A201 ピストンリング挙動の可視化解析

斎藤 公孝○ 小浜 時男 馬崎 政俊 鈴木 孝男
(株)日本自動車部品総合研究所 トヨタ自動車(株)

The Visualization Analysis of the Behavior of Piston Ring

Kimitaka Saito, Tokio Kohama, Masatoshi Basaki, Takao Suzuki

ABSTRACT

The author et al. made glass cylinder engine in which closed gap of piston ring could be visualized based on the idea that follow-up characteristic of piston ring to the sliding surface of bore in internal combustion engine, could be evaluated from minute change of closed gap of piston ring. This newly-devised visualized engine was an in-line 4-cylinder engine, capable of running up to 6000 rpm, in which we could observe closed gap of piston ring minutely during operation.

As the result of the evaluation of the follow-up characteristic of piston ring with this equipment, it was found that going-up passage of oil was widened and so, oil consumption increased, because abnormal behavior, that is, the separation of piston ring from deformed bore sliding surface at the time of going-down of piston, happened in high speed area.

Key words : Visualization, Piston ring, Ring gap, Oil consumption, Oil seal, Deformed bore

1. まえがき

エンジン全体の摩擦損失に対しピストン系(ピストンとリング)の摩擦損失は30~40%占め⁽¹⁾ている為、ピストン系摩擦の40%低減で、中速域燃費の7%程度改善⁽²⁾が見込める。ピストン系摩擦損失においては特にピストンリングの摩擦損失が大半を占めることからリングの張力低減が有効であるが⁽³⁾、リング張力を低減した場合にはオイル消費増大の問題が発生する。

そこで本研究ではリング低張力化に伴うオイルコントロール機能低下について着目し、低張力化に伴うリングのシリンダボア追従性を可視化を中心に解析した。本論文ではエンジン高速運転中のリング挙動の可視化技術を中心にリングのボア離れ現象の解析結果を報告する。

2. リング挙動の可視化

2.1 ボア離れとリング合口隙間

本研究では、図1に示す様にピストンリングがボアから離れるとリングの合口隙間がボアに密着している場合より狭くなる事に着目し、リング合口隙間の可視化からリングのボア離れ現象を解析した。可視化では同時に油膜状態の把握も可能となるため、リングのボア離れとオイル挙動との関係も明らかにできる。

2.2 リング合口隙間観察の課題

リング合口を観察する為には、エンジン本体に観察窓を設ける必要がある。観察窓は局所的に設けることもできるが、ボア面の段差の問題、ピストン表面オイルの全体観察、及び変形ボアでの観察を考慮し、シリンダ全体が可視化できるガラスシリンダ方式とした。

本研究の最大の課題は6000rpmまで高速運転可能なガラスシリンダエンジンの製作であった。従来の研究で筒内可視化が実施された最高回転数は3000rpm程度であるが、その最大の理由は研究用単気筒エンジンで可視化している為、運転回転数が限定されるためであった。そこで今回の筒内可視化は量産エンジンをベースとした4気筒

式ガラスシリンダエンジンを製作し, 高速回転域による可視化運転を実現した。

2.3 多気筒ガラスシリンダエンジン

従来製作した4気筒ガラスシリンダエンジンは(5,6), 可視化する気筒をボアアップ加工してガラスシリンダを挿入したが, 隣接気筒が廃止され4気筒エンジンが3気筒となり運転可能回転数4000rpmであった。そこで今回の4気筒ガラスシリンダエンジンは排気量の大きい2400CC-L4エンジンと排気量の小さい1500CC-L4エンジンのピストンを組合わせることにより, ガラスシリンダの挿入スペースを確保し, 廃止気筒が無い構造とした。

図2は今回製作した4気筒ガラスシリンダエンジンの構造概略図を示している。可視化エンジン本体は2400CC-L4をベースとし, 可視化する1番気筒にはガラスシリンダが, 2~4番気筒にはS C M金属ライナーが挿入されている。ガラスシリンダは石英製で肉厚15mmとした。ガラスシリンダにはエンジン本体から振動や衝撃が直接伝わらない様, 上下サイドともガスケットにより保持しガラスと金属の直接接触を避けた。ガラスシリンダの内径加工寸法は, 運転中の温度上昇によるアルミ(ピストン)と石英(シリンダ)の熱膨張差を考慮し, 暖機後で実機と同様のクリアランスとなる設計をした。ガラスシリンダの内面粗さは, オイルの濡れ性を実機と整合させるため, 内面にホーニング加工を施し表面粗さを実機と同じにした。ガラスシリンダ内面はホーニング加工で透明度は低下するが, 運転によりオイルが付着することにより透明度が回復する。クランクシャフトは2400CC-L4の量産品を, ピストン, ピストンリングは1500CC-L4の量産品を使用した。両者を結合するコネクティングロッドはハイブリット試作品を用いた。冷却系はシリンダブロック, シリンダヘッドのウォータージャケット内に加圧エアーを通し水冷から空冷に変更した。ガラスシリンダについても外周のエアー冷却を行った。潤滑系については全く変更することなく製作した。可視化エンジンのシリンダブロック外観を図3に示す。

Fig.3 General view of cylinder block

ガラスシリンダはボア変形の無いストレートタイプと変形のある樽形タイプを準備した。図4は, 実機ブロックと変形ガラスシリンダのボア内径をブロック上面からの距離で計測した結果である。実機ブロック単体ではブロック上面より20mm前後の位置で最も膨らんだ樽型のボア変形が生じている。ヘッドと組んだ場合や試験後では更にボア変形が大きくなり, ボア上端が広がる傾向が強くなる。変形ガラスシリンダは実機変形を模擬する変形を狙ったが, 製作上の都合で完成したのは上端面下方

Fig.4 Cylinder bore deformation

35mmの位置で76 μ mの膨らみを持った樽形タイプであった。

ピストンリング仕様は図5に示す様に, Topリングはバレルフェイス(B寸1.2mm, T寸2.8mm), 2ndリングはテーパフェイス(B寸1.2mm, T寸3.1mm), Oilリングは3ピースタイプを使用した。リング張力はTopリング8.1N, 2ndリング6.4Nの量産張力をベース張力とし, 低張力品(Topリング7.0N, 2ndリング5.4N)高張力品(Topリング11.1N, 2ndリング8.1N)を準備した。各ピストンリングには合口観察中に回転しない様, ストッパーピンによる回り止めを設け各リングの合口が180°対向するよう組み付けた。

Fig.5 Specification of test piston and piston-ring

本可視化エンジンはモータリングで6000rpmまでシリンダ破損の無い正常運転を確認したが, ファイアリングでは3000rpmで3分程度が限界であった。本研究での可視化は6000rpmまで要求された為, モータリングで実施した。

2.4 リング合口のマイクロ観察手法

ピストンリング合口のマイクロ観察装置を図6に示す。超小型CCDカメラがガラスシリンダ前面に配置される。

超小型カメラは, 1/3インチカラー単板CCDタイプで, 有効画素数41万素である。カメラにはリング合口の微小変化を計測できる様に, 特製の高倍率レンズを装着した。照明にはストロボ光源を用いたが, ストロボ光は光ファイバにより導き, カメラを囲むリングライトからの照明とした。ストロボによるリング合口の撮影では, ガラスシリンダ表面やピストン表面でのハレーションがあり, ライティング技術には多くの工夫をこらした。ストロボ光源はキセノンタイプで, 1フラッシュ当たりのエネルギー8J, 閃光時間12~25 μ secを使用した。

高回転運転中にクランク角位置に応じたリング合口をカメラで追跡観察する必要がある, 安全面から超小型カメ

Fig.6 Apparatus to observe piston ring gap

ラとストロボはステップモータで上下するステージ上に装着し、パソコンにより位置を遠隔制御した。

撮影装置のブロック図を図7に示す。ストロボはクランク角センサで検出した任意クランク角に同期発光させ、目的とするクランク角のリング合口映像を得た。超小型TVカメラの映像信号は、ストロボ発光と同期してデジタルのフレームメモリーにホールドし、ストロボ発光による映像のちらつきを無くした。ストロボ同期ホールドされた画像は市販のVTRに記録した。リング合口隙間変化及び油膜厚さは、再生映像を市販の画像処理ソフトで処理した。

ピストン表面オイルを解析する場合は、蛍光紫外線法で油膜観察を実施した。オイルに蛍光剤を混入し紫外線を照射して油膜の微小変化を解析した。オイルに混入する蛍光剤はキサンテン系染料(xanthene dye)を用いた。紫外線のみをピストン表面に照射するため、ストロボライトの前面には紫外線通過フィルタ(380nmローパス)を配置した。

カメラの前面には紫外線カットフィルタ(480nmハイパス)を配置し、ガラスシリンダ表面の紫外線ハレーションを取り除いた。蛍光剤入りのオイルは、紫外線で励起され波長540nmを中心とする黄緑色の可視光を発光するため、薄いピストン表面オイルの観察が可能である。ピストン表面オイルを可視化撮影する場合には、カメラレンズはピストン全体が撮影できる広角タイプに交換した。

Fig.7 Block diagram of the photographic system

3. 可視化結果

3.1 リング合口隙間の変化

エンジン低速回転(600rpm)におけるTopリング合口隙間の挙動を図8に示す。合口隙間の計測は各クランク角(1°CA毎)

Fig.8 Top ring gap fluctuation at 600rpm

に同期した可視化映像から読みとった。図中黒丸はピストン上昇行程(排気行程)、白丸はピストン下降行程(吸気行程)時の合口隙間量を示している。ストレートシリンダでは、各クランク角における合口隙間の変化は無く一定であるが、樽形シリンダではTopリングが変形部分を通過する部分で合口隙間が広がる挙動が確認できる。ピストン上昇時は62BTDC、下降時は62ATDCにTopリングがボア最大変位部を通過し、リング合口隙間の最大変化量は470μmである。樽形ガラスシリンダの樽部最大変化量は76μm(Δr)であるから、リングがボアに密着追従したと仮定すると、リング合口変化量は $2 \times \pi \times \Delta r$ から477μmと算出されて計測値にほぼ一致することから、リングは変形ボア壁面に密着追従していると判断できる。2ndリング、Oilリングについても同様の合口隙間変化を計測したが、Topリング同様ボア変形に密着追従して合口隙間が変化する結果を得た。この結果から、低速回転においてはリングがボアの変形に対して追従撓動してオイルコントロールできていることが確認できた。

次に6000rpmでのリング挙動の調査結果を図9に示す。図中灰線はピストン上昇行程(排気行程)、黒線はピストン下降行程(吸気行程)を示し、Topリング・2ndリングについて低張力、ベース張力、高張力品を調査した。Topリングについて見ると最大変位部通過クランク角は±62°CAで600rpmと同結果であるが、クランク角±80°CAの変形部からストレート部に移る位置(図中丸範囲内)で、リング下降時の黒線にアンダ

Fig.9 Ring gap fluctuation at high revolution(6000rpm)

シュートが発生し上昇時の灰線とにズレが生じている。このアンダシュート量は低張力リングでは大きくなり、高張力リングでは小さくなっている。

2ndリングの場合は最大変化部通過クランク角は $\pm 56^\circ \text{CA}$ でTopリングと 6°CA の差がある。これはTopリングと2ndリング位置関係から最大変化部を通過するクランク角が異なる為である。2ndリングもクランク角 $\pm 74^\circ \text{CA}$ で変形部からストレート部に移るリング下降時位置で、アンダシュートが発生し上昇時とズレが確認出来る。このアンダシュート量はTopリング同様低張力リングほど大きくなり、高張力リングほど小さくなっている。2ndリングはTopリングより張力が低い為、アンダシュート量も大きく発生する傾向にある。

Fig.10 Ring behavior at high revolution

このようなリング下降時のアンダシュート発生と、上昇時とのズレは図10に示すリング挙動により生じたと考えられる。ピストン上昇時はボア変形部に密着追従して上昇しているが、ピストン下降時には変形部からストレート部分に移行する位置で、リングがボア変形カーブに追従できずに離れてしまい、リング半径が密着半径より縮まりアンダシュートが発生した結果と考えられる。この時のリングのボア離れ量 L は、合口隙間のアンダシュート量 ΔGw から $L = \Delta Gw / 2\pi$ で求める事ができる。

次に2ndリングベース張力のボア離れ量 L について、回転数の影響を調査した結果を図11に示す。5250rpmまではリング離れ発生が無くリングは変形ボアに追従していることが解る。

しかし、それ以上の回転でボア離れが発生している。

Fig.11 2nd ring separation distance from cylinder bore

3.2 ピストン表面オイル挙動

ピストンリングのボア離れが発生した時のピストン表面オイルの状態を解析する為、樽形ガラスシリンダで高回転域の油膜を蛍光紫外線法で観察した結果を図12に示す。

ピストンリングのボア離れが発生する6000rpmでピストン表面オイルが急激に増加しているのが確認できる。オイルはトップ・セカンドランドにも侵入していることから、燃焼室へのオイル上がりが増加している。

Fig.12 Oil film thickness on piston surface

この結果から、高回転オイル消費増大の要因の一つとして、吸気行程中のピストン下降時に、リングがボア変形に追従できなくなりボアから離れる現象が発生し、オイルのかき落としが不十分となっていることが明らかにできた。

本論文では、吸気行程中のピストン下降時におけるボア離れを中心に解析結果を報告してきたが、爆発行程(WOTモータリング)のピストン下降時の解析では、圧縮筒内圧がリング背面に加わる為ボア離れ量が吸気行程より40%程度減少する傾向にあった。ファイアリング状態では爆発で筒内圧が高い為ボア離れ量は更に小さくなっていることから、ボア離れによるオイル消費増大は吸気行程中のピストン下降時のリング挙動が支配的と考えられる。

4. まとめ

リングのボア摺動面への追従性が、リング合口隙間の微小変化から評価できるという着想から、リング合口が可視化可能なガラスシリンダエンジンを製作し、運転中のリング合口隙間のマイクロ変化が可視化解析できる手法を開発しリング挙動を解析した。可視化エンジンは量産エンジンをベースとした列型4気筒とし、6000rpmまで可視化運転可能である。

本装置でリングのシリンダボア追従性を評価した結果、吸気行程中のピストン下降時に、ピストンリングが変形ボア摺動面から離れる異常挙動が高速回転域で発生し、オイル上がりが増加しオイル消費増大となることが判った。このピストンリングのボア離れ量及び発生回転数は、リング張力の影響を大きく受けていた。

参考文献

- (1) 斉, ほか3名: 自動車技術会 学術講演会前刷集, 911055(1991) P223-226
- (2) 古浜, 潤滑, Vol.1.32, NO.9, G627-632, 1987
- (3) 井上, ほか3名: 自動車技術会 学術講演会前刷集, 9436215(1994) P85-88
- (4) 後藤, ほか3名: 自動車技術会 学術講演会前刷集, 891010(1989) P47-50
- (5) K.Saito et al., SAE Paper 950044
- (6) 斎藤他, 可視化情報, Vol.15-Suppl. No.1, 1995.7