

自動車軽量化と排出ガス浄化に貢献する 加工性に優れた 高耐熱フェライト系ステンレス鋼および鋼管*

Ferritic Stainless Steel and Pipes for Automotive Exhaust System to Meet Weight Reduction and Stricter Emission Requirements



宮崎 淳
Atsushi Miyazaki
技術研究所
ステンレス鋼研究部門
主任研究員(課長)



郡司 牧男
Makio Gunji
知多製造所 溶接管・
鋳造部溶接管技術室
主査(課長補)



馬場 幸裕
Yukihiro Baba
千葉製鉄所 商品技術
部ステンレス管理室
主査(課長補)

要旨

自動車の排気系部品、特に高温環境(エキゾーストマニフォールド、フロントパイプ、触媒外筒材など)の用途に適した高加工性耐熱ステンレス鋼を、川崎製鉄千葉製鉄所に導入された最新鋭設備を駆使して開発した。開発鋼の耐熱性は、従来鋼と同じレベルを確保し、平均 r 値は30%以上向上した。その結果、本用途にとって重要な特性、すなわち(1)限界絞り比、(2)穴広げ性、(3)パイプの拡張率、(4)パイプ曲げ加工時の減肉率に関して、いずれも著しく向上した。特に、本パイプ曲げ加工性は、従来鋼の焼鈍パイプの特性に近い水準にまで向上した。

Synopsis:

High formability heat-resistance ferritic stainless steel and pipes for automotive exhaust system parts were developed to reduce auto weight and meet stricter emission requirements by making full use of the advanced production facilities recently constructed at Chiba Works. The average r -value of the newly developed stainless steel was improved by more than 1.3 times in comparison with the conventional steel while retaining the same level of heat resistance. This increase in the r -value resulted in a remarkable improvement in various forming properties which are important for automotive exhaust system parts, including (1) limit drawing ratio, (2) stretch flanging ratio, (3) limit expansion ratio of pipe, and (4) thickness reduction ratio of pipe after bending. In particular, the formability of the newly developed stainless steel pipes was nearly equal to that of conventional stainless steel pipes after stress relief annealing.

1 緒 言

近年、地球環境問題が注目され、その中で自動車の排出ガス浄化率の向上が各国において強く求められている。米国ではLEV規制、LEV-II規制、欧州ではEU2000規制、EU2005規制などの法規が施行あるいは提案され、今後数年間で排出ガス規制は大幅に強化される趨勢である。このような規制の強化に対応するには、エンジン始動直後(コールドスタート)の排出ガス浄化特性向上が極めて重要な課題となる。これは、エンジン始動直後には触媒コンバーターの温度が低く、排出ガス中の NO_x 、HC、COの浄化反応が生じにくいからである。対策として、(1)排出ガス温度の上昇、あるいは(2)エキゾーストマニフォールド(以下、エキマニ)の熱容量を低下させるための薄肉化が有効な方法である。このような薄肉化は、また軽量化にも寄与する。この方法を用いるための素材には優れた耐熱性が要求されるので、鋳物に代わってステンレス鋼の適用が拡大

しつつある。エキマニは多くの場合、限られた空間で収まるように複雑な形状に設計される。そのため、十分な加工性がないと、所定の形状に加工できなかったり、加工後の板厚減肉が大きくなる場合がある。このような観点から、最近では、耐熱性と加工性のバランスが比較的良好な15%Cr系のフェライト系ステンレス鋼(Type429Nb; 当社規格R429EX[®])が主に採用されている。しかし、加工性向上の要求はさらに厳しくなり、加工性と耐熱性を両立するステンレス鋼の開発が素材メーカーに課せられている。

このような要求に応えるため、川崎製鉄は、従来のエキマニ用耐熱ステンレス鋼(当社規格R429EX)に関して、その優れた耐熱性を示す組成を維持したまま、最新鋭のプロセス技術によって、 r 値を30%以上向上させることに成功した。

本論文では、エキマニ成形に関する主要な特性である板の深絞り性、穴広げ性、パイプの拡張性および曲げ性について、開発鋼(高加工性R429EX)と従来鋼の特性を比較した結果を述べる。

*平成13年3月8日原稿受付

Table 1 Chemical compositions of steel used

(mass%)						
C	Si	Mn	Cr	Ni	N	Nb
0.008	0.86	0.37	14.6	0.35	0.006	0.44

2 加工性向上の指針

エキマニなどの排気系高温部材の加工は、複雑な一体成形化が指向されるため、高い r 値が求められる趨勢にある。普通鋼の高 r 値化には主に4つの方法(1)冷間圧延率増加(2)最終焼鈍鋼板組織の粗大化(3)固溶Cの低減(4)熱間圧延鋼板組織の微細化などが有効⁹⁾であることが古くから知られている。

一方、フェライト系ステンレス鋼の平均 r 値は、70%程度の冷間圧延率を超えてから著しく向上する⁹⁾こともよく知られている。板厚が1mm以下のような薄い板厚の範囲では、冷間圧延率の増大により r 値は容易に向上する。しかし、エキマニ材の厚みの主流である1.5~2.5mm厚の場合、冷間圧延率が十分に確保できないため、 r 値向上は困難と考えられていた。また、高 r 値化の手法として、方法(2)の冷間圧延後の組織粗大化も考えられるが、粒径の増大は、加工後の肌荒れにつながり、エキマニ用としては限界がある。上に述べた理由から、固溶Cの低減あるいは熱間圧延鋼板組織の微細化によるフェライト系ステンレス鋼の高 r 値化について研究を行った。その際、供試材は従来のステンレスエキマニ材の主流鋼であるType429Nb(当社規格R429EX)とした。その成分をTable 1に示す。

3 供試材および実験方法

3.1 供試材

最新鋭の熱間圧延設備を用いて、2章で述べた方法(3)、(4)の効果を最大限に活用した高 r 値化熱間圧延制御プロセスを経た熱間圧延板の組織(開発鋼)は、従来プロセス材の組織よりも微細に再結晶している。その析出Nb量の分析結果および固溶C量の指標である時効指数(A.I.)をFig. 1に示す。ここで、析出Nb量の分析は、アセチルアセトン系電解液によって、定電位電解抽出した後、定量化学分析により求めた。また、A.I.は、圧延方向に採取したJIS 5号試験片を用い、7.5%の引張り歪みを付加し、いったん応力を除去後、300°C-30min処理後の変形応力の上昇量から評価した。Fig. 1から、高 r 値化熱間圧延制御プロセス材はNbがより多く析出しており、またA.I.の値も低く、熱間圧延鋼板中のCは、Nbによってより多く固定され、固溶Cは減少していると考えられる。

このような高 r 値化熱間圧延制御プロセスと従来プロセスを経た2種の熱間圧延鋼板を用いて、その後を同じ条件によって製造した厚さ2mmと1.5mmの冷延焼鈍板の特性を測定し、得られた各種特性を比較した。

3.2 実験方法

3.2.1 冷延焼鈍鋼板の成形性

室温のYS, TS, El, n 値および r 値は、JIS G0567に準拠し、JIS13号B試験片により測定した。 n 値は、5-15%歪みより、また、 r 値は15%歪みを付与した後に求めた。これらの平均値は、次式により求めた。

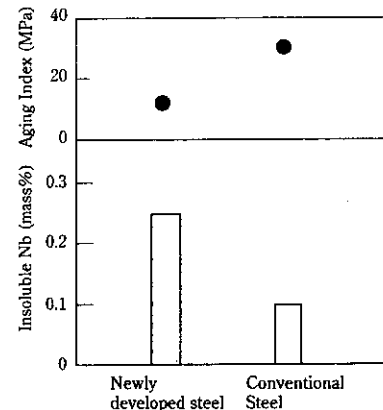


Fig. 1 Comparison of insoluble Nb and aging index (A.I.) of hot bands between newly developed and conventional stainless steels

$$\text{平均 } X = (X_L + 2X_D + X_C) / 4$$

ここで X_L , X_D , X_C は、圧延方向に対して、0°, 45°, 90°方向の X の特性を表わす。

深絞り成形性は、直径33mmのポンチを使用し、厚さ2mmで直径66~76mmの試験片を用いて、限界絞り比(試験片直径/33)で評価した。なお、ダイス肩部半径は3.5mm、しわ押え力は9.8kNとし、また鋼板のダイス側にビニールを付着させた。穴広げ成形性は、厚さ2mmの試験片中心部に直径10mmの穴を打ち抜き、かえり生成の反対面から頂角60°の円錐ポンチにより穴広げを行い、穴縁に亀裂が発生した時点での穴径を測定し、(この値-初期穴径)と初期穴径の比率(%)を穴広げ率(λ)とし、測定回数 $n=3$ の平均値を代表値とした。なお、かえりは研磨で削除した。

3.2.2 電縫管の成形性

3.1節で示した厚さ1.5mmの2種類の材料を用いて、直径42.7mmの電縫管を製造した。また、従来プロセスで製造した厚さ1.5mm冷間圧延焼鈍鋼板から製造した電縫管については、900°C程度での歪みとり焼鈍行なったものも比較として試験に供した。

拡張性は、限界拡張率で評価した。拡張は、エッジ部を手入れした電縫管に6板式セグメントを挿入し、約 $\Delta 0.1D/s$ の速度で1.25D, 1.35D, 1.45Dおよび1.5Dの条件で順次拡張率を上げ、10本の試験を行った。1本でも割れた時点の拡張率を限界拡張率とした。

電縫管の曲げ加工性は、曲げ半径を50mmとして、90°曲げを行った後の板厚を超音波で測定し、肉厚減少率で評価した。

4 実験結果と考察

4.1 冷間圧延焼鈍鋼板の機械的性質

Photo 1に組織を示した熱間圧延鋼板から作製した1.5mm, 2mm厚の冷間圧延焼鈍鋼板の機械的性質をTable 2に示す。

高 r 値化熱間圧延制御プロセスを経た冷間圧延焼鈍鋼板(以下、開発鋼)は、従来プロセスを経た場合(以下、従来鋼)に比較して、YS, TS, Elは同様であるものの、平均 r 値が30%以上高い。これらの冷間圧延焼鈍鋼板を使用した場合の、各種成形性の比較と考察を行う。

4.2 深絞り性

Fig. 2に深絞り成形試験結果を、またPhoto 1には成形後の外

Table 2 Mechanical properties of R429EX stainless steels produced by newly developed and conventional processes

Thickness: 2 mm				
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	$\bar{r}$ -value
Developed steel	330	488	34	1.5
Conventional steel	343	479	34	1.1

Thickness: 1.5 mm				
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	$\bar{r}$ -value
Developed steel	325	496	33	1.6
Conventional steel	340	490	33	1.2

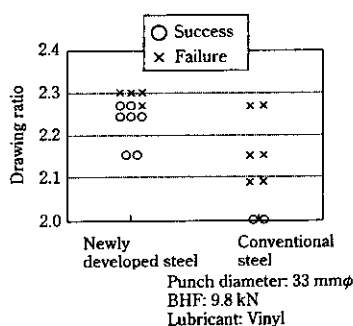


Fig. 2 Comparison of deep drawing property between newly developed and conventional steels

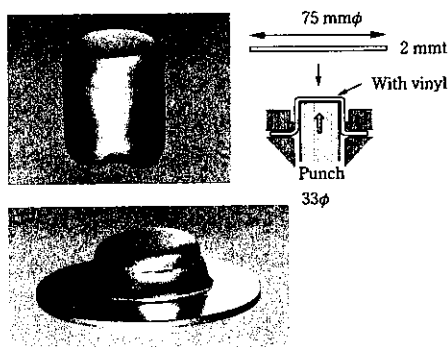


Photo 1 Comparison of appearance after deep drawing test between (a) newly developed stainless steel (deep drawing ratio = 2.27) and (b) conventional stainless steel (deep drawing ratio = 2.27)

鋼の一例を示す。従来鋼の限界絞り比 2 に対して開発鋼のそれは、約 2.3 に大きく向上している。今回行った円筒成形は、縮みフランジ変形をとまなう典型的な深絞り成形であり、その破断は、フランジ部の絞り込み力が破断部の破断耐力を上回ることによって起る。深絞り成形性は深絞り成形力と材料の破断荷重（絞り途中で破断する際の荷重）の大小関係に依存する。 r 値が高くなるほど縮みフランジ変形では円周方向に縮みやすく、フランジ部での材料の流入が容易で深絞り成形力が小さく、また、破断荷重が高くなるため、絞り加工に有利であることは、よく知られている⁶⁾。開発鋼と従来鋼の r 値以外の機械的性質は、ほとんど相違がないため、開発鋼の限界絞り比が良好であるのは、 r 値向上の効果と考えられる。

4.3 穴広げ性

Fig. 3 に穴広げ試験結果を、また Photo 2 には成形後の外観の

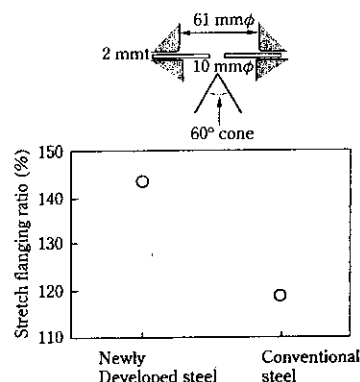


Fig. 3 Comparison of stretch flanging ratio between newly developed and conventional stainless steels

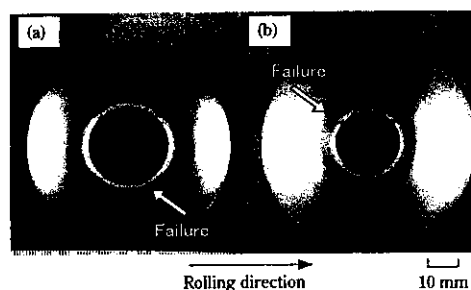


Photo 2 Appearance of test pieces after stretch flanging test, (a) newly developed stainless steel, (b) conventional stainless steel

Table 3 Comparison between results of stretch flanging test and the parameter of Itoh's theory⁷⁾

	Experimental results			Parameter of Itoh's theory $n(1+r_{min})$
	λ (%)	r_{min}	n -value	
Developed steel	144	1.12	0.19	0.40
Conventional steel	119	0.77	0.18	0.32

一例を示す。開発鋼の λ は、144% を示し、従来鋼の 119% から大きく改善されている。Photo 3 中の矢印で示したように、すべてのサンプルで亀裂発生位置は、 r_{min} の方向 (D 方向) であった。

穴広げ率には多くの因子が影響するものの、開発鋼と従来鋼の YS, TS, 伸び, n 値, これら異方性, 最終粒径, 清浄度およびシャルピー遷移温度はいずれも同程度であるため、主な相違は r 値のみである。伊藤ら⁷⁾ は、有限要素法によって、 λ におよぼす n 値と r 値の影響を検討し、 λ は $n(1+r_{min})$ に依存するとしている。ここで、 n は一様伸びを表わし、 $n r_{min}$ は局部伸びの最小値を表わしている。開発鋼と従来鋼の $n(1+r_{min})$ を比較した結果を Table 3 に示す。 n 値の相違がほとんどないため、 r_{min} が本パラメーターに影響している。今回行った試験片の亀裂発生は、すべて r_{min} 方向から発生したこと (Photo 2) および Table 3 の結果を考慮すると、開発鋼の穴広げ性向上は、局部伸び向上を反映した r_{min} の向上に起因していると考えられる。

4.4 電縫管の機械的性質

Table 4 に直径 42.7 mm, 厚さ 1.5 mm の電縫管の機械的性質および冷間圧延焼鈍鋼板の r 値を示す。これら 3 種の電縫管では、開

Table 4 Mechanical properties of ERW pipes according to JIS 11

	Plate	Pipe			
	1.5 mm	1.5 mm $\times$ 42.7 mm ϕ			
	$\bar{r}$ -value (JIS 13 B)		YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)
Newly developed steel	1.6	As rolled	465	511	49
Conventional steel	1.2	As rolled	438	488	50
	1.2	After stress relief annealing	299	501	51

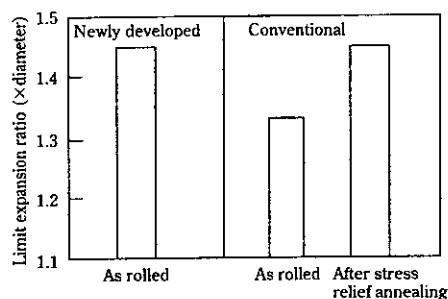
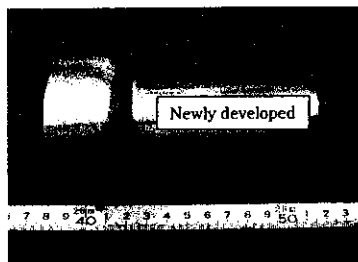


Fig. 4 Comparison of limit expansion ratio between newly developed and conventional stainless steel ERW pipes

Photo 3 Appearance of ERW pipe (1.5 mm $\times$ 42.7 mm ϕ) after expansion test (Expansion ratio = 1.45D, D: Diameter)

開発鋼のYSがやや高いが、TS、全伸びに大きな差異は見られない。

4.5 電縫管の拡張率

Fig. 4に、拡張試験の結果を示す。従来鋼の限界拡張率は、1.35Dであり、その焼鈍管材では1.45Dである。一方、開発鋼の限界拡張率は、焼鈍していないにも関わらず、1.45Dを示し、従来鋼の焼鈍材と同等にまで改善されている。Photo 3に開発鋼の1.45D拡張後の外観を示す。開発鋼の $\bar{r}$ 値は、従来鋼より高いため、(1)板厚が減少しにくい(2)局所伸びが向上するなどの特徴がある。これらの効果により限界拡張率が向上したものと考えられる。

4.6 電縫管の曲げ加工後の板厚減少率

Photo 4に曲げ加工した一例を示す。写真中の矢印部分は、板厚が最も減少した位置である。その部分を中心にとった電縫管の長手方向の板厚減少率をFig. 5に示す。開発鋼の板厚減少率は、従来鋼のそれより小さく、従来鋼の焼鈍材の値に近い水準にまで向上している。

4.7 開発鋼の耐熱性と加工性の位置付け

開発鋼の冷間圧延焼鈍鋼板の組織、成分、Nbなどの析出量は、従来鋼のそれとほとんど同じであり、高温強度、高温疲労、耐酸化性、高温塩害などの耐熱性は、同じレベルであることを確認した。これらの試験条件および特性は、既報⁹⁾に記述されている。

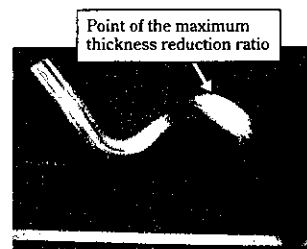


Photo 4 Appearance of ERW pipe of newly developed stainless steel after 50 mm R-90° bending (3 points)

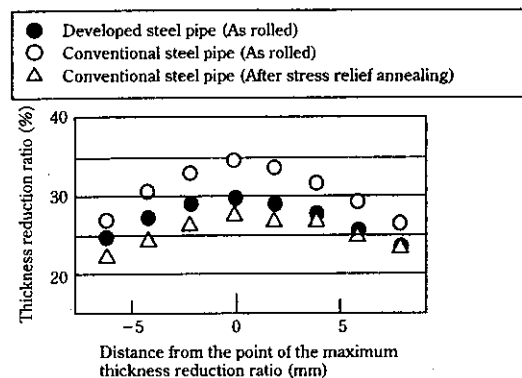
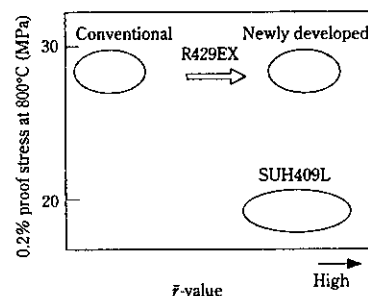


Fig. 5 Comparison of thickness reduction ratio after 90° bending between newly developed and conventional stainless steel pipes

Fig. 6 Relationship between 0.2% proof stress at 800°C and $\bar{r}$ -value (2 mm) at room temperature

また、Fig. 6に開発鋼、従来鋼およびSUH409Lの800°Cの高温耐力と室温の平均 $\bar{r}$ 値(2 mm)の位置付けを示す。開発鋼の高温耐力は従来鋼と同レベルを確保し、室温の平均 $\bar{r}$ 値は、既存のフェライト系ステンレス鋼中で加工性の最も優れているSUH409L同等以上のレベルにまで向上している。

5 結 言

近年の自動車排出ガス規制強化にともなって、ステンレス鋼の使

用環境はますます苛酷なものになりつつある。そのため、特にエキゾーストマニフォールド、フロントパイプ、触媒外筒材などに代表されるような高温環境用途として、優れた耐熱性と優れた加工性を有するステンレス鋼の開発要求が高まっていた。このような要求に応えるため、川崎製鉄は、高耐熱性ステンレス鋼 R429EX の加工性向上を研究し、千葉製鉄所の最新鋭の熱間圧延設備などを活用することで、深絞り性、穴広げ性、パイプ拡管率、パイプ曲げ加工性を

著しく向上させることに成功した。開発鋼を用いることにより設計の自由度向上、板厚減による軽量化、さらには、パイプでの歪み取り焼鈍の省略などの多くのメリットが得られるものと考えられる。

今後も世界各国において、排出ガス規制が強化されていく趨勢にある。これらの規制強化に適合できる高耐熱—高加工性ステンレス鋼 R429EX の採用が一層拡大し、環境浄化に貢献していくものと期待される。

参 考 文 献

- 1) 本間正幸：自動車技術，43(1989)9, 55
- 2) 久松定典：ステンレス，(1995)9, 10
- 3) 宮崎 淳，郡司牧男，吉岡啓一：川崎製鉄技報，25(1993)2, 34
- 4) たとえば，「再結晶・集合組織とその組織制御への応用」，(1999)，[日本鉄鋼協会]
- 5) 沢谷 精，清水邦彦，中山 正，三好正則：鉄と鋼，63(1977)5, 843
- 6) たとえば，薄鋼板成形技術研究会 編：「プレス成形難易ハンドブック」，(1997)，423，[日刊工業新聞社]
- 7) 伊藤 庸，橋口耕一：川崎製鉄技報，3(1971)4, 389
- 8) 宮崎 淳，石井和秀，佐藤 進：川崎製鉄技報，30(1998)2, 99