新技術・新製品

# 省資源型高耐熱フェライト系ステンレス鋼「JFE-TF1」の開発

中村徹之[*1)]　太田裕樹[*2)]　加藤　康[*3)]

## 1. はじめに

近年，自動車には燃費改善や排気浄化性能の向上が強く求められており，そのためには車体の軽量化や排ガス温度の上昇が必要とされる．従来は鋳物が使用されてきたエキゾーストマニフォールドには，90年代以降軽量化の観点からステンレス鋼板が使用されるようになり，現在はNb添加によって耐熱性が高められた耐熱ステンレス鋼Type429（15%Cr-0.4%Nb）や，Nbに加えてMoを添加した高耐熱ステンレス鋼SUS444（19%Cr-0.5%Nb-2%Mo）が多く使用されている（**図1**）．

しかし，Type429では排ガス温度がより高温となった場合に耐熱性が不十分となる場合があり，一方，レアメタルであるMoを多量に添加したSUS444は，原料価格に起因した鋼材価格の高騰や，高合金化に伴う硬質化による室温での加工性の低下が課題となることから，Moを使用せずに高い耐熱性を有する材料のニーズが高まってきた．

エキゾーストマニフォールドのような高温排気系部材は，エンジン稼動時には高温の排ガスにより800℃以上にまで加熱され，停止時には室温にまで冷却される．このとき，エキゾーストマニフォールドは限られたエンジンスペース内で他部材と連結されているため，熱膨張や熱収縮が制限されて熱歪を受ける．加熱と冷却が繰り返され，この熱歪が蓄積することで破壊に繋がる現象を熱疲労と言い，エキゾーストマニフォールド用材料にとって熱疲労特性は最も重要な特性の一つである．エキゾーストマニフォールド用材料には，その他に高温での耐振動性を示す高温疲労特性や，耐酸化性も重要視されている．

* JFEスチール株式会社
スチール研究所 1）ステンレス鋼研究部；主任研究員
鋼管・鋳物研究部；2）主任研究員　3）部長
Development of Resource-conserving Heat-resistant Ferritic Stainless Steel "JFE-TF1"; Tetsuyuki Nakamura, Hiroki Ota, Yasushi Kato（JFE Steel Corporation）
2014年10月27日受理［doi:10.2320/materia.54.18］

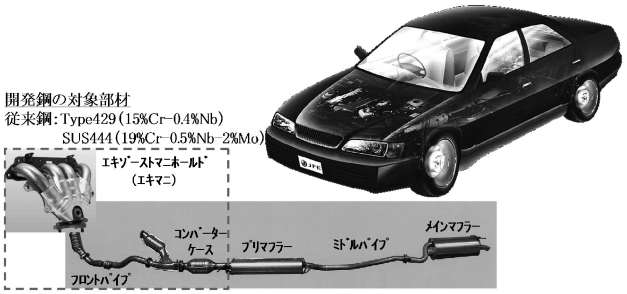


図1　ステンレス鋼が使用される自動車排気管部品例．

著者らは，高価な元素であるMoを使用することなく，安価な元素を使用して従来の高耐熱鋼SUS444と同等以上の耐熱性を有する材料の開発を行ったので紹介する．

## 2. 開発の考え方

### (1) 固溶強化元素としてのAlの活用

熱疲労特性を向上させる手段として，これまではNbやMoといった固溶強化元素の添加により，全温度域における高強度化が図られてきた[(1)]．また，Cuの添加は600℃～700℃において鋼中に微細析出することで高温強度を上昇させることが出来る[(2)]ため有効である．

Cuを添加した場合，析出強化効果が得られる600℃～700℃における高温強度は大きく増加するが，固溶温度域となる800℃以上においてはCu添加の効果は大きくない．熱疲労特性には最高温度（800℃以上）から室温まで全温度域における強度（耐力）が寄与するため，Cuの析出強化効果が小さい高温域での高強度化が必要となる．

一般に，800℃以上の高温域で有効な強化機構としては固溶強化が挙げられる．**図2**にαFe中の種々元素のミスフィット，拡散係数から，Crを1としたときの相対的な固溶強化能を計算した結果を示す[(3)]．従来から固溶強化元素として知られているNb, Moに加え，Alの固溶強化能が比較的大きいことが分かる．Alを多量に添加することで耐酸化性を

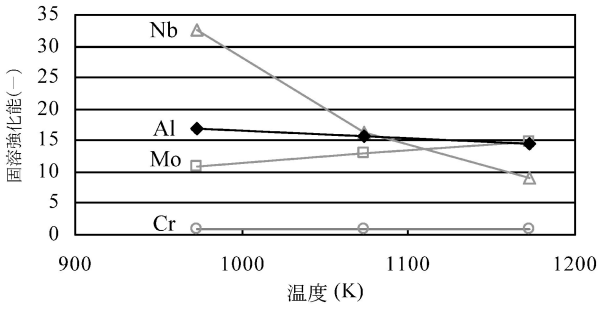


図２　各元素の αFe 中の固溶強化能計算結果[3].

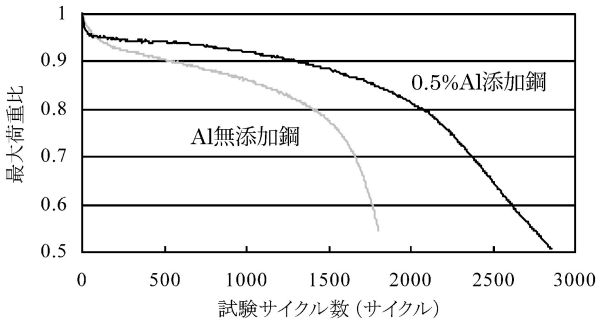


図３　熱疲労試験における最大荷重変化[3].

向上させたフェライト系ステンレス鋼は既に開発されている[4]が，Al を固溶強化元素として用いた開発例は無い．

本開発鋼は，エキゾーストマニフォールドのように昇温と降温が繰り返され，他部品からの拘束による歪に起因して破壊に至るという環境下における，Al の固溶強化元素としての挙動に着目し，開発したものである．

### ⑵　熱疲労特性に及ぼす Al 添加の影響

熱疲労試験は，最高温度 1103 K，最低温度 473 K とし，予め測定した自由膨張曲線を元に，拘束率を0.4として行った．

**図 3** に17％Cr–0.45％Nb–1.25％Cu 鋼の熱疲労試験中の最大荷重変化を示す．荷重は初期５サイクル目の値により規格化した．Al 無添加鋼に比べ，Al 添加鋼は荷重の低下が緩やかであることがわかる．

熱疲労試験中の変形挙動を調べるため，試験片平行部の断面積を求めた．その経時変化を**図 4** に示す[3]．Al 添加鋼は，Al 無添加鋼に比べ断面積の減少開始が遅く，その減少速度も緩やかであることが分かる．1400サイクル時点で比較すると，Al 無添加鋼では断面積が試験開始前に比べ約70％まで減少していたのに対し，Al 添加鋼では断面積は90％程度までしか減少していなかった．

次に，歪速度の影響について考察する．一般に，高温における強度には歪速度依存性が現れる．熱疲労試験における歪速度は $10^{-5}\,s^{-1}$ であり，通常の高温引張試験が行われる $10^{-3}\,s^{-1}$ に比べて小さい．**図 5** に，1073 K での引張試験を，異なる歪速度で行った結果を示す[3]．通常の高温引張試験が行われる歪速度 $10^{-3}\,s^{-1}$ の場合に比べ，熱疲労試験を想定した $10^{-5}\,s^{-1}$ 程度の低歪速度領域において，Al 添加による高強度化の効果が大きくなっていることが分かる．

**図 6** に，17％Cr–0.45％Nb–1.25％Cu–0.5％Al 鋼を用い，1103 K において異なる歪速度で20％の歪を与え急冷した後の組織を示す[3]．歪速度が大きい場合，粒内に転位は見られなかったのに対し，歪速度が小さい場合は粒内に転位が分布していた．このことは，高歪速度側では，転位が自由に移動(Free flight motion)できる純金属型変形であるのに対し，低歪速度側では，転位は粘性運動(Viscous motion)をする固溶強化型変形であることに起因しているものと考えられる．

以上より，歪速度が $10^{-5}\,s^{-1}$ 程度の小さい熱疲労試験において，Al は固溶強化によって鋼を高強度化し，ネッキングを抑制することで熱疲労特性を向上させることが分かった．

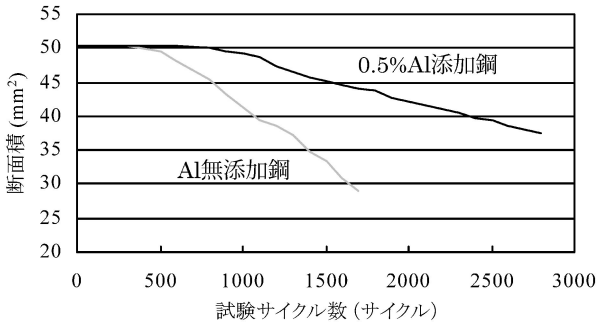


図４　熱疲労試験中の断面積変化[3].

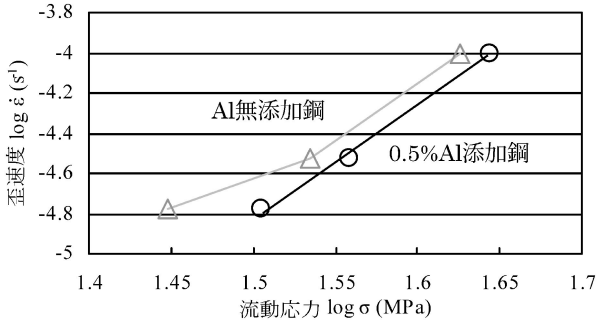


図５　1073 K における流動応力と歪速度の関係[3].

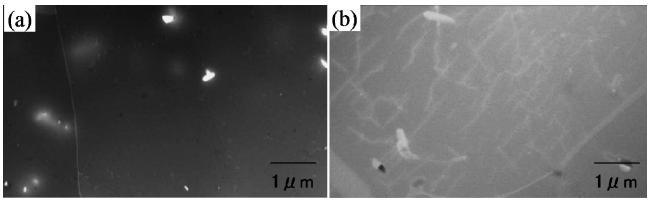


図６　1103 K, 20％歪付与後の TEM 組織写真．
歪速度(a) $2\times10^{-3}\,s^{-1}$, (b) $4\times10^{-5}\,s^{-1}$

## 3.　開発鋼の特性

本製品 JFE–TF1 は，Cu の析出強化に加え，Al の固溶強化を活用することで，Mo を添加することなく Mo 添加高耐熱鋼 SUS444 と同等以上の耐熱性を有する省資源型高耐熱フェライト系ステンレス鋼である．化学成分例を従来鋼と比較して**表 1** に示す．加工性・製造性とのバランスを考慮し，Al は0.35％とした．

**図 7** に開発鋼 JFE–TF1 の熱疲労特性(最高温度 1103 K，拘束率0.4)を，従来鋼と比較して示す．JFE–TF1 の熱疲労

表１　開発鋼 JFE−TF1 と従来鋼の化学成分例(mass%).

| 鋼種 | | Cr | Nb | Mo | Cu | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|
| JFE−TF1 | 高耐熱鋼 | 17.5 | 0.45 | — | 1.25 | 0.35 |
| Type429 | 耐熱鋼 | 14.6 | 0.44 | — | — | — |
| SUS444 | 高耐熱鋼 | 18.9 | 0.52 | 1.8 | — | — |

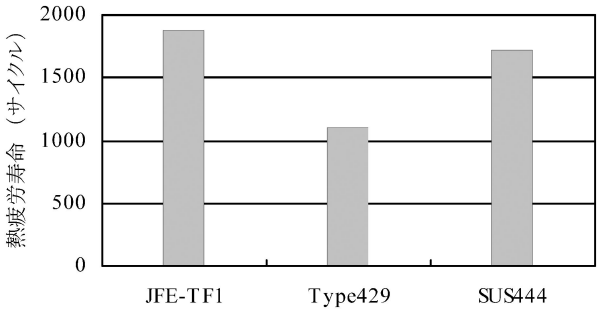


図７　開発鋼 JFE−TF1 と従来鋼の熱疲労寿命比較.

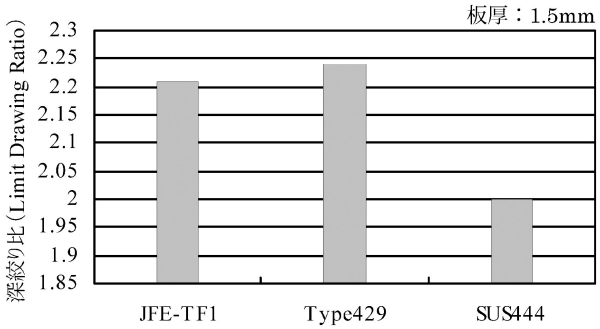


図８　開発鋼 JFE−TF1 と従来鋼の深絞り成形性.

寿命は Type429 に比べ優れており，SUS444 と同等以上であることが分かる.

**図８**に JFE−TF1 と従来鋼の深絞り成形性を示す．JFE−TF1の成形性は高耐熱鋼である SUS444 に比べて優れており，Type429 と同等で良好である.

その他に，開発鋼 JFE−TF1 は，高温疲労特性や耐酸化性についても SUS444 と同等以上で優れており，総合的に SUS444 と同等以上の耐熱性を有している．したがって，JFE−TF1 は，SUS444 に置き換えることで省資源(Mo)化するとともに，より複雑な形状への加工が可能となり，また，Type429 に比べて耐熱性が優れているため，薄肉化による軽量化に寄与することが出来る(**図９**).

## 4.　実績と将来性

JFE−TF1 は2010年から販売を開始しており，国内自動車

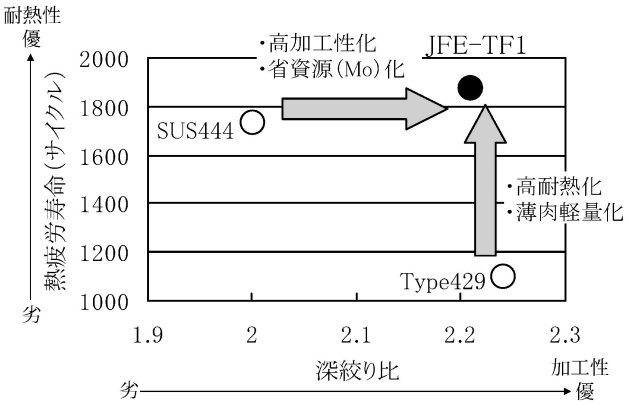


図９　開発鋼 JFE−TF1 と従来鋼の耐熱性と加工性.

図10　開発鋼 JFE−TF1 が使用されたコンバータケース.

メーカーにて SUS444 の省 Mo 化，または Type429の薄肉軽量化を目的として採用されている(**図10**：JFE−TF1 を使用した製品例)．Type429に対しては，20～25%程度の薄肉化が達成されている．2013年度の販売量は 130 t/月まで拡大(前年度比５倍)しており，今後，排ガス規制強化や燃費のさらなる向上のため，JFE−TF1 の採用は拡大していくことが期待され，JFE では2017年に 500 t/月の販売量を目指している.

## 5.　特　　許

国内：特許4702493号登録済．他関連９件出願済.
海外：米国8153055号，韓国1263584号他２ヶ国で登録済.

## 文　　献


（１）例えば，宮崎　淳，郡司牧男，吉岡啓一：川鉄技報，**25**(1993) 2, 112−118.
（２）例えば，中村定幸，鈴木　聡，大久保直人，長谷川守弘，宮楠克久：CAMP−ISIJ, **12**(1999), 517.
（３）H. Ota, T. Nakamura and K. Maruyama: Mater. Sci. Eng. A, **586** (2013), 133−141.
（４）川崎龍夫：特殊鋼，**37**(1988), 50.