

# 排気部品用ステンレス鋼 耐熱性と加工性に優れるエキゾーストマニフォールド用 フェライト系ステンレス鋼「JFE-MH1」

## Ferritic Stainless Steel for Automotive Exhaust Use —High Heat-Resistant Ferritic Stainless Steel with High Formability, “JFE-MH1,” for Automotive Exhaust Manifolds—

宮崎 淳 MIYAZAKI Atsushi JFE スチール 東日本製鉄所 商品技術部ステンレス室 主任部員(課長)  
平澤淳一郎 HIRASAWA Junichirou JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部 主任研究員(副課長)  
古君 修 FURUKIMI Osamu JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部長・工博

### 要旨

エキゾーストマニフォールドに適した高耐熱高加工性ステンレス鋼の開発を目的として、15% Cr フェライト系ステンレス鋼の室温加工性、高温強度および耐酸化性に及ぼす Mo と Si の影響を研究した。Mo の添加は、耐酸化性および高温強度向上に顕著な効果を示すが、Si の添加は、耐酸化性向上には効果的であるものの、高温強度向上にはほとんど効果がないことが明らかになった。これらの結果に基づき、耐熱性と加工性に優れるステンレス鋼 JFE-MH1 (15%Cr-0.3%Si-0.5%Nb-1.6%Mo) を開発した。開発鋼は、既存の 2 鋼(高加工性タイプと高耐熱タイプ)の長所を兼備した特性を示す。すなわち、JFE-MH1 の鋼板および電縫管の加工性は、既存の高加工性ステンレス鋼 JFE429EX (15%Cr-0.9%Si-0.5%Nb) の値と同等であるとともに、JFE-MH1 の高温強度、高温疲労特性および熱疲労特性は既存の高耐熱ステンレス鋼 JFE434LN2 (SUS444:19%Cr-0.3%Si-0.3%Nb-1.9%Mo) 以上の特性を示す。

### Abstract:

To develop a high heat-resistant stainless steel with high formability for automotive exhaust manifolds, the influences of Mo and Si contents on formability, oxidation resistance, and high temperature strength of 15%Cr ferritic stainless steel were investigated. Mo addition increased oxidation resistance and high temperature strength remarkably. On the other hand, Si addition increased significantly oxidation resistance but had little effect on high temperature strength. Based on these findings, a high heat-resistant Mo-added ferritic stainless steel with high formability, JFE-MH1 (15%Cr-0.3%Si-0.5%Nb-1.6%Mo), has been developed. The newly developed steel possesses not only the advantage of the existing high heat-resistant type but also that of high formability type stainless steels. Namely, JFE-MH1 possesses high temperature strength and fatigue properties equal to those of conventional SUS444 steel, JFE434LN2 (19%Cr-0.3%Si-0.3%Nb-1.9%Mo), which is considered to be a high heat-resistant steel for automotive exhaust applications, combined with formability equal to that of conventional JFE429EX (15%Cr-0.9%Si-0.5%Nb), which is used as a high formability steel in the same applications.

## 1. 緒言

近年、地球環境問題が注目され、自動車の排出ガス浄化率の向上が各国において法規制をともなって強く求められている。たとえば、ガソリン乗用車の排出ガス規制値に関して、国内では平成 12 年、17 年規制、欧州では Euro 3、4 規制、米国では Tier 1, 2 連邦規制、カリフォルニア州においては連邦規制を上回る LEV 1, 2 規制などが施行あるいは提案されている<sup>1,2)</sup>。このような趨勢に対応するに

は、エンジン始動直後(コールドスタート)の排出ガス浄化特性向上が極めて重要な課題となる<sup>2)</sup>。これは、エンジン始動直後には排出ガスの熱の一部がエキゾーストマニフォールドに奪われ、排出ガス温度が低下するとともに触媒コンバータ内の温度も低いいため排出ガス中の NO<sub>x</sub>、HC、CO の浄化反応が生じにくいためである。浄化反応を促進させるために、エキゾーストマニフォールドを薄肉化し、その熱容量を低下させることで、排出ガスを高温に保ったまま触媒コンバータに導く技術が実用化されている<sup>3)</sup>。エキゾーストマニフォールドの薄肉化は、また軽量

化にも寄与する。上記方法を用いるための素材には優れた耐熱性が要求されるので、鋳鉄に代わってフェライト系ステンレス鋼の適用が拡大しつつある<sup>4)</sup>。一方、エキゾーストマニフォールドは多くの場合、限られた車体空間で納まるように複雑な形状に設計されるため、高い加工性が要求される。JFE スチールは、耐熱性に重点を置いたステンレス鋼として JFE434LN2 (SUS444) を、また、加工性に重点を置いたステンレス鋼として、JFE429EX を開発した<sup>5,6)</sup>。しかし、最近では、多くの車種でエキゾーストマニフォールド材に求められる耐熱性あるいは加工性の要求が厳しくなり、両鋼の長所を兼ね備えたステンレス鋼、具体的には JFE434LN2 (SUS444) 以上の優れた耐熱性 (高温強度、高温疲労特性および熱疲労特性) を有し、さらに JFE429EX と同等の優れた加工性を兼備するフェライト系ステンレス鋼の開発が強く求められていた。

当社では、フェライト系ステンレス鋼の高温強度、耐酸化性および加工性について詳細に研究した結果、800 から 950 のような高温では、JFE434LN2 より優れた耐熱性 (高温強度、高温疲労特性および熱疲労特性) を有し、室温では JFE429EX 同等の優れた加工性を兼備する新しいフェライト系ステンレス鋼「JFE-MH1」を開発した。本報では開発で得られた知見について述べるとともに、JFE-MH1 の諸特性を紹介する。

## 2. 供試材および実験方法

耐熱性の指標である熱疲労特性および高温疲労特性の向上には、高温での 0.2% 耐力 (PS) を高めることが有効であると報告されている<sup>5,7,8)</sup>。高温での 0.2% PS を高めるには Mo の添加が効果的であるが、同時に室温での降伏強さ (YS)、引張強さ (TS) が上昇し、伸びが低下する。したがって、JFE429EX (15%Cr-0.9%Si-0.5%Nb) に Mo を添加するだけでは室温での加工性低下が問題となる。このような室温での加工性低下を補うために、低 Si 化に着目し 15% Cr 鋼を基本組成として、高温での 0.2% PS、耐酸化性および室温での加工性に及ぼす Mo と Si の影響を研究した。実験に用いた材料の化学組成範囲を Table 1 に示す。高周波真空溶解炉で溶製した小型鋼塊を用いて熱間圧延焼鈍、冷間圧延、焼鈍を行い、板厚 2 mm の冷間圧延焼鈍鋼板を作製し、下記 (1)~(3) の試験に供した。また鍛造焼鈍を行い中実丸棒試験片を作製し、(4) の熱疲労試験に供した。

次に工場で製造した開発鋼の冷間圧延焼鈍鋼板につい

Table 1 Chemical composition of steel used

(mass%)						
C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	N
0.01	0.05-1.5	0.2	15	0-2	0.5	0.01

ては、比較鋼の既存鋼 (JFE429EX, JFE434LN2) とともに下記 (1)~(3) の評価に加えて、(5) の高温疲労特性も評価した。

### (1) 高温引張試験

JIS G0567 に準拠し、所定温度に到達してから 15 min 保持し、0.2% PS までは 0.3% /min、その後破断まで 8.3% /min のひずみ速度の条件で、0.2% PS および TS を測定した。

### (2) 耐酸化性試験

試験片形状は、厚さ 2 mm、幅 20 mm、長さ 30 mm とした。実験室で作製した冷間圧延焼鈍鋼板は #400 までエメリー研磨、脱脂し、950 で 200 h 加熱処理後の、酸化増量と Mo 量および Si 量の関係を調べた。

工場で作製した冷間圧延焼鈍鋼板については、研磨せず、脱脂後 800, 850, 900, 950 および 1000 において大気中で 400 h 加熱処理後の酸化増量を測定した。

### (3) 室温引張試験

JIS 13 号 B 試験片を用い、引張速度 10 mm/min で YS, TS, El および  $r$  値を測定した。 $r$  値は 15% ひずみを付加した後に求めた。これらの平均値は、圧延方向に対して、0°, 45°, 90° 方向の特性を  $X_L, X_D, X_C$  で表示した時の値より (1) 式によって求めた。

$$\text{平均 } X = \frac{X_L + 2X_D + X_C}{4} \quad (1)$$

### (4) 熱疲労試験

油圧サーボ方式の熱疲労試験機を用い、無負荷制御により 450 まで昇温した。 $\alpha$  を熱膨張係数とするとこの温度まで自由熱膨張により  $\alpha \cdot (450 - \text{室温})$  だけ素材は伸びているが、荷重は負荷されていない。この状態を素材の応力とひずみの原点とした。ここから out of phase 型のひずみ制御を行った。見かけのひずみ検出には、標点間の距離が 15 mm の作動トランス式伸び計を用い (2) 式で定義される拘束率 ( $\eta$ ) が 0.5 となるように 100-800 の熱サイクルを付加し、最大応力の変化を測定した。また熱疲労寿命は、最大応力が 5 サイクル目のその 70% にまで低下したサイクル数とした。

$$\eta = \Delta \varepsilon_t / \Delta \varepsilon_f = 0.5 \quad (2)$$

$$\Delta \varepsilon_t = \Delta \varepsilon_f - \Delta \varepsilon_c \quad (3)$$

ここで

$\eta$ : 拘束率

$\Delta \varepsilon_t$ : 全ひずみ範囲

$\Delta \varepsilon_f$ : 100-800 間の自由熱膨張相当のひずみ

$\Delta\epsilon_c$  : 伸び計が検出する見かけのひずみ範囲

である。

5) 高温疲労試験

シエク式高温平面曲げ疲労試験機を用い  $R = -1$ , 回転数を 1 300 rpm の条件下で 800 と 900 の S-N 曲線を作成した。最大曲げ応力は、破断繰返し数 (Nf) に対して、 $Nf/2$  の繰返し時点で測定された最大曲げモーメントを試験片の断面係数で除した値を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 900 での 0.2% PS に及ぼす Mo, Si の影響

900 での 0.2% PS に及ぼす Mo と Si の影響を Fig. 1 に示す。Mo を 1.5% までの範囲で添加すると、0.2% PS を著しく高める効果が認められたが、それ以上の添加では、飽和傾向を示した。藤田ら<sup>9)</sup>は 19% Cr-0.4% Nb 鋼の 950 での 0.2% PS に及ぼす Mo の影響を調べ、1.5% 以上の添加で効果が飽和することを報告しており、本実験における Mo 添加も同様の挙動を示した。一方、Si の場合、本実験で検討した 1.5% 以下の範囲では、その添加量によらず 0.2% PS はほとんど一定であった。

3.2 耐酸化性に及ぼす Mo と Si の影響

フェライト系ステンレス鋼の酸化増量に及ぼす Mo の影響<sup>10)</sup>を Fig. 2 に示す。Fe 主体の酸化物、すなわち異常酸化が発生している場合は、図中に \* を併記した。15% Cr 鋼の 950 での耐酸化性向上には Mo の添加は著しく効果的であることが分かる。Mo 無添加の 15% Cr 鋼と Mo を 1.6% 添加した 15% Cr 鋼の酸化増量に及ぼす Si の影響<sup>10)</sup>を Fig. 3 に示す。950 での酸化試験で異常酸化を抑制するには、Mo 無添加鋼の場合、0.8% 以上の Si 添加が必要であるのに対して、1.6% Mo 添加鋼の場合は 0.2% 以上の Si 添加でよいことが明らかとなった。フェライト系ステンレス鋼の連続酸化試験における Cr および Si の影響は、これらの元素が一定量以上添加されると  $Cr_2O_3$  および  $SiO_2$  などの保護性に優れた酸化皮膜が連続的に生成し、耐酸化性を向上させると考えられている<sup>11)</sup>。

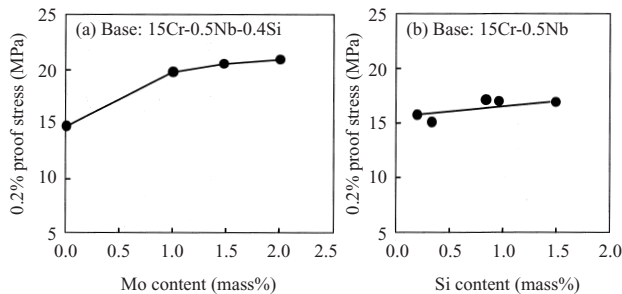


Fig. 1 Effects of (a) Mo and (b) Si contents on 0.2% proof stress at 900°C

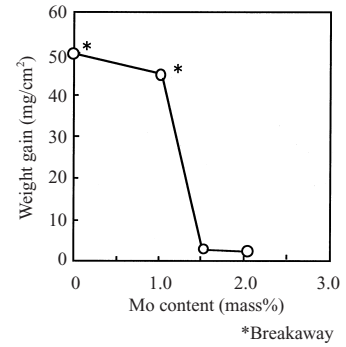


Fig. 2 Effect of Mo content on weight gain of 15%Cr-0.2%Si-0.5%Nb stainless steels by continuous heating at 950°C for 200 h in air

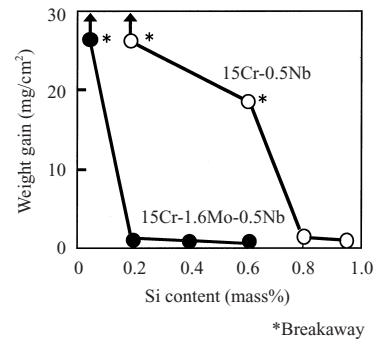


Fig. 3 Effect of Si content on weight gain by continuous heating at 950°C for 200 h in air

しかし、11% Cr 鋼に 4% Si を添加した場合<sup>12)</sup>、あるいは 14% Cr 鋼に 1% Si を添加した場合<sup>13)</sup>のいずれの実験結果においても、明確な  $SiO_2$  皮膜の形成は認められていないにもかかわらず、異常酸化の抑制に Si が有効であるという報告がされている。このように Si による耐酸化性向上機構は必ずしも明らかではない。一方、金属組織学的観点から、富士川ら<sup>14)</sup>は、酸化試験中に組織の一部が  $\gamma$  変態した場合、その部分から異常酸化が発生しやすく、耐酸化性への Si の影響は、保護皮膜説からではなく、フェライト組織の安定性から説明できると報告している。今回実験に供した成分系においても、連続的な Cr 酸化物は観察されたものの、連続的な Si 酸化物および Mo 酸化物は観察されなかった点、および Mo と Si はいずれも強力なフェライト生成元素である点を考慮すると、15% Cr 鋼へのこれら元素の添加は、高温での  $\gamma$  相の生成を抑制しフェライト組織を安定化することで耐酸化性を向上させていると考えることもできる。すなわち、950 の酸化試験で異常酸化を抑制するには、Mo 無添加鋼では 0.8% 以上の Si 添加が必要であるが、1.6% Mo 添加鋼では、0.2% のようなわずかな Si 添加でよいという実験結果は、Si 保護皮膜説からの解釈ではなく、1.6% Mo 添加鋼では、より少ない Si 量でフェライト相が安定化するためという解釈で説明できる。しかし、Ti 添加の 18% Cr フェライト系ステンレス鋼において、Mo は常温で生成する不動態皮膜組成に影響し、その不動態皮膜がその後の耐酸化性に影響を与える



との小林ら<sup>15)</sup>の報告も考慮すると、富士川らのフェライト組織安定化説に加え、不動態皮膜の緻密さなどの観点も含めた詳細な検討が必要であろう。

#### 4. 開発鋼の成分設計の考え方

以上の結果から、JFE429EX (0.9% Si) の Si は、耐酸化性向上に寄与しているものの、900 °C での 0.2% PS にはほとんど寄与していないことが明らかになった。したがって、開発鋼の成分設計として、耐酸化性向上とともに、高温での 0.2% PS をも向上させる Mo を積極的に活用し、Si 量の低減を図り、15%Cr-0.3%Si-1.6%Mo-0.5%Nb を基本組成とした高耐熱・高加工性フェライト系ステンレス鋼 JFE-MH1 の開発に至った。次章で、開発鋼の諸特性を既存鋼と比較して紹介する。

#### 5. 開発鋼「JFE-MH1」の特性

##### 5.1 化学組成と室温特性

開発鋼「JFE-MH1」および既存鋼「JFE429EX」、「JFE434LN2」の化学組成を Table 2 に示す。板厚 2 mm 冷間圧延焼鈍鋼板の室温での機械的性質を Table 3 に示す。JFE-MH1 の YS, TS, El および  $r$  値は JFE429EX と同等の値を示し、JFE434LN2 と比較すると強度は低く、伸びおよび  $r$  値は高い。

JFE-MH1 および JFE-429EX の 1.5 mm 冷間圧延焼鈍鋼

Table 2 Chemical composition of JFE-MH1, JFE429EX, and JFE434LN2 (mass%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb
JFE-MH1	0.004	0.34	0.18	14.5	1.6	0.46
JFE429EX	0.008	0.86	0.37	14.6	-	0.44
JFE434LN2	0.005	0.28	0.16	18.7	1.8	0.34

Table 3 Mechanical properties of JFE-MH1, JFE429EX, and JFE434LN2 (mass%)

	Direction	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)	$r$
JFE-MH1	L	307	474	37	1.6
	D	330	500	31	1.1
	C	320	478	36	2.1
	Average	322	488	34	1.5
JFE429EX	L	308	483	36	1.5
	D	337	511	32	1.1
	C	330	495	34	2.0
	Average	328	500	33	1.4
JFE434LN2	L	366	518	33	1.2
	D	400	543	29	0.9
	C	390	528	32	1.6
	Average	389	533	31	1.2

Sheet thickness: 2.0 mm

Table 4 Mechanical properties of ERW pipes (1.5 mm $t$  × 42.7 mm $\phi$ ) according to JIS 11

	YS(MPa)	TS(MPa)	El(%)
JFE-MH1	496	528	51
JFE429EX	516	534	49

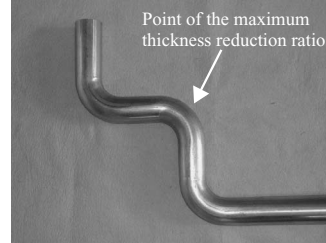


Photo 1 Appearance of ERW pipe of JFE-MH1 after 50 mm $R$ -90° bending at three positions

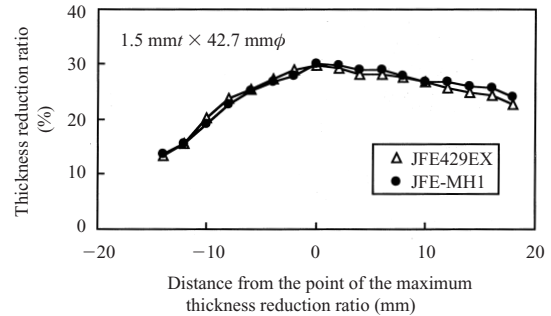


Fig. 4 Comparison of thickness reduction ratio after 90° bending between JFE-MH1 and JFE429EX stainless steel ERW pipes

板から、直径 42.7 mm の電縫鋼管を製造した。その機械的性質を Table 4 に示す。JFE-MH1 の電縫鋼管の YS, TS, El は、JFE429EX のそれと同等の値を示した。曲げ半径 50 mm、曲げ角度 90° で 3 ケ所曲げた後の外観を Photo 1 に示す。写真内の矢印部分は最大の肉厚減少を示した位置である。その位置を中心とした長手方向の肉厚減少率を Fig. 4 に示す。JFE-MH1 は、高加工性ステンレス鋼である JFE429EX と同等の優れた加工性を示した。

##### 5.2 高温特性

800 および 900 °C での 0.2% PS および TS を Fig. 5 に示す。JFE-MH1 の 0.2% PS は高耐熱ステンレス鋼である JFE434LN2 以上の値を示した。

800, 850, 900, 950 および 1000 °C での 400 h 大気中加熱処理後の酸化増量を Fig. 6 に示す。JFE-MH1 は、JFE429EX と同等の良好な耐酸化性を示した。

高温平面曲げ疲労試験による 800 °C と 900 °C での  $S-N$  曲線を Fig. 7 に、またこの  $S-N$  曲線から求めた  $10^7$  サイクル疲労強度を Fig. 8 に示す。JFE-MH1 の高温疲労特性は高耐熱ステンレス鋼である JFE434LN2 以上に優れ、特に 900 °C の  $10^7$  サイクル疲労強度は、高加工性ステンレス鋼である JFE429EX のそれよりもおよそ 50% 高く、JFE

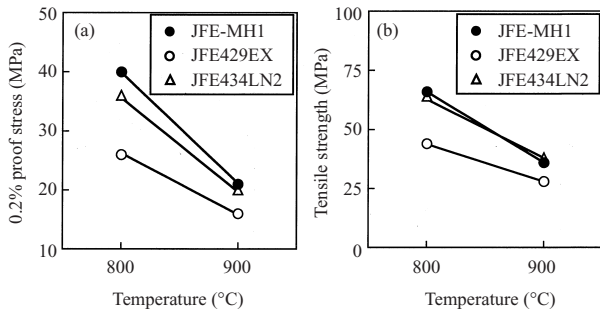


Fig. 5 Strengths at elevated temperatures; (a) 0.2% proof stress, (b) tensile strength

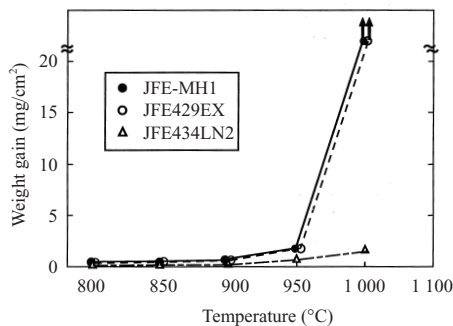


Fig. 6 Oxidation test results at 800°C to 1000°C for 400 h in air

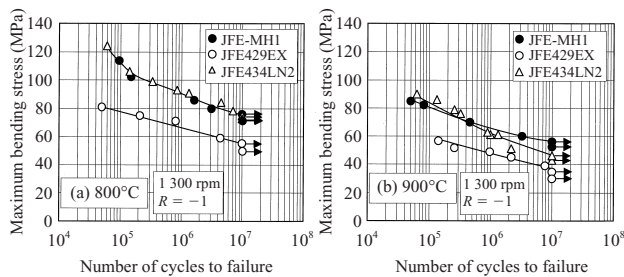


Fig. 7 S-N curves obtained by bending fatigue tests at (a) 800°C and (b) 900°C

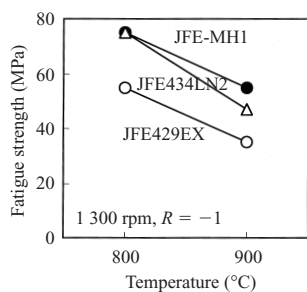


Fig. 8 Relation between 10<sup>7</sup> cycles fatigue strength vs. temperature

429EX の 800 °C での疲労強度と同等であった。

熱疲労試験結果を Fig. 9 に示す。JFE-MH1 は JFE 429EX, JFE434LN2 よりも優れた寿命を示した。

## 6. 結言

近年の自動車排出ガス規制強化にともなって、排気部品の使用環境はますます苛酷なものになりつつある。そのた

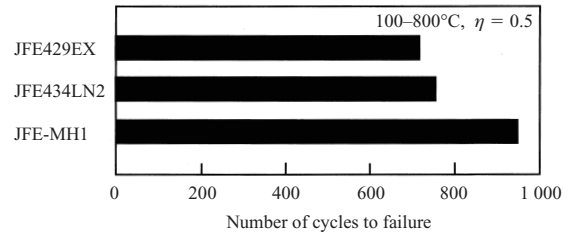


Fig. 9 Comparison of thermal fatigue life between JFE-MH1 and conventional stainless steels

め、特にエキゾーストマニフォールド、フロントパイプ触媒外筒材などに代表されるような高温環境用途として優れた耐熱性と優れた加工性を有するステンレス鋼の開発が強く求められていた。このような要求に応えるため耐熱性と加工性に及ぼす Mo と Si の影響を詳細に研究し Mo の有効性を最大限に活用する成分設計によって、従来の高耐熱ステンレス鋼の代表である SUS444「JFE434LN2」以上の優れた耐熱性（高温強度、高温疲労および熱疲労特性）と高加工性ステンレス鋼である JFE429EX と同等の優れた加工性を兼備する新しいフェライト系ステンレス鋼「JFE-MH1」の開発に成功した。今後も世界各国において排出ガス規制が強化されていく趨勢にある。これらの規制強化に適合できる高耐熱・高加工性ステンレス鋼 JFE-MH1 の採用が一層拡大し、環境浄化に貢献していくものと期待される。

## 参考文献

- 1 津田裕．自動車技術．vol. 56, no. 7, 2002, p. 98
- 2 中村郷平．自動車技術．vol. 57, no. 9, 2003, p. 11
- 3 本間正幸．自動車技術．vol. 43, no. 9, 1989, p. 55
- 4 久松定興．ステンレス．no. 9, 1995, p. 10
- 5 宮崎淳, 平澤淳一郎, 古君修．自動車技術．vol. 55, no. 10, 2001, p. 25
- 6 川崎製鉄．川鉄の自動車用ステンレス鋼板, 製品カタログ. 2001
- 7 平川賢爾, 時政勝行．鉄と鋼．vol. 4, 1977, S255
- 8 奥学, 中村定幸, 平松直人, 植松美博．日新製鋼技報．vol. 66, 1992, p. 37
- 9 藤田展弘．新日鉄技報．no. 371, 1999, p. 30
- 10 宮崎淳, 平澤淳一郎, 古君修．材料とプロセス．vol. 15, no. 3, 2002, p. 551
- 11 富士川尚男．鉄と鋼．vol. 70, no. 11, 1984, p. 41
- 12 川崎龍夫, 佐藤信二, 小野寛, 大橋延夫．川崎製鉄技報．vol. 8, no. 4, 1976, p. 437
- 13 奥学, 中村定幸, 平松直人, 植松美博．日新製鋼技報．vol. 74, 1996, p. 26
- 14 富士川尚男, 村山順一朗, 藤野允克．鉄と鋼．vol. 69, no. 6, 1983, p. 172
- 15 小林裕, 藤原最仁．材料と環境．vol. 43, no. 11, 1994, p. 640



宮崎 淳



平澤淳一郎



古君 修