

省資源型高耐熱フェライト系ステンレス鋼の開発

中村 徹之¹⁾ 太田 裕樹²⁾ 加藤 康^{**}

1. 開発の背景

近年、地球環境保護の観点から自動車の燃費改善、排ガス浄化性能の向上が強く求められている。自動車の運転時に800°Cを超える高温の排ガスに曝されるエキゾーストマニフォールドには、90年代以降軽量化を目的としてステンレス鋼板が用いられており、現在では耐熱性に優れた Type429 (15%Cr-0.4%Nb) や、さらに高い耐熱性を有する SUS444 (19%Cr-0.5%Nb-2%Mo) が多く使用されている。しかし、SUS444に含まれる Mo はレアメタルであり、原料価格が高騰しやすいのみならず、高合金化に伴う室温での加工性低下が課題として挙げられ、Mo を使用しない高耐熱材料の開発が求められていた。

2. 開発の考え方と経過

エキゾーストマニフォールドは、自動車の運転時には800°C以上にまで加熱され、停止時には常温まで冷却される。この加熱と冷却の繰り返しに起因した疲労破壊を熱疲労と呼び、エキゾーストマニフォールド用材料にとって最も重要な耐熱性と位置付けられている。これまで、フェライト系ステンレス鋼の高耐熱化技術としては、Nb, Mo, W といった室温から高温まで全温度域で鋼の強度を高めることができる高価な固溶強化元素を合金化する方法が主にとられてきた。しかし、固溶強化効果を十分に発揮させるためには合金量を多くする必要があり、原料費すなわち鋼材費のコストアップのみならず、室温での加工性の低下も課題となっていた。新たな高耐熱化技術を見出すべく、種々の強化技術について検討を行ったが、Nb や Mo のように幅広い温度域で効果を発揮するものはなかなか現れなかった。

上述したように、熱疲労は加熱と冷却が繰り返されることに起因して起こるため、最高温度における強化に限らず、それ以下の温度域における強化も有効なことから、上述の固溶強化には拘らず、600°C~700°Cで微細に析出し、大きな強化効果が得られる Cu を活用することに至った。適量の Cu を合金化することにより、700°C以下における強度が大きく増加し、最高温度830°Cでの熱疲労特性も大きく向上した。しかしそれだけでは Mo の効果を代替し切れず、目標である SUS444の熱疲労特性には及ばなかった。Cu によって700°C以下における強度は大きく増加したにもかかわらず熱疲労特性が不十分であったことから、やはり800°C以上の高温域に

おける強化も不可欠なのであろうと考えた。昇降温が繰り返される熱疲労においては、必ずしも1つの強化機構で全温度域を強化せずとも、温度域ごとに異なる強化機構が寄与できれば良いのではないかと考え、700°C以下における Cu の析出強化と組み合わせるべく、800°C以上における強化を再度検討した。800°C以上で安定して強化できるのはやはり固溶強化しか考えられず、改めて固溶強化元素について検討することにした。固溶強化に寄与する因子はミスフィット (Fe 原子との原子半径差) と、高温においては拡散係数である。文献から種々の元素についてこれらの値を求め、Cr を基準として相対的な固溶強化能の値として計算した結果が図1である。従来から知られる高価な Nb, Mo の強化能が大きいことが確認できたのと同時に、安価な元素である Al も比較的高い強化能を有するという結果に気付いた。耐酸化性を向上させる元素として知られる Al ではあったが、固溶強化元素としては認知されていなかった。そこで Al 量を変化させた研究鋼塊を作製し、800°Cで引張試験を行った。ここで Al 量増加とともに耐力が増加しているようであれば、おそらく Al は固溶強化元素として既に活用されていたであろう。Al 量を増加しても耐力の増加は僅かであった。強化能はあるのに試験結果には表れない。しかし Al を諦めなかった。そもそも、熱疲労は長時間かけて発生する疲労破壊現象であり、通常実施される高温引張とは少なくとも歪速度において大きく異なる。そこで、通常の高引張試験では10⁻³/s オーダーの歪速度を、熱疲労試験に相当する10⁻⁵/s オーダーまで小さくし、再度高温引張試験を行った。すると、図2に示すように、歪速度が小さい場合に Al 無添加鋼と Al 添加鋼で差が大きく表れた。Al は高温で強化に寄与することが確認できた。

そうすると、Al がどのようにして強化に寄与したかを確かめる必要がある。まずは Al が高温域で AlN 等何かしらの

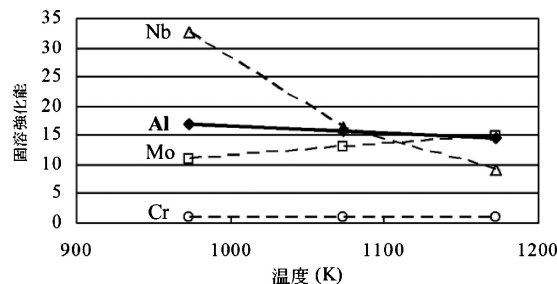


図1 各元素のαFe中固溶強化能計算結果。

* 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 2) 鋼管・鋳物研究部 部長

** JFE テクノリサーチ株式会社 知多事業所 材料解析部 部長
Development of Resource-conserving Heat-resistant Ferritic Stainless Steel; Tetsuyuki Nakamura*, Hiroki Ota*, Yasushi Kato**
(*1) JFE Steel Corporation, Chiba. (*2) JFE Steel Corporation, Chita. (**) JFE Techno Research Corporation, Chita)

Keywords: ferritic stainless steel, thermal fatigue resistance, solid solution strengthening

(まてりあ第54巻1号18-20頁「新技術・新製品」掲載)

2016年2月26日受理 [doi:10.2320/materia.55.271]

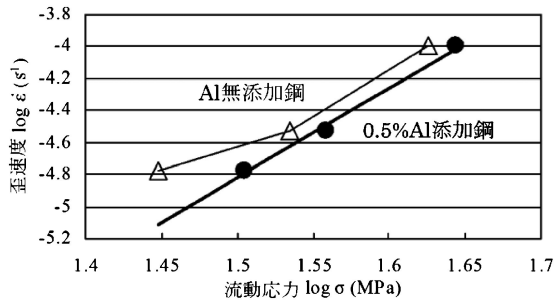


図2 1073 Kにおける流動応力と歪速度の関係。

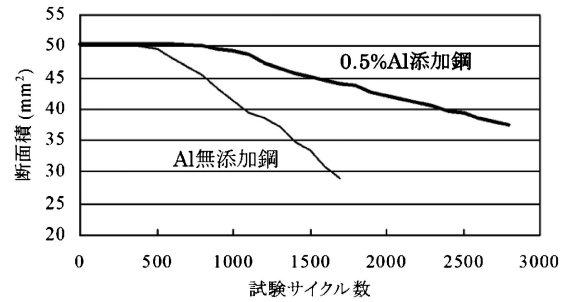


図4 熱疲労試験中の断面積変化。

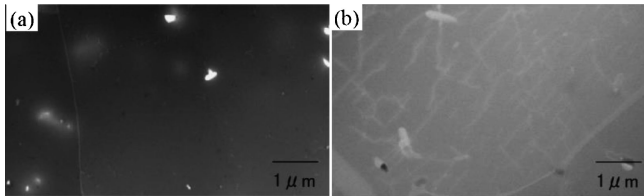


図3 1073 K, 20%歪付与後のTEM組織写真；歪速度 (a) $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, (b) $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

形で析出していないことを確認した。次に、高温で歪を与えた時の組織を観察するため、異なる歪速度で歪を负荷し、そのときの応力を负荷したまま急冷してTEMで組織観察を行った。その結果が図3である。歪速度が大きい場合には粒内に転位は見られなかったが、歪速度が小さい場合に粒内に転位が多く分布しており、転位が粘性運動する固溶強化型変形の挙動を示していることから、Alは高温域において固溶強化によって鋼を強化し、熱疲労特性を向上させていたことがわかった。

700°C以下においてはCuの析出強化、800°C以上の高温域においてはAlの固溶強化、これで全温度域での高強度化が果たされ、期待を持って熱疲労試験を行った。通常、熱疲労試験における寿命を評価するための指標としては最大引張荷重(応力)を用いるが、この値は昇降する温度範囲のうち最も低い温度(200°C)におけるもので、必ずしも高温での強度を示すわけではない。熱疲労試験中に高温域でAlの固溶強化が発揮されていることを確認するため、試験片のネックング挙動に着目した。熱疲労試験中の試験片の最もくびれた部分の断面積を測定した結果が図4である。Al添加鋼では、Al無添加鋼に比べてくびれが開始するタイミングが遅延しており、くびれ開始後のくびれ方も緩やかであった。それに伴って寿命も増加しており、Alの固溶強化による熱疲労特性向上効果が確認できた。Cu+Al複合含有鋼の寿命はMo含有鋼のSUS444と同等以上であり、目標が達成された。

以上のようにして、700°C以下におけるCuの析出強化と800°C以上におけるAlの固溶強化の組み合わせにより、Moを使用せずにSUS444と同等以上の熱疲労特性を得ることができた。

3. 開発鋼の特徴

本開発鋼はCuとAlの組み合わせにより優れた熱疲労特性を有しているのみならず、高温疲労特性や耐酸化性も優れており、総合的に耐熱性が優れている。また、その他の合金量も適正化し、成分に応じた製造条件の適正化を行うことで優れた加工性も有している。本開発鋼の特性を図5に示す。

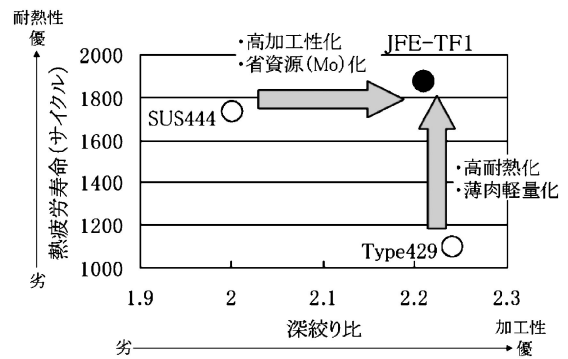


図5 開発鋼JFE-TF1と従来鋼の耐熱性と加工性。

レアメタルであるMoを使用していないことに加え、耐熱性と加工性を高レベルで両立していることが特徴である。そのため、SUS444に代替することでMo不使用となり省資源かつ材料コストを低減できる。また、従来は不可能であった複雑な形状の部品への加工が可能となる。さらに、Type429に代替することにより、鋼材の耐熱性が向上するため、より薄い鋼板を使用しても耐熱性を確保できるため車体の軽量化が可能となり、また、排ガス温度の高温化に対応することもできる。目的はお客様ごとにそれぞれであるが、様々な観点から環境に優しい自動車づくりに貢献することができる。

4. 開発を振り返って

本開発において最も重要な特性は熱疲労であるが、熱疲労試験は1試験当たり数週間、試験片を作製するのに多くの時間がかかるため、初めから全て熱疲労試験を行うというわけにはいかず、高温引張試験等である程度当たりをつけてから熱疲労試験を行うしかなかった。それでも実験の発案から結果が出るまでにはタイムラグがあり、いかにしてタイムリーに結果が出るように熱疲労試験スケジュールを組むかが開発期間短縮のテーマであった。そして、熱疲労特性には室温から高温まで全温度域の強度が寄与するが、温度毎にその寄与率が明らかになっているわけではなく、どの温度域の強度が上がって熱疲労特性が向上したのか、またどの温度域でどれだけ強度を上げれば熱疲労特性がどれだけ向上するのかなど、一筋縄ではいかない現象を解明するのも大きな課題であった。また、昇降温を繰り返す熱履歴と等温時効では鋼の特性が異なってくるため、熱疲労サイクル中の強度や析出物等の挙動を把握するのも困難な点であった。

本開発鋼はユーザーからも高い評価を受けており、採用は順調に拡大している。本開発にご尽力いただいた社内外の多くの方々にこの場を借りて深く感謝を申し上げます。