

技術論文

高加工性フェライト系ステンレス鋼 NSSC® PDX の開発

Development of an Ferritic Stainless Steel “NSSC® PDX” Featuring Excellent Formability

木村 謙*
Ken KIMURA高橋 明彦
Akihiko TAKAHASHI

抄 録

加工性と耐リジグ性を両立するフェライト系ステンレス鋼NSSC PDXを開発した。不純物の低減によりフェライト系ステンレス鋼の中で最高レベルの加工性を得ることが出来、凝固組織微細化と熱間圧延条件最適化による熱間圧延途中の再結晶促進を組み合わせた一貫組織制御により良好な耐リジグ性を確保した。本鋼種は従来フェライト系ステンレス鋼が使用されてこなかった高い加工度を有する部材に適用されている。

Abstract

A new ferritic stainless steel “NSSC PDX” having excellent formability and good ridging property was developed. An excellent formability was obtained by means of decreasing impurities. A good ridging property was attained by microstructural controls that were composed of the refinement of solidification structure and the accelerating recrystallization on the way of hot-rolling process. This new ferritic stainless steel is applied in new fields and is expected to broaden them in the future.

1. 緒 言

ステンレス鋼は、優れた意匠性や耐食性を有することから、家電、建材、厨房用等の広い分野で使用されている。ステンレス鋼の中で最も使用量の多い鋼種は、オーステナイト系ステンレス鋼のSUS304 (18mass%Cr-8mass%Ni)であり、全需要の過半数を占める。しかし、近年ではフェライト系ステンレス鋼の需要が増加してきている。

フェライト系ステンレス鋼をSUS304と比較したときの利点は、Niをほとんど含有しないため価格安定性に優れること、熱膨張率が低いこと、応力腐食割れ感受性が低いこと等が挙げられる。一方、フェライト系ステンレス鋼の課題は、加工性と耐リジグ性である。加工性の一つである延性についてフェライト系ステンレス鋼の代表鋼種であるSUS430 (17mass%Cr)とSUS304を比較すると、SUS304は50%超であるのに対し、SUS430は約30%と大きな差が認められる。また深絞り性の指標を示すr値はSUS304の約0.9に比べてSUS430系は高いものの最高で1.5程度であり、加工用途として十分とは言えない。

またフェライト系ステンレス鋼のもう一つの課題は、成形加工後に発生する“リジグ”と呼ばれる表面凹凸であ

る。リジグの原因は結晶粒の塑性異方性にある。特にフェライト系ステンレス鋼では類似結晶方位の集団（以下、コロニーと呼ぶ）が圧延方向に連なって存在し、あたかも粗大結晶粒のように変形するためにリジグとして現れる。リジグが発生すると、美観を損ねるだけでなく、加工後の表面研磨工程の負荷が増大する。したがってSUS304からフェライト系ステンレス鋼への材料変更を考えた場合、加工性が高いことに加え、耐リジグ性をも確保する必要がある。

著者らは、精錬、鋳造、熱間圧延、冷間圧延及び焼鈍の一貫工程における金属組織制御により、17%Cr鋼ベースのフェライト系ステンレス鋼で最高レベルの加工性を示し、且つ良好な耐リジグ性を有する鋼種“NSSC PDX”を開発した。本論文では該鋼種開発に至る金属組織制御の考え方及び開発鋼の特性を紹介する。

2. 開発目標

開発に当たり、目標を次のように設定した。加工性については、延性は従来のフェライト系ステンレス鋼の中で最高レベルであるSUS430とSUS304の中間（約40%）とし

◎は登録商標を示す。

た。もう一つの加工性の重要な指標である深絞り性については、1回冷間圧延工程で従来鋼の最高レベルである r 値 ≥ 2.0 とした。また耐リジグ性は、引張試験後のリジグ高さが $15\mu\text{m}$ 以下（成形試験後に軽微）であることとした。耐食性は、SUS430と同等以上とした。

3. 金属組織制御の考え方

3.1 加工性

一般にSi, Mn及びP等の不純物元素が鋼中に含まれることにより、引張強度は増加し、延性は低下することが知られている¹⁾が、フェライト系ステンレス鋼において各元素の延性への影響については、十分な知見がない。そこでフェライト系ステンレス鋼の延性（全伸び）に及ぼす種々の元素の影響を調査した。極低C, N-17Cr鋼を基本成分とし、Si, Ti及びP量を数水準変化させた鋼塊を実験室にて溶製し、熱間圧延後、冷間圧延及び焼鈍において0.5mm厚の鋼板を作製し、引張試験を実施した。図1に延性に及ぼすSi, Ti及びPの影響を示す。横軸の[]はmass%であり、各元素の係数は統計的処理により算出した。図より、いずれの元素も添加するほど延性は低下するが、特にPが延性に及ぼす影響が大きいことが分かる。

またフェライト鋼で深絞り性の指標である r 値を向上させるには、C, Nを低減し、且つそれらを析出物として固定することが有効である²⁾。そこで、極低炭素窒素化が可能な精錬設備（SUS-REDA³⁾）を用いて極低C, N化を図ることとした。またC, Nの固定元素としてはTi, Nb等があるが、 r 値向上効果が大きく、かつ強度増加の小さいTiを選定した。SUS-REDAを用いることでC, N量を低減可能なために、それを固定するTi添加量も低減でき、延性の点でも優位となる。

上記の検討結果を受け、P, Si, Mn量を通常のフェライト系ステンレス鋼に比べて低減し、C, Nを極力低減し、C, N固定にはTiを使う基本成分系を決定した。

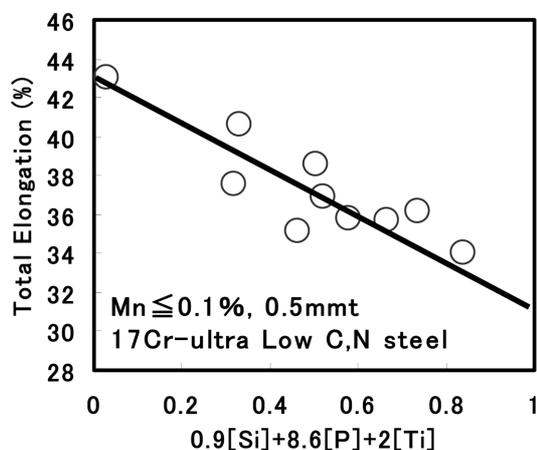


図1 17Cr極低C, N鋼の全伸びとSi, P, Ti量の関係
Relationship between total elongation and Si, P, Ti contents in 17Cr-ultra low C, N steels

3.2 耐リジグ性

一般的にフェライト系ステンレス鋼においてC, N等を低減した場合、耐リジグ性は劣化することが知られている。これは、C, N等の不純物低減により凝固組織が粗大化し、この粗大粒がコロニーとして残存し、リジグの成因^{4,5)}となるためである。したがってリジグの発生を抑えるためにはコロニーを分断（細分化）する必要がある。極低C, Nのフェライト系ステンレス鋼のコロニーを分断するには再結晶を活用する必要がある。一般的に冷間圧延、焼鈍を複数回繰り返す、圧延—再結晶を複数回実施することでコロニーは分断し、耐リジグ性は向上することが知られている。しかし、冷間圧延、焼鈍を繰り返すいわゆる2回冷間圧延法では製造コストが大きく増加する。そこで著者らは1回冷間圧延法で製造途中に複数回の再結晶組織を得るための方法として、熱間圧延途中に一度完全再結晶組織を得る新たな金属組織制御法を考案した。再結晶は初期粒径及び圧延条件の影響を受けることが知られている^{6,7)}ため、“凝固組織の制御（微細化）”と“粗圧延条件の最適化”により、熱間圧延途中（粗圧延後）に再結晶組織を得ることとした。

3.2.1 凝固組織の制御

凝固組織を微細化するためには、低温鋳造、電磁攪拌、非金属介在物添加等が有効であることが知られている。著者らは安定的に凝固組織を改善できる方法を検討し、異質核生成を活用した凝固組織微細化法を検討した。種々の非金属介在物による凝固組織への影響を調査した結果、複数の非金属介在物の組み合わせにより、極めて効果的に凝固組織制御しうることを明確にした。凝固組織制御の考え方を図2に模式的に示す。従来鋼種においては溶鋼中に酸化物が存在しているがフェライト相の凝固核としてはたらないため、柱状晶組織が形成する。これに対し、開発した方法は、溶鋼中に微細なAl-Mg-Ti系酸化物を分散し、その酸化物を核として溶鋼中にTiNを晶出させ、TiNを核としてフェライト相を凝固させる方法であり、本組織制御により微細な等軸晶組織が得られる。このような複層化合物

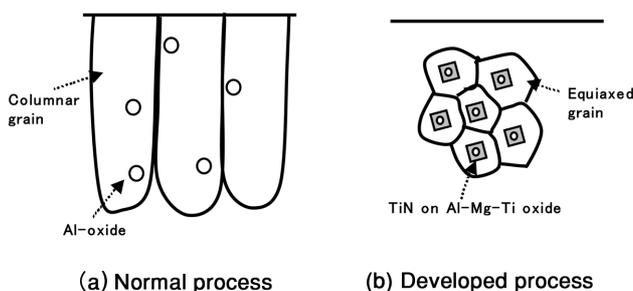


図2 酸化物と凝固組織の関係を示す模式図
(a)通常プロセス, (b)開発プロセス

Schematic figures showing relations between oxides and solidification structures

をフェライト相の凝固核とすることで少量の Ti 量で凝固組織微細化を達成することが出来た。

3.2.2 粗熱間圧延条件の最適化

熱間圧延再結晶挙動に及ぼす加工条件の影響を調査した。熱間加工フォーマスタにより、図3のような熱加工パターンを基本条件とし、歪、歪速度、温度を変化させた。また加工前の加熱温度を変化させることで初期粒径の影響を調査した。加工後の時間を変化させて保持後に水冷し、再結晶率を調査することで、50%再結晶時間 ($t_{0.5}$ (s)) に及ぼす加工温度条件を明確にし、下記の再結晶式を得た。

$$t_{0.5} = 8.4 \times 10^{-11} \cdot d_0^1 \cdot \epsilon^{-1.5} \cdot \epsilon'^{-0.4} \cdot \exp(Q/RT)$$

ここで、 d_0 : 初期結晶粒径 (μm)、 ϵ : 歪、 ϵ' : 歪速度 ($1/s$)、 Q : 活性化エネルギー (200kJ/mol)、 R : 気体定数、 T : 温度 (K) である。この再結晶式を用いて粗熱間圧延後に再結晶組織を得るための粗熱間圧延条件を検討した。

前述の“凝固組織の制御”と“粗熱間圧延条件の最適化”を組み合わせたときの粗熱間圧延後の金属組織を図4に示す。(a)通常プロセスでは圧延方向に展伸した未再結晶組織が多く残存しているのに対して、(b)開発プロセスでは完全再結晶組織となっている。次にこのような粗熱間圧延組織を用いて、更に仕上げ圧延、熱間圧延板焼鈍した後の結晶粒の存在分布を図5に示す。 $\langle 100 \rangle$ 方位粒が連なったコロニーがリジニングの成因となることが知られている⁶⁾ため、図は板面方向に平行な面における板面方向に $\langle 100 \rangle$

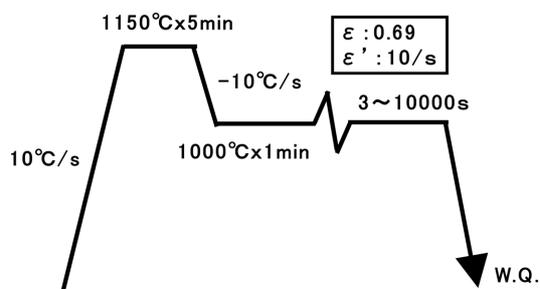


図3 実験条件
Experimental conditions

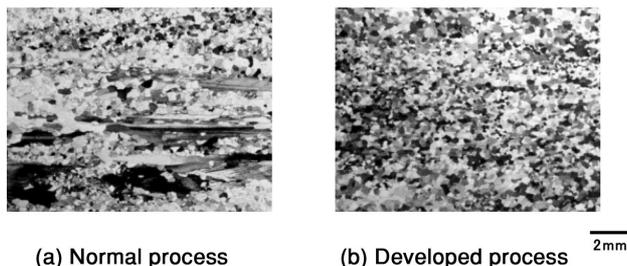


図4 粗熱延後の光学顕微鏡組織
(a)通常プロセス, (b)開発プロセス
Optical micrographs after rough-rolling

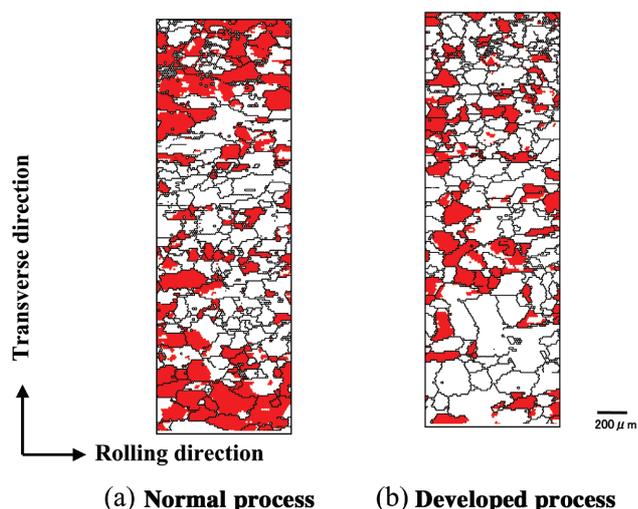


図5 熱間圧延焼鈍板の結晶方位分布 (赤は板面に $\langle 100 \rangle \pm 15^\circ$ の結晶粒) (a)通常プロセス, (b)開発プロセス
Orientation image mapping (OIM) of specimens after hot-band annealing (red areas show grains having $\langle 100 \rangle \pm 15^\circ$ from normal direction)

$\pm 15^\circ$ が向いた結晶粒を赤で図示した。(a)通常プロセス及び (b) 開発プロセスともに再結晶組織であり結晶粒の形状はほぼ等軸であるが、結晶方位分布は大きく異なる。すなわち、(a) 通常プロセスでは $\langle 100 \rangle$ 粒が圧延方向に連なって存在しているのに対し、(b) 開発プロセスでは $\langle 100 \rangle$ 方位粒の面積率が (a) 通常プロセスに比べて低く、圧延方向への連なりは認められない。

このように従来プロセスでは、熱間圧延途中(粗熱間圧延後)に未再結晶粒が存在し、この結晶粒から熱間圧延板焼鈍時に再結晶した場合、類似方位を有する組織となったと推定される。一方、開発プロセスでは、熱間圧延途中(粗熱間圧延後)に再結晶組織となり、これが仕上げ圧延時に結晶回転して比較的ランダムな再結晶方位粒が得られたと考えられる。

また、本開発プロセスは耐リジニング性だけでなく r 値の向上にも寄与している。 r 値を向上させるには、冷間圧延前の金属組織を微細かつ高 r 値の集合組織とすることが好ましい⁸⁾。ND// $\langle 100 \rangle$ 方位粒は r 値が低い方位であることに加え、比較的結晶粒径が大きい。したがってND// $\langle 100 \rangle$ 粒の面積率を低減する本プロセスを用いた場合、冷間圧延前の金属組織は、結晶粒径及び集合組織のいずれの点においても高 r 値化に好ましい組織である。本組織制御により、後述のような高 r 値が得られる。

このように精錬、鋳造、熱間圧延、冷間圧延及び焼鈍の一貫工程での組織制御により、製造工程を増やすことなく製造途中の再結晶を促進し、コロニーの分断ならびに r 値に好ましい冷間圧延前組織の形成を同時に達成した。

4. 開発鋼の成分及び各種特性

開発鋼の成分代表例を表1に示す。SUS430に比べてC、

表1 NSSC PDX, SUS430LX及びSUS430の化学組成 (mass%)
Chemical compositions of NSSC PDX, SUS430LX and SUS430 (mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	N
NSSC PDX	0.003	0.06	0.12	0.014	0.002	16.5	0.16	0.009
SUS430LX	0.012	0.25	0.82	0.023	0.008	16.3	0.37	0.012
SUS430	0.051	0.49	0.59	0.027	0.005	16.8	-	0.025

表2 NSSC PDX, SUS430LX及びSUS430の機械的特性, 硬度及び平均 r 値
Mechanical properties, hardness and average r value of NSSC PDX, SUS430LX and SUS430

Steel	0.2PS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)	Ave. r value
NSSC PDX	237	370	38	130	2.0
SUS430LX	270	416	33	133	1.7
SUS430	319	486	28	151	1.1

N, Si, Mn及びPを低減しており, C及びNを固定するのに十分なTiを添加している。次に板厚1.0mmの2B材の機械的特性を比較鋼 (SUS430LX 及び SUS430) の結果と併せて表2に示す。開発鋼の製品伸びは38%と, 従来のフェライト系ステンレス鋼に比べて極めて高い値を示す。r値は2.0と極めて高く, 比較鋼に比べて0.3以上も高い。次に実験室の小型プレス試験機で成形加工性を調査した。各鋼種の成形限界絞り比をTZP試験により測定した結果を図6に示す。図中にはSUS304のレベルを併せて示した。

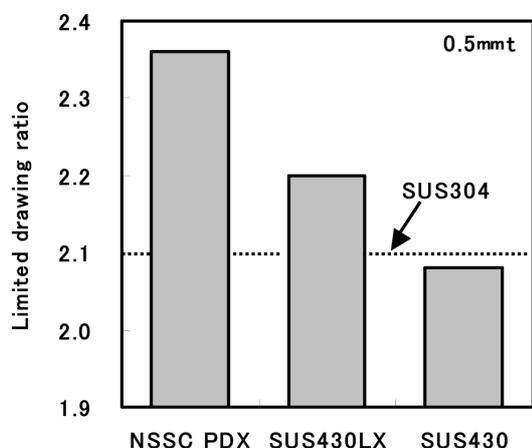
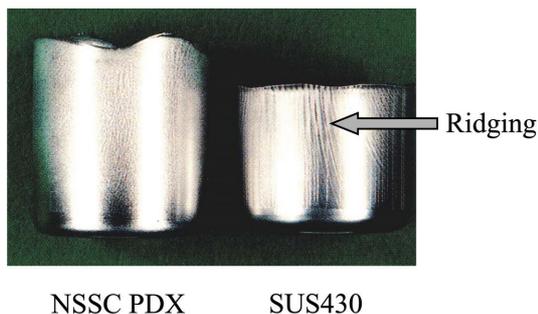


図6 NSSC PDX, SUS430LX及びSUS430の成形限界絞り比
Limited drawing ratio of NSSC PDX, SUS430LX and SUS430



NSSC PDX SUS430

図7 円筒深絞り成形試験後のサンプル
Samples after cylindrical drawing tests

開発鋼の成形限界絞り比は従来のフェライト系ステンレス鋼及びSUS304に比べて高い。以上のように開発鋼は, 延性, r値及び成形限界絞り比のいずれにおいても比較鋼に比べて極めて高い加工性を有することが確認された。

次に耐リジング性を評価した。開発鋼及びSUS430を成形限界絞り比で円筒深絞り成形したサンプルの外観を図7に示す。SUS430では壁部にリジングが発生しているのに対し, 開発鋼SUS430に比べて成形高さが高いにもかかわらず, リジングは極めて軽微である。このように開発鋼は前述の加工性に加えて優れた耐リジング性を示すことが確認された。

また耐食性は, 複合サイクル腐食試験にて評価し, 開発鋼はSUS430に比べて良好な耐食性を示すことが確認された。

以上のように, 極低C, N化を可能とする精錬技術に加え, 精錬, 凝固, 熱間圧延, 冷間圧延及び焼鈍の一貫工程における金属組織制御技術を確立し, 高加工性と良好な耐リジング性を両立した高加工性フェライト系ステンレス鋼NSSC PDXを開発した。

5. 開発鋼の適用状況

開発鋼NSSC PDXは, その良好な加工性を活かして従来のフェライト系ステンレス鋼では加工が困難な部材に適用され始めている。図8に燃焼機器部品として適用された



図8 プレス成形サンプル
An example of press forming

例を示す。本部品は従来カシメ構造であったが、NSSC PDXの適用により、一体成形が可能となった。成形加工後に割れは無く、リジグも認められない。また近年、本鋼種の耐力が低い特徴とクリア皮膜による表面色調との組み合わせにより冷蔵庫のパネル材としても適用されている。さらに該鋼種をフレキシブル管に成形し、エアコンディショナー接続用などの配管としての利用が検討され始めている。これらのようにNSSC PDXはその特長を活かし、様々な部品へ適用されている。

6. 結 言

フェライト系ステンレス鋼の中で最高レベルの加工性と良好な耐リジグ性を両立した鋼種の開発を検討した。加工性についてはP, Si, Mnを極力低減し、さらに高純化精錬によりC, Nを極力低減してTiの添加量も最低限に抑えることで延性の向上を図った。またC, Nの低減及び冷間圧延前組織の微細ランダム化により深絞り性を向上させた。耐リジグ性は、凝固組織微細化技術の確立及び熱間圧延条件の最適化を組み合わせることで熱間圧延途中の再

結晶組織化を達成し、工程の付加無く良好な耐リジグ性を得ることができた。このようにして開発された高加工性フェライト系ステンレス鋼NSSC PDXは、従来、フェライト系ステンレス鋼が使用されてこなかった高加工性が必要な部材に適用され始めており、今後もその広がりが期待される。

参考文献

- 1) 山田輝昭 ほか:鉄と鋼. 79(8), 973(1993)
- 2) 例えば, ステンレス協会編:ステンレス鋼便覧第3版. 日刊工業新聞社, 1995
- 3) 菅野浩至 ほか:材料とプロセス. 12, 747(1999)
- 4) Chao, H.: Trans. ASM Quat. 60, 37(1967)
- 5) Wright, R.N.: Met. Trans. 3(1), 83(1972)
- 6) Tsuji, N. et al.: ISIJ Int. 33, 783(1993)
- 7) 木村謙 ほか:CAMP-ISIJ. 10, 1204(1997)
- 8) 瀬沼武秀:再結晶・集合組織とその組織制御への応用. (社)日本鉄鋼協会, 材料と組織の特性部会, 再結晶・集合組織研究会編. 1999, p.227



木村 謙 Ken KIMURA
新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主任研究員
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511
TEL:(0439)80-2884



高橋明彦 Akihiko TAKAHASHI
新日鐵住金ステンレス(株) 研究センター 薄板・自動車材料研究部 部長 (現 研究センター長) 上席研究員 工博