

動的析出強化を活用した自動車排気部品用耐熱フェライト系ステンレス鋼(NSSC[®]429NF, NSSC[®]448EM)の開発裏話

濱田 純一*

1. 開発の背景

自動車のエンジンから発生する高温の排気ガスは、エキゾーストマニホールドで集められた後に各種の浄化装置や熱回収装置等を通りマフラーから車外に排出されます。排気ガスの経路となる排気部品に使用される材料には、耐熱性、耐食性、加工性および溶接性等の多様な特性が要求され、各部品環境に応じて多種のステンレス鋼が適用されています。近年、CO₂削減、熱効率や燃費の改善が進められていますが、ステンレス鋼も排気部品の素材として貢献しています。図1に示すエンジン直下のエキゾーストマニホールドやその後に配置されるコンバーターは、高温の排気ガスに曝され、かつエンジンの起動・停止や走行中の出力変動に伴い加熱と冷却を受けます。材料は高温環境に繰り返し曝されるため、国内では耐熱性に優れたフェライト系ステンレス鋼が主に使用されています。この代表鋼はNbにより高温強化するSUS429系(14%Cr-Nb)であり、より高耐熱性が必要な場合にはMoを多量に添加したSUS444系(18%Cr-2%Mo-Nb)が適用されます。NbやMoは耐熱性や耐食性を向上させる極めて有益な元素ですが、レアメタルとして挙げられ価格変動性が大きい元素です。よって、上記元素を代替可能な新たなベースメタルの抽出あるいは省合金化は、元素戦略上極めて重要です。また、排気ガスの高温化対策や薄肉・軽量化等の多様な

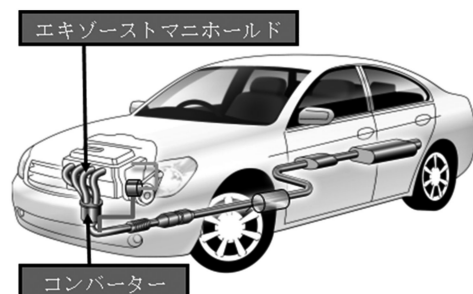


図1 開発鋼の主な適用対象となる自動車排気部品。

ニーズに応えるために素材メニューの拡充が必要になってきました。

2. 開発の着眼点

(1) 熱疲労

過酷な高温環境に繰り返し曝されるエキゾーストマニホールドやコンバーターにおいて最重要な耐久性能は、熱疲労です。熱疲労とは、温度変化を受ける材料が自由膨張・収縮を妨げられるために繰り返し応力あるいは歪が発生し、ついには亀裂を生じて破損する現象です。自動車メーカーや部品メーカーでは車の開発段階において、冷熱耐久試験によって部品の信頼性や素材の評価が行われます。冷熱耐久試験は実際のエンジンを長時間作動させる加速試験であり、所定のサイクル(寿命)を満足するか否かがポイントとなります。この試験は多くの時間と費用が掛かるため、開発負荷を減らすためにも素材メーカーとしては車のエンジン環境に適合し、かつオーバースペックにならない材料を提案する必要があります。素材メーカーで開発段階のエンジンを使った耐久試験を行うことは困難ですが、冷熱耐久試験環境に出来るだけ近い熱環境での素材の熱疲労評価が重要となります。当社では2003年に旧新日本製鐵㈱と旧住友金属工業㈱のステンレス事業が統合した際、パイプを用いた高精度な熱疲労試験技術を確立しました。実際の排気部品に使用される材料あるいは実験室で溶解・製造した材料の熱疲労試験を通じて、寿命に及ぼす合金元素の影響を把握しながら成分設計を行います。一方、熱・歪サイクルを同時に受ける熱疲労過程において材料内部は複雑に変化することが予想されます。この変化を冶金的に捉えて熱疲労損傷や寿命の支配因子を明確化すれば材料設計に反映出来るのではと考え、寿命に一喜一憂するだけでなく熱疲労過程における動的な組織変化を注意深く観察することにしました。

(2) 高温変形過程の動的組織変化

長寿命化のヒントを得るために種々の材料の熱疲労および

* 新日鐵住金ステンレス株式会社；上席研究員(〒743-8550 光市島田3434)

Development of Heat-resistant Ferritic Stainless Steels “NSSC[®]429NF” and “NSSC[®]448EM” Utilized Dynamic Precipitation Hardening for Automotive Exhaust Systems; Jun-ichi Hamada (Nippon Steel and Sumikin Stainless Steel Corporation, Hikari)

Keywords: ferritic stainless steel, heat resistance, thermal fatigue, automotive exhaust system, precipitation hardening, copper

(まてりあ第56巻1号33-35頁「新技術・新製品」掲載)

2018年2月13日受理[doi:10.2320/materia.57.176]

高温変形過程の動的組織変化を研究する中で、母相組織の変化⁽¹⁾とともに析出物の形態変化⁽²⁾に気づきました。耐熱フェライト系ステンレス鋼の高温強化には固溶強化と析出強化が提唱されていますが、析出強化は積極的に活用されていませんでした。この理由は、高温で長時間曝される場合に析出物の成長・粗大化が生じて強化能が無くなると考えられるためです。本開発で活用したCuの場合、Cu粒子が析出する温度での高温強度は高くなりますが、長時間時効によりCu粒子は棒状にオストワルド成長して強度低下が生じます。しかしながら、熱疲労過程のCu粒子を詳細に観察した結果、通常の静的時効熱処理の場合と異なり、球状に微細析出して転位との相互作用が生じている事がわかりました。また、析出強化能の理論計算から、熱疲労過程では動的析出強化が主体的に発現し得ると推定しました。次に何故熱疲労過程でCu粒子が球状微細化するのか？という疑問が生じ、析出物の成長・粗大化や転位との相互作用に関する基礎研究を大学にもご協力頂きました⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。この中で高温変形過程のCu粒子形態の変化を電子顕微鏡内でその場観察した結果、Cu粒子は析出・固溶・再析出を繰り返して球状微細形態となるモデルを構築しました⁽²⁾。長い間耐熱フェライト系ステンレス鋼はNbやMoの固溶強化で設計されてきましたが、上記の基礎研究をベースにCuの動的析出強化を積極的に活用し、必須元素とされてきたレアメタルを大幅に削減した2鋼種を成分設計しました。

3. 開発鋼の特徴⁽⁶⁾⁽⁷⁾

図2にCuを主体的に活用した2つの開発鋼の位置づけを示します。NSSC[®]429NFは、SUS429系が使用される温度環境下で同等以上の耐熱性を有します。NSSC[®]448EMは、SUS429系とSUS444系の間隔的な耐熱性を有するとともに、使用が想定される高温域でもSUS429系に対して30%以上の寿命向上を示します。従来は耐熱性向上のために1~2%のMo添加が常識的でしたが、熱疲労過程の母相組織の変化を追求する中で0.3%程度の微量Moでも広範囲な温度環境で安定的に寿命向上する寄与することを知見しました。これは微量の固溶Moが母相の回復・再結晶を遅延させる効果を通じて長寿命化に寄与していると推定され⁽¹⁾、有意性が

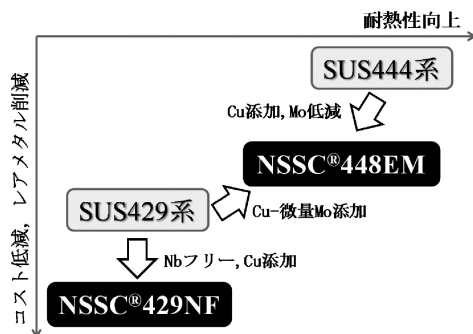


図2 Cuを活用した2つの開発鋼の位置づけ。

ある寿命向上と優れた総合性能を示しつつ、SUS444系よりも大幅にMoを削減することに成功しました。また、両鋼ともCr量等が適正化されているため優れた耐酸化性を示すとともに、薄板一貫製造工程における金属組織(析出物、集合組織)制御を適正に行っているため成形性にも優れています。これにより、部品のコンパクト化や複雑形状化にも対応可能な素材になっています。NSSC[®]429NFはSUS429系に対する省Nb化、NSSC[®]448EMはSUS444系に対する省Mo化およびSUS429系に対する薄肉・軽量化のメリットが得られることから、国内外の自動車に搭載が進んでいます。今後も地球環境に優しいステンレス鋼として各種ニーズに貢献し続けると考えます。

4. 開発を振り返って

本開発によって自動車用耐熱フェライト系ステンレス鋼のメニューが増え、多くのメリットを生み出すことが出来ました。排気部品用素材の選択肢が増えたことで様々な熱環境に応じた適材選定およびソリューション提案が更に重要になってくると考えられます。著者はステンレス鋼の研究に従事する中で、「何故その様な組織になったのかを金属の気持ちになって金属と会話しながら考えることが大切です。」という京都大学・牧正志名誉教授のお言葉⁽⁸⁾を大切にしています。本開発の着眼点となった高温変形過程の動的組織変化の追及は、何故壊れたか？どの程度のダメージを受けたか？過酷な熱疲労環境を耐える組織・合金制御は何か？をステンレス鋼の気持ちになって考えてみようとした事が発端でした。温度や歪が時間変化する複雑な熱疲労環境におけるステンレス鋼の気持ちを十分理解出来ているとは言えませんが、継続的に組織と向き合うことが次の新材料開発やソリューション提案に繋がると確信しています。

最後に本鋼の開発、実用化および拡販に際して、社内外の多くの方々にご尽力ならびにご協力頂きました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

文 献

- (1) 濱田純一, 森弘尚希, 梶村治彦: 日本金属学会誌, **81**(2017), 527-535.
- (2) 神野憲博, 濱田純一, 金子賢治: 鉄と鋼, **103**(2017), 539-548.
- (3) S. Kobayashi, T. Takeda, K. Nakai, J. Hamada, N. Kanno and T. Sakamoto: ISIJ Int., **51**(2011), 657-662.
- (4) S. Kobayashi, T. Takeda, T. Oe, J. Hamada, N. Kanno, Y. Inoue, K. Nakai and T. Sakamoto: ISIJ Int., **54**(2014), 1697-1704.
- (5) 小林周平, 金子賢治, 山田和広, 菊池正夫, 神野憲博, 濱田純一: 鉄と鋼, **101**(2015), 315-318.
- (6) 濱田純一, 林篤剛, 神野憲博, 小森唯志, 伊藤宏治, 福田望, 井上宜治: まてりあ, **56**(2017), 33-35.
- (7) J. Hamada, N. Kanno, A. Hayashi, N. Hiraide, M. Abe, K. Nishimura, C. Takushima, A. Yakawa and F. Fudanoki: Proc. of 9th European Stainless Steel Conference, AIM, Milano, (2017), CD-ROM.
- (8) 牧 正志: 新日鉄技報, **391**(2011), 11-14.