

# FRMライナーシリンダブロックの ピストンスラップ解析

Piston Slap Analysis for FRM Liner Cylinder Block

嶽 和 秀\* 大 林 玲 子\* 伊 藤 保\*  
Kazuhide TAKE Reiko OHBAYASHI Tamotsu ITO

藤 井 誠\* 星 野 守 門\*  
Makoto FUJII Syumon HOSHINO

## 要 旨

これまで、ピストンスラップに関する報告はFCライナーに関するものが主であり、FRMライナーに関しては例が無い。著者らはこのFRMライナーシリンダブロックのエンジンを用いてピストンスラップの計測解析を行い、冷間から熱間において発生するスラスト側と反スラスト側のピストンスラップを解明した。さらに、二次元ピストン挙動シミュレーションを実施し、熱間時のスカートプロフィールを取り入れて計算することによりピストンスラップが精度良く予測出来ることを確認した。

## ABSTRACT

The research on piston slap has been made mainly for FC cylinder liner, however, it has not been made for FRM one. The purpose of this paper is to clarify the piston slap mechanisms for the FRM liner cylinder block, for the thrust side and anti thrust side under the cylinder temperature condition from cold to hot, by measuring and analyzing the piston slap. Furthermore, using 2-dimensional piston motion simulation, it is confirmed that the slap is accurately estimated by the calculation considering a skirt profile at high temperature condition.

## 1. まえがき

ピストンがライナーに衝突して生じる騒音は、ピストンスラップ音と呼ばれている。この音は、完成車の静粛性を害する事からその対策手法については、実機及びシミュレーションを含めこれまで多くの報告がなされている<sup>1)~6)</sup>。

一般に乗用車用エンジンで多く用いられているFCライナーは、ピストン(アルミ)と熱膨張率が異なるため、ピストンとライナー間のクリアランス(以下、ピストンクリアランス)が大きい低温域のピストンスラップ音(ガラガラ音等と称される)が聴感を害する傾向にある。一方、ライナー部をFRM(Fiber Reinforced Metal)としたシリンダブロック(以下、FRMシリンダブロック)は、冷間と熱間でピストンクリアランスの差が小さいため、暖機過程から熱間においてもピストンスラップ音(カタカ

タ音等と称される)が聴感を害する傾向にある。このFRMシリンダブロックは、耐摩耗性・耐焼き付き性に優れており、ホンダでは高回転・高出力の上級スポーツモデルに用いている。

これまでピストンスラップに関する報告はFCライナーに関するものが主であり、FRMシリンダブロックに関しては例が無い。本報告では、FRMシリンダブロックのエンジンを用い、実機測定によりメカニズム解析を行うと共にピストン諸元とピストンスラップの関係を調べた。また、ピストン挙動シミュレーションと実測との比較検証の結果を報告する。

\*栃木研究所

Table 1 Engine specification

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| Cylinder liner                  | FRM        |
| Cylinder layout                 | In-line 4  |
| Bore × Stroke (mm)              | φ87 × 90.7 |
| Displacement (cm <sup>3</sup> ) | 2156       |
| Compression ratio               | 10.6 : 1   |

## 2. ピストン挙動とシリンダ振動

### 2. 1. 測定手法

測定に用いたエンジンの諸元をTable 1に示す。測定に際しては、Fig.1に示すようにスラスト側と反スラスト側のシリンダに取り付けたギャップセンサによりピストン挙動を調べると共に、加速度センサにより振動レベルの評価を行った。

ピストン挙動を調べた結果、エンジン実働時におけるピストンは、圧縮TDC前後及び排気TDC前後において、それぞれスラスト側、反スラスト側のシリンダ内壁に衝突する。このため、ピストンスラップの適正な評価を行うには、ピストンスラップの挙動に同期したシリンダ振動

の測定範囲(Gate)を設定する必要がある。Fig.2にピストン挙動とシリンダ振動測定範囲(図中のGate)の関係を示す。

### 2. 2. 測定結果

Fig.3にシリンダ振動データの一例を示す。図中のGateはFig.2に示す測定範囲を表わす。測定開始温度は、エン

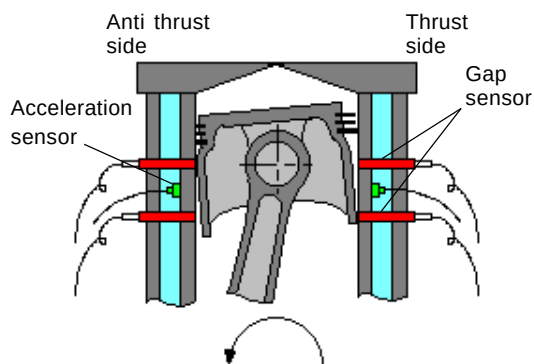


Fig. 1 The location of sensors

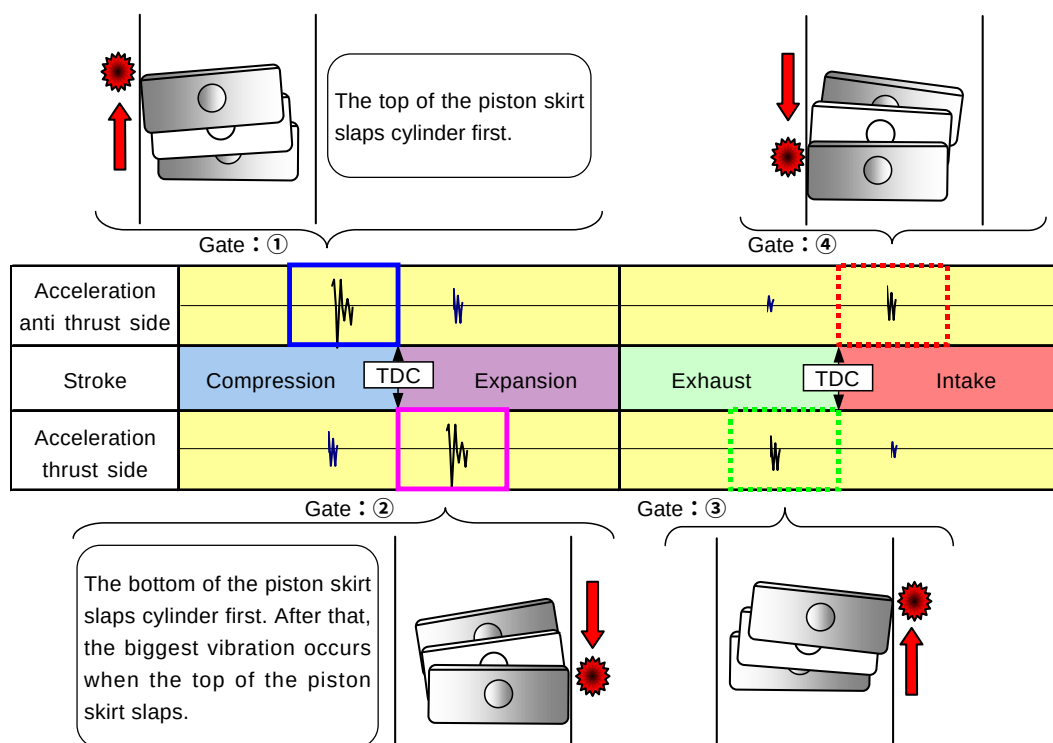


Fig.2 Piston motion and cylinder vibration measurement

ジンの油温及び水温で-20℃からとし、ファストアイドルから熱間アイドルまで測定を行った。

エンジンフリクションが大きい低温時のシリンダ振動は、膨張行程で発生するスラスト側の振動が主であるのに対し、暖機過程から熱間では、圧縮行程で発生する反スラスト側の振動が大きくなる傾向にある。すなわち、低温時の圧縮行程においては、シリンダ内の圧力が高いためピストンは反スラスト側のシリンダ内壁に沿って上昇する。このため、シリンダ振動は、サイドフォースの向きが急激に変わる圧縮TDC後のスラスト側が最も大きくなる。これに対しシリンダ内の圧力が低い暖機過程から熱間の圧縮行程時には、ピストンは反スラスト側のシリンダ内壁から離れる。その後、シリンダ内の圧力上昇により、ピストンピンまわりにモーメントが作用し、剛性の高いスカート上端が反スラスト側のシリンダー内壁に衝突し、大きな振動を生じる。

### 3. ピストン諸元の影響

ピストン諸元がピストンスラップに与える影響を調べるため、①ピストンピンオフセット量(Fig.4)、②スカートプロフィール(Fig.5)、③精円量(Fig.6)が各々異なるピ

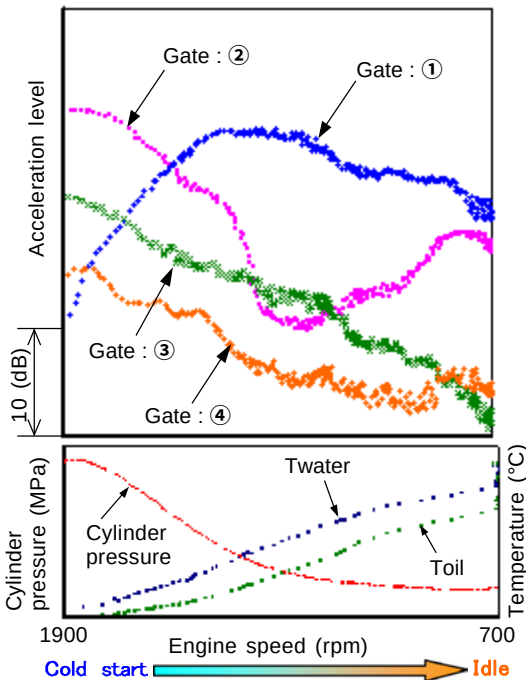


Fig.3 Cylinder vibration

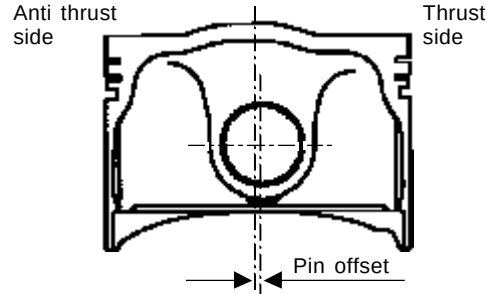


Fig.4 Piston pin offset

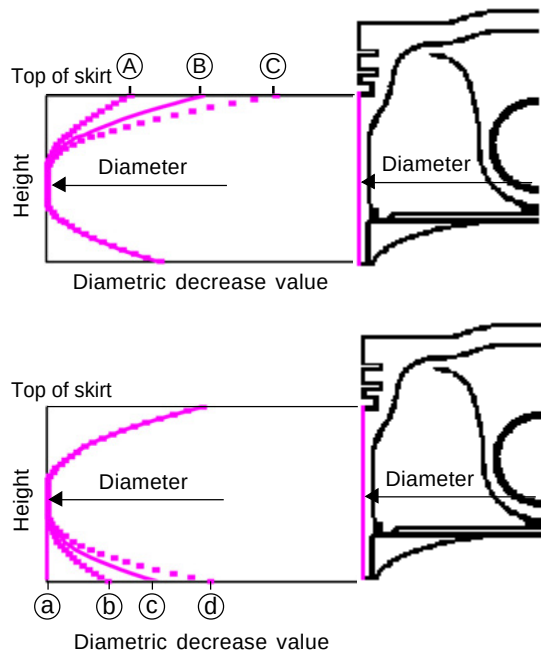


Fig.5 Skirt profiles

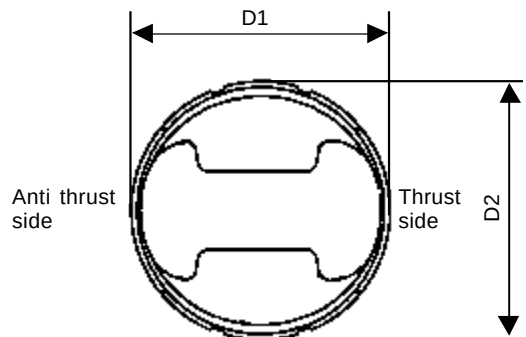


Fig.6 Piston skirt ovality (D1-D2)

ストンを用いてシリンダ振動の測定を行った。なお、スカートプロフィールは、直径減少量で表わす。

ピストンピンオフセット量を拡大することにより膨張行程では、剛性の低いスカート下端から衝突するため、スラスト側の振動を低減することが可能である。ただし圧縮行程では、ピストンピンまわりのモーメントが増大することにより反スラスト側の振動が悪化する。聴感においても低温域のガラガラ音が改善するのに対し、暖機過程から熱間においてはカタカタ音が悪化する傾向にある (Fig.7)。

Fig.2に示したようにピストン挙動は各工程において各々異なるが、異音の発生ポイントはスカート上部がシリンダー内壁に衝突する時である。このため、スカート上部のプロフィールがピストンスラップに与える影響は大きく、特にスカート上端から衝突する反スラスト側の振動が大きく変動する (Fig.8)。また、スカート下端から衝突するスラスト側の振動は、スカート下部に適正な減少量を与えることにより、スカート下端からスカート上端への接触をスムーズにし、シリンダ振動の低減を図ることが可能である (Fig.9)。スカート部の楕円量は、シリンダー内壁とピストン間の接触面積に影響を及ぼす。ピス

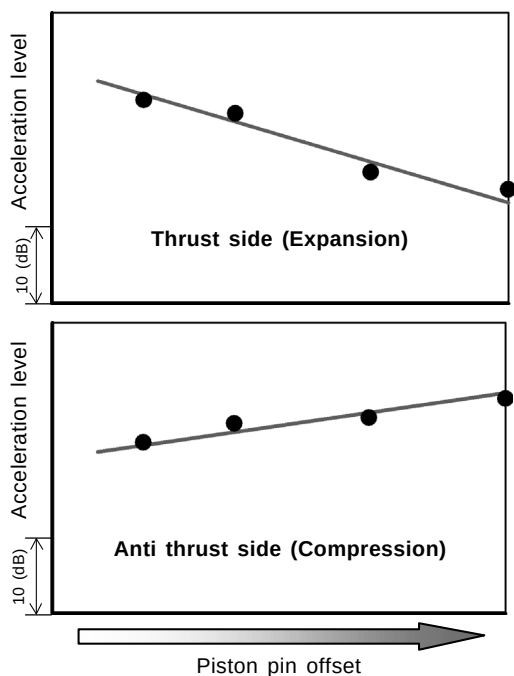


Fig.7 The Influence of piston pin offset to the cylinder vibration

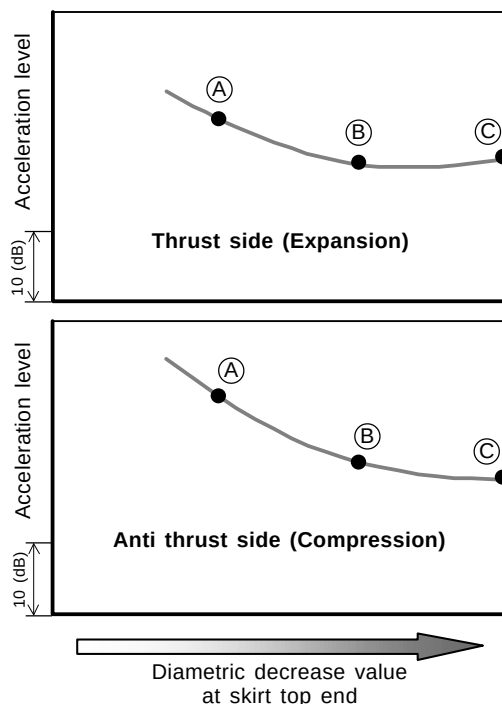


Fig.8 The Influence of skirt top profile to the cylinder vibration

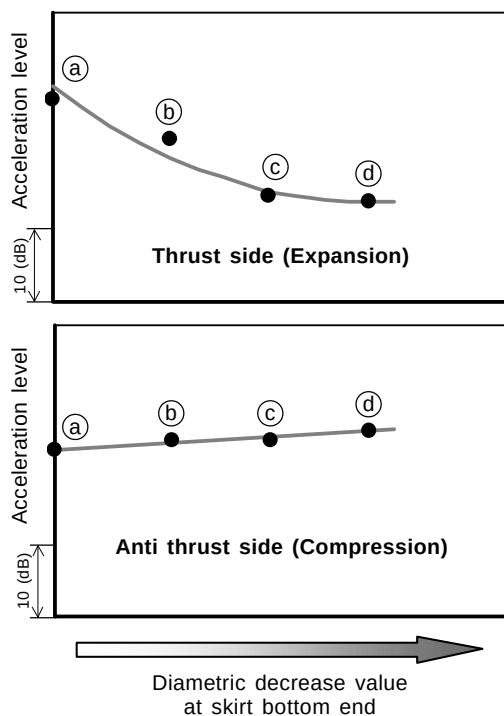


Fig.9 The Influence of skirt bottom profile to the cylinder vibration

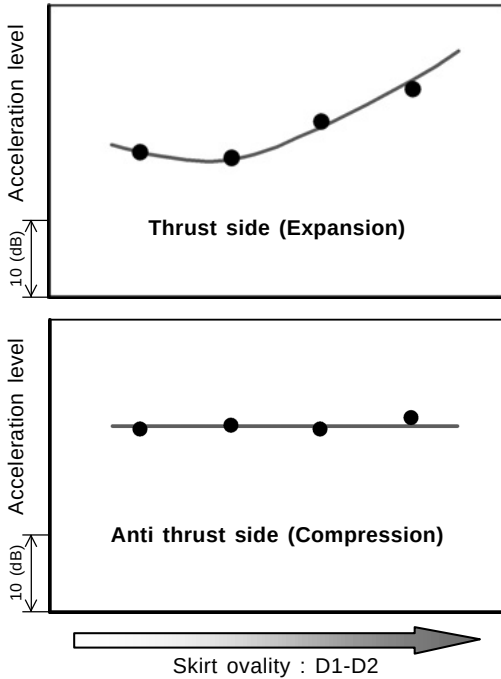


Fig.10 The Influence of skirt ovality to the cylinder vibration

トスラップを低減するためには、適正な接触面積を確保する必要がある。このため、スカート部の楕円量を小さく(真円方向)することによりシリンダ振動を低減することが可能である(Fig.10)。しかしながら、真円化は剛性の高いピン方向の当たりを強めることから、焼き付きに対する考慮が必要である。ピストン諸元の適正值はスラスト側と反スラスト側の振動では異なると考えられる。

#### 4. ピストンの熱変形

エンジン実働時におけるピストンは、燃焼及び水温・油温の影響を受け複雑に変形する。ピストンスラップの低減を図るには、実働状態におけるスカート形状を適正化する必要がある。このため、スカートプロフィールの値を設定する場合、熱変形を考慮しなければならない。

実働状態におけるピストンの熱変形を予測するには、ピストンの温度分布を調べる必要がある。このため、Fig.11に示すようにピストン各部に温度センサを埋め込み、そのケーブルをリンク機構により外部に取り出し測定を行った。

Fig.12に測温結果と、それを基に得られた温度分布シ

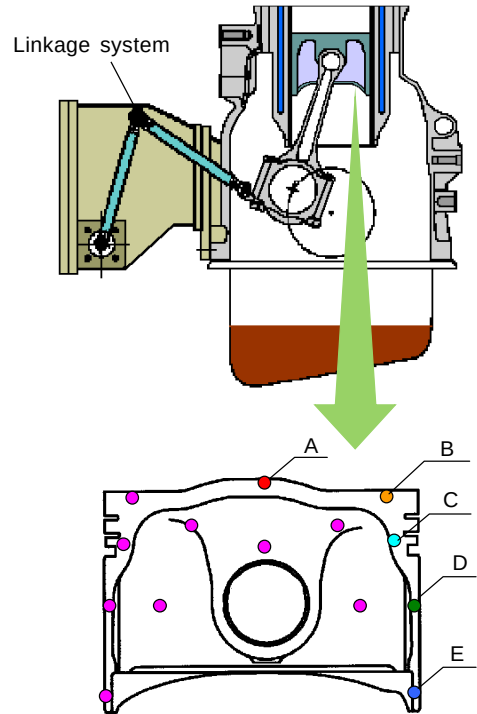


Fig.11 Linkage system and measuring points of temperature

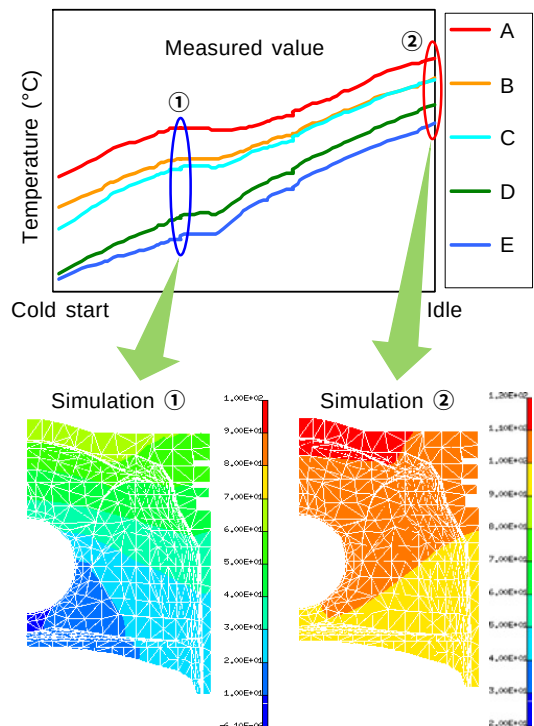


Fig.12 Temperature distribution

ミュレーションの結果を示す。また、Fig.13に熱変形シミュレーションの結果を示す。熱変形シミュレーションの妥当性についてはFig.14に示すピストン単体加熱法を用いることにより検証を行なった。

エンジン実働時におけるピストンは、燃焼により加熱されるスカート上部とウォータージャケット内冷却水の影響を受けるスカート下部では膨張量が異なる。この傾向は、熱間アイドルよりも燃焼指圧が高く、しかも水温及び油温が低い状態にあるファストアイドルの方が顕著である。

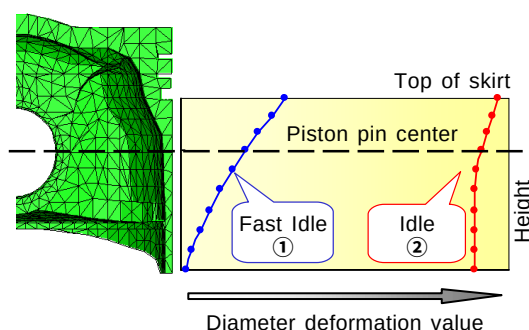


Fig.13 Simulation of thermal deformation

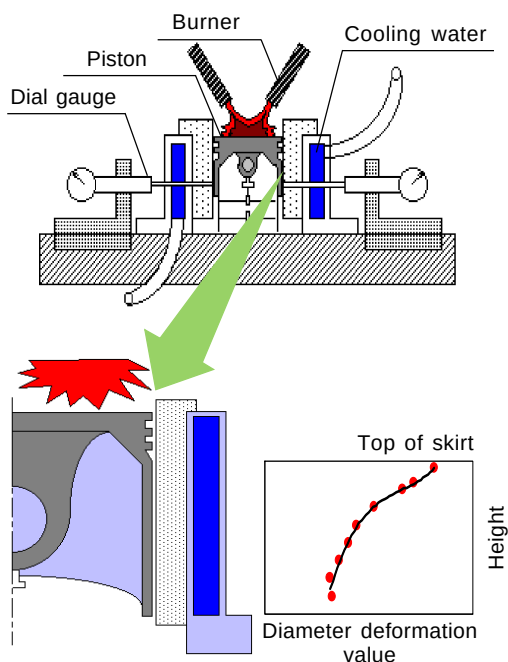


Fig.14 Measuring instrument of piston thermal deformation

前述より、ピストンスラップを低減するには、スカート上部と下部の膨張量の違いを考慮し、スカートプロフィールの設定を行うことが重要と考えられる。

## 5. ピストン挙動シミュレーション

ピストンピンオフセット、スカートプロフィール、楕円量は、ピストンスラップ低減の重要な設計諸元であるばかりでなく、オイル消費や焼き付き等に対してもその影響は大きい。また、乗用車用のエンジンは高出力、低燃費が強く求められており、これらの性能と密接な関係があるピストンは、さらなる軽量化を必要とされている。しかしながら、ピストンの軽量化は振動騒音や信頼性に対しては相反する点も多く、そのため、ピストンの設計はますます難しくなっている。

エンジンに求められる諸性能を満足し、かつ静粛性を確保出来るピストン諸元を早期に見出すには、精度の高いピストンスラップの予測技術が必要である。以下に二次元ピストン挙動モデルを用いた結果を述べる。

Fig.15にシミュレーションモデルを、Table 2に入力内容を示す。解析には、汎用機構解析ソフト“ADAMS”を用いた。ピストン部分は、ピストンの慣性質量を有する剛体と、スカート部の剛性、減衰を表わす複数の分割されたバネ、ダッシュポットにより構成される。これによりスカートプロフィールの設定及び、ピストンの側圧による変形を考慮可能としている。一方、シリンダ側はボア歪み等による細かいクリアランスの設定及び、ピストン衝突時の力を検出するためのダミー要素を配した。また、ピストンスラップの評価を加速度で行うため、一自由度のマスーバネ系を簡易ライナーモデルとして設置し、スラップ時に生じる衝突力の総和を入力することにより応答を得ている。

Fig.16、Fig.17にシミュレーションと実測の比較を示す。二次元シミュレーションは、ピストンの形状や剛性及びシリンダ側が簡易的な構成であるため、絶対値については一致しないものの、ピストンの熱変形を考慮することにより各パラメータの変化に対する振動の増減傾向については精度よく一致しており、ピストンスラップ対策の指針として有用である。

Table 2 Input data

|                | Contents                                                                                                       |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Engine         | Bore/Stroke, Engine speed, Bank angle, Cylinder pressure                                                       |
| Piston         | Mass, Piston pin offset, Clearance, Center of gravity point, Skirt profile, Skirt stiffness, Thermal expansion |
| Connecting rod | Length, Mass, Inertia moment, Center of gravity                                                                |
| Piston pin     | Mass, Outer diameter                                                                                           |
| Piston ring    | Dimensions, Mass, Tension                                                                                      |

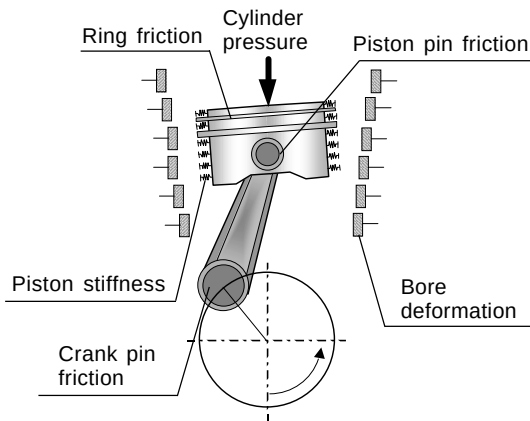


Fig.15 2 dimensional simulation model

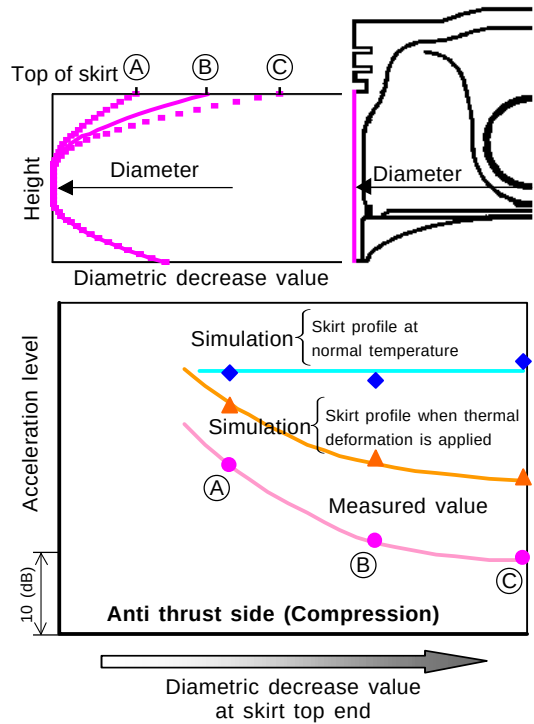


Fig.16 The Influence of skirt top profile to the cylinder vibration

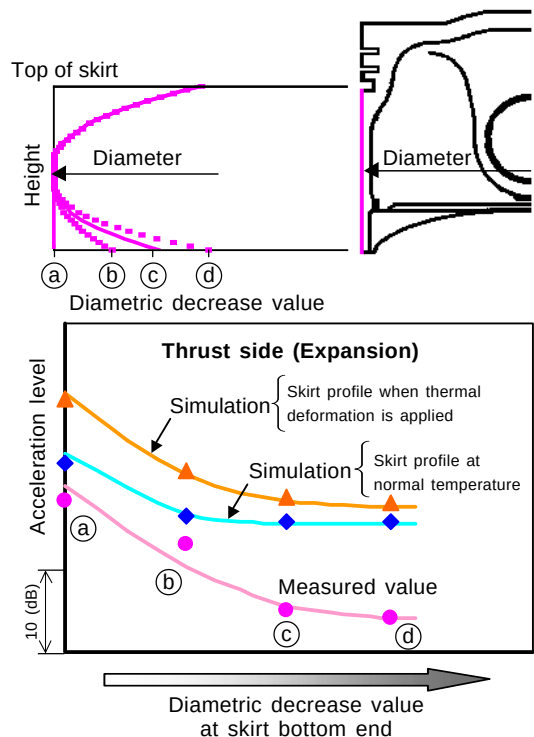


Fig.17 The Influence of skirt bottom profile to the cylinder vibration

## 6. まとめ

FRMシリンダーブロックのピストンスラップについて計測解析を行い、冷間から熱間において発生するスラスト側と反スラスト側のシリンダ振動とピストンスラップの関係を明らかにした。

また、ピストンスラップとピストン諸元の関係を調べると共に二次元ピストン挙動シミュレーションを実施した。その結果、熱間時のスカートプロフィールを取り入れて計算することによりシリンダ振動の増減を精度良く予測できることを確認した。

今後は、ピストン挙動シミュレーションのさらなる精度向上を目的として三次元挙動モデルの構築<sup>7)</sup>を推進する予定である。

## 7. 参考文献

- 1) 鳥居 他：ピストン運動解析モデルの開発、自動車技術会 学術講演会前刷集871001,1987
- 2) 岡村 他：ピストンスラップのメカニズムとエンジン騒音について、自動車技術、Vol.42,No.12,1988.
- 3) 末 他：スカート剛性を考慮したピストン挙動解析、自動車技術会論文集 No.44,1990
- 4) 瀧口 他：ピストンおよびシリンダ変形のスラップ騒音に対する影響、自動車技術会 学術講演会前刷集902215,1990
- 5) 竹内 他：ピストンスラップ低減に関する検討、自動車技術会 学術講演会前刷集924066,1992
- 6) 伊藤 他：回転シリンダによる実働中のピストン変形の測定に関する研究、自動車技術会論文集 Vol.25,No.2,1994
- 7) 小林利彰：ADAMSによるピストン挙動シミュレーション、'97ADAMSユーザーコンファレンス,1997

## ■著 者■



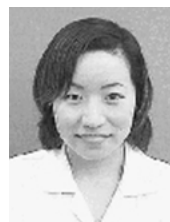
伊 藤 保



伊 藤 保



星 野 守 門



大 林 玲 子



藤 井 誠