

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一箇所、およびこの位置から上方4 mmおきに二箇所の合計三箇所に薄膜圧力センサを形成した。また薄膜圧力センサからのリード膜は両側に成形し、スカート縁部より結線する。

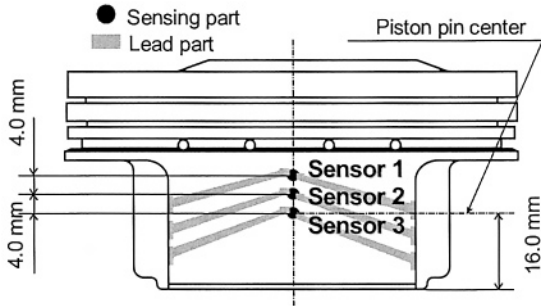


Fig.6 Thin-film pressure sensors on anti-thrust side skirt

3.5. 供試エンジンおよび測定装置

計算及び実機測定の対象とする供試エンジンの基本諸元を Table 2に示す。このエンジンは直列4気筒、排気量2リッターの普通乗用車用ガソリンエンジンである。

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	

測定は3番気筒のピストンについて行なった。ピストンに取り付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. 7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図中、赤、青、緑線で示す。

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. 8に示すホイートストンブリッジ回路の一辺に組み込むことで、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。

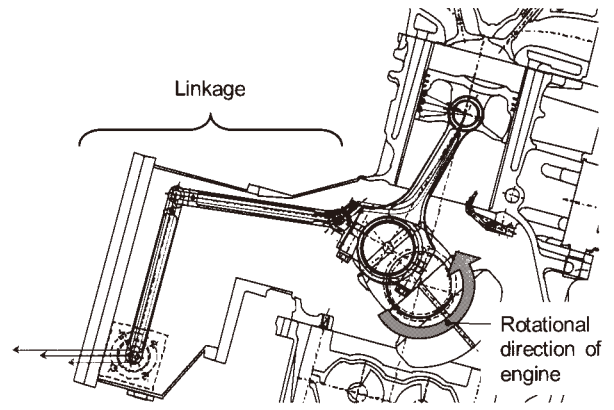


Fig.7 Linkage and wiring from thin-film sensors

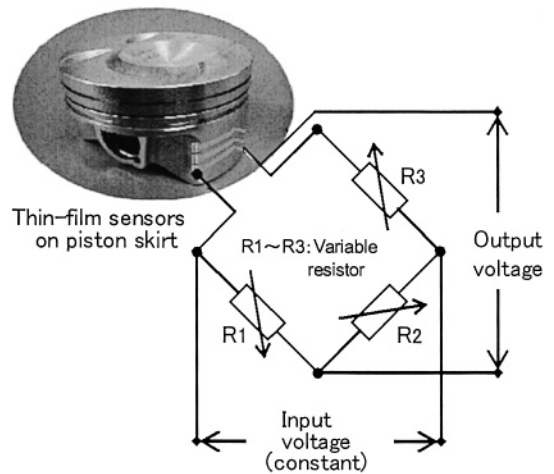


Fig.8 Measurement circuit (Wheatstone bridge)

4. 測定結果および考察

4.1. 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の関係

供試エンジンは、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、エンジン出口水温0℃、ファイヤリング、無負荷、主に3000 から4000 r/minにおいて、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. 9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と、同時に測定したピストンスカート面の油膜圧力測定値の相関性を調べた。シリンダライナ振動加速度は、ピストンの加振力による応答と考えられ、打音との相関も高い。

Fig. 10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のピーク測定値と、反スラスト側シリンダライナ振動加速度センサのピーク測定値の相関を示す。

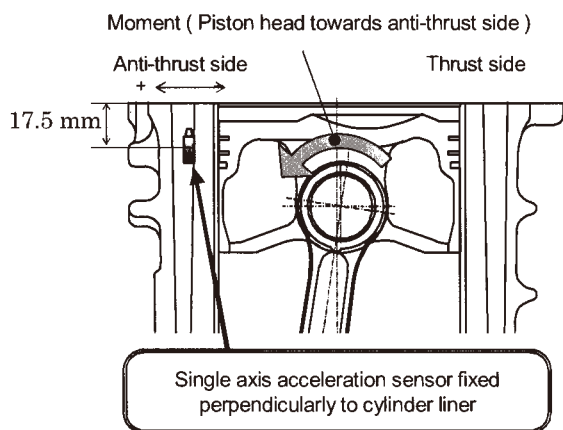


Fig.9 Location of acceleration sensor

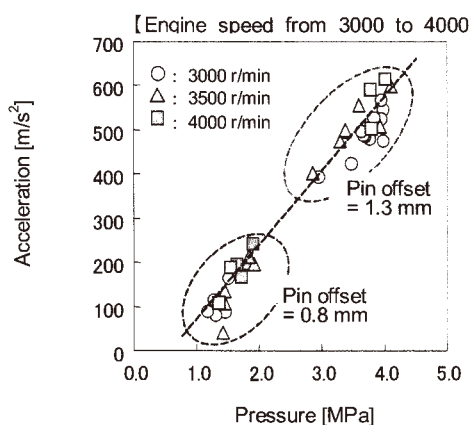


Fig.10 Pressure measured by sensor 1 versus cylinder liner acceleration at two different piston pin offsets

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、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。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 の測定値とシリンダライナ振動加速度との間には相関係数 $R^2 = 0.980$ と非常に高い比例相関が得られ、点直線は両結果の最小二乗法による近似直線である。このことから、ピストン打音発生時におけるスカート上部の薄膜圧力センサ測定値は、ピストン加振力の応答であるシリンダライナ振動加速度と比例しており、加振力として働くことが推測される。測定結果のばらつきは、サイクル毎の燃焼指圧やピストン挙動の微妙な変化によるものと考えられる。

4.2. 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. 11 に、それぞれピストンピンオフセット 0.8 mm, エンジン回転速度 2000 r/min および 3500 r/min における、反スラスト側ピストンスカート面の油膜圧力測定値、反スラスト側シリンダライナ振動加速度測定値、およびピストンピン中心回りのピストン回転モーメント計算値を示す。これは燃焼指圧と慣性力、油膜反力を考慮した、ピストン挙動解析シミュレーションを用いて算出する。この時燃焼指圧はばらつきを考慮し、実測された分布における平均値を用いた。

これら油膜圧力測定値およびシリンダライナ振動加速度測定値より、2000 r/min ではシリンダライナ振動加速度は小さく、ピストンスカート上下方向に配置した薄膜圧力センサのピーク出力は、上部ほど大きな値である。

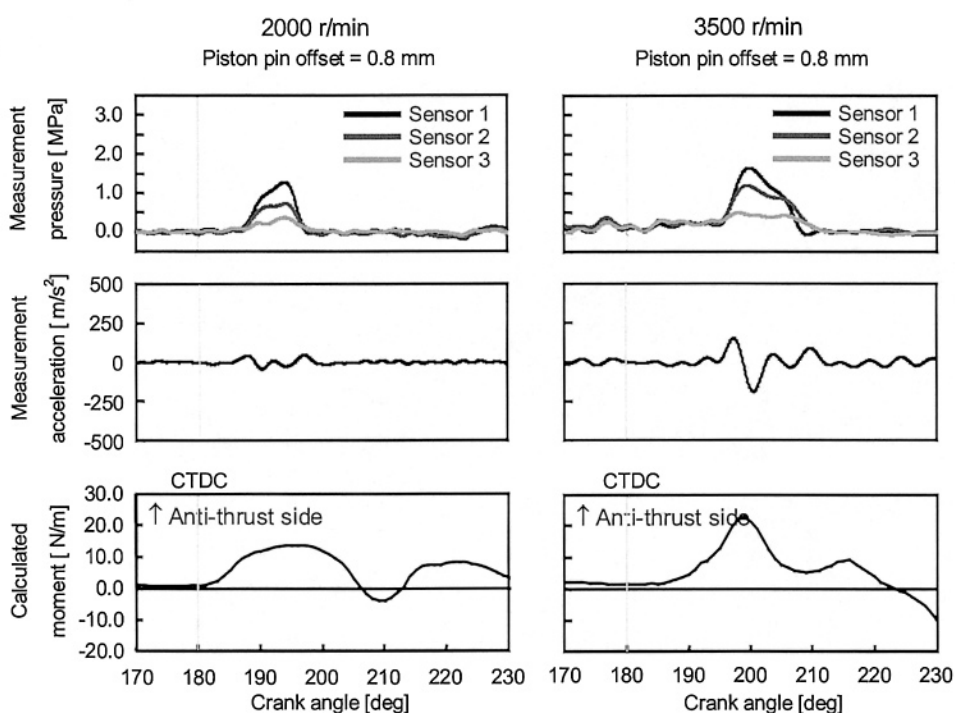


Fig.11 Experimental and calculation results for different engine speeds

4.3. 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の油膜圧力比較

Fig. 14に、同一回転速度(3500 r/min)、同等燃焼指圧における、異なるピストンピンオフセットに対する反スラスト側シリンダライナ振動加速度測定値と、ピストンスカートの薄膜圧力センサの測定値、指圧と慣性力を考慮した剛体によるピストン系の機構解析 CAE を用いて算出したピストンピン周りの回転モーメント計算値を示す。

この結果を比較することより、シリンダライナ振動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の薄膜圧力は、センサ 2 の測定最大値には違いがほとんどみられず、センサ 1 の測定最大値にのみその差異が現れていることがわかる。

計算によるモーメント量は、ピストンピンオフセット量増加により、ピストンピン周りのモーメントが増大し、その立ち上がりが急峻になり、回転速度が増加する。ピストンは上部が反スラスト側にさらに強く衝突しシリンダライナ振動加速度が増加する、つまりピストン打音が大きくなると考えられる。しかしモーメントの絶対値自体は、0.8 mm ピンオフセットに対しそれほど変わらない値である。これは衝突時の面圧反力により制限されることが推測される。

以上のことを検証するため、Fig. 15に、先のピストン系機構解析 CAE を用いて算出した 3500 r/min における 0.8 mm ピンオフセットと 1.3 mm ピンオフセットピストンの並進速度と回転速度を示す。またそれぞれの寄与を明確化するため、運動エネルギーの計算結果を並べて示す。図中の矢印は反スラスト側の衝突に関連すると推測されるピークである。

これらの結果より、0.8 mm ピンオフセットより 1.3 mm ピンオフセット時には並進速度、回転速度とも増加しているが、エネルギー比較では後者の方が大きく増加していることが判る。

更に 0.8 mm ピンオフセットでは、回転速度と並進速度がほぼ同時に増減するが、1.3 mm ピンオフセットは、並進速度が減少に転じても回転速度は増加する箇所がある。これはピストン挙動により並進運動のエネルギーが回転運動に変換され

る事象が在り得ることを示すと考えられる。オフセット増加によるこれらの作用の結果、特に衝突時の回転速度が増加し、ピストンスカート上部に大きな面圧を生じることで、反スラスト側における顕著なラトル音を生じるものと考察する。

5. ま と め

- (1) ピストンスカートの油膜圧力測定のため、物理蒸着法による小型薄膜圧力センサを用いた測定手法を提案した。
- (2) 本手法により、従来計測出来なかったエンジン実稼動時スカート面圧の測定に成功した。
- (3) 本手法によるスカート面圧測定結果と、剛体モデルを用いたピストン挙動シミュレーションによる挙動の比較から、ピストン打音の大きさには、ピストンの回転速度と、それによるピストンスカート上部における衝突が大きく寄与することを明らかにした。

参 考 文 献

- (1) 三原雄司：薄膜センサーによる内燃機関主軸受の油膜圧力測定法の開発に関する研究、武蔵工業大学大学院博士論文 (1995)
- (2) 三原雄司, 山田大祐, 染谷常雄, 後藤崇行：薄膜センサーによるピストンピンボス部の油膜圧力測定に関する研究、日本機械学会講演論文集, No98-1 (1998)
- (3) 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)
- (4) 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
- (5) 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けの焼き付き要因の解析、HONDA R&D Technical Review, Vol. 12, No. 1, p. 39-44

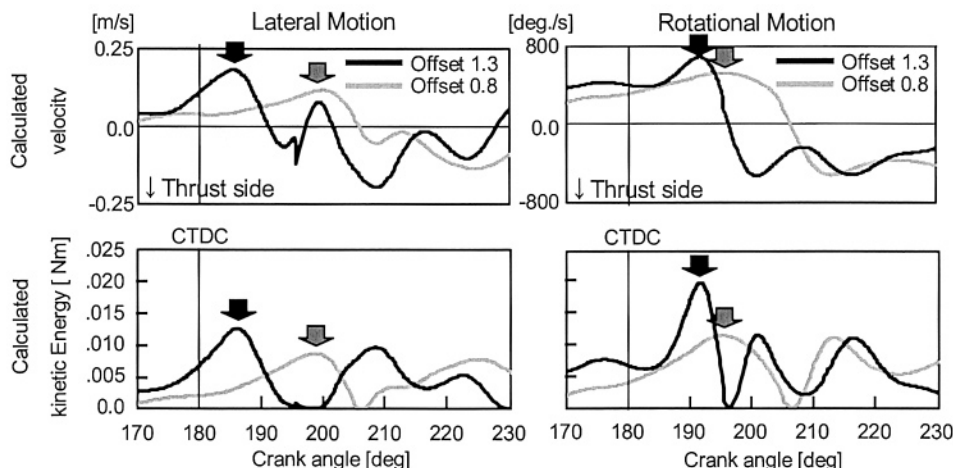


Fig.15 Comparison of piston secondary velocity and kinetic energy