
自動車エキゾーストマニフールド用高加工性R 4 2 9 E Xおよび高耐熱R 4 4 4 E Xステンレス鋼の開発

Development of High Formability R429EX and Heat-Resistant R444EX Stainless Steels for Automotive Exhaust Manifold

宮崎 淳 (Atsushi Miyazaki) 郡司 牧男 (Makio Gunzi) 吉岡 啓一 (Keiichi Yoshioka)

要旨：

自動車のエキゾーストマニフールド用フェライト系ステンレス鋼の加工性と耐熱性に及ぼす合金元素の影響について検討した。この結果に基づき開発した高加工性タイプR 429 E X (14 C r ?0.5 N b 鋼) は、Type 430 J I L 並の高温強度、組織安定性とより優れた熱疲労特性、Type 409 に近い高加工性を有する。また高耐熱性タイプのR 444 E X (19 C r ?0.6 N b ?2 M o 鋼) は、Type 430 J I L 並の高加工性、より優れた高温強度、熱疲労特性、組織安定性を有し、エキゾーストマニフールドの高排気温度化、薄肉化に対応できることがわかった。

Synopsis：

Effects of chemical elements on formability and heat resistance of ferritic stainless steels for automotive exhaust manifolds have been investigated. As a result, two new stainless steels, R429EX and R444EX, have been developed. R429EX is superior in the thermal fatigue property and formability to the conventional steel (Type430J1L) with good high temperature strength and structural stabilization. R444EX is superior in the thermal fatigue property, high temperature strength and structural stabilization to the conventional steel with good formability. Consequently R444EX is expected to meet the requirements of lighter weight and stricter regulations for the exhaust gas.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

自動車エキゾーストマニフォールド用 高加工性R429EXおよび高耐熱R444EX ステンレス鋼の開発*

川崎製鉄技報
25 (1993) 2, 112-118

Development of High Formability R429EX and Heat-Resistant R444EX Stainless Steels for Automotive Exhaust Manifold



宮崎 淳

Atsushi Miyazaki
鉄鋼研究所 薄板研究
部ステンレス鋼研究室
主任研究員(掛長)

郡司 牧男

Makio Gunzi
知多製造所 技術生産
管理部技術管理室

吉岡 啓一

Keiichi Yoshioka
鉄鋼研究所 鋼材研究
部鋼管研究室長(部長
補)・工博**

要旨

自動車の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の加工性と耐熱性に及ぼす合金元素の影響について検討した。この結果に基づき開発した高加工性タイプ R 429 EX (14 Cr-0.5 Nb 鋼) は、Type 430 J1L 並の高温強度、組織安定性とより優れた熱疲労特性、Type 409 に近い高加工性を有する。また高耐熱性タイプの R 444 EX (19 Cr-0.6 Nb-2 Mo 鋼) は、Type 430 J1L 並の高加工性、より優れた高温強度、熱疲労特性、組織安定性を有し、エキゾーストマニフォールドの高排気温度化、薄肉化に対応できることがわかった。

Synopsis:

Effects of chemical elements on formability and heat resistance of ferritic stainless steels for automotive exhaust manifolds have been investigated. As a result, two new stainless steels, R429EX and R444EX, have been developed. R429EX is superior in the thermal fatigue property and formability to the conventional steel (Type 430 J1L) with good high temperature strength and structural stabilization. R444EX is superior in the thermal fatigue property, high temperature strength and structural stabilization to the conventional steel with good formability. Consequently R444EX is expected to meet the requirements of lighter weight and stricter regulations for the exhaust gas.

1 緒 言

最近、自動車エキゾーストマニフォールドには、鋳物製に代わって Type 409 (11 Cr-0.2 Ti)、Type 430 J1L (17 Cr-0.4 Nb-0.5 Cu) 等のステンレスパイプ製マニフォールドが使用されつつある^{1,2)}。この動向は、地球環境問題が叫ばれる中で燃費向上を目的としたエンジンの高性能化による排ガス温度の上昇および自動車車体の軽量化に対応したものであり、今後ともに、この傾向は続くものと考えられる。

しかしながら、現用鋼 (Type 430 J1L) には、以下に示す2つの点について、改善要求がある。第1は、耐熱性を低下させることなく、素材の加工性の向上に対する要求である。エキゾーストマニフォールドはその形状が複雑であり、苛酷な加工が施されるため、成形時の割れや局所的な板厚減少等の問題は常に付随する。したがっ

て成形限界を高めることでステンレス鋼製パイプのエキゾーストマニフォールドへの適用範囲はさらに拡大するものと考えられ、パイプ製造法の点からも加工性向上の検討がなされている³⁻⁵⁾、さらに一層の加工性の改善が望まれている。第2は、耐熱性の向上に対する要求である。現行の排ガス温度 900℃ を 950℃ 以上に高排気温度化することにより、排ガス浄化特性およびエンジン出力の向上の検討がすでに始まっており、これらに対応可能な耐熱性の優れた材料の開発が将来的に望まれている。このように長期的には、エキゾーストマニフォールドの高排気温度化は避けられないものの、短期的には現行のエキゾーストマニフォールドの適用拡大が可能な高加工性汎用フェライト系ステンレス鋼が求められている。

そこで現用鋼 (Type 430 J1L) よりも優れた加工性を有する素材の開発および現用鋼よりも優れた耐熱性を有する素材の開発を目的とし、フェライト系ステンレス鋼の高温特性および常温での機械的性質に及ぼす C、Nb、Mo および Cr の影響について検討し、これらの検討結果を基に高加工性汎用フェライト系ステンレス鋼 R 429 EX および高排気温度対応高耐熱フェライト系ステンレス鋼 R 444 EX を開発した。以下にこれらの概要について報告する。

* 平成5年2月4日原稿受付

** 前鉄鋼研究所薄板研究部ステンレス鋼研究室長

2 フェライト系ステンレス鋼の高温特性および 常温機械的性質に及ぼす合金元素の影響

2.1 供試材および実験方法

供試材の化学組成範囲を Table 1 に示す。11~19%Cr フェライト系ステンレス鋼の C, Nb, Mo 含有量を変化させた 30 kg 真空溶解材を用い、それらをそれぞれ分割した後、一部を実験室的に熱延、焼鈍、冷延および 1 050°C 短時間焼鈍を行い、2 mm 厚の板を作成し (1)~(5) の項目の試験を行った。また一部は、35 mm 角のバーに鍛造し、900°C ~1 050°C ×10 min の焼鈍を行ない、熱疲労試験および高温引張試験 (丸棒形状) により絞り量の測定を行った。

(1) 高温引張試験 (JIS G 0567)

(2) シャルピー衝撃試験 (JIS Z 2242)

(3) 定電位電解抽出残渣の X 線回折による析出物の同定

(4) 大気中で 800°C から 950°C の温度域において、200 時間加熱後の組織観察および高温強度測定

(5) 耐酸化性試験

2 mm/ ×20 mm W/ ×30 mm/ の試験片の表面を #320 まで研磨、脱脂し大気中 800、900 および 1 000°C において 200 時間加熱後の酸化増量の測定

(6) 熱疲労試験

試験片形状を Fig. 1 に、また試験条件を Fig. 2 に示す。フェライト系ステンレス鋼において、本試験条件のような高温での熱疲労試験では、歪み検出用の石英棒の圧力により試験途中で試験片の変形⁹⁾または歪み検出位置でのクラックの発生が生ず

Table 1 Chemical composition ranges of specimens used (mass %)

C	N	Cr	Nb	Mo
0.003~0.03	0.01	11~19	0~1.0	0~2.0

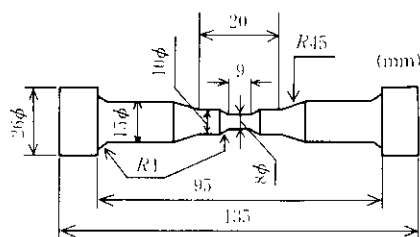


Fig. 1 Dimensions of specimen

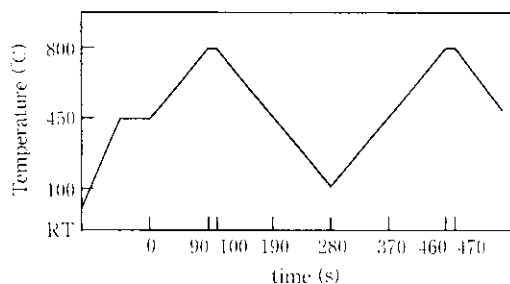


Fig. 2 Condition of thermal fatigue test (1cycle=370 s)

る。そこで、Fig. 1 に示した試験片形状により歪み検出システムが試験片に及ぼす影響を取り除いたため、歪み検出範囲内が一定断面積ではない。そのため一定断面積試験片よりも大きな歪みが試験片中央部に集中し、安全サイドの歪み量での評価となっている。

まず熱疲労試験での初サイクルでの昇温においては、450°C までを荷重 0 制御とし、その後の熱サイクルでは、上設定温度 (800°C) において圧縮荷重が、下設定温度 (100°C) において引張荷重が生じるように、サーボ型の歪制御方式を用いた。昇温降温速度は 3.9°C/s とし、上設定温度での保持時間は 10 秒とした。また破損までの繰り返し数として、5 サイクル目で発生する引張最大荷重の 70% まで引張最大荷重が低下した時点でのサイクル数を採用した。素材に加わる全歪み量は、以下の式により算出し、歪み検出のための標点間距離は 15 mm とした。

$$\Delta \epsilon_t = \Delta \epsilon_F - \Delta \epsilon_C$$

$\Delta \epsilon_t$: 全歪み範囲

$\Delta \epsilon_F$: 上下限温度範囲内で生じる自由熱膨張量相当の歪

$\Delta \epsilon_C$: 制御している歪み範囲

2.2 実験結果および考察

2.2.1 高温耐力およびじん性に及ぼす Nb, Mo の影響

エキゾーストマニフォールド用のパイプは、室温での曲げ、拡管および偏平等の成形加工を受ける。この時パイプが脆性破断を生じる場合があり、高温における強度のみならず、素材の低温じん性も重要である。

Fig. 3 に 950°C の高温耐力および -40°C におけるシャルピー吸収エネルギーに及ぼす Nb および Mo の影響を示す。Nb, Mo ともに、それらの含有量が増すにしたがい強度が増加する。また吸収エネルギーは Nb および Mo 含有量が増すにしたがいいずれも減少するが、Mo 添加は Nb 添加に比べじん性の低下の度合いが小さい。

2.2.2 高温耐力および加工性に及ぼす Cr の影響

Fig. 4 に 900°C の高温耐力と室温における耐力 (YS) および破断伸び (EI) に及ぼす Cr の影響を示す。Cr 含有量は 900°C の耐力に影響をほとんど及ぼさない。一方、Cr 含有量が少なくなるにつれ室温での YS は低下し、また EI が向上し、加工性が良好になる。

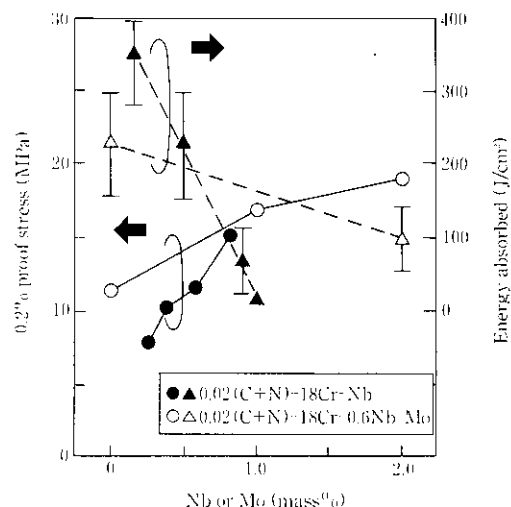


Fig. 3 Effects of Nb and Mo contents on the strength at 950°C and Charpy impact value at -40°C

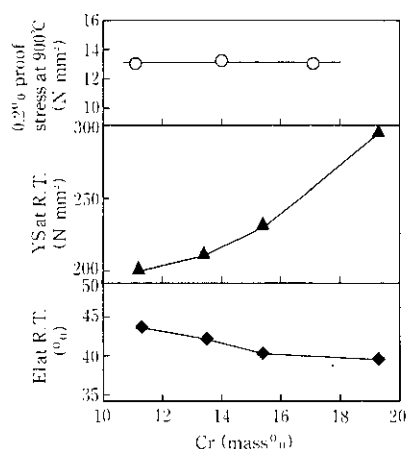


Fig. 4 Effect of Cr content on the 0.2% proof stress at 900°C, YS and El at room temperature (0.2%Ti steels)

2.2.3 高温における組織安定性に及ぼす C, Nb, Mo の影響

エキゾーストマニフォールドとして使用される場合の組織安定性を評価するため、950°Cで200h大気中で長時間熱処理した後の組織変化に及ぼす成分元素の影響を検討した。Photo 1 に0.01C-0.01N-18Cr鋼のNb含有量を0.3, 0.4および0.5%に変化させた冷延焼鈍板の長時間熱処理前後のL断面組織を示す。0.3%Nb含有鋼では、長時間熱処理により結晶粒径が著しく粗大化するが、0.4あるいは0.5%Nb含有鋼ではその変化が小さい。Photo 2にはType 430J1LとC, NbおよびMo含有量を変化させた18%Cr鋼の長時間熱処理前後のL断面組織を示す。Moの添加あるいは高C化は高温での組織安定性には寄与しないことがわかる。一方低C化しNbを0.5~0.6%含有させた場合高温での組織安定性が優れている。

高温での粗粒化防止には、微細析出物による粒成長抑制が有効であることが知られている。そこで、N含有量を0.01%と一定にした18%Crフェライト系ステンレス鋼の冷延焼鈍板において、析出物の種類とCおよびNb含有量との関係を電解抽出残査のX線回折により検討した。Fig. 5に検出された析出物を示す。低C高Nb化した場合に、 M_6C 、 Fe_2Nb が検出された。 M_6C および Fe_2Nb は、NbCよりも微細であり、先述のNb添加による高温強度の上昇及び高温での組織安定性の向上と考え合わせると、 M_6C 、 Fe_2Nb 析出物の一

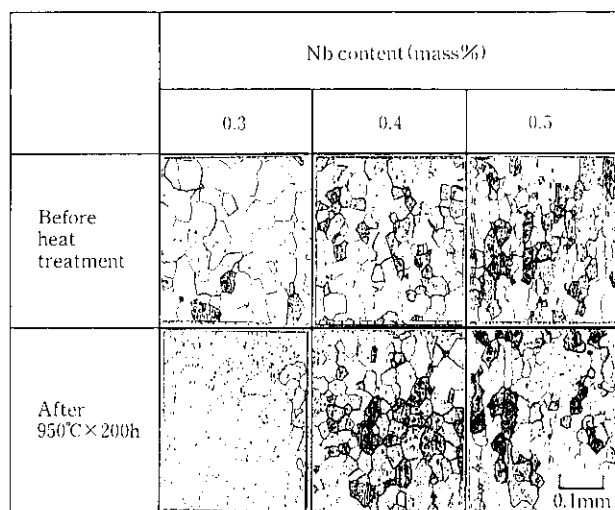


Photo 1 Microstructures of stainless steels before and after heat treatment (0.01C-0.01N-18Cr)

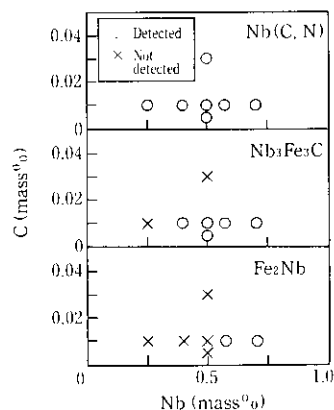


Fig.5 Identification of precipitates

方あるいは両者がこれらに寄与しているものと考えられる。またMoの影響については、Moの析出物が観察されないことから粗粒化防止に効果がなく、高温強度の上昇は固溶Moによるものと考えられる。

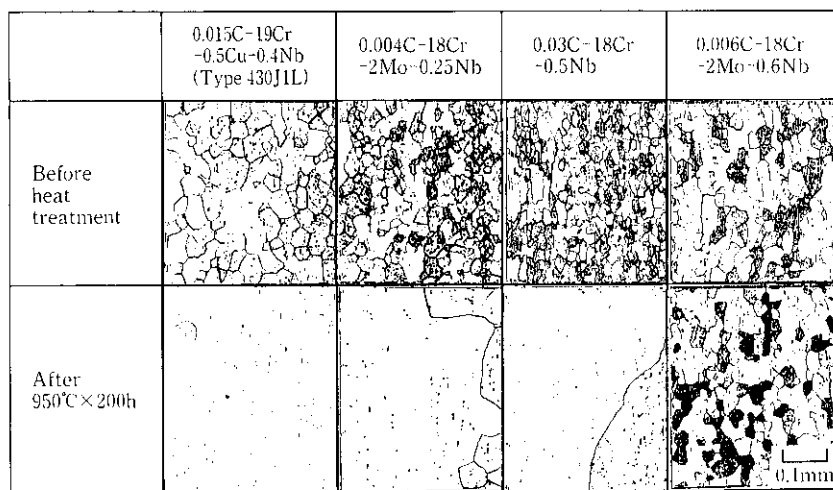


Photo 2 Microstructures of stainless steels before and after heat treatment

3 開発鋼の成分設計と特性

3.1 開発鋼の成分設計

高加工性汎用鋼の成分設計としては、汎用性を高めるために高価な Mo を無添加とし Nb 単独添加で Type 430 J1L 並の高温強度を確保した。また現行のエキゾーストマニフォールドの実環境温度はせいぜい $\sim 900^{\circ}\text{C}$ 程度であるため、その温度域での耐酸化性を確保できる程度に Cr 含有量を Type 430 J1L のそれに対して低減し、それによって加工性の向上を図った。これらの点と製造性を加味して、14Cr-0.5Nb を基本成分とした高加工性汎用フェライト系ステンレス鋼 RIVER LITE 429 EX を開発した。

一方、高排気温度対応高耐熱フェライト系ステンレス鋼としては、高温強度を Type 430 J1L よりも向上させる必要がある。高温強度の向上のためには Nb あるいは Mo の添加が有効⁷⁻¹¹⁾であるが、じん性の点からは Mo 添加の方が、一方、高温での組織安定性の点からは Nb 添加が必須である。これらの点と耐酸化性、製造性を加味して Nb, Mo を複合添加した 19Cr-0.6Nb-2Mo を基本成分とした高排気温度対応高耐熱フェライト系ステンレス鋼, RIVER LITE 444 EX を開発した。R 429 EX, R 444 EX およびエキゾーストマニフォールド材としての現用鋼の代表成分を Table 2 に示す。

Table 2 Chemical compositions of specimens used (mass %)

Specimens	C	Cr	Nb	Ti	Mo	Cu
R429EX ^a	0.010	14.3	0.45	—	—	—
R444EX ^a	0.006	19.2	0.56	—	2.0	—
Type 409	0.011	11.5	—	0.23	—	—
Type 430J1L	0.015	19.1	0.42	—	—	0.54
Type 436	0.010	17.2	—	0.28	1.3	—

^aDeveloped steel

3.2 開発鋼の高温強度

Fig. 6 には、各種フェライト系ステンレス鋼の高温引張強度と耐力を、また Fig. 7 には、 $800^{\circ}\text{C} \sim 950^{\circ}\text{C}$ 温度域での耐力の拡大図を示す。R 429 EX は Type 430 J1L 並の高温強度を有している。一方、R 444 EX は、全温度範囲において Type 430 J1L, Type 436 および Type 409 よりも高い高温強度を有しており、本開発鋼が現用鋼よりもさらに高温側での使用に供しうる可能性を示唆している。

Fig. 8 は、R 444 EX, R 429 EX, Type 430 J1L および Type 436 を $800^{\circ}\text{C} \sim 950^{\circ}\text{C}$ で 200 h 保持後空冷し、これを 900°C および 950°C に再加熱して高温強度を測定した結果を示す。R 429 EX は、Type 430 J1L と同様な軟化挙動を示し、 $900^{\circ}\text{C} \times 200 \text{ h}$ 時効処理後も 900°C における耐力の低下は 10% 以下とわずかである。R 444 EX は、 $950^{\circ}\text{C} \times 200 \text{ h}$ のような高温の熱処理後でも 900°C あるいは 950°C の耐力のいずれにも低下は認められない。一方、Type 436 は、 800°C 以上の熱処理後において、 900°C の耐力の低下が若干生じるが、より高温で熱処理しても耐力のさらなる低下は少ない。

Photo 3 に長時間熱処理前後の TEM 観察結果を示す。Type 430 J1L では 930°C 熱処理前後において Nb の析出量に変化が認められないものの、熱処理後の Nb 析出物は著しく凝集粗大化している。一方、高温耐力の低下が生じない R 444 EX では、このような析出物

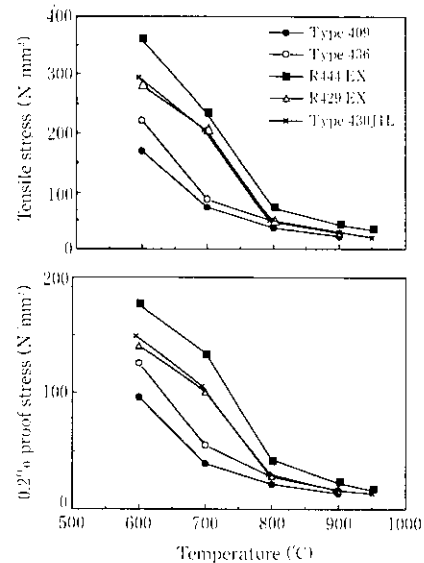


Fig. 6 Tensile and 0.2% proof stress of stainless steels at elevated temperatures

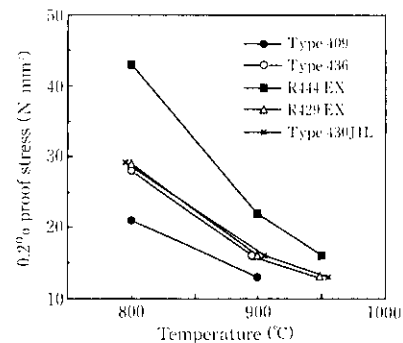


Fig. 7 0.2% proof stress of stainless steels at elevated temperatures

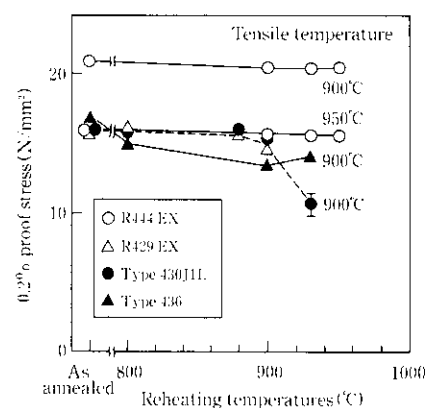


Fig. 8 Effect of reheating temperatures for 200 h on 0.2% proof stress of stainless steels at 900°C and 950°C

の凝集粗大化がほとんど認められない。Ti, Mo 添加鋼である Type 436 において 800°C 以上の長時間熱処理によって耐力の低下が小さい理由として、R 444 EX における場合と同様に固溶 Mo により強化された高温耐力が保持されたものと考えられる。

以上の点から、 900°C 以上での高温耐力の向上は、前述の組織安定

Photo 3 TEM images and amount of Nb precipitates before and after heat treatment

		Before heat treatment	After 930°C×200 h
		TEM image	Insol. Nb
Type 430J1L	TEM image		0.19
	Insol. Nb		0.17
R444EX	TEM image		0.26
			0.33

性の点も考慮すると、極低Cレベルでの M_6C , Fe_2Nb を中心にした微細な Nb 析出物および固溶 Mo が寄与しているものと考えられる。また、Mo による 900°C 以上の強化は、Nb によるそれよりは使用温度、時間依存性が小さく安定していると考えられる。

したがって Nb 添加のみにより高温強化をはかる場合、使用環境温度に応じた Nb, C レベルでなければ、長時間にわたって高温強度を維持できない恐れがある。

3.3 開発鋼の熱疲労特性とその向上機構

Fig. 9 に R444EX, R429EX および Type 430J1L の 100°C ~ 800°C における歪制御熱疲労試験中の各サイクルごとの最大引張荷重を示す。本試験条件ではいずれも、塑性変形を通し、素材平行部にくびれが発生した。また Photo 4 に同試験片の熱疲労試験後に観察された粒内を貫通する疲労クラックを示す。このようにフェライト系ステンレス鋼の 100°C ~ 800°C の熱疲労試験は、繰り返し数の増加に伴い昇温時での回復再結晶および降温時での加工硬化を繰り返し、平行部断面面積が変化し、疲労クラックが発生、伝播し破壊に至るという複雑な過程をとる。

R444EX は、高温で高強度であるため各サイクルごとに R429EX, Type 430J1L よりも大きな荷重が付加される。1 サイクル中に発生する最大引張荷重は、下限温度 100°C での引張歪みによる。

Fig. 10 に、R444EX, R429EX, Type 430J1L および Type 409 の全歪み範囲と破損繰り返し数の関係を示す。エキゾーストマニフォールドは、エンジンの始動、停止に伴う熱サイクルによる熱歪み

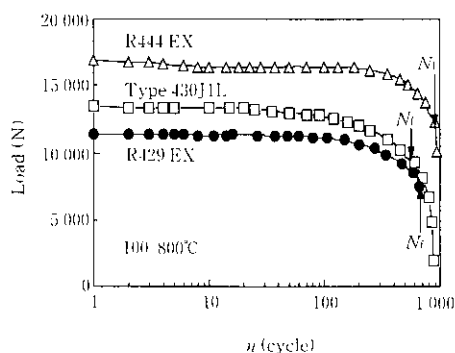


Fig. 9 Change in maximum tensile load with increasing thermal fatigue cycles (N_f : number of cycles to failure)

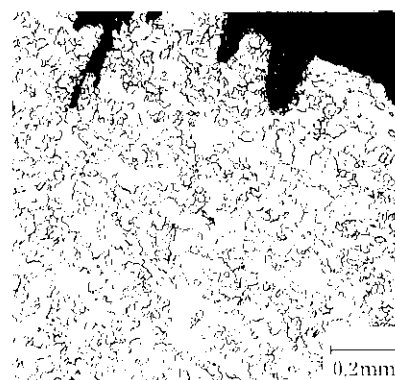


Photo 4 Microstructure of Type 430J1L after thermal fatigue test (100-800°C, $\Delta\epsilon_t=0.5\%$, $N_f=550$)

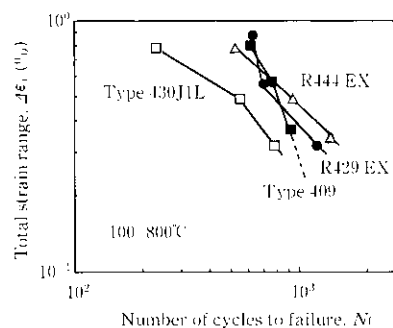


Fig. 10 Relation between total strain range and number of cycles to failure

を受けるが、このような耐久部材では、その熱歪みが小さくなるような設計が行われている。本実験で検討したような全歪み範囲が 0.3% 程度の歪み範囲では、R429EX, R444EX の熱疲労特性は、既存鋼 (Type 430J1L) のそれに較べて 1.5 倍以上の優れた特性を示す。

一般に熱疲労特性に関して下記に示す Manson¹²⁾と Coffin¹³⁾による式が知られている。

$$\Delta\epsilon_p \times (N_f)^a = C \quad \text{..... (1)}$$

a : 定数

$\Delta\epsilon_p$: 繰り返し塑性歪み範囲

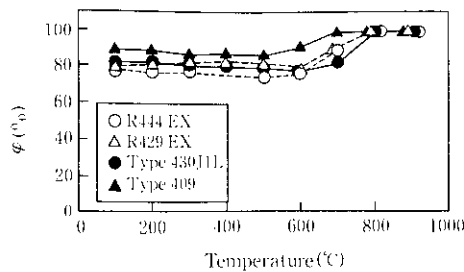


Fig. 11 Reduction of area at elevated temperatures

N_f : 破損繰返し数

C : 素材定数

エキゾーストマニフォールド用のフェライト系ステンレス鋼の熱疲労特性の評価に関しては、上記の式による解析が奥ら⁹⁾によって報告されている。素材の高温高強度化によって素材に加わる非弾性歪み範囲（塑性歪み範囲）が小さくなることにより、上記の式にしたがい熱疲労寿命が向上することを、彼らは、(1)式により説明している。しかし、全歪み範囲が0.8%のような高歪み量の試験条件において、高温強度の低いType 409が最も高寿命である点は説明されない。

一般に高温疲労特性を全歪み範囲で整理した場合、高歪み範囲域では延性が大きく影響し、低歪み範囲域では強度の影響が大きいと言われている^{14,15)}。また(1)式の右辺の C は以下のように引張試験にける絞り量に関連することが知られている^{12,13)}。

$$C = -\frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\Phi}$$

Φ : 引張試験における破断絞り量

すなわち、引張試験時の破断絞り量が増大するほど、定数 C が大きくなり、熱疲労寿命が向上すると考えられている。Fig. 11に各温度における各鋼種の引張試験による破断絞り量の測定結果を示す。いずれの鋼も500~600°C程度において最も絞り量が小さくなるが、全温度域でType 409が最も高い絞り量を示し、以下概してR429EX, Type 430J1L, R444EXという序列となる。熱疲労試験時の亀裂発生は、降温過程においてその引張歪みが増加していくのと、絞り量の温度依存性との兼ね合いに支配されるものと考えられる。したがってType 409が高歪み範囲域での熱疲労試験で優れた疲労寿命を示した理由の一つとしてこのような高延性が関係したものと解釈できるが、これについてはさらに詳細な検討が必要である。

このように、定性的には、素材の熱疲労特性向上に対し、熱疲労温度域での高強度化および延性の向上が有効であるものと考えられる。また高温強度と延性は、加熱温度と時間によっては長時間加熱時に変化する場合¹¹⁾もあり、エキゾーストマニフォールド用熱疲労特性の評価を一層複雑にしている。R429EXは、Type 430J1L並の高温強度および組織安定性を有しているとともに、Cr含有量が低いため広い温度範囲において延性に優れており、100~800°C間の熱疲労特性は、その歪み範囲の大小によらず、Type 430J1Lの1.5倍以上の優れた熱疲労特性を有している。またR444EXは、高温での強度がType 430J1Lよりも大きく、また長時間高温熱処理によっても高温強度の低下は少ないにもかかわらず、Type 430J1Lに近い高延性を有しているので、100~800°C間の熱疲労特性は、その歪み範囲の大小によらず、Type 430J1Lの2倍程度の優れた熱疲労特性を示し、高排気温度用のエキゾーストマニフォールド用素材として有望である。

3.4 開発鋼の耐酸化性

Fig. 12に800, 900および1000°Cにおける大気中200h連続酸化試験結果を示す。R429EXは現行のエキゾーストマニフォールド使用温度域750~900°Cにおいて良好な耐酸化性を有している。またR444EXはType 430J1L以上の良好な耐酸化性を有し、1000°C、200h連続酸化試験においても良好な耐酸化性を示している。

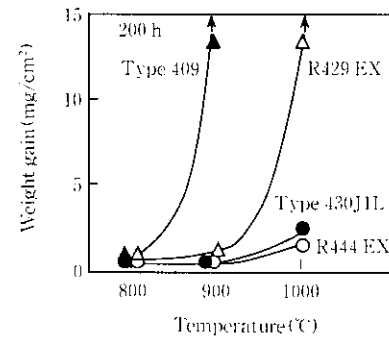


Fig. 12 Effect of temperatures on oxidation properties between 800°C and 1000°C for 200 h

3.5 開発鋼の成形性

Table 3にR429EXとR444EXの室温の機械的性質および造管したERWパイプの加工性をType 409, Type 430J1Lと共に示す。R429EXのYSはType 409とType 430J1Lの中間にあり、Type 430J1Lよりも加工しやすいことが期待できる。またパイプの加工性は、R429EXおよびR444EXともに偏平は密着加工まで可能であり、かつ1.2Dまでのセグメント拡管にも耐え、良好な加工性を有している。Fig. 13にはR429EX, Type 430J1L,

Table 3 Mechanical properties of plates and ERW pipes of stainless steels

	Plate (2 mm t)			Pipe (Φ48.6×2 mm t)	
	YS (N/mm²)	TS (N/mm²)	El (%)	1.2D segment expanding	Flattening test
R429EX	299	476	38	Good	2t
R444EX	336	519	36	Good	2t
Type 430J1L	325	474	36	Good	2t
Type 409	224	400	40	Good	2t

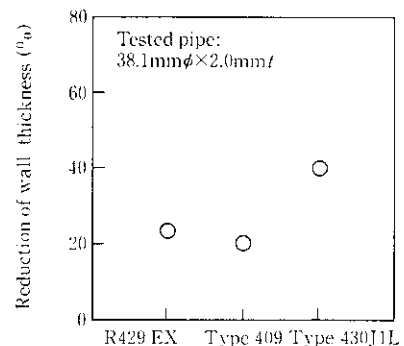


Fig. 13 Reduction of wall thickness after bending test (40 mmR- 90° bending)

Type 409 パイプを曲げ加工した場合の板厚減少率を示す。Type 430 J1L では40%以上の板厚減少率を示す厳しい加工においても、R 429 EX は Type 409 なみに25%以下の板厚減少率を保ち、Type 409 に近い高加工性パイプであることがわかる。

4 結言

自動車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の加工性と耐熱性の向上を図るために高温強度、じん性、高温組織安定性に及ぼす合金元素(C, Cr, Nb, Mo)の影響を検討し、この結果にもとづき高加工性汎用フェライト系ステンレス鋼 R 429 EX (14 Cr-0.5 Nb 鋼) および高排気温度対応高耐熱フェライト系ステンレス鋼 R 444 EX (19 Cr-0.6 Nb-2 Mo 鋼) を開発した。これらの開発に際して得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 800℃以上の高温強度の向上にはMo, Nb添加が有効である。
- (2) Crの増量は室温の強度を上昇させるが、800℃以上の高温強度には影響を与えない。
- (3) 950℃の高温耐力をMoまたはNb添加により同一量向上させる場合、前者の方が後者に比べてじん性の劣化は少ない。
- (4) 950℃×200 h後の結晶粒粗大化抑制に対して、Mo添加は効果がなく、低C化あるいは高Nb化が効果的である。これは、 M_6C 、 Fe_2Nb 等の微細析出物の結晶粒界のピンニング効果によるものと考えられる。

るものと考えられる。

- (5) 熱疲労特性の向上のためには、高温耐力および延性の向上が効果的である。
- (6) 以上の知見を基にして開発した高加工性汎用耐熱フェライト系ステンレス鋼 R 429 EX は、板およびパイプのいずれにおいても現用鋼 (Type 430 J1L) なみの高温強度を有しつつ Type 430 J1L 以上で Type 409 に近い高加工性を有する。また熱疲労特性は Type 430 J1L のその1.5倍以上に向上した。
- (7) 高排気温度対応高耐熱フェライト系ステンレス鋼として開発された R 444 EX の高温特性は、950℃長時間熱処理においても、Type 430 J1L の900℃長時間熱処理後のそれと同等の値を示し、優れた高温強度、高温長時間熱処理後の高温強度と組織の安定性を示した。また熱疲労特性は Type 430 J1L のその2倍程度でかつ Type 430 J1L なみの加工性と耐酸化性を示した。

今回開発した R 429 EX はより複雑な形状に対応できる高加工性汎用材料としてステンレス鋼製エキゾーストマニフォールドの適用範囲を広げるものであり、また R 444 EX は、今後予想されるエキゾーストマニフォールドの高温・薄肉化に対応できるものである。いずれも今後広く利用されるものと考えられる。

なお本論文の一部は自動車技術会学術講演会前刷集 (No 921150) から同会の承諾のもとに転載いたしました。

参 考 文 献

- 1) 本間正幸: 自動車技術, 43(1989) 9, 55
- 2) 石川秀雄: 材料とプロセス, 4(1991) 6, 1760
- 3) 豊岡高明, 橋本裕二, 成本朝雄, 宮崎一淳, 小林邦彦, 唐沢順市, 西田保夫, 川崎龍夫: 材料とプロセス, 4(1991) 6, 1800
- 4) 新谷一進, 飯田公典, 稲葉洋次, 樋口賢次: 材料とプロセス, 3(1992) 5, 827
- 5) 成本朝雄: 金属, 11(1992), 15
- 6) 奥一学, 中村定幸, 平松直人, 植松美博: 日新製鋼技報, 66(1992), 37
- 7) 宮崎一淳, 宇城一工, 富樫房夫, 吉岡啓一: 材料とプロセス, 4(1991) 3, 886
- 8) 中村定幸, 宮楠克久, 植松美博: 材料とプロセス, 4(1991) 6, 1788
- 9) 大村圭一, 藤田展弘, 菊地正夫, 鈴木一亨, 弘重逸朗: 材料とプロセス, 4(1991) 6, 1796
- 10) 藤田展弘, 大村圭一, 菊地正夫, 鈴木一亨, 船本秀一, 弘重逸朗: 耐熱金属材料第123委員会研究報告, 33(1992) 1, 1
- 11) 宮崎一淳, 多田昌哉, 宇城一工, 富樫房夫, 吉岡啓一: 材料とプロセス, 5(1992) 6, 1936
- 12) S. S. Manson: NACE Technical Note 2933, (1953)
- 13) L. F. Coffin, Jr: Proc. 4th Sagamore Conf., (1957), 219
- 14) P. G. Forrest and K. B. Armstrong: Joint Int. Conf. on Creep, London, (1963)
- 15) 平 修二編: 「熱応力と熱疲労」, (1974) 103, [日刊工業新聞社]