

# SULEV 用低熱容量 エキゾーストマニホールドの開発

Development of a Low Heat-Capacity Exhaust Manifold for SULEV

石井 和夫\*  
Kazuo ISHII

宗村 岳\*  
Takeshi MUNEMURA

吉田 信行\*  
Nobuyuki YOSHIDA

## 要 旨

## ABSTRACT

触媒の活性化温度到達時間を短縮するために低熱容量の二重構造エキゾーストマニホールドを開発した。インナパイプをできるだけ薄くするために、最適成分設計により高温強度、耐酸化性を大幅に向上したオーステナイト系ステンレス鋼を開発した。この材料を用いることで、高温での座屈強度を向上することができ、0.4mm厚のインナパイプとすることができた。米国エミッションモードにおいて、インナパイプを0.4mm厚とした二重構造エキゾーストマニホールドは、2 mm厚の通常の一重構造品に対して触媒の活性化開始温度に達する時間を3 sec 早期化することができ、HC 排出量を約 22%低減することができた。開発したエキゾーストマニホールドと、空燃比制御技術および触媒技術을 合わせて適用することにより、床下配置コンバータにおいて 01 モデルの SULEV 仕様車よりも貴金属量を約 20% 低減することができた。

A dual-wall exhaust manifold was developed that has low heat capacity in order to reduce the time taken to reach the catalyst activation temperature. An austenitic stainless steel with significantly improved high-temperature strength and oxidation resistance was developed by optimizing the composition design so that the inner tube could be made as thin as possible. The use of this material made it possible to increase the buckling strength at high temperatures and to make the inner tube wall 0.4 mm thick. In United States emission modes, a dual-wall exhaust manifold with an inner tube having a wall 0.4 mm thick is able to reach the catalyst light-off temperature 3 seconds faster than an ordinary single-wall manifold that is 2 mm thick. This achieved a reduction of approximately 22% in hydrocarbon (HC) emissions. The combined application of air-fuel ratio (A/F) control technology and catalyst technology together with the developed exhaust manifold made it possible to reduce the amount of precious metals used in an under-floor converter by approximately 20% compared to a 01 model vehicle with SULEV specifications.

## 1. まえがき

近年、自動車地球環境に与える影響が注目されつつあり、各地域でさまざまな規制が施行されている。中でも、排気による大気汚染については米国のカリフォルニア州を初めとして各国で早期からその規制への取り組みがなされてきており、かつては達成が不可能といわれていたULEV (Ultra low emission vehicle)や SULEV (Super ultra low emission vehicle)に適合する市販車も増えつつある。これらのエンジ

ンでは燃焼の改善、空燃比制御の精密化、触媒コンバータの浄化性能向上や排気システムの改良などの技術を組み合わせることで、排気中の汚染物質を低減している<sup>(1), (2)</sup>。

なかでも、触媒コンバータは排気浄化に対して大きな役割を担っているため、排気エミッションの規制強化に伴って触媒作用のある貴金属使用量が増加しつつある。このことから、貴金属資源保護の観点でその使用量を削減しつつ浄化性能を向上する技術が従来にも増して重要となってきている。

\*栃木研究所

## 2. 開発のねらい

エキゾーストマニホールドの薄肉低熱容量化はエンジン始動時の排気温度の低下を抑制し、触媒の昇温特性を改善することができる。このような効果をねらって、インナが0.6mm厚の二重構造エキゾーストマニホールドが開発され、エミッション低減効果があることが報告されている<sup>(3)</sup>、<sup>(4)</sup>。このように、エキゾーストマニホールドの低熱容量化は排気エミッションの低減に寄与する技術として標準的な技術になりつつあるが、より一層の排気エミッション低減と触媒コンバータの貴金属使用量削減のためにも、従来にも増して低熱容量化の技術が求められてきていた。しかしながら、インナ材として従来から用いられているフェライト系ステンレス鋼を用いた場合は、0.6mm厚が強度的な限界であった。本開発では、高強度なオーステナイト系ステンレス鋼を開発し、これを適用することでいっそうの薄肉低熱容量化をねらった、インナが0.4mm厚の二重構造エキゾーストマニホールドを開発し、貴金属使用量の低減とSULEVの両立に寄与することをねらいとした。

## 3. 構造

Fig. 1 に開発したエキゾーストマニホールドの全体構造を示し、適用材料の一覧を Table 1 に示す。パイプ、チャンバともに断熱二重構造を適用した 4-1 集合形態としている。インナパイプは熱容量に対する寄与が大きいため、強度との両立を考えた極限の低熱容量化を目指すために、従来材よりも高強度な材料を開発することで 0.4mm 厚とした。

チャンバについても熱容量低減のために二重管構造を適用している。チャンバは排気流の下流端をステンレス鋼製メッシュを介して支持する構造としている。インナチャン

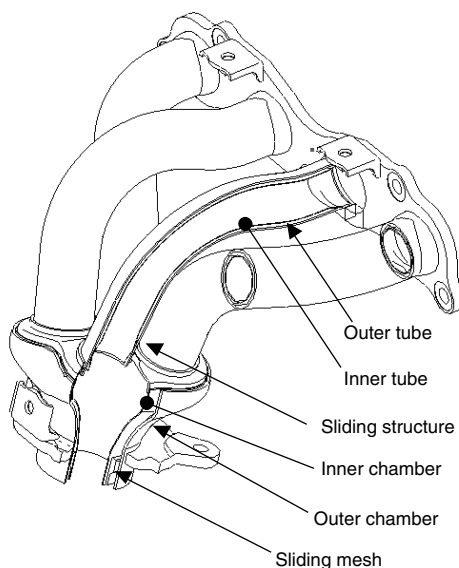


Fig. 1 Structure of exhaust manifold

Table 1 Applied material for each part

| Part          | Material                  | Thickness |
|---------------|---------------------------|-----------|
| Outer chamber | JIS SUH409L               | 2.0mm     |
| Inner chamber | 14Cr-Nb stainless steel   | 0.8mm     |
| Outer tube    | 14Cr-Nb stainless steel   | 1.5mm     |
| Inner tube    | Developed stainless steel | 0.4mm     |

バについては、メッシュによる安定したスライドが期待できること、および形状的にも座屈し難いことから、従来から用いられている0.8mm厚のフェライト系ステンレス鋼を適用した。以上のような仕様によりインナパイプ0.6mm厚、インナチャンバ0.8mm厚の従来の二重構造エキゾーストマニホールドに対して<sup>(3)</sup>、熱容量を15%低減している。

次に、本開発で最も重要な技術要素であるインナパイプの材料およびスライド機構について述べる。

## 4. 材料

従来の二重構造エキゾーストマニホールドで最も薄いインナ材料を用いているものとしては、0.6mm厚のフェライト系ステンレス鋼を用いている例があった<sup>(3)</sup>、<sup>(4)</sup>。これら従来品では熱疲労の観点での耐久性が最も重要視され<sup>(8)</sup>、熱膨張が小さいフェライト系ステンレス鋼を用いていた。しかしながら、二重構造エキゾーストマニホールドの開発が進み、熱膨張を吸収するスライド機構により熱疲労を回避する技術が確立したことで<sup>(3)</sup>、<sup>(4)</sup>、熱膨張が大きいオーステナイト系ステンレス鋼を用いることができる技術的環境が整ってきた。また、二重構造エキゾーストマニホールドのインナ薄肉化が進むにつれて、主たる破損形態が熱疲労から高温での高サイクル疲労に変化してきている<sup>(4)</sup>。本開発では薄肉低熱容量化を極限まで狙うために従来よりも更に薄肉な0.4mm厚のインナを達成目標とするため、高温での高サイクル疲労に優れるオーステナイト系ステンレス鋼を用いることを検討した。

### 4.1. 材料コンセプト

高温においては、オーステナイト系ステンレス鋼が強度的に優れているが、加工硬化が大きいことや、自動車用エキゾーストマニホールド特有の環境として常温と高温の熱サイクルが繰り返し加わるなどのことから、従来のオーステナイト系ステンレス鋼では以下のような課題があった。

- (1) 加工誘起マルテンサイトを生じると加工硬化が大きく、加工性が悪化する。また、加工誘起マルテンサイトは800℃程度で逆変態するため、変形等を生じる。
- (2) 熱膨張、収縮の繰り返しにより酸化膜がはく離し、耐繰り返し酸化性が低い。

このようなことから、繰り返し酸化に耐え、安定したオーステナイト組織であるステンレス鋼とすることをコンセプト

トとした。さらに、インナ厚を0.4mmとするためにできるだけ高温強度を高くすることも合わせて検討した。

#### 4.2. 成分設計

各特性を検討した結果、23Cr-11Ni-N-REM (Rare earth metal:希土類元素)という成分系を用いることとした。材料コンセプトとそれに基づいた達成方法について Fig. 2 に示す。それぞれの検討内容と結果を次に示す。

##### 4.2.1. オーステナイト組織の安定化

ステンレス鋼の組織は、合金成分から計算される Ni 等量:  $Ni_{eq}$  および Cr 等量:  $Cr_{eq}$  から Schaeffler の組織図を用いて推定することが一般的であるが、N を考慮する場合には Fig. 3 に示す DeLong の組織図を用いる<sup>(5)</sup>。加工誘起マルテンサイト変態を抑制するにはマルテンサイト生成領域(図中の左下)を避け、オーステナイト領域の成分系とすることが基本である。また、溶接時の凝固割れを回避するにはδフェライトをある程度析出させるような成分設定とすることが望ましく、フェライト寄りの成分設計とした。

##### 4.2.2. 耐繰返し酸化性の向上

オーステナイト系ステンレス鋼の繰返し酸化性がフェライト系ステンレス鋼よりも劣るのは、熱膨張の繰返しにより酸化皮膜がはく離し、酸化に対する保護性を喪失するからである。したがって、酸化皮膜の密着性を改善することで耐繰返し酸化性を向上することができる。

耐繰返し酸化性の高い合金としては Ni 基合金が一般的である。これは基材の熱膨張がオーステナイト系ステンレス鋼よりも小さく、酸化皮膜との熱膨張の差が小さいので熱膨張を繰返しても酸化皮膜が破壊されることがないからである。このようなことから、Ni を多量添加することで耐繰返し酸化性をある程度は改善することができるが、Ni は高価な合金元素であるため経済的ではない。一方、REM は酸化皮膜の粒界に析出して密着性を改善することが知られており<sup>(6), (7)</sup>、このような機構によることから極微量添加でも効果が大きい。したがって、Ni 添加よりも経済性に優れた REM 添加により耐繰返し酸化性を改善することとした。

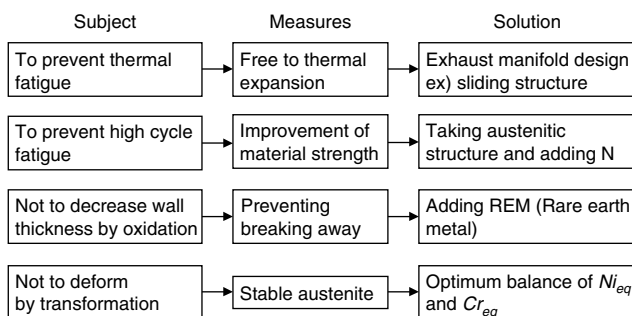


Fig. 2 Subject and solutions for thin inner wall exhaust manifold

#### 4.2.3. 高温強度の向上

高温での再結晶や回復の影響が無く強度を維持できる強化機構としては、基材に溶質原子を均一に固溶させる固溶強化や、基材に異質の析出物を微細分散させて強化する析出強化に限られる。自動車用排気系材料として考えた場合、溶接することや非調質であることを考慮すると、析出強化は適用し難いため、固溶強化を効果的に利用する必要がある。固溶強化に効果が大きい元素は侵入型の C や N であるが<sup>(8)</sup>、C は高温下で  $Cr_{23}C_6$  型の炭化物を形成して脆化の原因となり、高温で長期間安定して強度を維持するには適さない。また、上記反応で Cr を消費してしまうので耐酸化性も劣化してしまう。一方、N は高温下でも窒化物を形成し難く、高温でも長期間安定して強度を維持できる。また、耐酸化性を向上する効果もあることから<sup>(9)</sup>、N 添加により強化することとした。

#### 4.3. 適用成分系での諸特性

本開発材の成分の代表例を Table 2 に示す。次に、この成分系での各特性を述べる。

##### 4.3.1. 組織安定性

ステンレス鋼は一般的に焼鈍状態で加工に供される。焼鈍材料の冷間加工による金属組織の変化を Fig. 4 に示す。図からわかるように、初期のオーステナイト結晶粒は変形するが、加工誘起マルテンサイトは生じていない。これらの各加工度におけるフェライト率はフェライトスコープ (Fischer MP30) による測定では測定限界以下であった。これらのことから、安定オーステナイト組織であることがわかった。

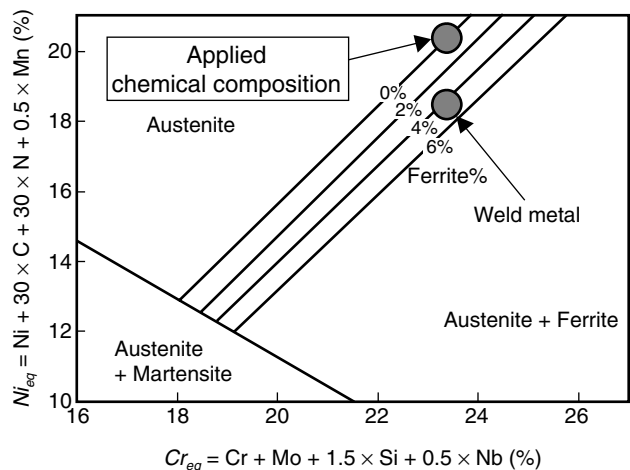


Fig. 3 DeLong diagram<sup>(5)</sup>

Table 2 Typical chemical composition of the developed stainless steel

| (mass%) |      |      |       |       |      |      |
|---------|------|------|-------|-------|------|------|
| C       | Si   | Mn   | Cr    | Ni    | N    | REM  |
| 0.07    | 0.31 | 0.79 | 22.86 | 11.68 | 0.20 | 0.03 |

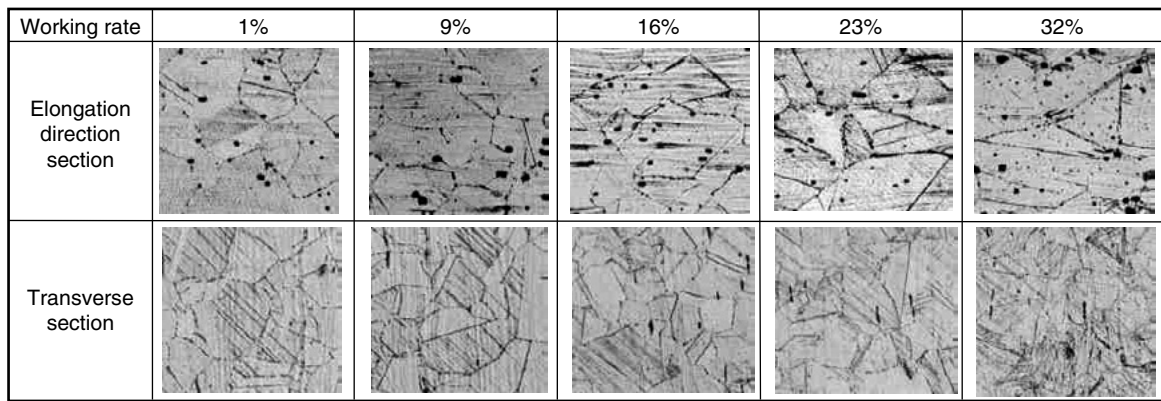


Fig. 4 Change of metal structure by cold working

TIG 溶接金属の組織は Fig. 5 に示すように、オーステナイトの樹枝状晶であることがわかる。オーステナイト系ステンレス鋼の溶接金属の溶接割れを回避するには5%程度のフェライトを析出させることが効果的であるとされる<sup>(5)</sup>。フェライトスコープにより溶接金属のフェライト率を測定すると、ほぼ5%で安定していた。溶接金属の窒素を分析すると0.14%であり、Ni等量は $Ni_{eq}=18.38$ となるので、Fig. 3 に示したようにフェライト率が約5%になる。このように、溶接による窒素含有量の低下によってフェライト率が最適な値となることがわかる。

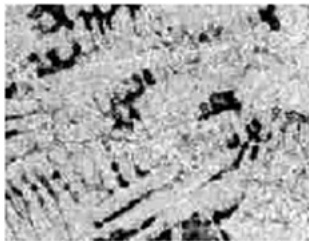


Fig. 5 Structure of weld metal

#### 4.3.2. 耐酸化性

大気中での各温度における連続酸化試験の結果を Fig. 6 に示す。連続酸化では酸化皮膜の成長により重量が増加し、これが小さい方が耐連続酸化性に優れた材料である。このことより、本開発材は従来のオーステナイト系ステンレス鋼と同等以上の耐連続酸化性であることがわかる。

次に、大気中でヒートサイクルを与えた場合の繰り返し酸化による重量変化を Fig. 7 に示す。このような繰り返し酸化では酸化皮膜がはく離することによる重量減少が見られ、これが小さい方が耐繰り返し酸化性に優れた材料である。本開発材は重量が減少していないことから、酸化皮膜がほとんどはく離せず、従来の鋼種よりも耐繰り返し酸化性に優れていることがわかる。

#### 4.3.3. 高温強度

高温強度特性のうち耐力について Fig. 8 に示す。本開発材はフェライト系ステンレス鋼で最も高温強度が高い SUS444 に比較して 800℃以上では約3倍の強度を達成している。また、従来のオーステナイト系ステンレス鋼に比較しても 1.2 ~ 1.5 倍の高温強度を達成している。

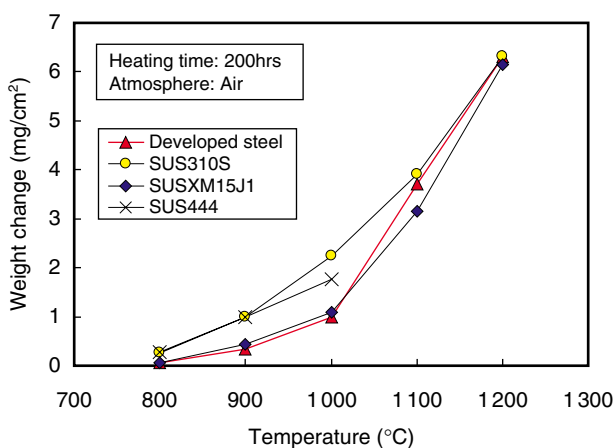


Fig. 6 Weight change by continuous heating

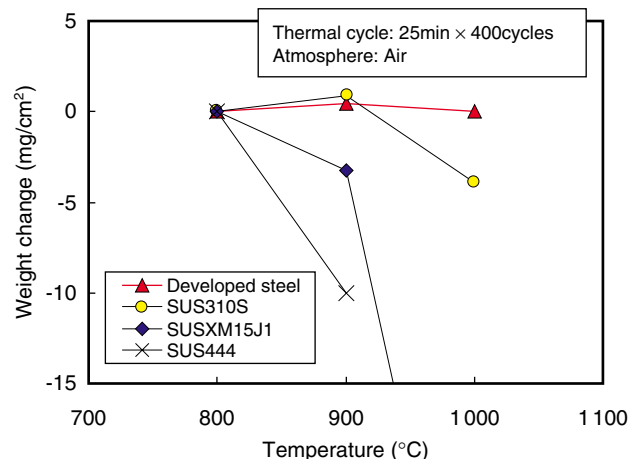


Fig. 7 Weight change by thermal cycles

## 5. ポート構造の検討

### 5.1. 二重管での座屈強度評価

二重管構造ではインナパイプが直接排気に接触しており、アウトパイプに対して温度が高くなる。そのためインナパイプはアウトパイプに対して相対的に伸びることから、イ

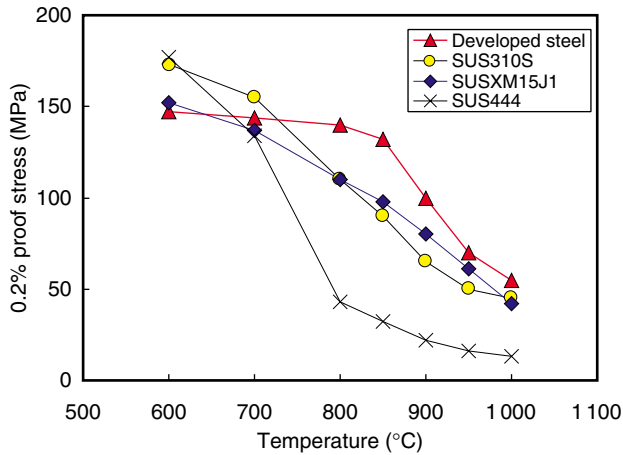


Fig. 8 Proof stress under high temperature

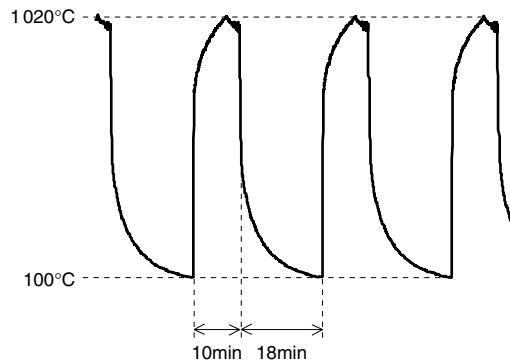


Fig. 9 Thermal cycle pattern for buckling test

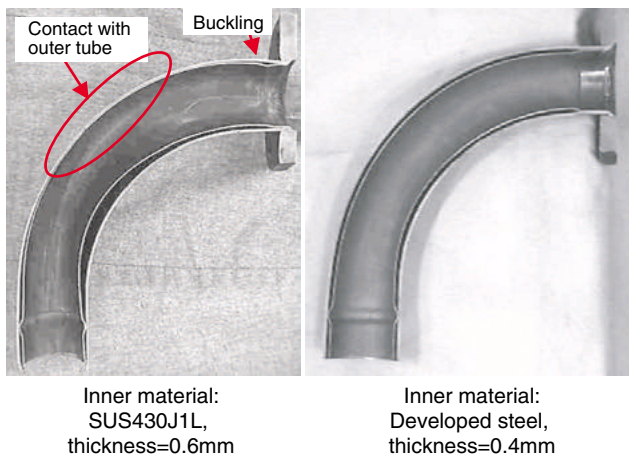


Fig. 10 Buckling deformation of the inner tube after thermal cycles

ンナパイプの高温での降伏強度が十分でない場合には座屈変形する。そこで、二重管構造における従来材と本開発材との座屈強度を排気シミュレート試験機を用いて比較した。排気温度は加速試験とするために実機よりも高い1020°Cとした。試験は Fig. 9 に示す熱サイクルを 40 サイクル与えて、その後のインナパイプの座屈変形を観察した。Fig. 10 に座屈試験の結果を示す。従来のフェライト系ステンレス鋼では0.6mm厚でも座屈変形してインナパイプとアウトパイプが密着してしまい、本来の目的である断熱二重構造を維持できないことがわかる。一方、本開発材では0.4mm厚でも座屈変形が生じていないことがわかる。

このような座屈変形挙動を解析するために Fig. 11 に示した先端の相対熱伸び量を計測した。この試験によって得られた相対熱伸び曲線の代表例を Fig. 12 に示す。ここで、相対熱伸びの計算値は次式を用いて計算した。

$$\Delta L_{cal} = \alpha_{in} L_{in} \Delta T_{in} - \alpha_{out} L_{out} \Delta T_{out} \quad (1)$$

$\Delta L_{cal}$  : Calculated relative thermal expansion

$\alpha_{out}$  : Linear thermal expansion coefficient of outer material

$\alpha_{in}$  : Linear thermal expansion coefficient of inner material

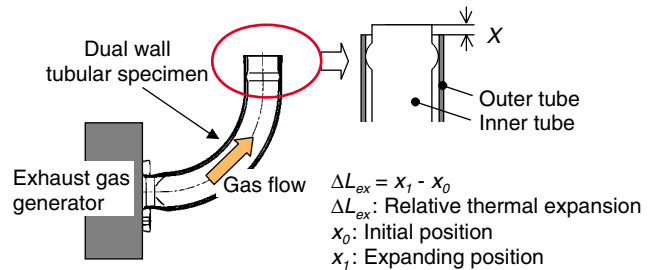


Fig. 11 Test method to measure the relative thermal expansion of inner tube

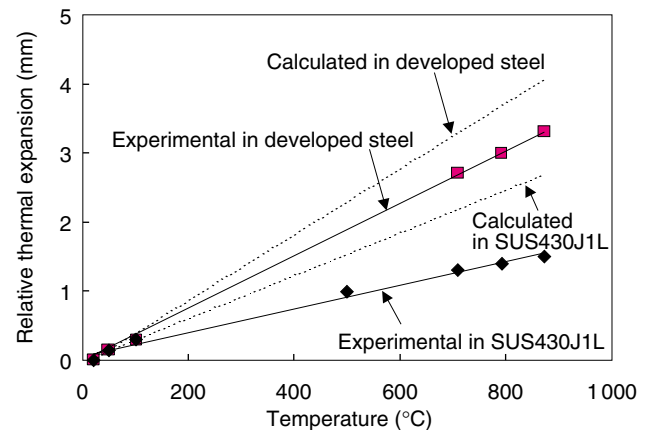


Fig. 12 Thermal expansion behavior

- $L_{out}$  : Length of outer tube  
 $L_{in}$  : Length of inner tube  
 $\Delta T_{out}$  : Temperature vary of outer tube  
 $\Delta T_{in}$  : Temperature vary of inner tube

この結果でわかるとおり、フェライト系ステンレス鋼の SUS430J1L では相対熱伸び量は小さいが計算値とのかい離が大きく、熱伸びの拘束が大きいことがわかる。一方、オーステナイト系ステンレス鋼である開発鋼では、相対熱伸び量は大きい計算値とのかい離は小さく、熱伸びの拘束が小さいことがわかる。このような差は拘束によって発生する熱応力が材料の耐力を超えると座屈してしまうことが原因と考えられる。したがって、このような構造で部品として使用するには拘束の度合いを設計パラメータとして考慮する必要がある。

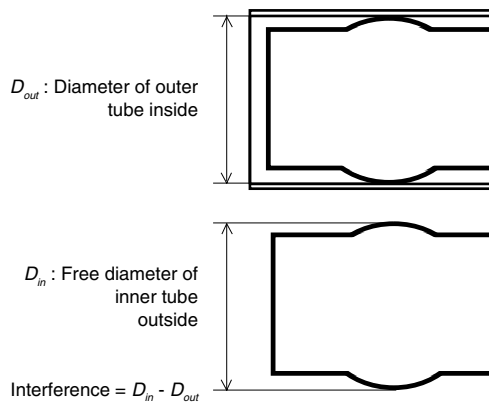


Fig. 13 Structure of sliding port

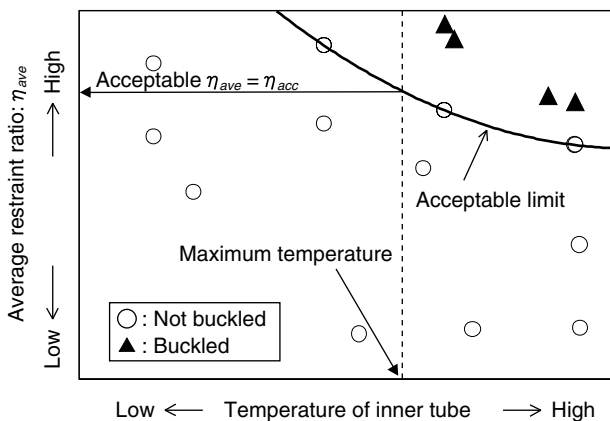


Fig. 14 Acceptable average restraint ratio

## 5.2. 座屈限界の定量的評価

排気系の熱疲労に対しては拘束率が評価パラメータとして最適であることはすでに実証されている<sup>(10)</sup>。これを拡張して、熱膨張に対する座屈限界を定量的に評価するためのパラメータとしてパイプ全長にわたる平均拘束率  $\eta_{ave}$  を定義する。

$$\eta_{ave} = \frac{\Delta L_{cal} - \Delta L_{ex}}{\Delta L_{cal}} \quad (2)$$

$\eta_{ave}$  : Average restraint ratio

$\Delta L_{ex}$  : Experimental relative thermal expansion

平均拘束率はスライド部の締め代を変えることにより変化させることができる。ここで、締め代は Fig. 13 で定義された値である。平均拘束率と温度を変化させた場合の座屈発生状況から、本開発材を用いた場合の座屈限界線図を Fig. 14 のように得ることができた。

## 5.3. スライド構造の設計

インナパイプとアウトパイプの排気流の上流端はシリンダヘッド側のフランジに溶接され、下流端は Fig. 13 のようなスライド構造となっている。ここで、エキゾーストマニホールドの使用設計温度を設定すると、Fig. 14 より許容平均拘束率:  $\eta_{acc}$  を求めることができる。インナパイプの座屈強度を保証するためには、平均拘束率が  $\eta_{acc}$  以内となるスライド構造とするための締め代の設定が必要である。この締め代と平均拘束率の関係について3曲げ実体形状を用いて、Fig. 11 に示した挙動解析による試験結果を Fig. 15 に示す。この関係より、平均拘束率を  $\eta_{acc}$  以内にするためにはスライド部の締め代を  $I_{max}$  以内とすれば良いことがわかり、これを設計最大締め代とした。

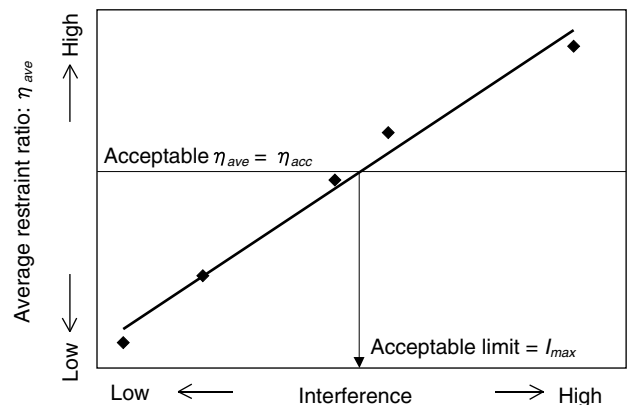


Fig. 15 Relationship of interference and average restraint ratio

## 6. 部品性能

部品性能について、開発品と2mm厚の通常の一重構造エキゾーストマニホールドとの比較試験を行った。Table 3に各エキゾーストマニホールドの仕様を示した。

### 6.1. エミッション性能

#### 6.1.1. 昇温特性

米国 FTP(Federal test procedure)サイクルのエンジン始動時における触媒コンバータの昇温特性の差を Fig. 16 に示す。始動後徐々に触媒温度に差が現れ、始動から20sec後では40°Cの温度差を生じ、触媒のライトオフ温度といわれる400°Cに到達する時間が3 sec 早くなる効果がある。こ

Table 3 Specification of the exhaust manifold for comparison test

|              | Tube  |       | Chamber |       |
|--------------|-------|-------|---------|-------|
|              | Outer | Inner | Outer   | Inner |
| Conventional | 2mm   | —     | 2mm     | 2mm   |
| Developed    | 1.5mm | 0.4mm | 2mm     | 0.8mm |

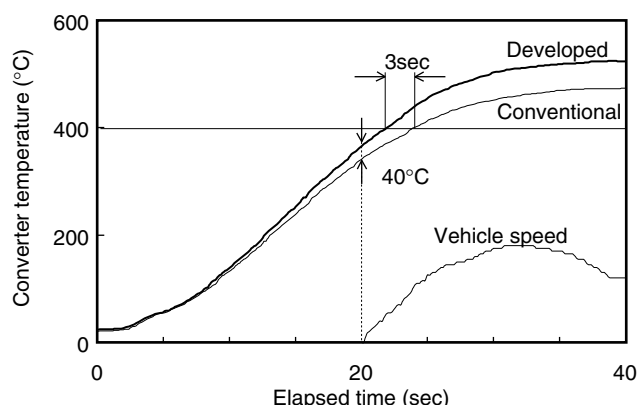


Fig. 16 Converter heat-up behavior on FTP cycle

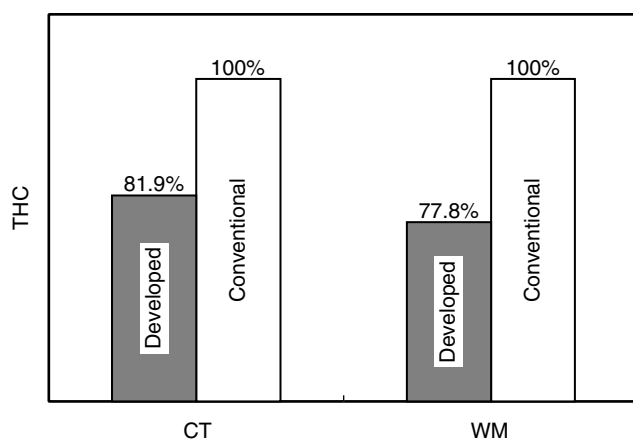


Fig. 17 Effect for emission decrease

の効果により、開発したエキゾーストマニホールドを用いることにより、ライトオフまでに排出されるエミッションを低減可能であることがわかる。

#### 6.1.2. エミッション達成値

エミッションに対する効果を見るために、代表値としてHCの累積排出量の違いを Fig. 17 に示す。開発したエキゾーストマニホールドを用いることによりコールドスタート時の触媒を早期活性化できることからCT(Cold transient)でのエミッション低減効果が大きく、約18%の低減効果がある。また、モード全体の加重平均値 WM でも約22%の低減効果がある。同様に NO<sub>x</sub> に対しては10%、CO に対しては12%の低減効果があることを確認し、エミッション低減に大きな効果があることが実証できた。

### 6.2. 音響特性

Fig. 18にエキゾーストマニホールドの違いによる音圧レベルの差を比較して示す。開発したエキゾーストマニホールドは通常の一重構造品に対して高周波領域においては若干劣るが、低周波領域においては優位であり、全領域(Overall)ではほぼ同等の位置付けにある。一般的に、二重構造のエキゾーストマニホールドは一重構造のものに対して音響特性が劣るとされているが<sup>(3)</sup>、本開発品ではインナがすべて円筒形状であるので比較的剛性が高く、音響特性の劣化が少ないと考えられる。

## 8. まとめ

本開発の結果以下のことが明らかとなり、薄肉低熱容量化を極限まで狙ったインナが0.4mm厚のエキゾーストマニホールドの開発に成功し、空燃比制御技術および触媒技術を合わせて適用することにより、床下配置コンバータにて01モデルのSULEV仕様車よりも貴金属量を約20%低減することができた。

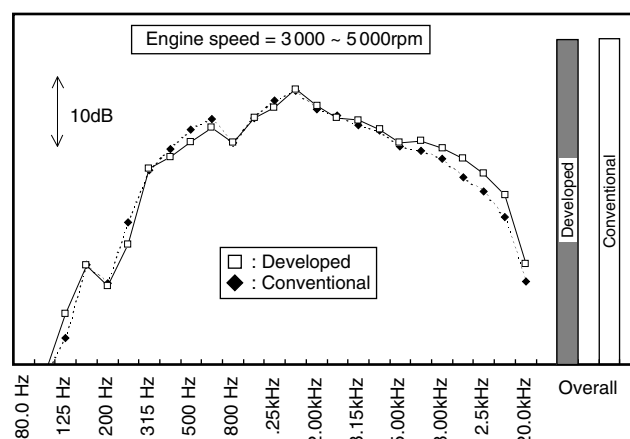


Fig. 18 Comparison of sound pressure level

- (1) 二重構造エキゾーストマニホールドのインナ材を従来よりも薄板で成立させるために、N 添加、REM 添加、 $Ni_{eq}-Cr_{eq}$  バランスの改善により高温強度、耐酸化性を向上した高耐熱なステンレス鋼を開発した。
- (2) 開発した高耐熱ステンレス鋼を二重構造エキゾーストマニホールドのインナに用いた場合、従来材よりも座屈変形に対して高い強度があることを単体熱サイクル試験により実証した。
- (3) 単体熱サイクル試験による座屈評価により許容平均拘束率を求めた。この許容値を用いて定量的評価が可能となり、インナが0.4mm厚であっても耐久性を満足する設計が可能となった。
- (4) インナを 0.4mm 厚とした二重構造エキゾーストマニホールドは、従来品に対して、FTP モードにおける触媒のライトオフ温度に達する時間を 3 sec 早くすることができた。
- (5) インナを 0.4mm 厚とした二重構造エキゾーストマニホールドであっても、板厚が 2 mm 厚のエキゾーストマニホールド(一重構造)と放射音圧は同等であることがわかった。

本開発エキゾーストマニホールドは 2002 年より量産を開始し、03 モデルの対米仕様 SULEV 仕様車をはじめとしたアコードシリーズに搭載されている。

## 謝 辞

本開発では、住友金属工業(株)、(株)ユタカ技研をはじめ多くの関係者のご理解とご協力を頂いたことに、本誌面を借りて深く感謝致します。

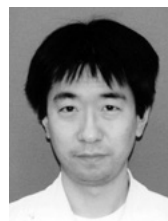
## 参考文献

- (1) Kishi, N. *et al*: Development of the High Performance L-4 Engine ULEV System, SAE paper, SAE980415 (1998)
- (2) 北川浩ほか: 「ACCORD SULEV」用極超低エミッションシステム, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.37-44 (2000)
- (3) Kishi, N. *et al*: Development of the Ultra Low Heat Capacity and Highly Insulating (ULOC) Exhaust Manifold for ULEV, SAE paper, SAE980937 (1998)
- (4) 橋本宏ほか: 高出力エンジン用低熱容量 4-2 集合エキゾーストマニホールドの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.1, p.85-92 (1999)
- (5) Long, C.J. *et al*: The Ferrite Content of Austenitic Stainless Steel Weld Metal, The Welding Journal, Vol.7, p.281-297 (1973)
- (6) Ishii, K. *et al*: Effect of Ti, Zr and Hf on High-Temperature

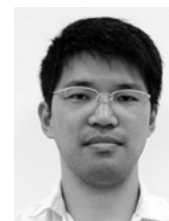
Oxidation Resistance of Fe-20Cr-5Al-0.1La Alloy Foiles, Materials Transactions, JIM, Vol.39, No.10, p.1040-1045 (1998)

- (7) Fukaya, M.: Material Properties of Fe-Cr-Al Alloy Foil for Metal Support, SAE paper, SAE970790 (1997)
- (8) Irvine, K.J. *et al*: High-strength austenitic stainless steels, Journal of the Iron and Steel Institute, vol.199(2), p.153-175 (1961)
- (9) 細井祐三ほか: オーステナイト系ステンレスの高温酸化に及ぼす窒素添加の効果, 第 119 回腐食防食シンポジウム資料「高窒素ステンレスの現状と課題」, p43-49 (1998)
- (10) Ishii, K. *et al*: Evaluation of Thermal Fatigue Life on the Exhaust Manifold by Analyzing Restraint Ratio, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000G295 (2000)

## ■ 著 者 ■



石井 和夫



宗村 岳



吉田 信行