

小型エンジン開発における熱応力解析の適用

Application of Thermal Stress Analysis to Small Engine Development

鈴木 大介*

Daisuke Suzuki

吉村 昇一**

Shoichi Yoshimura

安藤 剛廣***

Takehiro Ando

要旨

ヤマハ発動機において小型エンジンの開発に有限要素法 (FEM) による熱応力解析を適用した事例を示す。それは、シリンダヘッドの熱変形解析によりバルブシートの熱変形量を明らかにし、バルブの着座衝撃による異音の発生要因を検討した例。ピストンの熱変形・熱応力解析を実施し、爆発圧力による変形・応力と比較した例。自動車エンジンのエキゾーストマニフォールドに非定常熱伝導解析を用いて熱応力分布の時間変化を求めた例。そして、組立クランクにおける圧入状態をFEMモデルに表現するために熱膨張を利用した例である。熱応力解析に必要な温度分布のデータは熱伝導解析により得ている。最後に、熱応力解析を商品開発に適用する上での問題点を示す。

1 はじめに

ヤマハ発動機の商品である、オートバイ・スノーモービル・自動車エンジン等には、高温（又は低温）かつ温度変化の激しい条件で使用される部品が数多くある。このため、熱的な問題は商品開発において、避けられない重要な課題である。ヤマハ発動機では、この問題を解決するための方策のひとつとして、有限要素法 (FEM) を用いた熱伝導・熱応力解析を実施している。そして、製品の信頼性、快適性、性能の向上に役立てている。

本論文では、熱応力解析を商品開発に適用した事例を幾つか紹介し、その有効性を示す。また、圧入問題に対して圧入締め代を仮想的に熱膨張で表現することにより解いた例も紹介する。

なおFEMの計算には汎用構造解析コードMSC/NASTRANを使用している。

2 FEMによる熱応力の計算方法

一般にはFEMを用いて熱変形・熱応力の計算をする場合、FEMモデルのすべての節点に温度を与える必要がある。これらすべての数値を実測値または理論値から求めるのは無理なので、同一の形状モデルを用いた熱伝導計算を先に行い、各節点での温度を求め、それを熱応力計算の入力値とするのが実用的な手順である。図1に計算処理の流れを示す。

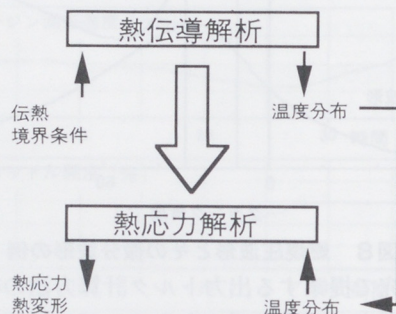


図1 熱応力解析の流れ

3 適用事例

3.1 4サイクルエンジン運転時の

シリンダヘッドの熱変形解析

バルブの着座音はメカノイズの主な要因のひとつである。メカノイズはユーザーにとって好ましくない音（異音）であり商品の快適性を損なう。この異音の対策のために、実車走行時のバルブシートの熱変形、バルブシートとバルブステムガイド孔のずれ量を調べた。図2にFEMモデル図を示す。

車速100, 120, 148km/hで走行したときのシリンダヘッドの温度計測値をもとに熱伝導解析により温度分布を決定し、各車速での温度分布に対応した熱変形解析を実施した。

*技術本部 基盤技術研究室

**モーターサイクル事業本部 第4開発部

***(株)YEC システム部

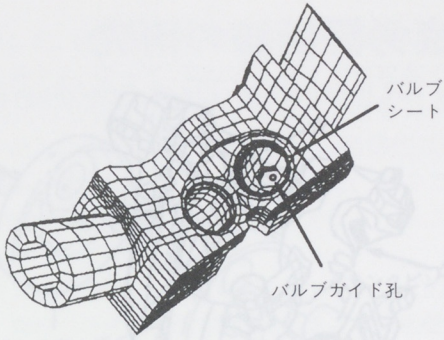


図2 シリンダヘッドFEMモデル

バルブシートは楕円形に広がると同時に各バルブシート孔の中心が燃焼室の外側に移動するといった変形モードを示す。(図3)

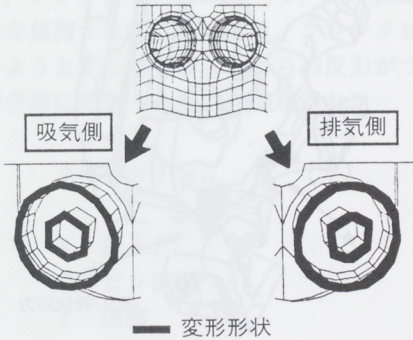


図3 バルブシート変形モード

各車速でのバルブシートの変形量とバルブシートとバルブステムガイド孔のずれ量を図4に示す。

これらの変形によりバルブがバルブシートに着座するときのあたりが悪くなり、ノイズの原因となっていると考えられる。

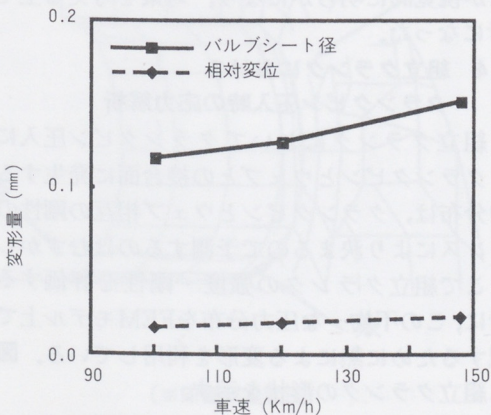


図4 各車速でのバルブシートの変形

3.2 2サイクルエンジン運転時の ピストンの熱変形・熱応力解析

モーターサイクルのエンジンにおいて、ピストンは直接燃焼ガスにさらされるため、特に熱負荷の高い部品のひとつである。2サイクルエンジンの場合は4サイクルエンジンと比べさらに熱負荷が高くなる。このため、エンジン開発時に焼き付きや溶損などのトラブルが起こりやすい。そこで熱による変形・応力を調べ、爆発圧力による変形・応力と比較した。

テストベンチでの温度計測値をもとに最大出力を発生する運転状態での熱伝導解析を実施し温度分布を求め、熱変形・熱応力解析を試みた。熱応力解析においてはヤング率の温度依存性を考慮している。

熱変形はピストンヘッド側で大きくスカート下側で小さい。逆に、爆発圧力による変形はピストンヘッド側で小さくスカート下側で大きい。ただし全体的に爆発圧力による変形の方が小さく、図5に示すようにスカート下側での変形量が熱変形と同じ位のレベルであり、これより、焼き付きなどを議論する場合は熱変形が重要になるということがわかった。

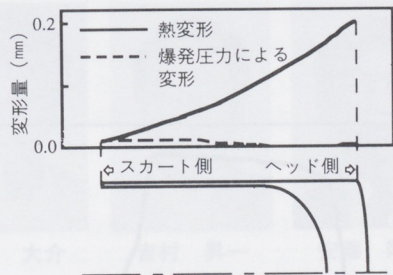


図5 排気側スカートの変形

また、こわれやすい部位であるクラウン裏側とピンボス部では熱応力は爆発圧力による引張応力と逆方向に作用し、引張応力が緩和されていることがわかった。(図6)

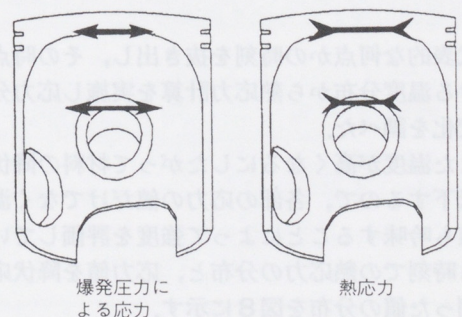


図6 応力比較

3.3 自動車エンジンの

エキゾーストマニフォールドの熱応力解析

エキゾーストマニフォールド（以下エキマニ）は排気ガスの高温にさらされ、また鋳物で厚肉部品であるため熱変形や熱応力が問題となりやすい部品である。さらに耐久試験に多くの時間を必要とするため、クラック発生などの問題が発生すると対策仕様の確認試験にさらに多くの時間が必要となる。このため、数値解析により対策検討の試行錯誤の回数を減らすことができれば開発の効率向上に非常に有効である。

エキマニの耐久試験では実車走行を模擬した運転サイクルを与え、これを何サイクルか繰り返して耐久性の評価をする。この運転サイクルをシミュレートするため、時間依存の熱伝導解析を行った。図7に示されるような耐久試験の1サイクル中の排気ガスの温度変化を計測により入手し、エキマニ内壁の境界条件として与えることにより時間依存の熱伝導計算を行った。

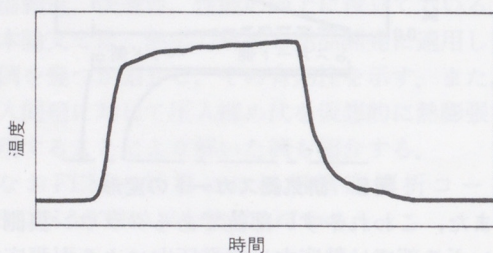


図7 排気ガス温度

代表的な何点かの時刻を抜き出し、その時点における温度分布から熱応力計算を実施し応力分布の変化を調べた。

また温度が高くなるにしたがって材料の降伏点が低下するので、各部の応力の値だけでなく温度の値も吟味することによって強度を評価している。ある時刻での熱応力の分布と、応力値を降伏応力で割った値の分布を図8に示す。

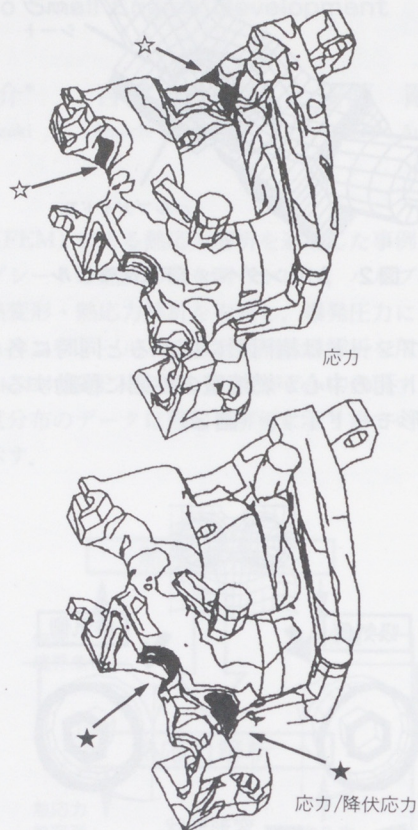


図8 応力及び応力/降伏応力の分布

解析の結果、クラックの発生した部位と計算上での危険箇所はよく一致している。また耐久試験ではクラックが発生していなくても危険な部位があることがわかった。さらに、熱変形と熱応力を合わせて見ることによりクラック発生メカニズムが視覚的に明らかになり、対策を考える上で参考になった。

3.4 組立クランクにおける

クランクピン圧入時の応力解析

組立クランクにおいてクランクピン圧入によりクランクピンとウェブとの接合面に発生する圧力分布は、クランクピンとウェブ相互の剛性のバランスにより決まるので予測するのはむずかしい。そこで組立クランクの強度・剛性を評価する場合に、この不均一な圧力分布をFEMモデル上で表現するために熱による変形を利用している。図9に組立クランクの形状を示す。

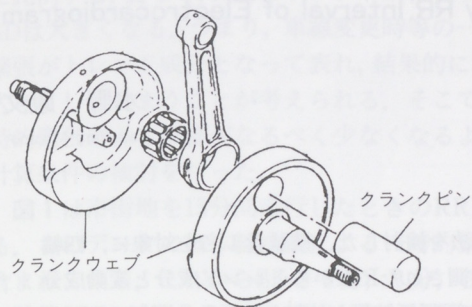


図9 組立クランク

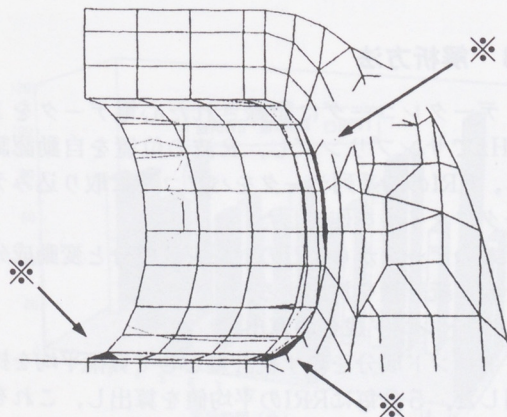
まず、ピン孔と同じ直径でクランクピンをモデル化し、クランクピンとウェブの接合部では半径方向にのみ力が作用するような境界条件を与える。そして、クランクピンのみに(1)式で決定される温度を負荷する。これにより、クランクピンの膨張しようとする力とウェブからの反力がつりあって接合面に発生する圧力が表現される。

$$\delta = D \times T \times \alpha \quad (1)$$

ここで δ : 圧入代
D : ピン直径
T : 温度
 α : 線膨張係数

である。 δ , D, α が決まれば、Tの値を決定することができる。

結果、接合面での圧力分布は図10のようになった。



(※印部が高面圧)

図10 接合面での圧力分布

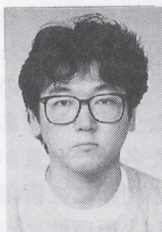
4 おわりに

以上述べたように、種々の問題に対して熱応力解析を適用し、商品開発過程で発生した問題の解決に役立っている。

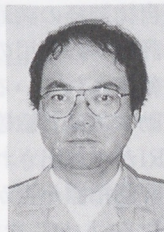
最後に、現状での熱応力解析を商品開発に適用する上での問題点を示す。まず温度分布のデータを入力するための熱伝導解析において、適切な伝熱境界条件の設定がむずかしいことである。現状では何点かの計算結果の温度が実測値と合致するように、伝熱境界条件を調整しながら繰り返し計算を行い、境界条件の数値を決定している。次に、熱変形・熱応力の実験検証データの入手がむずかしいことである。特に、ピストンのようにエンジン内で運動している部品については困難である。さらに、熱応力の値から部品の寿命を予測するための評価手法が確立されていないことなどがあげられる。

今後は、さらに適用事例を積み重ねていき、これらの問題点を克服していきたいと考える。

■著者



鈴木 大介



吉村 昇一



安藤 剛廣