

# レシプロエンジン開発における構造・強度評価技術

## Application of Structural Strength Evaluation Technology in the Development of Reciprocating Engines

戸田恭子	新潟原動機株式会社	技術センター技術開発グループ
齊藤俊之	新潟原動機株式会社	技術センター技術開発グループ
渡辺泰秀	新潟原動機株式会社	技術センター技術開発グループ
加藤尚次	新潟原動機株式会社	技術センター製品開発グループ
後藤悟	新潟原動機株式会社	技術センター技術開発グループ

グループ長 工学博士

近年、新しく開発するエンジンに対する要求が厳しくなるなかで、小型軽量化、高信頼性を実現するためには、FEMによる構造解析・CFDなどのCAEを用いた強度検討技術は欠かせない手段となっている。新潟原動機株式会社は、部品ごとに製造組立時、エンジン運転時の複雑な物理現象を考慮したFEMによる構造解析を実施しており、最適設計、開発期間短縮、開発コスト削減に取り組んでいる。本稿は、高性能環境対応エンジン28AHX開発時に実施したFEMを用いた構成部品の強度検討内容を紹介する。

Engine development in recent years must be able to address the harsh demands of the market. Therefore, CAE (Computer Aided Engineering), including structural strength evaluation using FEM (Finite Element Method) and CFD (Computational Fluid Dynamics), is a clearly important part of a design for the realization of lightweight, reliable engines. Niigata Power Systems is applying structural strength analysis using FEM to various engine components in consideration of complex physical phenomena during the assembly of components and engine operation to achieve optimized design, fast development and lower costs. This paper reports on certain aspects of the structural analysis of main engine components performed during the development of the 28AHX, which is a high-performance, eco-friendly engine.

### 1. 緒言

地球環境問題への関心が高まっている今、環境性能の優れたクリーンエンジンの開発が求められている。これらのエンジンには低燃費、有害排出ガス低減はもちろんのこと、高出力、小型軽量化、高信頼性などの厳しい要求事項があり、その実現のためには、コンピュータを用いたシミュレーション検討が欠かせないものとなっている。

エンジン開発におけるシミュレーション検討技術として、有限要素法 (Finite Element Method : FEM) による構造計算や、熱条件算出のための数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics : CFD) などがあり、これらのCAE (Computer Aided Engineering) を設計の事前検討に用いることによって、開発期間の大幅な短縮、実験・試作コストの削減、最適設計の実現などにつなげることができる。最近では高性能コンピュータが安価に入手できるようになり、簡単な静応力の計算だけでなく、詳細な物理現象を考慮した動的な計算まで可能となった。

新潟原動機株式会社 (NPS) は高性能環境対応型エンジン AHX シリーズの開発に CAE を用いた検討を実施し、

低燃費・高出力を実現した。本稿では船用中速エンジン28AHX開発時に実施した主要部品の強度検討の一部を紹介する。第1図に6シリンダの28AHX外観を、第1表に28AHXエンジン主要目を示す。

### 2. シリンダブロック

シリンダブロックはエンジン総質量の約1/4を占めるエンジンの骨格となる大型部品で、燃焼圧力や部品の運動



第1図 28AHX 外観

Fig. 1 External appearance of 28AHX

第1表 28AHX 主要目  
Table 1 28AHX main specifications

機関型式		28AHX	
シリンダ内径	mm	280	
シリンダ行程	mm	390	
機関回転速度	min <sup>-1</sup>	800	750
連続最大出力	kW	6 シリンダ	2 220
		8 シリンダ	2 960
		9 シリンダ	3 330
平均有効圧力	MPa	2.31	2.30
平均ピストンスピード	m/s	10.40	9.75
最高燃焼圧力	MPa	18.0	

に伴う慣性力を支え、また運動部分を包括する役割も担っている。

### 2.1 計算モデル

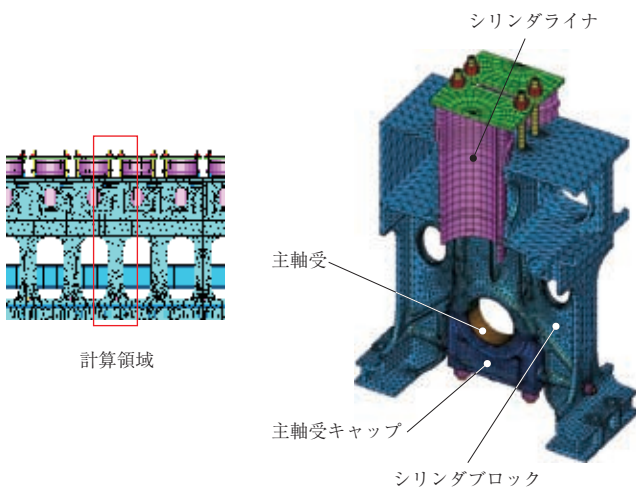
シリンダブロックに発生する応力は、実際の運転状態を想定し、下記の荷重条件下において計算した。

- (1) 主軸受のメタルクラッシュ
- (2) 組立時のボルト締付
- (3) 運転時の温度上昇
- (4) 燃焼圧力

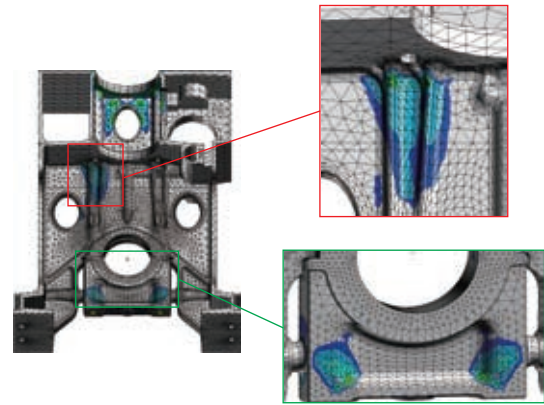
シリンダブロックの計算モデルを第2図に示す。計算領域は1シリンダ分とし、シリンダライナ、主軸受キャップなど周辺部品をモデル化した。

### 2.2 強度検討

シリンダブロックの強度については、応力計算を実施した後、疲労解析による安全率評価を行った。安全率分布を第3図に示す。解析結果を基に、隔壁および主軸受キャップ部の必要な安全率を保持しながらも減肉を行い、軽量化した形状を決定した。



第2図 シリンダブロック計算モデル  
Fig. 2 Calculation model for cylinder block



第3図 シリンダブロック安全率分布  
Fig. 3 HCF safety factor for cylinder block

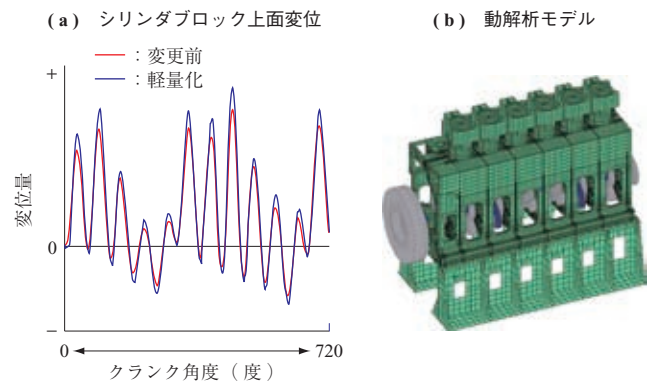
シリンダブロックは、静解析による安全率評価のほか、機関振動につながる変形応答も必要であるため、動解析を実施している。動解析のモデルと計算結果の一例としてシリンダブロック上面の上下方向の変位の変化を第4図に示す。シリンダブロック全体をモデル化し、燃焼圧力の変化およびクランク軸、接続棒などの運動部品に作用する荷重変化による応答を計算した。

以上の検討結果から、シリンダブロックは必要な材料強度に対する安全率と剛性を確保し、さらに従来機より軽量化された形状に決定することができた。

## 3. 接続棒

燃焼時の爆発力をクランク軸に伝達する役割の接続棒は、エンジン部品のなかでも過酷な環境で使用される部品の一つである。接続棒構造評価ポイントを下記に示す。

- (1) 軸受ハウジングの変形
- (2) 棹部強度さお
- (3) 座屈
- (4) 各部高サイクル疲労 (HCF)



第4図 動解析モデルと変位結果  
Fig. 4 Calculation model for cylinder block

### 3.1 計算モデル

連接棒の検討に用いた計算モデルを第5図に示す。連接棒を構成する部品のほかに、ピストンピン、クランクピンをモデル化し計算を実施した。

### 3.2 荷重条件

連接棒の構造検討では以下の荷重を考慮している。

- (1) メタルクラッシュ
- (2) 組立時のボルト締付
- (3) 運転中に作用する荷重（燃焼荷重／慣性荷重）

運転中の連接棒には筒内燃焼に伴う燃焼圧力とピストンの往復運動に伴う慣性力が作用しており、荷重は1サイクルの間で複雑に変動する。この変動荷重を油膜圧力として計算に用いた。

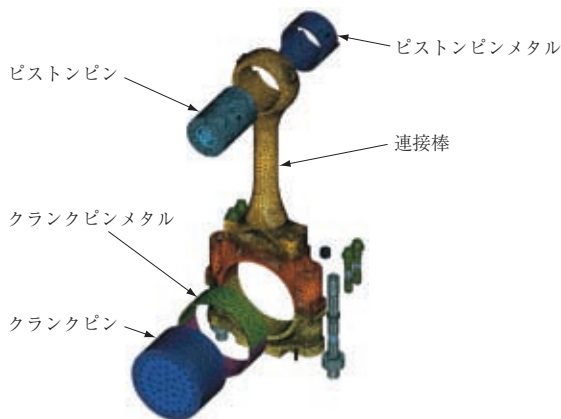
### 3.3 計算結果

#### 3.3.1 軸受ハウジングの変形

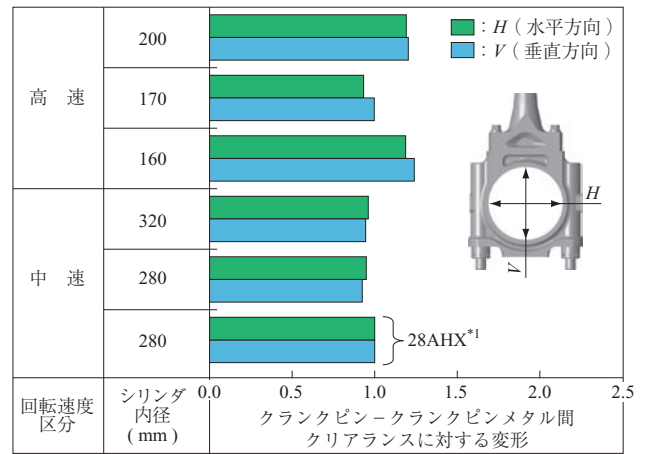
連接棒とピストンピン・クランク軸の間には軸受が組み込まれており、また軸受と軸のすきまには潤滑油の油膜が存在する。軸受を保持しているハウジングの変形によって油膜が切れると軸の焼付きにつながるため、ハウジング変形の評価が重要である。28AHX 連接棒のクランクピン軸受ハウジング変形量を実績のある社内他機種と比較した図を第6図に示す。28AHX は後述する軸受周辺の大膽な軽量化を実施しているが、ハウジング変形量は同手法で計算した他機種の結果と比較して同等なレベルであり、健全性を確認した。

#### 3.3.2 安全率評価

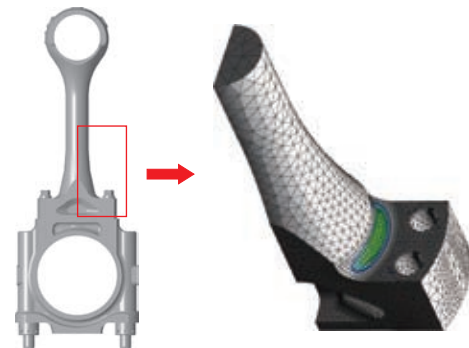
連接棒の材料強度に対する安全率を評価するため、製品組立時の静荷重で発生する応力と、1サイクル中の変動荷重による応力振幅で高サイクル疲労評価を行った。安全率分布の一例を第7図に示す。連接棒のどの領域でも疲労



第5図 連接棒計算モデル  
Fig. 5 Calculation model for connecting rod



第6図 連接棒大端部ハウジング変形比較  
Fig. 6 Big-end housing deformation

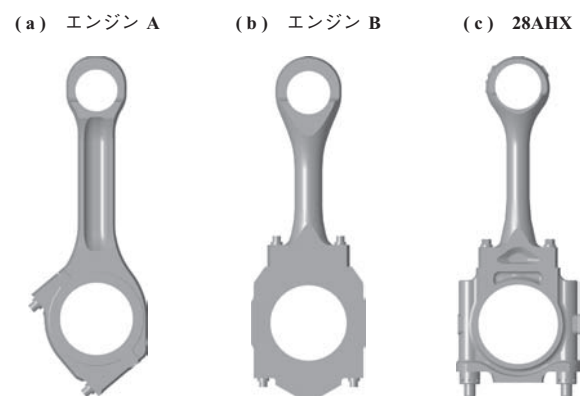


第7図 連接棒安全率分布  
Fig. 7 HCF safety factor of connecting rod

評価による必要な安全率を確保していることが確認できた。

#### 3.3.3 部品質量低減

第8図にNPSのシリンダ内径280mmの各エンジンの連接棒比較を示す。また、第2表に第8図に示した各連接棒の最大燃焼圧力に対する連接棒質量比を示す。



第8図 シリンダ内径 280 mm 機関連接棒比較  
Fig. 8 Connecting rod 3D model for cylinder bore 280 mm engine series at Niigata



第 2 表 接続棒質量比  
Table 2 Connecting rod weight

NPS φ280 mm エンジン	エンジン A	エンジン B	28AHX
質量／最高燃焼圧力	1.1	1.4	1.0 <sup>*1</sup>
出荷開始年	1988	1998	2010

(注) \*1: 28AHX を 1.0 とする.

第 2 表から分かるように、28AHX 接続棒の最大燃焼圧力に対する質量は、従来の機種と比較して最も小さくすることができた。三次元形状でさまざまな状態を考慮した構造計算を行うことで詳細な評価が可能となり、最適化検討によって高剛性と軽量化を両立させた。

## 4. ピストン

ピストンは燃焼時の衝撃的な圧力上昇を直接受け、高温にさらされる部品であるため、機械的応力のほかに熱応力を考慮する必要がある。そのため、正確な温度分布を得ることが重要となる。ピストンについては下記の内容を評価している。

- (1) ピストン温度
- (2) 各部高サイクル疲労
- (3) リング溝変形
- (4) シリンダライナとの接触面圧

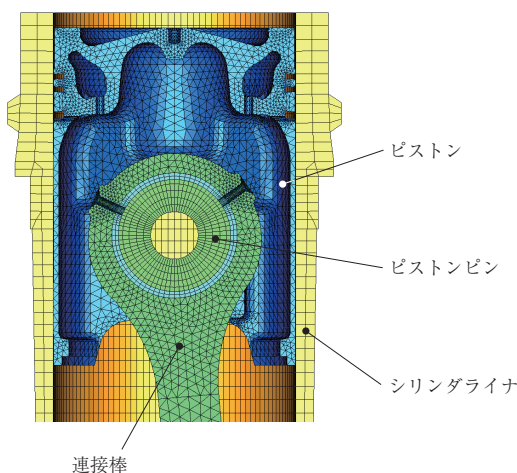
### 4.1 計算モデル

ピストン構造検討用の計算モデルを第 9 図に示す。計算モデルは、ピストン、ピストンピン、接続棒、シリンダライナまで含むモデルとした。

### 4.2 荷重条件

ピストンの構造検討では以下の荷重を考慮している。

- (1) 運転中に作用する荷重（燃焼荷重／慣性荷重）
- (2) サイドフォース



第 9 図 ピストン計算モデル  
Fig. 9 Calculation model for piston

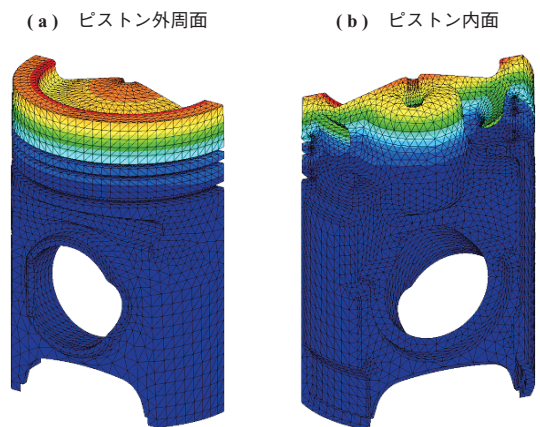
### (3) 運転時の熱荷重

機械的荷重は 3 章で述べた接続棒と同様に、運転中の燃焼荷重と慣性荷重の 1 サイクルの変動荷重を計算に用いている。さらに、接続棒の傾きによってピストン側面がシリンダライナ壁面を押し力（サイドフォース）を考慮した。

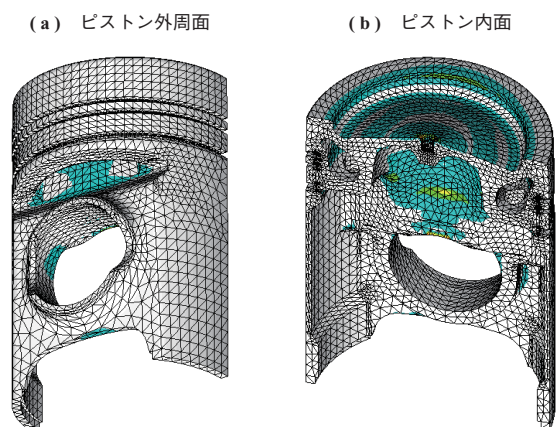
熱荷重として定義するピストン温度分布の予測は、従来は試験データに基づいた経験的な手法を用いていたが、最近ではコンピュータの高性能化に伴い、CFD を活用するようになった。NPS ではピストン温度分布を予測するため、CFD による筒内燃焼計算と冷却ギャラリー内の空気／潤滑油の気液二相流計算を実施し、これらの熱条件を用いて正確な温度分布を得ている。第 10 図に CFD を用いて算出した温度分布を示す。

### 4.3 計算結果

ピストン計算は、温度分布による熱応力と機械的荷重の応力を組み合わせて疲労解析を実施した。疲労解析から得られた安全率分布を第 11 図に示す。この評価には、材料

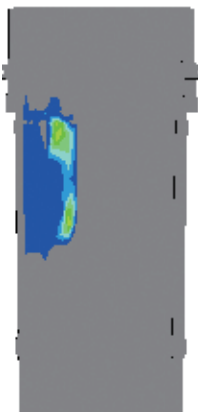


第 10 図 ピストン温度分布  
Fig. 10 Temperature distribution for piston



第 11 図 ピストン安全率分布  
Fig. 11 HCF safety factor for piston

(a) シリンダライナ



(b) ピストン



第 12 図 シリンダライナー-ピストン間接触圧力分布  
Fig. 12 Cylinder liner – piston contact pressure

強度の温度依存性を考慮している。この結果から、ピストンのいずれの領域においても必要な安全率を確保した形状を決定した。

また、一例として第 12 図にシリンダライナーとピストン間の接触圧力分布の計算結果を示す。このような検討を実施して、運転中の摺動について問題がないことを確認した。

## 5. 計算結果の妥当性確認

シミュレーション結果の妥当性を確認するため、実機で応力計測や温度計測と計算結果の比較を行い、ほぼ一致していることを確認した。また、実機で 1 800 時間以上の耐久試験と開放点検を行い、その健全性と十分な信頼性が確保されていることを確認している。

## 6. 結 言

新潟原動機株式会社で実施している FEM を用いた構造検討、構成部品に必要な強度検討を 28AHX の結果を基に紹介した。

新型船用中速エンジン 28AHX の開発過程において、CAE による構造検討によって従来機種に比べて大幅な軽量化を実現した。また、実機の耐久試験などによって健全性を確認し、高出力・軽量化を達成しながら低燃費・低 NOx エンジンを開発した。2011 年に発表した新型船用小型中速エンジン 17AHX 開発にも、これらの手法を展開している。

今後は、計算と実験結果との比較を重ねることで、より高精度な評価・検討手法を確立させ、より高性能なエンジンのスピーディな開発に貢献していく。