

めねじ谷底部を含むクランクケース全体に対する疲労強度評価技術の確立と製品開発への適用例

Establishment of Prediction Technology of Fatigue Strength in Roots of Internal Thread for Crankcase Assembly and Application in Product Development

栗原 博*

Hiroshi KURIBARA

齋藤 秀輝*

Hideki SAITO

齋藤 淳也*

Junya SAITO

関谷 大輔*

Daisuke SEKIYA

要 旨

モータサイクルのエンジンに広く採用されるアルミニウム合金製クランクケースでは、試作段階での耐久テストにおいて、シリンダヘッド締付ボルトやクランクシャフトのメイン軸受締付ボルトのめねじ谷底部に疲労破損が発生することがある。従来は、めねじ谷底部の疲労強度は机上での絶対値評価が困難であったため、疲労強度評価はエンジン実機を用いた耐久テストに頼らざるを得なかった。本研究では、主要なボルトのめねじ部を含むクランクケース全体の疲労強度を FEM 解析により机上評価する技術を構築した。おねじとめねじの形状や接触特性を考慮した大規模 FEM モデルに対し並列計算処理をおこなうことで、計算精度、計算時間ともに実用性を見出した。本手法を製品設計に適用した事例より、ボルト締結部周辺の形状やボルト先端部の形状を工夫することで、質量を増加させることなくクランクケースのめねじ谷底部の疲労強度を向上できることが示された。

ABSTRACT

Aluminum alloy crankcases are generally used in motorcycle engines. Fatigue fractures sometimes occur in the roots of the internal threads of the cylinder head fastening bolts and the crankshaft main bearing fastening bolts in durability tests in the prototype stage. Conventionally, theoretical evaluation of absolute values of fatigue strength in the roots of the internal threads was a challenge, so evaluation of fatigue strength had to rely on durability tests using actual engines.

This study developed technology that uses FEM analysis to theoretically evaluate the fatigue strength of the entire crankcase, including the internal thread portions of the main bolts. This technology performs parallel calculation processing on a large-scale FEM model that takes into account the forms and contact characteristics of the external and internal threads, and was found to be practical in terms of both calculation accuracy and calculation time. Examples of applying this new method to product design showed that fatigue strength in the roots of the internal threads for crankcase assembly can be enhanced without increasing the weight, by modifying the form around the bolt fastening area and the form of the bolt tip.

1. はじめに

モータサイクルでは主に軽量化の観点からアルミニウム合金製のクランクケースを採用するが、このようなエンジンに特有な問題として、シリンダヘッドスタッドボルトやクランクシャフト主軸受の締付ボルトといった高軸力ボルトの締結部のめねじ谷底部からの疲労破損がある。おねじ、めねじともに鋼製の場合、締結部の破損は一般的にボルトフランジの首下フィレットや、めねじとかがっていないおねじのねじ谷底部より発生するが、鋼製のおねじを材料強度の劣るアルミニウム材のめねじに締め付ける場合に

はめねじ側が破損の起点となる場合がある。Fig. 1 に試作段階の耐久テストにて発生するめねじ谷底部からのクラックの発生部位を示す。起点はおねじのかかり終わりのめねじの谷底部であり、クラックの破面は疲労破面を呈する。

耐久テストの削減による環境負荷低減と製品開発コストの削減への要望より、製品開発プロセスにおける机上性能評価技術の重要性はより高まっている。複雑な形状を持ちながら、軽さと耐久性の高次元でのバランスが要求されるクランクケースの設計では、設計初期段階における FEM 解析を用いた疲労強度評価は有益かつ必須の手段である。

しかし、従来締結部の疲労強度評価については、その形

*二輪 R&D センター

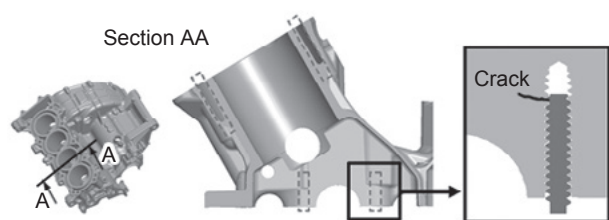


Fig. 1 Location of starting point of fatigue fracture at internal thread

状の微細さと接触状態の複雑さから評価対象部位から外さざるを得ず、クランクケースのめねじ谷底部の強度評価はエンジン実機を用いた耐久テストで評価されていた。締結部の応力解析に関する研究⁽¹⁾⁻⁽³⁾は多くなされているが、製品形状全体の疲労強度評価を目的とした実用的な研究は稀である。本研究では、締結部周辺やその内部を含む、クランクケース全体での疲労強度評価技術を構築した。

2. ボルト締結部を含めたクランクケースの疲労強度評価技術の構築および妥当性の検証

技術構築までの三つの過程を次に示す。

STEP 1: 締結部応力解析 FEM モデルの構築

締結部に着目したテストピースによるめねじ谷底、およびめねじ抱き肉部外表面のひずみ計測と、これを模擬した FEM モデルでの応力解析を実施し、これらの相関性を検証することにより、締結部に対する応力解析のための高精度なモデル化手法を構築した。

STEP 2: クランクケース全体の応力解析 FEM モデルの構築

STEP 1 で構築した締結部解析モデルを組み込んだクランクケース全体の応力解析モデルを構築した。実機エンジンを用いたひずみ計測を実施し、クランクケース全体の応力分布の再現性についてモデルの妥当性を検証した。

STEP 3: 疲労安全率の算出手法の構築

エンジンの組立工程および運転時に発生する応力履歴と、材料強度より、締結部を含むクランクケース全体の疲労安全率を算出する手法を構築した。

2.1. 締結部周辺の応力解析モデルの構築

2.1.1. めねじ谷底の応力解析モデルの構築

締結部の特性を詳細に考慮した FEM モデルを構築した上でこれと等価な実測テストをおこない、それぞれの結果を比較することにより、提案するモデルの妥当性を評価する。FEM モデルの概要を Fig. 2 に示す。モータサイクルの主要ボルトは M6-M12 ボルトを用いることが多いが、精度が良いひずみ計測が困難であるため、ボルト呼び径は $\phi 64$ とした。また実際のボルトはらせん形状であるが、めねじ谷底部のクラックの発生に対しては、ボルトの

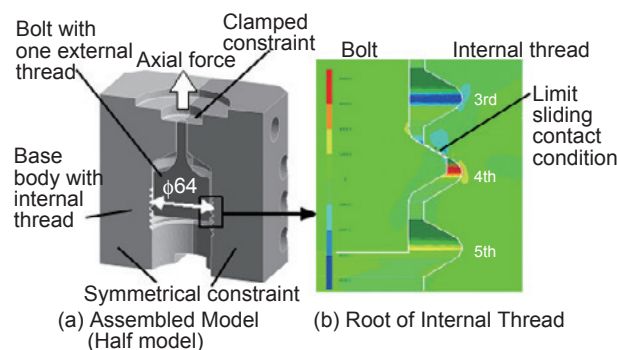


Fig. 2 FEM model for strain analysis at root of internal thread

リード角を持った接触により発生するリード方向の荷重の影響は十分小さく無視できると仮定し、本研究ではねじ形状については軸対称形状のモデルを採用した。ボルトは鋼製で一山のおねじを持ち、めねじ側はアルミニウム製のブロックに七つの谷が形成され、上から四つ目の谷部におねじを挿入し軸力を負荷する。部品同士が接触する部位については、おねじとめねじの接触面間での荷重と滑りの挙動を再現するために有限すべり摩擦モデルを採用した。各 부품の形状、材料特性についてはテストピース実物からの計測値を用いた。

めねじ谷底のひずみ計測用のテストピースの形状とひずみ計測の手順を Fig. 3 に示す。最初に、テストピースを分割した状態でめねじ谷底にひずみゲージを貼り付ける。続いて、ボルトをめねじ部に挿入した状態で二つのボデーをボルトで締結する。最後に、おねじ上部に切られたねじにナットを締めることにより、軸力とめねじ谷底のひずみを計測する。めねじ谷底のひずみ評価位置を Fig. 4 に示す。応力評価位置は、軸方向に対してはおねじのかかっている谷底とその上下の谷底とし、円周方向に対しては角度違いで三箇所とした。ひずみの計測方向は実測、FEM とともに、谷底フィレットに沿わせたボルト軸方向とした。

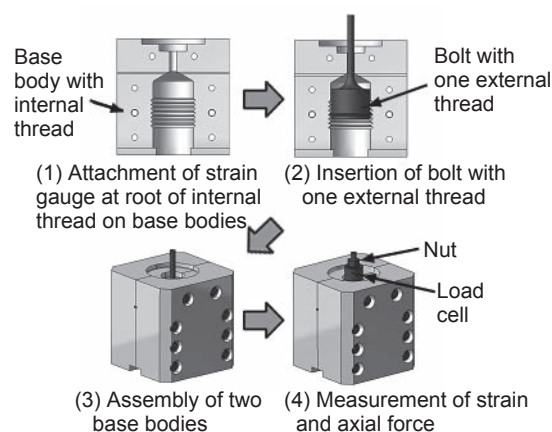


Fig. 3 Measurement sequence for strain at root of internal thread

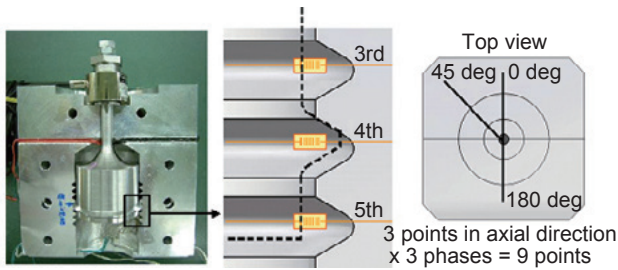


Fig. 4 Measurement point for strain at root of internal thread

FEM モデルでの解析結果と、実測結果のめねじ谷底のひずみ値を比較したものを Fig. 5 に示す。実測結果より、ボルトのおねじがかかっているめねじ部と、その上下のめねじ部での応力分布、定量値ともに良い精度で一致しており、本研究で提案するモデルの妥当性が確認できた。

2.1.2. めねじ抱き肉外表面の応力解析精度検証

クランクケースの疲労強度を評価する上では、高軸力が作用するボルトのめねじ谷底だけではなく、その周辺の応力状態も精度良く再現する必要があるため、めねじ抱き肉外表面のひずみに対する実測・シミュレーションの相関検証を実施した。めねじ抱き肉外表面のひずみ計測用のテストピースを Fig. 6 に示す。テストピースは三本の柱を持ち、中央の円柱にめねじが形成されており、柱の表面に軸方向にねじのピッチに合せた間隔でひずみゲージが貼り付けられている。このテストピースに対しスペーサを挟み込み、軸力を与えることによりめねじ抱き肉外表面のひずみを計測する。テストピースでの実験を模擬した FEM モデルの概要を Fig. 7 に示す。モデル化の手法はめねじ谷底部の応力解析モデルと同様とした。

実測により得られためねじ抱き肉外表面のひずみ値と、FEM モデルでの解析により得られたひずみ値の比較を Fig. 8 に示す。ねじ底部のひずみだけでなく、ねじ抱き肉外表面のひずみ分布についても実測結果とシミュレーション結果はよく一致しており、本研究で提案するモデルの妥当性が確認できた。

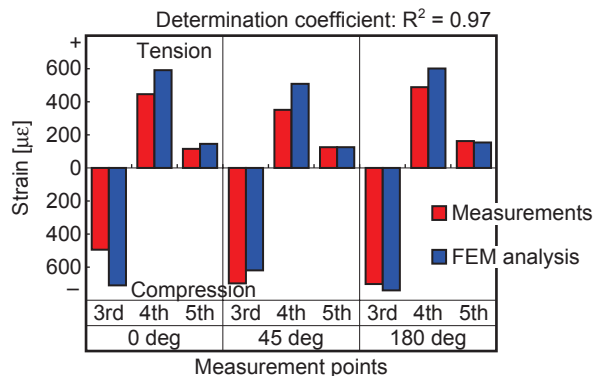


Fig. 5 Strain at root of internal thread: Measurements vs. FEM analysis

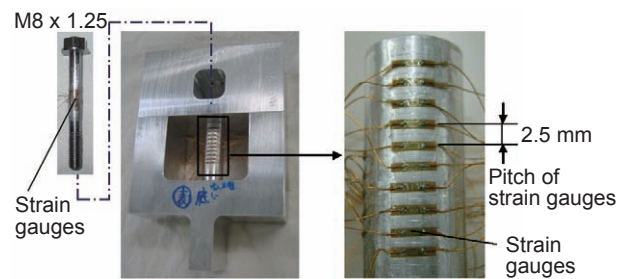


Fig. 6 Test piece for measurement of strain at external surface of bolt fastening area

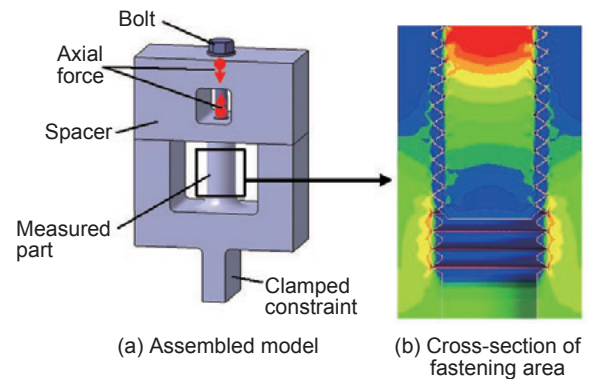


Fig. 7 FEM model for strain analysis at external surface of bolt fastening area

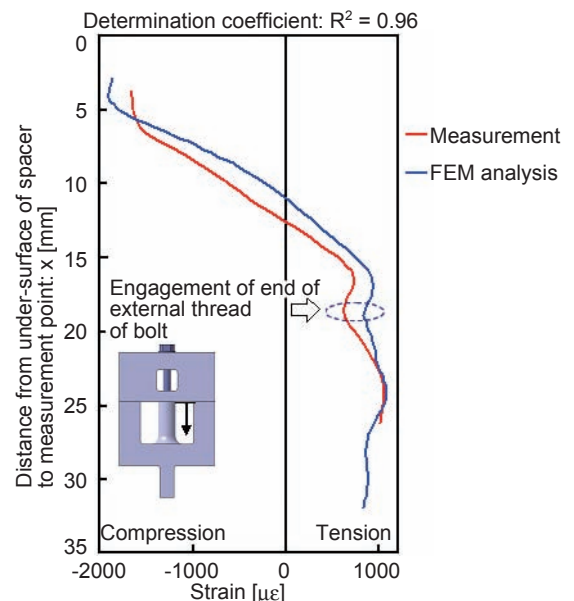


Fig. 8 Strain at external surface of bolt fastening area: Measurements & FEM analysis results

2.2. クランクケース全体の応力解析モデルの構築

2.1. 節で説明した締結部モデルをクランクケースのスタッドボルト締付めねじ部に組み込んだ、クランクケース全体での応力解析モデルを構築する。単気筒エンジンを対象とした場合を例としてモデルの概要と解析の流れを Fig. 9 に示す。

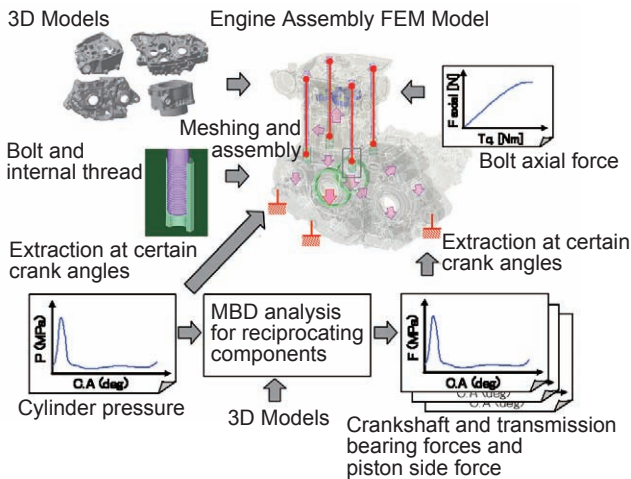


Fig. 9 Stress analysis model for entire crankcase

エンジン運転時のクランクケースには、主に（１）鋳造、熱処理、機械加工の過程で発生する残留ひずみ、（２）エンジンの組立過程に発生するひずみ、（３）燃焼指圧荷重やクランクシャフト、トランスミッション等の各軸受反力により発生するひずみ、（４）エンジンの慣性運動の支持によりエンジンマウント近傍に発生するひずみ、（５）温度分布の不均一性や構成部品間での線膨張係数の差に起因して発生するひずみ、などがある。今回はめねじ谷底の応力状態に対し特に大きな影響を与える（２）（３）に着目し、荷重としては、スタッドボルトの軸力、燃焼指圧、ピストンスラスト力、クランクシャフト主軸受、およびトランスミッション軸受の軸受荷重、一軸一次バランスの軸受荷重を考慮した。

FEM モデルを構成する部品については、評価対象であるクランクケースに加え、（２）（３）の荷重の授受に必要な部品を選択し、モデルに組み込んだ。またクランクケースの材料特性については、部品から切り出したテストピースの引張試験により計測した応力ひずみ曲線を用いた。

荷重条件の定量的な値については、Fig. 9 に示すように、シリンダヘッド締付ボルトの軸力値と燃焼指圧については実測値を用い、クランクシャフト、トランスミッション軸、バランス軸の軸受荷重については機構解析⁽⁴⁾により得られた計算値を用いた。

ねじの詳細形状を含むエンジンアセンブリでの FEM モデルは要素数も多く、また接触非線形、材料非線形を考慮した計算が必要のため、計算規模は大規模となる。このような大規模モデルでも短時間での計算を可能とするために、ソルバにはパラレル計算ソルバを採用した。エンジンアセンブリモデルの解析規模と概要を Table 1 に示す。大規模な計算でありながらも、設計段階における繰り返し仕様検討が可能な時間での解析を実現している。

解析モデルの妥当性を評価するために、エンジン組立て時および運転時にクランクケースに発生するひずみ値の計測をおこなった。計測に用いたエンジンの写真を Fig. 10 に示す。ひずみ計測位置は、FEM 解析より得られるひずみ

Table 1 Scale of FEM stress analysis model for entire crankcase

Number of elements	10 million elements
Number of contact elements	1 million elements
Minimum mesh size	25 μm
Number of CPUs used in calculation	50 CPUs
Calculation time/One boundary condition	5 hours

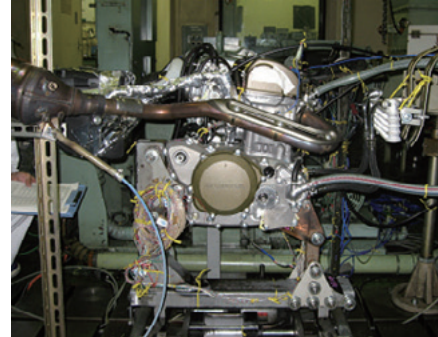


Fig. 10 Engine used to measure strain when assembled and under operating conditions

分布を参考に六箇所決定した。ひずみゲージの貼り付け位置を Fig. 11 に示す。ひずみゲージの貼り付け方向は、最大主ひずみ、または最小主ひずみが発生する方向とした。

スロットル全開、エンジン回転数 6000 r/min で定常運転した際の、指圧最大となるクランクアングル 16 deg での、各点でのひずみ計算結果と、ひずみ測定結果の相関を Fig. 12 に示す。ここで示したひずみ値は、軸力の影響により発生するひずみと、指圧荷重や各軸受荷重の影響によりエンジン運転時に発生するひずみの和である。実測のひずみデータについては、指圧のサイクル変動の影響を排除するために 10 サイクル分のひずみ測定結果を平均化した。

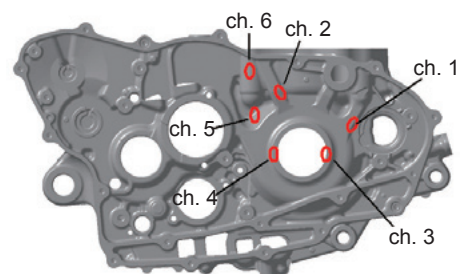


Fig. 11 Locations for attachment of strain gauges

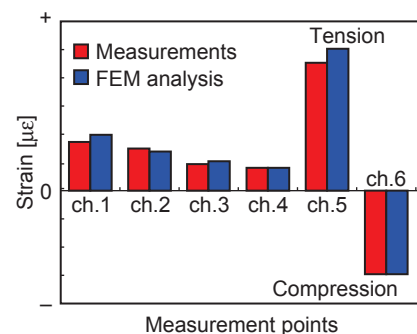


Fig. 12 Strain at points of attachment of gauges on crankcase: Measurements and FEM analysis results

FEM モデルによる解析結果と実測結果を比較すると、エンジン組立て時、運転時ともに大きな引張荷重の作用する ch.5 が両結果ともに応力最大部位となった。ch.6 についてはスタッドボルトのかかり位置よりヘッド側にひずみゲージを貼り付けたため、応力値は高い圧縮応力を示す結果となった。その他 ch.1～4 については、燃焼指圧とクランクシャフト主軸受の軸受荷重の引張内力の範囲内となるため、燃焼タイミングに同期して引張ひずみが発生する結果となった。

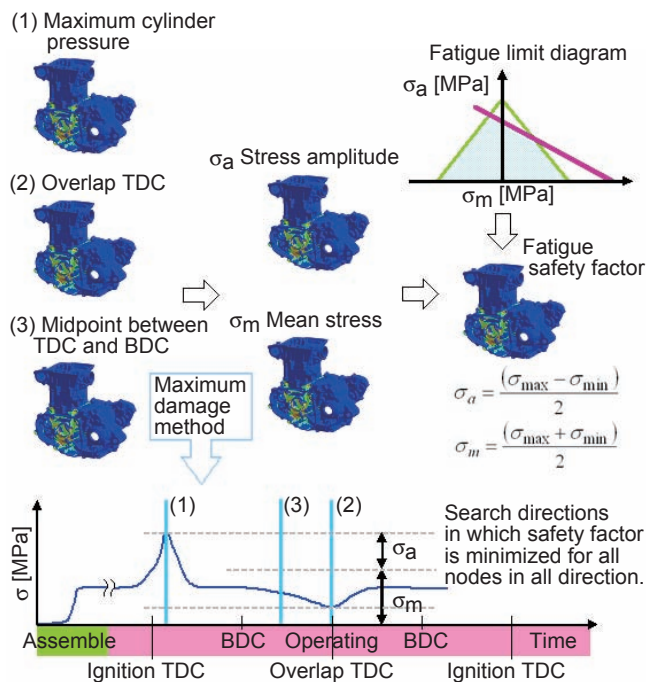
実測とシミュレーションの結果を比較すると、定性的、定量的に高い相関性があることが確認され、エンジンアセンブリ FEM モデルの妥当性が検証された。

2.3. 疲労安全率の算出と疲労強度評価

クランクケースの疲労強度の評価をおこなうためには、一荷重状態に対する応力値ではなく、エンジン運転時における応力の変動と、材料の疲労強度特性を考慮した疲労評価が必要である。

本研究では、複数のクランクアングルでの静的応力解析の結果をもとに、平均応力、応力振幅を算出し、強度判定指標として修正グッドマンの疲労限度線図を用いることで疲労安全率を算出する疲労強度評価方法を採用した。疲労安全率算出までの流れを Fig. 13 に示す。

一定速度での耐久試験を想定する場合を例にとると、クランクケースの疲労強度に影響を与える特徴的な応力状態として、(1)燃焼指圧ピークでの荷重状態、(2)ピストンが吸気前上死点にあり、レシプロ系の上死点側慣性力が最大となる荷重状態、(3)ピストンが上下死点の中心近くにあり、クランクシャフト主軸受荷重が最小となる状態、の3



条件での応力解析を実施し、これらの解析結果に対し一連の疲労計算処理をおこなうことでクランクケース FEM モデルのすべてのノードにおける疲労安全率が算出される。

この処理により Fig. 13 に示すようにクランクケース各部の疲労安全率や応力分布が可視化され、強度判断が容易になるのみならず、強度が不足している場合や、軽量化する際の形状検討の材料としての活用も可能となる。

3. 本技術の製品開発への適用例

本解析手法を用いて、めねじ谷底部の強度検討をおこなった事例を二例紹介する。

3.1. 先端穴あきスタッドボルトによるめねじ谷底クラックの防止

めねじ谷底部の疲労強度を向上させる工夫として Fig. 14 に示すようなボルト先端の中空化があり、実際にクランクケースの疲労強度が向上することが耐久テストにて確認されている。ボルト先端の中空形状の有無以外はすべて同条件として、中空形状の効果を調査する解析をおこなった。単気筒エンジンの一本のヘッド締付ボルトに着目し、めねじ谷底部分での平均応力、応力振幅の状態をめねじ谷底一周にわたって疲労限度線図上にプロットしたものを Fig. 15 に示す。中空ボルトを採用することで、めねじ谷底部の平均応力、振幅応力が低減されていることがわかる。中空ボルトの効果については、従来は実験的な効果のみが確認されていたが、本技術を用いることで、効果の定量的な評価が可能となった。

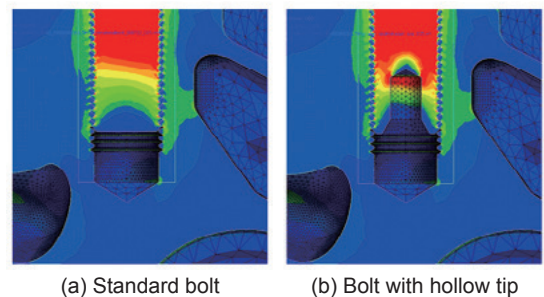


Fig. 14 Form of hollow cylinder at tip of bolt

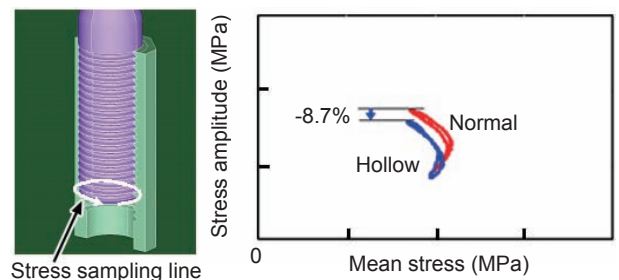


Fig. 15 Reduction of stress at root of internal thread using bolt with hollow cylinder at tip

3.2. クランクケースの形状変更によるめねじ谷底クラックの防止

ボルトの形状変更だけでなく、クランクケースのスタッドボルト周辺部の形状を工夫することにより、めねじ谷底部の疲労強度を向上させた一例を示す。スタッドボルト近傍の形状が異なるクランクケース A, B に対する応力解析をおこない、めねじ谷底部の疲労強度を比較した。耐久テストの結果より、クランクケース B は、クランクケース A に対し高い疲労強度を有することが明らかになっている。

軸力や軸受荷重については同じ条件を用いてクランクケース A, B を組み込んだエンジンアセンブリモデルの応力計算および疲労評価処理を実施し、ねじ底部一周にわたって平均応力と振幅応力をプロットしたグラフを Fig. 16 に示す。クランクケース A に対し、クランクケース B のねじ底部の平均応力、振幅応力は低減されており、その効果は中空ボルトを用いた場合よりも大きい結果となった。スタッドボルト締結部周辺形状の設計段階での工夫は、設計自由度も大きく、またコストや質量の増加もないため、効率的であるといえる。

以上の例が示すように、本技術の確立により、軽さと必要十分な疲労強度を持つクランクケースの効率的な設計が可能となった。

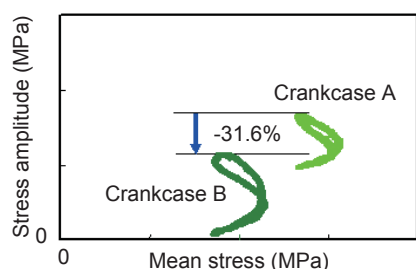


Fig. 16 Reduction of stress at root of internal thread by changing form around bolt fastening area

4. 結論

- (1) シリンダヘッド締付ボルトやクランクシャフト軸受部締付ボルトのめねじ谷底部の疲労強度の評価が可能、クランクケース全体に対する疲労強度評価技術を構築した。
- (2) 設計段階におけるめねじ谷底部を含むクランクケースの定量的な強度評価が可能となったことで、構造や形状の工夫により質量増加とコスト増加を抑え、かつ効率的なクランクケースの設計が可能となった。

参考文献

- (1) 福岡俊道, 山崎直樹, 北川浩, 浜田実: ねじ谷底の応力集中 (谷底の丸みおよび摩擦係数の影響), 日本機械学会論文集 (A 編), 52 巻, 481 号, p.2201-2208(1986)
- (2) 福岡俊道, 野村昌孝, 森本雄哉: ねじ山らせん形状の高精度なモデリングと有限要素解析, 日本機械学会論文集 (A 編), 72 巻, 723 号, p.1639-1645(2006)
- (3) 梶井秀斗, 池田聡, 田上実秋, 牛嶋研史, 高橋直樹: エンジン実稼動時のボルトねじ部の応力解析手法, 自動車技術会 2009 年学術講演会前刷集, No.99-09, p.13-16(2009)
- (4) Niino, T., Iwamoto, T., Ueda, S.: Development of simulation technology for dynamic behavior of crankshaft systems in motorcycle engines, JSAE Review, Vol.23, p.127-131(2002)

■ 著 者 ■



栗原 博



齋藤 淳也



齋藤 秀輝



関谷 大輔