
自動車排気部品用ステンレス鋼の特性とタンデム圧延による製造

Characteristics of Stainless Steel for Automotive Exhaust System and Its Production by Tandem Cold Rolling Mill

小林 眞 (Makoto Kobayashi) 川崎 龍夫 (Tatsuo Kawasaki) 三原 康雄 (Yasuo Mihara) 佐藤 広武 (Hirotake Sato) 高田 正和 (Masakazu Takada) 柳島 章也 (Fumiya Yanagishima)

要旨：

自動車排気系部品用ステンレス鋼について、最適鋼種を耐食性および高温特性の点から検討した。また、普通鋼冷延設備を用いた製造に関わる問題点について検討した。R410L および R409L ステンレス鋼は内面側の排気凝縮水、外面側の塩水の両方に対して優れた耐食性を示した。両者で比較すると、Ti を添加した R409L が無添加の R410L よりも優れた成績を示した。また、R409L は高温特性および成形性にも優れ、この種の用途に最も適した材料である。高い生産性を有するタンデムミルによる圧延と、焼鈍工程に関して検討を行い普通鋼冷延設備を用いても、板厚精度、表面疵および材質の点で十分な品質のものが製造できることを示した。

Synopsis：

Ferritic stainless steels for automotive exhaust systems are reexamined for corrosion resistance and properties at elevated temperatures. Production process of the steels using conventional facilities for plain carbon steels is also studied. Stainless steels have good resistance against corrosion by inner condensate and outer road salt. Ti-stabilized type 409L is better than nonstabilized type 410L in both corrosive environments. Type 409L also has better properties at elevated temperature and better press formability, and is considered to be the optimum material for these automotive applications. It is shown that rolling by the high-productive tandem mill and optimizing the condition of the annealing process can provide stainless steel strips with sufficient quality of dimensions, surfaces and properties.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

自動車排気部品用ステンレス鋼の特性とタンデム 圧延による製造*

川崎製鉄技報
20 (1988) 1, 20-26

Characteristics of Stainless Steel for Automotive Exhaust System and Its Production by Tandem Cold Rolling Mill



小林 眞
Makoto Kobayashi
千葉製鉄所 管理部ス
テンレス管理室 主査
(課長)



川崎 龍夫
Tatsuo Kawasaki
鉄鋼研究所 薄板研究
部ステンレス鋼研究室
主任研究員(課長)



三原 康雄
Yasuo Mihara
鉄鋼技術本部 電磁・ス
テンレス技術部 主査
(部長)



佐藤 広武
Hirotake Sato
阪神製造所 ステンレ
ス部生産技術室 主査
(部長補)



高田 正和
Masakazu Takada
千葉製鉄所 冷間圧延
部冷延技術室 主査(課
長)



柳島 章也
Fumiya Yanagishima
千葉製鉄所 冷間圧延
部 部長

1 緒 言

ステンレス鋼の需要分野は多岐にわたり、拡大の一途をたどっているが、これまではどちらかというと表面光沢や美観性を重視したものが中心であった。しかし、ここ数年耐食性および耐熱性といった高Cr鋼のもつ本来の機能を重視する分野が広がり、その代表的なものに自動車排気系部品が挙げられる。従来、この分野では铸铁やアルミナイズド鋼が使用されているが、燃費改善のための軽量化を目的として、またエンジンの高性能や排気浄化装置の改良などによる、あるいは寒冷地域での融雪塩使用量の増加による腐食環境の変化などに対応し、ステンレス鋼への切替えが急速に進みつつある。

排気系部品ステンレス鋼としては、高温特性や耐食性の機能を満足し、かつ低コストであることが必要と考えられ、この点から最適

要旨

自動車排気系部品用ステンレス鋼について、最適鋼種を耐食性および高温特性の点から検討した。また、普通鋼冷延設備を用いた製造に関わる問題点について検討した。R410LおよびR409Lステンレス鋼は内面側の排気凝縮水、外面側の塩水の両方に対して優れた耐食性を示した。両者で比較すると、Tiを添加したR409Lが無添加のR410Lよりも優れた成績を示した。また、R409Lは高温特性および成形性にも優れ、この種の用途に最も適した材料である。高い生産性を有するタンデムミルによる圧延と、焼鈍工程に関して検討を行い普通鋼冷延設備を用いても、板厚精度、表面疵および材質の点で十分な品質のものが製造できることを示した。

Synopsis:

Ferritic stainless steels for automotive exhaust systems are reexamined for corrosion resistance and properties at elevated temperatures. Production process of the steels using conventional facilities for plain carbon steels is also studied.

Stainless steels have good resistance against corrosion by inner condensate and outer road salt. Ti-stabilized type 409L is better than nonstabilized type 410L in both corrosive environments. Type 409L also has better properties at elevated temperature and better press formability, and is considered to be the optimum material for these automotive applications.

It is shown that rolling by the high-productive tandem mill and optimizing the condition of the annealing process can provide stainless steel strips with sufficient quality of dimensions, surfaces and properties.

鋼種の選定と製造工程の検討を行った。

排気系部品用には AISI 409 が一般的に用いられるが、本報告ではこれに対応する当社材料 R409L および R410L ステンレス鋼につき検討を行った。

また、製造プロセスとして従来のセンジミアミルに代わり、高い生産性を有する普通鋼用のタンデムミルを用いたものを検討した。

2 排気系部品の腐食環境変化と材料への要求

排気系部品に使用される材料の最近の傾向と要求特性を Table 1 にまとめた。最近ステンレス化が進められているのはエキゾーストマニホールドとマフラーおよびその前後のパイプである。

エキゾーストマニホールドは従来より铸铁が用いられていたが、軽量化による燃費改善を目的としてステンレス鋼による薄肉化が図

* 昭和62年11月13日原稿受付

Table 1 Properties required for materials of automotive exhaust system

Parts	Properties required	Material selection	
		Conventional	Substituting
Exhaust manifold	• Tensile, fatigue and creep strengths at elevated temperature	Cast iron	Stainless steel pipe (type 409, 439)
Front pipe	• Oxidation resistance • Formability • Corrosion resistance in condensate	Stainless steel pipe covered by aluminized steel pipe (type 409)	
Converter shell	• Fatigue strength at elevated temperature • Press formability	Stainless steel (type 409, 410)	
Middle pipe, muffler and tail pipe	• Corrosion resistances in condensate and road salt • Press formability	Aluminized steel	Stainless steel pipe (type 409, 410)

られつつある。このことは米国で積極的に進められ、いわゆる Gas guzzler tax を克服するために、平均燃費を改善しやすいコンパクトカーを中心に材料の切替が進んでいる。また、薄肉化は触媒コンバーターに導入する排気温を高めることができ、エミッションコントロールの点でも効果があるとされている。エキゾーストマニホールドでは材料温度が800°C程度にも達するため、これに耐える高温特性、とくに冷・熱繰返しに対する耐久性が要求される。また、加工組み立てがプレスやパイプの曲げにより行われるため、優れた成形加工性が要求される。

エンジンの高性能化あるいは透過音を遮断するために用いられる遮音材の断熱効果などにより、エキゾーストマニホールド用材料にはより高温での特性に優れたものが要求される傾向にある。

一方、ミドルパイプ、マフラー、テールパイプ等はアルミナイズド鋼からの切り替えであり、内面・外面での腐食問題がその理由である。

内面からの腐食は排気凝縮水によるもので、三元触媒採用による凝縮水のpHが変化したことと、また、マニホールドコンバーターの採用等により触媒コンバーターとマフラー間の距離が変り、凝縮水の生成条件が変化したため問題化している。また、従来マフラー等の耐用年数は2車検(4年)と設定されていたが、新車の車検が1年延長されたことも、耐食性を改善する動機となっている。

外面からの腐食は海洋性塩分や冬期の融雪塩による。とくに北米では融雪塩の使用量が年々増加し腐食環境が厳しくなっている。

マフラー用材料としては、上記の耐食性および加工性、とくにパーリング性が要求される。

3 最適ステンレス鋼種の検討

以上の必要特性について、当社のステンレス鋼の中で排気系部品に使用実績のあるR409Lおよび410Lについて検討した。これらの鋼種の組成範囲はTable 2に示すとおりである。

3.1 高温諸特性

エキゾーストマニホールド等エンジンに近い側の500°C以上の高温で使用される部品には以下に述べる特性が要求される。これにつきステンレス鋼間での比較を行った。

3.1.1 高温酸化特性

大気中の900°Cまでの繰返し酸化試験の結果をFig. 1に示す。800°CではR409LとR410Lの耐酸化性はほとんど同じで重量変化もごくわずかである。850°CではR409Lは安定な酸化皮膜であるのに対し、R410Lでは加速度的な酸化に移り始める。900°Cでは両者とも100h程度で加速酸化して厚い酸化皮膜を生成しこの温度では使用できない。また410Lでは $\alpha \rightarrow \gamma$ 変態点がこの程度の温度域²⁾にあり、高温での γ 相の生成あるいは冷却時の $\gamma \rightarrow \alpha'$ 変態により、材料の変形が起りやすい。したがって、R410Lの場合には使用上限は耐酸化性での上限温度よりも変態温度に律せられる。

自動車排気雰囲気下、すなわち高温分でかつ低酸素雰囲気では、酸化は大気中よりも厳しい。したがってこれらの11~12%Cr鋼の耐酸化性からの使用上限温度は800°C程度と見るべきである。

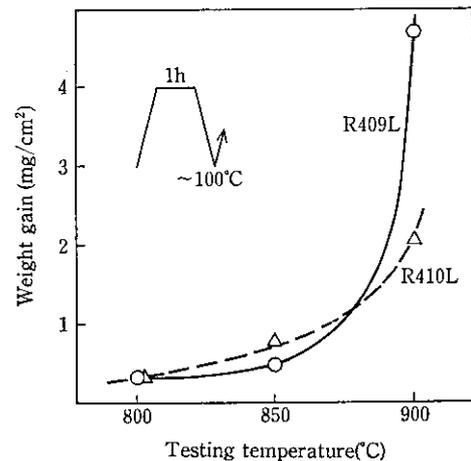


Fig. 1 Temperature dependence of steels in weight change after oxidation of 300 cycles in air at elevated temperature

Table 2 Chemical composition of standards and typical examples

Steel grade		Ladle analysis value (wt %)							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
R409L	Standard	≤0.030	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	≤0.60	10.50~11.50	6×C~0.75
	Typical example	0.010	0.50	0.50	0.025	0.005	0.10	11.20	0.15
R410L	Standard	≤0.030	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.030	≤0.60	11.00~13.50	—
	Typical example	0.012	0.35	0.35	0.025	0.006	0.07	12.13	—

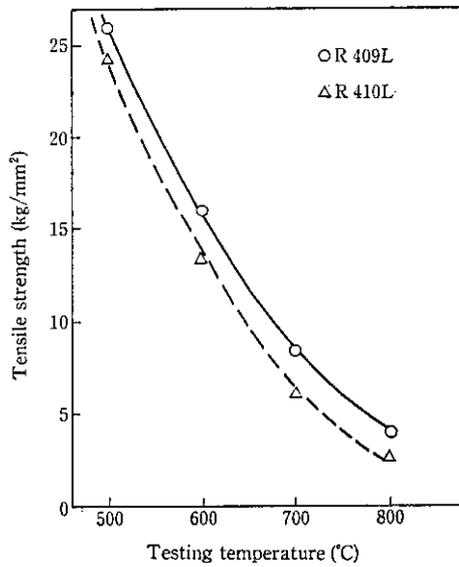


Fig. 2 Short time tensile strength of the stainless steels at elevated temperature

3.1.2 高温強度

平板での高温短時間引張試験結果を Fig. 2 に示す。R409L および R410L とともに試験温度ではフェライト組織であり、強度は温度上昇にしたがい急激に低下する。わずかではあるが R409L のほうが強度が高い結果になっているが、基本的には C, N, Cr, Ti 等の合金元素が高いほど高くなる。しかし、これらの元素は高温強度以外は、耐酸化性³⁾ および成形性を劣化させるため、どの特性に重点を置くかにより、成分バランスは決定される。

3.1.3 クリープ特性

平板に対する 500 と 700°C でのクリープ特性を Larson-Miller パラメーター法により整理した結果を Fig. 3 に示す。クリープ強度の点からは、R409L のほうが R410L よりもはるかに優れているといえる。TIG 溶接部 (Y308 1.2 mmφ フィラー使用) を含む試験に

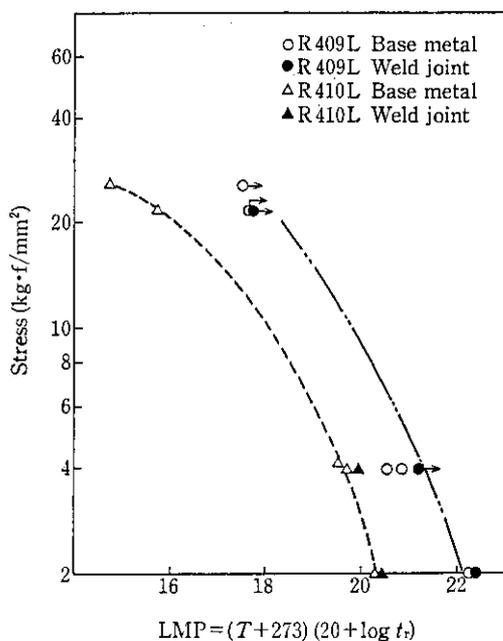


Fig. 3 Master rupture curves of the stainless steels for the results of creep test

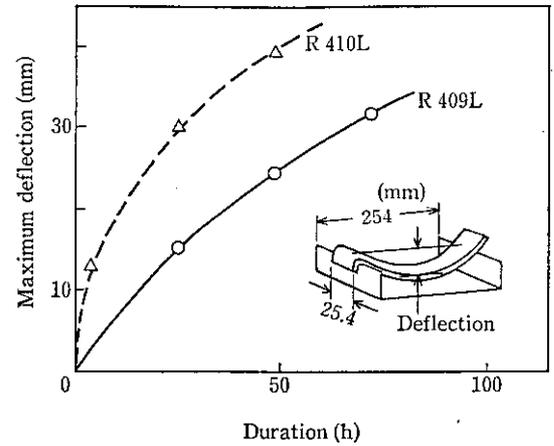


Fig. 4 Change in deflection of the stainless steels by sag test at 800°C

において、破断は母材から生じており、溶接部や HAZ のクリープ強度は母材より高い。

また、800°C でのサグ試験でも Fig. 4 に示すように、クリープ試験と同様 R409L のほうが優れている。

3.1.4 高温疲労特性

溶接部を含む平板での繰り返し曲げを行い高温疲労特性を求めた。試験方法の概要を Fig. 5 に、試験状況を Photo 1 に示す。テーパー付の試験片を用いることにより、溶接部を含む材料の均熱部内で最も疲労強度の弱い部分を評価することができる。加熱は 2 ターンの高周波誘導加熱によったが、治具による固定端から加振部に

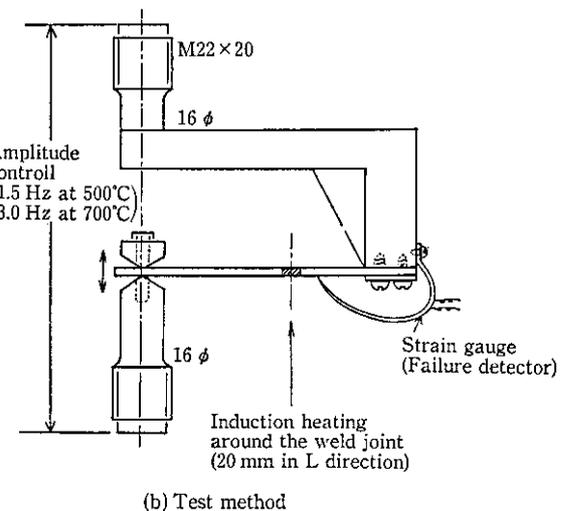
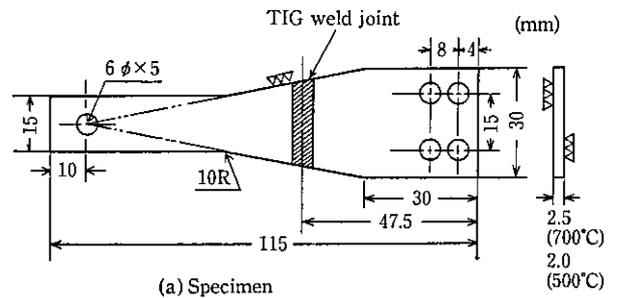


Fig. 5 Method of fatigue test at elevated temperature for tapered specimen with weld joint

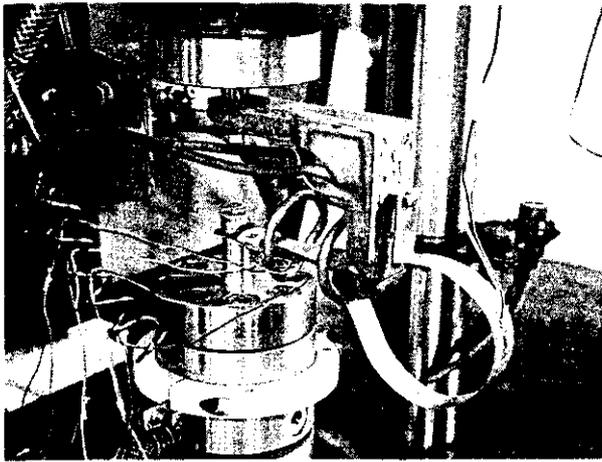
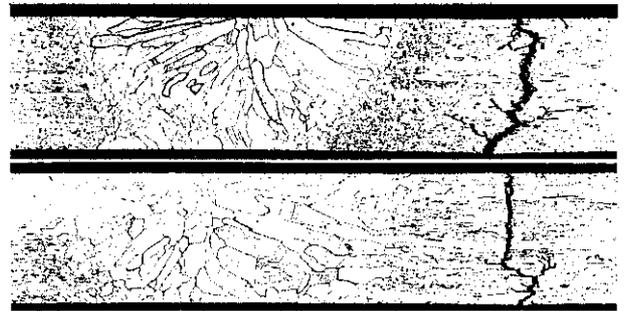


Photo 1 Fatigue test at elevated temperature

Upper: R409L
Lower: R410L

1 mm

Photo 2 Optical micrographs of the specimen at the fatigue crack

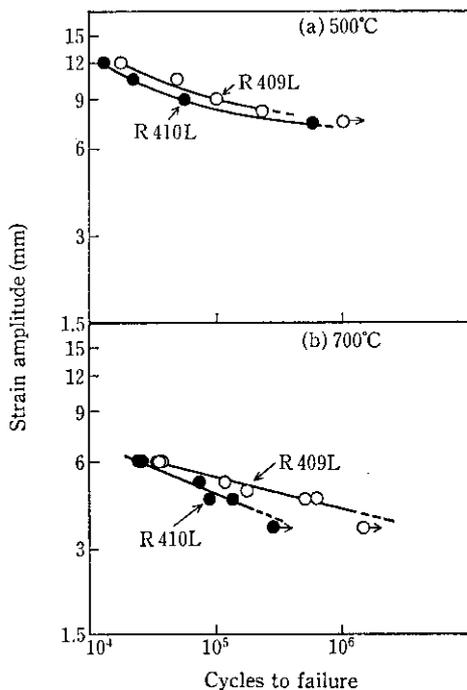


Fig. 6 Fatigue life of the stainless steels at 500 and 700°C

かけての温度分布にしたがい材料強度が変化するため、曲げ応力に対する関係としては得られないが、同一条件下での相対的評価には簡便な方法である。得られた結果を Fig. 6 に示す。ここでは、振幅に対する破断回数で表示した。また、試験条件は、試験機の能力と応答性から、500°C では 2.0 mm 厚で 1.5 Hz、700°C では 2.5 mm 厚で 3 Hz とした。高温疲労特性として、両鋼の間に大きな差はないが、R409L のほうが特性は良い。いずれも母材での破断であり溶接部あるいは HAZ が弱いということはない。割れは Photo 2 に示すごとく貫粒および粒界割れとなっているが、R409L のほうが粒界割れにより割れの先端が枝分れする傾向が強い。

以上のごとく、高温での多くの特性に関し R409L と R410L ではほぼ等しい特性を有するが、すべての点で R409L のほうが若干優れている。クリープ特性から高温部の排気系部品としては R409L が適していることが分かる。

3.2 耐食性

排気系部品の腐食のトラブルは、北米の例などでは、ほとんどミドルパイプ以降の比較的低温の低い部分で生じており、その 70% が凝縮水による腐食、すなわちパイプ内側からのトラブルであり、残り 30% が塩害、すなわちパイプ外側からのトラブルであるといわれている⁹⁾。最近の 3 元触媒による凝縮水の pH の上昇がアルミニウム鋼の腐食を増加させている理由と考えられる。

マフラーでの排気凝縮水を想定し、Cl⁻、SO₄²⁻等を含み、アンモニア水で pH 8 に調整した Table 3 のごとき合成液⁹⁾を用いて気液界面浸漬の腐食試験を行った。ここでは試験片の端面は剪断のま

Table 3 Composition of synthesized condensate⁹⁾

Reagent	Composition (wt %)
HCl	0.1
H ₂ SO ₄	1.0
CH ₃ COOH	1.0
HCOOH	1.0

NH₄OH is added as to be pH 8

まとし、比較材として 1.5 mm のアルミニウム鋼 JIS SA1D40、SA1D80 を用いた。得られた結果を Photo 3 に示す。腐食は気液界面と気相部で著しく、ステンレス鋼では剪断部端面の孔食が著しいが全面腐食はなく腐食量は少ない。鋼種間では、R409L のほうが R410L よりも優れた耐食性を示した。TIG 溶接部の試験では、R410L では気液界面に当たる溶接部で粒界腐食をともなった軽微な孔食 (0.2 mm 深さ) を生じ、安定化元素として Ti を含有する 409 タイプのほうが耐食性は優れている。比較材として用いたアルミニウム鋼は比較的短時間で全面腐食を生じた。

長時間の塩水噴霧試験によるパイプ外面腐食に関する評価は、Fig. 7 と Photo 4 に示すような結果となった。R409L および R410L ステンレス鋼ともほぼ同程度で、720 h 後でも発錆状況は軽微であった。アルミニウム鋼は 720 h で全面発錆を生じた。

以上のことから、自動車排気部品の内・外面の腐食に対する耐食性は、R409L ステンレス鋼が R410L 鋼に比べてやや優れているものの、いずれのステンレス鋼もかなり良好な耐食性を有することがわかった。

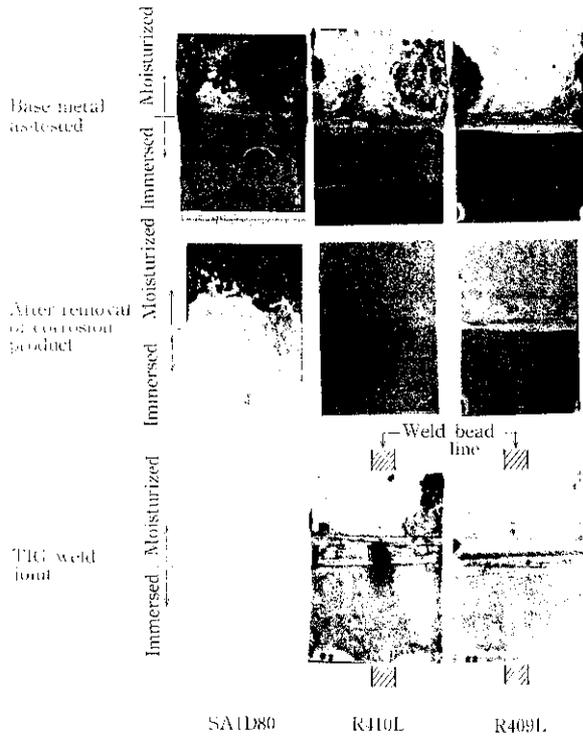


Photo 3 Corrosion test results in the synthesized condensate²⁾ (half immersion, 80°C, 4 weeks)

3.3 機械的性質, 成形性

R409L, R410L およびアルミナイズド鋼の機械的性質と成形性を Table 4 に示す。Ti を含む R409L は r 値が高く, プレス成形性に優れている。マフラーではバーリング加工性が要求されるが, この特性は $n(1+r_{min})$ で評価でき¹⁾, この点からも R409L が適しているといえる。アルミナイズド鋼は R409L と 410L の中間的な特性である。

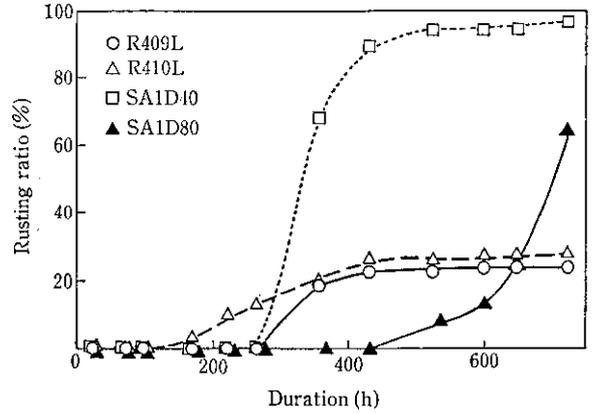


Fig. 7 Rusting ratio of the steels after long time exposure in the salt spray test (JIS Z2371, 5%NaCl, 35°C)

Table 4 Mechanical properties of materials for the exhaust system (thickness=1.5 mm)

Direction		YS	TS	El	$n^{*1)}$	$r^{*2)}$	CCV	Er	Bore ^{*3)}
		(kgf/mm ²)	(kgf/mm ²)	(%)			(mm)	(mm)	expansion, λ
R409L	L	25.3	44.0	37.4	0.25	1.08			
	D	27.0	45.0	35.7	0.24	0.99	60.0	11.9	2.30
	T	27.6	45.1	34.4	0.23	1.40			
R410L	L	25.9	37.8	38.1	0.25	0.85			
	D	28.0	41.3	33.2	0.25	0.77	62.6	10.8	1.77
	T	28.0	40.9	34.3	0.25	1.18			
Aluminized steel (SA1D80)	L	25.2	33.9	43.8	0.18	0.99			
	D	26.2	34.9	40.7	0.18	0.80	60.1	12.4	2.07
	T	26.4	34.0	45.1	0.18	1.35			

*1) Calculated from 5-15% stress

*2) Calculated from 15% elongation

*3) $\lambda = D/D_0$ (D_0 , original dia. of punched bore (15 mm ϕ); D , expanded bore dia.)

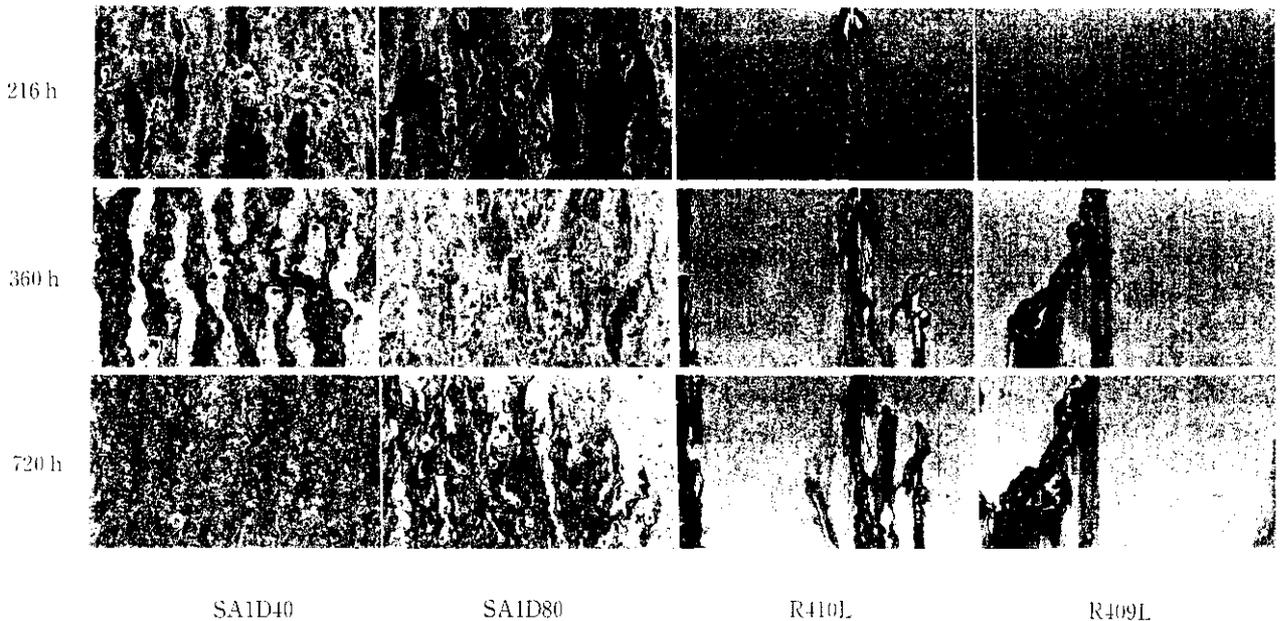


Photo 4 Results of salt spray test

4 最適製造工程の検討

ここでは、この種の機能性材料としての適性の明らかとなったR409Lの、用途に適した製造工程を検討した結果について述べる。言うまでもなく、通常のステンレス鋼はセンジミルにより圧延され良好な表面光沢を確保しているが、排気系部品ではその必要性は少ない。高い生産性によるコスト低減が最も重要な位置を占め、この点で、普通鋼生産設備であるタンデムミルによる圧延が最も適していると考えられる。

そこで、R409Lを普通鋼の設備を用いて製造するうえでの問題点を検討した。Fig. 8に通常のステンレス鋼製造工程と普通鋼の工程を比較して示した。圧延後の焼鈍工程はステンレス工程のAPL (Annealing and pickling line) と普通鋼工程のCAL (Continuous annealing line) の2つの方法を採用した。

排気系部品はERWパイプやプレス成形をへて組み立てられるが、そのためには、良好な寸法精度と加工性が必要とされるこれらの点に関する検討に重点を置いた。

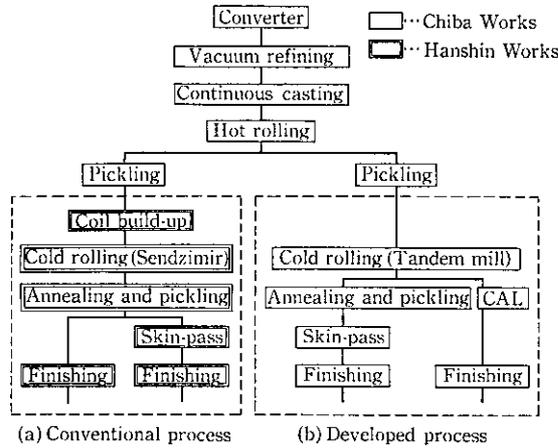


Fig. 8 Comparison of manufacturing process of conventional and developed ones

4.1 冷間圧延

タンデム圧延は5スタンドのミルを用いた。このミルはFig. 9に示すときAGC(Automatic gauge control)を備えており、普通鋼では長手方向で±2%の板厚精度を達成している。R409Lは抗張力が45 kgf/mm²程度で普通鋼のそれと同程度であるので十分な精度が得られる。圧延時の板厚記録の一例をFig. 10に示す。定常部では0.6 mm±6 μmの精度を示しており、板幅方向のクラウンを考慮してもJISのET公差(±5%)は十分クリアしている。

Fig. 11にR409Lの仕上厚さと圧延速度およびヒート・ストリークの発生限界の関係を示す。圧下を大きくするほど、また、圧延速度の大きいほどヒート・ストリークが出やすい。したがって、仕上板厚によって熱延母材の厚みを変える必要がある。

以上の結果に基づいてFig. 12に示すような圧延可能範囲を求めた。仕上板厚の薄いものでは、熱延母板寸法とも関係するが、全体の生産性も考慮して範囲を決定している。

ステンレス鋼をタンデム圧延するときの最大の問題点は、コイル両端での噛み込み、戻抜け時に発生するロールの焼き付き疵である。普通鋼ではこの問題は起らないため、クロムを多く含有するステンレス鋼特有の現象と考えられる。この疵を回避するため先後端

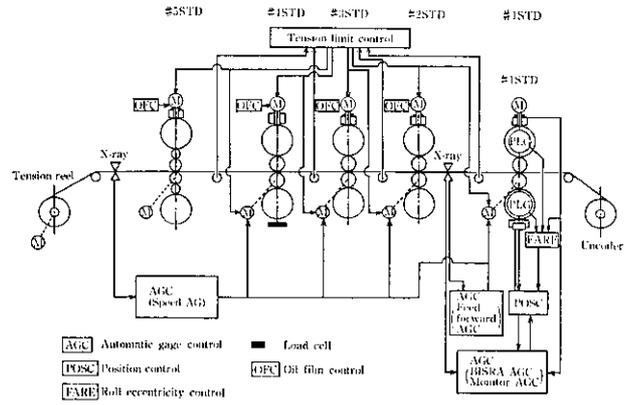


Fig. 9 Diagram of AGC system of 5-stand tandem cold mill

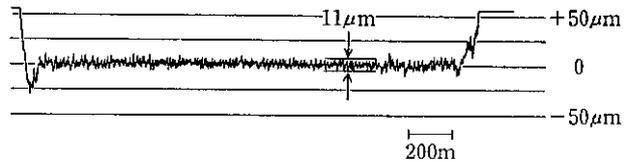


Fig. 10 Examples of thickness record of tandem rolled R409L

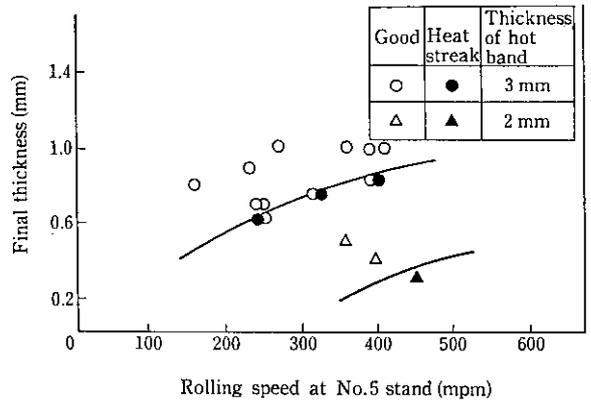


Fig. 11 Relation between rolling reduction and rolling speed on occurrence of heat streak

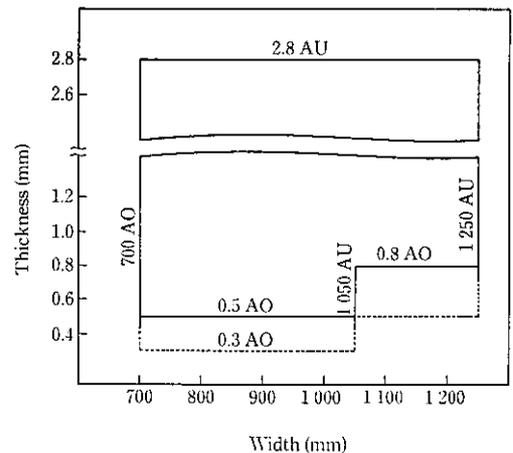


Fig. 12 Size availability of R409L and R410L by tandem rolling process (Mill edge coil; AO, and over, AU, and under; solid line, standard availability; broken line, special availability—to be negotiable)

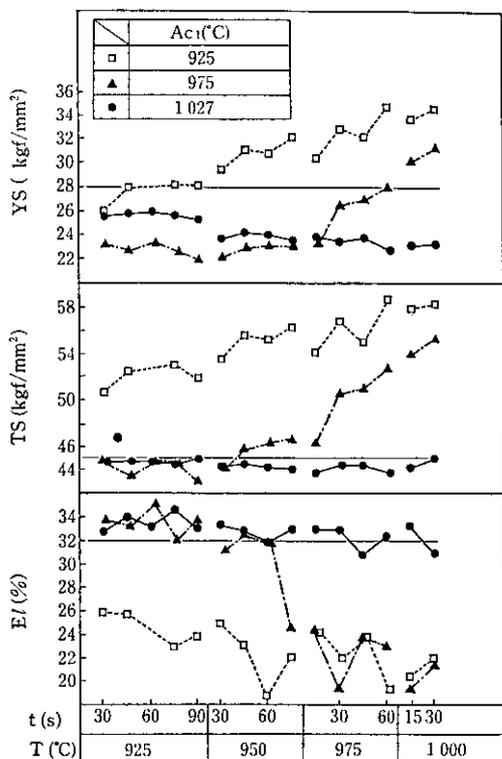


Fig. 13 Influence of annealing temperature (T) and holding time (t) on mechanical properties of R409L

の通過時にロールの圧下を軽くすればよいが、オフゲージ部が増えるという問題点がある。この対策として熱延母板でコイルを巻いて大単重化する方策を採った。溶接は圧延での張力と変形に十分耐えるようレーザーで行っている。10 kW レーザー溶接での継手断面組織は TIG 溶接部と比べ熱影響部が非常に狭いことが特徴であり安定した圧延に寄与している。このオフゲージ部を基本的に解消するには連続ミルにする必要があり現在計画中である。

4.2 仕上熱処理

R409L は Ti 添加鋼であり十分な焼鈍さえ行えば良好な成形性を示す。焼鈍条件を設定するにあたって、成分バランスを調整して Ac₁ 点 (α→γ 変態点) を高めて高温高速通板を行って良好な機械的性質が得られるか検討を行った。Cr, Si によりこの温度を 1027 °C まで変化させた材料について焼鈍条件と機械的性質の関係をみた。Fig. 13 に結果を示すが、変態点をこえると伸びは急激に低下する。変態点を高くして焼鈍温度を高めても必ずしも良好な伸びは得られない。以上の結果に基づいて実生産ではコイルごとに化学成分バランスから Ac₁ 点を推定して、この温度を超えないように仕上焼鈍を行っている。最近の製品の機械的性質の実績を Fig. 14 に示

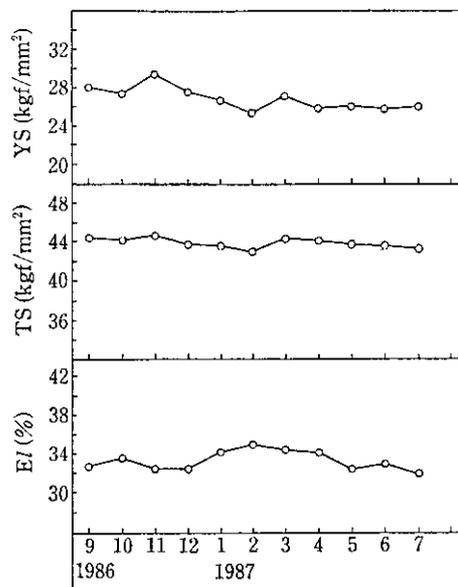


Fig. 14 Stable results in mechanical properties of R409L in recent years

した。

普通鋼の連続焼鈍設備である CAL は生産性は高いが水素分圧が低く、露点もステンレス鋼、とくに Ti を含むものに対しては高いため、焼鈍時の酸化は避けられない。このとき生成する酸化膜は非常に薄いものであるが、プレス時の型噛じりを引き起こし、また、耐食性の劣化をきたす。したがって、CAL 通板材は酸洗や研磨を行わない限り、用途を限定して出荷している。

以上のことから、現在は、タンデム圧延した R409L も中性塩電解と酸洗を行うステンレス工程で仕上げている。

5 まとめ

自動車排気系部品用ステンレス鋼として最適鋼種の検討を行い、それを高効率に製造する工程について検討した。

- (1) 高温での多くの特性に関し R409L と R410L はほぼ等しい特性を有するが、すべての点で R409L の方が若干優れている。
- (2) 自動車排気部品の内外面の腐食に対する耐食性は R409L が R410L に比べてやや優れている。
- (3) 機械的性質・成形性に関しては、R409L は r 値が高くかつパーリング加工性も R410L、アルミナイズド鋼と比べて優れており、この種の用途に最も適した材料である。
- (4) 普通鋼用のタンデムミルはこの材料を高効率に圧延することが可能で、適切な仕上焼鈍条件を採用することにより、十分な品質の製品が得られる。

参考文献

- 1) 山村英俊, 田原広光, 山本祥三: 自動車技術会講演会前刷集 872, (1987), 651
- 2) R. Castro and R. Tricot: Mém. Sci. Rev. Meta., 63 (1966), 657.
- 3) 川崎龍夫, 佐藤信二, 小野 寛, 大橋延夫: 川崎製鉄技報, 8 (1976) 4, 437.
- 4) D. M. Smith and F. Kilbane: Materials week '87, extended abstract, Oct. (1987), p. 105
- 5) 伊藤 庸, 橋口耕一: 川崎製鉄技報, 3 (1971) 4, 389