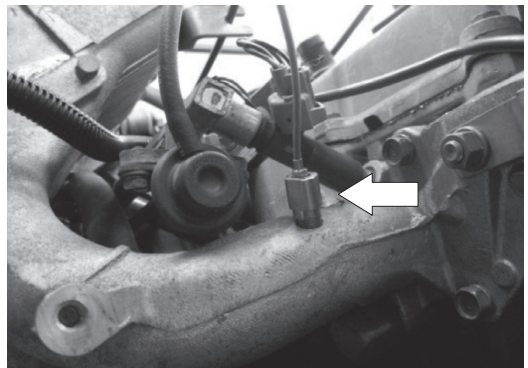


Fig.12 Pressure sensor (P1)

した。その様子を Fig.12 と Fig.13 に示す。また、回転軸の前頭部にクランク角度センサ (小野測器社製、720P/ 1 rev および 1P/ 1 rev) を取り付けた。3000rpm で回転パルス (1P/ 1 rev) を計測できるようにサンプリング周波数を 48kHz に設定した。

ガソリンエンジンを用いた実験システムを Fig.14 に示す。低圧計測用圧力センサの仕様として計測されたデータは電圧 [V] 単位で出力される為、空気量 [bar] 単位へ単位換算を行う。低圧計測用圧力センサの仕様からアンプゲインを $G=5[V]$ に設定し、換算式は (2) 式のようにになる。

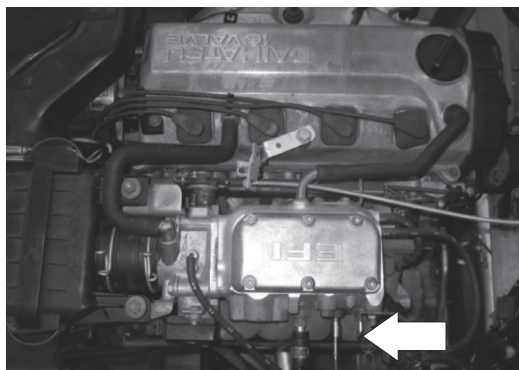


Fig.13 Pressure sensor (P2)

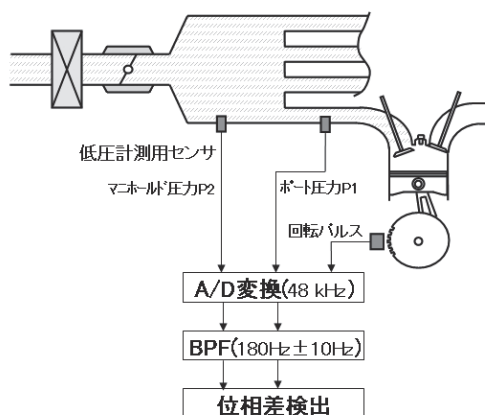


Fig.14 Experimental system of 4-cylinder engine

$$x[\text{bar}] = x^* / G \times 0.5[V] \quad (2)$$

3.2 BPF によるデジタル信号処理

圧力計測結果のみでは脈動成分を確認することは困難である為、バンドパスフィルタ (BDF) を用いて信号処理を行い、吸気脈動成分を強調する。バンドパスフィルタには楕円型、チェビシェフ形、バターワース型の 3 種類があり、この中から本研究に最適なフィルタを確認する為にテスト信号による比較検討を行った。その結果を Fig.15 に示す。この結果から楕円型フィルタでは適切に要素抽出が行えるものであると確認できる。

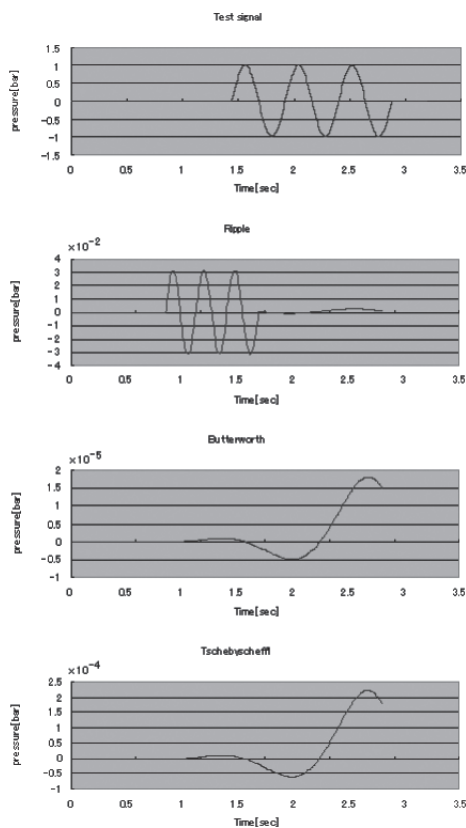


Fig.15 Test signal

3.3 バンドパス型楕円フィルタ

GT-POWER のシミュレーション結果と吸気ポート圧力の計測値を FFT 処理したところ、脈動の周波数は約 180Hz であることが分かった。このことから BPF の仕様を Fig.15 に示す通り、直接型Ⅱ構造、8 次数、通過帯域：170 ～ 190Hz、遮断帯域：160 ～ 200Hz（ ± 10 Hz）、通過帯域内リップル:0.1dB、遮断特性：30dB とした。その構成図を Fig.16 に示す。

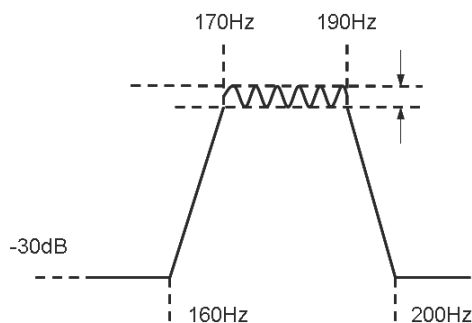


Fig.16 Filter Specification

1000 回転時、1 サイクルを AC モードで吸気ポート圧力 (P1) とマニホールド圧力 (P2) を同時計測した結果を Fig.17 (a) に示す。 $\pm 3 \times 10^{-3}$ bar の波形が得られ、1/2 回転の周期で同様な変化がみられる。当該吸気ポートの吸気行程は 0.038 秒～0.058 秒間であり、その間を基準として吸気脈動の確認を行う。脈動成分を強調する為にバンドパス型楕円フィルタ (BDF) を用いた信号処理を行ったことにより、Fig.17 (b) の結果を得た。振幅は $\pm 10 \times 10^{-5}$ bar と小さいが、1/2 回転よりも高い周波数の信号が現れている。当該吸気ポートの吸気行程において位相差を調べると、吸気ポート圧力 (P1) がマニホールド圧力 (P2) よりも進んでいる。

1000 回転時と同様に 2000 回転時、1 サイクルを AC モードで吸気ポート圧力 (P1) とマニホールド圧力 (P2) を同時計測した結果を Fig.18 (a) に示す。 $\pm 4 \times 10^{-3}$ bar の波形が得られ、僅かではあるが 1/2 回転の周期で同様

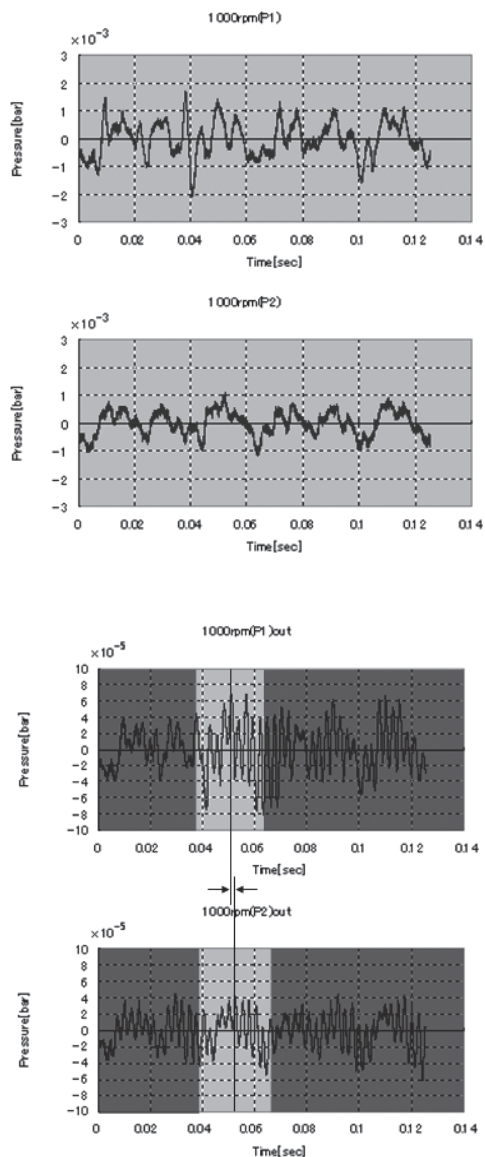


Fig.17 Processed value with BPF of intake pressure (1000rpm)

な変化がみられる。当該吸気ポートの吸気行程は 0.014 秒～0.03 秒間である。バンドパス型楕円フィルタ (BDF) を用いた信号処理の結果を Fig.18 (b) に示す。当該吸気ポートの吸気行程において位相差を調べると、吸気ポート圧力 (P1) がマニホールド圧力 (P2) よりも進

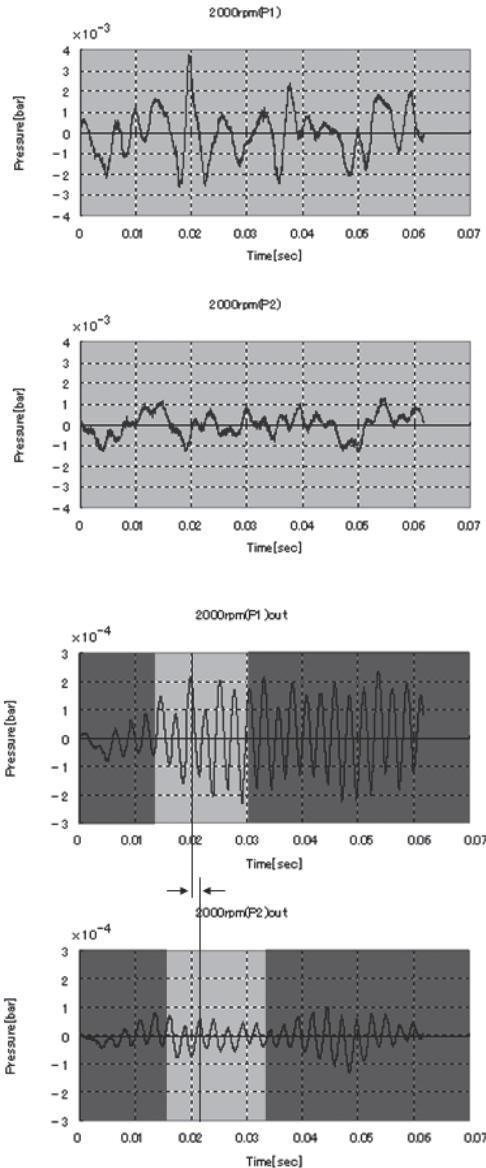


Fig.18 Processed value with BPF of intake pressure (2000rpm)

んでいる。このことから、バンドパス型楕円フィルタを用いたフィルタリング信号処理により吸気圧力から吸気脈動が検出されたものと判断される。

4. まとめ

自動車エンジンの可変吸気弁を制御するうえで、吸気量と吸気脈動との関係をシミュレーションとエンジン試験により下記のように明らかにした。

- (1) 吸気量を左右する逆流特性は、ピストンが急速に下降する際に生じる共鳴振動（吸気脈動）に影響される。
- (2) 脈動振幅が増大するとシリンダへ流入する吸気量も増大する。
- (3) 吸気脈動は吸気ポート圧力の変動として現れ、上流のマニホールド圧力に伝播する。
- (4) マニホールド圧力の計測信号を適切なBPFを用いることにより、吸気脈動成分を安定して検出できる。

以上のことから吸気制御の指標の一つとして活用することを提案する。

参考文献

- [1] Y.Akasaka, et al, Proc. Of the 15th Pacific Automotive Engineering Conference Papen No.APAC15-311 (2009)
- [2] Y. Moriya, N. Kurihara, et al., エンジン吸気系の圧力脈動特性に関する実験解析, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 講演論文集 (5), pp125-126 (2009) .