

ピストン打音発生時のピストンスカート面圧測定

Measurement of Piston Skirt Oil-film Pressure when Piston Slap Noise Occurs

神谷 満 好*

Mitsuyoshi KAMIYA

高橋 幸 敬*

Yukitaka TAKAHASHI

小林 利 彰*

Toshiaki KOBAYASHI

三原 雄 司**

Yuji MIHARA

嶽 和 秀*

Kazuhide TAKE

染谷 常 雄***

Tsuneo SOMEYA

要 旨

ピストンスカート面形状、剛性、質量に影響を与えない小型薄膜圧力センサを物理蒸着法によりピストンスカート面に直接成膜し、ピストン打音発生時のシリンダライナ加振力と密接な関係にあるピストンスカート面の油膜圧力を測定した。その結果、実稼動エンジンにおいて、ピストン打音の指標であるシリンダライナ振動加速度に追従した油膜圧力が測定され、本測定手法の有効性を確認した。また、エンジン回転速度やピストンピンオフセット量の変更に伴うピストンスカート面の油膜圧力分布の変化が測定できた。これらより、シリンダライナ振動加速度のみでは説明できない、ピストンがシリンダライナへ衝突した際のピストンスカート面の油膜圧力の違いから、そのピストン挙動の違いを明確にした。その結果、ピストン挙動シミュレーションの精度向上が図られ、ピストン打音対策への効率の良い検討が可能となった。

ABSTRACT

A small thin-film pressure sensor that does not affect the piston skirt surface geometry, stiffness, and mass was directly deposited onto the piston skirt surface by physical vapor deposition, and the oil-film pressure on the skirt surface which is closely related to the cylinder liner excitation force when piston slap noise occurs was measured. The oil-film pressure corresponding to the cylinder liner acceleration, which is an indicator of piston slap noise, was measured in an engine under running condition, and the accuracy of this measurement was confirmed. It was also possible to measure the change in the oil-film pressure distribution on the piston skirt surface corresponding to changes in engine speed and the piston pin offset. The difference of the oil-film pressure on the piston skirt surface when the piston collides with the cylinder liner, which was not possible to explain from cylinder liner acceleration alone, allowed the mechanism where the piston secondary motion differs to be identified. As a result, the accuracy of the piston secondary motion simulation was enhanced, enabling effective measures against piston slap noise to be studied.

1. まえがき

近年の乗用車用エンジンは、小型、軽量、高出力、低燃費、低公害といった商品魅力に加え静粛性への要求も高い。それ故、ピストンに関しても上記要求を満たすために、軽量化、耐久性の確保、フリクション低減を設計目標とするだけでなく、ピストン打音の低減を目的としたピストンピンオフセット調整やピストンスカートフォーム変更といった設計がなされている。

一方、近年のシミュレーション技術の進化に伴い、ピストン打音発生時のピストン挙動やピストンスカート面の油膜圧力分布の予測が可能となりつつある。しかし、その予測精度は十分ではなく、ピストン開発の工数削減には至っておらず、予測精度向上が要求されている。

そこで特にピストン打音発生時のピストン加振力と密接な関係にある、ピストンスカート面の油膜圧力分布の時刻歴遷移を測定し、ピストン打音発生メカニズムを解明する必要がある。

* 四輪開発センター

** 武蔵工業大学

*** 東京大学 名誉教授

本論文では、開発の効率化に寄与するピストン挙動シミュレーションの精度向上を目的に、その影響因子を明らかにする。測定にあたっては、新たに小型薄膜圧力センサを用いてピストン打音発生時のピストンスカート面の油膜圧力の直接測定を試みた。

2. ピストンスカート面の油膜圧力測定手法

2.1. ピストン打音と油膜圧力測定

ピストンスカート面の油膜圧力測定に関しては、反スラスト側で発生するピストン打音を対象とした。このピストン打音は、主に往復運動部慣性力とシリンダ内圧力の増減により、圧縮および膨張行程上死点付近で、ピストンが急激にスラスト側から反スラスト側に移動するとともに、ピストンピン周りに生じるモーメントによりピストンが回転し、反スラスト側スカート面がシリンダライナへと衝突するために発生すると考えられている⁽¹⁾。しかし、実稼動エンジンにおいて、この挙動は短時間で生じるため、シリンダライナ振動加速度測定ではピストン挙動との関係が不明確で、ピストンの並進および回転挙動のシリンダライナ振動加速度に対する寄与分離が困難であった。

このようなピストン挙動のメカニズム解明にはピストンスカート面の油膜圧力分布測定が必要となるが、往復運動部質量に影響する大きなセンサや、ピストンスカート剛性やスカート面性状の変化を生じる測定手法は使用できない。

そこで、ピストンの質量、スカート面剛性および形状へ影響が無く、直接スカート面の油膜圧分布測定可能なセンサを用いた。

2.2. 測定手法概要

ピストンスカート面の油膜圧力分布測定には、エンジンのしゅう動部表面に直接形成できる薄膜圧力センサを用いた。このセンサは実稼動エンジンにおける主軸受の油膜圧力分布測定用として開発され⁽²⁾、ピストンピンボス部やコンロッド大端部軸受の油膜圧力分布測定においても実績がある^{(3)・(5)}。エンジンの滑り軸受の研究⁽⁶⁾においても、単体テスト装置による油膜圧力分布の検証にこのセンサを応用した実績があるが、実稼動エンジンの代表的な往復動運動部であるピストンスカート部への薄膜圧力センサの適用したのは初の試みである。

2.3. センサ構造

薄膜圧力センサの圧力感知部は、物理蒸着法により測定部位に直接成膜した薄膜抵抗体である。このセンサは、取り付け穴や測定用の油導入孔を必要とせず、しゅう動部の曲率に応じた形状に取り付けることができるため、測定対象部の形状変化、剛性低下、質量増加などの影響が少ないという利点がある。

Table 1 Alloy composition of sensors [wt%]

	Cu	Mn	Ni
Cu-Mn-Ni alloy	87.8	8.75	3.45

薄膜圧力センサは Fig. 1 に示すような形状を持ち、約 $\phi 1\text{ mm}$ 以下の微小な領域の圧力測定が可能である。センサ膜は Fig. 2 に示すように、導電体であるピストン表面の上に付着強度を上げる中間膜、絶縁膜、圧力感知膜、リード膜、保護膜から構成され、全膜厚は約 $12.6\text{ }\mu\text{m}$ である。本測定に用いたピストンスカート面は、センサが形成された状態でピストン径を実機と同じにする必要があるため、成膜部を成膜行程前にセンサの全膜厚分だけ研磨した。

2.4. センサ材料と圧力特性

圧力感知材料は、実稼動エンジンにおける主軸受、コンロッド大端部の油膜圧力分布測定^{(2)・(4)}などにおいて使用された Cu-Mn-Ni 合金を用いた。Table 1 にセンサ合金の組成を示す。

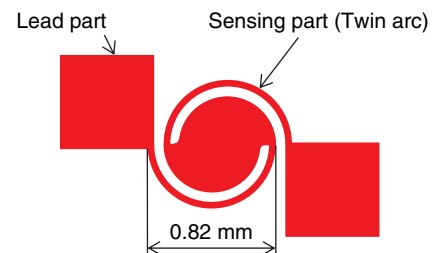


Fig. 1 Shape of thin-film sensor (Plain view)

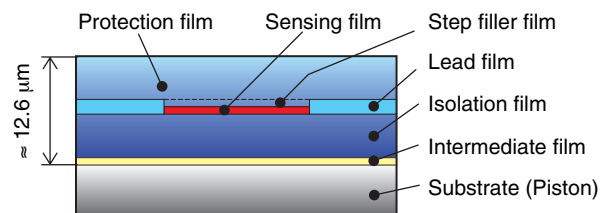


Fig. 2 Structure of thin-film sensor (Cross section)

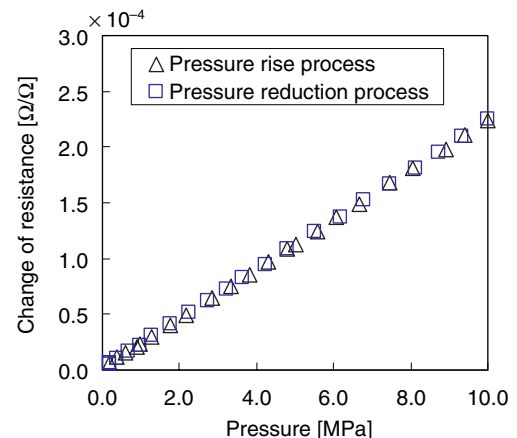


Fig. 3 Pressure-resistance characteristics

この材料により製作されたセンサの圧力に対する出力特性の一例を Fig. 3 に示す。測定の対象範囲である 0-10 MPa において、高い直線性と低ヒステリシス性能が得られた。

2.5. 測定位置

Fig. 4 に既存のピストン挙動シミュレーションにより求めた異なるピストンピンオフセット量におけるピストン打音発生時のピストンスカート面の油膜圧力分布計算結果を示す。この結果と従来の開発における経験から、Fig. 5 に示すように、ピストンピン穴の中心と同位置の反スラスト側ピストンスカート面上に 1 箇所、およびこの位置から上方に 4 mm おきに 2 箇所の合計 3 箇所に薄膜圧力センサを形成した。

2.6. 供試エンジンおよび測定装置

供試エンジンの基本諸元を Table 2 に示す。

測定は 3 番気筒のピストンについておこなった。ピストンに取りつけられたセンサ信号ターミナルからエンジン外部までの配線取り出しには、Fig. 6 に示すリンク機構を用いた。リンクはコンロッド大端部より三つの節を持つ。三つの薄膜圧力センサからの配線取り出し経路をピストンスカート面上の点より、コンロッドおよびリンクへとつながる矢印線で示す。

薄膜圧力センサは金属抵抗素子であり、作用する圧力によりセンサ抵抗が微小に変化する。この薄膜圧力センサを Fig. 7 に示すホイートストンブリッジ回路の 1 辺に組み込む

Table 2 Engine specifications

Engine type	Water-cooled, DOHC, 4-stroke 16 valves, In-line 4-cylinder, gasoline	
Bore × Stroke [mm]	86.0 × 86.0	
Displacement [cm ³]	1998	
Compression ratio	9.8 : 1	
Max. power [kW / (r/min)]	118 / 6500	
Max. torque [N·m / (r/min)]	191 / 4000	
Piston pin offset [mm]	0.8 (Standard)	1.3
Cylinder offset [mm]	0.0	

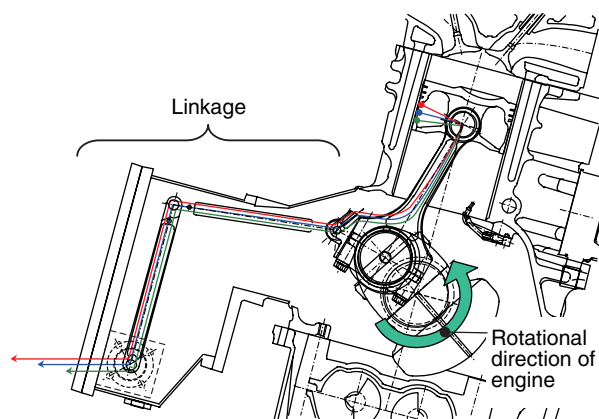


Fig. 6 Linkage and wiring from thin-film sensors

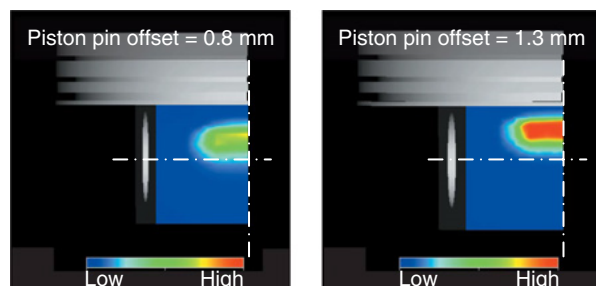


Fig. 4 Simulation results of oil-film pressure distribution on anti-thrust side skirt

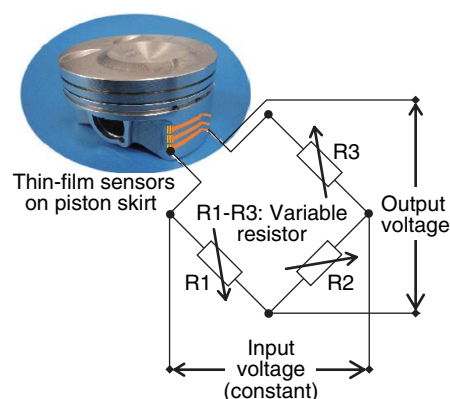


Fig. 7 Measurement circuit (Wheatstone bridge)

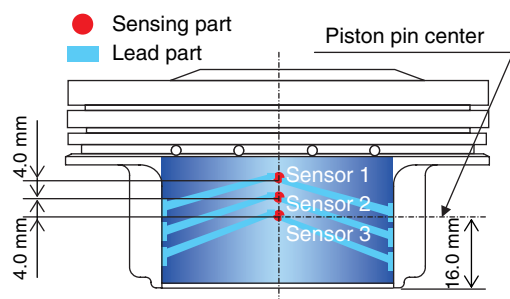


Fig. 5 Thin-film pressure sensors on anti-thrust side skirt

ことで、ホイートストンブリッジ回路内の端子間に微小電圧が発生する。出力された電圧値は微小なため、ストレインアンプにて出力を増幅し測定した。

3. 測定結果および考察

3.1. ピストンスカート面の油膜圧力とシリンダライナ振動加速度的関係

供試エンジンは、エンジン出口水温 0 °C、ファイヤリン

グ、無負荷、主に 3000 r/min から 4000 r/min の運転条件において、ピストンピンオフセット量をスラスト側へ 0.8 mm から 1.3 mm へ変更すると、反スラスト側においてピストン打音が発生する。

そこで Fig. 8 に示すようにシリンダライナ外壁ウォータージャケット内、シリンダライナ円周に対し法線方向に一軸の加速度センサを取りつけた。このシリンダライナ振動加速度測定値を打音発生時のピストン加振力の代表値とみなし、同時に測定したピストンスカート面の油膜圧力測定値と相関性を調べた。

Fig. 9 に、先に記述した運転条件における、ピストン打音発生時の反スラスト側ピストンスカート面の薄膜圧力センサ 1 の測定値に対する反スラスト側シリンダライナ振動加速度センサの測定値を示す。

図中、下方の点線で囲んだ領域はピストンピンオフセット 0.8 mm、上方の点線で囲んだ領域は 1.3 mm の結果であり、点直線は両結果の最小二乗法による近似直線である。またエンジン同一回転速度による結果を同一記号で示した。

サイクルごとの燃焼指圧やピストン挙動の変化、接触点が微妙にセンサ位置と異なることから生じるばらつきを考

慮しても、ピストン打音発生時に、反スラスト側ピストンスカート面の薄膜圧力センサ 1 の測定値とシリンダライナ振動加速度との間に相関係数 $R^2 = 0.980$ の高い比例相関が得られた。したがってピストン打音発生時の薄膜圧力センサ測定値はピストン加振力を良好に表しており、このことは薄膜圧力センサによる測定の有効性を示していると考えられる。

3.2. エンジン回転速度の違いによるピストンスカート面の油膜圧力比較

Fig. 10(a) に燃焼指圧測定値、Fig. 10(b) に反スラスト側シリンダライナ振動加速度測定値、Fig. 10(c) に反スラスト側ピストンスカート面の油膜圧力測定値を示す。また、Fig. 10(d) および Fig. 10(e) に単純な機構モデルによるピストンサイドフォース計算値およびピストンピン中心周りのピストン回転モーメント計算値を示す。図中の垂直な点線は、シリンダライナの振動加速度発生開始クランクアングルである。

Fig. 10(b) および (c) より、2000 r/min ではシリンダライナ振動加速度は小さく、ピストンスカート面の薄膜圧力センサの出力はシリンダライナ振動加速度出力に対して位相が遅れて発生する。これに対して 3500 r/min では薄膜圧力センサ出力とシリンダライナ振動加速度発生開始クランクアングルには位相差はない。しかし、シリンダライナ振動加速度は大きく、シリンダライナ上下方向に配置した三つの薄膜圧力センサ出力値は、2000 r/min 同様、センサ 1, 2, 3 の順に小さい。

また Fig. 10(d) より、シリンダライナ振動加速度発生開始クランクアングルにおけるサイドフォース計算値は、2000 r/min の場合はほぼ 0 N であるが、3500 r/min の場合は -700 N 前後あり、反スラスト側からスラスト側へ移動させる力がピストンに作用している。

さらに Fig. 10(e) より、ピストンのピン周りの回転モーメント計算値より、2000 r/min の場合は、ピストンに反スラスト側へ弱いモーメントが作用しているが、3500 r/min の場合は、Fig. 8 の矢印で示すように反スラスト側へ(ピストンヘッドを反スラスト側に押し付ける方向に)強いモーメントが作用している。

以上の結果をもとに、Fig. 11 および Fig. 12 に、2000 r/min および 3500 r/min におけるピストン挙動を示す。

2000 r/min の場合、シリンダライナ振動加速度発生以前、ピストンは小さいながらもサイドフォースにより反スラスト側に位置している。その後、サイドフォースの影響が無くなると同時に、弱いピストンピン周りの回転モーメントを受け続けていたピストンは、Fig. 11(a) に示すように、薄膜圧力センサの取り付け部位より下側においてシリンダライナに接触し、シリンダライナ振動加速度のみが発生した。さらにその後、Fig. 11(b) に示すように、ピストンはシリンダ

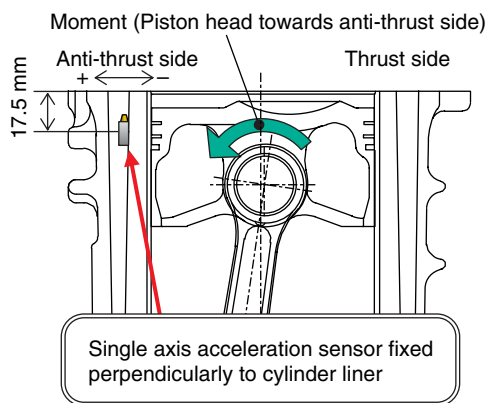


Fig. 8 Location of acceleration sensor

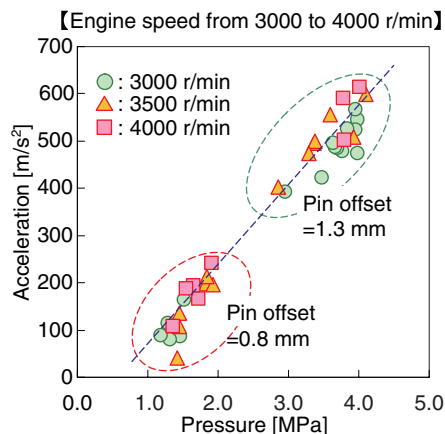


Fig. 9 Pressure measured by sensor 1 versus cylinder liner acceleration at two different piston pin offsets

ライナから離れつつも、反スラスト回りのモーメントが増加し続け、薄膜圧力センサ部位でシリンダライナに再接触したために、ピストンスカート面の油膜圧力は、シリンダライナ振動加速度発生クランクアングルより位相遅れが生じたものと考察できる。

3500 r/min の場合は、Fig. 12 に示すように、ピストンはスラスト側に押しつけられており、ほぼピストンクリア

ランス分が反スラスト側に空いている状態で、反スラスト側へのピストンピン周りの強いモーメントを受ける。このとき、ピストンがピンを中心に反スラスト側へと回転し、最も上方に設置した薄膜圧力センサ 1 近傍でシリンダライナと接触したために、シリンダライナ振動加速度およびスカートの油膜圧力は、ともに大きく、位相差なく測定されたものと考察できる。

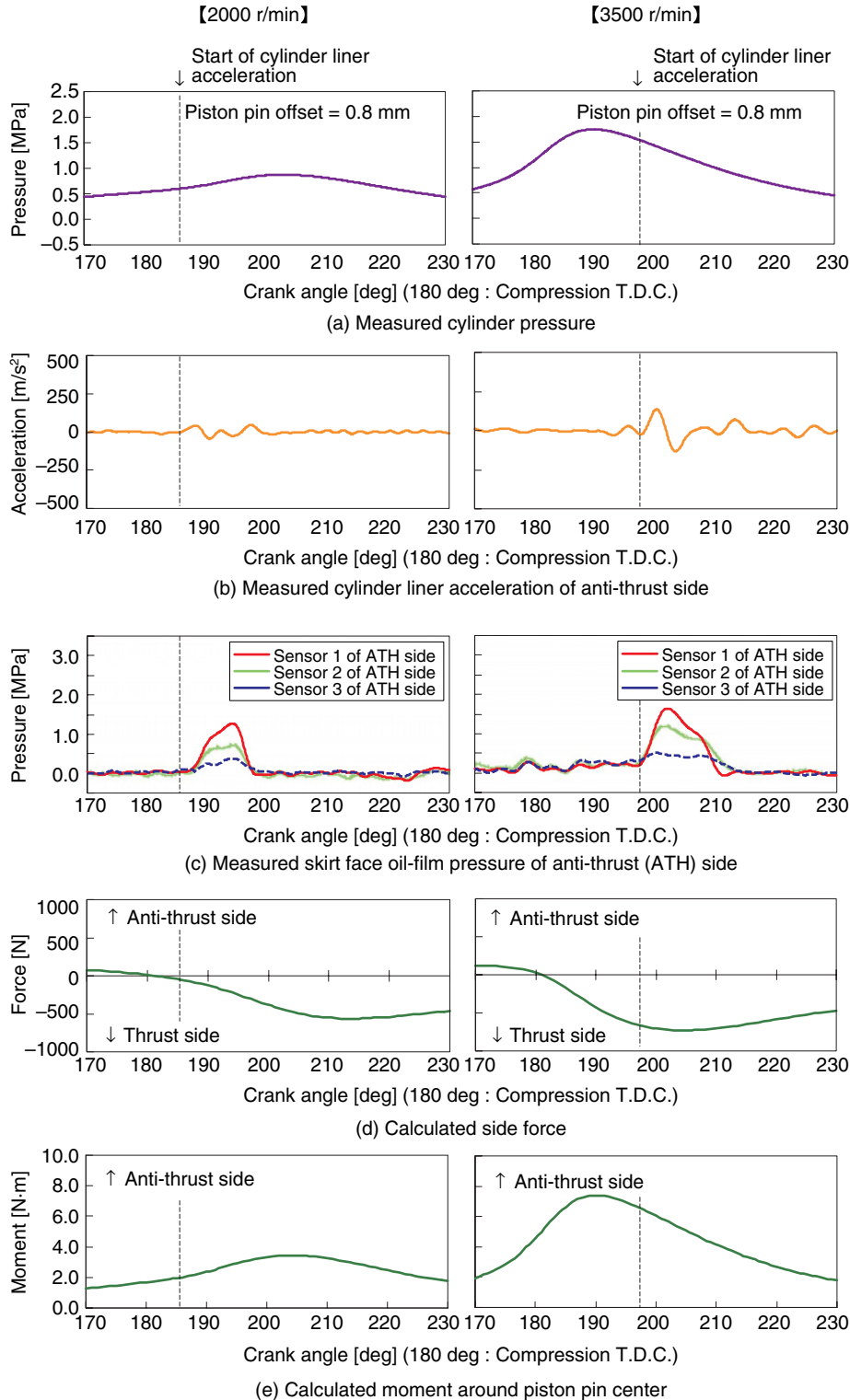


Fig. 10 Experimental and calculation results for different engine speeds

3.3. 同等燃焼指圧でのピストンピンオフセット違いによるピストンスカート面の油膜圧力比較

Fig. 13(a)に反スラスト側シリンダライナ振動加速度測定値, Fig. 13(b)にピストンスカート面の薄膜圧力センサの測定値を示す。また, Fig. 13(c)に単純な機構モデルによるピ

ストンピン周りの回転モーメントの計算値を示す。図中の垂直な点線は、シリンダライナ振動加速度発生クランクアングルである。

Fig. 13(a) および (b) より、シリンダライナ振動加速度が発生した際のピストンピンオフセットの違いによるピストンスカート面の薄膜圧力センサ2の測定最大値に違いはほとんどみられず、センサ1の測定最大値にのみ差異が現れている。したがってセンサ1の測定値でピストンスカート面の油膜圧力差を評価できることがわかった。

その結果, Fig. 13(c)より、ピストンピンオフセット量増加の際には、ピストンピン周りのモーメント増加により、ピストン上部が反スラスト側に強く押し付けられ、シリンダ

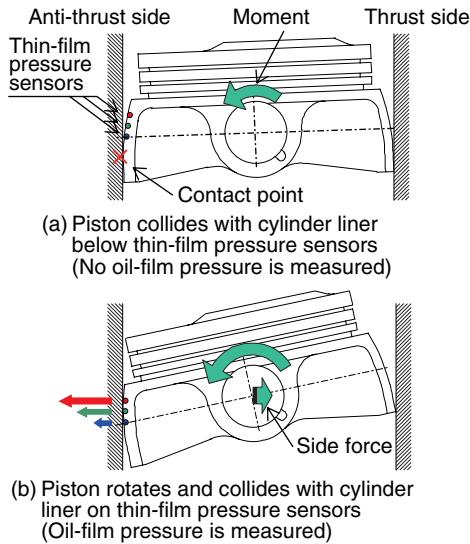


Fig. 11 Piston secondary motion at 2000 r/min

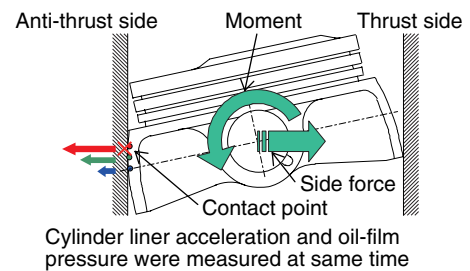


Fig. 12 Piston secondary motion at 3500 r/min

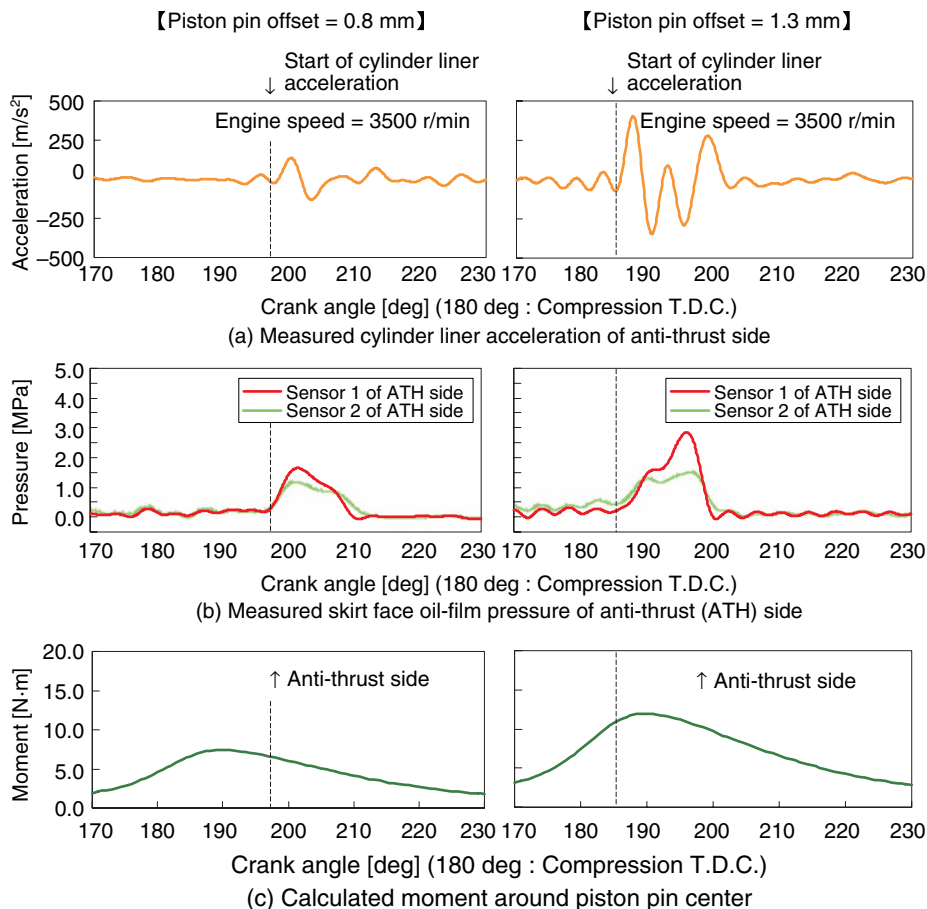


Fig. 13 Experimental and calculation results for different piston pin offsets at 3500 r/min

ライナ振動加速度が増加している。

このことから、ピストン打音の主要因が、ピストン回転挙動によるスカート面上部への接触であることが判明した。

以上により、ピストン打音を予測するピストン挙動シミュレーションにおいて、ピストンの回転挙動に留意したモデル構築ができ、予測精度向上が図られた⁽⁷⁾。

4. まとめ

- (1)物理蒸着法により小型薄膜圧力センサをピストンスカート面へ直接取付けることで、エンジン実稼動時のピストンスカート面の油膜圧力測定を可能とした。
- (2)ピストン打音発生時において、加振力の一指標であるシリンダライナ振動加速度とピストンスカート面の薄膜圧力センサ測定値との間に比例相関が認められ、本測定手法の有効性が確認された。
- (3)異なるエンジン回転速度や、ピストンピンオフセット量変化に伴う、ピストンスカート面の油膜圧力の遷移が測定された。このことから、シリンダライナ振動加速度のみでは従来説明できなかったピストン打音の大きさの要因が、ピストンの回転挙動にあることをピストンスカート面の油膜圧力測定により明らかにした。
- (4)実稼動時のピストンスカート面の油膜圧力が直接測定できたことにより、ピストン挙動シミュレーションの予測精度向上が図られ、効率の良い対策検討を可能とした。

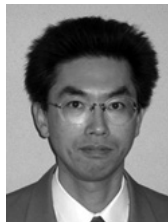
参考文献

- (1) Künzel, R., Tunsch, M., Werkmann, M.: Piston Related Noise with Spark Ignition Engines — Characterization, Quantification and Mechanism of Excitation, SAE Paper, 2000-01-3311(2000)
- (2) Mihara, Y.: Development of Measuring Method for Oil Film Pressure of Engine Main Bearing by Thin Film Sensor, Dissertation, Musashi Institute of Technology (1995)
- (3) Mihara, Y., Someya, T., Kobayashi, K., Kusunoki, T.: Development of a New Thin Film Sensor for the Measurement of Oil Film Pressure, Japanese Society of Tribologist, International Tribology conference Nagasaki 2000, p.1621-1626(2000)
- (4) Mihara, Y., Someya, T.: Measurement of Oil-film Pressure in Engine Bearings Using a Thin-film Sensor, Society of Tribologists and Lubrication Engineers Paper, Vol.45, p.11-20(2002)
- (5) 佐藤謙次, 町田恭一, 牧野克紀: コンロッド大端部の剛性が油膜に与える影響について, HONDA R&D

Technical Review, Vol.12, No.1, p.33-38

- (6) 町田恭一, 牧野克紀, 佐藤謙次: 単体試験装置によるエンジン用滑り軸受の焼付き要因の解析, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.1, p.39-44
- (7) 小林利彰, 嶽和秀, 神谷満好, 高橋幸敬: 3次元ピストンシミュレーションによるピストン打音予測, Honda R&D Technical Review, Vol.19, No.1, p.156-162

■著 者■



神谷 満好



小林 利彰



嶽 和秀



高橋 幸敬



三原 雄司



染谷 常雄