

ディーゼルシリンダヘッド燃焼室の 低サイクル疲労破壊予測手法

Prediction Method of Low-cycle Fatigue Breakdown in HSDI Diesel Cylinder Head

三 上 祥 平*
Shohei MIKAMI

荻 野 晃 一*
Koichi OGINO

空 澤 光 将*
Mitsumasa SORAZAWA

要 旨

冷熱サイクルを繰り返す運転モードにおいてクラックが発生することの多いディーゼルシリンダヘッドのグロープラグホール周りを解析対象とした、低サイクル疲労破壊に対する予測手法を紹介する。疲労破壊の予測にあたっては、クラックの起点となる部位のひずみ振幅と温度を把握する必要があるため、CAEを用いたひずみ解析をおこない、同時に、硬度測定による温度換算法により局所の温度を求めた。これにより、従来は困難であった局所状態の把握が可能となった。さらに、試作エンジンの冷熱サイクル耐久テストをおこなうことにより、本手法による低サイクル疲労破壊の予測の確からしさを実証した。また、新規エンジン開発において本手法が仕様検討のツールとして活用されるよう、設計プロセスへの取り入れ方を提案した。

ABSTRACT

This paper introduces a method of predicting low-cycle fatigue breakdown that takes as its focus the area around the glow plug hole of the diesel engine cylinder head, where cracks frequently occur during operating modes in which hot and cold cycles are repeated. Because an understanding of the strain amplitude and temperature of the areas in which cracks originate is necessary in predicting fatigue breakdown, strain analyses were conducted using CAE, and at the same time a method of calculating temperature from hardness measurements was used to determine local temperatures. This made it possible to study the local conditions of the cylinder head combustion chamber, which had previously represented a challenge. In addition, a hot-and-cold cycle endurance test using a prototype engine demonstrated the validity of predictions of low-cycle fatigue breakdown using the new method. The project also proposes the incorporation of the method in the design process in order to employ it as a tool for the review of specifications in new engine development.

1. はじめに

これまでのディーゼルエンジン開発において、冷熱サイクルによりシリンダヘッド燃焼室のバルブシート間に発生するクラック (Fig. 1) は、大きな課題となってきた。このようなクラックは、熱疲労現象であると考えられ⁽¹⁾、冷熱サイクルによる繰り返し荷重が燃焼室に加わる際、塑性変形が繰り返され、そこを起点にクラックが発生する。

このような低サイクルの繰り返しによるクラックの場合、Manson-Coffin の式⁽²⁾で示されるように、発生するひずみ振幅を指標に疲労寿命を予測する手法が知られている。

材料の強度特性は温度によって変化するため、実際にシリンダヘッド燃焼室の疲労寿命を予測するにあたっては、解析対象とする部位のひずみ振幅に加え温度も測定する必要がある。

しかし、特にひずみ振幅をエンジン運転時に測定することは技術的難易度が高く、これまでは Fig. 2 に示すように、限定的な領域で得たひずみ振幅と温度の関係を基に、比較的測定が容易な温度よりひずみ振幅を推定する等の手法を試みてきた。しかしながら、その推定精度は必ずしも十分ではなく、疲労寿命を精度良く予測することができなかった。そのため、エンジンの耐久信頼性の確認は、耐久テス

*四輪 R&D センター

トによる実機確認を主体とせざるを得ず、エンジン試作数の増大に繋がっていた。

そこで、クラックの起点となる部位の温度、およびひずみ振幅を精度良く測定、解析する手法の構築に取り組むと共に、燃焼室各部のひずみ振幅 - 温度の状態を把握し、それをシリンダヘッド素材の熱疲労限度線と対比させることで、冷熱サイクルにおけるクラックの発生を予測することに取り組んだ。

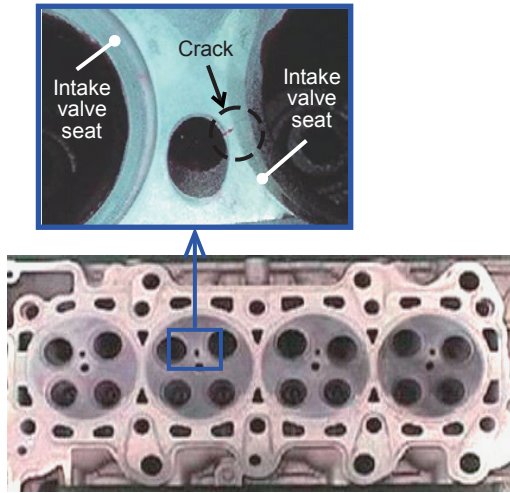


Fig. 1 Crack found beside glow plug hole

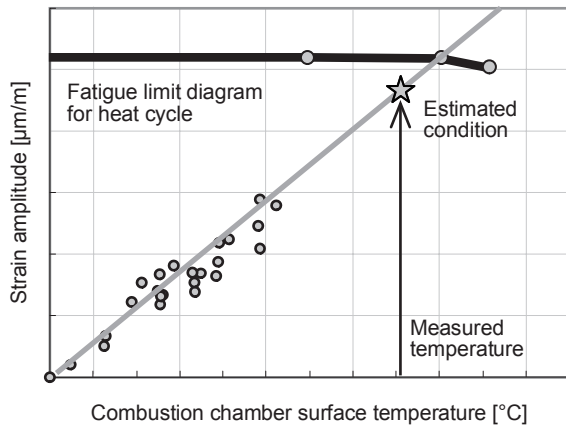


Fig. 2 Estimation of combustion chamber surface condition based on measured temperature

2. 低サイクル疲労破壊予測手法

2.1. 解析対象

シリンダヘッド燃焼室の低サイクル疲労破壊予測手法の導入とその検証にあたり、試作エンジン A にて冷熱サイクル耐久テストを実施した。今回実施した冷熱サイクルテストモード 1 の概要を Fig. 3 に示す。この耐久テストモードは、数あるテストモードの中で、シリンダヘッド燃焼室のクラック評価に対して厳しいテストモードであることが過

去のディーゼルエンジン開発経緯から明らかなため、これを選択した。今回は、このテストモードを約 10^4 回繰り返すこととし、燃焼室表面温度を変化させることで燃焼室各部のクラック発生状況を変化させるため、冷却条件や燃焼条件を変更した耐久テストを 4 ケース実施した。テスト条件、および耐久テスト終了後のシリンダヘッド燃焼室の状態を Table 1 に示す。表内のグロープラグホール周辺温度および排気バルブ間温度は、近傍の平坦部を熱電対で測定した値であり、耐久テストモード中に到達する最高表面温度である。

ケース 1 では、シリンダヘッド燃焼面の吸気バルブシート間 (グロープラグホール周辺) (Table 1 内 a)、排気バルブシート間 (Table 1 内 b) および吸気 - 排気バルブシート間 (Table 1 内 c) のいずれにもクラックが発生した。ケース 2 ではグロープラグホール周辺と吸気 - 排気バルブシート間に、ケース 3 ではグロープラグホール周辺にクラックが発生したが、ケース 4 ではクラックの発生は無くなった。

グロープラグホール周辺に発生したクラックの破断面を観察した結果を Fig. 4 に示す。一般的にグロープラグホールは機械加工によってシリンダヘッド燃焼室表面に開けられた穴であり、シリンダヘッド燃焼室表面も機械加工によって形成された面である。そのため、その口元は直角もしくは鈍角のエッジとなる。破断面の観察から、クラックの起点は燃焼室表面の平坦部ではなく、グロープラグホール口元のエッジであることがわかる。よって、この部位を解析対象として低サイクル疲労破壊の予測に取り組んだ。

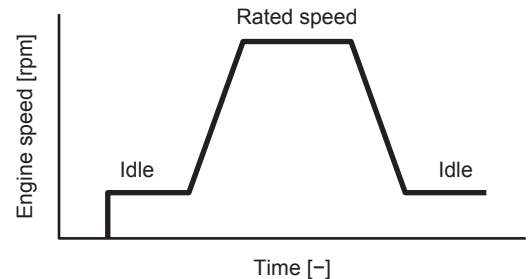


Fig. 3 Hot and cold cycle test mode 1

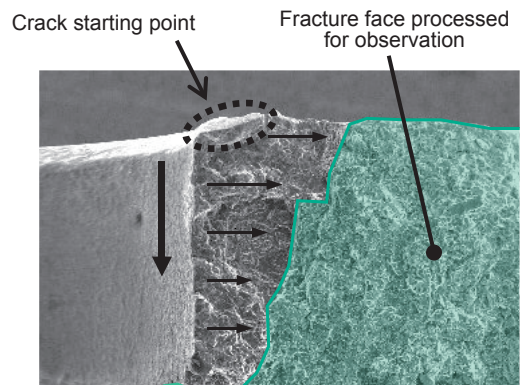
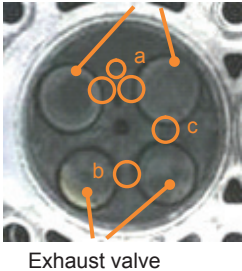


Fig. 4 SEM image of broken-out section of crack beside glow plug hole

Table 1 Hot and cold cycle endurance test conditions and resulting cracks

Prototype engine A					Indicates location of crack observed after test
Case No.	1	2	3	4	
Occurrence of cracks					
Engine load	Full load	Full load	Full load	Full load	
Coolant temperature [°C]	96	97	80	82	
Coolant flow rate	Base	Base +75%	Base +26%	Base +39%	
Nozzle cone angle	Base	Base	Base	Base -3 deg	
Temperature beside glow plug hole [°C]	282	253	226	225	
Temperature between exhaust valve seats [°C]	298	256	236	230	

2.2. ひずみ振幅解析手法

ひずみゲージによるひずみ測定法では、グロープラグホルールのエッジに直接ひずみゲージを取り付けることはできないため局所の測定が不可能であり、そのうえ、ひずみゲージの耐熱性の限界により高出力時の高温雰囲気下での測定もできない。そこで、Computer Aided Engineering (CAE) を用いたひずみ解析を実施した。

冷熱サイクル耐久テストにおいてシリンダヘッド燃焼室にクラックが発生する原因は、燃焼室の不均一温度分布に起因したひずみの発生とその集中であると考えられる。Fig. 5 に燃焼室のサイクル平均の温度分布を示す。インジェクタホールを中心に燃焼室中央は温度が高くなる。燃焼室中央は高温になることで、燃焼室外周側へ向かって熱膨張する。これに対して、燃焼室外周側は比較的低温

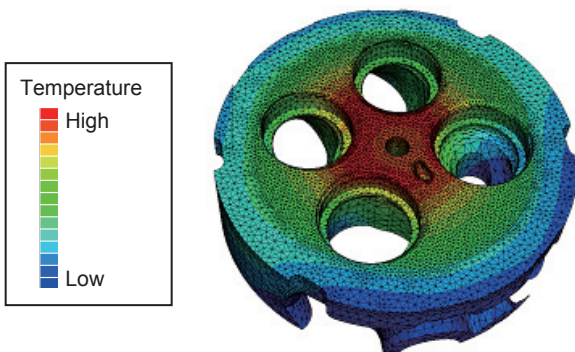


Fig. 5 Temperature distribution of combustion chamber surface

であるため中央部に比べ熱膨張量は小さくなる。このように、不均一温度分布に起因した熱膨張差により、燃焼室には半径方向の圧縮ひずみが発生する。この圧縮ひずみは、グロープラグホール周りやバルブシート間のような断面積が小さい部位に集中し、冷熱サイクルによる繰り返しにより、ひずみ集中部を起点としたクラックが発生すると考える。

したがって、解析の流れとしては、まず温度解析により温度分布を求め、それを基にひずみ解析をおこなった。以下(1)から(5)に手順を示す (Fig. 6)。

- (1) シリンダヘッドの Finite Element Method (FEM) モデルを作成する (Fig. 7)。
- (2) FEM モデルのウォータジャケット壁面に対して、Computational Fluid Dynamics (CFD) 解析で求めた熱伝達率をマッピングし、熱境界条件を与える。解析ソルバーには VECTIS (3次元流体ダイナミクスプログラム) を用いる。
- (3) 燃焼室を始めとするその他のシリンダヘッド表面に対しても熱境界条件を付与する。この熱境界条件は、実機耐久テストと同運転条件の下、熱電対により燃焼室表面温度を測定した結果と合致するように、領域を分割してガス温度および熱伝達率を設定する。熱境界条件は、耐久モード中の高温時 (定格出力時)、低温時 (アイドル時)、それぞれに応じて設定する。なお、熱電対による温度測定については、燃焼室の温度分布が把握可能なように、多点で測定することが必須である。

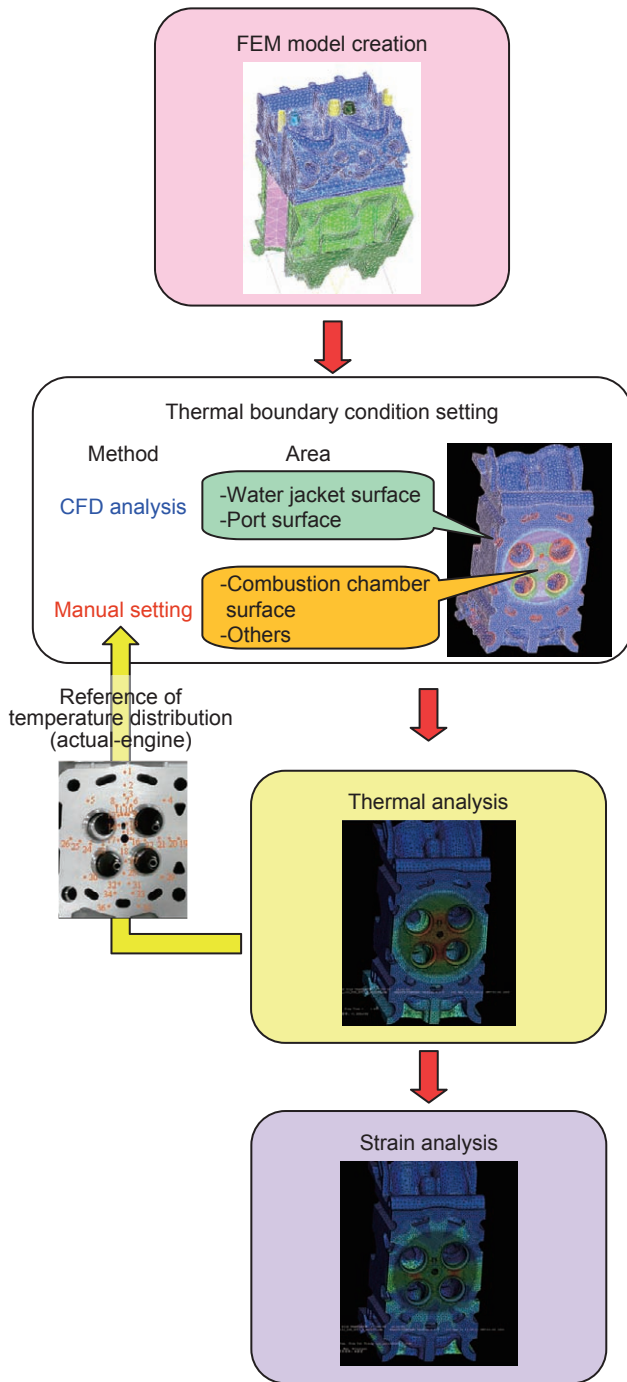


Fig. 6 Flow diagram of strain analysis

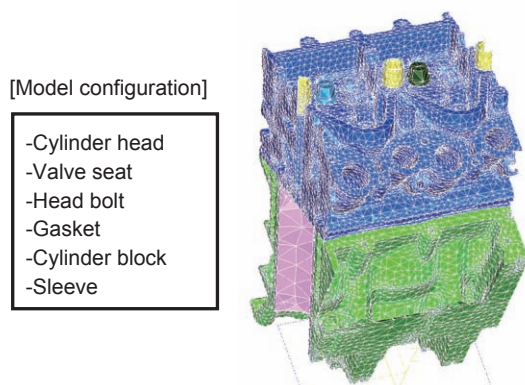


Fig. 7 FEM model configuration

(4) ABAQUS (汎用非線形有限要素解析プログラム)を用いて温度解析をおこなう。

(5) 求めた温度分布を基に、冷熱サイクル中に発生するひずみ振幅を解析する。解析ソルバには、温度解析と同様に ABAQUS を用いる。

燃焼室表面に熱境界条件を付与する手段として、CFD による燃焼解析をおこなった例もある^{(3), (4)}。この場合の解析の流れを Fig. 8 に示す。しかし、CFD で実際の燃焼状態を忠実に模擬するためには、ポート内脈動解析、筒内流動解析、噴霧解析、そして燃焼解析と多くの過程を経ることになり、それぞれの過程に高い解析精度を要する。特に、噴霧解析と燃焼解析において、各種パラメータの調整とその検証に多大な時間を要するという課題がある。また、燃焼解析の精度検証の一つとして、実機の温度測定結果との対比も必要となる。そこで今回は、低サイクル疲労破壊の予測という本解析の主旨と計算時間短縮を考慮し、(3) に示す手法を採用した。耐久モード中の高温時の燃焼室熱境界条件を、本手法により設定した例を Fig. 9 に示す。また、この時の燃焼室表面温度を熱電対により測定した値と CAE の温度解析により求めた値の比較を Fig. 10 に示す。

(5) で得られた CAE による温度とひずみ振幅の関係を、熱電対およびひずみゲージによる実測値と比較した。対象とする部位は Fig. 11 に示すグロープラグホール近傍の平坦部である。比較結果を Fig. 12 に示す。横軸の温度は、耐久テスト中にその部位が到達する最高温度である。実測より求めた温度に対するひずみ振幅の近似曲線に対し、CAE による結果は相関がとれている。さらに CAE による解析において最大のひずみ振幅を示す位置を調べると、実際の耐久テストにおいてクラックの起点となる詳細な位置は一致することがわかる (Fig. 13)。

2.3. 局所温度解析手法

次に、グロープラグホールの周辺の詳細な表面温度を解析することを試みた。燃焼室の表面温度を測定する方法としては、熱電対による測定が一般的である。しかし、ひずみゲージの場合と同様にグロープラグホールのエッジに直接熱電対を埋め込むことはできない。そのため従来は、エッジ近傍の平坦部に熱電対を施工し、この測定値をもってその領域の温度を代表できるとしていた。

今回は、熱電対による温度測定に加え、素材の硬度低下特性を利用した燃焼室表面硬度測定による温度換算法 (以下、硬度法と記す) により、グロープラグホールのエッジを含む周辺の局所の温度を求めた。手順を以下 (1) から (4) に示す。

(1) 熱電対により、耐久テストと同条件下で燃焼室表面温度を測定する。

(2) 温度測定したポイントと同じ部位の表面硬度を、ピッカース法⁽⁵⁾により測定する。

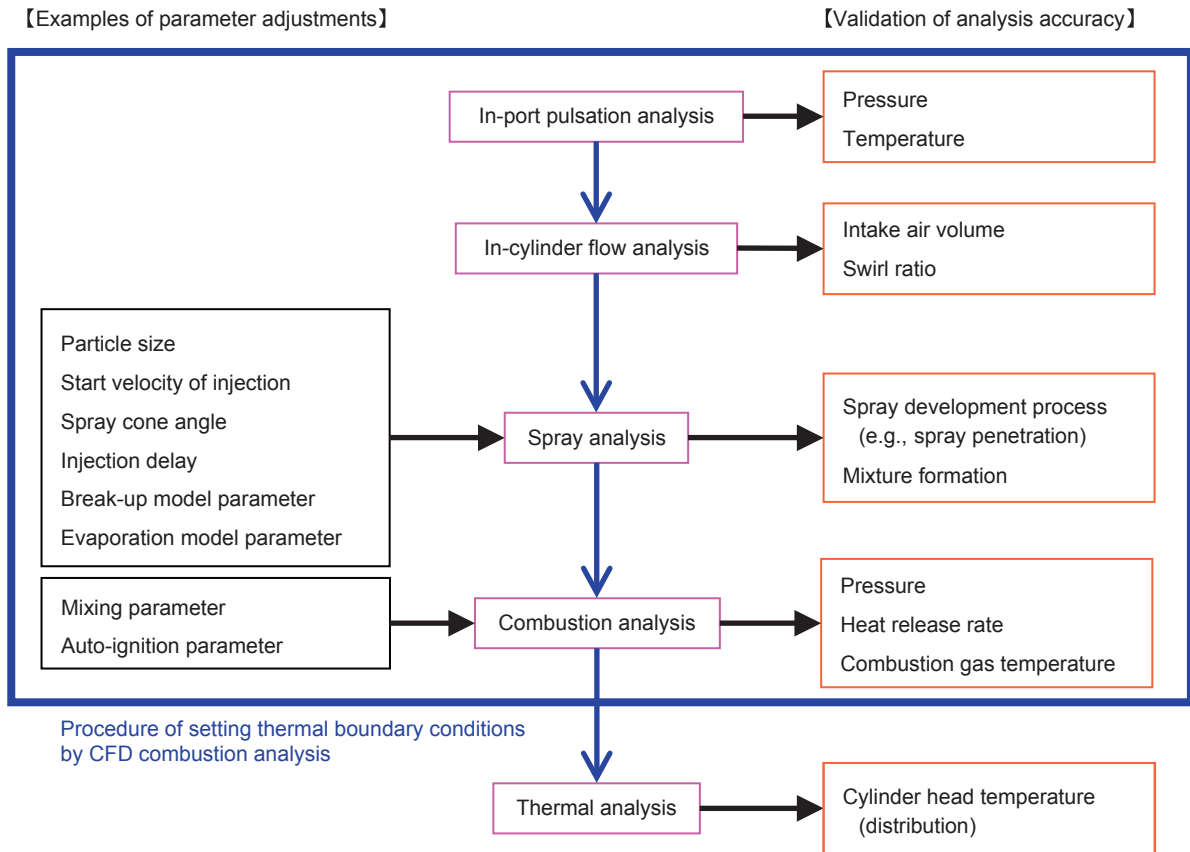


Fig. 8 Procedure of CFD combustion analysis and examples of parameters and validation at each step

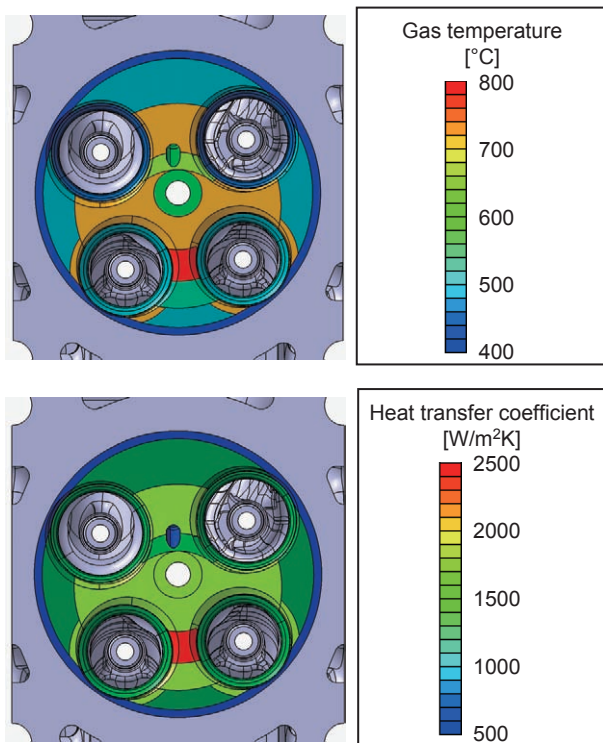


Fig. 9 Combustion chamber thermal boundary conditions (high-temperature state of endurance test)

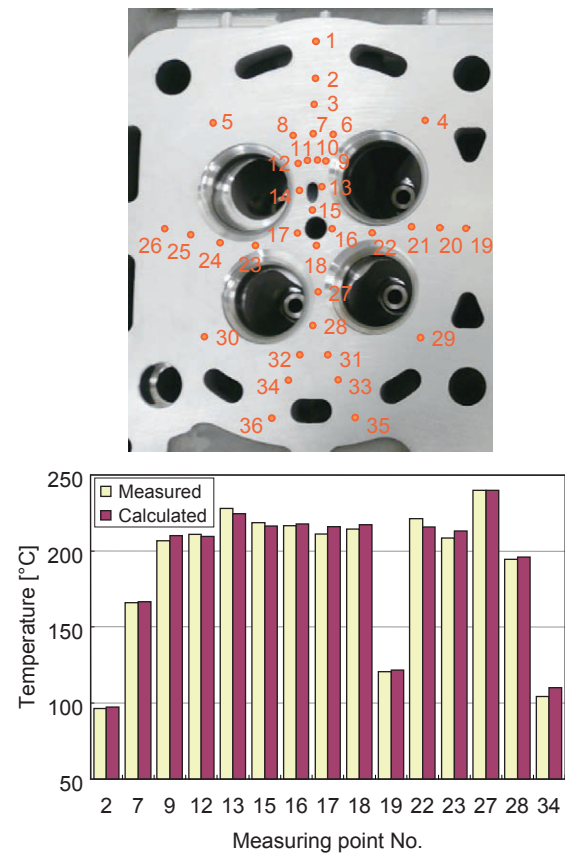


Fig. 10 Measured and calculated values of combustion chamber surface temperature (high-temperature state of endurance test)

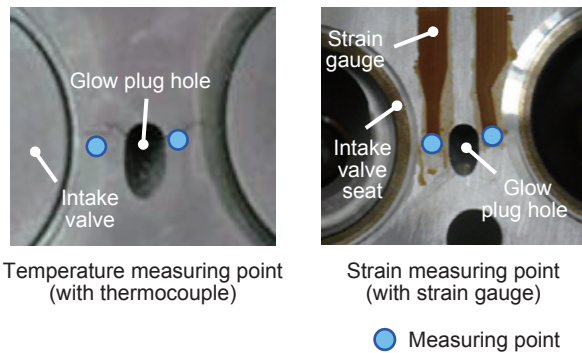


Fig. 11 Temperature and strain measuring points beside glow plug hole

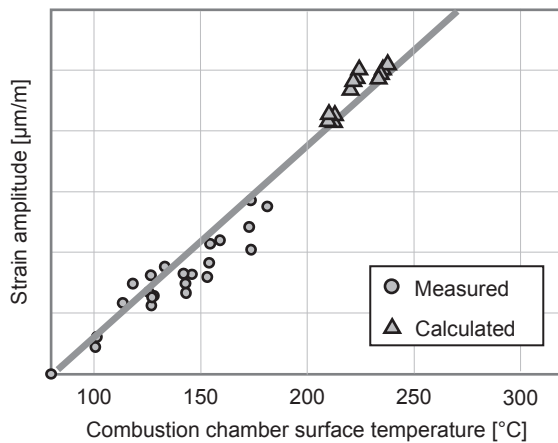


Fig. 12 Measured and calculated strain amplitudes and temperature beside glow plug hole

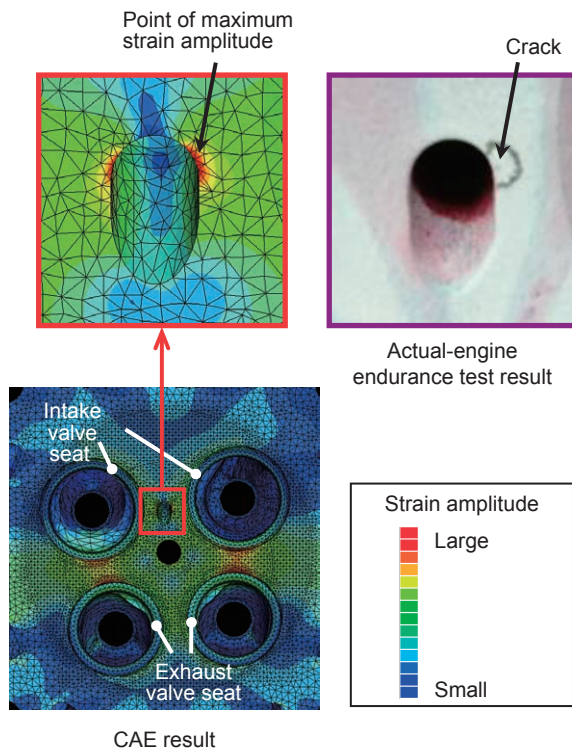


Fig. 13 Strain amplitudes in hot and cold cycle endurance test

(3) 熱電対による温度測定値と硬度測定値の相関関数を得る。この温度には、耐久テストモード中の最高到達温度を用いる。

(4) 任意の部位の硬度を測定し、(3)で求めた相関関数より、局所温度を算出する。

温度測定と硬度測定の実施例、およびそれより得た相関関数の例を Fig. 14(a), (b), (c) に各々示す。冷熱サイクル耐久テスト後の表面硬度と到達温度の関係は線形に近似できる。これにより、エッジの硬度からエッジの温度を求められる。

この手法により求めたケース 2 の冷熱サイクル耐久テストにおけるグロープラグホール周辺の温度を Fig. 15 に示す。硬度法より求めたエッジの温度は 278°C であり、熱電対により得られた平坦部温度よりも 25°C 高い。図中の L1 もしくは L2 に沿って、わずか 1.5 mm の範囲内でも大きな温度勾配を持っており、クラック起点のエッジは局所的に高温になっていたことがこの手法により明らかとなった。

次に、ケース 3 とケース 4 のグロープラグホール周辺の温度比較を Fig. 16 に示す。熱電対により測定した平坦部温度はそれぞれ 226°C 、 225°C と差が無いが、クラックの発生には差が生じた。ケース 4 は、インジェクタノズルコーン角の変更に伴う燃焼状態の変化により、燃焼室の温度分布を局所的に変化させることを意図したものである。そこで、両ケースにおけるグロープラグホールのエッジの温度を硬度法により調べたところ、クラックが発生したケース 3 では 255°C に達するが、クラックが発生しなかったケース 4 では 235°C であり、 20°C の温度差が生じていることがわかった。この局所的な温度差がクラック発生の有意差に繋がったと推察するが、このように、疲労破壊の

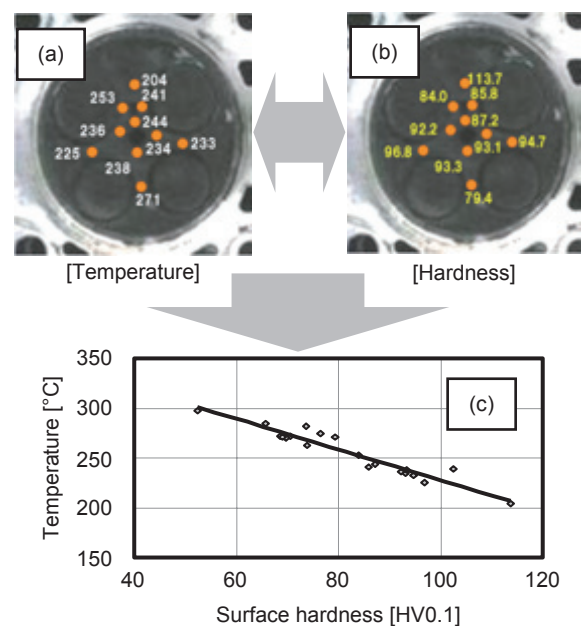


Fig. 14 Relationship between temperature and hardness of combustion chamber surface

予測には起点となるエッジの温度を得ることが重要である。そしてそれには硬度測定による温度算出が有効な手法であることを確認した。

2.4. シリンダヘッド素材の熱疲労限度

2.2. および 2.3. 節により得られたひずみ振幅, 温度を基に疲労破壊の予測をおこなうためには, シリンダヘッド素材の強度特性を基にした判定指標が必要である。ここではシリンダヘッドに用いた素材の単体試験をおこない, 取得した限度ひずみ振幅を疲労破壊の判定指標とすることを試みた。

限度ひずみ振幅は以下の手順 (1) から (5) により求めた (Fig. 17)。

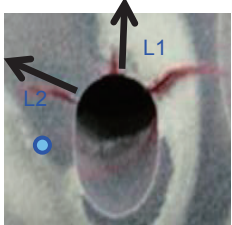
- (1) 試験片素材は AC2B-T6^{(6), (7)}を用いる。Table 2 に素材の化学成分を示す。熱処理条件は, 500 °C で 4 時間保持後, 水焼入れし 200 °C で 4 時間の時効処理を施している。試験片形状は外径 7 mm, 標点間距離 12 mm の丸棒形状である。
- (2) クラック発生部位を想定し, 高温時には圧縮ひずみが, 低温時には引張りひずみが繰り返し生じる温度

Table 2 Chemical compositions of AC2B alloy [wt%]

Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Al
6.3	3.2	0.17	0.01	0.13	<0.01	<0.01	Balance

とひずみのサイクル (out-of-phase 熱疲労サイクル) を試験片に付与し, 耐久試験を実施する。ひずみの制御には伸び計を用い, 機械ひずみが全振幅で 0.6 から 1.6% の範囲となるよう条件を設定する。加熱には高周波加熱機を用い, 冷却は放冷とする。温度サイクルは 50 から 200 °C, 50 から 250 °C, 50 から 280 °C にておこなう。

- (3) 試験をおこなったひずみ振幅に対する破断寿命をプロットし, 10^4 サイクルでの限度ひずみ振幅 (破損確率 50% (B50)) を得る。
- (4) 温度サイクルごとに上記限度ひずみ振幅を取得する。
- (5) 設定した温度サイクル中の最高到達温度に対する限度ひずみ振幅をひずみ振幅 - 温度のグラフにプロットし, シリンダヘッド素材の熱疲労限度線を定める。

Case No.	2
Crack occurrence	Yes
Flat area temperature	253 °C
Edge temperature	278 °C
Flat area temperature measuring point (with thermocouple)	

[Hardness measuring position]
Hardness was measured along lines L1 and L2 from the edge as the origin. (crack starting point to propagation area)

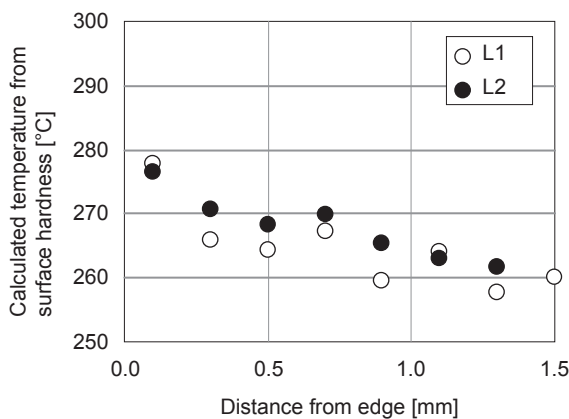
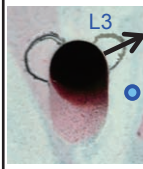


Fig. 15 Edge temperature calculation from measured hardness

Case No.	3	4
Crack occurrence	Yes	No
Nozzle cone angle	Base	Base -3 deg
Flat area temperature	226 °C	225 °C
Edge temperature	255 °C	235 °C
Flat area temperature measuring point (with thermocouple)		

[Hardness measuring position]
Hardness was measured along lines L3 and L4 from the edge as the origin. (crack starting point to propagation area)

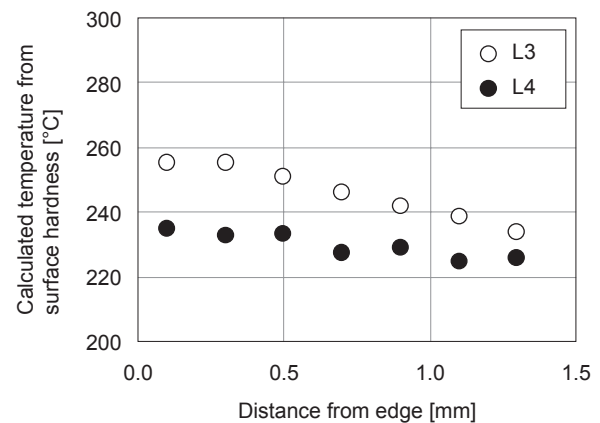


Fig. 16 Influence of nozzle cone angle on edge temperature

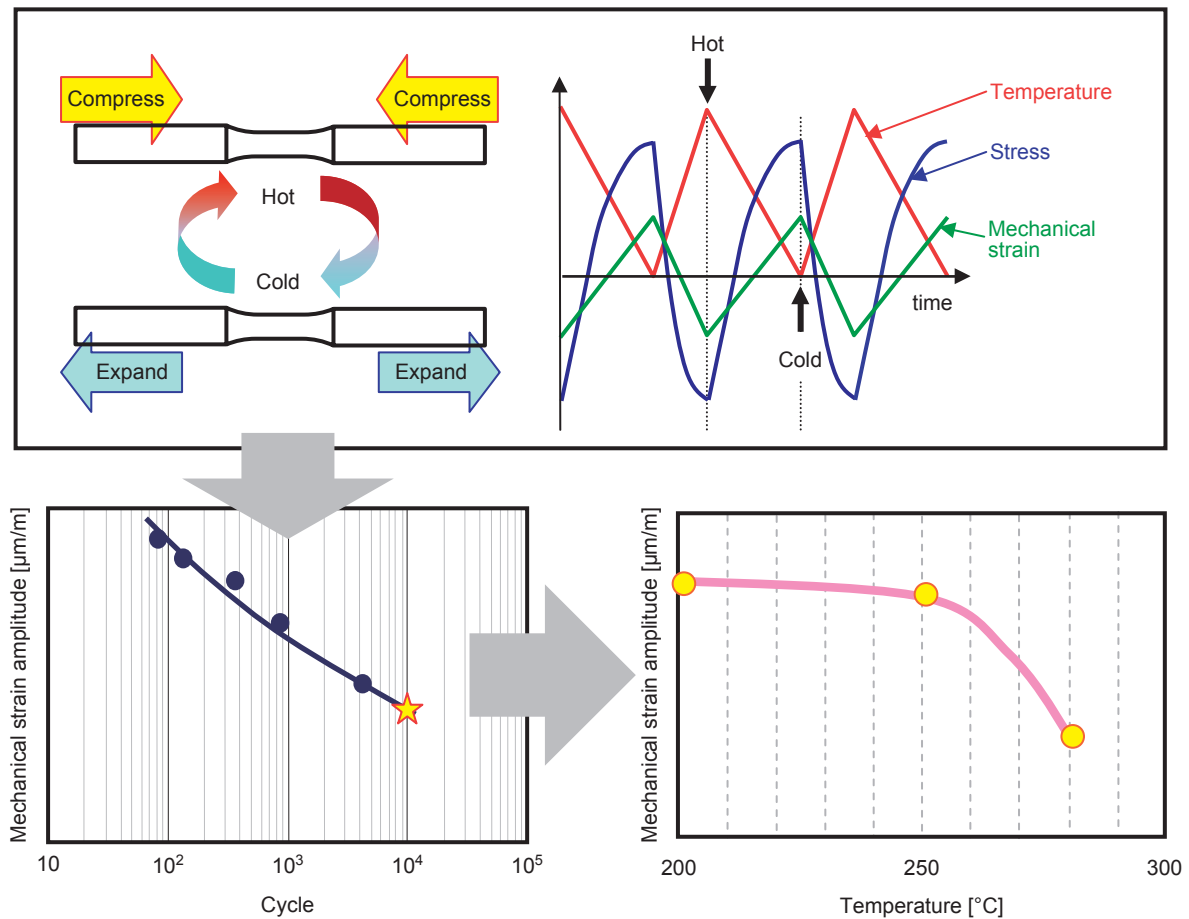


Fig. 17 Steps taken to obtain material fatigue limit diagram for heat cycle

3. 燃焼室解析結果と低サイクル疲労破壊予測技術の有効性検証

上述の手法により、冷熱サイクル耐久テストにおけるシリンダヘッド燃焼室表面のひずみ振幅と温度を把握し、熱疲労限度線と対比させた結果を Fig. 18 に示す。図中には、クラック発生の可能性が高いエッジのみを示している。○は耐久テストにおいてクラックが発生しなかった部位、×はクラックが発生した部位を意味する。これより、冷熱サイクル耐久テストにおけるクラックの発生は、本手法で得たひずみ振幅 - 温度の関係と熱疲労限度線によって整理できることが明らかとなった。

また、熱疲労限度線に対する各部位の余裕度に着目すると、排気バルブシート間のエッジが最も大きく、次いで、吸気 - 排気バルブシート間のエッジ、グローブプラグホールのエッジの順となる。これは、一連の冷熱サイクル耐久テストで、段階的にクラック発生箇所を減少させた際の傾向 (Table 1) と一致する。

低サイクル疲労破壊予測手法の有効性を確認するため、この手法をシリンダヘッドの設計プロセスに取り入れ、冷

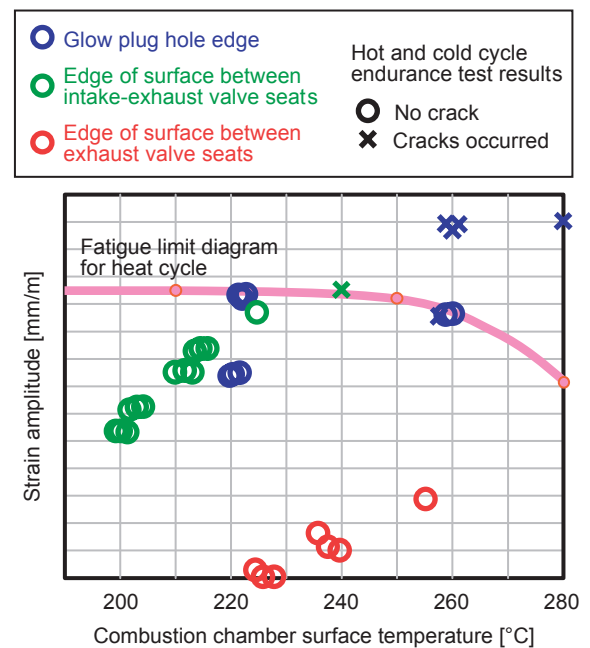


Fig. 18 Strain amplitudes and temperature of prototype engine A

Table 3 Prototype engines A and B - changes in specifications

	Prototype engine A	Prototype engine B
Engine output	Base	Base +10%
Fuel injection timing	Base	Base +2 deg advance
Valve skew angle	Provided	None
Coolant flow direction in cylinder head	Longitudinal flow	Cross flow
Coolant flow rate	Base	Base +17%

熱サイクル中の燃焼室表面の状態が熱疲労限度線内になるよう、新たにエンジンの諸元や形状を設定し、試作エンジン B を作製した。試作エンジン A からの変化点を Table 3 に示す。そしてこれまでと同様に冷熱サイクルテストモード 1 による耐久テストをおこない、クラック発生の有無を確認した。クラック発生の可能性が高いエッジのみを抽出し、ひずみ振幅と温度の状態、さらに耐久テストでのクラック発生の有無を併せて Fig. 19 に示す。

試作エンジン B で最もクラック発生の可能性が高い部位は、試作エンジン A 同様にグロープラグホールのエッジとなっている。この部位は熱疲労限度線のほぼ線上にある。冷熱サイクル耐久テスト終了後、光学顕微鏡を用いて詳細にその部位を観察したところ、50 μm 程度の微小なクラックを確認した。

以上の結果から、本手法による冷熱サイクル耐久テストにおける低サイクル疲労破壊の予測は、仕様の異なるエンジンにおいても有効であることを確認した。

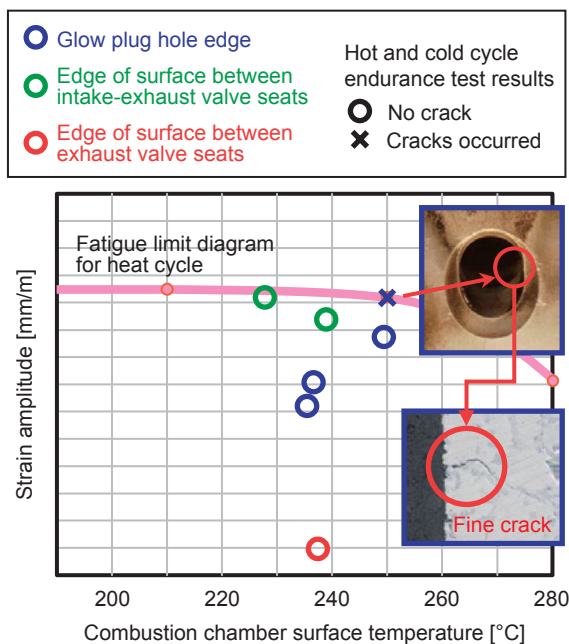


Fig. 19 Strain amplitudes and temperature of prototype engine B

4. 本手法を用いたシリンダヘッド設計プロセスの提案

本手法の新規エンジン設計プロセスへの取り入れ方を提案する (Fig. 20)。シリンダヘッド燃焼室に発生するひずみ振幅の大きさや、その原因となる燃焼室の不均一な温度分布は、バルブ配置を始めとする燃焼室の形状や燃焼条件、シリンダヘッドの冷却条件に起因する。これらは、シリンダヘッドの耐久性のみでなく、エンジン出力を始め多岐に渡る領域に影響を及ぼす因子であるため、エンジン開発の初期段階で確定させることが望ましい。そのためにはエンジンの仕様構想段階で低サイクル疲労破壊の予測手法を取り入れ、フロントローディングとして活用することが望まれる。

Fig. 20 中のラピッドプロトタイピングエンジンとは、エッジにおける温度上昇の見積りや、ガス温度や熱伝達率の見積りに供試することを目的とするエンジンである。そのため、このエンジンはそれらの目的に沿った最低限の形状や諸元を備えていれば十分であり、その設計や製作には短い期間しか要さないものとするのが望ましい。

将来的には、Fig. 6 に示した CAE によるひずみ解析フ

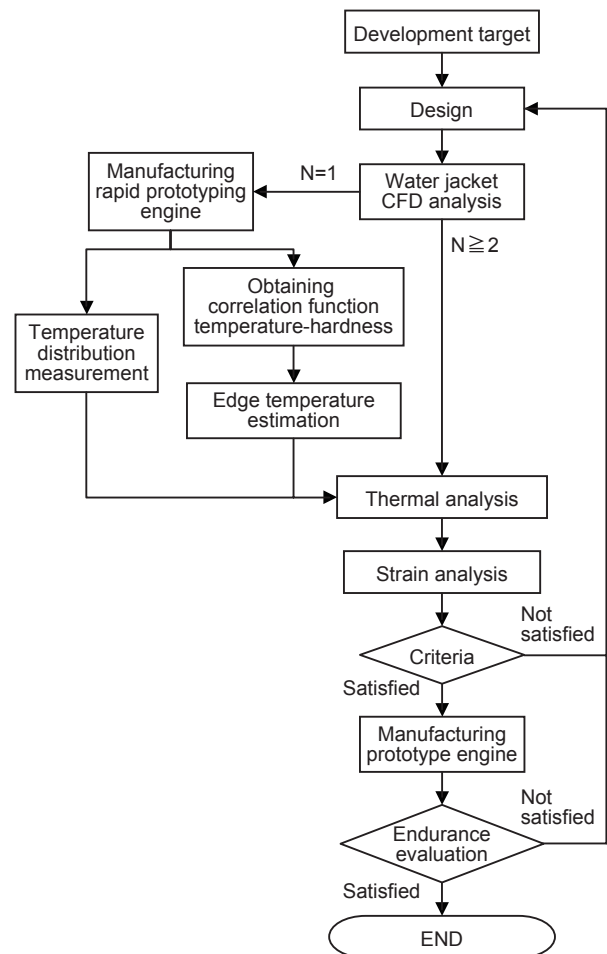


Fig. 20 Proposal of low-cycle fatigue evaluation in design process

ローの中に Fig. 8 に示した CFD による燃焼解析を組み合わせた形で、これを設計プロセスへ取り入れることを目標とするが、現段階では CFD の解析精度や燃焼系フルモデルの計算時間を考慮すると、ここに提案するプロセスが実用性に優れていると考える。

5. まとめ

シリンダヘッド燃焼室の低サイクル疲労破壊予測手法の構築に取り組み、以下の結果を得た。

- (1) クラックの起点はエッジであり、ひずみ振幅、温度共に近傍の平坦部とは差異があるため、局所の状態を把握することがクラックの発生予測には不可欠である。
- (2) グロープラグホール周りを解析対象とし、ひずみ振幅、温度はそれぞれ CAE によるひずみ解析および硬度法により妥当な値が得られることを確認した。
- (3) 素材単体の熱疲労試験で得られた限度ひずみ振幅より設定した熱疲労限度線と、CAE および硬度法より得られたひずみ振幅 - 温度の状態とを対比することにより、冷熱サイクル耐久テストにおける、シリンダヘッド燃焼室の低サイクル疲労破壊の精度良い予測を可能にした。
- (4) 新規エンジン開発において、低サイクル疲労破壊の予測手法をフロントローディングとして活用することが望まれるが、本手法はエンジン開発で要求される時間的制約の中で設計プロセスに取り入れることを可能とした。

参考文献

- (1) 生野元, 岩永省吾, 栗野洋司: アルミニウム合金鋳物の熱疲労特性評価, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.31, No.2, p.73-84(1996)
- (2) 鯉淵興二, 小久保邦雄: 製品開発のための材料力学と強度設計ノウハウ, 日刊工業新聞社, p.86-93(2002)
- (3) 宮崎隆男, 加賀谷浩, 西野隆之, 村上展堂, 鳥越祐児, 池田雅博: シリンダヘッドの熱疲労寿命予測, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.111-05, p.23-26(2005)
- (4) 久保雅彦, 今井康太郎, 坪内真佐夫, 野村洋介, 石黒達男, 金子秀明, 近藤充: ディーゼルエンジンのシリンダヘッド熱解析による耐久性評価手法, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.90-08, p.19-22(2008)
- (5) 国際規格 ISO/DIS 6507-1:1995, Metallic materials-Vickers hardness test-Part 1: Test method
- (6) 日本工業規格 JIS H 2211:1960, 鋳物用アルミニウム合金地金
- (7) 日本工業規格 JIS H 0001:1972, アルミニウム, マグネシウム及びそれらの合金一質別記号

■ 著 者 ■



三上 祥平



萩野 晃一



空澤 光将