

# 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<sup>®</sup>429NF, NSSC<sup>®</sup>448EM)の開発

濱田 純一<sup>1)</sup> 林 篤剛<sup>2)</sup> 神野 憲博<sup>3)</sup> 小森 唯志<sup>4)</sup>  
伊藤 宏治<sup>5)</sup> 福田 望<sup>5)</sup> 井上 宜治<sup>\*\*</sup>

## 1. はじめに

自動車のエンジンから放出された高温の排ガスは、ステンレス鋼製の各種排気部品を通り車外に排出される。この間、排ガスの浄化、再循環および熱回収等が行われる。エンジン直下に設置され、排ガスを集めるエキゾーストマニホールドには鋳物が使用されていたが、軽量化による燃費向上、低熱容量化による触媒暖気性および排ガス浄化性能の向上等の観点から、1980年代以降ステンレス鋼板または鋼管の適用が急速に進んだ<sup>(1)</sup>。図1に示す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燃焼ガスに曝されるため、材料に要求される特性は高温強度、高温疲労(熱疲労、高サイクル疲労)、耐酸化性、加工性および溶接性と多岐に渡るが、エンジンの起動・停止や走行中の出力変動に伴う加熱と冷却の繰り返しで生じる熱疲労が最も重要となる。フェライト系ステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼に比べて熱膨張係数が小さいため熱疲労特性に優れているとともに、コストパフォーマンスの観点からも広く採用されている。現在、主に使用されている汎用耐熱鋼はNbにより強化するSUS429系(14%Cr-Nb)であり、より高耐熱性が必要な場合にはMoを加えたSUS444系(18%Cr-2%Mo-Nb)が適用されている。

一方、NbやMoはレアメタルとして挙げられており、生

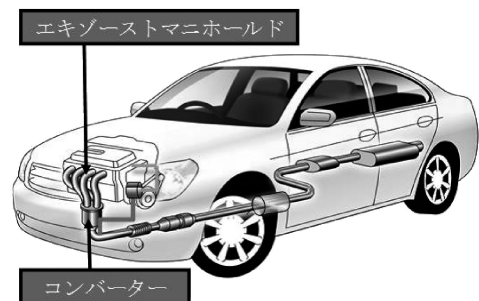


図1 開発鋼の主な適用対象となる自動車排気部品。

産国が偏在するとともに価格変動性が大きい元素である。よって、上記元素を代替可能な新たな耐熱元素の抽出あるいは省合金化は、元素戦略上極めて重要となる。加えて、市場では低コスト化、排ガス温度の高温化や薄肉・軽量化に対応可能な素材のニーズが高まってきている。

著者らは、エキゾーストマニホールドの耐久性で最も重要な熱疲労における動的組織変化を追求する中で、析出粒子の形態変化に着眼し、動的な高温析出強化を主体的に活用可能であることを見出した<sup>(2)(3)</sup>。その結果、ベースメタルであるCuをフェライト系ステンレス鋼に積極的に添加することで、耐熱用途の材料に対して必須元素とされてきたNbをフリーとしたCu添加鋼「NSSC<sup>®</sup>429NF」を開発した。また、この技術を発展させて、SUS444系に対してMoを大幅に削減したNb-Cu-微量Mo複合添加鋼「NSSC<sup>®</sup>448EM」を開発および商品化した。本稿では技術基盤となる研究、開発鋼の諸特性と実用例について述べる。

## 2. 開発の考え方

### (1) 熱疲労過程のCu粒子形態

既存の耐熱鋼における主な強化機構はNbやMoの固溶強化であり<sup>(4)</sup>、析出強化は補助的な強化と位置付けられていた。その理由は、析出物を微細分散させた組織であっても長時間高温に曝されると析出物が粗大化して密度が減少し、そ

\* 新日鐵住金ステンレス株式会社：  
研究センター薄板・自動車材料研究部；1) 首席研究員 2) 主任研究員 3) マネジャー 4) 光製造所生産管理部；部長代理 5) 商品開発部；部長代理  
\*\* 新日鐵住金株式会社八幡技術研究部；首席主幹研究員  
Development of Heat-resistant Ferritic Stainless Steels “NSSC<sup>®</sup>429NF” and “NSSC<sup>®</sup>448EM” Utilized Dynamic Precipitation Hardening for Automotive Exhaust Systems; Jun-ichi Hamada, Atsutaka Hayashi, Norihiro Kanno, Tadashi Komori, Koji Ito, Nozomu Fukuda and Yoshiharu Inoue (\*Nippon Steel and Sumikin Stainless Steel Corporation. \*\*Nippon Steel and Sumitomo Metal Corporation)  
2016年10月31日受理[doi:10.2320/materia.56.33]

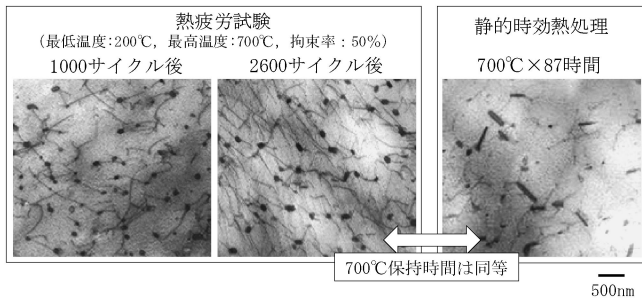


図2 熱疲労過程と時効熱処理後のCu粒子。

の強化量は大きく低減すると予想されるためである。しかしながら、自動車排気部品のように繰り返し熱・歪サイクルを受ける際の組織形成は、静的な時効熱処理の場合とは大きく異なっていた。自動車排気部品の耐久性能を高精度に評価可能なパイプを用いた熱疲労試験<sup>(5)</sup>を14%Cr-1.2%Cu添加鋼に対して実施し、時効熱処理の場合とCu粒子形態を比較した結果を図2に示す<sup>(3)</sup>。熱疲労過程のCu粒子は、時効熱処理の場合よりも球状微細分散し、Cu粒子に転位が絡んでいる様子が観察される。超高圧電子顕微鏡内での高温引張その場観察の結果<sup>(3)</sup>と併せて、高温で歪を受ける環境下におけるCu粒子は、通常想定される棒状粒子のオストワルド成長では無く、Dislocation shearingによる分断・固溶・再析出を繰り返し、微細形態を維持することが分かった。また、このようなCu粒子の析出形態は強化量が高く、静的熱処理後の約4倍の強化量が見積られ、動的析出強化の有効性を定量的に示した<sup>(3)</sup>。

(2) 熱疲労寿命に及ぼすCu添加および微量Mo添加の効果

従来、SUS429系で高温耐久性が未達な場合、約2%のMoが添加されたSUS444系が使用されてきた。しかしながら排ガス温度が徐々に高温化する中、コストアップが大きい。Cu粒子の動的析出を活用したNb-Cu複合添加ならびにMo削減を検討した。18%Cr-0.5%Nb-0.1%Ti添加鋼の熱疲労寿命に及ぼす1.2%Cu添加および微量Mo添加の効果を図3に示す<sup>(6)</sup>。ここでは、CuおよびMo無添加鋼の寿命に対する比で示している。これよりCu添加により熱疲労寿命が向上し、排ガス高温化や軽量化に向けた適用が期待出来る。更に、従来検討されていない0.3%程度の微量Moを添加することで、より大きな寿命向上が認められた。

(3) 目標と成分設計

図4に二つの開発鋼の位置づけを示す。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することを目標とした。NSSC®448EMは、SUS429系とSUS444系の間接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%以上の寿命向上を目標とした。いずれも加工性と製造性を考慮してCu添加量は1.2%とし、図3の結果からNSSC®448EMは0.5%Nb、0.3%Mo添加とした。また、Cr量は耐酸化性を考慮して、NSSC®429NFで14%、NSSC®448EMで17%とした。更

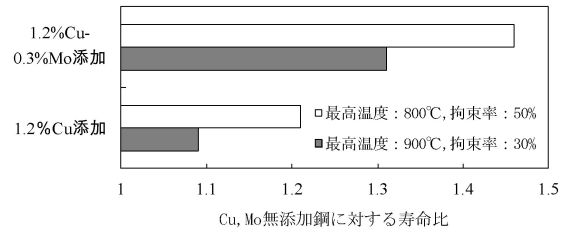


図3 熱疲労寿命に及ぼすCuおよび微量Mo添加の効果。

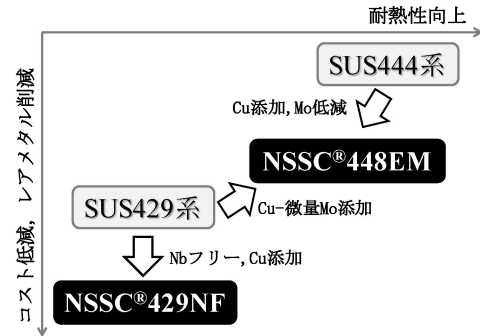


図4 既存鋼に対する開発鋼の位置づけ。

表1 開発鋼と既存鋼の成分例(mass%)。

鋼	Cr	Nb	Mo	Cu	Ti
NSSC®429NF	14.1	—	—	1.2	0.18
NSSC®448EM	17.1	0.54	0.3	1.2	0.11
SUS429系	13.3	0.43	—	—	—
SUS444系	17.2	0.47	1.8	—	0.11

に、いずれも溶接部の粒界腐食を防ぐために極低C, Nとして、安定化元素としてTiを添加した。化学成分例を表1に示す。

3. 開発鋼の特性

図5に開発鋼と既存鋼の熱疲労寿命の比較を示す<sup>(6)(7)</sup>。NSSC®429NFの熱疲労寿命は、SUS429系と同等であり、目標を満足する。NSSC®448EMの熱疲労寿命は、SUS429系とSUS444系の間接に位置づけられるとともに、いずれの温度条件でもSUS429系に対して30%以上の寿命向上を達成している。

図6に開発鋼を大気中950°Cで200時間の連続酸化試験を行った後の外観を示す<sup>(6)(7)</sup>。両鋼ともCr量等が適正化されているため、異常酸化やスケール剥離は生じない。

表2に開発鋼と既存鋼の常温材質を示す<sup>(6)(7)</sup>。開発鋼は、SUS429系よりも硬質・低延性傾向であるが、深絞り性の指標であるr値を高めて成形性を向上させている。これは、製鋼・熱延・冷延・焼鈍の薄板一貫製造工程における金属組織(析出物, 集合組織)制御を高効率かつ適正に行うことで得られている<sup>(6)</sup>。近年、ダウンサイジングに伴う部品コンパクト

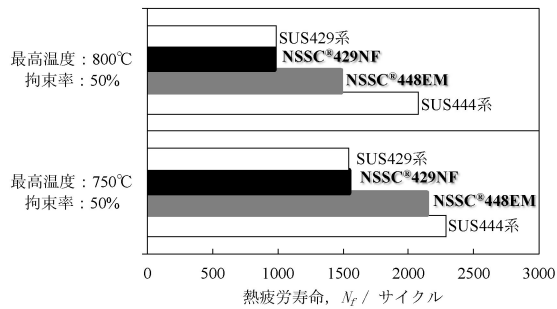


図5 開発鋼と既存鋼の熱疲労寿命の比較.

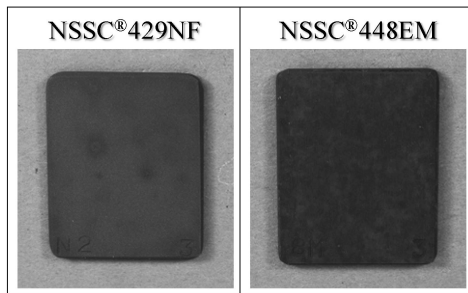


図6 開発鋼の酸化試験後の外観.

表2 開発鋼と既存鋼の機械的性質(2 mm厚).

鋼	0.2%耐力 MPa	引張強度 MPa	全伸び %	平均 r値	限界 絞り比	穴拡げ率 %
NSSC®429NF	326	447	34	1.4	2.13	158
NSSC®448EM	361	489	34	1.4	2.13	156
SUS429系	300	470	35	1.1	2.00	122
SUS444系	351	501	33	1.3	2.06	151

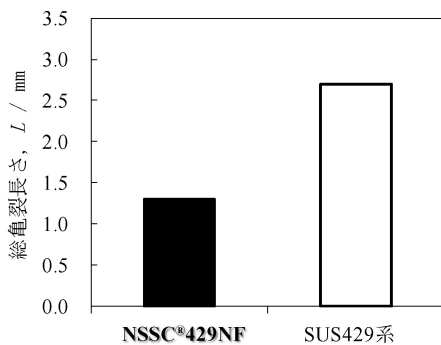


図7 NSSC®429NFとSUS429系のバレストレイン試験結果.

化の流れから素材の成形性も極めて重要になっているが、本開発鋼は深絞り性や穴拡げ性に優れており、複雑形状部品への成形の自由度が向上している。

図7に溶接部の凝固割れを模擬したバレストレイン試験結



図8 開発鋼が使用されたエキゾーストマニホールド.

果を示す<sup>(7)</sup>。NbフリーとしたNSSC®429NFはNb添加鋼に比べて凝固割れ感受性が低く、溶接性に優れている。

#### 4. 実用例・将来性

開発鋼が適用されたエキゾーストマニホールドの実用例を図8に示す。2008年から製造が実施されており、その生産量は累計約11,000 tonに至っている。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る。両鋼は、地球環境対策として加速する排ガス規制の強化、燃費や熱効率の向上並びに部品コスト削減等の種々のニーズに貢献可能なステンレス鋼として、今後も採用の拡大が期待される。

#### 5. 特許

本開発に関わる特許を国内外に15件出願しており、国内では特許第5297630号、特許第5546911号等の12件が登録されている。米国や中国をはじめ海外でも7件が登録されている。

#### 文献

- (1) 例えば、細井祐三監修：ステンレス鋼の科学と最新技術，ステンレス協会，東京，(2011)，222-228.
- (2) 神野憲博，井上宜治，濱田純一：CAMP-ISIJ，**25**(2012)，1175.
- (3) 神野憲博，濱田純一，金子賢治：CAMP-ISIJ，**29**(2016)，822.
- (4) 藤田展弘：新日鉄技報，**371**(1999)，30-34.
- (5) 宮原光雄，梶村治彦，樋口賢次：日本鉄鋼協会自主フォーラム，ステンレス鋼の高温特性と自動車排気系部材への利用技術，(2003)，10-15.
- (6) 濱田純一，神野憲博，林篤剛，平出信彦，梶村治彦，井上宜治：自動車技術会学術講演会前刷集，**46-14**(2014)，13-16.
- (7) 神野憲博，濱田純一，平出信彦，林篤剛，矢川敦久，井上宜治，寺岡慎一：自動車技術会2016年秋季大会学術講演会講演予稿集，(2016)，371-374.