

技術論文

極軟質高加工性オーステナイト系ステンレス鋼NSSC® 304JSの開発

Development of NSSC® 304JS, Ultra-soft Austenitic Stainless Steel Providing Excellent Formability

秦野正治*
Masaharu HATANO

高橋明彦
Akihiko TAKAHASHI

抄 録

NSSC 304JSの材質設計の考え方、二次加工性を有効に発現する合金設計の検討結果、実機材の諸特性、実用化の状況についてまとめた。特に、Mn添加の効果に着目し、二次加工性が有効に発現する加工組織を詳細に検討した。NSSC 304JSは、既存のSUS304やSUS304J1Lと比較すると、極軟質、高加工性、着磁性低減といった特長を有しており、二次加工あるいは多段深絞り用途に適している。このような特長を生かし、高い加工性が要求される自動車用部品や厨房製品、家電部品等で実用化されている。

Abstract

In this paper, we first describe the designing chemical compositions of NSSC 304JS, we investigated the influence of Mn contents and deformation microstructures on the formability in detail. Finally, we introduce several properties and applications of NSSC 304JS steel sheets. This steel has an ultra soft hardness and excellent deep drawing formability, reducing of α' phase induced by cold-forming in comparison with conventional SUS304 and SUS304J1L steel. This steel is suitable for many applications using such as stretch flanging after cold-forming and deep drawing. This steel sheet is used for automotive parts and deep drawing cups, electric parts based on the several formability of NSSC 304JS.

1. 緒 言

SUS304やSUS304J1Lに代表される準安定オーステナイト(γ)系ステンレス鋼は、耐食性と加工性のバランスに優れることから、広範囲の加工用途に使用されている。このような準安定 γ 系ステンレス鋼は、加工誘起マルテンサイト(α')の生成により高延性を有し、張り出し性に優れる一方、深絞り性や二次加工性には課題がある。

近年、加工方法は多様化し、二次加工や過酷な深絞り加工が施される場合、準安定 γ 系ステンレス鋼を適用できないこともある。例えば、多段深絞り加工や深絞り後にスピニングあるいは張り出しの二次加工を行う用途では、素材の軟質化と加工硬化の抑制に加え、加工組織を二次加工性が有効に発現するように制御することが重要になる。素材の軟質化と加工硬化の抑制には、 γ の固溶強化元素であるCやNを精錬技術の革新により低減するとともに、 γ 安定度を高めて α' の生成を抑制する必要がある。そこで本研究では、CやNを低減した極軟質 γ 系ステンレス鋼の二次

加工性に及ぼす γ 生成元素であるMn, Cu, Niの影響について、省資源、経済性の観点から特にMnの活用に注目した検討を行った。

上述した背景から新日鐵住金ステンレスでは、Mn, Cu, Niの添加量を調整し、二次加工性が極大化する α' の生成と γ 自体の加工硬化の組み合わせを最適化した極軟質高加工性 γ 系ステンレス鋼NSSC® 304JS^{*1}を開発した。本稿では、NSSC 304JSの材質設計の考え方、二次加工性を有効に発現する合金設計の詳細な検討結果、実機材の諸特性、実用化の状況について述べる。

2. 材質設計の考え方

図1は、NSSC 304JSの成分設計についてC+Nと M_{d30} により既存鋼と比較したものである。 M_{d30} は、加工誘起マルテンサイト(α')の生成のしやすさを示す指標¹⁾としてよく知られている。ここでは実験式の一例として下式²⁾を用いた。 M_{d30} は小さいほど γ 安定度が高く、 α' の生成を

^{*1} ®は、登録商標を示す。

抑制する。

$$M_{d30} (\text{°C}) = 551 - 462(\%C + \%N) - 9.2(\%Si) - 8.1(\%Mn) - 13.7(\%Cr) - 29(\%Ni + \%Cu) - 18.2(\%Mo)$$

C + Nは、SUS304 (汎用鋼 18Cr-8Ni), 18Cr-9Ni (器物絞り用 SUS304), SUSXM7 (9Ni-3Cu) へと順次低下し、加えてM_{d30}もγ生成元素であるNiやCuの添加により小さくなる。NSSC 304JSは、素材の軟質化のために、C + Nを精錬技術の革新により極低減した。M_{d30}は、α'の生成を抑制するために、準安定γのSUS304J1L (低Ni, Cu添加) に対してMn添加により18Cr-9Ni鋼と同等とした。上述した成分設計により、NSSC 304JSは、既存鋼に対してC +

Nを低減して軟質化と成形性全般の改善^{3,4)}, Mnの活用によりγ安定度を高めて深絞り性の向上を指向した。

二次加工性の発現と加工組織制御の考え方を模式図に示して、図2に示す。二次加工性の支配因子として、α'の生成によるTRIP (変態誘起塑性) とγ自体の加工硬化が挙げられる。図は、TRIPとγ自体の加工硬化の大きさについて、横軸を積層欠陥エネルギーで表記して概念的に描いている。図中の数値は、二次加工性の評価指標とした40%冷間圧延後の穴拡げ率を示している。図のターゲット領域に示すように、TRIPとγ自体の加工硬化との組み合わせにより、二次加工性 (穴拡げ率) が極大化する合金設計^{5,6)}を完成させた。詳細な検討内容は、4章にて後述する。

3. 実験方法

まず、二次加工性を有効に発現させる合金設計を調べるために行った実験方法について述べる。極低C, N-17Cr鋼でMn, Cu, Ni量を表1に示す範囲で変化させた供試材を真空溶製した。得られた鋼塊は、熱間圧延にて5mm厚の熱間圧延板とし、1050℃, 60秒の熱間圧延焼鈍を行い、1.5mm厚まで冷間圧延した。1000℃, 60秒の焼鈍により1.5mm厚の冷間圧延焼鈍板を作製してビッカース硬さ測定、二次加工性の評価に供した。二次加工性は、冷間圧延焼鈍板を40%冷間圧延後に10mm径の切削穴を頂角60°円錐ポンチで穴拡げし、試験前後の穴径の増加比 (穴拡げ率: λ) により評価した。α'量は、フィッシャー製フェライトメータで測定した。また、加工組織は、穴拡げ試験片から薄膜試料を採取してTEM観察した。

次に、上述の検討結果を反映して実機製造したNSSC 304JSの諸特性について評価した。JIS13号B引張試験により機械的性質を調べ、加工性はJIS Z 2247に準拠するエリクセン試験および液圧バルジ試験により評価した。多段深絞り性は、初期blank径96mmでポンチ径22, 25, 30, 35, 40, 44, 48mmの7段円筒深絞り試験を行い、時期割れが発生する限界絞り比を評価した。角筒絞り性は、初期blank 220mm角でポンチ103mm角、しわ押さえ40tで角筒絞りを行い、板厚分布、着磁性を既存γ鋼と比較評価した。着磁性は、角筒絞り品のα'量をフィッシャー製フェライトメータで測定して評価した。耐食性は、温度20~80℃, Cl⁻濃度20~20000ppmの範囲で変化させた孔食電位測定試験 (方法JIS G 0577準拠) により評価した。

4. 実験結果, 考察

ここでは、二次加工性を有効に発現する合金設計を検討

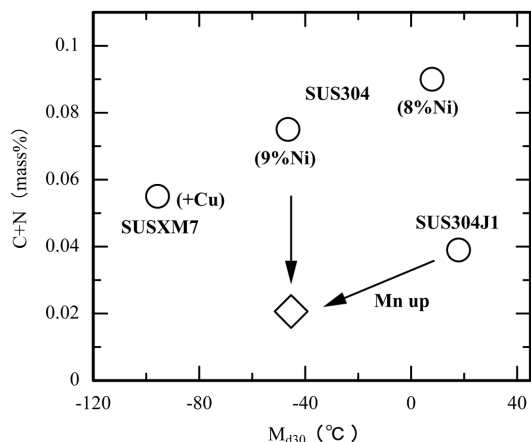


図1 NSSC 304JSの成分設計

Schematic illustration of the designing chemical compositions of NSSC 304JS

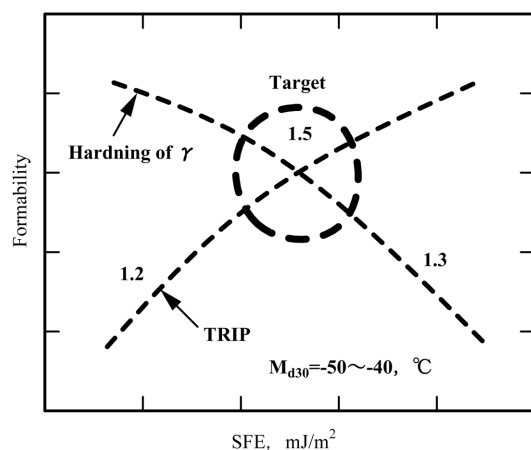


図2 二次加工性の発現と加工組織制御の考え方

Schematic illustration of the basic idea for deformation microstructure and formability

1.2, 1.3, 1.5 : Stretch flanging ratio after 40% cold rolling

表1 供試材の成分 (mass%)
Chemical compositions of specimens (mass%)

C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	N	M _{d30}
0.005 - 0.010	0.35 - 0.45	1.4 - 4.4	7.0 - 9.5	1.6 - 4.0	17.0 - 17.7	0.010 - 0.014	-15.0 - -50.0

$$M_{d30} (\text{°C}) = 551 - 462(C + N) - 9.2Si - 8.1Mn - 13.7Cr - 29(Ni + Cu) - 18.2Mo$$

した詳細な結果について述べる。

M_{d30} と二次加工性の評価指標とした穴抜け率(λ)との関係を図3に示す。素材の硬さは、いずれもHv130程度となるように調整した。 λ は、白丸のプロットに着目すると M_{d30} の低下により上昇し、 -20°C から -40°C の特定範囲において極大値を示している。このような λ の挙動は、従来の報告^{4,7)}と類似する。ここで注目すべきは、 $M_{d30} \doteq -30^{\circ}\text{C}$ 付近にある白丸と黒丸の λ が大きく異なっていることである。これらの結果は、二次加工性の発現に対して、 M_{d30} と素材の硬さに加えて、第3の因子として合金元素により変化する加工組織の存在について示唆している。

図3の実験結果を残留 γ 量により整理した結果を図4に示す。残留 γ 量は、穴抜け試験後の破断部近傍から測定した α' 量を差し引いた値とした。図中には、各合金のMn量と M_{d30} を併記した。残留 γ 量はMn量の上昇とともに増加し、 λ の極大値をとる残留 γ 量が存在する。 $M_{d30} \doteq -30^{\circ}\text{C}$

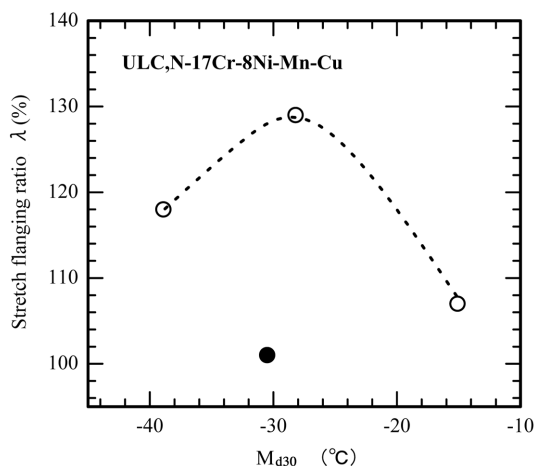


図3 M_{d30} と穴抜け率(λ)の関係

Stretch flanging ratio after 40% cold rolling dependence on a M_{d30} -stability of austenitic stainless steels

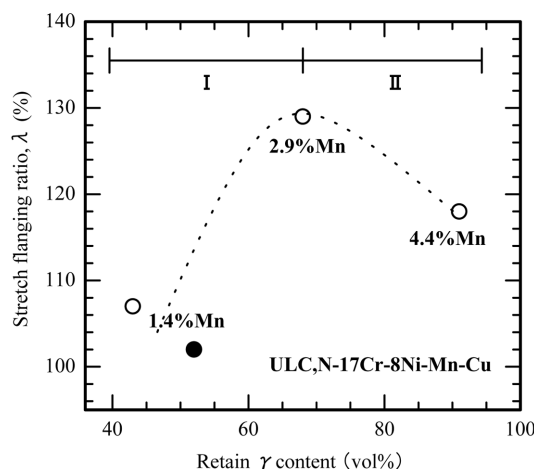


図4 残留 γ 量と λ の関係

Effects of retain γ content on the stretch flanging ratio after 40% cold rolling

M_{d30} ($^{\circ}\text{C}$), ○: 1.4%Mn= -15 , 2.9%Mn= -28 , 4.4%Mn= -38
 M_{d30} ($^{\circ}\text{C}$), ●: 1.4%Mn= -31

$^{\circ}\text{C}$ に注目すると、Mn量を高めた方が、残留 γ 量は増加し、 λ は上昇している(黒丸: 1.4%Mn, 白丸: 2.9%Mn)。すなわち、Mnの作用として、 M_{d30} のみかけより40%冷間圧延後の α' を抑制して λ を上昇させる結果が得られた(図4の領域I)。

図4の整理から、残留 γ 量が44~77%の範囲において、 λ は残留 γ 量に比例する。つまり、極低C、N系 γ 鋼において、 λ の上昇に対する γ の寄与は大きいと言える。そこで、 λ の影響因子として、 α' の生成によるTRIPに加えて、 γ 自体の加工硬化能を考慮し、 λ を(1)式のように記述した。

$$\lambda = X + Y \quad (1)$$

X: α' の生成によるTRIP, Y: γ 自体の加工硬化

(1)式の仮定のもとで、表1に示すMn, Cu, Ni量の異なる鋼から得られた実験結果を用いてパラメータX, Yに対する各合金元素の係数を回帰分析した。得られた解析結果を(2)式と図5に示す⁸⁾。

$$\lambda = 14.1A + 15.0B - 23.5 \quad (2)$$

$$A = 13.3 - (\text{Mn} + \text{Ni} + 0.72\text{Cu}),$$

$$B = \text{Mn} + 0.91\text{Ni} - 0.78\text{Cu}$$

単位: λ (%), 成分 (mass%)

(2)式において、14.1Aは α' 量であり、 γ 生成元素であり α' の生成を抑制するMn, Cu, Niは負の係数を持つ。他方、15.0Bは、 γ 自体の加工硬化能に対応する。正の係数を持つMn, Niは穴抜け破断部近傍で γ 相の加工硬化を高め、逆に負の係数を持つCuは γ 相の加工硬化を抑制すると解釈できる。ここで、Niは、Crに次ぐ本合金の構成元素($\geq 7\%$)であり、本解析では添加元素の作用としてMnとCuの相違について着目することにした。すなわち、本解析結果は、二次加工性の発現に係る高歪域におい

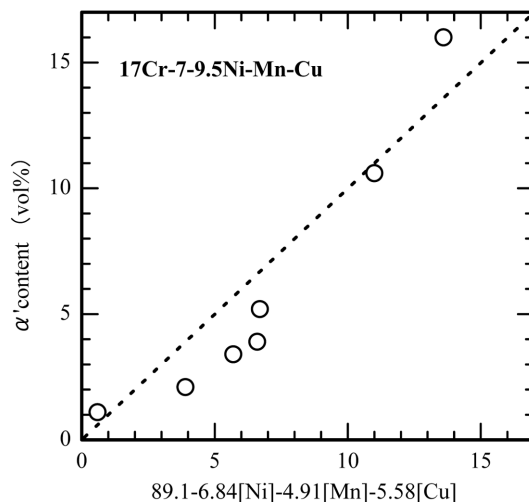


図5 λ に対するNi, Mn, Cuの回帰分析結果

Effects of Ni, Mn, Cu on the stretch flanging ratio after 40% cold rolling

$A = 13.3 - (\text{Mn} + \text{Ni} + 0.72\text{Cu}), B = \text{Mn} + 0.91\text{Ni} - 0.78\text{Cu}$
 (mass%)

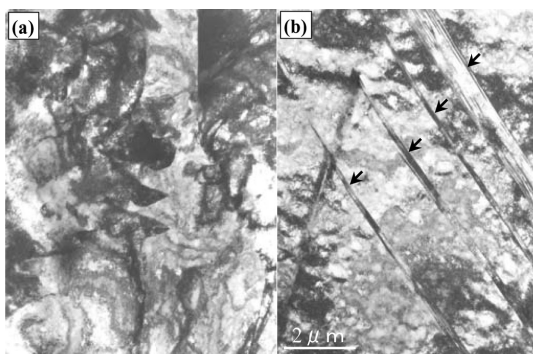


図6 穴抜け試験破断部近傍の薄膜TEM組織
Bright field TEM images of 1.4%Mn(a) and 2.9%Mn steels (b) shown in Fig.4

A tin foil sample was taken from the area close to the fracture portion in the fractured stretch flanging specimen after 40% cold rolling

て、Mnは積層欠陥エネルギーを低下させて γ 自体の加工硬化能を向上させる、Cuはその逆の作用を意味している。積層欠陥エネルギーを低下させるMnの作用はE.B.Pickering⁹⁾、積層欠陥エネルギーを高めるCuの作用についてはD.Dulieuら¹⁰⁾の報告がある。

本解析結果に基づいて、図4の領域Iにおける λ の上昇はMn添加により γ 自体の加工硬化能が向上したことが、領域IIでの λ の低下は α' 量 (TRIP) の低下によると推論する。

上述したMnによる高歪域での積層欠陥エネルギーの低下に対する組織要因を検証するために、加工組織のTEM観察を行った。図4で示した1.4%Mn鋼と2.9%Mn鋼において、穴抜け破断部近傍の薄膜TEM組織を図6に示す。1.4%Mn鋼は、転位の粗密からなるセル組織を有する。他方、2.9%Mn鋼は、セル組織に加えて、矢印で示すような特徴あるバンド状組織の出現が観察された。これらバンド状組織は γ 双晶に由来することを確認した。 γ 系の加工組織は、積層欠陥エネルギーの低下により、プラナーな転位配列になりやすく¹¹⁾、 γ 双晶も出現しやすくなることが知られている¹²⁾。従って、観察された加工組織の変化は、Mn添加による積層欠陥エネルギーの低下に基づくものと考えられる。言い換えると、Mn添加による γ 自体の加工硬化能の向上は、高歪域で出現する γ 双晶による効果であると判断する。

5. NSSC 304JS の諸特性

ここでは、4章に述べた詳細な検討結果に基づいて合金設計したNSSC 304JS実機製造材の特長ある諸特性について述べる。

NSSC 304JSの代表的な化学成分を表2に示す。17%Cr-8%Niを主成分として、C、N等の不純物元素を徹底低減し、極軟質化、二次加工性の発現のためにMn、Cuを添加している。1.5mm厚冷間圧延鋼板の機械的性質を表3に示

表2 NSSC 304JSの成分 (mass%)
Chemical compositions of NSSC 304JS (mass%)

C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	N
0.009	0.46	2.7	8.0	2.7	17.4	0.011

表3 機械的性質

Mechanical properties of NSSC 304JS and SUS304 steel sheets

	0.2%PS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	EL (%)	Hv (49N)
NSSC 304JS	201	492	59	109
SUS304	274	680	59	170

JIS products, 2D finish

している。SUS304と比較すると、0.2%耐力は約200N/mm²、引張強さ約490N/mm²、硬さHv109の極軟質化を達成するとともに高い伸びを有している。

以下に、3章の実験方法に従って評価した本鋼の加工性等について順じ示していく。冷間圧延後の穴抜け試験は2D仕様1.5mm厚鋼板、各種プレス成形試験等は2B仕様0.8mm厚鋼板を使用した。

冷間圧延後の穴抜け試験結果を図7に示す。本鋼の穴抜け率は極めて高く、冷間加工後においてもSUS304の2倍程度の値を維持している。すなわち、本鋼は、本開発の目的である優れた二次加工性を有している。

代表的な加工特性を表4に示す。n値は、SUS304と比べて十分小さく、加工硬化を抑制している。他方、純粋張

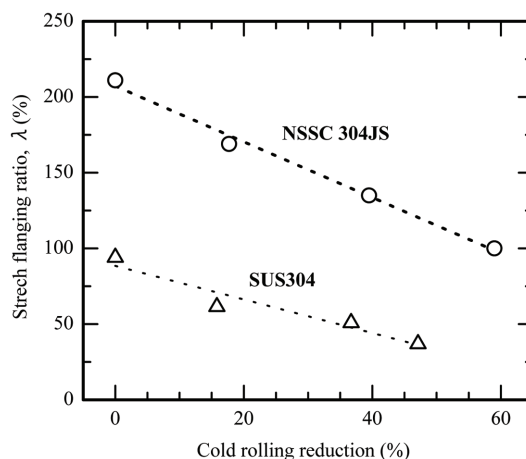


図7 冷間圧延後の穴抜け率
Stretch flanging ratio after cold rolling of NSSC 304JS and SUS304 steel sheets

表4 加工特性
Formability of NSSC 304JS and SUS304 steel sheets

	n-value	n-value	Erichsen heigh (mm)	Bulge heigh (mm)
NSSC 304JS	0.39	0.98	13.5	42.2
SUS304	0.49	0.97	13.4	40.3

JIS products, 2B finish

り出し性の指標である液圧バルジ高さは、極軟質化の効果と高い伸びを反映してSUS304よりも高い値を有している。

多段深絞り性を表5 および試験後の外観を図8に示す。SUS304は総絞り比2.4の3段深絞り後に時期割れを生じる。他方、本鋼は総絞り比4.4の7段深絞り後においても時期割れを生じず、耐時期割れ性は極めて優れている。多段深絞り性の大幅な向上は、極軟質化とMn添加による γ 安定度の上昇に基づくと理解できる。

角筒絞り試験後の外観と板厚変化率を図9に示す。試験後の板厚は、外観に記載する頭からフランジにかけて測定

表5 多段深絞り性

Deep drawing formability of NSSC 304JS and SUS304 steel sheets

Punch (mm)	48	44	40	35	30	25	22
Die (mm)	51	47	43	38	33	28	25
L.D.R.	2.0	2.2	2.4	2.7	3.2	3.8	4.4
NSSC 304JS	○	○	○	○	○	○	○
SUS304	○	○	▲				

○ : No cracking ▲ : Delayed cracking
JIS products, 2B finish

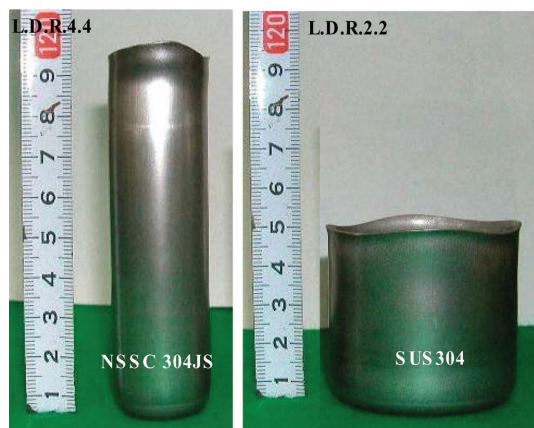


図8 多段深絞り後の外観

Limited deep drawing height of NSSC 304JS and SUS304 steel sheets

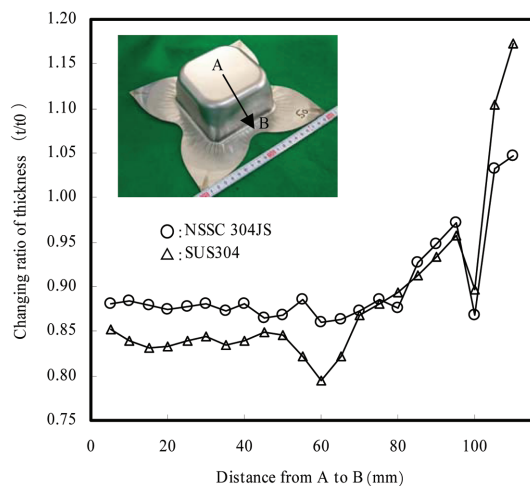


図9 角筒絞り試験後の板厚変化率

Changing ratio of thickness after square-deep drawing of NSSC 304JS and SUS304 steel sheets

した。板厚変化率は、試験後の板厚:tを素材の板厚:t₀で減じることで規格化した。本鋼は、角筒絞り加工後の板厚変化率がSUS304と比較して小さい。すなわち、成形加工で生じる板厚変動が小さく、より塑性変形の均一性が高いという特長を有している。同試験後の α' 量の測定結果を図10に示す。 α' は磁性相、 γ は非磁性相である。すなわち、本鋼は、成形加工後の磁性がSUS304と比較して著しく小さい特長を持つ。

温度とCl⁻濃度を変化させた孔食電位測定結果を図11に示す。各測定環境下で孔食電位Vc' 100 (Vv.s.AgCl)が0.2V以上となる領域を実線で表記した。0.2Vは、水洗い清浄前提でステンレス鋼の腐食が抑制される電位と判断できる。図中には、本鋼に加えて、SUS304, SUS304J1L, SUS430の測定結果も記した。本鋼の耐孔食性は、海水以

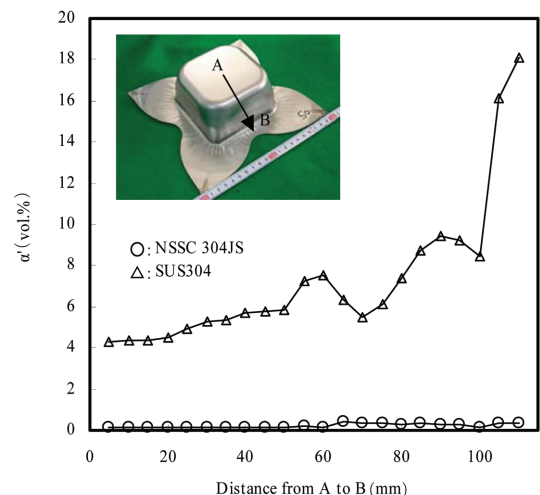


図10 角筒絞り試験後の α' 体積率

Amount of α' phase induced by square-deep drawing of NSSC 304JS and SUS304 steel sheets

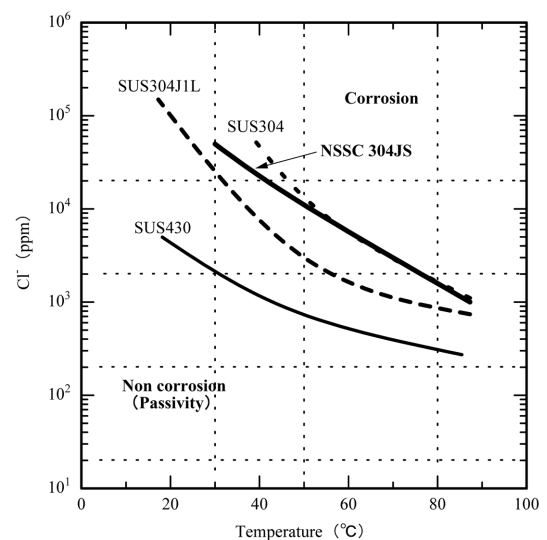


図11 孔食電位の測定結果

Change in pitting potential area above 0.2V (Vv.s.AgCl.) of NSSC 304JS, SUS304, SUS304J1L and SUS430 with Cl⁻ and temperature

上の塩分濃度範囲を除いてSUS304と同等であり、SUS304J1Lより優位にある。

上述したように、NSSC 304JSは、極軟質で二次加工性ならびに多段深絞り性等のプレス加工性に優れることから、多工程の複雑形状あるいは深絞り用途に適する材料である。また、成形加工後の着磁性を低減したい用途にも適している。本鋼への高潤滑塗装により、さらに高い加工性を実現することも可能⁹⁾である。本鋼は、このような特長を生かし、高い加工性が要求される自動車用部品や厨房製品、加工後の着磁性を低減したい家電部品等で実用化されている。

6. 結 言

本稿では、NSSC 304JSの材質設計の考え方、二次加工性を有効に発現する合金設計の詳細な検討結果、実機材の諸特性、実用化の状況についてまとめた。

NSSC 304JSは、高歪域で発現するMnの特長ある効果を活用し、 α' の生成と γ 自体の加工硬化の組み合わせで二次加工性が極大化する合金設計を完成させた。本鋼は、極軟質、高加工性、着磁性低減といった特長を有してお

り、今後、更に多様な加工用途への適用が期待される。

参照文献

- 1) 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, 東京, 1995, 554p
- 2) 野原清彦, 小野寛, 大橋延夫:鉄と鋼. 63, 772(1977)
- 3) 荒川基彦, 住友秀彦:鉄と鋼. 65, 472(1979)
- 4) 伊藤直哉, 鋸屋正喜, 横山賢治, 石山成志:日本ステンレス技報. 13, 1(1977)
- 5) 秦野正治 ほか:材料とプロセス. 17(3), 410(2004)
- 6) 高橋明彦, 秦野正治, 木村謙:塑性と加工. 46(530), 194(2005)
- 7) 鈴木聡, 田中秀記, 宮楠克久:材料とプロセス. 13(3), 552(2000)
- 8) 秦野正治, 高橋明彦:材料とプロセス. 19(6), 1163(2006)
- 9) Pickering, E.B.:Stainless Steel '84, The Inst. of Metals, London, 1984, p2
- 10) Dulieu, D., Nutting, J.:Met.Trans. 2, 140(1968)
- 11) Remy, L., Pineau, A.:Materials Science and Engineering. 28, 9(1977)
- 12) Kurdjumov, G.V.:Fiz. Met Metalloved. 42, 527(1976)



秦野正治 Masaharu HATANO
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 主任研究員 工博
山口県光市大字島田 3434 〒743-8550
TEL:(0833)71-5110



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