

シリンダブロックのメインベアリング部のフレッティング疲労による破損に対する予測および検証手法の開発

Prediction of Fracture of Cylinder Block Main Bearing by Fretting Fatigue and Development of Verification Method

石原 祥道*
Yoshimichi ISHIHARA
山崎 毅幸*
Takeyuki YAMASAKI
羽根田 裕彰*
Hiroaki HANEDA

濱川 丈*
Takeru HAMAKAWA
史 超*
Chao SHI
高橋 伸一*
Shinichi TAKAHASHI

佐藤 謙次*
Kenji SATOH
橋本 尚*
Hisashi HASHIMOTO

要 旨

シリンダブロック開発におけるメインベアリングのフレッティング疲労破損事象に対する、予測手法と検証手法の開発をした。

フレッティング疲労強度は、フレッティングを伴わない場合の材料疲労強度と異なるため、フレッティング発生時の疲労限度線を材料試験片を用いて取得し、実機エンジンでの発生応力に対する評価基準を明確にした。また単体試験機での振幅応力と相対すべり量測定手法を確立させ、実機試験の前段階でフレッティング疲労破損の予測を可能とした。実機での相対すべり量評価においては、単体試験機を用いてひずみ値を相対すべり量に変換する手法を考案することで、実機エンジンでの検証評価手法を確立させた。

ABSTRACT

A method of prediction of the occurrence of fretting fatigue fracture of the main bearing in the cylinder block development process and a method of verification of the results of predictions have been developed.

Because fretting fatigue strength differs from material fatigue strength when fretting does not occur, a fatigue limit diagram when fretting occurs was obtained using material test pieces, and criteria for the evaluation of stress generated in an actual engine were determined. A method of measurement of stress amplitude and relative slip using a unit test apparatus was developed, making it possible to predict fretting fatigue fracture before the stage of tests using actual engines. The development of a method of conversion of strain values determined using the unit test apparatus into figures for relative slip made it possible to formulate a method of evaluation of relative slip in an actual engine.

1. まえがき

世界的に環境意識が高まる中、自動車業界の近年の状況において、燃費向上のためにエンジン部品の軽量化要求が強まってきている。エンジン部品のシリンダブロックの軽量化手法として、クランクシャフトを支持するメインベアリング部のベアリングキャップの独立構造化が挙げられる⁽¹⁾。しかしながら独立ベアリングキャップの構造は、ラダー構造と比較すると締結剛性が低く、ベアリングキャップの合わせ面に微小なすべりが生じフレッティング疲労による破損が発生することがある⁽²⁾。

フレッティング疲労破損とは、表面酸化膜の破壊と凝着事象から滞留した摩耗粉を介し、疲労亀裂の発生、進展が起こる事象として知られている⁽³⁾。シリンダブロックの強度評価において実機エンジンを用いたメインベアリング合わせ面の応力測定をおこなうが、フレッティングによる疲労破損が伴う場合の振幅応力はフレッティングを伴わない材料疲労強度に対し低い値を示すことがある。このため破損の予測が容易ではなく実機エンジンでの耐久試験による確認が必要となっており、シリンダブロックの開発において多くの時間を費やしている。

フレッティング疲労破損の発生メカニズムから Fault

*四輪 R&D センター

Tree Analysis (FTA) で事象を分解すると、主要因として発生応力と相対すべりの2大要因が抽出された⁽³⁾。

本開発では、この2大要因に対する材料疲労強度の確認をおこないフレットング発生時の疲労限度線を取得し、実機エンジンでの検証手法を確立させる。また、単体試験機を用いた試験手法を考案し実機エンジンでの試験前段階での予測手法の確立をおこなう。

2. 開発のねらい

本開発は、シリンダブロック単体試験機を用いたフレットング疲労破損に対する予測手法を確立させることをねらいとした。また、実機エンジンを用いたフレットング疲労破損に対する検証手法についても確立させる。

これらを達成することにより、シリンダブロック開発におけるフレットング破損による開発工数の削減を図る。

3. 材料試験

3.1. 試験のねらいと試験方法

フレットング疲労試験は、日本機械学会基準 (JSME)⁽³⁾ フレットング疲労試験方法に従って実施した。本試験は、試験片にすべりと荷重を同時に付加し材料疲労強度との相関を確認することで、振幅応力と相対すべりの2大要因に対する判定基準を明確にすることをねらいとした。

試験方法を Fig. 1 に示す。試験片 (ADC12) に接触片 (FC250) を押し付けることで、フレットング状態を再現させた。接触部の面圧はボルト締結により付与し、リング状の保持治具のひずみ値から計算した。また、試験片と接触片の相対すべり量は、それぞれに高温用クリップゲージを保持するステーを取り付け、直接計測する手法とした。日本機械学会基準フレットング疲労試験ではクリップゲージでの相対すべり量測定事例が無く、本試験にて考案した手法である。試験片は真空ダイカストにて鋳造した素材を加工して作成した。接触片はシリンダブロックの軸受より切出し、加工して作成した。試験片形状、接触片形状を Fig. 2 に示す。相対すべり量を変化させるため、接触片の幅をそれぞれ 10, 15, 30 mm (Fig. 2 図中の L) としたものを準備した。試験条件を Table 1 に示す。疲労試験は

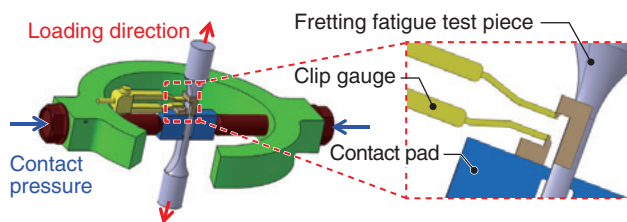


Fig. 1 Fretting fatigue test method

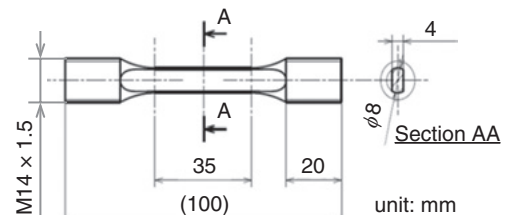
Table 1 Test conditions

Test machine	SERVO PULSER
Test temperature, atmosphere	150°C, air
Test speed	15 Hz
Contact pressure	50, 100, 150 MPa
Number of cycles	Max 10 ⁷

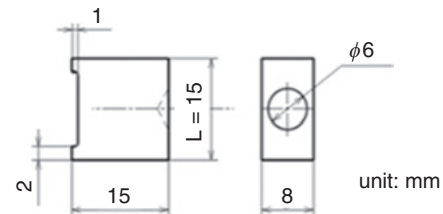
150°C の恒温槽内にて、試験速度 15 Hz の引圧疲労で実施し、最大繰り返し数は 10⁷ 回とした。各条件にて得られた振幅応力と疲労寿命の関係 (S-N 曲線) から、相対すべり量に対する疲労寿命を算出した。試験は破断した時点で終了とし、その繰り返し回数を評価した。

3.2. 試験結果

Fig. 3 に相対すべり量に対する 10⁷ 回での疲労強度の測定結果を示す。相対すべり量と疲労強度には相関関係があり、相対すべり量 15 μm で疲労強度が約 25% 低下する。



(a) Fretting fatigue test piece



(b) Contact pad

Fig. 2 Fretting fatigue test pieces

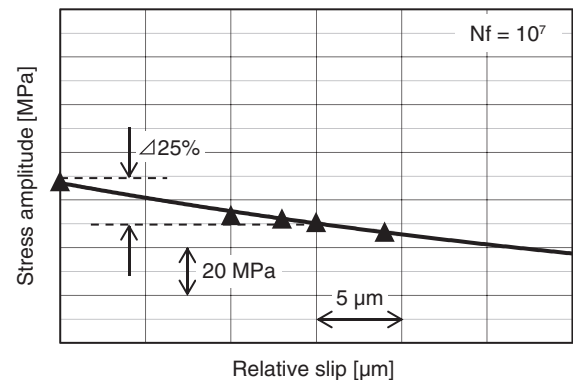


Fig. 3 Relationship between stress and relative slip measurement

本試験により、フレット発生時の応力評価判定値が明確となり、フレット疲労限度線を定義することができた。

4. シリンダブロック単体試験

4.1. 試験のねらいと試験方法

実機のシリンダブロックの一部を切り出し、シリンダブロック単体試験機を製作した (Fig. 4)。

本試験機を用い、シリンダブロック単体のメインベアリングを加振することでフレット現象を発生させ、振幅応力および相対すべり量を測定する。測定結果を材料試験片での単体試験にて取得したフレット疲労限度線にプロットすることで、実機エンジン全部を用いずにフレット疲労破損の予測をすることをねらいとした。

試験装置は、2軸直交系でクランクシャフトを加振するシステムとした。各軸の加振器の振幅、位相を独立制御することで、任意の荷重条件を設定可能とした。

シリンダブロックは、直列4気筒 (L4) エンジンのメインベアリング入力荷重が最も高く、フレット疲労が発生する中央ベアリング部のみに荷重をかけられるよう切出しをおこなった。

振幅応力および相対すべり量測定は、シリンダブロックとメインベアリングの両側面に対向するように等間隔にひずみゲージを貼りつけ実施した。また、ひずみの測定方向はシリンダブロックとメインベアリングの合わせ面に対し平行な方向とし可能な限り合わせ面近傍位置にひずみゲージを貼り付けた (Fig. 5)。

ひずみ測定の結果から振幅応力と相対すべり量を算出した。相対すべり量の算出方法はシリンダブロックのひずみとメインベアリングのひずみの差分を求め、各測定ポイントにおけるひずみ差を積算した値を相対すべり量 S_{Strain} とした。その算出手法を Fig. 6 に示し、計算式を式 (1) に示す。

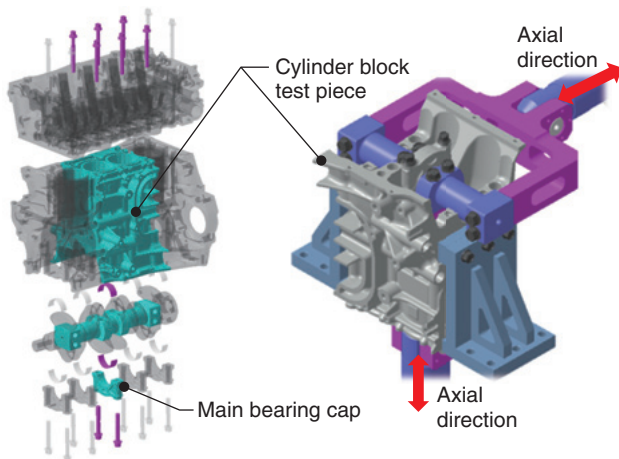


Fig. 4 Test equipment

$$S_{Strain} = \sum (\varepsilon_{Ai} - \varepsilon_{Bi}) \times L \quad (1)$$

測定した振幅応力と相対すべり量をフレット疲労試験にて求めた疲労限度線にて評価するためには、ひずみゲージにて測定した相対すべり量と、フレット疲労試験にて用いたクリップゲージで測定した相対すべり量との相関付けをする必要がある。そのためシリンダブロックおよびメインベアリングにクリップゲージを取付け、ひずみゲージとの同時測定をおこなった (Fig. 7)。クリップゲージとひずみゲージの相対すべり量相関付けをおこなうことで、単体およびクリップゲージをレイアウトすることができない実機エンジンでの相対すべり量の測定をひずみゲージでおこなうことが可能となる。

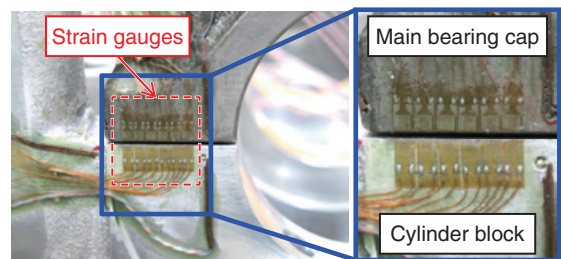


Fig. 5 Cylinder block and main bearing with strain gauges

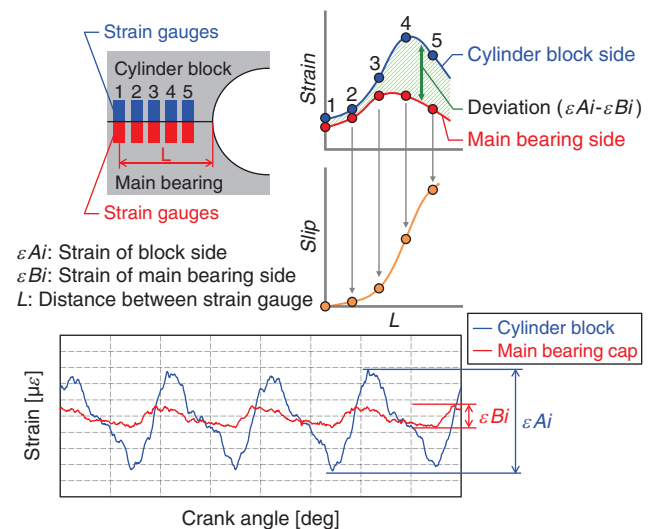


Fig. 6 Method of calculation of slip

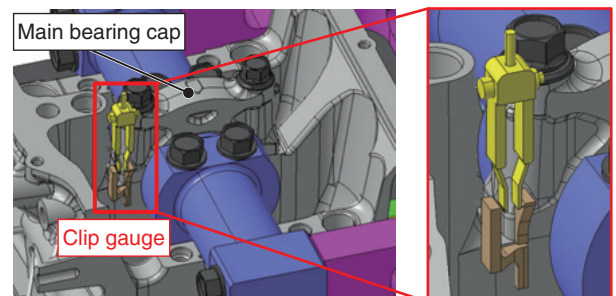


Fig. 7 Test equipment with clip gauge

Table 2 Test conditions

Force amplitude	15 kN
Frequency	100 Hz
Phase difference	90 deg
Bolt axial force	Base: 11% reduction
Stiffness	Base: Width 5% reduction

ひずみゲージにて算出した相対すべり量 S_{Strain} とクリップゲージでの相対すべり量 S_{clip} の相関係数 K を求めた。その相関関係を Fig. 8 に示す。

最終的にクリップゲージを用いた相対すべり量の計算式は式 (2) となる。

$$S_{clip} = \sum (\varepsilon Ai - \varepsilon Bi) \times L \times K \quad (2)$$

4.2. 試験条件および結果

テスト条件を Table 2 に示す。入力荷重は、試験機の水平軸方向と垂直軸方向の2軸から 90 deg 位相違いで荷重を付加した。2軸荷重の合成荷重を発生させることで L4 エンジンでの荷重形態に近似したものを再現させた (Fig. 9)。最大荷重は 15 kN とし、実機エンジンの最大荷重相当とした。

試験はクランクシャフト入力荷重および周波数を固定し、フレット疲労応力に感度があるメインベアリングの締結ボルト軸力とメインベアリングの剛性 (合わせ面幅) 値を変更し実施した。

また、シリンダブロックとメインベアリング合わせ面の表面形状がフレット疲労破損に寄与することが品質工学に基づく試験から明確になっている^{(4),(5)} ため、試験品の試験前表面性状の測定をおこなった。測定は触針式粗さ測定機を使用し、横方向の計測機に縦方向の送り装置を組み込むことにより、測定点群情報をサーフェス化することとした。断面形状測定走査を 140 回おこなうことによ

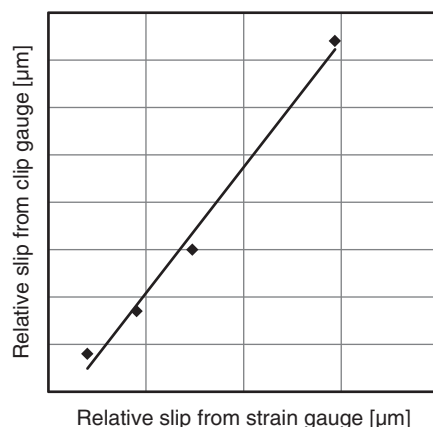


Fig. 8 Relationship between strain gauge and clip gauge

り、面高低差 (面形状) の数値化をした。メインベアリングの表面形状測定結果を Fig. 10 に示す。試験は表面高低差 10 μm をねらい作成したシリンダブロックにて実施した。数値化した表面形状のデータはシミュレーションに取り込むことで、フレット疲労破損のシミュレーションでの予測精度向上につなげている。

振幅応力と相対すべり量の測定結果を Fig. 11 に示す。ベース仕様の試験結果は、振幅応力および相対すべり量は材料試験片での単体試験にて取得したフレット疲労限度線以下の値となり、連続加振による耐久試験においても破損の発生はなかった。メインベアリングのボルト軸力および剛性を低下させた仕様での結果は、振幅応力および相対すべり量はフレット疲労限度線以上の値となり、連続加振による耐久試験にて破損が発生した。軸受部

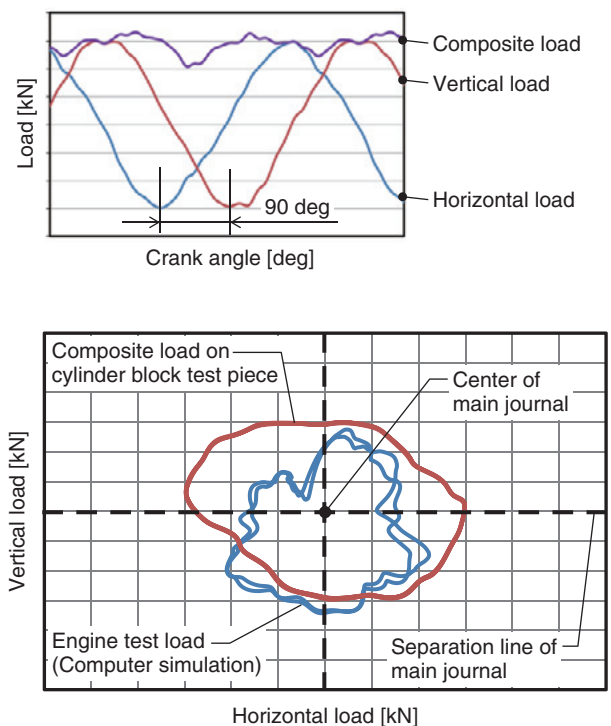


Fig. 9 Cylinder block test piece test loads

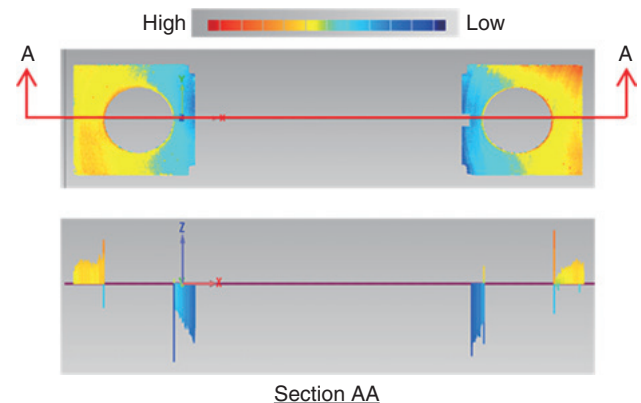


Fig. 10 Surface property from measurements

の合わせ面が黒色に変色していることや、破損の起点が合わせ面にあることから、フレットングによる摩耗が起因となり破損が発生したと考えられる⁽³⁾。フレットング破損による破面の観察結果を Fig. 12 に示す。

本試験手法により得られた振幅応力および相対すべり量とフレットング疲労限度線との関係と、フレットング疲労破損事象の有無に相関があることが確認できた。実機エンジンを模擬した本試験機により、実機エンジンを用いずにフレットング疲労破損に対する予測が可能となったと考える。

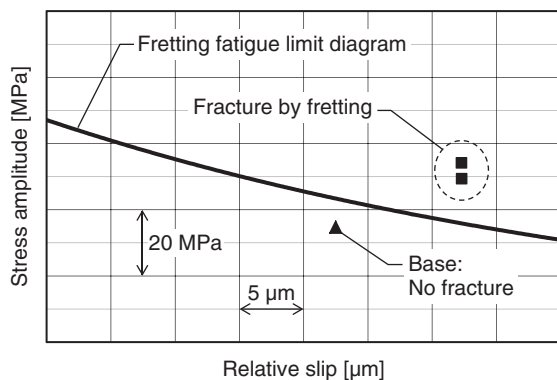


Fig. 11 Results of stress and relative slip measurements

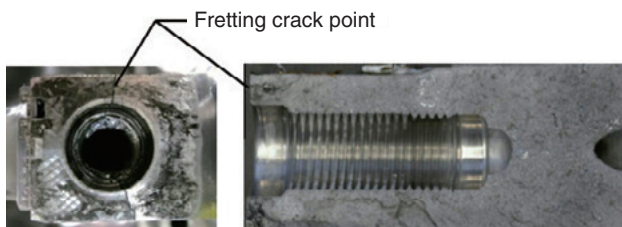


Fig. 12 Results of material inspection after cylinder block test

5. 実機検証手法の確立

5.1. 検証試験条件

実機エンジンにおいてもシリンダブロック単体試験と同様の結果を示すか検証するため、単体試験と同じ測定方法で振幅応力と相対すべり量の測定、および実機エンジンで耐久試験をおこなった。実機エンジンについてはクリップゲージの取付けができないため、ひずみゲージのみによる測定を実施した。

試験条件としては、振幅応力に感度があるメインベアリングの締結ボルト軸力とクランクシャフトの入力荷重値を変更した2パターン実施した⁽⁵⁾。

Table 3 にエンジン試験条件を示す。

Table 3 Test conditions

	Test 1	Test 2
Engine type	1.5 L Engine	Same as left
Oil temp	80°C	Same as left
Water temp	80°C	Same as left
Engine speed	6800 r/min	Same as left
Endurance test time	100 hr	26 hr
Bolt axial force	Base	11% reduction
Force amplitude on crankshaft	Base	56% increase

5.2. 検証試験結果

振幅応力と相対すべり量の測定結果を Fig. 13 に示す。テスト1での結果は、振幅応力および相対すべり量はフレットング疲労限度線以下の値となり、6800 r/minでの耐久試験 100 hr においても破損の発生はなかった。テスト2での結果は、振幅応力および相対すべり量はフレットング疲労限度線以上の値となり、6800 r/minでの耐久試験 26 hr にて破損が発生した。振幅応力および相対すべり量測定結果からも 1×10^6 回から 10^7 回の繰り返し数で破損し推定通りの結果となった。耐久試験後の軸受部の合わせ面状態や破損起点がシリンダブロック単体試験と同様の結果となり、フレットング疲労破損が発生したと考えられる。破面の観察結果を Fig. 14 に示す。

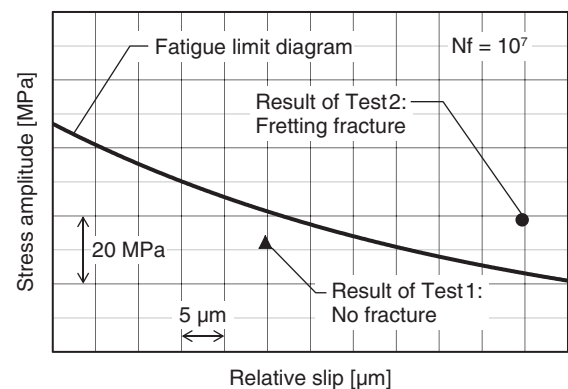


Fig. 13 Results of stress and relative slip measurements

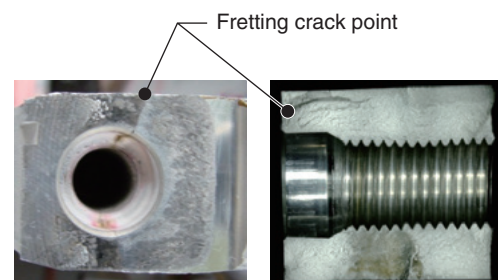


Fig. 14 Results of material inspection after actual engine test

本試験手法により得られた結果は、シリンダブロック単体試験同様の傾向を示しており、実機エンジンでのひずみゲージによるフレット疲労破損に対する評価手法を確立することができた。

6. まとめ

本開発を通じて以下の知見が得られ、シリンダブロック開発におけるフレット疲労破損に対し耐久試験前の予測と検証手法を確立することができた。これによりフレット疲労破損による実機耐久試験の回数を減らし、開発工数削減が可能となった。

- (1) 材料試験片での単体試験にてフレット発生時の相対すべり量 $15\ \mu\text{m}$ で疲労強度が約 25% 低下することがわかり、フレット疲労限度線を定義することができた。
- (2) 実機シリンダブロック切出し品を用いた単体試験にてフレット疲労破損に対する評価が可能となり、実機耐久試験前の予測が可能となった。
- (3) 実機エンジンにてひずみゲージによるフレット疲労破損に対する評価を確立し、簡易かつ短時間にて検証することが可能となった。

参考文献

- (1) 鈴木雅樹, 早川修一, 石原祥道, 進藤俊洋: 小型車用新 L4 ガソリンエンジンの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, NO. 91-14, p. 9-12, (2014)
- (2) Cha, S., Chang, H., Lee, K., Cho, S., Hwang, D.: A Development of the Fretting Fatigue Analysis Techniques for Engine Aluminum Block, SAE Int. J. Mater. Manuf. 4(1), p. 7, (2011)
- (3) 日本機械学会: 日本機械学会基準 S015 フレット疲労試験方法 (改訂版), 90p., (2009)
- (4) 田口玄一: ロバスト設計のための機能性評価—効率的開発の方法, 日本規格協会, 351p., (2000)
- (5) 濱川丈, 佐藤謙次, 山崎毅幸, 史超, 橋本尚, 羽根田裕彰, 高橋伸一, 石原祥道: 軸受のフレット疲労破損予測技術の開発, 自動車技術会学術講演会講演予稿集, No. 46-15A, p. 1107-1112, (2015)

■ 著 者 ■



石原 祥道



濱 川 丈



佐 藤 謙 次



山 崎 毅 幸



史 超



橋 本 尚



羽根田裕彰



高 橋 伸 一