

# ステンレス鋼製排気系部品の熱ひずみ測定技術

## Thermal Strain Measurement Technology of Stainless Steel Exhaust System Parts

今川 一成\*      岡 義洋      奥 学  
Kazunari IMAKAWA      Yoshihiro OKA      Manabu OKU

### 抄 録

自動車の排気系部品であるエキゾーストマニホールドは、エンジンより排出される高温の排ガスに曝され、エンジンの回転数にともない加熱・冷却が繰り返されるため、熱疲労破壊を生じることがある。エキゾーストマニホールド開発の短縮やコスト低減のため、CAE解析が広く適用されているが、耐久寿命予測の精度が不十分なため、ベンチ耐久のやり直しが頻発している。耐久寿命予測精度向上には、実部品を用いて加熱・冷却中に発生するエキゾーストマニホールドの熱ひずみ量を正確に把握することが必要となる。このような背景から、高温下での非接触ひずみ測定を種々検討し、実部品における熱ひずみ分布を把握する技術を開発した。

### Abstract

Exhaust manifolds used as an exhaust system part of automobiles are exposed to high temperature exhaust gases discharged from engines, and are repeatedly heated and cooled along with the rotational speed of the engine. Therefore, thermal fatigue failure may occur in some cases. Currently, CAE analysis is being applied to shorten the development of exhaust manifolds and reduce costs. However, since the accuracy of the durable life prediction is not yet reliable, bench durability tests have been redone frequently. In order to improve the accuracy of the durable life prediction, it is necessary to use actual parts to accurately understand the amount of thermal strain of exhaust manifolds which occurs during the heating and cooling. Based on such a background, we performed various examinations of non-contact strain measurements under high temperatures, and developed technology to understand the thermal strain distribution on actual parts.

## 1. 緒 言

自動車の排気系部品には、耐熱性、耐食性の観点から、主にフェライト系ステンレス鋼が使用されている。排気系部品のなかでも、最も上流に取り付けられるエキゾーストマニホールド(以下、エキマニと略記する)は、エンジンより排出される高温の排ガスに曝され、エンジンの回転数にともない加熱・冷却が繰り返される。エキマニがステーや他部品により拘束された状態で加熱・冷却されると、熱ひずみが発生し、その繰り返しにより熱ひずみが蓄積され、熱疲労破壊を生じる。これまで、高温強度を高めることで、熱疲労特性を向上させた鋼として、NSSC® HR-1(14Cr-1Mn-1Si-0.4Nb-0.1Cu)<sup>1)</sup>、NSSC EM-3(18Cr-1Mn-2Mo-0.65Nb-0.2Cu)<sup>2)</sup>、NSSC EM-C(17Cr-1.4Cu-Nb-Ti)<sup>3)</sup>、NSSC 429NF(14Cr-1.4Cu-Ti)<sup>4)</sup>などのエキマニ用材料を開発している。

一方、自動車メーカーでは、エキマニ開発期間の短縮やコスト低減のため、CAE(Computer Aided Engineering)解析が広く適用されており、熱応力解析により算出した熱ひずみ量から、ベンチ耐久寿命を予測している<sup>5)</sup>。CAE解析では、熱ひずみ集中部から破損位置の特定は可能であるが、熱ひずみ量の絶対値は、その精度が不十分なため、CAE解析やベンチ耐久のやり直しが頻発しており、CAE解析を用いた耐久寿命予測の精度向上が強く求められている。

耐久寿命予測の精度向上のためには、実部品を用いて加熱・冷却中に発生するエキマニの熱ひずみ量を正確に把握することが必要となる。しかし、通常高温部品のひずみ測定に用いられる高温ひずみゲージは、溶接にて行われるため、溶接部のひずみ取り焼鈍によるひずみ量の校正が必要であり、取り扱いが限定される。また、ひずみゲージ長が数mm程度であり、取り付け位置も制限され、微小部の測

\* 日本製鉄(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 材料信頼性研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

定は不可能であるため、エキマニ実部品でのひずみ測定は困難であると推察される。

そこで、排気系部品での非接触によるひずみ測定装置を用いて、加熱・冷却中に発生する熱ひずみ量を正確に把握する技術開発に着手した。本報告では、非接触ひずみ測定の精度検証結果およびエキマニ実部品を用いた熱ひずみ測定結果について述べる。

## 2. 実験方法

### 2.1 冷熱サイクル再現装置

エキマニでの熱ひずみを測定するためには、室温から800℃近い高温までの冷熱サイクルを再現する必要がある。高周波誘導加熱を用いた熱疲労試験機と、独自作製した冷熱サイクル再現装置を用いて試験を実施した。

図1に冷熱サイクル再現装置の概略図を示す。従来、エキマニの冷熱サイクルは、実機エンジンあるいはバーナー等の燃焼ガスを使用するため、空燃比や燃焼温度の制御が難しく、また、安全面での莫大な費用および管理が必要であった。一方、独自作製した冷熱サイクル再現装置は、大気を吸引するブロアーと、その大気を加熱する電気ヒーターで構成されている。ブロアーは、インバーターの周波数を任意に設定し、風量を制御・調整できるシステムとした。電気ヒーターは、ブロアーより排出された大気とカンタル線表面の接触面積を大きくするため、らせん状カンタル線をさらにらせん状に巻いた構造とし、電気ヒーター出側の排ガス最高温度が1050℃以上に設定可能となった。また、温度制御は2～4系統並列制御と1系統単独制御に切り替え可能であり、各ヒーターの間隔も可動式とすることで、エキマニの組み上げ品からパイプ加工の模造品まで様々な形状サンプルでの冷熱サイクル試験が実施できるシステムとした。

図2にエキマニサンプル取り付け方法の一例を示す。エンジンブロックの冷却を模擬できるように、水量調整可能な水冷フランジを作製し、エキマニを任意のトルクで締結できる構造とした。なお図中のエキマニは、後述する非接触ひずみ測定のため、耐熱スプレーで白黒のランダム斑点を塗布した状態で組み付けている。図3に各ヒーター出側

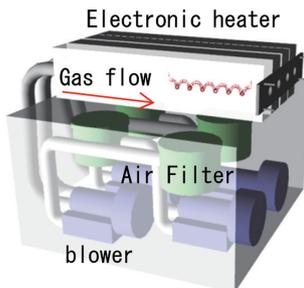


図1 冷熱サイクル再現装置の概略図

Schematic diagram of heating-cooling cycle reproduction system

での排ガス温度測定結果を示す。各ヒーター出側排ガス制御条件は、加熱および冷却速度は約2.4℃/sとし、上限温度を1050℃、均熱時間を10minとした。図中に矢印で示すように、加熱および冷却の均熱到達時にわずかに制御からの遅れが認められるものの、いずれのヒーターにおいても、ヒーター出側排ガス最高温度が1050℃の冷熱サイクルを再現できている。

### 2.2 非接触ひずみ測定方法

エキマニのひずみ分布を測定するためには、非接触かつ広範囲で測定する方法を選定する必要がある。市販されている非接触ひずみ測定装置から、加熱中のひずみ測定に適した測定方法を検討した。レーザー光を用いた非接触ひずみ測定装置は、スリット状のレーザー光をサンプル表面に照射し、その反射光をCCDカメラで受光することで、形状、ひずみを測定するシステムであるが、赤熱表面での測定が不可能であり、加熱中のひずみ測定は困難であった。また、プロジェクタからフリンジパターンを照射する測定も、レーザー光同様、赤熱表面での測定が不可能であり、加熱中のひずみ測定は困難であった。一方、デジタル画像相関法(DIC)を用いる非接触ひずみ測定装置は、サンプル表面に施したランダム斑点を2台の高解像度デジタルカメラで撮

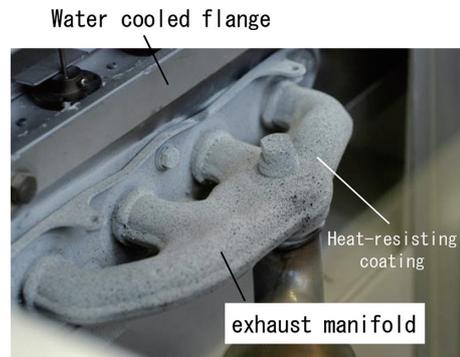


図2 エキマニ取り付け方法  
Exhaust manifold mounting method

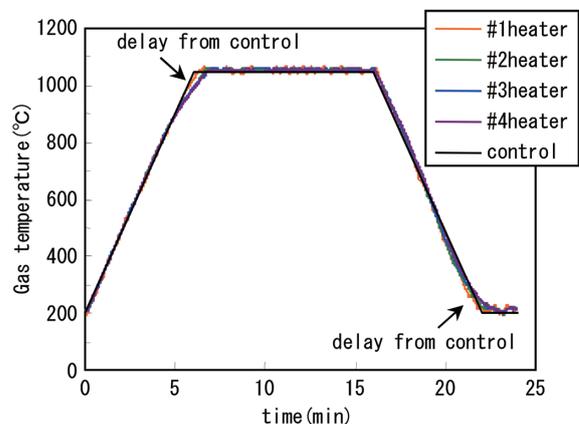


図3 各ヒーター出側での排ガス温度測定結果  
Exhaust gas temperature measurement results on outlet side of each heater

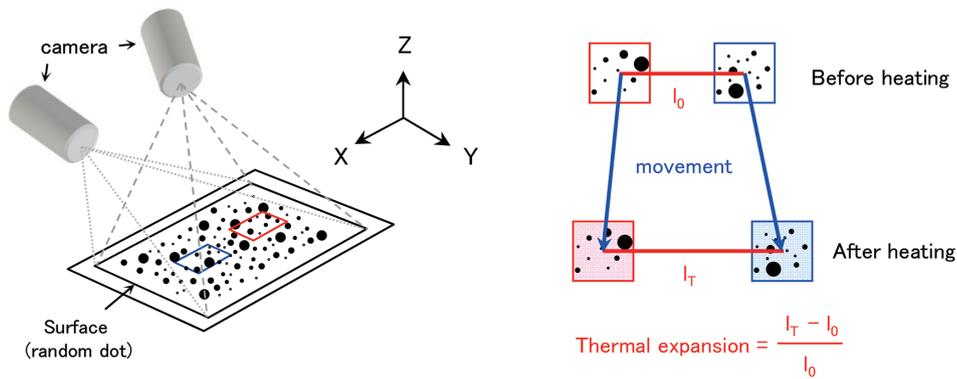


図4 DICにおける移動量および熱膨張量測定原理  
Movement amount and thermal expansion amount measurement principle in DIC method

影することで、撮影時のサンプル表面形状を3次元で捉えることができ、ランダム斑点を認識できる範囲であれば、赤熱表面においても測定が可能であった。また、耐熱ガラス越しの撮影も可能であり、加熱したサンプルによる輻射熱を防止し、安全に測定することが可能であった。図4にDICでの移動量および熱膨張量測定原理を示す。2台のカメラで捉えた加熱前後のサンプル表面形状データをDICにて解析することで、移動量およびひずみ量を算出することができる。また、複数の方向から同時撮影も可能であり、一部重複するエリアを撮影することで、解析画像を接続することもでき、広範囲での測定が可能で特徴も有している。

以上の検討結果から、非接触ひずみ測定方法として、デジタル画像相関法(以下、DIC systemと表記する)を選定した。

### 3. 試験結果

#### 3.1 DIC systemでの移動量測定精度検証結果

##### 3.1.1 常温での移動量測定精度検証結果

熱ひずみ測定で取り扱うひずみ範囲は、数%以下であり、高い精度での測定が必要である。そこでまず、エキマニで発生し得るひずみ量を測定可能か検証した。図5に常温での移動量測定精度検証方法を示す。伸び校正器の片面に接触式の伸び計で移動量を測定しながら、もう片面側をDIC systemにて測定することで、常温での移動量測定精度を検証した。移動量測定範囲は、実際のエキマニにて想定される移動量範囲とし、10~1000 $\mu\text{m}$ の範囲とした。図6に常温での移動量測定精度検証結果を示す。DIC systemで測定した移動量は、いずれの範囲においても伸び計で実測した移動量の $\pm 3\%$ 以内の誤差範囲であり、高精度で移動量を測定できることが確認された。

##### 3.1.2 冷熱サイクル中での熱膨張量測定精度検証結果

写真1に冷熱サイクル中での熱膨張量測定精度検証方法を示す。パイプ熱疲労試験片に常温時と同様の伸び計を取り付け、同時にDIC systemで移動量を測定することで、

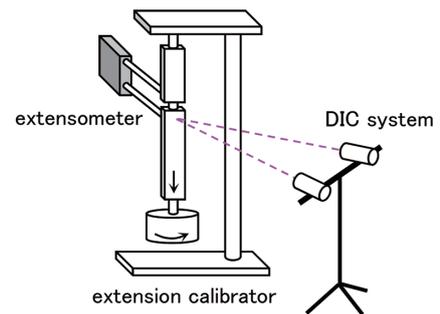


図5 常温での移動量測定精度検証方法  
Verification method of movement amount measurement accuracy at normal temperature

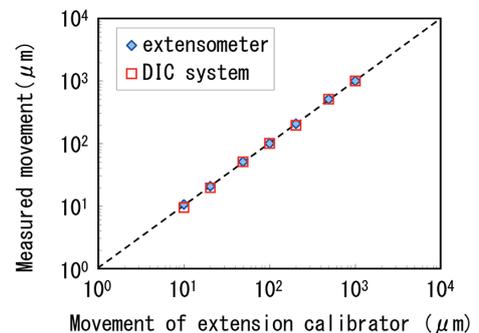


図6 常温での移動量測定精度検証結果  
Verification results of movement amount measurement accuracy at normal temperature

冷熱サイクル中の熱膨張量測定精度を検証した。熱疲労試験条件は、加熱-冷却条件は200~750 $^{\circ}\text{C}$ とし、サンプルにかかる荷重がゼロ、すなわち自由熱膨張状態となるように制御した。

図7に伸び計およびDIC systemを用いた冷熱サイクル中の自由熱膨張量測定結果を示す。また、図中には線熱膨張係数より算出される自由熱膨張量も合わせて示す。なお、DIC systemでの自由熱膨張量は、伸び計先端直近2点(標点間距離:15mm)の移動量の差分から算出した。非接触ひずみ測定での自由熱膨張量は、いずれの温度においても伸び計で実測した自由熱膨張量の $\pm 3\%$ 以内の誤差範囲であり、サンプル表面が赤熱状態となる冷熱サイクル中におい

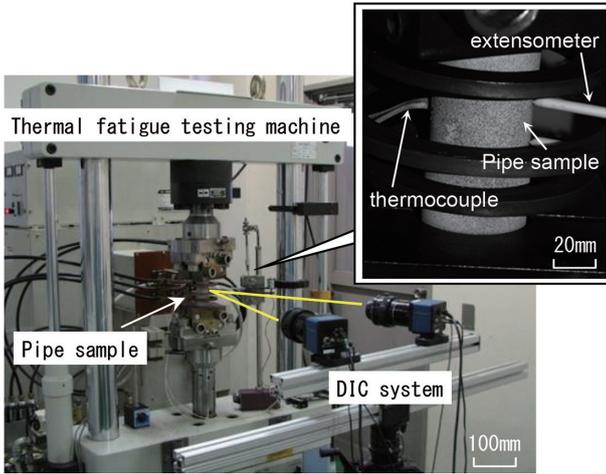


写真1 冷熱サイクル中での熱膨張量測定精度検証方法  
Verification method of thermal expansion amount measurement accuracy during heating-cooling cycle

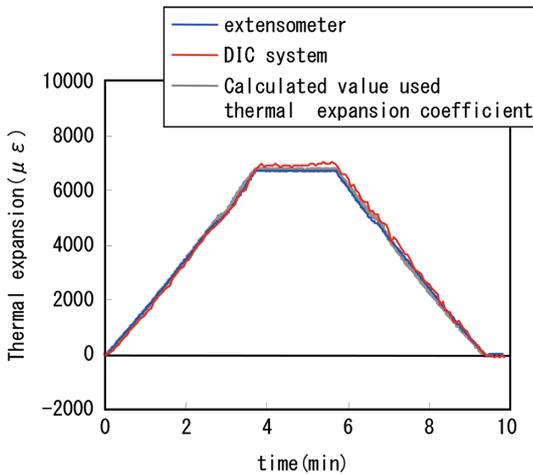


図7 冷熱サイクル中の自由熱膨張量測定結果  
Measurement results of free thermal expansion amount during heating-cooling cycle

でも、高精度に熱膨張量を測定できることが確認された。

#### 4. 実部品での熱ひずみ測定結果

##### 4.1 エキマニ温度測定結果

図8にサーモビュアで測温したエキマニの最高到達温度測定結果を示す。エキマニ下流側に向かって温度が上昇しており、4つのポートからの排ガスが集まる集合部では、最高到達温度が約750℃まで上昇している。また、エキマニフランジ部は400℃以下であり、エキマニポート部より剛性が高いことが予測される。エンジンベンチ耐久時の最高到達温度も約750℃であり、実エンジンと冷熱サイクル再現装置で送風条件に差はあるものの、フランジ部を含め、温度分布は再現できていると推察できる。

##### 4.2 冷熱サイクル中のエキマニの移動熱ひずみ量測定結果

図9にエキマニの最高到達温度時点における熱ひずみ量

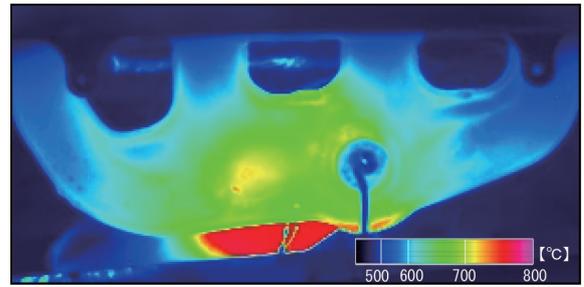


図8 エキマニの最高到達温度測定結果  
Measurement results of maximum attained temperature of exhaust manifold

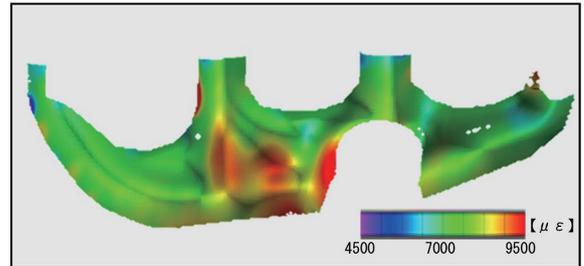


図9 最高到達温度時点における熱ひずみ量測定結果  
Thermal strain amount measurement results at maximum attained temperature

測定結果を示す。温度分布にしたがい、エキマニ下流側にむけて熱膨張量は増加している。しかし、実際に材料にかかるひずみ量は、温度上昇代から予測される自由熱膨張量と比較しないと明確にはならない。

材料にかかるひずみ量 ( $\varepsilon$ ) は、その材料の線熱膨張係数 ( $\alpha$ ) と、加熱前後の温度差 ( $\Delta T$ )、測定した熱ひずみ量 ( $\varepsilon_m$ ) から、下記式 (1) で算出することができる。

$$\varepsilon = \alpha \Delta T - \varepsilon_m \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$  は正であれば加熱時に圧縮ひずみが発生している、すなわち加熱とひずみの位相が逆となる out-of-phase モードであることを意味し、負であれば、その逆の in-phase モードであることを意味する。本測定では、温度分布と熱ひずみ量分布を同時に測定しており、測定点のそれぞれで式 (1) を算出することで、材料にかかるひずみ分布を把握することができる。なお、温度分布測定と熱ひずみ量測定はそれぞれ別のソフトウェアを用いて解析しているが、測定位置を一致させることで、一括して材料にかかるひずみ量へ変換する独自ソフトウェアも開発している。

図10は図9のエキマニの最高温度分布にその温度での線熱膨張係数をかけて算出した自由熱膨張量分布および式 (1) で算出した材料にかかるひずみ分布を示す。温度分布において最高温度を示す部位より、#2ポートと#3ポートの集合部に圧縮の熱ひずみが集中する部位が認められる。また、エキマニ上流部には引張の熱ひずみ部も確認される。熱疲労寿命は温度差  $\Delta T$  が大きいほど、拘束率が高いほど、短寿命になることが知られており<sup>5,6)</sup>、測定したエキマニでは、圧縮の熱ひずみが集中する#2ポートと#3ポートの集

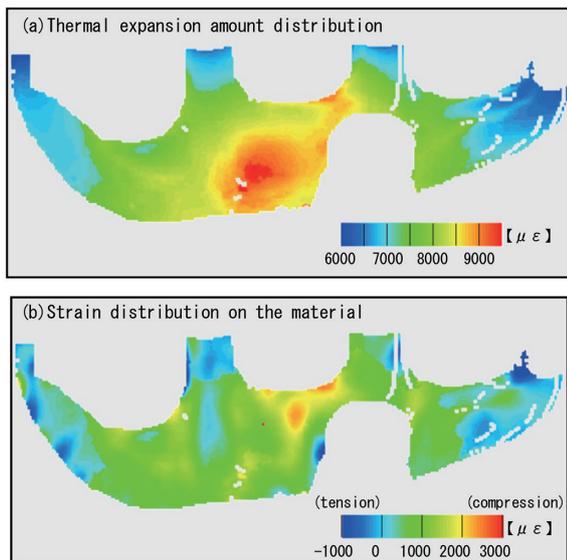


図 10 最高到達温度時点における熱膨張量分布および材料にかかるひずみ分布

Thermal expansion amount distribution and strain distribution on the material at maximum attained temperature

合部が熱疲労破壊しやすい部位と推定される。実際、別途実施したベンチ耐久試験では #2 ポートと #3 ポートの集合部に熱疲労特有のしわが発生しており、熱ひずみ測定技術は亀裂発生部位予測に有用な技術であることが示された。さらに、得られた材料にかかるひずみ量と熱疲労特性の関係を組み合わせることで、寿命予測精度向上に寄与するものとする。

本技術は、可視できる範囲であれば、エキマニ以外にもターボチャージャーや EGR (Exhaust Gas Recirculation) クーラー等の部品や、それら溶接部を含む接合部も測定可能である。加えて、ガラス越しでの撮影も可能であるため、測

定したい部分をガラス張りにすることで、部品内部のひずみも測定することができる。測定の際は、部品の拘束状態の再現が重要となるが、エンジンベンチ耐久時にも測定可能であることを確認しており、幅広く活用できる技術であるといえる。

## 5. 結 言

エキマニ実部品の冷熱サイクルを再現し、非接触ひずみ測定装置にて加熱前後のエキマニの熱ひずみ量を計測する技術を開発した。得られた知見を以下に要約する。

- (1) デジタル画像相関法を用いたひずみ測定精度は、常温および冷熱サイクル中ともに  $\pm 3\%$  以内であり、加熱 - 冷却時のエキマニ各部位の熱ひずみ量を精度良く測定できる。
- (2) 温度分布と熱ひずみ分布を同時に測定し、材料にかかるひずみ分布を算出することで、実部品での熱疲労亀裂発生部位を高精度に予測することができる。

## 参考文献

- 1) 奥学, 中村定幸, 平松直人, 植松美博: 日新製鋼技報, (74), 26 (1996)
- 2) 奥学, 藤村佳幸, 中村定幸, 伊東健次郎, 名越敏郎, 植松美博: 日新製鋼技報, (80), 32 (2000)
- 3) 富田壮郎, 奥学: 日新製鋼技報, (90), 30 (2009)
- 4) 濱田純一, 林篤剛, 神野憲博, 小森唯志, 伊藤宏治, 福田望, 井上直治: まてりあ, 56, 33 (2017)
- 5) 奥学, 藤村佳幸, 名越敏郎: 材料とプロセス, 13, 1173 (2000)
- 6) 奥学, 中村定幸, 平松直人, 植松美博: 日新製鋼技報, (66), 37 (1992)



今川一成 Kazunari IMAKAWA  
日本製鉄(株)  
技術開発本部 鉄鋼研究所  
材料信頼性研究部 主幹研究員  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



岡 義洋 Yoshihiro OKA  
日鉄ステンレス(株)  
研究センター 厚板・棒線材料研究部  
研究員



奥 学 Manabu OKU  
日鉄ステンレス(株)  
研究センター 機能創製研究部  
部長 首席主幹研究員