

# 高純フェライト系ステンレス鋼の成形性におよぼす 材料特性と加工条件の影響

## Effect of Material Properties and Forming Conditions on Formability in High-Purity Ferritic Stainless Steels

石丸 詠一朗\*      高橋 明彦      小野 直人  
Eiichiro ISHIMARU      Akihiko TAKAHASHI      Naoto ONO

### 抄 録

高純フェライト系ステンレス鋼は、優れた耐食性と高r値を有しており適用範囲は拡大している。高純フェライト系ステンレス鋼の高r値特性を活用した最適な成形条件を選択することにより、SUS304と同等以上の成形性が得られることを明らかにした。すなわち、成形条件を変更することでn値の影響が大きい張り出し要素を低減し、r値の影響が顕著な深絞り要素を高める。また、フェライト系ステンレス鋼特有の加工硬化が少ないことから、打ち抜き穴での穴拡げ率はSUS304よりも良好な特性を示す。これは、打ち抜き穴加工時の加工硬化が僅かであるため変形能の低下が少ないことと高r値による良好な局部伸びに起因している。

### Abstract

Applications of high-purity ferritic stainless steels are expanding, because of the steels' excellent corrosion resistance and high r-value. This report shows that high-purity ferritic stainless steels present satisfactory formability better than SUS304 by selecting forming conditions to utilize the high r-value characteristic. It is desirable to change forming conditions from n-value dependent budge forming to r-value dependent drawing. Moreover, high-purity ferritic stainless steels indicate hole expanding ratio better than SUS304. The reasons are: 1) less deterioration of formability resulting from lower work-hardening at the time of hole punching, 2) good local elongation by high r-value.

## 1. 緒 言

フェライト系ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼に比べ、Niを含有しないため安価であり応力腐食割れ感受性が低いなどの優れた特性を有している。フェライト系ステンレス鋼の適用拡大は、昨今の省資源化の動きと一致しており、今後大幅な進展が見込まれる。しかしながら、ステンレス鋼の用途は複雑な形状へ変化しており、高延性で幅広い加工形状に対応可能なオーステナイト系ステンレス鋼からの転換は容易ではない。

一般にフェライト系ステンレス鋼の加工性を向上させる手段として、不純物元素(例えば、CおよびN)の低減や安定化元素のTi、Nbの添加<sup>1-5)</sup>が用いられる。これにより、延性およびr値向上<sup>6,7)</sup>が可能となり、優れた深絞り性が得られるためである。しかしながら、実プレス工程では絞

り以外の張り出しや伸びフランジ成形のような種々の塑性変形要素が存在する<sup>8,9)</sup>ため、最適な成形条件を選択する必要がある。このような背景を受け、フェライト系ステンレス鋼板の成形条件に関する研究が盛んに報告<sup>9-13)</sup>されている。

そこで、近年適用範囲が拡大している高純フェライト系ステンレス鋼NSSC® 180<sup>\*1</sup>を取り上げ、成形加工範囲を拡げるための成形条件や材料特性の影響について解析した結果を報告する。

## 2. 高純フェライト系ステンレス鋼 NSSC 180

### 2.1 NSSC 180の組成および機械的性質

NSSC 180の代表組成を一般的なステンレス鋼であるSUS304、SUS430と比較して表1に示す。NSSC 180の特

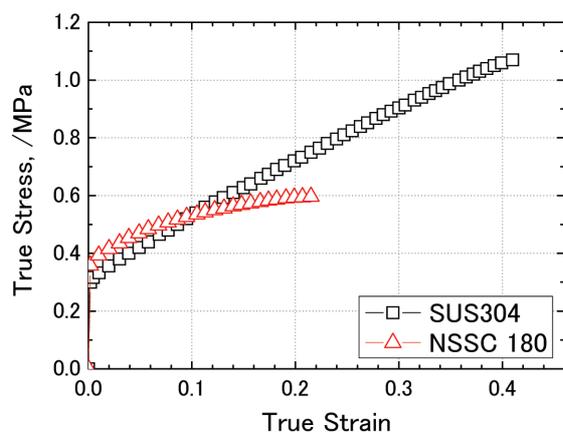
\*1 ®は登録商標を示す。

表1 代表組成 (mass%)  
Chemical composition

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Nb	N
NSSC 180	0.013	0.5	0.1	0.3	19.3	0.5	0.4	0.0115
SUS430	0.078	0.3	0.6	-	16.1	-	-	0.0293
SUS304	0.056	0.4	1.1	8.1	18.1	0.2	-	0.0374

表2 引張特性調査結果 (試験片: JIS13号B, RD)  
Results of tension test (specimen: JIS13B, RD)

	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	n-value
NSSC 180	331	505	31.4	0.09
SUS430	305	511	26.7	0.18
SUS304	325	757	50.8	0.46

図1 SUS304とNSSC 180の真応力-真歪み線図  
True stress-true strain curves of SUS304 and NSSC 180

徴はC, Nを低減し, かつ, 安定化元素としてNbを添加することで加工性向上を図っており, JIS規格SUS430J1Lを満足していることである。表2に各サンプルの引張特性を示す。試験片形状はJIS13号Bとし, 採取方向は圧延方向に平行とした。NSSC 180はSUS304よりも低延性であるが, SUS430に比べ高延性であり, 高純化および安定化元素添加の効果が得られている。図1に板厚0.8mm材を用いた引張試験時の真応力-真歪み線図をSUS304と比較して示している。SUS304は変態誘起塑性 (以下, TRIP) により著しい加工硬化を示している。一方, NSSC 180の加工硬化は僅かであるものの, 均一伸びはおよそ20%であり, 全伸びとの関係を考えてと局部伸びはSUS304並となっている。

## 2.2 深絞り性と張り出し性

### 2.2.1 限界絞り比とエリクセン値の比較

加工性の評価試験方法としては, 限界絞り比 (L.D.R.) とエリクセン試験を用いた。写真1は, Punch径を一定 (40mm径) とし, ブランク径を変更 (78~96mm径) した限界絞り比測定試験の完了材を示している。円筒絞り時の条件は, Punchの進行速度: 6 mm/min, 潤滑: #122wax,

写真1 限界絞り比測定完了材  
Sample after limit drawing ratio test表3 r値と成形性評価結果  
r-value and forming properties

	r-value average	L.D.R.	Er value
NSSC 180	1.4	2.25	9.6
SUS304	1.0	2.05	13.1

クッション圧: 10kNとした。表3は成形性の代表指標である平均r値と限界絞り比を張り出し性の評価試験であるエリクセン値と比較して示している。限界絞り比は, SUS304よりもNSSC 180の方が高く, 高r値の特性が反映された結果が得られている。一方, NSSC 180のエリクセン値は延性を反映しSUS304よりも低くなっている。

### 2.2.2 試験方法と材料特性

円筒絞り試験 (絞り比2.0) と液圧バルジ試験時の板厚分布を動的陽解法の solverであるPAM-STAMP 2G<sup>(4)</sup>を用いて計算し比較したイメージ図を図2に示す。図は円筒絞り条件が板厚分布, 液圧バルジが板厚減少率分布を示している。NSSC 180の円筒深絞り試験材では板厚変化が少なく, SUS304とは大きく異なっているのに対し, 液圧バルジ試験では板厚減少率の絶対値は異なるものの張り出し頂上部近傍が共に薄くなっており, 板厚分布は類似している。この結果は, NSSC 180の高r値特性を活用し, 深絞り変形要素を高めることが, 成形範囲を拡げることにつながることを示唆している。

## 2.3 成形性向上の考え方と評価試験

### 2.3.1 角筒深絞り成形試験

成形加工品の大部分は, フランジを残した形状でプレス加工される。これは, 材料端部が絞り込まれる際の金型への疵を防止することと種々の成形形状で均一な流れ込みとなる初期ブランク形状が複雑となるためである。したがっ

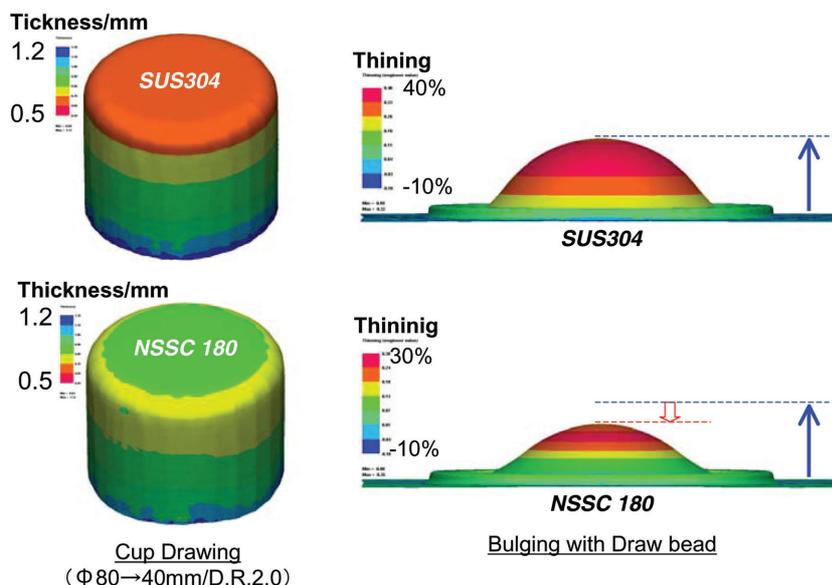


図2 FEMシミュレーションを活用した成形能の比較模式図  
Comparison of forming properties by FEM simulation

Punch:100×100mm, Corner r20mm, rp10mm  
Die: 103×103mm, rd5mm  
Lubricant: #122wax, BHF: 300KN

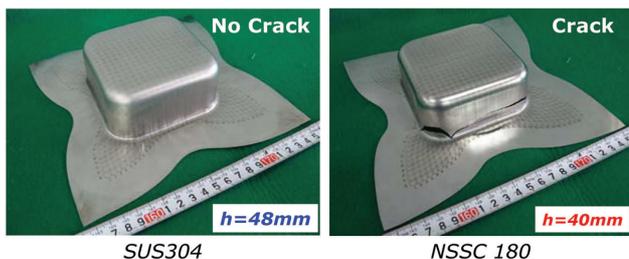


写真2 角筒深絞り性の比較  
Comparison of square formability

て、フランジを残す成形試験で絞り性を評価する必要がある、その一例として角筒深絞り成形試験を実施した。写真2は同一成形条件を用いた角筒深絞り成形試験結果を示している。角筒深絞り成形ではコーナー部のフランジ残りが顕著であり張り出し要素が高まるため、NSSC 180は成形高さ40mmにおいてDie R近傍の割れが発生している。すなわち、フランジが残る成形においては、SUS304と同一成形条件では同形状を得られる可能性は低いと推定される。

### 2.3.2 成形性を向上させる成形条件

限界絞り比が向上する成形条件<sup>9)12)</sup>としては、

- ①クッション圧をしわ発生限界まで低下させる、
- ②張り出し加工領域で金型条件を緩和させる、
- ③摩擦係数を低下させた潤滑条件とする、
- ④ブランク形状を最小とする、

等が挙げられる。いずれも材料の流入抵抗を低減し、板厚減少を抑制することで高r値特性を活かすことを意図している。しかしながら、これらの条件はそれぞれ課題を抱え

ており、十分な検討が必要である。すなわち、クッション圧の低減および金型条件の緩和は成型品側壁の張りを低下させるため、キャニングなどの形状不良を生じやすい。潤滑条件の変更は、潤滑剤やその後の脱脂処理等生産構造の変更によるコスト増につながる。また、ブランクの最小化は、流れ込みを促進していることから、成形条件の僅かな変化で部分的な材料不足を招く危険性がある。

### 2.3.3 評価試験結果

成形条件の変更による成形性の向上を探索するためFEMシミュレーションの活用を試みた結果を図3に示す。写真2と同様にSUS304と同条件では、早期に同位置で割れが発生している。そこで、絞り性を向上させる方法の一つである摩擦係数を大きく低減した条件での計算結果を図3(c)に示す。摩擦係数の低減により、SUS304と等しい成形高さ48mm可能な結果が得られている。この計算結果で得られた板厚分布に注目すると、SUS304と異なりNSSC 180の最大板厚減少部は側壁へ変化している。これは、張り出し要素が強く反映されるSUS304では、Punch R近傍に板厚減少が集中するが、材料流入を促進したNSSC 180では底面材料移動が少なくなるため、板厚減少が少なくなっていることを反映していると推定される。

以上のシミュレーション結果を参考に、潤滑条件を変更した角筒成形試験を実施した。結果を写真3に示す。摩擦係数を低減する方法としては、材料の両面へ保護フィルムを貼り付ける<sup>15)</sup>とともに#122潤滑剤をDie側へ塗布する条件とした。その結果、NSSC 180においても成形高さ48mmが得られることを確認した。成型品表面のスクライブドサークルを写真2と比較するとコーナー部および直辺部の残量が明らかに減少している。すなわち、材料流入が

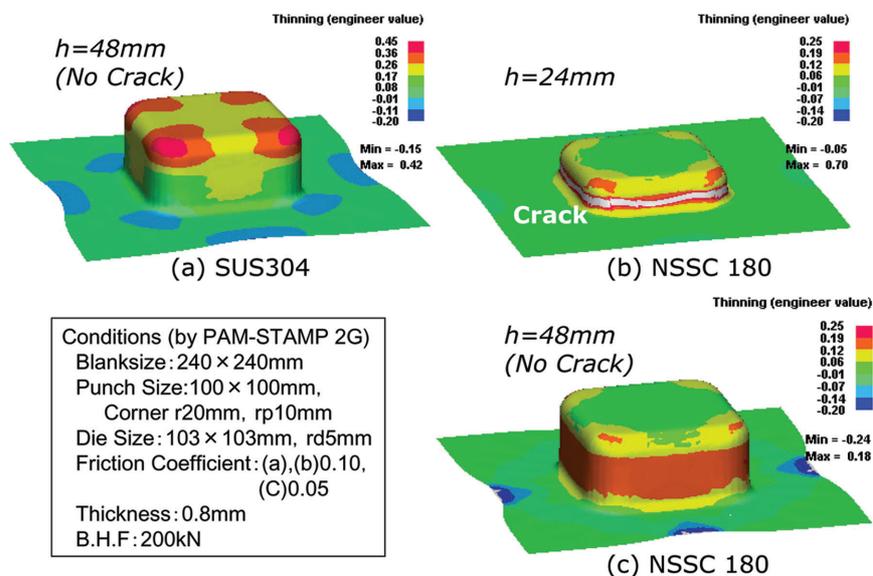
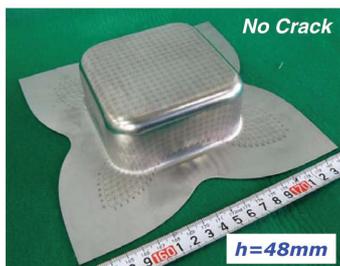


図3 NSSC 180の角筒成形性におよぼす潤滑条件の影響  
Effect of friction condition on square formability in NSSC 180

Punch:100×100mm, Corner r20mm, rp10mm  
Die:103×103mm, rd5mm, BHF:300kN



Friction: Thin Film with #122wax

写真3 高潤滑条件による角筒成形試験結果  
Result of low friction condition on square formability

促進されることで局所的な歪み集中の抑制が可能となり、張り出し要素から絞り要素へ変更されたことを示していると考えられる。したがって、形状や工程を考慮し最適な条件変更が可能であれば、延性に劣るNSSC 180においてもSUS304と同様な形状を得ることが可能となる。

## 2.4 伸びフランジ性

### 2.4.1 穴拡げ試験

伸びフランジ性の評価方法は、穴拡げ試験を用いた。初期穴は12mm径であり、打ち抜きクリアランスは板厚に対して2.5%、5.0%、10.0%とした。打ち抜きクリアランスの影響を確認するため、破断面の性状および断面の硬度を測定した。成形条件の影響として、頂角30°、60°、平頭(40mm径、Punch r=4mm)のPunchを用いた。Punchの進行速度は6mm/minであり、潤滑はPunchへ防錆油を軽く塗布する程度で、クッション圧は10kNとした。尚、比較のため切削穴でも同様の試験を実施した。

### 2.4.2 打ち抜き破断面の特性評価

図4は打ち抜き破断面の上/下面における硬度をクリア

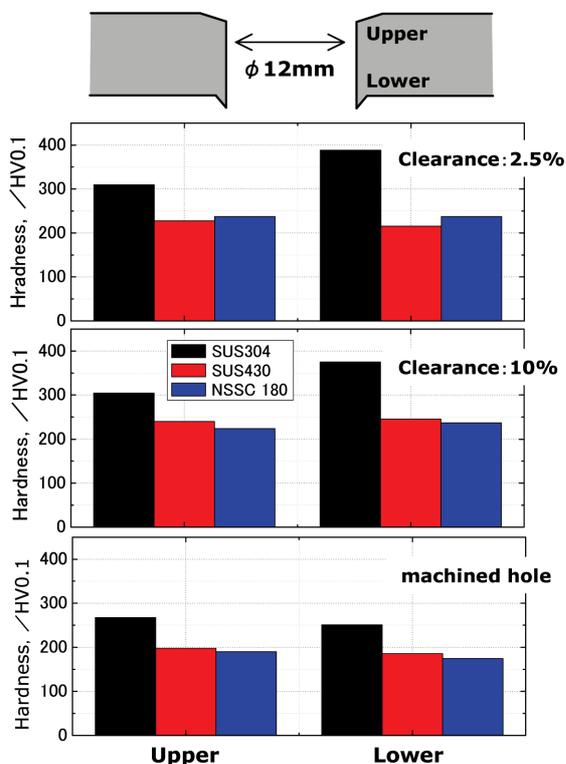


図4 穴加工条件による加工硬化の比較  
Comparison of work hardening on punch hole clearance and machined Hole

ランスおよび切削穴と比較している。穴端部近傍の硬度上昇は、切削に比較して打ち抜きの方が顕著となっている。穴加工の影響が顕著であった打ち抜き穴に着目すると、NSSC 180ならびにSUS430は、若干の硬化が認められるものの、破断面位置における差は認められない。一方、SUS304ではTRIPに起因した顕著な加工硬化が確認でき、ともに下面(ばり)側で顕著となっている。

図5は頂角60°のPunchを用いた穴拡げ試験結果を鋼種で比較し示している。打ち抜き穴における穴拡げ率

は、NSSC 180 > SUS304 > SUS430の順であり、NSSC 180は優れた穴抜き性を有している。また、鋼種に依らずクリアランスが小さいほど高い穴抜き率が得られた。図6はNSSC 180における穴抜き率と打ち抜きクリアランスの影響

を示している。切削穴では頂角60°の円錐Punchが極大値を示したが、打ち抜き穴では頂角30°の円錐Punchが最も高い穴抜き率を示した。また、クリアランス2.5%では、Punch形状の影響が小さく、5.0%、10.0%では穴抜き率はほぼ同様の値を示し、クリアランスの影響は確認できない。

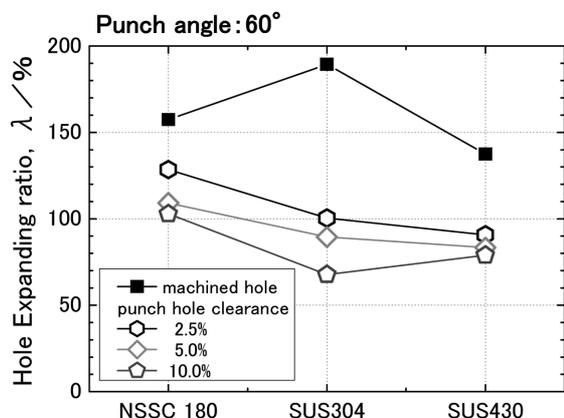


図5 穴抜き試験結果(Punch頂角60°)  
Results of hole expanding test

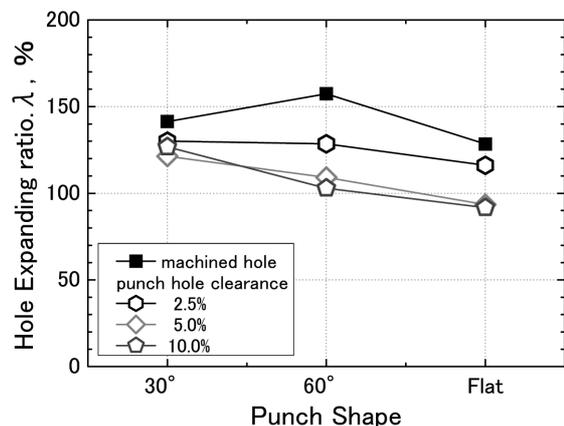


図6 NSSC 180における穴抜き率λにおよぼすPunch形状の影響  
Effect of punch shape on hole expanding ratio in NSSC 180

### 2.4.3 打ち抜き破面性状と穴抜き性

打ち抜き穴による穴抜き率λは、破面性状(ばり)の影響が大きいことが知られており、円錐Punchを活用したコイニング加工で均質化する対策が検討<sup>16)</sup>されている。写真4は打ち抜きクリアランス2.5%、10.0%における破面観察結果を鋼種で比較している。クリアランス2.5%材では、破断面はほとんど観察できず、切断面やばりもほとんど観察できないことから、穴抜き率に及ぼすPunch形状の影響が小さくなっていると推定される。特に、NSSC 180の破面性状は良好であり、高い穴抜き性が得られる一要因と考えられる。クリアランス10.0%では、各鋼種の破断面比率の差が小さくなっており、破断面のポイド等穴抜き性の低下要因が観察でき、打ち抜きクリアランスの影響を示している。

ここで、穴抜き性の重要因子であるばりの影響を調査した。図7は打ち抜き方向による穴抜き率への影響をクリアランスで比較調査した結果を示している。穴抜き率λにおよぼすばり方向の影響はフェライト系ステンレス鋼においても傾向が一致しており、コイニング効果が得られない上ばり方向でも、クリアランス2.5%の方が良好な結果が得られている。一方、SUS304では、コイニング効果が得られない上ばり条件での穴抜き率λの低下が顕著となっており、打ち抜き剪断時の加工硬化と重畳したためと推定される。

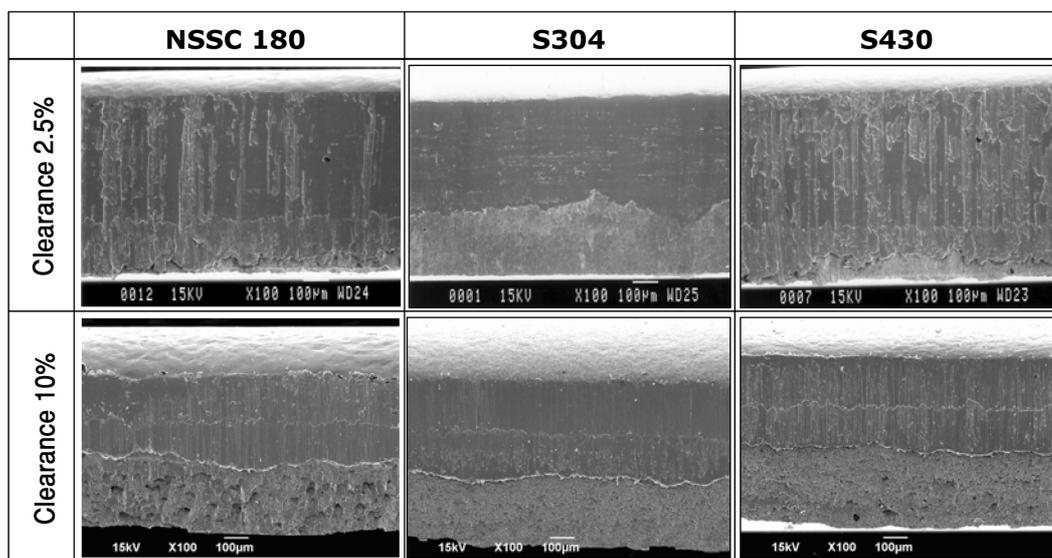


写真4 破断面の性状におよぼす打ち抜きクリアランスの影響  
Effect of punch hole clearance on edge morphology by SEM

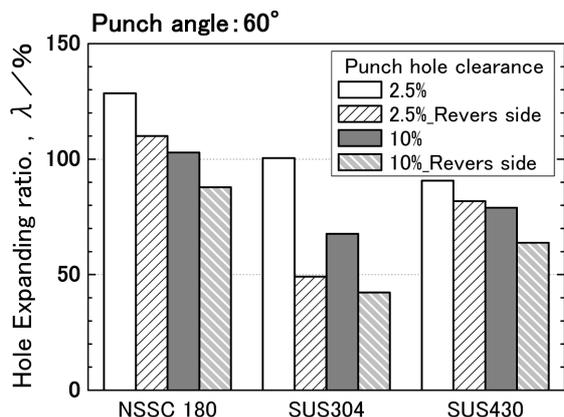


図7 穴拡げ率λにおよぼす打ち抜き剪断方向の影響  
Effect of punch hole direction on hole expanding ratio

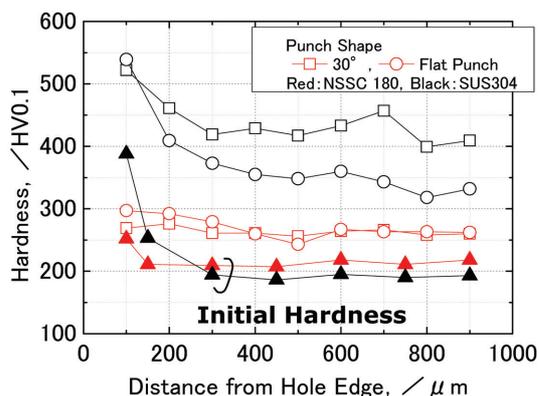


図8 打ち抜き穴近傍の加工硬化におよぼすPunch形状の影響  
Effect of punch shape on work hardening at punch hole edge

### 2.4.4 Punch 形状と穴拡げ性

Punch角度が変化すると穴縁での応力勾配が変化し、頂角30°~60°で穴拡げ率が極大値を示すことが知られている<sup>16,17)</sup>。図7に示されるようにNSSC 180においても頂角を有するPunchの方が平頭Punchよりも良好な結果が得られている。また、切削穴では頂角60°で極大を示すのに対し、打ち抜き穴では頂角30°の方が高値を示している。NSSC 180の破断部近傍の形態をSEM観察した結果を写真5に示す。頂角30°では、広範囲のくびれを伴った破断であるのに対し、平頭Punchではくびれ範囲が狭くばりを起点とした亀裂が多数観察できる。

図8は、穴拡げ加工前後の硬度分布をPunch形状とSUS304と比較して示している。打ち抜き端面からの硬度変化は、Punch頂角30°の方が小さくなっており、歪み分散効果を示していると考えられる。したがって、頂角30°で穴拡げ率λが高位となった理由は、ばりに対するコイニ

ング効果と接触角減少により応力勾配が増加しくびれを分散する効果が重畳した結果と考えられる。また、破断位置は、圧延方向から45°位置付近に多く観察できる。この位置はr値異方性においてr値が低位となる領域であり、打ち抜き穴においても十分な変形能が残存していると考えれば、局部伸びと同様なくびれの生成に及ぼすr値の影響<sup>16)</sup>が示唆されていると推定できる。

### 3. NSSC 180の適用事例

昨今の省合金化へ向かう流れやレアメタルの価格変動に対する価格安定性が評価され、NSSC 180の適用範囲は大きく広がっている。写真6はNSSC 180が適用された意匠シンクを示している。これまで、意匠シンクは、凹凸を有する複雑な形状と加工表面の美しさが必要とされるため、SUS304に代表されるオーステナイト系ステンレス鋼が専有されていた分野である。成形品と加工工程ならびに成形条件の関係を解析し、適切な改良を施すことで商品化が達成されている。

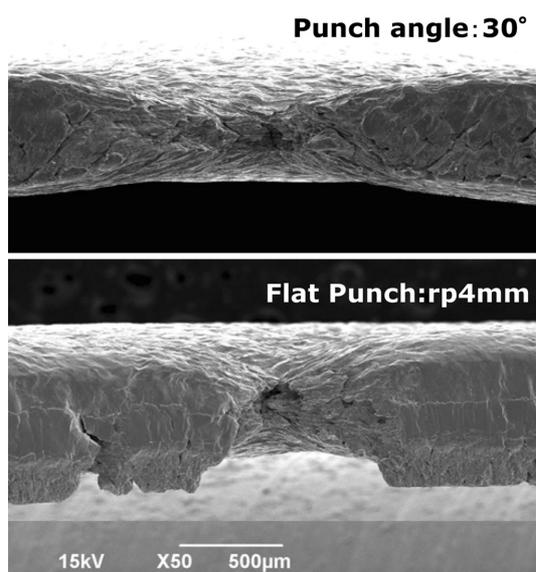


写真5 穴拡げ試験材の破断部性状におよぼすPunch形状の影響  
Effect of punch shape on crack morphology at hole expanding test



写真6 NSSC 180の適用例(意匠シンク)  
Application of NSSC 180 at design sink

## 4. 結 言

高純フェライト系ステンレス鋼NSSC 180の成形性におよぼす成形条件と材料特性の影響について検討した結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 円筒絞り成形では、高 $r$ 値特性が効果的であり、限界絞り比はNSSC 180の方がSUS304よりも高くなる。
- (2) フランジが残る絞り成形では、張り出し要素が強くなるのでSUS304と同成形条件では破断の可能性が高くなる。したがって、材料流入を促進する成形条件への変更が必要となる。
- (3) 打ち抜き穴での穴拡げ率( $\lambda$ 値)は、NSSC 180の方がSUS304よりも高位となる。
- (4) 以上より、加工条件を分析し、塑性変形モードを最適化することで、適用範囲拡大が可能となる。

### 参考文献

- 1) 林:塑性と加工. 11, 119(1970)
- 2) 木村 ほか:まてりあ. 41, 218(2002)
- 3) 宮楠 ほか:鉄と鋼. 69, A269(1983)
- 4) 川瀬 ほか:鉄と鋼. 60, S319(1974)
- 5) 住友 ほか:新日鉄技報. (361), 14(1996)
- 6) 沢谷 ほか:鉄と鋼. 63, 199(1977)
- 7) 例えば石山 ほか:プレス技術. 34, 26(1996)
- 8) 清水 ほか:日本ステンレス技報. 7, 18(1967)
- 9) 例えば須釜 ほか:日新製鋼技報. 88, 55(2007)
- 10) 森川:(社)日本塑性加工学会プロセッシング計算力学分科会, 第21回セミナー, 2008, p.1
- 11) 井口 ほか:JFE技報. 20, 16(2008)
- 12) 尾崎 ほか:JFE技報. 20, 42(2008)
- 13) 石丸 ほか:第56回塑性加工連合講演会, 2005, p.67
- 14) 例えば小川:(社)日本塑性加工学会プロセッシング計算力学分科会, 第8回セミナー, 2006, p.21
- 15) 山本 ほか:プレス技術. 34(7), 33(1996)
- 16) 例えば中川:塑性と加工. 19, 227(1978)
- 17) 寿福 ほか:日新技報. 69, 25(1994)



石丸詠一郎 Eiichiro ISHIMARU  
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 上席研究員  
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



小野直人 Naoto ONO  
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