

拘束率による エキゾーストマニホールドの熱疲労寿命評価

Evaluation of Thermal Fatigue Life on the Exhaust Manifold by Analyzing Restraint Ratio

中 田 真*
Makoto NAKADA
小 西 泰 則*
Yasunori KONISHI

石 井 和 夫*
Kazuo ISHII
高 橋 伸 一*
Sinichi TAKAHASHI

榎 本 勝*
Masaru ENOMOTO

要 旨

エキゾーストマニホールドの熱疲労寿命を評価するためのパラメータとして拘束率を適用することを検討した。材料試験での熱疲労寿命と拘束率との間にはよい相関が認められ、評価パラメータとして用いることができることを確認した。また、エンジン最大負荷運転時の温度分布を300℃程度の温度条件で再現することにより、通常のひずみゲージによる測定でエキゾーストマニホールドの拘束率を容易に測定することができる。この方法で実測したエキゾーストマニホールドの拘束率と耐久試験結果は良く一致しており、拘束率はエキゾーストマニホールドの熱疲労寿命を十分に評価可能なパラメータであることを確認した。さらにCAEにより計算した拘束率も実測値と良く一致しており、CAEにより熱疲労寿命の評価が可能であることがわかった。

ABSTRACT

To evaluate a thermal fatigue life of the exhaust manifold, it has been shown to apply the restraint ratio to an evaluation parameter. As it was confirmed that a thermal fatigue life depended on the restraint ratio in material experiment, authors judged that the restraint ratio could be applied to evaluate a thermal fatigue life. It was confirmed that the restraint ratio of real exhaust manifold could be obtained without difficulty from the results of strain measured by using a conventional strain gauge. This was carried out under setting up the experimental conditions about the temperature of 300℃, which reproduced the same temperature distribution state on the exhaust manifold as the full load engine operating condition. As the restraint ratio actually measured by this method agreed with the result of endurance test, it was confirmed that the restraint ratio was a parameter adequate to evaluate a thermal fatigue life of the exhaust manifold. And further, as the restraint ratio which was calculated with CAE agreed well with actually measured value, it was confirmed that the CAE could evaluate a thermal fatigue life of the exhaust manifold.

1. はじめに

近年の排出ガス規制強化に伴い、触媒の活性化時間短縮のため、エキゾーストマニホールドの低熱容量化(薄肉化)要求が高まっている。一方、燃費向上を目的とした理論空燃費運転領域の拡大に伴い排気温度は上昇傾向にある。

これらはいずれもエキゾーストマニホールドの耐久性を悪化させる要因となるため、従来にも増して形状、材料、製法の適切な組み合わせを見出す必要に迫られている。また、開発期間も短縮されてきており、エキゾーストマニホールド開発に対する技術は要求が高くなってきている。

エキゾーストマニホールド開発の従来方法は、台上での耐久試験によるトライアンドエラーが主体であった。これに対し、材料置換による簡易応力測定試験¹⁾、CAE (Computer Aided Engineering)による強度予測技術などいくつかの手法が提案されてきている^{2)~7)}。しかしながら、いずれの手法についても結果の実用性の点では十分とは言えない。

そこで、本研究ではエキゾーストマニホールドに対する熱疲労寿命の定量的評価パラメータとして拘束率を新たに導入し、その有効性を実証したので以下に報告する。

*栃木研究所

2. 部品の熱疲労評価パラメータ

エキゾーストマニホールドの寿命を決める要因の一つは低サイクル熱疲労である。これは、エンジンの運転による加熱と停止による冷却とにより、圧縮応力と引張り応力が塑性変形を伴いつつ繰り返し現れることにより起こる。このような、エキゾーストマニホールドの熱疲労寿命を予測するには、①熱負荷を表す評価パラメータの設定、②評価パラメータに対応した材料の寿命線図の作成、③エキゾーストマニホールドにおける評価パラメータの実測技術とCAE計算技術の確立が必要になる。

この三項目のうち、実用性の観点で重要なのが③の項目である。実測技術は、CAE計算結果の妥当性検証および出来上がった製品の品質確認に必要であり、CAE計算技術は、図面段階での寿命予測には不可欠である。

以上のことから、熱疲労寿命の評価パラメータの選定においては、この③の項目が実現出来ることを必要条件とした。すなわち、「熱疲労寿命に対し高い相関性を有すること」以外に、「エキゾーストマニホールドにて測定可能であること」、「CAEで計算可能であること」もパラメータの条件に含めた。

以下、それぞれの条件ごとに3節に分けて述べる。

2. 1. 熱疲労寿命に対して相関性を有する

評価パラメータの候補

熱疲労現象は塑性疲労なので、寿命評価パラメータ(負荷パラメータ)として応力を用いることはできない。そのため従来より塑性ひずみ範囲、熱疲労ループのエネルギー損失、拘束率などを用いた寿命評価が提案されてきている^{3), 8)}。

これらのパラメータのうち、塑性ひずみ範囲($\Delta \varepsilon_p$)、エネルギー損失(E)の定義をFig.1に示す。これは、Fig.2に示す試験片の平行部の長さを一定に保持しながら加熱、冷却して得たものである。縦軸は試験片の軸方向に発生する荷重を平行部の断面積で割って応力に換算してあり、横軸は温度変化に熱膨張係数を掛けてひずみにしてある。このFig.1において、 $\Delta \varepsilon_p$ は、応力0軸と交わる点のひずみの差である。またEは加熱、冷却ループの応力とひずみの積分値である。

つぎに拘束率(η)の定義であるが、拘束率とは対象となる部分の伸びが妨げられる割合であり、次式で与えられる。

$$\eta = \frac{\Delta L_t - \Delta L}{\Delta L_t} \quad (1)$$

ΔL : 拘束条件下での伸び

ΔL_t : 与えられた温度変化における自由伸び

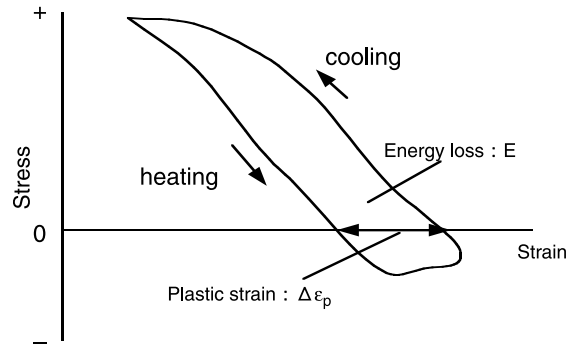


Fig.1 Hysteresis loop in thermal fatigue

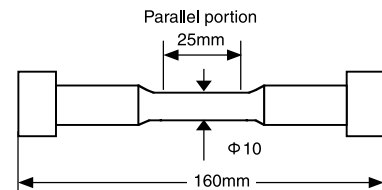


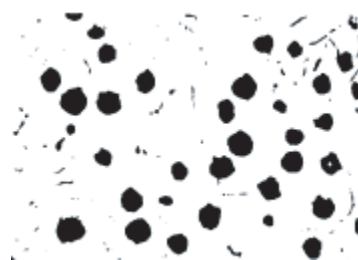
Fig.2 Specimen for thermal fatigue test

これら $\Delta \varepsilon_p$ 、E、 η の各パラメータと熱疲労寿命の相関性を確認するため、ダクタイル鋳鉄での熱疲労試験を実施した。試験の最高温度はエキゾーストマニホールドの使用温度を考慮して、600、700および750°Cの三水準とし、最低温度は試験機の冷却能力を考慮して100°Cとした。試験片の化学成分と組織をTable 1とFig.3に、得られた結果をFig.4に示す。

Fig.4によると、いずれのパラメータも熱疲労寿命と良い相関を示しており、評価パラメータとして用いることが可能であることが分かった。

Table 1 Chemical composition

Element	C	Si	Mn	P	S	Mg
wt%	3.50	3.55	0.18	0.023	0.013	0.039



Magnification : $\times 100$

Fig.3 Microstructure of specimen

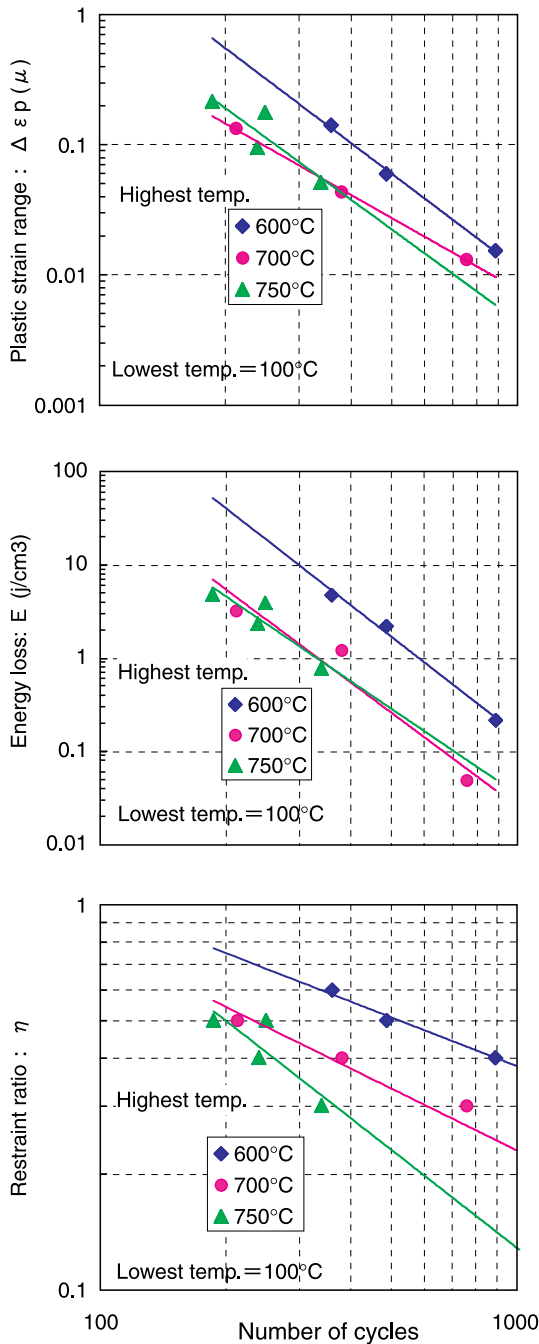


Fig.4 Relationship between evaluation parameter and thermal fatigue life

2.2. 実測に対する評価パラメータの適性

次に、各パラメータのエキゾーストマニホールドでの測定に対する適性について述べる。各パラメータの特徴をTable 2に示す。

まず最初に、塑性ひずみ範囲($\Delta \varepsilon_p$)とエネルギー損失(E)について考察する。

エキゾーストマニホールドについて、 $\Delta \varepsilon_p$ やEを求めるにはファイヤリング中の応力とひずみを同時に測定する必要がある。しかし、応力を直接測定する手法は現在のところ困難なため、実際には伸びと温度を同時に測定して求める

Table 2 Evaluation parameters for a thermal fatigue life

Evaluation parameter	Plastic strain Range : $\Delta \varepsilon_p$	Energy loss : E	Restraint ratio : η
Original factor	Stress : σ Strain : ε	Stress : σ Strain : ε	Temperature : Δt Strain : ε
Expression	$\varepsilon_{\max}(\sigma=0) - \varepsilon_{\min}(\sigma=0)$	$\int \sigma \cdot d\varepsilon$	$\frac{-\varepsilon}{\alpha \cdot \Delta T}$
Conception of parameter	Plastic deformation in a single heat cycle	Distract energy in a single heat cycle	Restraint ratio of heat expansion

こととなる。この時に問題になるのが、高温域でのひずみ測定技術である。現在、レーザ光などを利用した非接触測定法が種々提案されてきているが、ファイヤリング時のエンジン振動などの問題が未解決であるため、正確なデータを得るのが難しい。また、現時点で入手できる高温ひずみゲージでは、測定対象部形状に制約があるために、測定箇所が限定される。すなわち、高温域でのひずみ測定の難しさが、 $\Delta \varepsilon_p$ やEをエキゾーストマニホールドで測定する際の大きな課題である。

また、最終的な $\Delta \varepsilon_p$ 、Eを求めるためには、以下の計算手順を踏む必要があり、実験誤差を考慮すると精度的な疑問も残る。すなわち、 $\sigma(t, \varepsilon)$ は実用的には各温度での材料の引張り試験を行なって近似的に求めるものであるし、クリープを含めた特性についても同様に把握する必要がある、誤差の累積は相当大きいと考えられる。

$$\varepsilon = \frac{\Delta L \cdot \alpha_t \cdot (t - t_0) \cdot L_0}{L_0} \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma(t, \varepsilon) \quad (3)$$

- t : 温度
- t_0 : 基準温度
- α_t : その温度までの平均線膨張係数
- L_0 : 初期長さ
- $\sigma(t, \varepsilon)$: 応力を表す温度、ひずみの関数

次に、拘束率(η)について考察する。 η は、式(1)より熱伸びの比であるため、弾性域でも定義可能である。なお弾性域内の変化においては、 $\Delta \varepsilon_p$ とEは0である。

ここで、実使用温度におけるエキゾーストマニホールドの熱疲労寿命と、より低い温度(弾性域温度)における拘束率との間に強い相関性が有ると仮定できれば、一般的箔タイプのひずみゲージが使える範囲のひずみ解析で、簡便にエキゾーストマニホールドの熱疲労寿命評価ができる可能性を有することになる。

上記の仮定の妥当性については3章で詳しく論証する

が、以上の考察により、実測に対する評価パラメータとしては拘束率(η)が最も適していると判断した。

2. 3. CAE計算に対する評価パラメータの適性

次にCAEにおける各パラメータの適性について考える。

まず $\Delta \varepsilon_p$ と E については、有限要素法(FEM)の場合、解析対象のエネルギーの総和が最小になるように収束計算することで要素の応力、ひずみを求めるため、要素毎の σ 、 ε が定義できることが大前提となる。この場合、完全弾塑性モデルを用いることになる。そして精度を求めるためには、更にクリープモデルを確立する必要がある、材料毎に各温度における正確な塑性域特性値を事前に与えなければならず難易度が高い。また、 $\Delta \varepsilon_p$ と E はエキゾーストマニホールドでの測定が困難なパラメータであることから、得られた計算結果についてエキゾーストマニホールドに対する精度検証が難しい。このように、 $\Delta \varepsilon_p$ と E はCAEでは扱いにくい。

次に η についてであるが、これは一般的な弾性域のひずみ解析から計算可能であるため、容易にシミュレート計算が可能である。また、計算対象パラメータが実物にて測定可能であることから、計算結果の妥当性検証が可能である。

以上、第1節から3節に分けて述べてきた内容をTable 3にまとめた。表からも明らかなように、弾性域でも定義可能なパラメータである拘束率が、エキゾーストマニホールドの熱疲労寿命評価パラメータとして最も適している。

Table 3 Comparison of usability among the parameters

Evaluation parameter	Plastic strain range : $\Delta \varepsilon_p$	Energy loss : E	Restraint ratio : η
Expectation of rupture life	Possible	Possible	Possible
Measurability in actual manifold	Difficult	Difficult	Possible
To calculate in CAE	Complicated	Complicated	Simple

3. エキゾーストマニホールドにおける拘束モデル

拘束率が自由伸びに対して拘束されている伸びの比で与えられることはすでに述べた。本章では、エキゾーストマニホールドにおいて拘束率にどのような意味が与えられるかを考察し、前章で述べた仮定の妥当性について検証する。

まず拘束側と被拘束側の関係において拘束率の決定要素

を考察した。拘束側と被拘束側を二つのばねと仮定すると、Fig.5に示すような閉じたばね系で表現できる。このばね系の常温での釣り合い状態を初期状態とし、被拘束ばねに温度変化(Δt)を与えたときの状態を考える。この時の釣り合い状態の模式図をFig.6に示す。

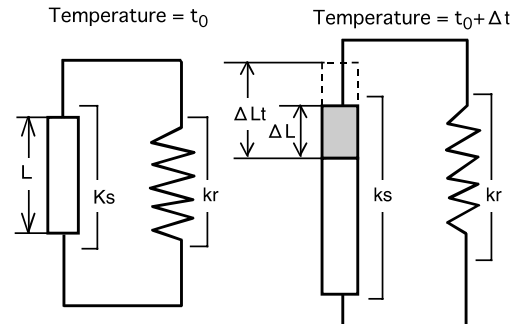


Fig.5 Spring system model for restrained state

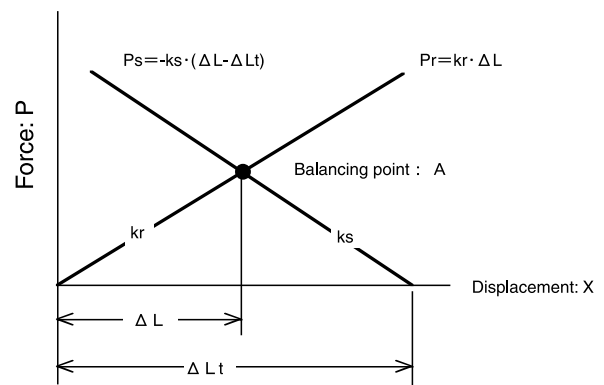


Fig.6 Graphic formula of stable point on the spring system

このとき拘束ばねに生じる力は以下となる。

$$Pr = kr \cdot \Delta L \quad (4)$$

Pr : 拘束体に発生する力

kr : 拘束体のばね定数

次に、被拘束ばねに生じる力を求める。自由状態での長さは $L_0 + \Delta Lt$ であるが、拘束時の長さは $L_0 + \Delta L$ であり、このばねに与えられる変位は両者の差、 $\Delta L - \Delta Lt$ である。したがって、被拘束側に生じる力は以下となる。

$$Ps = -ks \cdot (\Delta L - \Delta Lt) \quad (5)$$

Ps : 被拘束体に発生する力

ks : 被拘束体のばね定数

力の平衡を考えると $P_r=P_s$ となり以下の式が成立する。

$$kr \cdot \Delta L = -ks \cdot (\Delta L - \Delta L_t) \quad (6)$$

$$\therefore \Delta L = \frac{ks}{kr+ks} \cdot \Delta L_t \quad (7)$$

定義式(1)に式(7)を代入すると、

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\Delta L_t \cdot \Delta L}{\Delta L_t} \\ &= \frac{\Delta L_t \cdot \frac{ks}{kr+ks} \cdot \Delta L_t}{\Delta L_t} = \frac{1}{1 + \frac{ks}{kr}} \end{aligned} \quad (8)$$

ここではね定数比を以下のように定義する。

$$a = \frac{ks}{kr} \quad (9)$$

これを式(8)に代入すると拘束率を以下のように表せる。

$$\eta = \frac{1}{1+a} \quad (10)$$

このように、拘束ばねと被拘束ばねの関係から、拘束率は両者のばね定数比によって定義できることが分かる。次に拘束率が拘束体と被拘束体のばね定数比であることをエキゾーストマニホールドに拡張して考察する。

エキゾーストマニホールドにおけるポートと集合部に注目し、拘束状態をFig.7のようなばね系モデルとする。ばねの分割は任意に可能であるが、Fig.8に示すように系としては4つのばねによって構成されるものとし、そのうちの集合部を表すばねを被拘束ばねとして定義した。

このばね系において、被拘束ばねに温度を与えたときの拘束ばねの自由伸びを ΔL_t とおくと、式(4)と式(7)により、系に作用する力は以下となる。

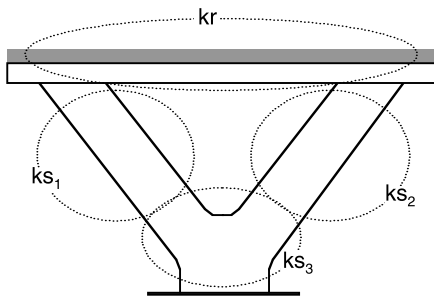


Fig.7 Model of restrained state in exhaust manifold

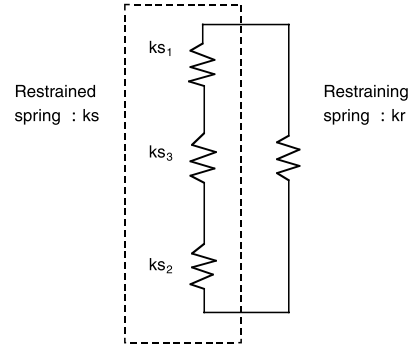


Fig.8 Series spring system model for exhaust manifold

$$P = \frac{ks}{kr+ks} \cdot \Delta L_t \cdot kr \quad (11)$$

P : ばね系に発生する力

直列系であるので ks_3 に作用する力もこれに等しい。したがって、 ks_3 の変位は以下となる。

$$x_3 = \frac{P}{ks_3} = \frac{ks}{kr+ks} \cdot \frac{1}{ks_3} \cdot \Delta L_t \cdot kr \quad (12)$$

x_3 : ばね ks_3 に発生する変位

この場合、 ks_3 の拘束率は以下となる。

$$\eta_3 = \frac{x_3}{\Delta L_{t_3}}$$

η_3 : ks_3 の拘束率

ΔL_{t_3} : ks_3 の自由熱膨張量

この式に式(12)を代入する。

$$\begin{aligned} \eta_3 &= \frac{1}{\Delta L_{t_3}} \cdot \frac{ks}{kr+ks} \cdot \frac{1}{ks_3} \cdot \Delta L_t \cdot kr \\ &= \frac{\Delta L_t \cdot ks}{\Delta L_{t_3} \cdot ks_3} \cdot \frac{kr}{kr+ks} \\ &= \frac{\Delta L_t \cdot ks}{\Delta L_{t_3} \cdot ks_3} \cdot \eta_{total} \end{aligned} \quad (13)$$

η_{total} : 被拘束体全体の拘束率

ここで弾性域における ΔL_t 、 ΔL_{t_3} は温度で表現できる。

$$\Delta L_t = \int \alpha \cdot (t(x) - t_0) \cdot dx \quad (14)$$

α : 線膨張係数

$t(x)$: 被拘束体の温度分布関数

t_3 : 被拘束体 ks_3 の温度

L_3 : 被拘束体 ks_3 の長さ

ここで定義する領域における温度範囲では、 α はほぼ一定であると考え、式(14)は式(15)のようになる。

$$\Delta Lt = \alpha \cdot \int (t(x) - t_0) \cdot dx \quad (15)$$

$$\Delta Lt_3 = \alpha \cdot (t_3 - t_0) \cdot L_3 \quad (16)$$

式(15)、式(16)を式(13)に代入すると、以下となる。

$$\begin{aligned} \eta_3 &= \frac{\Delta Lt \cdot ks}{\Delta Lt_3 \cdot ks_3} \cdot \eta_{total} \\ &= \frac{\alpha \cdot \int (t(x) - t_0) \cdot dx}{\alpha \cdot (t_3 - t_0) \cdot L_3} \cdot \frac{ks}{ks_3} \cdot \eta_{total} \\ &= \frac{\int (t(x) - t_0) \cdot dx}{(t_3 - t_0) \cdot L_3} \cdot \frac{ks}{ks_3} \cdot \eta_{total} \\ &= \frac{1}{L_3} \cdot \int \frac{t(x) - t_0}{t_3 - t_0} \cdot dx \cdot \frac{ks}{ks_3} \cdot \eta_{total} \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)のうち、 L_3 、 ks 、 ks_3 、 η_{total} はエキゾーストマニホールドの形状パラメータであり、 $t(x)$ 、 t_3 は環境パラメータである。 η_3 の環境依存性は各部位の温度そのものではなく、 $(t(x) - t_0) / (t_3 - t_0)$ に依存することが分かる。即ち、エキゾーストマニホールドの拘束率を測定する際に重要なのは、 $(t(x) - t_0) / (t_3 - t_0)$ つまり t_0 を基準として t_3 で規格化した温度分布を再現することである。したがって、必ずしも実使用の高温域で測定する必要はないと言える。

4. 実機測定

4.1. 拘束率測定手法

前述より拘束率は式(1)で定義できる。この式から、エキゾーストマニホールドでの拘束率を以下の要領で求めた。

測定に際し、エンジン稼動時の熱負荷により発生した基準温度 t_0 からある温度 t までの温度変化量(Δt)に対し、エキゾーストマニホールド部材が拘束されていない状態における熱伸び、即ち自由膨張量(ΔLt)、またその ΔLt からエキゾーストマニホールドがエンジン各部に締結された、ある拘束条件下での熱伸び(ΔL)を引いた量($\Delta Lt - \Delta L$)を知る必要がある。

ここでこれらのデータはFig.9に示すように、実際のエンジンにおいて、高温箔タイプのひずみゲージと、熱電対を使用して測定した。この時、先に式(17)の中で述べたように、エキゾーストマニホールドの温度状態として重要なのは温度分布、即ち $(t(x) - t_0) / (t_3 - t_0)$ であるため、必ずしも実使用温度での測定をする必要は無い。したがって温度分布さえ正しく表現出来れば300°C程度の比較的低い温度での測定であっても正しい結果を得ることが可能と言える。

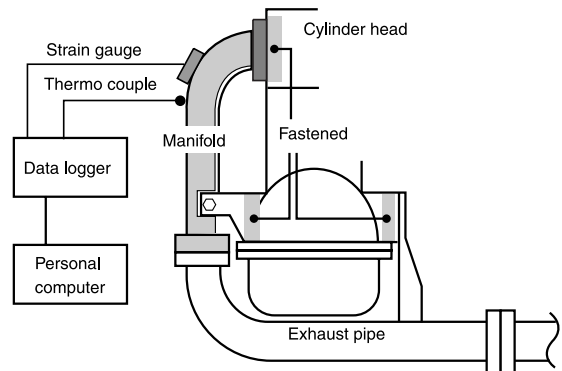
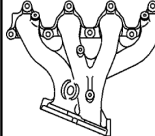
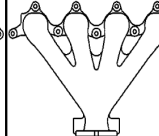
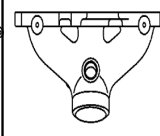


Fig.9 Schematic diagram of measurement system

4.2. 拘束率測定条件の妥当性確認

先に述べた様に、拘束率に対しては温度分布が影響を及ぼすので、300°C程度の比較的低い温度条件下で試験を行うに当たり、エキゾーストマニホールド各部の温度分布が実使用である高温域の温度分布を正しく反映しているかをはじめに確かめた。ここでは、Table 4に示した形状の異なる三種類のエキゾーストマニホールドについて温度分布測定を行なった。試験としては、実使用温度状態および拘束率測定時の温度状態である300°C程度になる様にエンジンを運転し、これらの状態における温度分布比較を行った。この時の比較温度は、双方の運転条件での飽和温度とした。その結果をFig.10に示す。

Table 4 Aspect of the exhaust manifold for experiment

	Type-A	Type-B	Type-C
Aspect			
Engine	L4, SOHC 1.6L	L4, SOHC 2.2L	L3, SOHC 0.66L

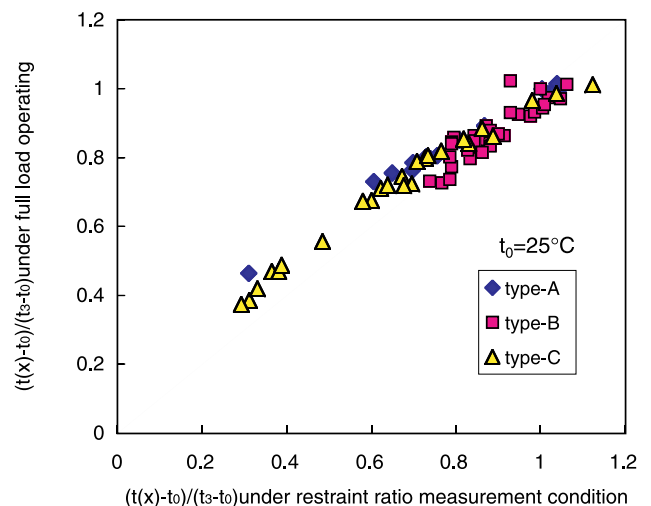


Fig.10 Comparison of temperature distribution

双方は直線の関係にある、つまり形状に関係なく温度には互いに良い相関性を有することが明らかとなった。したがって300℃程度の低い温度条件下で拘束率を求めることの妥当性が証明できた。

4. 3. 熱疲労寿命の判定に対する拘束率の有効性

エキゾーストマニホールドの熱疲労寿命が拘束率により判定可能か否かを確かめるために、形状の異なるエキゾーストマニホールドにて確認した。ここではその一例について延べる。

試験に際し、Fig.11で示す、A領域のみ異なる断面肉厚を設定した4気筒用のエキゾーストマニホールドを製作し、そのエキゾーストマニホールドにて耐久試験およびA領域の拘束率測定を実施した。

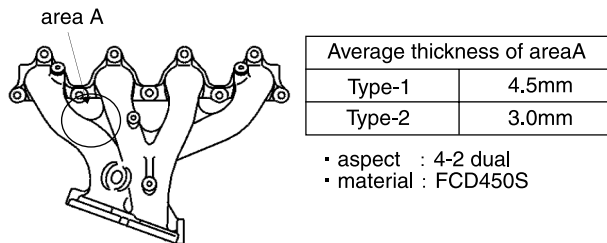


Fig.11 Specifications of exhaust manifold for the examination

耐久試験の結果、Type-1は問題なく目標とする寿命に達したが、断面肉厚を薄くしたType-2については、耐久試験の中でA領域に熱疲労破損が発生した。

次にA領域の拘束率測定結果をFig.12に示す。Type-2のエキゾーストマニホールドでは、耐久試験において熱疲労破損を生じた個所の拘束率が最も高い値を示した。更に目標とする寿命に達したType-1での拘束率は、Type-2に対しほぼ全域に渡って低い値であることが解る。

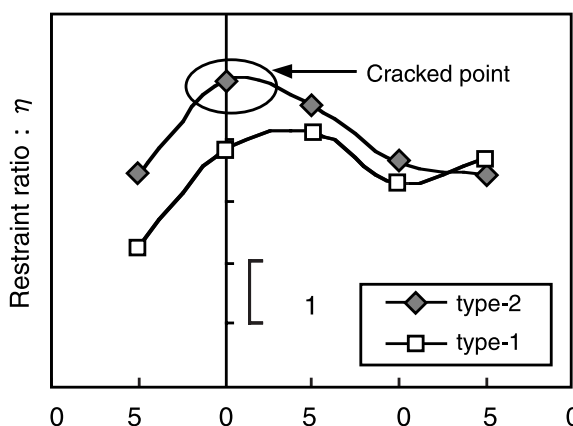


Fig.12 Distribution of restraint ratio at the near by cracked

このように、拘束率の測定結果は耐久試験結果と良く一致した。即ち、問題の生じた部分における拘束率の値が他の部位に比べ大きく、また、形状を変更することにより拘束率を小さくすると、それに従って耐久性が向上する。以上のことから拘束率により熱疲労寿命評価が可能であることが明らかになった。

4. 4. エキゾーストマニホールドの熱疲労評価に対する拘束率の形状依存性

次に、材料試験の中で熱疲労寿命が拘束率と温度で一義的に定まることが確認されたが、そのことが各々形状の異なるエキゾーストマニホールドにおいても同様に定義でき、測定した拘束率および温度と熱疲労寿命の関係が一定の値で整理することが可能か否かについて確認した。その時の供試エキゾーストマニホールドの一覧をTable 5に示す。

Table 5 Various exhaust manifold aspect for experiment

No.	Manifold type	Material	Engine type
1	4-1type-a	FCD450S	L4 SOHC 1.2L
2	4-1type-b	FCD450S	L4 DOHC 1.6L
3	4-2type-a	FCD450S	L4 DOHC 1.6L
4	4-2type-b	FCD450S	L4 SOHC 2.0L
5	4-2type-c	FCD450S	L4 SOHC 2.2L
6	4-2type-d	FCD450S	L4 SOHC 2.2L
7	4-2type-e	FCD450S	L4 SOHC 2.2L
8	3-1type-a	FCD450S	V6 SOHC 3.0L
9	3-1type-b	FCD450S	L3 SOHC 0.66L
10	3-1type-c	FCD450S	L3 SOHC 0.66L

試験としては、形状の異なる各エキゾーストマニホールドに対して、拘束率の多点測定、耐久試験および拘束率測定個所の耐久試験中の温度測定を行なった。

それぞれの結果を、耐久試験中の各温度に対する各拘束率のグラフ上にプロットするとFig.13となる。図より、拘束率と温度がある値以上になった場合には耐久試験上で熱疲労破損の問題が発生しており、そうでない場合は耐久試験でも問題の発生は無い。これらの結果は種々のエキゾーストマニホールド形状に左右されず、図中の直線A-Aで示すような、およそ一定の拘束率と温度の関係で分別出来る。

以上から、エキゾーストマニホールドに対する拘束率による熱疲労の評価手法は、種々のエキゾーストマニホールド形状に対しても適用可能と判断出来る。

この結果は、拘束率がエキゾーストマニホールドの耐久性を判断する指標として妥当であり、高温において生じる弾塑性域の事象を、弾性域のひずみ解析で取り扱っても実用上問題が無いことを意味している。

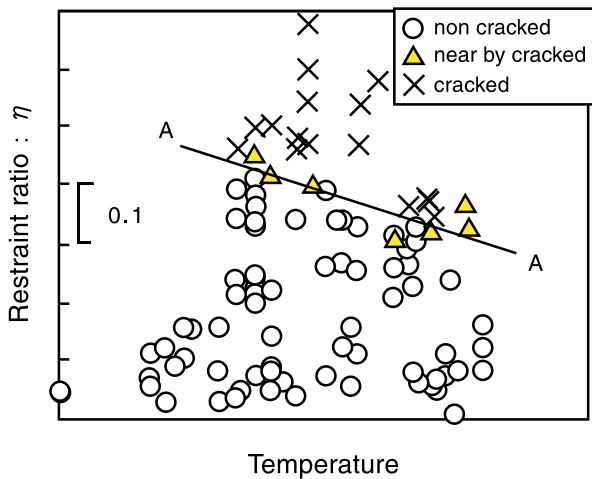


Fig.13 Acceptable line for manifold durability

これにより、これまでエキゾーストマニホールドの熱疲労評価をする上で課題であった高温域での測定の必要性が無くなったことで、従来に対し測定が簡便で且つ自由度が広がり、実物での評価精度が向上した。更に拘束率は弾性域パラメータであるため、CAEに対し、一般的な弾性域のひずみ解析から計算可能であり、容易に開発に使用可能である。また、シミュレーション対象となる拘束率がエキゾーストマニホールドで測定可能なことから、その精度検証などに対し有利であり、シミュレーション精度向上に寄与すると考える。

5. CAE技術

従来はCAEによりエキゾーストマニホールドの熱疲労寿命を評価する場合には弾塑性域解析が必要であるとされてきたが^{3)~5)}、本研究にて提示した拘束率を評価パラメータとして導入することにより、弾性域解析での評価が可能となった。

本研究では拘束率を導入した際のCAEによるエキゾーストマニホールドの熱疲労寿命評価の妥当性の検証結果を示す。

5. 1. 解析モデル

解析に用いたモデルはFig.14に示す節点数7 140、要素数4 534のソリッドモデルとした。

解析計算を実行する際には、シリンダヘッドおよびエキゾーストマニホールドステーのFEMモデルを作成し、付加した状態で計算を実行した。

5. 2. 温度分布

エキゾーストマニホールドの温度分布は三次元の流れ解

析により熱伝達係数を算出し、熱伝導解析を実行して求める。

本項ではCAEにより算出された拘束率と実機拘束率測定結果との検証を目的とするため、測定時の排気温度を計算モデルに与えてエキゾーストマニホールドの温度分布を求めた。

結果をFig.15に示す。

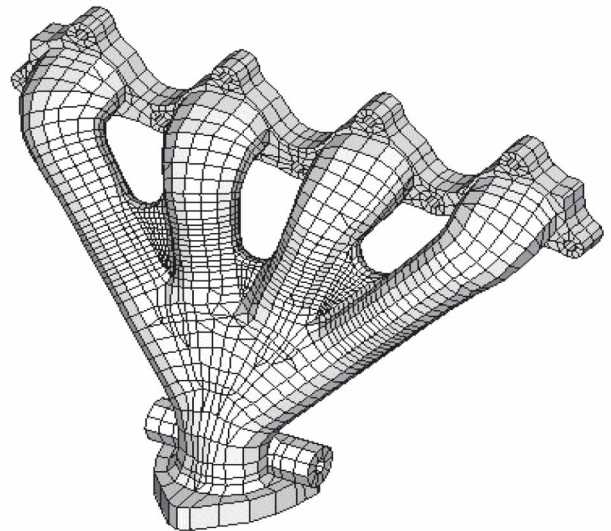


Fig.14 FEM model

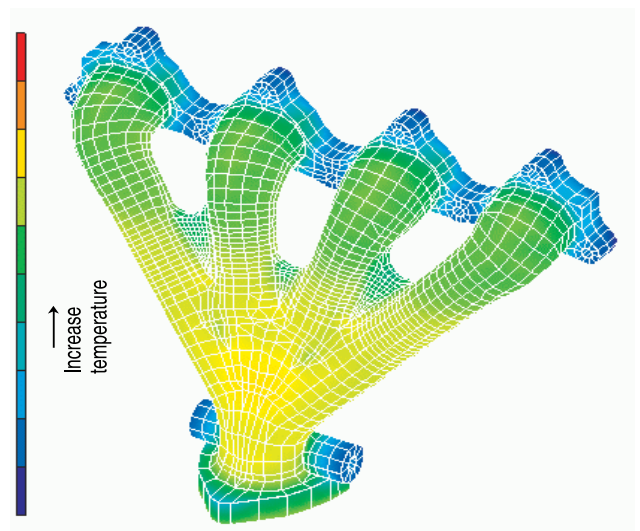


Fig.15 Calculation result of temperature

5. 3. 拘束率解析結果

25°Cにおける初期平衡状態を基準として、温度分布解析により求められた温度まで上昇した時の弾性域解析を実行し、得られた熱ひずみ量から拘束率(η)を算出する。

実測および計算時の測定ポイントをFig.16に、エキゾーストマニホールド全体の熱ひずみ分布および拘束率の実測値と計算結果をそれぞれFig.17, 18に示す。拘束率計算値は実

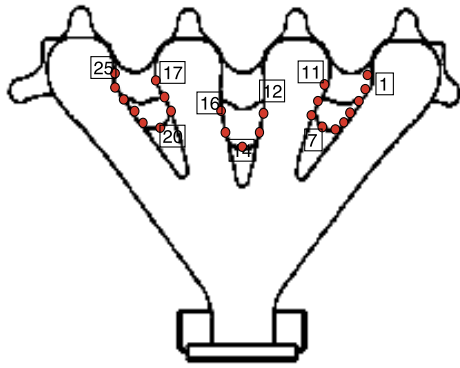


Fig.16 Measured points

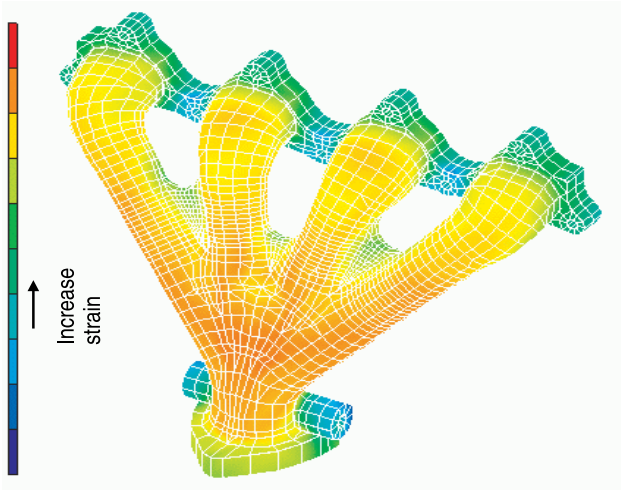


Fig.17 Calculation result of strain

機測定結果と良く一致している。

以上より、エキゾーストマニホールドの拘束率の予測が弾性域解析で十分可能であることが検証できた。

6. まとめ

エキゾーストマニホールドにおける熱疲労の定量的評価パラメータに拘束率を適用し、その有効性を実証できた。その結果、従来に対してエキゾーストマニホールドでの測定において簡便性および自由度が広がり、評価精度が向上した。またCAEに対しても、一般的な弾性ひずみ解析でシミュレート可能なことから、多くの材料データの必要性が無くなり、更に、実機との相関検証が容易にできることによりCAE精度の向上が実現できた。

また、今回提示した拘束率は、エキゾーストマニホールド各部のパネ定数比(a)で決まることがわかった。パネ定数比(a)は、エキゾーストマニホールド各部の形状に依存するため、各部位の形状設計に対し有用と考えられる。

以上をまとめると、

- (1)材料試験、実物での測定、耐久試験の結果、拘束率(η)は、熱疲労寿命の評価パラメータとして妥当であることが実験的に証明できた。
- (2)一般箔ゲージを使用することで、簡便にエキゾーストマニホールドにおける拘束率測定が可能となった。
- (3)拘束率と温度を測定することで、耐久試験によらないエキゾーストマニホールドの熱疲労寿命評価が可能となった。
- (4)拘束率をCAEに活用することで、従来より簡便な手法でも実測と良く一致し、図面段階での寿命予測が可能となった。

謝 辞

本研究の材料基礎試験にあたり、浅間技研工業株式会社の石井 峰雄氏、竹内 長男氏、丸山 正俊氏をはじめ多くの方々から多大な御協力をいただいたことを記し感謝いたします。

参考文献

- 1) 矢野 満：発砲ウレタンモデルによる熱応力解析，日本機械学会，No.900-63，p.71-76(1990)
- 2) 安藤聡ほか：排気マニホールドの熱応力解析，自動車技術会講演会前刷集，Vol.943，p.89-92(1994)
- 3) 渡辺 義正ほか：SUS製エキゾーストマニホールド亀裂予測解析，TOYOTA Technical Review，Vol.47，No.1，p.108-113(1997)
- 4) 高橋剛ほか：エキゾーストマニホールドの熱解析システ

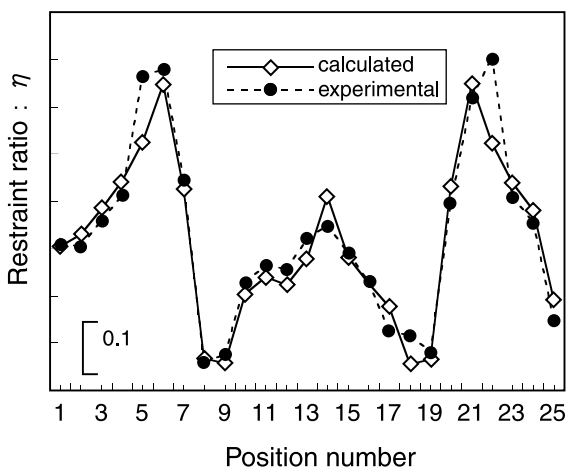


Fig.18 Correlation of restraint ratio between calculated and experimental

- ムの開発, 自動車技術会講演会前刷集, Vol.954, p.265-268(1995)
- 5) 河野 弘明ほか: FEMによるエキゾーストマニホールド弾塑性熱解析の精度向上, 自動車技術会講演会前刷集, Vol.901, p.377-380(1990)
- 6) 河本 進: ステンレスパイプ製排気マニホールドの開発, 三菱自動車テクニカルレビュー, No.4, p.73-80(1992)
- 7) 工藤 邦人: 実測温度を用いたエキゾーストマニホールドの熱歪み解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, Vol.983, p.81-84(1998)
- 8) 木村浩文ほか: エンジン排気系部材の熱疲労特性とその寿命予測, 日立金属技報, Vol.8, p.79-84(1992)

■ 著 者 ■



中田 真



石井和夫



榎本 勝



小西泰則



高橋 伸一