

286-20135799 ピストンのサードランド圧とオイル消費に関する研究*

大野 陽平¹⁾ 菊原 浩司²⁾ 伊東 明美³⁾ 乾 正継⁴⁾ 赤松 洋孝⁵⁾

A Study on the Effect of Third Land Pressure on Lubricating Oil Consumption of a Gasoline Engine.

Yohei Ohno Koji Kikuhashi Akemi Ito Masatsugu Inui Hirotaka Akamatsu

Reduction of engine oil consumption is required for preventing poisoning an after treatment device, an abnormal combustion and so on. The effect of the third land volume of a piston on engine oil consumption was investigated. Gas pressure at the second and the third land lands were measured and calculated. Oil consumption was also measured. Findings showed that the third land volume affected oil consumption. An increase in the third land volume was effective for decreasing gas pressure at the third land and improving oil consumption.

KEY WORDS: Internal combustion engine, spark ignition engine, Lubrication / Tribology, Lubricating oil combustion(LOC), Land pressure

1. 序論

エンジンのオイル消費増大は排気性状の悪化、触媒被毒、使用者の経済的負担の増大等をもたらす。さらに近年、高過給を行う直噴ガソリンエンジンでは、オイル消費に起因する異常燃焼の発生が報告されている⁽¹⁾。一方で、ガソリンエンジンには二酸化炭素排出量削減のため燃費低減が強く求められている。そのためピストンリングの低張力化やピストンスカート面積縮小等の機械損失低減策が採られるが、これらはしばしばオイル消費の増加を招くことが知られている⁽²⁾⁽³⁾。そのためオイル消費量低減は現在、重要な課題となっている。

オイル消費の主たる要因は、ピストン周辺の潤滑に使われたオイルが燃焼室に入り込むオイル上りである。オイル上りにはピストンリングの摺動面、合口及び側背面の三つの経路が存在する。うち合口及び側背面経由のオイル上りは、ピストンのセカンドランド圧力の影響を強く受けることが過去の研究により示されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これはセカンドランド圧力が筒内圧よりも高くなる場合に、トップリング合口からガスと共にオイルが逆流したり、トップリングがリング溝下面から

浮き上ることでサイドシールが失われることによるものである。そのためピストンの設計では、セカンドランド圧力の上昇を抑制するために、セカンドランド体積は大きく、セカンドリング合口隙間は広めにするのが一般的である。

ピストンのセカンドランド形状及び各ピストンリングの合口隙間の設計にあたっては、その評価のためにしばしばセカンドランド圧力の計算が行われる。セカンドランド圧力の計算モデルは古浜らの提案するもの⁽⁷⁾が良く知られている。この計算モデルでは、サードランド圧力はクランクケース内圧と等しいと仮定されている。然るに近年では、エンジン軽量化の観点からコンプレッションハイドが減少する傾向にある。一方、セカンドランド体積は維持されるため、サードランド体積は減少する傾向にある。

ここで、サードランド部でもセカンドランド部と同様のメカニズムにより圧力が上昇すると仮定すると、サードランド体積縮小は当該部圧力を増加させ、サードランドからセカンドランドへのオイル上りを増加させる可能性がある。すなわちセカンドランドへの供給油量を増加させることでオイル上りに影響を及ぼしている可能性がある。

そこで本研究では、サードランド体積がオイル上りに及ぼす影響について、調査を行った。光ファイバ超小型圧力センサを用いたサードランド圧力の測定により、当該部圧力はクランクケース内圧と必ずしも等しくないこと、サードランド体積を変更することにより、オイル消費量が変化することなどを確認したので報告する。

*2013年10月25日自動車技術会秋季学術講演会において発表。

1)・3)東京都市大学

(158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

2)早稲田大学

(367-0035 埼玉県本庄市西富田1011)

4)・5)日産自動車株式会社

(230-0053 神奈川県横浜市鶴見区大黒町6番1号)

2. 実験方法

2.1. ピストンランド部圧力測定手法

2.1.1. ピストンランド部圧力測定手法の検討

本研究ではランド部圧力計算結果の妥当性を確認するため、ランド部圧力測定を行った。従来のランド部圧力測定手法ではランド部に圧力導入孔を設け、孔の深部にダイアフラム式あるいはピエゾ式圧力センサを設置している。図1(a)及び(b)に従来のランド圧測定法⁽⁸⁾⁽⁹⁾を示す。しかし従来法では小型のピストンに複数個の圧力センサを設置することが困難であった。また、ランド部に空孔を設けることでランド部体積が変化してしまうこと、空孔内で気柱振動が発生し測定結果に影響を及ぼすことが知られている。さらに従来使用されていたセンサでは温度ドリフトの影響が無視できないため、その補正のための圧力センサをシリンダに取り付ける必要があった。本研究ではセカンドランド部及びサードランド部の2点の圧力を同時測定する必要があるため、従来の測定で使用されていた圧力センサよりも小型の圧力センサが必要だった。

そこで本研究では従来のピエゾ式圧力センサよりも小型・軽量かつ搭載性に優れた光ファイバ超小型圧力センサを採用し、実運転中のランド部圧力の2点同時測定を行った。

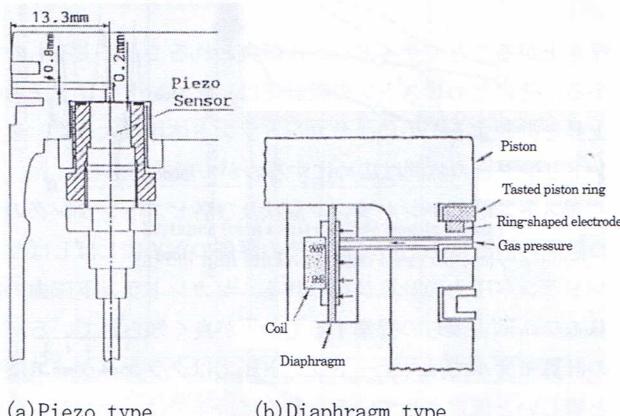


Fig. 1 Typical measurement method for piston land pressure⁽⁸⁾⁽⁹⁾

2.1.2. 光ファイバ超小型圧力センサ

本研究で採用された光ファイバ超小型圧力センサの外観を図1に諸元を表1に示す。



URL:<http://www.directindustry.com/prod/fiso/technologies/fiber-optic/high-pressure-sensors-16668-501983.htm>

Fig. 1 Pressure sensor using optical fiber

Table 1 Specification of pressure sensor

Pressure range	0 - 1000 psi (0 - 1 MPa)
Resolution	< 0.2% of full scale
Accuracy	±0.5% of full scale
Operating temperature	-20 to 150 degree C

光ファイバ超小型圧力センサの測定原理を図2に示す。センサ受圧部にダイアフラムが設置してあり、その裏側に半透過ミラーが設置してある。光ファイバを通過してきた白色レーザ光（以下、白色光とする。）が半透過ミラーに達すると白色光の一部は反射し、残りは透過してダイアフラム部に到達する。透過した白色光はダイアフラム部で反射し、半透過ミラーで反射した白色光と共に光ファイバに戻る仕組みになっている。光ファイバに戻る2つの白色光には光路差が生じ、干渉縞を発生させる。受圧部に圧力が発生しダイアフラムが変形すると、ダイアフラム部で反射する白色光の光路長が変化し、半透過ミラーを透過した白色光との光路差も変化し、干渉縞が変化する。当該センサはこの干渉縞の変化を測定し、受圧部の圧力の変化を測定する。

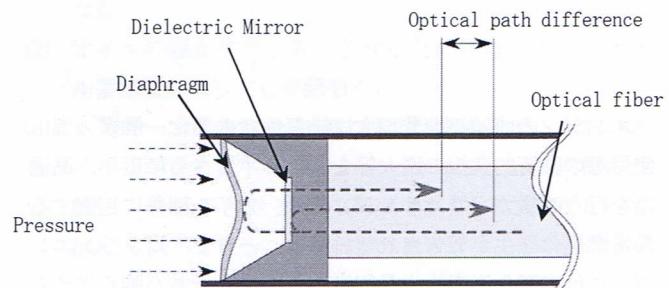


Fig. 2 Principle of pressure measurement

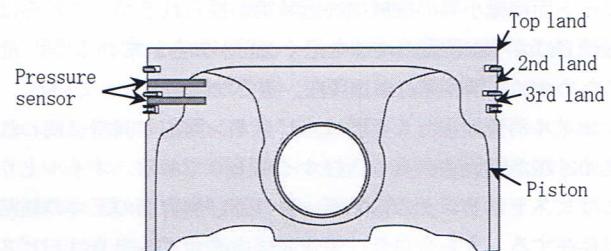


Fig. 3 Schematics of pressure sensor embedded in the piston

当該センサは光学的に測定を行うので、電気的ノイズの影響を受けない上に、温度変化による出力のドリフトも極めて小さい。そして受圧部がΦ0.8mmと非常に小型であり、軽量であるため、搭載性が高い上にセンサ重量による影響も小さく、局所的な圧力測定に適している。

本研究では当該センサを図3の様にピストンに搭載し、セカンドランド部及びサードランド部圧力の2点同時測定を行った。

2.1.3. 光ファイバ用リンク装置

当該センサは光学的測定手法であるため、光ファイバ線の使用が必要不可欠である。ピストンからの配線の取り出しには、リンク装置が広く用いられている。しかし従来のリンク装置では光ファイバ線の最小曲げ半径を確保出来なかった。そこで本研究では配線の曲げ半径が光ファイバ線の最小曲げ半径を下回らないように配線できるような光ファイバ線用リンク装置の開発を行った。

図4に光ファイバ線用リンク装置の構造概略図を示す。リンク装置の関節部に円盤状のガイドを設置し、光ファイバを図4の太い破線の様に這わせることで、光ファイバ線の最小曲げ半径の問題を克服した。

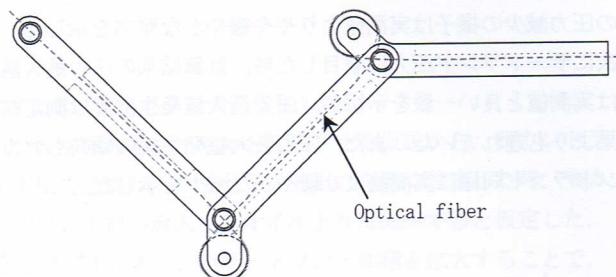


Fig. 4 Linkage device for pressure sensor using optical fiber

2.2. ランド圧力計算手法

ランド圧力を計算するにあたって、古浜のピストンリングを漏れるガス流れによる計算手法を踏襲した。図5に今回の計算手法に用いたモデルを示す。

計算モデルは第1室(燃焼室)、第2室(セカンドランド)および第3室(サードランド)を壁(ピストンリング)によって仕切り、各壁にはピストンリング合口の隙間等から求めた漏れ面積が存在すると仮定した。古浜の計算ではサードランドは考慮されていないが、本研究では図5に示すようにサードランドも計算モデルに取り入れた。

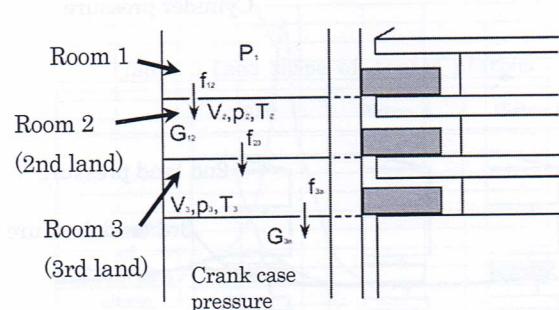


Fig. 5 Calculation model for pressure at the 2nd and 3rd land

ただし、

f_{12} : 燃焼室 - セカンドランド間の漏れ面積

f_{23} : セカンドランド - サードランド間の漏れ面積

f_{3a} : サードランド - クランクケース間の漏れ面積

G_{12} : f_{12} を通るガス流量

G_{23} : f_{23} を通るガス流量

G_{3a} : f_{3a} を通るガス流量

p_1 : 筒内圧

p_2 : セカンドランド圧

p_3 : サードランド圧

T_1 : トップランド壁面平均温度

T_2 : セカンドランド内ガス温度

T_3 : サードランド内ガス温度

V_2 : セカンドランド容積

V_3 : サードランド容積

とする。

以下に第一室から第二室にガスが流れる場合を例に、計算に用いた式を示す。第二室内のガス量 G_{12} の状態式は(1)式となる。

$$p_2 V_2 = RT_2 G_2 \quad \dots \quad (1)$$

ガス量および圧力が変わっても温度、第二室容積は不変であるとすれば、第2室内の圧力変異量 dp_2 は式(2)となる。

$$dp_2 = \frac{RT_2 dG_2}{V_2} \quad \dots \quad (2)$$

dt 秒後のガス量の増加 dG_{12} は式(3)で表せる。

$$dG_{12} = (G_{12} - G_{23})dt \quad \dots \quad (3)$$

隙間を通る流量 G_{12} は式(4)で表せる。

$$G_{12} = \frac{\alpha f_{12} \varphi_{12} p_1}{\sqrt{RT_1}} \quad \dots \quad (4)$$

$$\varphi_{12} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{(k+1)}{k}} \right)} \quad \dots \quad (5)$$

R : ガス定数

α : 流量計数

ϕ_{12} : 流量特性の式

R : $29.27 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{deg}$

ただし、実験値として以下を用いた。

α : 0.86

ϕ_{12} : $2.145 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ 一定 ($p_2 / p_1 < 0.528$)

なお、今回の計算ではリング挙動は考慮されていない。

2.3. Sトレース法によるオイル消費量測定手法

今回の測定は全て供試機関に単気筒ガソリンエンジンを使用したため、連続重量法や抜き取り法などのオイル消費量測定手法は不適切だと判断し、トレーサー法で実施した。トレーサー法の中でも比較的事前準備が簡単かつ安全なSトレ

ス法を選択した。

Sトレース法とは排気中の硫黄分の濃度を排気分析器で測定し、その硫黄分をオイル消費量として測定する測定手法である。Sトレース法では硫黄分を含まない特殊燃料を使用するため、排気中の硫黄分は全てオイル由来であると仮定して測定が行われる。

2.4. 供試機関

供試機関には当研究室で開発した試験用単気筒ガソリンエンジンを採用した。表2には供試機関の諸元、図6には供試機関の外観を示す。

Table 2 Specification of tested engine

Engine Type	Single-cylinder, Four-stroke spark-ignited gasoline engine
Displacement (liter)	0.673
Bore × Stroke (mm)	86 × 86
Compression Ratio	10
Maximum BMEP (MPa)	0.9
Maximum Engine Speed (rpm)	2500 rpm
Number of piston rings	3
Balance shaft	Primary and secondary
Piston cooling jet	Oil jet

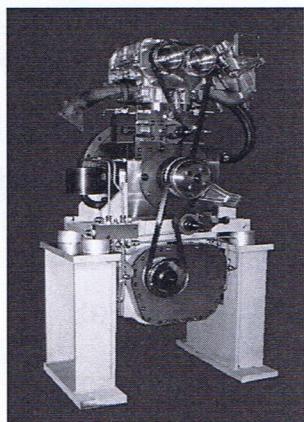


Fig. 6 Tested Engine

3. 実験結果

3.1. ランド圧力測定結果と計算結果の比較

3.1.1. ピストンランド圧力代表測定例

図7に機関回転数 1500 rpm、全負荷時の STD ピストンのランド部圧力測定結果を示す。縦軸に圧力、横軸にクランク角度を示し、筒内圧、セカンドランド圧力及びサードランド圧力を重ねて示す。

セカンドランド圧力最大値発生位置に注目すると、筒内圧の最大値よりも遅れて発生しているのが解る。また、サードランド圧力最大値に注目した時、これもセカンドランド圧力よりも遅れて発生している。セカンドランド圧力は燃焼ガスがピストンリングを通過し、当該部に流入することで発生する。従ってランド圧力最大値は筒内圧最大値よりも位相が遅れることは妥当であると考えられる。また、サードランド圧

力は同じ理由でセカンドランド圧力よりも位相が遅れたと考察した。燃焼ガスのランドへの流入流量はリング前後の圧力差に依存するため、リングを通過する度に減少していくと推測でき、筒内圧よりもセカンドランド圧力は小さくなり、セカンドランド圧力よりもサードランド圧力が小さくなっていることは妥当であると考えられる。

3.1.2 ランド圧力測定結果と計算結果の比較

図8に図7と同じ運転条件のランド圧力計算結果を示す。図7と同様に縦軸に圧力、横軸にクランク角度を示し、筒内圧、セカンドランド圧力及びサードランド圧力を重ねて示す。

セカンドランド圧力に着目した時、圧力最大値及び圧力最大値発生位置は実測値と概ね一致しているが、最大値発生後の圧力減少の様子は実測値よりやや緩やかな傾向を示した。次にサードランド圧力に着目した時、計算結果の圧力最大値は実測値と良い一致を示すが、圧力最大値発生位置は測定結果よりも遅れていた。また、圧力最大値発生後の傾向もセカンドランド同様に実測値より緩やかな減少を示した。

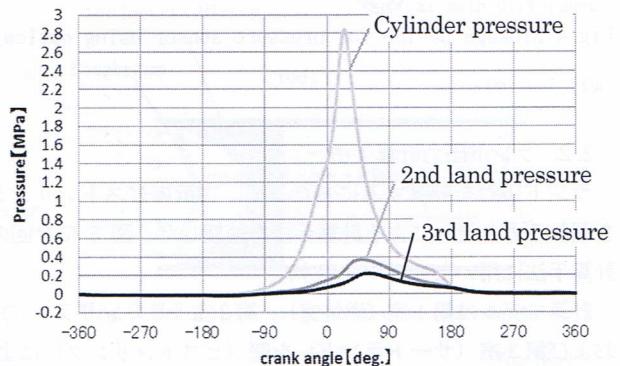


Fig. 7 Typical measurement result of cylinder, 2nd land and 3rd land pressure

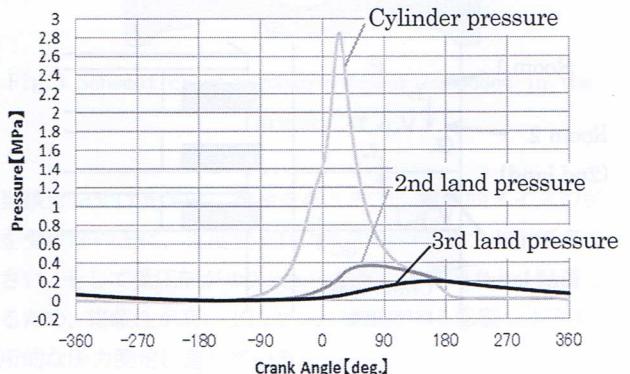


Fig. 8 Typical calculated result of cylinder, 2nd land and 3rd land pressure
(Measured cylinder pressure was used as input date)

今回、ランド圧力の計算を行うにあたり、サードランド体積は考慮したもののはオイルリング部については、2本のサイドレール及びオイルリング溝体積等のモデル化には課題を残している。この点については今後、実測値との比較により異なる予測精度の向上を図りたい。しかしランド圧力の最大値を把握するには十分な精度であると思われたため、以降、この計算を用いてサードランド部形状の検討を行った。

3.2. 計算によるサードランド部形状の検討

3.2.1. ランド圧力の変更方法の検討

ここでは前述の計算手法を用いてサードランド部形状を変化させた時のランド圧力最大値を計算し、ランド圧力がオイル上りに与える影響を確認するに最適なサードランド形状を検討した。

3.2.2. サードランド部形状の検討

ランド圧力差がオイルを流動させる仮説から、セカンドランド圧力に対し、サードランド圧力を低く設定した時、セカンドランド部へ流入するオイル上りは減少すると仮定した。そこでSTDピストンのサードランド体積を拡大することで、サードランド圧力の低減を図った。そしてサードランド体積拡大方法を2種類用意することで、サードランド部の設計がオイル消費に及ぼす影響の確認を行った。考案したピストンの詳細は表3に示す。

ピストンAはサードランド部外形を切削することでサードランド体積をSTDピストンより約2.3倍拡大した。結果、セカンドリング合口部通路面積が1.3倍拡大した。ピストンBはサードランド部に溝を設けることで、セカンドリング合口通路面積を変化させずにサードランド体積をSTDピストンよりも約2.3倍拡大した。

図8に全負荷時のSTDピストン、ピストンA及びBのセカンドランド圧力最大値計算結果を示す。縦軸に圧力最大値、横軸に回転数を示す。計算結果を比較したところ、STDピストンとピストンBの結果はほぼ等しい結果を示しているが、ピ

Table 3 Land shape of tested pistons

	STD	Piston A	Piston B
Schematic of piston land shape			
2nd ring gap area ratio	1	1.3	1
Oil ring gap area ratio	1	1	1
3rd land volume ratio	1	2.3	2.3

ストンAの結果は他の2種よりも低い結果が示された。これはピストンAのセカンドリング合口面積が拡大し、セカンドランド部からサードランド部へ抜けるガス流量が増加傾向になることを示していると考察した。

図9に図8と同条件で行ったサードランド圧力の計算結果を示す。図8と同様に縦軸に圧力最大値、横軸に回転数を示す。サードランド容積を拡大したピストンA及びBはSTDピストンよりも低下した結果を示した。しかしピストンA及びBを比較した時、ピストンBの方が低い結果を示した。これはセカンドリング合口面積の広いピストンAはBよりもサードランド部へ流入するガス流量が増加傾向にあることを示していると考えられる。

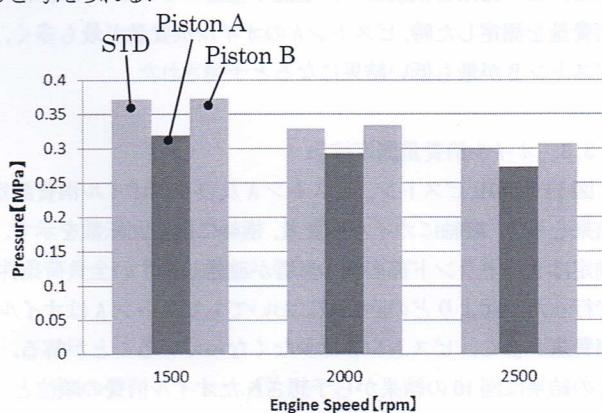


Fig. 8 Calculated maximum pressure of 2nd land

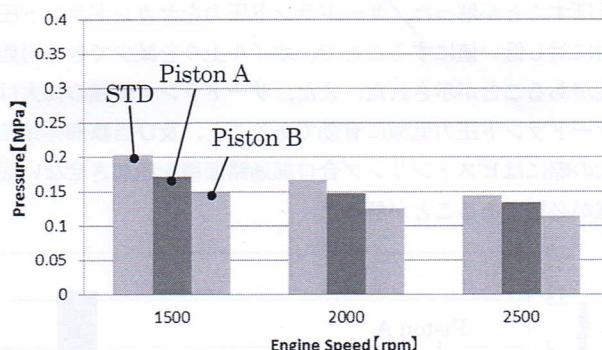


Fig. 9 Calculated maximum pressure of 3rd land

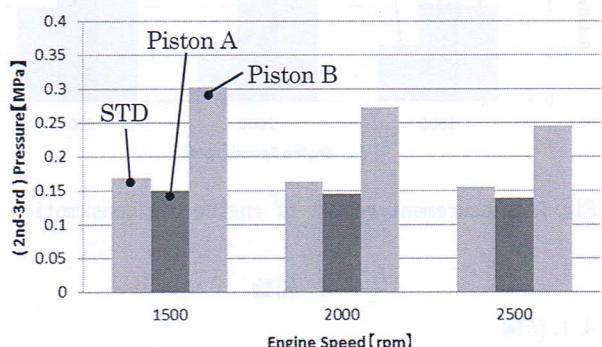


Fig. 10 Difference between the maximum pressures of 2nd and 3rd land

図 10 にセカンドランド圧力の計算結果からサードランド圧力を引いた結果を示す。この結果からピストン B は一番圧力差が大きく、ピストン A は一番圧力差が小さくなる計算結果が示された。

以上の結果より、ピストン A はサードランド体積を拡大したにも関わらず、セカンドリング合口面積を拡大させてしまったため、サードランドへ流出するガス流量が増加する結果、ランド間圧力差が減少傾向になることが予測された。またピストン B はセカンドリング合口面積を拡大せずにサードランド体積拡大を図ったため、サードランド圧力の低減のみ行うことができ、ランド間圧力差が増加傾向になることが予測された。この結果と仮説より、上記 3 種類のピストンでオイル消費量を測定した時、ピストン A のオイル消費量が最も多く、ピストン B が最も低い結果になると予想された。

3.3. オイル消費量測定結果

図 11 に STD ピストン、ピストン A 及び B のオイル消費測定結果を示す。縦軸にオイル消費量、横軸に機関回転数を示す。測定はサードランド部形状の影響が確認しやすい全負荷条件で行った。図よりどの回転域においてもピストン A はオイル消費量が多く、ピストン B は少なくなっていることが解る。この結果は図 10 の結果から予想されたオイル消費の順位と一致している。

以上の結果より、サードランド体積はオイル上りに影響を及ぼすことが解った。サードランド圧力をセカンドランド圧力に対し低い値にすることで、オイル上りを減少できる可能性があることが示された。また、サードランド体積の拡大はサードランド圧力低減に有効であること、及び当該部体積拡大の際にはピストンリング合口部通路面積を増加させない配慮が必要であることが解った。

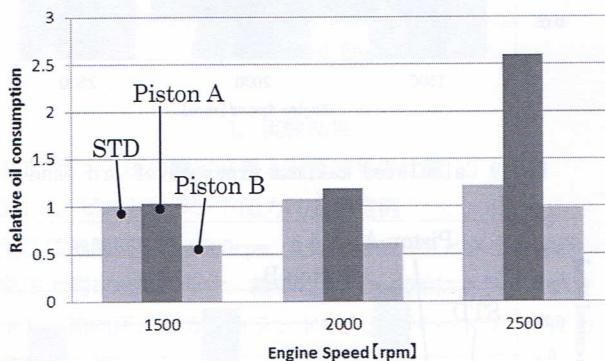


Fig. 11 Measurement result of engine oil consumption

4. 結論

4.1. 結論

リング合口部経由のオイル上りメカニズム解明の一助とするため、実動中のセカンドランド及びサードランド圧力の同時測定を行った。これにより、以下のことが解った。

- (1) 光ファイバ超小型圧力センサを用いて、実動中のセカンドランド及びサードランド圧力の同時測定に成功した。
- (2) サードランドを考慮したランド圧力の計算を行った。計算された各ランド圧力の最大値は実測値と良い一致を示した。
- (3) 計算されたランド圧力波形より、詳細な解析のためには、さらなる計算予測精度の向上が必要であることが解った。
- (4) サードランド体積はオイル上りに影響を及ぼし、当該部体積拡大によりサードランド圧力を低減させることでオイル消費が低減できる可能性があることが示された。

4.2. 今後の課題

- (1) ランド圧予測計算精度向上のため、計算モデルについてさらなる検討を行う。
- (2) サードランド容積が当該部圧力に及ぼす影響について、実際に測定を行い確認する。

5. 参考文献

- (1) Christoph Dahnz, Kyung-Man Han, Ulrich Spicher : SAE Int. J. Engines, Vol. 3, Issure 1, 2010, P214 ~224
- (2) 飯島直樹, 青木秀馬, 今村淳一, 瀧口雅章 : 自動車技術会論文集, Vol. 40, No. 6, 2009, P1477~1482
- (3) 伊東明美, 白川晴久, 中村正明, 吉田和義, 秋山久 : 自動車技術会論文集, Vol. 36, No. 3, P63~68, 2005
- (4) 古浜庄一 : 自動車技術, Vol. 29, No. 2, 1975, P119~127
- (5) 畫間勝, 古浜庄一 : 潤滑, 第 23 卷, 第 8 号, 1978, P40~46
- (6) 畫間勝, 古浜庄一, 吉田秀樹, 新啓一郎 : 日本機械学会論文集, No. 810-5, 1981, P138~140,
- (7) 古浜庄一, 多田寿雄 : 古浜庄一論文集, 1 日本機械学会関係 (上), 1959, P100~116
- (8) 日向哲, 古浜庄一, 瀧口雅章 : 自動車技術会前刷集 902 1990-10, P113~P116
- (9) 古浜庄一 : 内燃機関石油学会誌, 第 12 卷第 4 号, 別冊, 1969, P43~48

6. 謝辞

本研究を遂行するための光ファイバ超小型圧力センサの発注及び使用にあたり、熱心なご協力を頂きました株式会社レーザー計測の桜井将人様に対し、厚く御礼申し上げます。

また、著者と共に研究に励んでくれた新野芳也君、木内哲也君、鈴木悠太君に対し、心よりの感謝の意を表します。