

Stainless Steel Increasing in Demand with Multi-Function



蓮野 貞夫
Sadao Hasuno
ステンレス・特殊鋼セ
クター室 主査(課長)



白石 昌司
Masaji Shiraishi
ステンレス・特殊鋼セ
クター室長

要旨

ステンレス鋼の著しい市場拡大に対処する川崎製鉄におけるステンレス鋼板の製造設備の進歩と用途開発に貢献する鋼種について概説する。製造設備面では、フェライト系ステンレス鋼の製造に有利な生 Cr 鉱石の溶融還元法と強力ミルパワーによる熱間圧延、高効率タンデム圧延などを開発した。川崎製鉄はこれら設備の特徴を活用して自動車排ガス部材用の機能品、建築外装用の高クロム高耐食性ステンレス鋼、高加工性ステンレス鋼など多くの新製品を開発し、フェライト系ステンレス鋼に重点シフトしたステンレス鋼板メーカーとして特徴を有している。

Synopsis:

The development of stainless steel production facilities and steel grades in Kawasaki Steel supports the great increase in demand of stainless steels. Cr-ore smelting reduction, powerful hot rolling mill and tandem mill rolling were developed and applied especially to ferritic stainless steels in many fields such as automobile, construction and other general uses. Kawasaki Steel is now characterized by the high production ratio of ferritic stainless steel.

1 はじめに

ステンレス鋼は耐食性のみならず耐熱性、意匠性、高強度などさまざまな特徴を付与できる鉄鋼材料として現在もお幅広い分野で利用拡大が続けている。日本国内でのステンレス鋼板の用途別受注実績¹⁾は Fig. 1 に示すように 1967 年の 23 万トンが 1997 年では 110 万トンまで著しく増加している。しかし、1998 年度は国内景気に影響され前年比減少した。すべての分野で増加しているが、特に建設、輸送機器の分野での増加が顕著である。このような、受注実績の増加は生産能力の飛躍的増大と品質の向上および新規需要開拓

に支えられたものである。川崎製鉄は特にフェライト系ステンレス鋼に重点をおいた製造技術開発と新製品開発による用途拡大を進めてきた²⁾。本報では川崎製鉄における製造工程の特徴とステンレス鋼の需要拡大に貢献している製品群について概説する。

2 川崎製鉄におけるステンレス鋼製造技術の特徴

2.1 製鋼工程

ステンレス鋼の溶製には、合金鉄とスクラップを原料とする電気炉-AOD-(VOD)-CC のプロセスがいまだに多く利用されている。

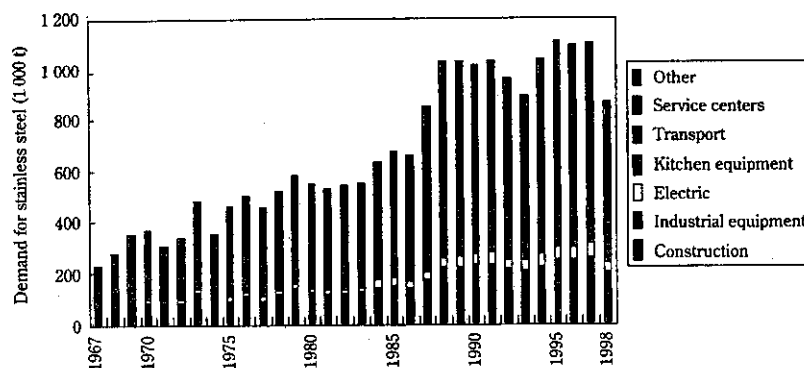


Fig. 1 Trend in stainless steel demand for several end uses in Japan (Source: Japan Stainless Steel Association)

* 平成12年5月24日原稿受付

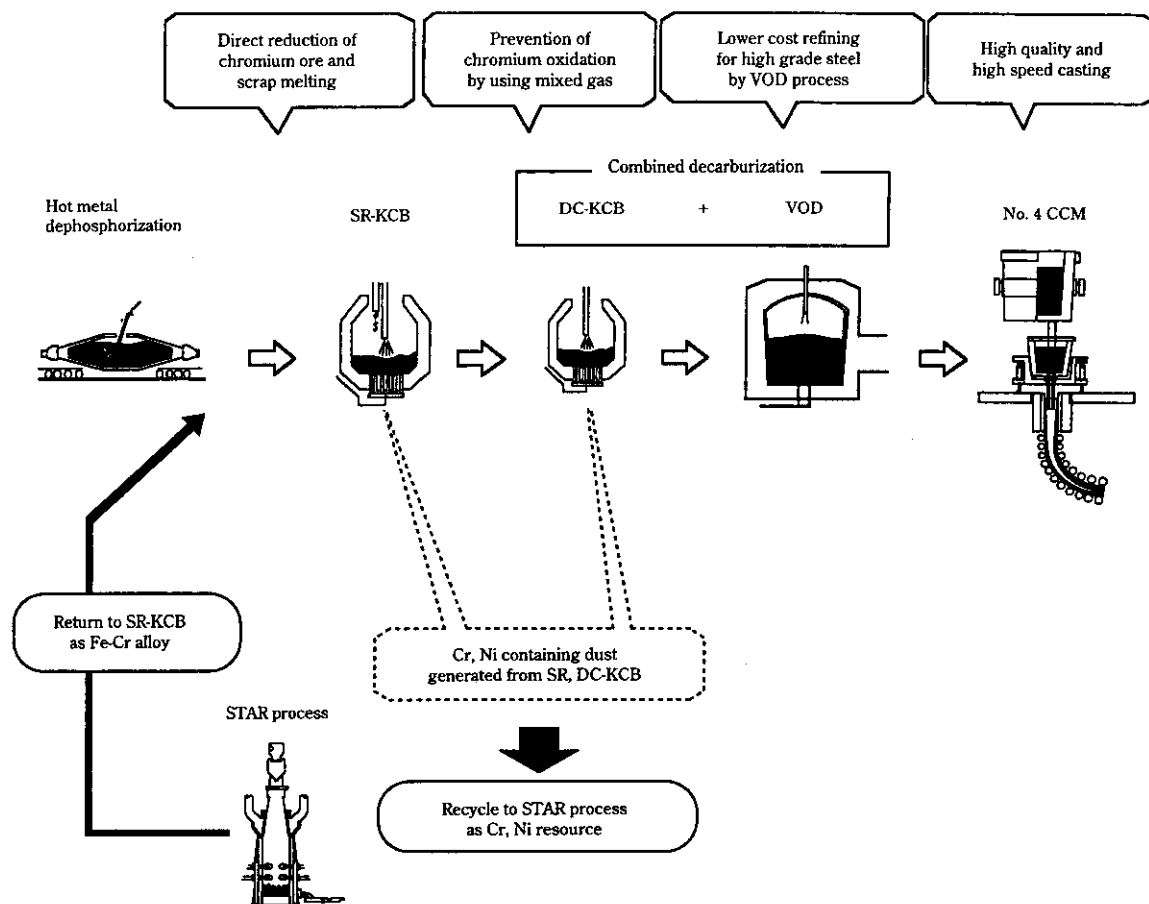


Fig. 2 Refining process of stainless steel in Chiba Works

しかしながら、ステンレス鋼が量的増加と質的向上を続けるためには、大量生産に適しかつ高品質ステンレス鋼の溶製が可能な高炉溶銑を利用する製鋼プロセスの開発が有利である。

川崎製鉄では1973年から転炉法でのステンレス鋼の製造を開始し、ステンレス鋼の主要な合金元素であるCrを鉻石の溶融還元で得る製鋼技術開発に取り組むとともに、高クロム極低C、N系高耐食ステンレス鋼の高効率精錬技術を開発してきた。1994年には千葉製鉄所第4製鋼工場を建設し、Fig. 2に示す溶融還元-脱炭炉-VOD-CCプロセスを完成させ、転炉法による高品質ステンレス鋼の量産技術を確立させた³⁾。

この精錬法の特徴を以下にまとめる。

(1) Cr 鉻石を用いた溶融還元プロセス

溶融還元炉 (SR-KCB) で生 Cr 鉻石を還元し Cr 源とすることで高価なフェロクロムに頼らない画期的製鋼プロセス⁴⁾。

(2) 極低炭ステンレス鋼の高効率製造

大流量スリットプラグを利用した底吹攪拌を特徴とする脱炭・脱窒が難しい高クロム鋼の高効率精錬。

(3) 産業廃棄物のないリサイクルプロセス

製鋼工場から発生するダストを回収し、2段羽口式コークス充填層型溶融還元炉 (STAR 炉: stainless advanced reactor 炉) で溶融還元し Ni, Cr などの原料としてリサイクルする。

2.2 熱間圧延・焼鈍・酸洗工程

ステンレス鋼は熱間変形抵抗が高くかつ熱間加工性も劣るため、ステッセルミルなどのステンレス鋼専用の熱間圧延機が多く使用されているが、リバース圧延のため生産性が低いのが欠点である。

川崎製鉄は普通鋼の熱間圧延に使用される高生産性タンデム圧延機でのステンレス鋼広幅圧延を1978年から千葉製鉄所で開始し、タンデム圧延によるステンレス鋼の最適圧延技術の開発に取り組んできた。その後、1995年には開発したステンレス鋼の熱間圧延技術を工程的に実現できる新設の第3熱間圧延工場での生産を開始した。Fig. 3に第3熱間圧延工場のレイアウトを示す⁵⁾。サイジングプレスによる幅調整、高い圧延能力による圧延精度向上に加え、スラブ加熱からコイラーまでの圧延温度、圧延パターン、冷却制御によりステンレス鋼の品質制御に大きく貢献している。

3 各分野における特徴あるステンレス鋼製品

3.1 自動車分野

輸送機器分野でのステンレス鋼板の使用量は1975年における2.8万トンから1995年の10.6万トンまで著しく増加している。内訳をみると自動車向けが大半で2.3万トンから8.4万トンに増加しており、車両重量の約1.5%に相当し大部分はマフラー、コンバータシエルをはじめとする排気系部材用である。この主要因は排気ガス対策の触媒搭載による排気系の腐食環境悪化への対応と排気系部品の保証期間延長であり、排気系部品は溶融アルミめっき鋼製からステンレス鋼製へほとんどが切り替わった⁶⁾。自動車排気系部材では一般用途と異なり、外観より耐食性・耐熱性などの本来機能が重視され、かつステンレス鋼化に際しては製造コストの低減が重視された。川崎製鉄で、自動車排ガス部材のステンレス鋼化のため、ステンレス鋼の従来製造工程から脱却し、高炉メーカーとしての優位性を活

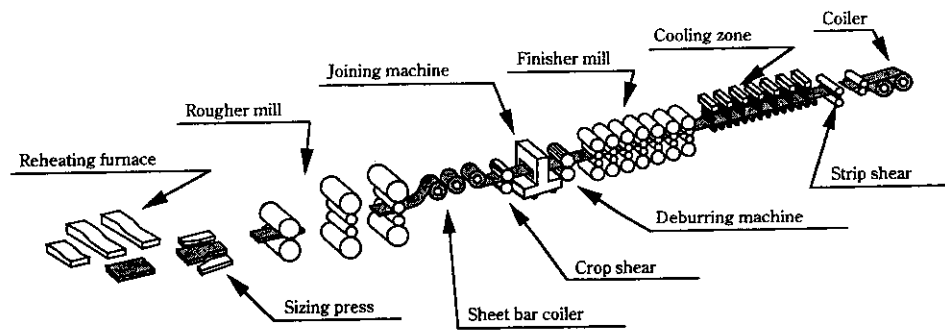


Fig. 3 Layout of No. 3 hot strip mill in Chiba Works

かした普通鋼用冷間圧延・焼鈍設備による自動車排ガス部材の大量生産体制を開発した⁷⁾。

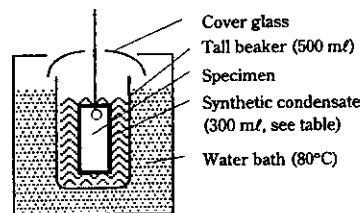
ステンレス鋼板専用のゼンジミア圧延機によるリバース圧延については普通鋼用高能率タンデム圧延機による連続圧延化を 1978 年に実現した。さらに、ステンレス鋼専用の焼鈍酸洗設備による仕上げ焼鈍酸洗については、1988 年に普通鋼用連続焼鈍炉での高効率電解酸洗法を開発、適用することでステンレス鋼の高能率焼鈍酸洗を可能にした。この冷間圧延工程は自動車排気系部材を代表とする機能重視のステンレス製品に対する最適な製造工程であり、タンデ

ム冷間圧延機能品として幅広い分野で利用できる製品開発に繋がっている。

3.1.1 マフラー材

自動車マフラー材には長く熔融亜鉛およびアルミめっき鋼が使用されてきたが、1970 年代後半から開始した排気ガス規制で三元触媒が導入されると排気ガス成分が変化しマフラー内で生じる凝縮水による腐食が激しくなった。川崎製鉄では、Fig. 4 に示す合成凝縮水によるマフラー腐食の評価試験法を開発するとともに、マフラー用ステンレス鋼の開発を進め、Table 1 に示す R409L から R436LT

Procedure:
Specimen pre-oxidation in air at 400°C for 5 h.
Full immersion in synthetic condensate at 80°C
↓
Condensing at 80°C to completely dry
↓
Pouring of synthetic condensate
Repeat immersion-dry 10 cycles



										(ppm)
Cl ⁻	SO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	CH ₃ COO ⁻	HCHO	COOH ⁻	NH ₄ ⁺	Activated carbon
250	1 250	1 250	2 000	100	20	400	250	100	2 500	50 g/l

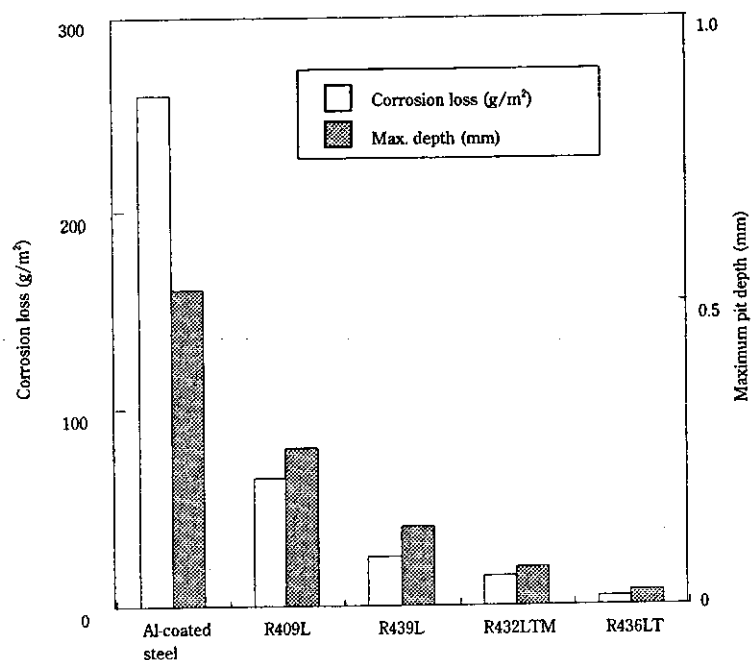


Fig. 4 Corrosion behavior of muffler grade steels in synthetic condensate corrosion test

Table 1 Stainless steels for automotive exhaust systems

(mass%)

Application	Standard designation		Typical example of main compositions								
	Kawasaki Steel Standard	JIS	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	La
Muffler	R409L	SUH409L	0.01	0.3	0.3	11.2	—	—	0.3	—	—
	R432LTM		0.01	0.1	0.2	17.5	0.5	—	0.3	—	—
	R436LT	SUS436L	0.01	0.1	0.2	17.8	1.2	—	0.3	—	—
Exhaust manifold	R429EX		0.01	0.9	0.4	14.8	—	0.45	—	—	—
	R430LNM	SUS436J1L	0.01	0.3	0.3	17.5	0.5	0.38	—	—	—
	R434LN2	SUS444	0.01	0.3	0.2	19.0	1.9	0.35	—	—	—
Metallic substrate of catalyst	R20-5USR		0.005	0.1	0.1	20.1	—	—	—	5.7	0.1

までの3鋼種によるタンデム冷間圧延機能品製造工程でのマフラー材量産体制を確立している⁹⁾。マフラーのステンレス鋼化は耐熱鋼に属するSUH409L（極低C、N+Tiの11%Cr系）から浸透していったが、1980年代後半になると、マフラーの保証期間延長と、北米などで散布される融雪塩によるマフラー塩害対策のためステンレス鋼化が加速し、現在では最も耐食性の高いR436LTまでを含め排気系の腐食性に応じて使い分けされ、マフラーのほぼ全量がステンレス鋼化された。この結果、ステンレス鋼として新たな機能品分野の大きな市場が開拓された。

3.1.2 エキゾーストマニホールド材

マフラーのステンレス鋼化と並行し排ガス上流部位にあたるエキゾーストパイプなどの排気系部材においてもステンレス鋼化が進んだ。これら部材では触媒搭載による排気ガス温度の上昇で耐熱性が必要となり、高耐食性と高温高強度の両立する極低C、N+Nb系の鋼種が使用されている。川崎製鉄における代表鋼種をTable 1に示した。

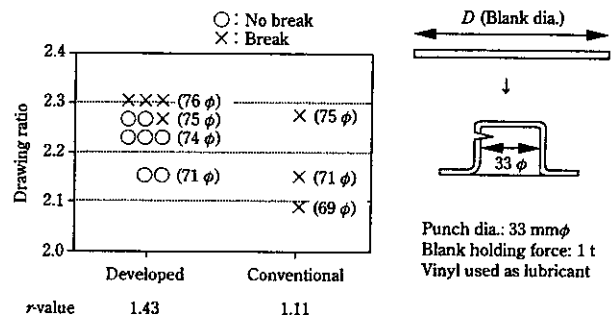
またパイプは曲げ、並管など厳しい加工を受ける場合が多く川崎製鉄では知多製造所で開発した、造管ひずみの少ないCBR (chance-free bulge roll) 成形法で高品質のステンレス電綫管でエキゾーストパイプ素管を製造している⁹⁾。

最近では、エキゾーストマニホールドにおいても鋳鉄からステンレス鋼化が進んでいる。ゼロエミッションと低燃費追求で、触媒コンバーター体型をはじめ各種のステンレス鋼製マニホールドが開発されると同時に排気ガス温度も上昇の傾向があるため素材には高温特性以外に優れた加工性が必要となる。フェライト系ステンレス鋼は高温強度と加工性でオーステナイト系に劣るが熱膨張係数が小さく耐熱疲労の観点からエキゾーストマニホールド材に使用されている。現在は高温特性と加工性のバランスで15Cr-Nb系のR429EXが主流となっている。特にR429EXでは耐熱性を維持しつつ、加工性の重要な指標となる r 値を約30%向上させ、Fig. 5に示すように深絞り性、穴広げ性を向上させている。

3.1.3 メタルハニカム材

自動車排気ガス浄化対策に使用される触媒コンバーターではPt、Rhなどの貴金属触媒をハニカム状担体に保持する。ステンレス箔製の担体では、熱容量が小さいので触媒温度の上昇が早く、エンジン始動時から触媒が有効に働き、またセラミック製担体に比べて熱衝撃特性に優れかつ担体自身の断面積が小さいので排気抵抗が小さいことなどの特徴がある。最近ではエンジン直下へコンバーターを設置される例も増加し、箔厚も50 μ m以下が要求されるなどハニカム担体にはさらに優れた高温特性が要求されている。

川崎製鉄のメタルハニカム用鋼種は、20%Cr-5%Al鋼をベースに

Fig. 5 Deep drawability of R429EX with increased r -value

耐酸化性をさらに向上させるため希土類元素の中で特に耐酸化性に寄与するLaを選択的に添加したR20-5SRを1986年に開発した¹⁰⁾、さらにZr添加を追加しこの鋼種中では最高の耐酸化性を有するTable 1に示すR20-5USRを1993年に開発した¹¹⁾。同時に、広幅箔圧延技術を開発し1000mm幅で30 μ mハニカム用素材を製造できている。

3.2 建設分野

建設分野でのステンレス鋼板の使用量は1975年における2.6万トンから1995年の15.7万トンまで著しく増加している。これはステンレス鋼の持つ優れた耐食性に加え、鏡面、エッチング、発色、研磨など多様な表面仕上げが特にビルエントランスやインテリアの意匠性付与に適したのが大きな要因である。さらに体育館、コンベンションセンターをはじめとする各種大型建築物の屋根材、壁材として大規模に使用されている。

特に、ステンレス鋼屋根では防水工法が開発され、多くの大型屋根が無垢のままのステンレス鋼で施工されている。しかし、立地環境によって必要な耐食性が大きく変化するため、ステンレス鋼の耐食性に関する研究が促進され、多くの建材用フェライト系ステンレス鋼が開発された¹²⁾。

川崎製鉄ではTable 2に示すRSX-1からR30-2 (SUS447J1) が建材用として開発され、それらの耐食性はFig. 6に示すように大気暴露試験においてSUS316よりも優れた耐食性を示している。特に22Cr鋼は新たなJIS鋼種 (SUS445J1, J2) に制定され今後さらに普及が期待されている。また、フェライト系ステンレス鋼はSUS304などのオーステナイト系ステンレス鋼にくらべ熱膨張係数が小さいため溶接や気温の変化による熱ひずみが小さく屋根材に有利である。これらはいずれも高純度高クロム系ステンレス鋼で特に初の海上空港である関西新空港旅客ターミナル屋根で採用されたR30-2

Table 2 Mechanical and physical properties of stainless steels for buildings

Steel	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	λ (W/mK)	α (K ⁻¹)	d (g/cm ³)
RSX-1	328	492	33	—	10.3×10^{-6}	7.75
R445MT	342	490	32	19.5	10.1×10^{-6}	7.68
R24-2	392	520	31	—	9.8×10^{-6}	7.66
R30-2	430	539	30	18.9	9.6×10^{-6}	7.64
SUS304	284	637	58	16.2	16.0×10^{-6}	7.93

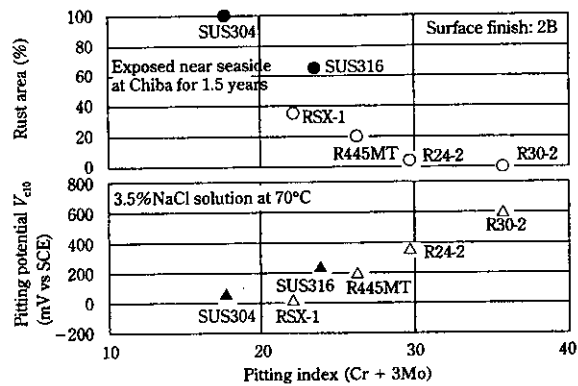
 λ : Thermal conductivity measured at 298 K α : Coefficient of expansion at the temperature between 273 K and 573 K d : Density

Fig. 6 Corrosion resistance of the developed ferritic stainless steels



Photo 1 An aerial view of the passenger terminal building at Naha Airport: the building roofed with SUS447J1

(SUS447J1) の耐食性は最も優れており、さらに過酷な環境といわれる那覇空港でも Photo 1 に示す屋根材に使用された。また空港屋根では防眩性が重要で Photo 2 に示す微細な凹凸をつけたダル仕上げ（シルバーソフト）が開発され意匠性ステンレス鋼としても高く評価されている¹³⁾。

また近年では、水管橋、高欄、ダム・堰を始めとする土木分野へステンレス鋼が採用されつつあり、ステンレス鋼の大きな新規需要分野と期待されている¹⁴⁾。一例として、多自然型河川づくりのために環境に優しい護岸工事法として使用されているステンレスエキスパンドメタル製かご枠を Photo 3 に示す¹⁵⁾。この素材としては、高耐食性の 18Cr-1.2Mo 系フェライト系ステンレス鋼 R436LT が使用されている。

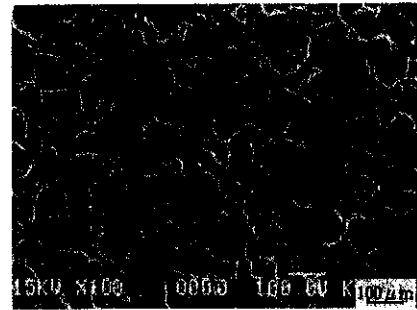


Photo 2 Surface of dull finish "Silver Soft" observed by SEM

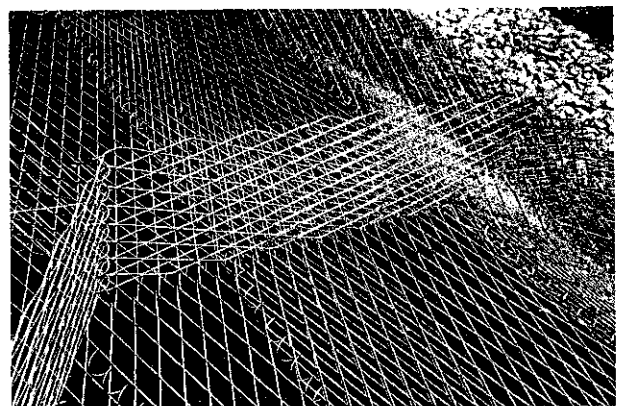
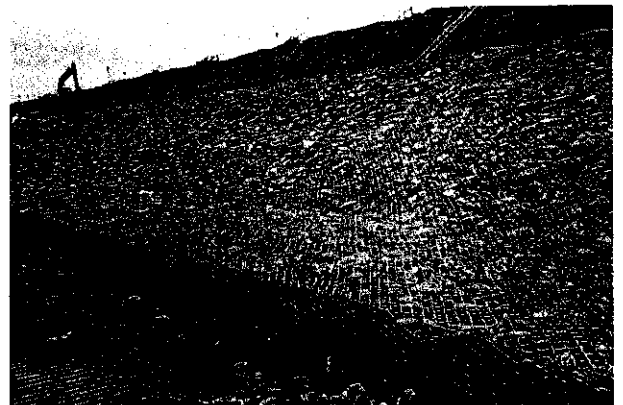


Photo 3 Expand metal honeycomb frame used for revetment works

3.3 家庭用・業務用器具分野

この分野でステンレス鋼板の使用量は 1975 年における 12.6 万トンから 1995 年の 20.4 万トンまで増加したが、占有率では逆に 17%

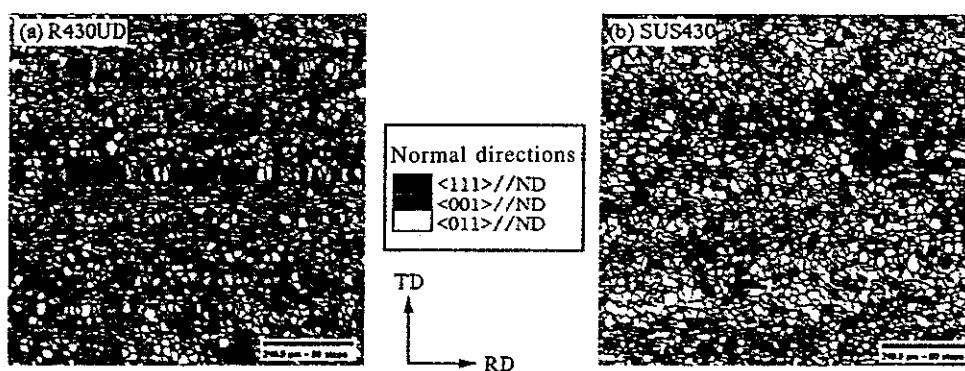


Photo 4 Texture maps for normal direction, tolerance angle = 15°, of the 1/4 thickness ND plane of samples (a) R430UD and (b) SUS430

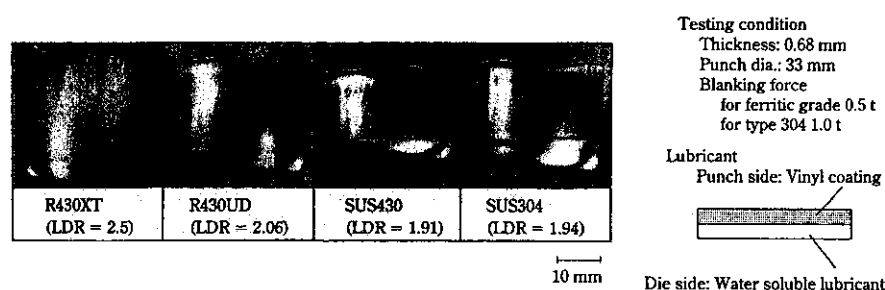


Photo 5 Appearance of ridging and drawn cup-height of R430UD and R430XT after Olsen cup test

Table 3 Results of antimicrobial activity test in samples after polishing for 1 μm

Sample	Finish	Species	Viable cell count before test (cfu/sample)	Viable cell count after 24 h (cfu/sample)	Rate of cell reduction (%)
R430LN-AB	BA ↓ #600	<i>Escherichia coli</i>	3.1×10^5	8.0×10	>99
		<i>Staphylococcus aureus</i>	3.9×10^5	5.0×10	>99
SUS430LX (Control)	2B	<i>Escherichia coli</i>	3.1×10^5	4.0×10^5	
		<i>Staphylococcus aureus</i>	3.9×10^5	5.4×10^5	

Testing facility: Japan Food Hygiene Association
Date of test certificates: Jan. 19, 1998
Nos. of test certificates: No. 71-8289, No. 71-8290

から 12% に低下した。ただしステンレス鋼分野としては、調理器具・台所製品など身近な製品が対象となる分野でその重要性に変わりはない。業務用厨房を除くと、汎用の SUS304 がなお圧倒的に使用されているが、川崎製鉄はオーステナイト系に比べると安価なフェライト系ステンレス鋼の普及を図るため、深絞り加工などの加工性改善に取り組んできた。フェライト系ステンレス鋼の深絞り性は熱間圧延・冷間圧延工程で生じる集合組織に依存する r 値に大きく依存している。鋼種としては、極低 C、N に Ti もしくは Nb を添加した SUS430LX が優れており実用上ほぼ十分な深絞り性を付与することができる。しかし、この鋼種では深絞り加工でリジングとよばれる畝状の凹凸が発生するため製品加工はできても外観を損ねる欠点があり、身近な製品に使用するには研磨負荷が大きく普及への障害となっていた。川崎製鉄ではリジング発生機構の解明とともにリジングの軽微なフェライト系ステンレス鋼製品として SUS430 に

属する R430UD と SUS430LX に属する R430XT を開発した。一例として Photo 4 にリジングの発生原因となる集合組織の改善を R430UD と SUS430 で比較して示す¹⁰⁾。これらの鋼種での深絞りにおけるリジング観察写真を Photo 5 に示す。また、ステンレス鋼製品では一般的に美観と耐食性が重要視されてきたが、近年多くの生活用品で抗菌製品が開発されステンレス鋼製品でも抗菌性が求められた。川崎製鉄では、抗菌効果の高い Ag を初めて利用した抗菌ステンレス鋼を開発し¹¹⁾、SUS430 と SUS430LX の両鋼種をベースとする R430AB、R430LXAB が洗濯機ドラム、食品保存庫などに利用されている。抗菌のための表面処理と異なり素材で抗菌性があるため研磨などの加工後でも抗菌性が得られるのが特徴で研磨仕上げや鏡面仕上げの製品など適用範囲が広い。Table 3 に抗菌性試験結果を示す。ステンレス鋼製品はさまざまな用途に利用されるため、抗菌性以外にも用途に応じた表面特性が今後とも期待されている。

4 まとめ

ステンレス鋼は優れた耐食性と美麗さの特徴を有し数多くの製品に普及し、量的拡大を続けている。

川崎製鉄は特にフェライト系ステンレス鋼に対する最適な製造体

制を築きつつ普及を図るため数多くの製品開発に努めてきた。自動車用排気系部材を代表とする機能品、SUS447J1 を代表とする高耐食性ステンレス鋼、R20-5USR などの耐高温酸化性ステンレス鋼さらには深絞り加工性に優れるフェライト系ステンレス鋼などが挙げられる。これら幅広いフェライト系ステンレス鋼による新規用途開拓をすすめるステンレス鋼の一層の普及に寄与したい。

参 考 文 献

- 1) ステンレス協会需要調査委員会：用途別受注統計年報
- 2) 川崎龍夫：川崎製鉄技報，30(1998)2, 69-77
- 3) 鍋島祐樹，小倉 滋，山田純夫：川崎製鉄技報，28(1996)4, 206-212
- 4) 岸本康夫，田岡啓造，竹内秀次：川崎製鉄技報，28(1996)4, 213-218
- 5) 今江敏夫，野村信彰，三吉貞行：川崎製鉄技報，28(1996)4, 219-223
- 6) 松浦則之：ISSF 市場開発委員会資料
- 7) 小林 真，川崎龍夫，三原康雄，佐藤広武，高田正和，柳島章也：川崎製鉄技報，20(1988)1, 20-26
- 8) 佐藤 進，宇城 工，石井和秀：川崎製鉄技報，31(1999)1, 28-33
- 9) 豊岡高明，橋本裕二，小林邦彦，板谷 進，井手 勉，西田保夫：川崎製鉄技報，22(1990)4, 236-244
- 10) 石井和秀，川崎龍夫：日本金属学会誌，56(1992)7, 854-862
- 11) 清水 寛，河野雅昭，吉岡啓一：川崎製鉄技報，25(1993)2, 119-123
- 12) 矢沢好弘，吉岡啓一，富樫房夫：川崎製鉄技報，25(1993)2, 131-137
- 13) 岡 裕，栗山則行：川崎製鉄技報，30(1998)2, 118-120
- 14) ISSF 国内市場開発委員会資料：第 5 回エキスパートミーティング，(1999)
- 15) ステンレス協会：ステンレス，44(2000)1, 4-10
- 16) 横田 毅，M. Brochu，佐藤 進：川崎製鉄技報，30(1998)2, 115-117
- 17) 横田 毅，栃原美佐子，小林 真：川崎製鉄技報，30(1998)2, 121-122