

軽量触媒コンバータ用材料の開発

Development of Material for Lightweight Catalytic Converter

鈴木 治*

Osamu SUZUKI

要 旨

触媒コンバータ用の材料として高温強度とプレス成形性に優れた高強度フェライト系ステンレス鋼 HSS430CU を開発した。

HSS430CU は、Type444 に代表される既存の高強度フェライト系ステンレス鋼に通常添加される高価な Mo を含有せず、Cu 添加により同等以上の高強度化を達成した材料である。この材料の特徴は、触媒コンバータに必要な加工性と強度を両立させたことにある。その手法としては、プレス成形前の素材の状態を高強度化に必要な Cu を固溶させることで優れた加工性を確保し、車載後の部品の状態で排気ガスによる熱エネルギーを受けることにより、固溶していた Cu が ϵ -Cu として微細に析出することで高い強度を確保している。

この材料を 2014 年モデル FIT 用触媒コンバータの構成部品に適用した際には、高強度化の特性を生かし板厚を 20% 以上薄肉化することができた。またその優れた加工性によって、これまで 2 ピースで成形していた部位を、一体成形することが可能となり、軽量化と同時にコストも低減することができた。

ABSTRACT

High-strength ferritic stainless steel HSS430CU has been developed as a material for use in catalytic converters. This material has superior strength at elevated temperatures and excellent press-forming properties.

HSS430CU does not contain the expensive element Mo that is normally added to the conventional high-strength ferritic stainless steel that is represented in Type444. Instead, Cu is added, which achieves equal or better high-strength properties. This material combines both the workability and strength properties required for catalytic converters. These properties are achieved as follows: superior workability is ensured by incorporating Cu, which is required for high strength, into solid solution when the materials are still raw materials, prior to press-forming; and high strength is ensured once the part is mounted in the vehicle, when heat energy is received as a result of exhaust gas, causing the Cu that was incorporated into solid solution to precipitate as fine ϵ -Cu crystals.

When this material was used in the catalytic converter for the 2014 model year FIT, the high-strength-providing properties of the material were utilized to reduce the plate thickness by 20% or greater. In addition, that superior workability enabled parts that had previously been formed as two pieces to be integrated into one piece, and it reduced weight while simultaneously cutting costs as well.

1. まえがき

昨今の環境意識の高まりから CO₂ 削減に対する取り組みが各界でおこなわれている。自動車分野においても、パワートレインの高効率化、電動化、車体の軽量化などによる燃費向上の検討が進められている。排気系部品においても軽量化に対するニーズは高く、鋳鉄の製品をステンレス鋼板を用いたプレス部材に置き換えるなどの施策がおこなわれてきた。現在、触媒コンバータに用いられるステンレス鋼板は、Type409L (11Cr-0.2Ti) や Type429M (14Cr-1Si-0.4Nb) などのフェライト系ステンレス鋼が中

心である。また薄肉化によってさらに軽量化を促進させようとした場合、その耐久信頼性を高める必要があるため、Type444 (18Cr-2Mo-0.4Nb) に代表される高強度フェライト系ステンレス鋼を用いる必要があった。しかしながら Type444 にはレアメタルの一種で高価な元素である Mo が含有されており、必然的に部品コストの上昇を招いていた。

本稿では、Mo を含有せず高強度と高加工性を両立させたフェライト系ステンレス鋼 HSS430CU の開発と、その材料を適用することで軽量化とコスト低減を達成した 2014 年モデル FIT 用触媒コンバータについて紹介する。

*四輪 R&D センター

2. 開発のねらい

2.1. 触媒コンバータ軽量化

2008 年モデル FIT 用触媒コンバータの概略構造を Fig. 1 に、その構成材料の重量比率を Fig. 2 に示す。触媒コンバータでは一部の構成部品（キャタリスト、触媒保持マット、フランジ、ナット類）を除き、ステンレス鋼が使われており、その重量比率は約 70% を占めている。このことから触媒コンバータの軽量化をおこなうには、ステンレス部位の軽量化が重要である。ステンレス部位を軽量化するためにはステンレス鋼素材そのものを高強度化により薄肉化することと、溶接で重ね合わせ継手構造になっていた部位を一体成形することで継手構造を削減することが必要である。またそのためにはステンレス鋼の高強度化に加え、難成形部品を一体成形するための加工性の向上が必要である。そこで本開発では Fig. 1 に示す Part A に着目し、一体成形を検討した。

2.2. 高強度ステンレス鋼開発

排気系部品に適用されるステンレス鋼にはフェライト系とオーステナイト系が存在する。オーステナイト系は、フェライト系に対し熱膨張係数が約 1.5 倍大きいため、運転中

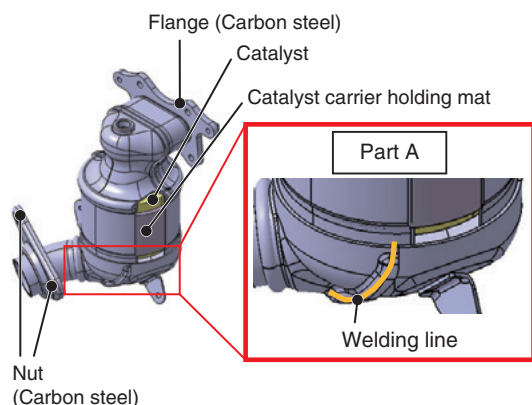


Fig. 1 2008 model year FIT catalytic converter

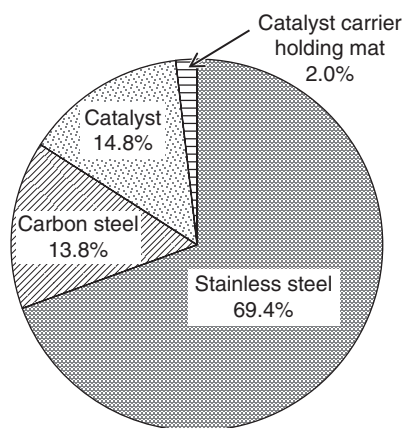


Fig. 2 Weight percentages of materials of 2008 model year FIT catalytic converter

に高温から低温までの冷熱サイクルを受ける触媒コンバータ用の材料として用いた場合には、高い熱応力が繰り返し加わるため耐久性が厳しくなり、また Ni を含有するため高価な成分系である。そのため現行量産材である Type429M 同様、フェライト系で高強度材の開発をおこなった。

まず触媒コンバータ用材料として求められる以下の 4 項目の特性に対し開発目標を定めた。薄肉化することで発生応力が増加するため、既存の高強度フェライト系ステンレス鋼 Type444 同等以上の高温強度を目標とし、耐酸化性と耐食性に対しては使用環境が変わらないため従来材の Type429M 同等以上を目標とした。また軽量化とコスト低減のため、部品点数の削減を可能とするプレス成形性を加工性の目標とした。

- | | |
|----------|--------------------|
| (1) 高温強度 | Type444 同等以上 |
| (2) 耐酸化性 | Type429M 同等以上 |
| (3) 耐食性 | Type429M 同等以上 |
| (4) 加工性 | 部品点数削減を可能とするプレス成形性 |

3. 合金設計の考え方

1 章で述べた通り、Type444 に代表される高強度フェライト系ステンレス鋼には高価な Mo が添加される。Mo は金属中に固溶し、固溶強化元素として高温強度の確保に効果があるだけでなく、耐酸化性や耐食性にも有効であることがわかっている^{(1),(2)}。しかし今回の開発ではコスト低減のために Mo を添加せずに高温強度を上昇させる手法として、以下に述べる理由から Cu に着目した。

- (1) コストが比較的安定していること
- (2) Cu が固溶した素材状態では、加工性が良好であること
- (3) 固溶していた Cu は、車載後に排気ガスの熱エネルギーにより微細な ϵ -Cu として析出することで高温強度が高まること

開発目標である加工性を高めるには、伸びと r 値の二つの特性値を高める必要がある。

伸びに関して、Fig. 3 にフェライト系ステンレス鋼（板厚

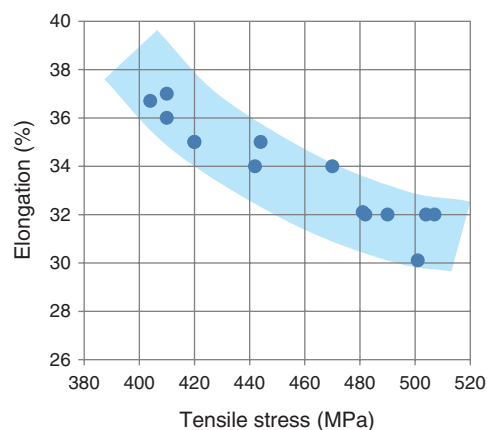


Fig. 3 Relationship between elongation and tensile stress

1.5 mm)の伸びと引張強さの関係を示す。引張強さが高い材料は伸びが低く、逆に伸びの高い材料は引張強さが低いことから、強度と伸びの両立は困難であることがわかる。

一方、Cuを含有するフェライト系ステンレス鋼は、Cuが固溶した状態では比較的良好な伸びを示すが、500℃から700℃程度の高温域にさらすと微細な析出物(ϵ -Cu)が形成され、伸びは低下するものの強度は上昇する⁽³⁾。このため高い伸びが必要なプレス成形時ではCuを固溶状態とすることで良好な伸びを確保し、高い強度が必要な車載後には排気ガスの熱エネルギーによる ϵ -Cu析出効果により強度を上昇させることが可能と考えた。

伸び同様、加工性の評価指標である r 値は、材料を引張変形させた際に、厚さ方向、幅方向のどちらに縮みやすいかを示す特性値であり式(1)で表される。

$$r = \ln(W_1/W_0)/\ln(t_1/t_0) \quad (1)$$

r : r 値

W_0, W_1 : 引張変形前後の試験片の幅

t_0, t_1 : 引張変形前後の試験片の厚さ

Fig. 4 に深絞り性に及ぼす r 値の影響を示す。 r 値が大きい材料ほど、より深い絞り形状までの成形が可能となるため^{(4),(5)}、絞り形状を有する触媒コンバータでは r 値が特に重要である。Fig. 5 に Type429M の r 値に及ぼす板厚

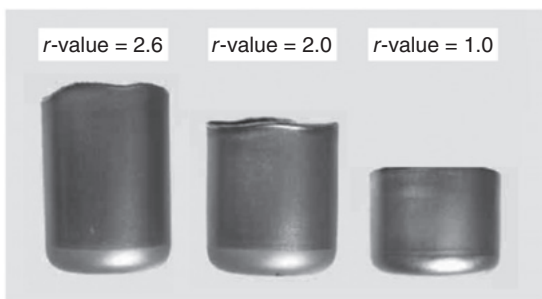


Fig. 4 Effect of r -value on deep-drawability

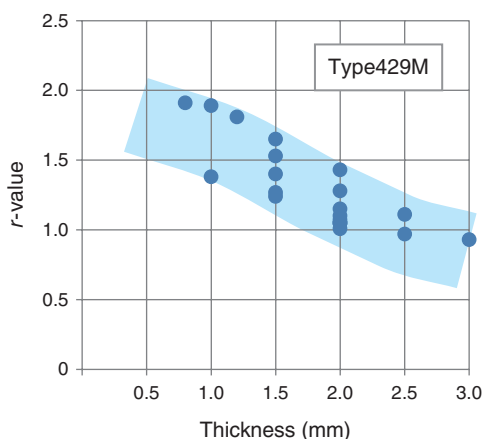


Fig. 5 Effect of plate thickness on r -value

Table 1 Chemical composition (mass%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Nb	N
Developed steel	0.007	0.8	0.2	17	-	1.3	0.5	0.007
Type429M	0.008	1.0	0.3	14	-	-	0.4	0.009
Type444	0.009	0.3	0.2	18	2	-	0.4	0.010

の影響を示す。図が示す通り、板厚が薄くなる程 r 値が向上することから、高強度材を適用することで板厚を薄くすることができれば、その結果 r 値を向上させることができると考えた。さらに r 値向上を阻害するC, Nを低減する手法⁽⁶⁾も用い、 r 値のさらなる向上をねらった。

またCu添加は耐酸化性を阻害することが知られている。耐酸化性の向上にはステンレス表層に存在する酸化被膜の強化が欠かせないため、本開発では耐酸化性に有効なCrを増量することで耐酸化性の確保をねらった。

耐食性に関しては、式(2)で示される Pitting resistance equivalent(PRE)で予想できることがわかっており⁽⁷⁾、耐酸化性の対策であるCr増量により耐食性の確保も可能でないと考えた。

$$PRE = Cr + 3.3Mo \text{ (wt\%)} \quad (2)$$

上記検討により設定した成分の代表値をTable 1に示す。開発材の成分的な特徴は以下の通りである。

- (1) 既存材 Type429M に対して、高強度化するためにCuの添加、耐酸化性と耐食性の確保のためにCrを増量した。
- (2) 高強度フェライト系ステンレス鋼に通常添加される高価なMoを含まない。
- (3) 加工性の向上のため、C, Nを極力低減した。

4. 材料特性

4.1. 高温強度

高温強度はステンレス鋼を薄肉化する上で重要な特性である。排気系部品には高温環境下でエンジンなどから伝わる振動の他、エンジンの冷熱サイクルによる熱応力が発生するため、材料には高温での高サイクル疲労強度と熱疲労強度の両方の特性が必要とされる。

Fig. 6 は、600℃で熱処理したときの硬さの変化を示す。Cuを含有しないType429Mでは硬さに変化がなく一定値を示すのに対し、開発材では熱処理中に ϵ -Cuが析出することにより、硬さが上昇していることを確認した。

Fig. 7 に高温引張試験結果を示す。開発材は ϵ -Cuの析出により、すべての温度域でType429Mに比べ引張強さが高く、また高強度フェライト系ステンレスであるType444に対しても同等以上の強度を保持することを確認した。

Fig. 8 に800℃における両振り高温高サイクル(10^7 回)疲労試験結果を示す。開発材の疲労限度は、Type429Mに

対し 20% 以上向上しており, Type444 に対しても同等以上の強度を保持することを確認した。

Fig. 9 に 700℃ から 100℃ の間で冷熱サイクルを加えた条件でテストした熱疲労試験結果を示す。開発材の熱疲労寿命は, Type429M に対し 40% 以上長寿命化しており, Type444 同等以上の寿命を保持することを確認した。

4.2. 耐酸化性

ステンレス鋼は限界温度を超えると急激に酸化するた

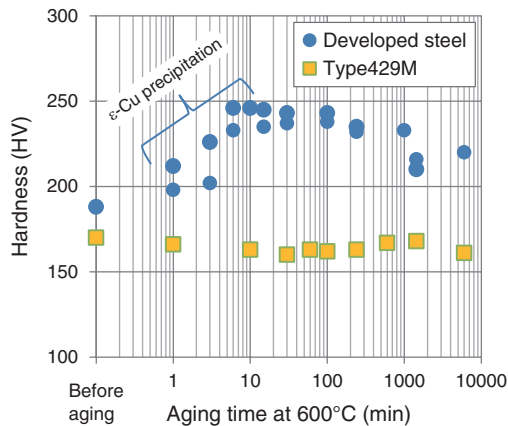


Fig. 6 Change in hardness at 600°C

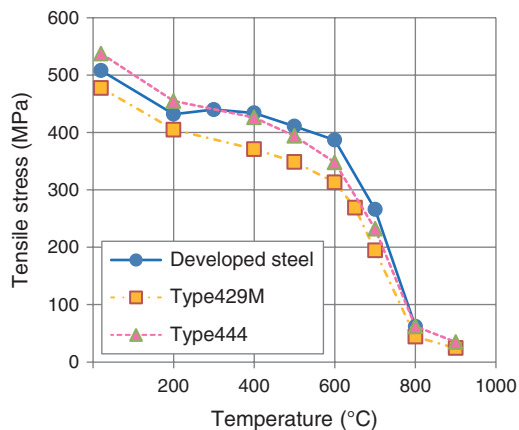


Fig. 7 Result of high-temperature tensile test

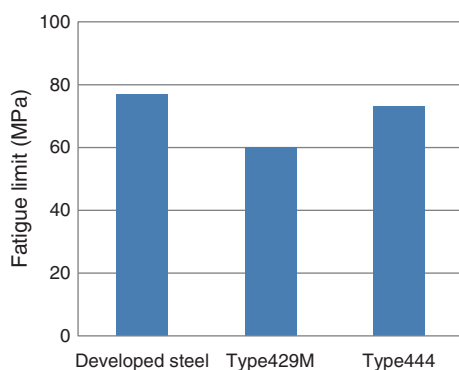


Fig. 8 Fatigue limit at 800°C

Table 2 Pitting resistance equivalent (*PRE*)

	Cr	Mo	<i>PRE</i>
Developed steel	17	0	17
Type429M	14	0	14
Type409L	11	0	11
Type444	18	2	25

$$PRE = Cr + 3.3Mo \text{ (mass\%)}$$

め⁽⁸⁾, その温度を酸化限界温度と称してその材料の使用限界を決めている。Fig. 10 に各種材料の大気雰囲気中における酸化限界温度を示す。開発材の酸化限界温度は 950℃ のため Type429M 同等以上であり, 触媒コンバータ用材料として十分な耐酸化性を示すことを確認した。

4.3. 耐食性

3 章で述べた通りステンレス鋼の耐食性は, *PRE* と相関性があり, *PRE* が高いほど, 耐食性が向上することが知られている。Table 2 に各種排気系用材料の *PRE* を示すが, 開発材の *PRE* は Type429M に対し高く, 優れた耐食性が予測される。耐食性の評価は, JIS G 0577 に規定される孔食電位法でおこない, Fig. 11 に各種材料の孔食電位測定結果を示す。孔食電位が高い程, 耐食性が優れるが, 開発材の孔食電位は Type429M 同等以上であり, 触媒コンバータ用材料として十分な耐食性を示すことを確認した。

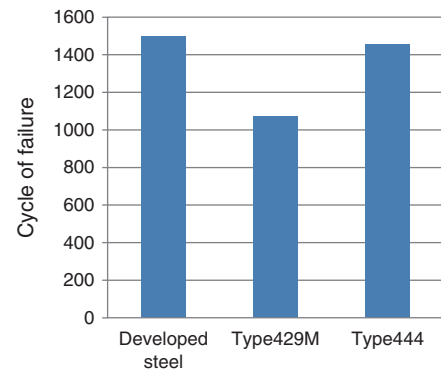


Fig. 9 Result of thermal fatigue test

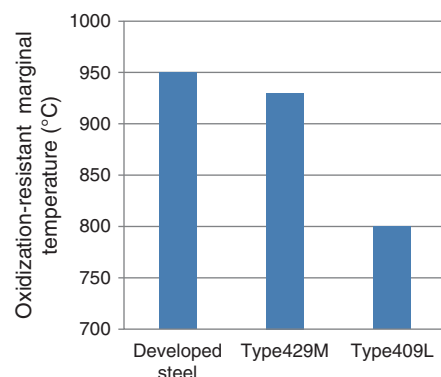


Fig. 10 Oxidization-resistant marginal temperature

Table 3 Test result of r -value

	Thickness (mm)	r -value			
		r_0	r_{45}	r_{90}	r_m
Developed steel	2.0	1.38	1.23	1.98	1.46
	1.5	1.74	1.26	2.36	1.65
Type429M	2.0	1.15	0.88	1.49	1.10
	1.5	1.30	0.96	1.85	1.27
Type444	2.0	1.01	0.96	1.29	1.06
	1.5	1.30	0.87	1.69	1.18

$$r_m = (r_0 + r_{90} + 2r_{45})/4$$

4.4. 加工性

Table 3 に r 値測定結果を示す。 r_0 , r_{45} , r_{90} は、それぞれ圧延方向に対する角度が、 0° , 45° , 90° 方向の試験結果を、 r_m は平均の r 値であり、式 (3) で示される。

$$r_m = (r_0 + r_{90} + 2r_{45})/4 \quad (3)$$

C, N を低減したことにより、同じ板厚で比較した場合、開発材の r 値は Type429M に対し高く、加えて高強度化したことで板厚を 2.0 mm から 1.5 mm に薄くすることができたため、さらに高い r 値が得られた。このような高い r 値を利用し、コンバータの一部品 (Fig. 12 の Part A) の一体成形を検討した。 Fig. 13 に Part A のプレス成形試験結果を示す。 Type429M ではプレス途中で破断してしまうが、開発材ではプレス成形が可能であることを確認した。このように、この部品は Type429M では一体成形

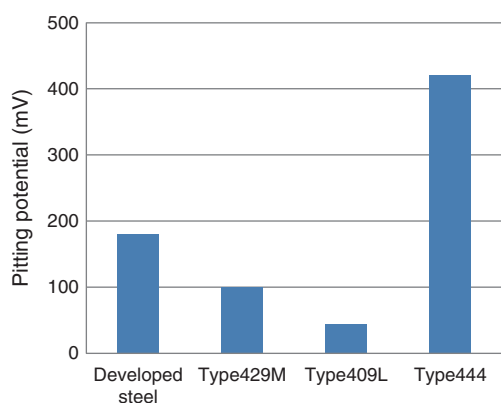


Fig. 11 Result of pitting potential measurement

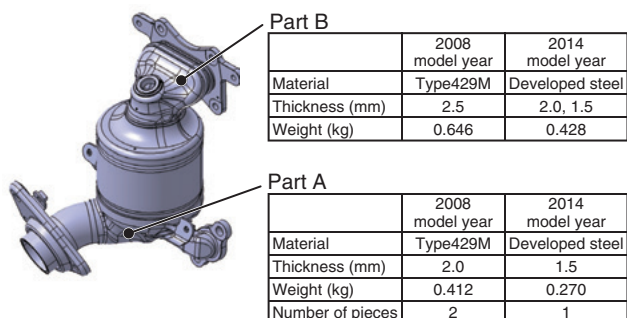


Fig. 12 2014 model year FIT catalytic converter

ができないため、従来は 2 ピースのプレス部品を溶接して製造していた。しかし開発材では一体成形することができたため、1 ピースのプレス部品に置き換えることができた。

また材料に複雑なプレス成形をおこなった場合、材料は局部的に延ばされるため板厚は減少する。しかしながら、減少率が高いと板厚 (t) が局部的に薄くなり、耐久信頼性などの観点から望ましくなく、可能な限り板厚減少率は抑制した方が望ましい。 Fig. 14 に Part B をプレス成形後の板厚減少率の測定結果を示す。板厚減少率は式 (4) で求められる値である。

$$D = (t_{p0} - t_{p1})/t_{p0} \times 100 (\%) \quad (4)$$

D : 板厚減少率

t_{p0} , t_{p1} : プレス成形前後の板厚

Part B は、開発材、Type429M とともに成形可能であったが、板厚減少率が一番少なかったのは開発材 (板厚 2.0 mm) であった。二番目は Type429M (板厚 2.0 mm) で Type429M (板厚 2.5 mm) は最も大きかった。プレス後の板厚減少率は材料の r 値と相関するが、開発材の高い r 値が、プレス時の板厚減少率の抑制につながることが確認できた。

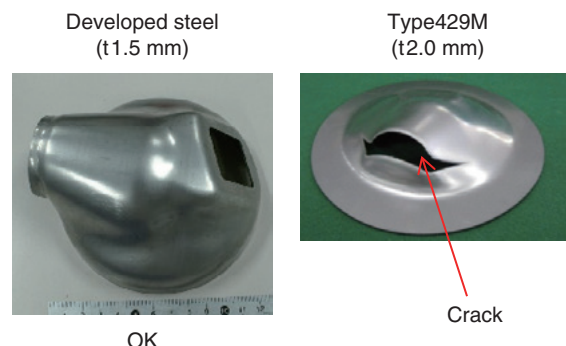


Fig. 13 Press-forming result of part A

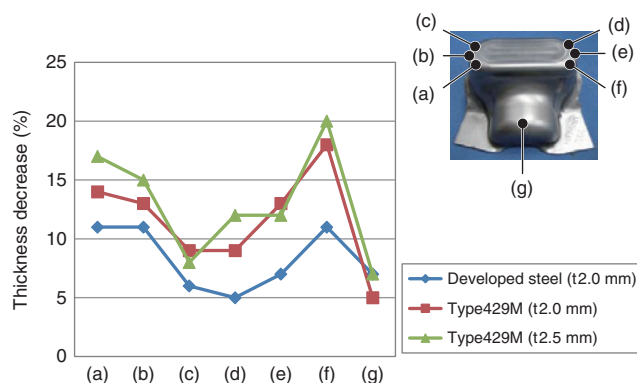


Fig. 14 Thickness decrease after part B press-forming

5. 軽量化効果

開発材をFig. 12に示す2014年モデルFIT触媒コンバータの二つの部位 (Part AおよびPart B)に適用することで、板厚を20%以上薄肉化した。Part Aに関しては部品の一体成形も併せておこなった。その結果、適用部位の重量としてトータル0.36 kgの軽量化を達成した。

また、Moを含まない高強度フェライト系ステンレス鋼の開発、薄肉化による材料使用量の低減、2ピース部品を一体成形することによるプレス金型費の低減と溶接部位の削減により、軽量化と同時にコストを低減することができた。

6. まとめ

高温強度と成形性に優れたHSS430CU材を開発することで、2014年モデルFIT用触媒コンバータの軽量化とコストの低減をおこなった。

- (1) 高強度フェライト系ステンレス鋼HSS430CUは、成形時にはCuを固溶させることで加工性を良好に保ちつつ、車載後に排ガスという熱エネルギーを利用することで微細な ϵ -Cuを析出させ、高温強度を高めることで、加工性と両立させた。
- (2) 高強度化による薄肉化と r 値向上による部品の一体成形化により触媒コンバータを軽量化した。
- (3) Mo無添加および部品の一体成形による溶接部位削減等により、コストを低減した。

参考文献

- (1) 井上宜治, 菊池正夫:自動車排気系用ステンレス鋼の現状と今後の展望, 新日鉄技報, No.378, p.55-61(2003)
- (2) 宮崎淳, 平澤淳一郎, 古君修:排気部品用ステンレス鋼—耐熱性と加工性に優れる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「JFE-MH1」—, JFE技報, No.4, p.53-57(2004)
- (3) 富田壮郎, 奥学:Cu含有フェライト系ステンレス鋼NSSEM-Cの開発, 日新製鋼技報, No.90, p.30-39(2009)
- (4) 矢沢好弘, 加藤康, 宇城工:深絞り性に優れたフェライト系ステンレス鋼板:JFE技報, No.20, p.72-78(2008)
- (5) 石丸詠一郎, 高橋明彦, 小野直人:高純度フェライト系ステンレス鋼の成形性に及ぼす材料特性と加工と条件の影響, 新日鉄技報, No.389, p.26-32(2009)
- (6) 矢沢好弘, 加藤康, 小林真:Ti添加高機能フェライト系ステンレス鋼「R430XT, RSX-1」の開発, 川崎製鉄技報, Vol.30, No.2, p.93-98(1998)
- (7) 宮坂松甫:「腐食防食講座—海水ポンプの腐食と対策

技術—」第5報:ステンレス鋼及びニレジスト鋳鉄の腐食と対策技術, エバラ時報, No.224, p.28-37(2009-7)

- (8) 内田一也, 湊司:高耐熱エキマニの耐高温酸化技術開発, CALSONIC KANSEI TECHNICAL REVIEW, Vol.8, p.62-66(2011)

■ 著 者 ■



鈴木 治