

## 高純フェライト系ステンレス鋼板のプレス加工特性

## Press Formability of High Purity Ferritic Stainless Steel Sheets

住友秀彦<sup>(1)</sup> 田上利男<sup>(2)</sup>  
 Hidehiko Toshio TANOUE  
 SUMITOMO

## 抄 録

各種高純フェライト系ステンレス鋼板のプレス加工性について、20工程からなる多段の円筒深絞り試験を行い、深絞り性の鋼種特性評価と材質因子との関係及びプレス成形技術の特徴について検討した。主な結果を以下に示す。(1)高純フェライト系ステンレス鋼板の深絞り加工性として以下の鋼種特性が得られた。B添加YUS436S > YUS436S, YUS409D > YUS190 > SUS304 >> SUS430。特に、B添加は強加工状態での二次加工脆性防止に効果的である。(2)各種材質評価因子の中で、深絞り加工特性に関しては $\bar{r}$ 値が比較的良い相関を示した。その他因子の、伸び、 $n$ 値、エリクセン値及びCCV値は明瞭な相関を示さなかった。(3)円筒多段深絞り加工においては、フランジ側から円筒中心側へ素材流入を図る工程設計が重要であり、高純フェライト系ステンレス鋼の場合、再絞り率0.86で良い結果を示した。

## Abstract

Press formability of high purity ferritic stainless steel sheets was studied on some steel grades through a multi-stage cylindrical deep drawability test consisting of twenty processes, to clarify the relationship between the evaluated deep drawability of a steel grade and the factors to define its material's quality, and to investigate the characteristic of press forming technique. Following results have been observed. (1) Among steel grades tested, the deep drawing workability shows most high for boron-added YUS436S and is getting poor for the other steel grades in following order : boron-added YUS436S > YUS436S, YUS409D > YUS190 > SUS304 >> SUS430. To be noticed, adding boron makes it effective to prevent brittleness of the steel at the secondary press working in an excessive working state. (2) Among factors to evaluate material's quality,  $\bar{r}$  value has comparatively a good correlation with the deep drawing workability. Another factors such as elongation,  $n$  value, Erichsen value and CCV value do not show any clear correlation with it. (3) In the case of the multi-stage cylindrical deep drawing, it is important to arrange the processing design for the material to flow from a flange side into the center of cylinder, and a redrawing rate 0.86 shows a good result in the case of high purity ferritic stainless steel.

## 1. 緒 言

近年、ステンレス鋼溶製技術の進歩により高純精錬技術がめざましい発展をとげている。この結果、典型的な不純物元素である炭素、窒素の大幅低減が工業的規模で経済的に可能となり、耐粒界腐食性や溶接性に一段と優れた安価な高純フェライト系ステンレス鋼が広く提供できるようになった<sup>1,2)</sup>。

特に、自動車分野では、排気系部品を中心に、同鋼種の排気ガス環境を対象とした各種の耐食性評価が詳細に検討され、溶融アルミニウムめっき鋼板から高純フェライト系ステンレス鋼板への材料転換が積極的に進められている<sup>3,4)</sup>。

一方、フェライト系ステンレス鋼において炭素、窒素の低減は、耐食性の向上に加え、延性、韌性等の機械的性質の向上も図られる<sup>5,6)</sup>。複雑な器物等へのプレス加工に際しては、深絞り加工性の指標となる、伸び、 $n$ 値、ランクフォード値( $\bar{r}$ 値)等の特性が高いこ

とが重要とされているが、高純フェライト系ステンレス鋼はこれらの特性にも優れており、従来鋼にはない高深絞り性が期待される。しかしながら、実使用に近い複雑かつ苛酷な形状でのプレス加工性を評価した具体的な検討事例はこれまでほとんど報告されていない。

ここでは、高深絞り性の評価として、20工程からなる円筒多段深絞り金型を用い、各種の高純フェライト系ステンレス鋼と汎用ステンレス鋼であるSUS430、SUS304の特性比較を行うとともに、深絞り加工性向上のための材質因子とプレス技術の特徴について検討を行った。

## 2. 実験方法

## 2.1 供試材

供試材には耐熱鋼を含めて高純フェライト系4種類と比較のためのSUS430、SUS304を用いた。これら供試材の化学成分を表1に示

<sup>(1)</sup> 技術開発本部 八幡技術研究部 主幹研究員 工博

<sup>(2)</sup> ステンレス鋼板営業部 部長代理

表 1 供試材の化学成分(wt%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	N	B
YUS190	0.004	0.13	0.13	0.026	0.005	—	18.95	1.84	0.15	0.16	0.009	—
YUS436S (B添加)	0.005	0.11	0.10	0.028	0.002	—	17.23	1.19	0.17	—	0.009	0.0008
同上 (B無添加)	0.003	0.07	0.09	0.026	0.003	—	17.16	1.10	0.16	—	0.009	0.0001
YUS409D	0.004	0.43	0.33	0.019	0.002	—	10.89	—	0.17	—	0.007	—
SUS430	0.050	0.47	0.12	0.018	0.001	—	16.23	—	—	—	0.010	—
SUS304	0.043	0.48	1.10	0.027	0.001	8.31	18.05	—	—	—	0.056	—

す。高純系の各鋼種はいずれもC+Nが140ppm以下に低減化されており、加えて、Ti及びNb添加で安定化が図られている。一部の鋼種には1~2%のMo添加が行われているが、耐食性の更なる向上が目的である。YUS436Sには特にB添加を試みたが、これは二次加工脆性改善が狙いであり、後述する実験にてその効果を確認する。

高純系の各鋼種は、いずれも、転炉~VOD(Vacuum Oxygen Decaburization)で溶製され、連続鋳造鋼片とした後、連続熱間圧延及び冷間圧延を行い、次いで、最終焼鈍と調質圧延を施した商用鋼である。汎用ステンレス鋼を含め、板厚はすべて0.6mmにそろえた。

## 2.2 材質試験

供試材の引張試験は、圧延方向に平行に切出したJIS 13B号試験片を用い、引張速度5mm/minの一定で行った。n値の算定は応力-歪曲線上で歪量10~20%間の勾配より求めた。r値の測定にはJIS 5号試験片を用い、伸び15%の歪量を与えた。

加工性評価としてエリクセン試験及びコニカルカップ試験(CCV)を行った。エリクセン試験はJIS Z 2247に基づき、A法を採用した。CCV試験はJIS Z 2249に基づき、板厚0.6mm用試験として型別13型(ブランク直径36mm)を採用した。

硬さ測定はビッカース硬さ計により板厚中央にて行った。

## 2.3 深絞り試験

深絞り成形能の評価には、60t油圧プレス機による20段円筒多段深絞り試験を行った。まず、ブランクとして直径144mmの円盤を打ち抜いた後、第1絞り工程では絞り比1.78で円筒形状に絞り加工を行った。第2絞り工程以降は、中間焼鈍を入れずに、再絞り率0.80~0.93(主に0.86を採用)で多段絞りを繰り返し行い、図1に示す最終形状にプレス加工した。ダイス肩半径は主に6.0mm、ポンチ肩半径は7.0~0.8mmを採用した。金型材質はSKD-11、潤滑剤は市販の油性プレス油を用いた。

プレス成形品の加工度調査として、各部の板厚歪測定と断面の硬さ測定を行った。プレス割れを生じたものについては、走査型電子顕微鏡により破断面の形態観察を行った。

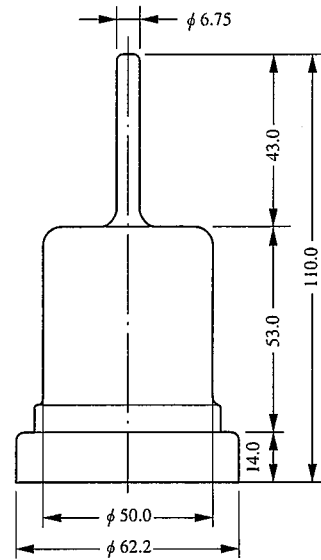


図 1 円筒多段絞りの最終形状

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 材質特性

供試材の引張試験結果と硬さ測定及び加工特性の評価結果について、表2に示す。また、代表的鋼種の応力-歪曲線を図2に示した。

汎用フェライト系ステンレス鋼のSUS430に比べ、高純フェライト系ステンレス鋼はC+Nが低く抑えられていることにより耐力が低く、伸びが大きい。更に、高純化により $\bar{r}$ 値も大きく向上しており、その結果、エリクセン値、CCV値も改善されている。これに対し、オーステナイト系ステンレス鋼のSUS304は加工に伴いマルテンサイト変態が誘起し、変形部分の加工硬化が一段と強く生じるため歪の分散が起こりやすく、高n値で伸び及びエリクセン値が極めて大きい。

表 2 各種材質特性値

鋼種	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	硬さ (HV)	n値	ランクフォード値				エリクセン値 (mm)	コニカルカップ値 (mm)
						r <sub>0</sub>	r <sub>45</sub>	r <sub>90</sub>	$\bar{r}$		
YUS190	343	497	33.8	173	0.20	1.60	1.47	2.10	1.66	9.5	26.7
YUS436S (B添加)	275	459	34.8	135	0.21	1.67	1.63	2.12	1.76	9.8	26.9
同上 (B無添加)	284	483	34.5	137	0.22	1.49	1.90	2.01	1.83	9.8	26.8
YUS409D	239	424	37.2	116	0.24	1.51	1.77	2.11	1.79	9.7	26.7
SUS430	308	472	31.8	159	0.21	0.94	0.92	1.50	1.07	8.9	28.5
SUS304	281	705	64.0	172	0.44	0.91	1.19	0.83	1.03	12.5	27.0

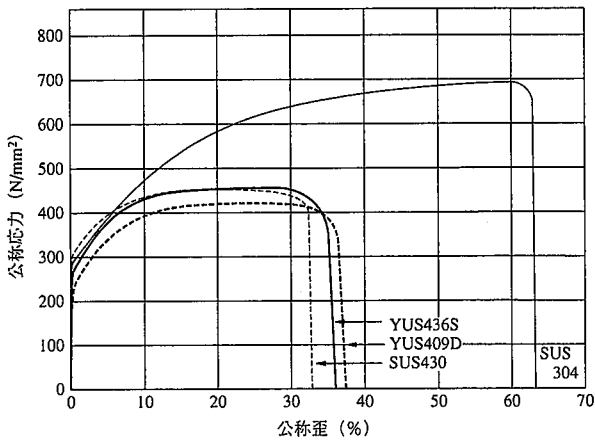


図 2 応力-歪曲線

3.2 多段絞りによる深絞り性

各種鋼種の円筒多段絞りによる深絞り性を、第1絞りと多段絞り後のポンチ径の比で評価し、図3に示す。

汎用ステンレス鋼のSUS430、SUS304に比べ、高純フェライト系の多段深絞り性は極めて高く、特に、Bを添加したYUS436Sは再絞りが20工程以上可能となる。この結果、多段絞り後のポンチ直径は第1絞り工程の直径に対し1/12以下に縮径ができ、縮径率に逆比例した高深絞り成形品が得られる。これは、ブランク直径を基準にしたトータル絞り比に換算すると、21.3となる。このように汎用ステンレス鋼では中間焼鈍必須の難加工形状でも、高純フェライト系ステンレス鋼は焼鈍省略で連続的に多段プレス成形が可能であり、極めて高い深絞り成形性を有していることが理解できる。第20工程のプレス成形品の外観を写真1に示す。

一方、Bを添加していないYUS436S及びYUS409Dは20工程目で破断を生じたが、この割れは絞り方向に伝播した縦割れであり、

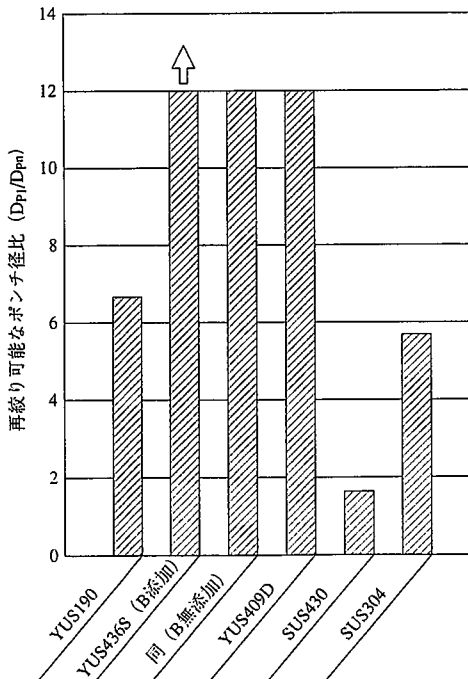


図 3 円筒多段絞りによる深絞り性

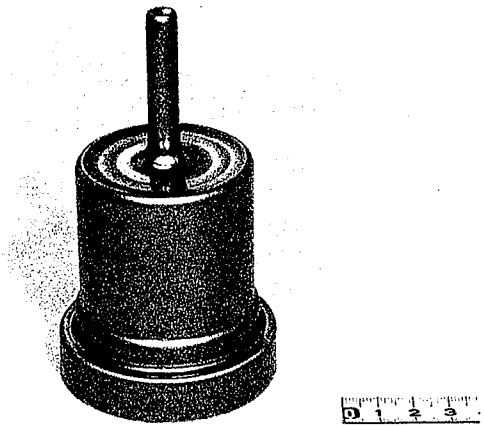


写真 1 プレス成形完了品の外観写真

SUS430やSUS304で認められるポンチ肩半径部近傍での割れ、いわゆる、 $\alpha$ 破断とは形態が異なっている。以上の結果、円筒多段深絞り性能の鋼種特性としては、

B添加YUS436S>YUS436S, YUS409D>YUS190>SUS304>>SUS430

の順位が明らかとなった。

3.3 多段深絞り成形能と各種材質特性との関係

汎用のフェライト系及びオーステナイト系ステンレス鋼を含め、高純フェライト系鋼種の多段深絞り成形能を把握するため、表2に示した各種材質特性値との関係を検討した。これらの結果を図4に示す。

深絞り性は、フェライト系鋼種に限定した場合、伸び、n値及びエリクセン値ともそれぞれの特性値が高いほど良好な結果を示すが、各特性値の変動範囲は極めて狭く、また、オーステナイト系ステンレス鋼を含めて考えるとこれらとの相関は必ずしも明瞭とはいえない。今回検討した特性値の中では、 $\bar{r}$ 値が多段深絞り性と比較的高い相関を示した。CCV値も供試材全体でマクロに評価するとやや相関が認められるが、高純フェライト系鋼種の中ではやはり変動範囲が狭く明瞭な関係を示していない。

一般に、加工歪分散の点から高n値材も高加工性が期待されるが、この特性値は特に張出し加工性に対して有効であり<sup>8)</sup>、円筒多段絞りのような深絞り加工性に対しては早川ら<sup>9)</sup>が指摘しているようにむしろ小さい方が望ましいと考えられる。

3.4 高純フェライト鋼の加工性に及ぼすBの効果

鋼中炭素及び窒素を極低下し、かつ、適量のTi又はNbを単独又は複合添加して固溶炭素を極限まで減らした極低炭素鋼(IF鋼)は結晶粒界が脆化しやすく、深絞り成形において二次加工脆性が起こりやすい<sup>10)</sup>。二次加工脆性を改善する成分としてIF鋼ではBの効果知られているが<sup>11)</sup>、著者らは同じ結晶構造を持つ高純フェライト系ステンレス鋼の一部においても同様の傾向が認められることを確認している<sup>12)</sup>。ここでは、YUS436Sに8ppmの微量B添加を行い、多段深絞り試験でこの効果の確認を試みた。

この結果、Bの有無にかかわらず $\bar{r}$ 値の高いYUS436S、YUS409Dはいずれも19工程までの高深絞り性を示したが、B無添加材では20工程再絞りで円筒端部に拡管応力が作用した際、縦割れを発生した。一方、Bを8ppm添加したYUS436Sではこのような異常は認め

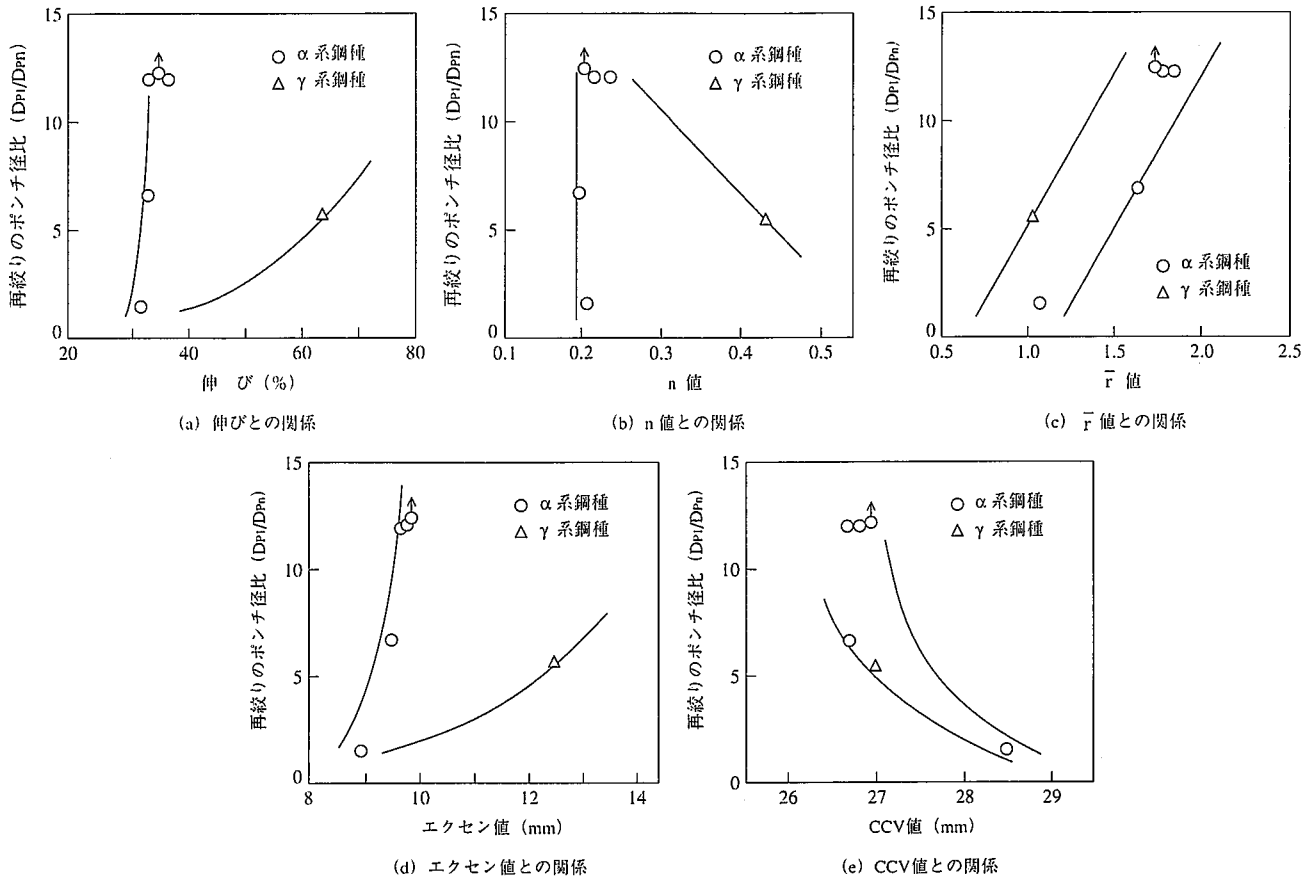
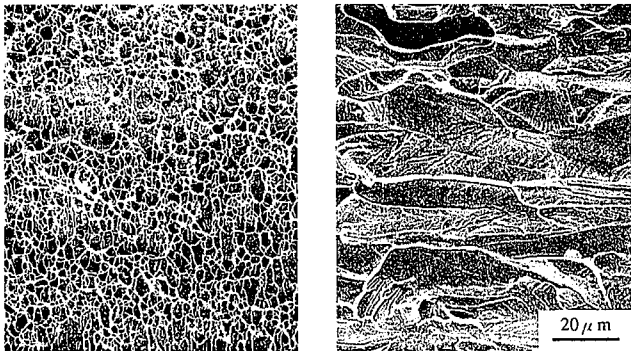


図4 円筒多段絞り成形能と各種材質特性との関係

られず目的形状の成形を完了している。

B無添加YUS436Sの縦割れ破断面と通常の $\alpha$ 破断を生じたSUS430の破断面を比較して写真2に示す。SUS430の破断面は延性加工限による通常の破断であるdimple patternを示すのに対し、B無添加YUS436Sの縦割れは粒界破面を呈した。深絞り加工で二次加工脆性の破断面がこのような破面形態を示すことはIF鋼でも良く知られており<sup>13)</sup>、今回の結果とも良く一致する。

これらの結果から推定すると、今回20工程で縦割れを生じたYUS409Dについても、B添加を行えばYUS436Sと同程度に高加工性を示すことが期待できる。



(a) SUS430  
(プレス第5工程)

(b) B無添加YUS436S  
(プレス第20工程)

写真2 走査型電子顕微鏡による破断面の観測結果

### 3.5 多段深絞りによる変形状況と加工硬化

最高の深絞り成形性を示したYUS436Sの第20工程プレス成形品の板厚歪と硬さ変化の挙動を図5に示す。

板厚は中心の円筒形状先端の肩半径( $r_{p1}$ )において25%の減少を示しているが、円筒の端部方向になるにつれて急激に増加し、中心部から18mmの位置で加工前の板厚と同じ厚さまで回復した後、最初のダイス肩半径( $r_{d1}$ )直前で最高値42%の板厚増加を示す。更に、 $r_{d1}$ から外側の円筒のポンチ肩半径( $r_{p2}$ )にかけては板厚が減少し、 $r_{p2}$ から $r_{p4}$ にかけてはほぼ元の板厚状態が保持され、円筒の端部側で再び板厚が増大する複雑な挙動を示す。一方、B添加有無による板厚歪への影響は認められなかった。

板厚の複雑な挙動に対し、硬さ変化は比較的単調で、中心部を除き、側壁部はビッカース硬さで230~270程度の加工硬化を示した。上述したように、位置 $r_{p2}$ から $r_{p4}$ にかけての板厚歪はほぼ0%に近いが、図6の冷間圧延による硬さから推定すると、圧延率50%程度の歪量に相当し、円筒端部からの素材流入による板厚増大と絞り方向への引張りによる板厚減少が相殺された結果と考えられる。

このような円筒側壁部の板厚増大挙動及び元厚保持状態での絞り変形の進行は、多段絞りの各工程を通じて再絞りによる深さ増大での板厚減少分を補償する以上の素材流入がフランジ側から図られていたことを示唆している。即ち、多段絞りの金型設計はこのようなメタルフローを可能とする再絞り率及びポンチやダイスの肩半径設定が重要なポイントであることを示している。今回の実験条件下では、高純フェライト系ステンレス鋼の場合、再絞り率0.86で良い結

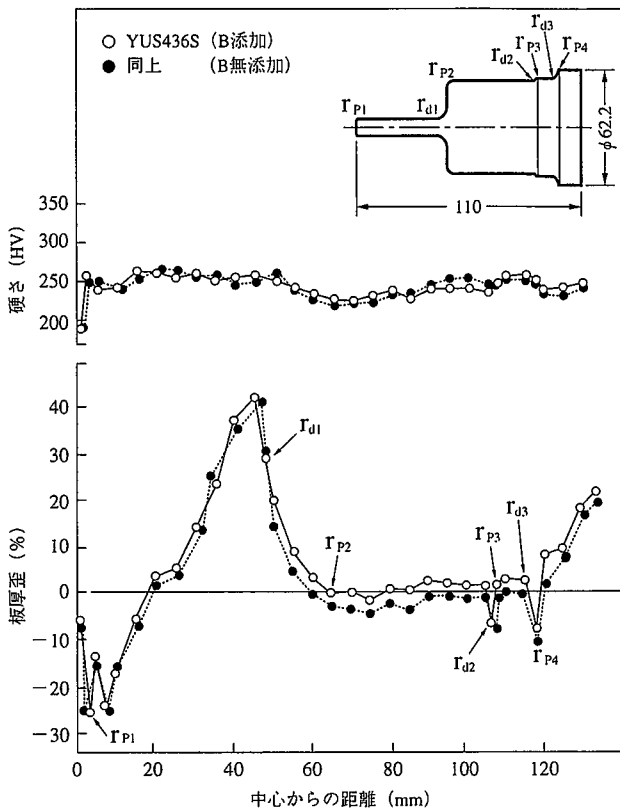


図 5 YUS436Sによる円筒多段プレス成形品の板厚歪と硬さの挙動

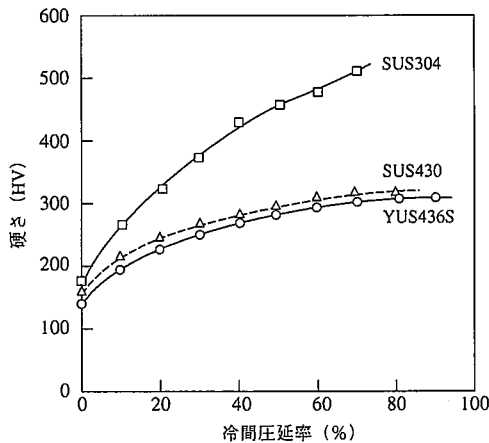


図 6 冷間圧延率と硬さの関係

果を示した。

次に、第5工程で割れを生じたSUS430成形品の板厚変化を調べた結果をYUS436Sと比較して図7に示す。YUS436Sの挙動に比べ、 $\bar{r}$ 値の低いSUS430は局部的に板厚減少が生じやすく、中心側円筒のポンチ肩半径部近傍でくびれ状を呈し、 $\alpha$ 破断に至っていることが分かる。

第14工程で割れを生じたSUS304成形品の板厚変化と硬さ変化をYUS436Sと比較して図8に示す。SUS304はYUS436Sに比べ中心側円筒部での板厚増加が著しく小さく、逆に、円筒端部での板厚が厚い。一方、硬さはピッカース硬さで350~450を示し、全体的に高い加工硬化を示した。また、中心から円筒端部にかけての硬さの挙動には特徴があり、特に、 $\Gamma_{d1}$ と $\Gamma_{d3}$ 部の2か所に硬さのピークを持つ特

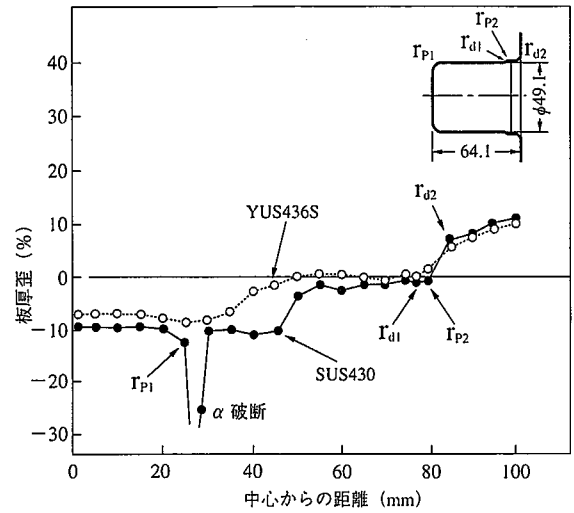


図 7 SUS430とYUS436Sの第5工程プレス成形品の板厚歪挙動

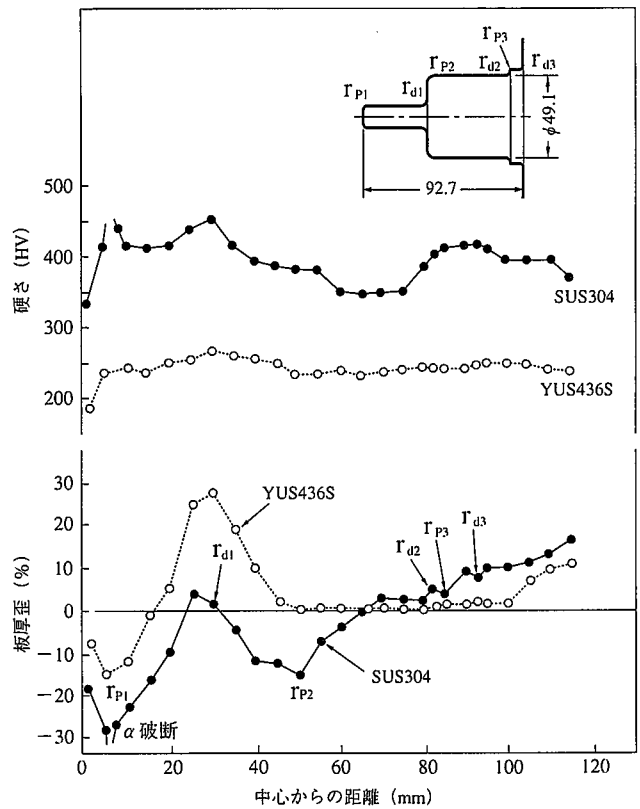


図 8 SUS304とYUS436Sの第14工程プレス成形品の板厚歪と硬さの挙動

異なるパターンを示した。

これらの結果から、高n値のSUS304では、まず、最初の円筒絞りにより端部の硬さ上昇が著しく起こり、以降の多段絞り時の円筒中心部への素材流入を遅らせ、この結果、ポンチ先端部には平面歪型の変形が集中して起こり、 $\Gamma_{P1}$ 部で破断に至ったものと考えられる。

このことは、SUS304系の多段深絞り加工においては、第1絞りの絞り比は極力小さく設定し、かつ、第2絞り以降の再絞りでポンチ径差も小さく設計することが望ましいことを示唆している。

## 4. 結 言

各種高純フェライト系ステンレス鋼板のプレス加工特性を、20工程からなる多段の円筒深絞り試験で評価し、深絞り加工性と材質因子との関係及びプレス成形技術の特徴について検討した結果、次のことが明らかとなった。

(1)高純フェライト系ステンレス鋼板の深絞り加工性として以下の鋼種特性を確認した。B添加YUS436S>YUS436S, YUS409D>YUS190>SUS304>>SUS430

(2)高純フェライト系鋼種は強加工状態において二次加工脆性を生じやすいが、微量のB添加により改善が可能である。

(3)加工性を示す各種材質因子の中で、深絞り加工特性に関しては $\bar{r}$ 値が比較的良い相関を示した。その他因子の、伸び、n値、エリクセン値及びCCV値は明瞭な相関を示さなかった。

(4)円筒多段深絞り加工においては、中心側円筒の板厚減少阻止が $\alpha$ 破断防止に重要であり、フランジ側から中心側への素材流入を容易とする再絞り率及びゲイスやボンチの肩半径設定がポイントである。

本実験条件下では、高純フェライト系ステンレス鋼の場合、再絞り率0.86で良い結果を示した。

## 謝 辞

本研究を遂行するに当たり、深絞り試験で御協力いただいた京三電機(株)工機部桜井宏明氏ほか関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

## 参照文献

- 1) 長谷川正義：ステンレス鋼便覧，第3版，日刊工業新聞社，1995，p.775
- 2) 辻野良二 ほか：新日鉄技報，(351)，p.35(1993)
- 3) 石川秀雄：鉄鋼協会西山記念講座，1994，p.2554
- 4) 佐藤栄次 ほか：新日鉄技報，(354)，p.11(1994)
- 5) 沢谷 精 ほか：鉄と鋼，63(5)，p.832(1977)
- 6) Binder,W.O. et al.：Trans. ASM，43，p.759(1951)
- 7) 後藤善弘 ほか：第45回塑性加工連合講演会論文集，p.319(1994)
- 8) 住友秀彦 ほか：昭和51年度塑性加工春期講演会論文集，p.151(1976)
- 9) 早川 浩 ほか：材料とプロセス，8，p.704(1995)
- 10) 清水釜男：学位論文「超深絞り用冷延鋼板の開発に関する研究」，1972，京都大学
- 11) Takahashi, N. et al.：Proc. of Conf. on Metallurgy of Continuous-Annealed Sheet Steel, AIME, p.133(1982)
- 12) 札軒富美夫 ほか：鉄と鋼，73(5)，p.143(1987)
- 13) 山田正人 ほか：鉄と鋼，73(8)，p.1049(1987)