
極深絞り用オーステナイト系ステンレス鋼 R 304UD の開発

Development of New Austenitic Stainless Steel R 304UD for Ultra Deep Drawing

大橋 延夫(Nobuo Ohashi) 小野 寛(Yutaka Ono) 野原 清彦(Kiyohiko Nohara)
宮脇 哲雄(Tetsuo Miyawaki) 渡辺 健次(Kenji Watanabe)

要旨：

極深絞り用オーステナイト系ステンレス鋼の開発研究を行い、成形性に最適なオーステナイト安定度指標 Md30 の値が存在すること、そして Cu 添加鋼はこの最適 Md30 における成形性がさらに優れていることがわかった。結晶粒度の影響や熱間加工性をも考慮して、極深絞り用 R304UD の製造条件を決定した。R304UD の LDR は 2.23 で SUS304 の 2.08 よりかなり大きい。これは R304UD のほうが絞り力が小さく、かつ破断力が大きいためである。また深型シンクの実際プレス試験の結果、R304UD は SUS304 に比べてリストライク量を増すことができ、その結果形状性を著しく改善しうることがわかった。

Synopsis：

The investigation was carried out to develop austenitic stainless steel sheet for deep drawing. Good press formability was shown for the steel of suitable Md30 value, the index of austenite stability, which was calculated from the chemical composition. Excellent press formability was obtained in Cu-bearing steels in comparison with Cu-free steels of the same Md30 values. Influence of grain size on formability and hot workability were also studied and a new steel of ultra deep drawing quality named R 304UD was developed. Limiting drawing ratio of R 304UD was 2.23 which was considerably higher than the value, 2.08, of JIS-SUS 304. This was due to the low drawing force and the high fracture force of R 304UD compared with those of SUS 304. In applying R 304UD to press forming of deep sink, the increase of restriking depth was realized and consequently shape-fixability and rigidity were remarkably improved.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

極深絞り用オーステナイト系ステンレス鋼 R 304UD の開発

Development of New Austenitic Stainless Steel R 304UD for Ultra Deep Drawing

大 橋 延 夫*

Nobuo Ohashi

小 野 寛**

Yutaka Ono

野 原 清 彦***

Kiyohiko Nohara

宮 脇 哲 雄****

Tetsuo Miyawaki

渡 辺 健 次****

Kenji Watanabe

Synopsis:

The investigation was carried out to develop austenitic stainless steel sheet for deep drawing.

Good press formability was shown for the steel of suitable Md_{30} value, the index of austenite stability, which was calculated from the chemical composition. Excellent press formability was obtained in Cu-bearing steels in comparison with Cu-free steels of the same Md_{30} values. Influence of grain size on formability and hot workability were also studied and a new steel of ultra deep drawing quality named R 304UD was developed.

Limiting drawing ratio of R 304UD was 2.23 which was considerably higher than the value, 2.08, of JIS-SUS 304. This was due to the low drawing force and the high fracture force of R 304UD compared with those of SUS 304. In applying R 304UD to press forming of deep sink, the increase of restriking depth was realized and consequently shape-fixability and rigidity were remarkably improved.

1. 緒 言

一般にプレス成形用のオーステナイト系ステンレス薄鋼板としては、従来 SUS 301 や SUS 304 が使用されている。このうち SUS 301 は、オーステナイト相がかなり不安定で冷間加工時の加工

誘起マルテンサイトの生成が活発であることから加工硬化性が著しく、また張出し成形性に優れているので、自動車ホイールカバーなどの張出し加工を主とする成形品に用いられている。しかし絞り加工が厳しい場合には、加工後室温に放置すると置割れを生ずる危険があるため、深絞りを主とする成形品には不適當である。

* 技術研究所特殊鋼研究室室長・工博
*** 技術研究所特殊鋼研究室主任研究員・工博
〔昭和52年2月28日原稿受付〕

** 技術研究所特殊鋼研究室主任研究員
**** 技術研究所特殊鋼研究室

一方、SUS 304 はオーステナイト相が安定で室温変形時に加工誘起マルテンサイトがそれほど多く生じないため、絞り加工を受けても置割れが生じにくく深絞り成形用として多用されている。しかし、実際の深絞り成形では張出し要素が複合している場合が多く、この点 SUS 304 は十分でない。

とくに近年、深型シンクやバスタブを支障なく成形するために深絞り性および張出し性がともに優れ、かつ十分な耐食性と耐置割れ性を具備した新しいオーステナイト系ステンレス鋼が望まれるようになってきた。このような要求を満たすために筆者らは種々の実験と検討を重ねた結果、極深絞り用オーステナイト系ステンレス鋼 R 304UD を開発した。以下にその開発の経過、そして材質特性、成形性および形状凍結性、さらに実際の深型シンクのプレス成形実験結果などについて述べる。

2. 供試材および実験方法

2-1 供試材

供試材の大部分は実験用高周波真空炉で溶製した 10kg 小型鋼塊から作製した。そしてそれらの中で優れた特性を示したいくつかについて実験用 5t 真空誘導炉による溶製を行い、商用工程を流して製品を試作した。

10kg 鋼塊は厚さ 20mm のシートバーを経て厚さ 1.3mm の熱延板とし、熱処理後圧延率 46% で厚さ 0.7mm の冷延板にした。その後 1080°C で 2min 保持空冷の仕上げ焼鈍を行った。

一方、5t 鋼塊は現場工程を通し、まず分塊圧延により厚さ 200mm のスラブにしたあと熱間圧延により厚さ 4mm の熱延コイルを作製した。ついで中間圧延で 1.75mm、仕上げ圧延で 0.7mm (圧延率 60%) の冷延コイルとし、その後 R 304UD の場合 1050°C に保持された連続焼鈍炉中を 11.7 m/min の通板速度で、SUS 304 の場合 1120°C の炉中を 19m/min で仕上げ焼鈍した。

得られた供試材はすべてオーステナイト単相であり、結晶粒度はいずれも ASTM No. で 6.5~8.0 であった。

2-2 実験方法

2-2-1 組織観察および硬度

焼鈍試料のほかに粒度測定のため 650°C で 1h 焼鈍化した試料を準備し、いずれもしゅう酸電解エッチによって組織を観察した。粒度測定はポイント・カウンティング法によった。硬度はビッカース硬度計により 1kg の荷重下で試料の表面を 5 点測定しその平均値で表した。

2-2-2 引張試験

10t オートグラフを使用し、空气中室温(22°C)、クロスヘッド速度 30mm/min で引張試験を行った。試験片は JIS 13B 号で圧延方向に対し 0°, 45°, 90° 方向に採取した。塑性ひずみ比(r 値)は 30% の予ひずみを与えて求めた。引張試験の際、一部の試料について引張過程の試片の温度ならびに α' マルテンサイト発生量を測定した。温度はサーミスター温度計によって連続記録し、 α' マルテンサイト量は西独 Helmut 社製フェライト量測定器によって磁気誘導量を非破壊の状態で連続的に測定し、あらかじめ異方性を考慮して X 線法により作製した検量線と照合することによって体積率として求めた²⁾。さらに引張性質の温度依存性を調べるため、JIS 13B 号試験片を -40~+95°C の範囲内で一定温度に保持しながら引張った。クロスヘッド速度は最大 300mm/min、試験雰囲気は 0°C 以下ではドライアイス・アルコール、0°C では氷水、0°C 以上では水である。

2-2-3 成形試験

(1) 確性試験

- (a) エリクセン試験: JIS B 7777 に基づき、そして潤滑剤はグラファイト・グリースとした。
- (b) コニカルカップ試験: JIS Z 2249 に基づき、13 型工具(ブランク直径 36mm ϕ)を用いて測定した。潤滑剤はマシン油 #120 である。
- (c) 液圧バルジ試験: 東京試験機製高温バルジ試験機により 100mm ϕ 円形ダイスを用い、試験片締付圧力 10t、張出し速度約 30mm/min で試験した。液温は室温(22°C)に合わせ一定に制御した。なお成形限界曲線作成のため一部楕円形タ

イス(100×75mm および 100×60mm)による成形も行った。

(2) 小型深絞り試験機による成形試験

西独 Erichsen 社製自動カップ絞り試験機によって荷重深絞り試験を行い、さらにしわと破断を考慮した成形可能領域の推定のための試験も行った。主として用いた工具は 33mmφ 平底円筒型である。

(3) 100t プレスによる成形試験

100t 油圧プレスにより、主として 100mmφ 円筒型および各辺 100mm の 4 角筒型を用いてプレス実験を行った。プレス速度は約 200mm/min としたが、潤滑およびしわ押え条件は適宜選定した。

(4) 実物プレスによるプレス実験

実物プレスによる深型シンの絞り実験を行った。成形品の側壁のそり(ひずみ)をダイヤルゲージで、また剛性(転移点挫屈荷重)をばねばかりで測定した。

3. R 304UD の組成決定の経過

3・1 δ フェライト量

SUS 304 クラスのオーステナイト鋼の熱間加工性は造塊・圧延工程で生成する δ フェライト量 δ_f (vol%) に主として依存する。成分から凝固時の δ_f を推定するのにいわゆる Schaeffler の状態図が多く用いられているが、読取精度がよくないので Schaeffler-Delong-Ostram の式³⁾

$$\delta_f(\text{vol}\%) = 2.9(\text{Cr} + 1.5\text{Si} + \text{Mo} + 0.5\text{Nb}) - 2.07\{\text{Ni} + 0.5\text{Mn} + 30(\text{C} + \text{N}) + 0.3\} - 26.0 \quad \cdots \cdots (1)$$

の妥当性と熱間加工性の良否を種々の組成の 10kg 小型鋼塊について調べた。ただし元素はその重量%を示す(以後の式でも同様)。 δ_f の測定はフェライト量測定器を用い、鋼塊表面数箇所について行った。実測値と(1)式による計算値の関係を Fig. 1 に示す。両者の間にはある程度のばらつきはあるがおおむね一致している。これらの試料を分塊圧延したところ、 δ_f の実測値が 8% 以下であれば熱間加工性に問題のないことがわかった。この値を越すと 2 回焼きなどの処置を施さないと耳割れを生ずる恐れがある。

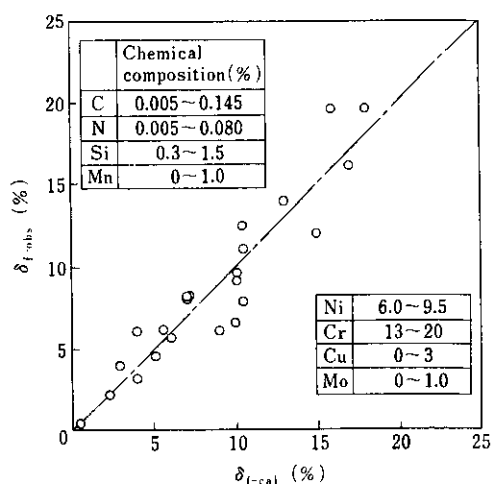


Fig.1 Relation between observed and calculated amount of δ ferrite in 10kg ingot

3・2 オーステナイト安定度

オーステナイト系ステンレス鋼の機械的性質がオーステナイト安定度に強く依存していることはよく知られている⁴⁾。絞りと張出しの複合成形性についても同様の影響が考えられる⁵⁾。前述の結果から、 δ_f の計算値が 8% 以下でオーステナイト安定度が異なる成分の 10kg 鋼塊を溶製し材料特性を調べた。オーステナイト安定度指標としては Angel⁴⁾ が提案し筆者ら⁶⁾ が結晶粒度の影響もとりにいて修正した次式の $Md_{30}(^{\circ}\text{C})$ を用いた。

$$Md_{30} = 551 - 462(\text{C} + \text{N}) - 9.2\text{Si} - 8.1\text{Mn} - 29(\text{Ni} + \text{Cu}) - 13.7\text{Cr} - 18.5\text{Mo} - 68\text{Nb} - 1.42(\text{ASTM G.S.N.} - 8.0) \quad \cdots \cdots (2)$$

エリクセン値(Er)およびコニカルカップ値(CCV)と(2)式による Md_{30} 計算値の関係を Fig. 2 に示す。約 -40°C から約 $+40^{\circ}\text{C}$ の範囲内の Md_{30} の変化によって Er , CCV とともに明白な極値を示し、良好な成形性を示す最適オーステナイト安定度が存在することがわかる。そして注目されることは Cu 添加鋼のほうが Cu 不添加鋼よりも Er が高く CCV が小さいことである(ただし Md_{30} の高いところでは Er の差がなくなる)。

以上の事実を基にして種々検討した結果、極深絞り用鋼 R 304UD は、成分組成、 δ_f , Md_{30} および結晶粒度⁷⁾が Table 1 の範囲にある Cu 添加オーステナイト系ステンレス鋼として開発された。

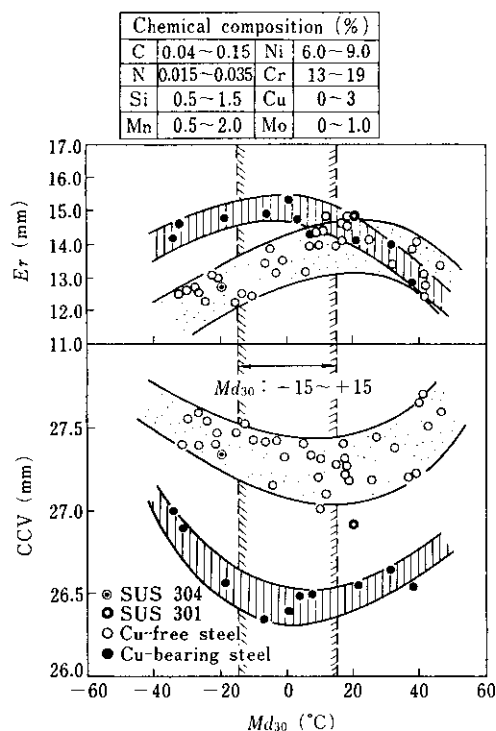


Fig.2 Relation between Erichsen value or conical cup value and austenite stability Md_{30}

4. R 304UD の材料特性

R 304UD の実際例について SUS 304 と比較しながら一般的な材料特性について述べる。

4.1 組成, 組織および硬度

5t 真空溶製鋼塊の組成やその他のデータを Table 2 に示す。2 種類の R 304UD のうち K 材は S 材より C がやや高いが、(C+N) 量ではそれほど差がない。R 304UD の特徴の一つである優れた張出し性とリストライク加工性を確保するためには、(C+N) はある程度以上の量が必要である。 δ_f は K 材、S 材ともに十分に低く、 Md_{30} はいずれも $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}\text{C}$ の間に入っている。また比較材としての SUS 304 は $Md_{30}=-20.3^{\circ}\text{C}$ で成分的にかなり安定な組成になっている。これら 3 種類の材料は現場の分塊、熱間圧延工程を通じ熱間加工性がいずれも良好であった。圧延率 60% で仕上げ冷延したのち前述の条件で仕上げ焼鈍した。それらの光学顕微鏡組織を Photo. 1 に示す。R 304UD の焼鈍組織は SUS 304 に比べて双晶発生頻

Table 1 Specification of chemical composition (wt%), δ_f , Md_{30} and ASTM grain size number of R 304UD stainless steel

C	N	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	(Nb,Ti or Ta)	δ_f^*	Md_{30}^*	ASTM G.S.N.
≤ 0.15	Not determined	≤ 2.0	≤ 3.0	≤ 0.04	≤ 0.03	6.0~8.0	13.0~15.0	1.0~3.0	≤ 1.0	≤ 0.1	$< 8\%$	$-15^{\circ}\sim+15^{\circ}\text{C}$	6.5~7.5

* Calculated from equations (1) or (2)

Table 2 Compositions and other data of typical R 304UD and SUS 304 specimens melted in 5t vacuum induction furnace

Specimen		Compositions (wt%)										δ_f^* (%)	Md_{30}^* (°C)	Recrystal- lization temp. ** (°C)	ASTM G.S.N.	H_v
		C	N	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo					
R 304UD	K	0.128	0.017	0.47	1.03	0.029	0.007	7.22	14.17	1.95	0.55	2.1	6.3	930	6.8	134
	S	0.084	0.039	0.49	1.55	0.027	0.008	6.93	13.70	2.93	—	1.7	8.1	900	6.8	138
SUS 304		0.076	0.018	0.51	1.65	0.030	0.008	9.06	18.72	—	—	0.4	—20.3	950	8.0	158

* Calculated from equations (1) or (2)

** Experimental values

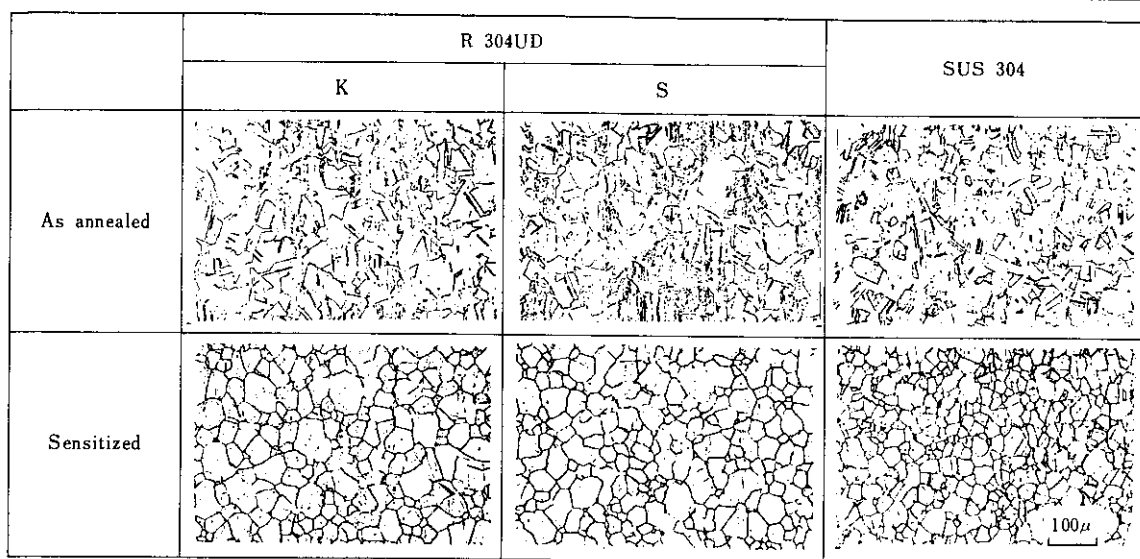


Photo. 1 Microstructures of specimens annealed or sensitized at 650°C for an hour

度が少ない傾向がある。Table 2 に示したように、R 304UD は SUS 304 に比べて非常にやわらかい。これは前者が後者よりも若干粗粒であることも影響しているが、より本質的には組成の違いによる母相の加工硬化度の差異による。

4・2 引張特性および成形性

Table 3 に空气中室温変形による引張りおよび成形試験結果を示す。成形試験は繰り返し 3 回ずつ行った。

Table 3 Results of tensile and forming tests of R 304UD and SUS 304 specimens of 0.7mm thick

Specimen		Angle from rolling direction	Tensile properties						Formability				
			0.2%PS (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	El (%)	PS/TS	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>Δr</i> [*]	<i>E_r</i> (mm)	CCV (mm)	LDR ^{**}	Bulge height (mm)
R 304UD	K	0°	24	70	57	0.34	0.55	0.86	-0.18	14.1	26.3	2.07	40.5
		45°	24	67	60	0.36	0.54	1.03					
		90°	24	68	61	0.35	0.55	0.83					
		Ave.	24	68	60	0.35	0.55	0.94					
	S	0°	24	70	57	0.34	0.56	0.95	-0.19	14.8	26.0	2.12	39.8
		45°	24	67	61	0.36	0.55	1.08					
		90°	23	68	59	0.34	0.55	0.83					
		Ave.	24	68	60	0.35	0.56	0.99					
SUS 304		0°	26	65	58	0.40	0.51	0.83	-0.15	12.5	27.4	1.93	42.0
		45°	26	62	62	0.42	0.48	0.99					
		90°	25	63	62	0.40	0.48	0.84					
		Ave.	26	63	61	0.41	0.49	0.91					

* Planar anisotropy, Δr , of r value is calculated from the following formula: $\Delta r = \frac{1}{2}[(r_0 + r_{90}) - 2r_{45}]$

** Using 100mm dia. cylindrical punch with flat bottom

4・2・1 引張特性

平均値でみると 0.2% 耐力や硬度測定結果からわかるように R 304UD は低加工度における強度が低く、軟質な材料といえる。それに対し引張強さは逆に大きく、したがって耐力比(0.2% 耐力 / 引張強さ)が低く n 値は大きい。さらに塑性ひずみ比 r 値については、面内異方性 Δr ならびに平均値 $\bar{r}$ のいずれも各試料間でとくに差異はみられない。また r 値以外の引張試験値の面内異方性に関しても、いずれの試料も類似の結果を示しており、特別な相違は認められない。

4・2・2 成形性

E_r と CCV は R 304UD のほうが明らかに優れている。100mm ϕ 平底円筒カップによる限界絞り比でも R 304UD は SUS 304 より 0.1~0.2 大きい。後述するように、しわ押え力を変化させたり荷重絞り試験法で調べた場合も限界絞り比は両鋼種で大きな差を示している。

これらに対して液圧バルジ試験における頂点張出し高さは、SUS 304 のほうが R 304UD よりも若干大きい。これはこの試験が 22°C の液体中で行われたことによるもので、材料特性の温度依存性が比較的大きい R 304UD にとっては不利な条件にあった。変形状態図中の破断限界曲線にもそれが現れている。

4・3 耐置割れ性および耐食性

4・3・1 耐置割れ性

Table 3 に示した限界絞り比を求めるための絞

り試験において、絞り加工完了後の成形品を空气中室温で保持した場合、各材料別の限界絞り比で成形した試料でも置割れは生じなかった。さらに、ブランクを 1 段または多段絞りにより種々の絞り比で成形し、80°C で 1h 時効処理後割れの有無を判定する方法によって強制的な耐置割れ性試験を行った。結果を Table 4 に示す。いずれも多段絞りによっては絞り割れは生じないが、絞り比の大きいものでは置割れを生じており、R 304UD の耐置割れ性が SUS 304 より若干劣ることは否めない。この原因は R 304UD の Md_{30} が SUS 304 より高く、オーステナイト母相が不安定で加工によって誘発される α' マルテンサイトが多いことにあるが、実際の市販品のプレス加工条件での置割れ発生の問題については後述する。

4・3・2 耐食性

R 304UD の耐食性を調べるため、塩水噴霧による耐しゅう試験と Strauss 粒界腐食試験を主として行い、一部耐応力腐食割れ試験も行った。また孔食電位や陽極分極曲線も測定した。

Table 5 に耐しゅう性および耐食性試験結果を示す。塩水噴霧試験結果では R 304UD と SUS 304 の間に差はみられない。溶接後使用される場合を想定し、Strauss 試験はすべて 650°C、1h 鋭敏化処理後の試料について行った。その結果はすべてクラック発生なしに密着曲げが可能であった。他方、Huey 試験の結果では R 304UD の K 材の腐食減量が他より若干多い。耐応力腐食割れ性を判定するために 42%MgCl₂ 沸騰液中で U 曲げ試験片による試験を行った結果、割れ発生時間および割れ貫通時間のいずれをとっても鋼種間に差はみ

Table 4 Results of delayed fracture test by multi-stage drawing

Specimen		Drawing ratio								LDR for delayed fracture
		1.90	2.00	2.05	2.16	2.24	2.35	2.45	2.58	
R 304UD	K	○	○	○	○	○	×	×	×	2.24
	S	○	○	○	○	○	×	×	×	2.24
SUS 304		○	○	○	○	○	○	○	×	2.45

○ : Without delayed fracture

× : With delayed fracture

Table 5 Corrosion resistance properties of specimens

Specimen		Salt spray test *	Strauss test	Huey test (g/m ² ·h)	SCC test (42%MgCl ₂)		Pit corrosion potential (mV)
					Time for initiation of crack (min)	Time for propagation of crack (min)	
R 304UD	K	1	Good	5.91	65	110	290
	S	0	Good	2.02	70	120	310
SUS 304		1	Good	1.66	70	140	340

* Number of rusts per 50×75mm² after 8h test

られなかった。また孔食電位の測定を 1 000ppm Cl⁻ 液 (液温 30℃ で N₂ バブリング) 中電位移動速度 21mV/min で行った。孔食電位は R 304UD のほうが SUS 304 よりも低いが大きな差ではない。さらにアノード分極曲線測定結果 (浸漬液は 5%H₂SO₄ 水溶液) はいずれの試料もほぼ同様であった。

なお TIG 溶接後の機械的性質や耐食性についても若干の調査を行った。たとえば溶接電流 50A, 溶接速度 350mm/min, 電極径 2.4mmφ で TIG 溶接した場合, 母材と比較して機械的性質や耐食性はほとんど変わらなかった。

5. 引張性質および成形性に関する検討

前章までの研究結果から R 304UD は優れた成形性を示すことがわかったが, さらにその塑性挙動の特質を調べ, 成形性が優れている原因を明らかにするため以下の検討を行った。

5-1 引張性質について

各供試材の性質は Table 3 に示したとおりであるが, 単軸引張試験における空气中室温変形時の塑性曲線を Fig. 3 に示す。R 304UD は SUS 304 に比べていずれも低ひずみ領域における応力が低く, 高ひずみ領域における加工硬化が顕著である。前者の事実は Cu 添加オーステナイト系ステンレス鋼の特徴とも考えられ⁸⁾, 形状凍結性や耐しわ性に有利である。またシंकのような角筒の絞り成形に対して, R 304UD のように低ひずみ領域でむしろ下に凸の応力-ひずみ曲線を呈する材料が有利であるともいわれている⁹⁾。

本鋼の塑性挙動は加工によって誘発される α' マ

ルテンサイトの変態挙動と密接な関連を有している。そこで空气中室温での単軸引張変形過程で発生した α' マルテンサイト量測定結果を Fig. 4 に示す。SUS 304 に比べて R 304UD は低ひずみにおいても α' マルテンサイト発生量がかかなり多いが, それにもかかわらず応力レベルは低く加工硬化指数が小さい。これには二つの原因が考えられる。

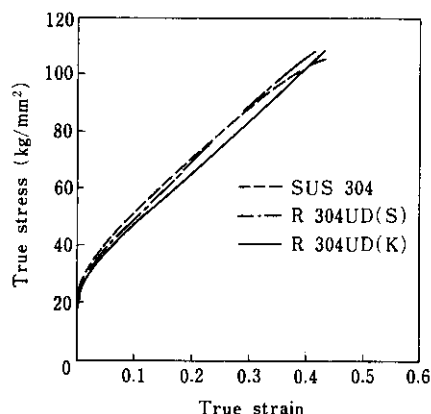


Fig. 3 True stress vs. true strain curves in tensile deformation in rolling direction

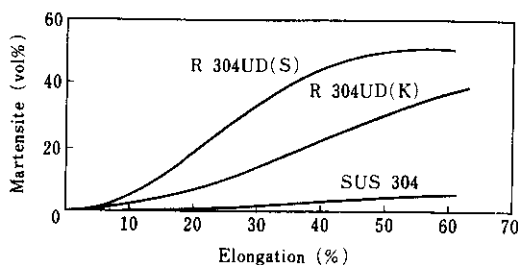


Fig. 4 Change in the volume fraction of martensite during tensile deformation in rolling direction

一つは母相の加工硬化の程度が軽微なことである。これは低ひずみ領域で R 304UD とほぼ同量の α' マルテンサイトを発生する N 含有 Cu 添加オーステナイト系ステンレス鋼¹⁰⁾ の流動応力が R 304UD よりもかなり大きいことから裏づけられる。もう一つは R 304UD の α' マルテンサイトが比較的軟質なこと、これは SUS 301 としては比較的安定な組成を有し、高ひずみ領域で R 304UD とほぼ同量の α' マルテンサイトを発生する鋼の流動応力が R 304UD よりもかなり大きい事実から裏づけられる。

本鋼のような準安定鋼の特性は変形温度に依存することが知られている。したがって、引張性質の温度依存性を知ることは成形性の観点から、また相変態量の温度依存性を知ることは置割れ性の観点から重要なので、これらを調べた結果を Fig. 5 に示す。破断伸びと試験温度との関係は、いずれもこの種のオーステナイト系ステンレス鋼に特有のピークを有する変化を示している。そして R 304UD のほうが SUS 304 よりいづれもピーク温度が高く、そのときの伸びも大きい。とくに空气中室温で実際の加工が行われる場合の材料の実質の変形温度は 30°~60°C と推定され、この温度範囲では R 304UD の伸びが著しく大きいので、実際加工では SUS 304 より有利と考えられる。また Fig. 5 の α' マルテンサイト量 (真ひずみ 0.30 のときの発生量) の温度依存性から Md_{30} の実験値が求められるが、それらは (2) 式による計算値とだいたい一致する。そして Md_{30} が大きいほど破断伸びのピーク温度とそのときの値が大きいこと

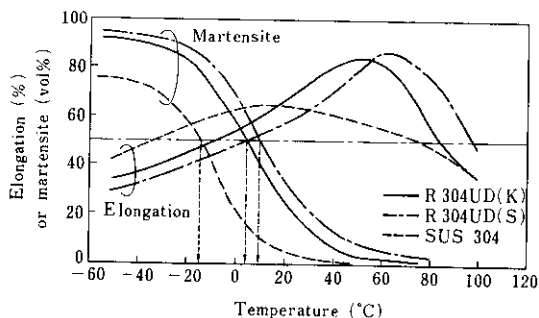


Fig.5 Temperature dependences of fracture elongation and volume fraction of martensite induced by true strain of 0.30 in tensile deformation

がわかる。すべての測定温度範囲で R 304UD のほうが SUS 304 より α' マルテンサイトが多発しており、このことが前者の機械的性質や成形性が優れている原因の一つと考えられるが、同時に耐置割れ性に若干劣る原因ともなっている。

5.2 成形性について

5.2.1 荷重-ストローク曲線

絞り成形における多軸変形の際の荷重とストロークの関係を調べ、鋼種間の比較と単軸変形との比較を行った。実験結果を Fig. 6 に示す。変形条

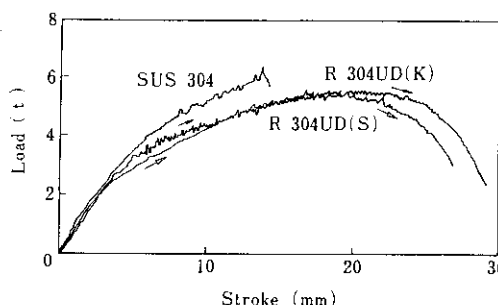


Fig.6 Load vs. stroke curves in cupping test by 33mm dia. flat bottom punch

件は 33mm ϕ 平底円筒工具、ポンチ肩半径 3mm、ダイス肩半径 3mm、プランク径 71mm、しわ押え力 1t、潤滑剤は水溶性固体潤滑剤の JPE800 である。この条件で R 304UD はいずれも絞り抜け、SUS 304 は破断した。両鋼種の絞り力-ストローク曲線を比較すると、ストローク 3~4mm までは同程度の絞り力を示す。この部分はプランクがポンチになじむ行程に相当し、ポンチ肩半径の影響を受ける領域である。さらに行程が進むと R 304UD の絞り力は SUS 304 より明らかに小さい。このことは絞り力 P_f を構成する四つの要素 (フランジ部における縮みフランジ抵抗 P_d 、ダイス肩における曲げ抵抗 P_b 、しわ押え力による摩擦抵抗 P_h 、ダイス肩における摩擦抵抗 P_i) のうち、材料の加工硬化に関連する P_d の影響もさることながら、R 304UD の場合 P_b 、 P_h および P_i が SUS 304 よりかなり小さいことを暗示している。

5・2・2 限界絞り比

金属材料のプレス成形性の全体像を把握するには、成形深さ-ブランク径-しわ押え力の間の関係を求めるのが望ましいが、このうち成形深さ-ブランク径の関係から求められる成形限界ブランク径 D_c または限界絞り比 LDR について、R 304UD と SUS 304 との比較において若干の検討を行った。

まずブランク径を少しずつ変えて成形深さを求める通常の方法で、 D_c または LDR を求めた結果を Fig. 7 に示す(100mmφ平底円筒型、ポンチおよびダイスの肩半径：いずれも 10mm、潤滑剤：JPE 800)。しわ押え力のいかににかかわらず R 304UD は SUS 304 に比べて大きな LDR を示している。LDR 以上の絞り比に対する成形深さも全領域にわたって SUS 304 より大きい。これは、張出し性の寄与が大きい複合成形性において R 304UD が SUS 304 よりも優れていること

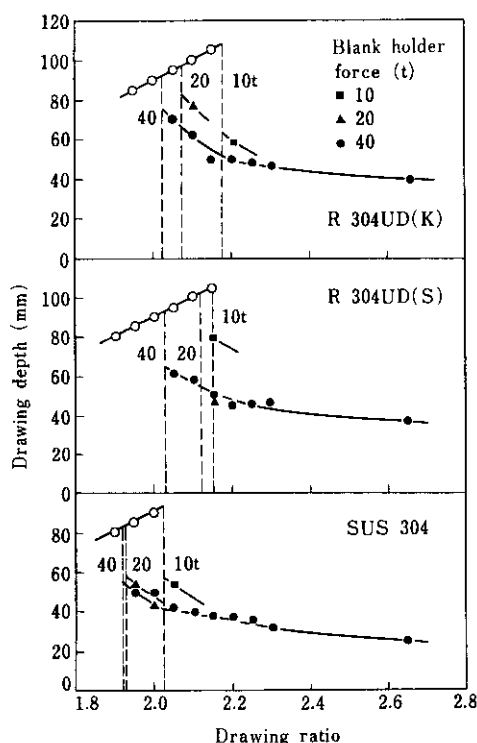


Fig.7 Correlation between drawing depth and drawing ratio in cupping test by 100mm dia. flat bottom punch

を示すものである。

LDR は、次式のように絞り力 P_f とこれを支えるカップの壁から底へかけての強さ(破断力) P_z で決まる。

$$LDR = f(P_f, P_z) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし $P_f = P_a + P_b + P_h + P_i$ である。TPZ 法(荷重深絞り試験法)によれば、あるブランク径での(最大)絞り力と破断力が求められるから、R 304UD の優れた LDR が P_f もしくは P_z のいずれに起因しているのかを推定することができる。結果を Fig. 8 に示す。これらは最大絞り力 $P_{f,max}$ まではし

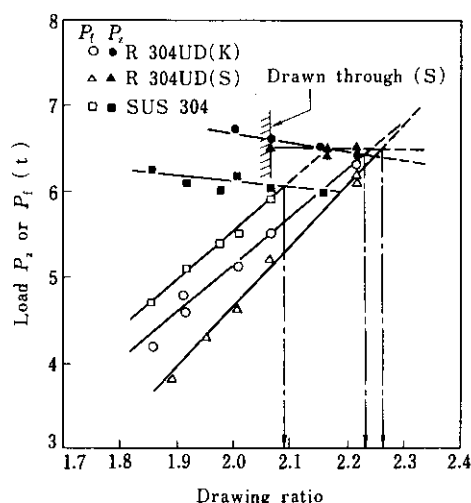


Fig.8 Change in fracture load P_z and drawing load P_f with drawing ratio in TPZ cupping test by 33mm dia. flat bottom punch

わ押え力を 2t とし、その後 9t に増加させて得られた結果である。Fig. 7 と同様 R 304UD の D_c もしくは LDR は SUS 304 よりもかなり大きい値を示した。図からその原因は、各ブランク径での R 304UD の $P_{f,max}$ の低下、かつ P_z の増大にあることがわかる。このことは、Fig. 3 において R 304UD の引張塑性曲線が SUS 304 と比べて低加工度において低応力を、高加工度において高応力を示したことに対応しているものと思われる。

5・2・3 成形可能領域の推定

実際のプレス作業を想定した場合、種々の寸法を有するブランクを用いたときのしわ押え力による成形深さの変化を、しわと破断の発生の双方を

考慮して把握しておくことが肝要である。それによってしわも破断も生じない成形可能領域を推定することができる。

Fig. 9 に 71mm ϕ のブランクを用いた 33mm ϕ 平底円筒型による成形実験の結果を示す。このブランクでは、しわ押え力をどのように選んでもしわも破断も生ぜずに SUS 304 を絞り抜くことはできない。しわ押え力が 0 から増加するにつれてしわ発生による成形限界深さは直線的に増加し、しわ押え力が 500kg 以上になるとその増加とともに破断限界深さは徐々に減少し、結局しわも破断も生じない成形可能領域が区分される。これに対し R 304UD の場合には、しわも破断も生ぜずに絞り抜くことのできるしわ押え力の値が存在する。耐しわ限界および耐破断限界ともに SUS 304 より大きく向上し、その結果成形可能領域が非常に広がっている。R 304UD の耐破断限界が同一しわ押え力のもとで SUS 304 より大きいことは、Fig. 7 においてブランク径の大きい領域で R 304UD の成形深さが SUS 304 より大きいことと対応している。

さて Fig. 9 は模式的に Fig. 10 のようにかける。 H_{max} はトライアウト時にダイフェイス側の条件を

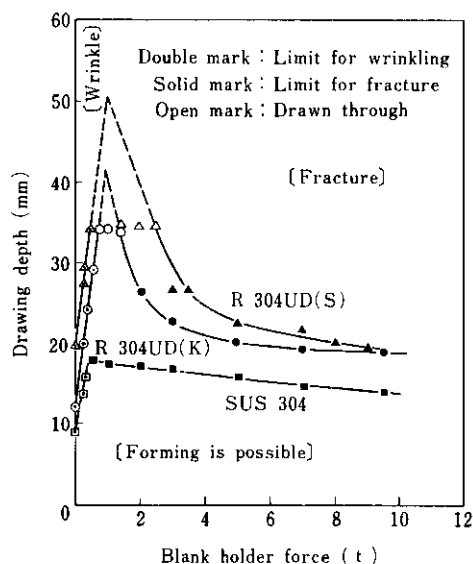


Fig. 9 Correlative effect of drawing depth and blank holder force on defect occurrence in cupping test using 33mm dia. flat bottom punch, 71mm dia. blank and lubricants JPE800

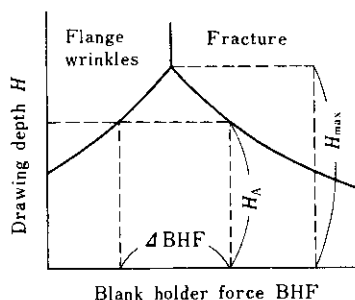


Fig. 10 Schematic representation of correlative effect of drawing depth and blank holder force on defect occurrence

うまく調整すれば、この深さまでは不良なしに成形することができる限界を示しており、またもし成形深さが H_A に設定されたとすると、 ΔBHF の値の範囲内ではしわも破断も生じない良品が得られるわけで、 H_{max} や ΔBHF は成形時のしわと破断の両面を考慮し、さらに生産時の安定性という概念を含む成形性の尺度といえる。さらに簡便法として CCV 工具を用いて得られるしわと破断の両者を考慮した成形性指標 FI (Formability Index) 値

$$FI = \frac{1}{\eta_B \cdot \eta_F} \quad \dots\dots\dots (4)$$

は、軟鋼の円錐台試験で生じたボディーしわに関して得られた ΔBHF とよい対応を示すとされている¹¹⁾。ここに η_B は、CCV 試験において規格より上のレベルの工具を使い、あえて口辺しわを生じさせ、荷重が低下する時点で CCV 試験を中止したときのブランク外径変化率、 η_F は通常の CCV 試験で求められるブランク外径変化率である。そこで本実験材のフランジしわに関して得られた H_{max} 、 ΔBHF および FI 値を Table 6 に示す。R 304UD の各指標は SUS 304 のそれらよりも

Table 6 Formability indices defined in Fig. 10 for the present specimens

Specimen		H_{max} (mm)	ΔBHF^{**} (t)	FI value
R 304UD	K	42 *	5.7	1.60
	S	50 *	7.8	1.59
SUS 304		18	-1.0 *	1.53

* Extrapolated values

** ΔBHF were obtained by assuming $H_A = 20\text{mm}$

いずれも大きい。データ数は少ないが FI 値と $H_{\max}$ もしくは ΔBHF の間には正の相関がありそうなので、ステンレス鋼においても FI 値を簡便試験法として用いる可能性がある。軟鋼の $H_{\max}$ は、

$$H_{\max} = (0.057r - 0.0035)D_d + 0.171D_p + 0.58r_p + 36.6t + 12.1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

なる回帰実験式で表され¹²⁾、材質としては r 値が関与する。本実験材の r 値については Table 3 に示したように材料間にほとんど相違がみられず、 $H_{\max}$ に大きな差が生じた。これは準安定オーステナイト系ステンレス鋼の特質を示すものと思われる。

5・2・4 成形限界曲線の決定

SUS 304 と R 304UD の破断ひずみ限界の実測値と、角筒成形時のコーナー方向のひずみ分布測定結果を変形状態図上に同時に表したのが Fig. 11 である。破断限界線は円筒絞り(平底および球底)、

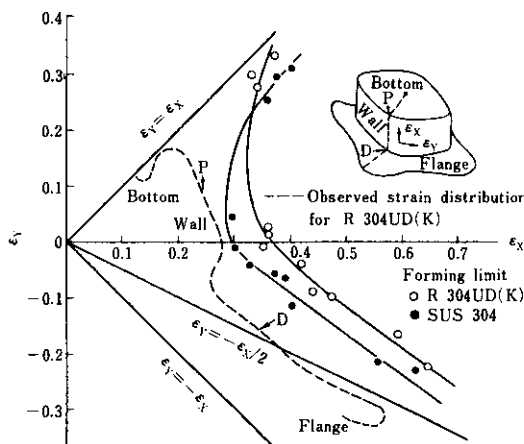


Fig. 11 Forming limit curves of R 304UD and SUS 304 and strain distribution in rectangular drawing

角筒絞り、単軸引張り、R 付単軸引張り、液圧バルジ試験(円および楕円)の各試験結果から求めた。R 304UD の破断限界線は、等 2 軸ひずみ近傍状態を除いて SUS 304 のそれより主ひずみ ϵ_x の大きいところに位置している。付記した角筒絞りの実際例では、平面ひずみ状態に近い部分(ポンチ肩部より少しフランジ部に寄ったところ)が破断限界線にもっとも接近しており、角筒絞りではこの部分で破断が生じやすいことがわかる。し

たがって、材料としては平面ひずみ状態での延性の優れているものがこのような絞りには好ましく、この点において、R 304UD は優れた角筒成形能を示すことが推測される。なおここに得られた変形限界曲線の形態は、拡散くびれおよび局部くびれ変形において、応力比およびひずみ比の変化をとり入れて得られた結果と基本的に同じで、平面ひずみ状態における限界点をもっとも原点に近い特徴を有している。等 2 軸状態近傍で両鋼種の成形限界曲線が交叉したのは、このひずみ比におけるプロットが液体中で求められたものであるため、材料の加工誘起変態の温度依存性が剛体工具による空気中での変形(他のひずみ状態におけるプロットはこの条件で求められた)と異なることによるものと考えられる。

6. 実機によるプレス実験

以上のような材料特性を有する R 304UD を実際の深型シンのプレス成形に適用し、SUS 304 を比較材として成形性、形状性、張り剛性、耐置割れ性、溶接性などの種々の観点から応用試験を行った。成形体の寸法は長辺 550mm、短辺 430mm、深さ 200mm、ポンチ肩半径 30mm、ダイス肩半径 4mm、コーナー半径 80mm で、辺のキャンバーや側壁のテーパはとくにつけていない。プレスは出力 300t の単動油圧式で、リン青銅合金をインサートした金型を用いた。潤滑剤としてはステンレス用の水溶性潤滑剤とスピンドル油を混合したものを用いた。ブランクはシアでせん断した 8 角型のもので、その寸法は一定とした。成形方法は 2 回法で 1 次絞りののち第 2 次工程でリストライク処理を行った。Photo. 2 に成形体の一例を示す。これは 1 次絞り 175mm、リストライク 25mm、しわ押え力 90t の条件でプレスしたものである。

Table 7 に 1 次絞りと 2 次リストライクの成形深さ (h_1 および h_2 とする) のバランスを変化させた実験結果を示す。後述するように形状性は現場での官能検査の結果である。R 304UD の場合は $h_1 \geq 150$, $h_2 \leq 50$ の範囲で成形可能であるのに対し、SUS 304 の場合は $h_1 \geq 165$, $h_2 \leq 35$ の範囲で成形可能で、それ以上 h_2 が大きくなるとリストライクで破断を生ずる。 h_2 が大きいほどリストライク後の成形

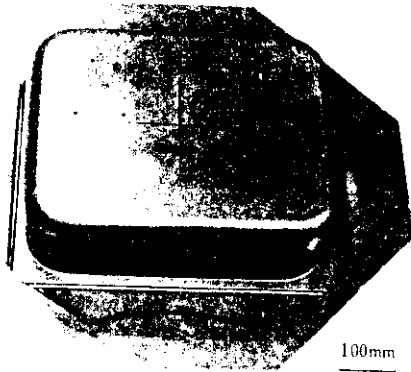


Photo. 2 Sink and its blank made of R 304UD

体の形状（側壁のそり）がよくなる傾向があり、この点においても R 304UD は SUS 304 よりも有利である。そのうえ h_1 と h_2 のバランスが同じであれば、SUS 304 よりも R 304UD のほうが形状性に優れている。そしてリストライク成形まで可能だった R 304UD 成形品は、室温に1箇月保持後も置割れをまったく生じなかった。なお、R 304UD の溶接性および研摩性は SUS 304 と同等で、成形品を仕上げるうえでの問題はなかった。

通常工程条件 ($h_1=175\text{mm}$, $h_2=25\text{mm}$) でプレス成形した R 304UD および SUS 304 成形体のコーナー方向の板厚分布と α' マルテンサイト変態量測定結果を Fig. 12 に示す。成形体の切断にはせん断ひずみを生じさせないために放電切断機を用いた。板厚はポンチ肩部において最低値 0.52mm (SUS 304) および 0.48mm (R 304UD) を示している。いずれの部位においても SUS 304 よりも

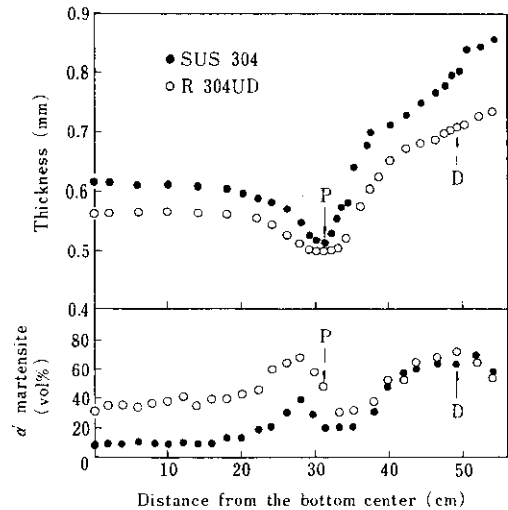


Fig. 12 Distributions of thickness and amount of strain-induced martensite along the corner direction of press formed sink

R 304UD のほうが板厚減少程度が明らかに大きく、かつ板厚分布も若干均一である。これは R 304UD のフランジ残り幅が大きい事実と対応しており、ブランク寸法を減少させる可能性を示すものである。また α' マルテンサイト量は底部では R 304UD のほうが多発しているが、側壁部やフランジ部では差異はみられない。これは Fig. 11 を参照すると、平面ひずみ変形に近い変形様式のもとではマルテンサイト変態のひずみ量依存性が小さくなることを示すものである。このように、R 304UD は SUS 304 に比べて軟質で n 値が大きいので、たとえしお押し圧力が小さくてもひずみの伝播性に優れ均一に変形しやすい。したがって破断し

Table 7 The effect of the balance of drawing and restriking depth on press-formability of sink with the depth of 200mm

Drawing (mm)		180	175	170	165	160	155	150	145	140
Restriking (mm)		20	25	30	35	40	45	50	55	60
SUS 304	Fracture	○	○	○	○	×	×	×	×	×
	Shape fixability	×	△	△	○	—	—	—	—	—
R 304UD	Fracture	○	○	○	○	○	○	○	×	×
	Shape fixability	○	○	○	◎	◎	◎	◎	—	—

Fracture: ○ Not fractured, × Fractured

Shape fixability: ◎ Very good, ○ Good, △ Not so good, × Inferior

にくく、かつ側壁ひずみも生じにくいから形状性にも優れているといえる。ブランク寸法を小さくして使用材料を減らすことも可能である。そして底部平坦部を除くとマルテンサイト発生量も SUS 304 と変わらない。置割れもこの程度の変形状ではとくに問題とはならない。

Table 7 に現場での官能検査によるプレス後の形状性判定結果を示したが、さらに実験室的に定量測定した結果について述べる。すなわち、ダイヤルゲージを利用して基準側面からの側壁のそり(べこつき)の最大値を測定するとともに、側壁のたわみの増加に対して荷重増加が示されなくなる点に相当する、いわゆる“転移点荷重”をばねばかりを利用して測定した。転移点荷重が大きいほど側壁の剛性が大きく控屈しにくい。これら測定値を 1 次絞りとリストライクの組合せ変化に対応して示したのが Fig. 13 である。リストライク量 25mm 時の SUS 304 の側壁のそりは 3mm であるのに対し、同じ条件における R 304UD のそれは、1.7mm で 1mm 以上小さい。そして R 304UD に 50mm 程度リストライクを施すとそりはほとんど 0 に近い。Table 7 に示したように R 304UD はこのような条件での成形も可能であるから、形状矯正上非常

に有利である。なお 1 次絞り 180mm のままの状態でのそりは 5mm 以上と非常に大きいが、20mm のリストライクを行うことによりこれが 3mm 程度に減少する。他方、転移点荷重測定結果によれば、リストライク量が 20mm のときの SUS 304 と R 304UD の荷重はいずれも約 1kg で同程度である。そして R 304UD のリストライク量を増加させると 30mm まではわずかに荷重の増加がみられるにすぎないが、35mm 以上ではかなり大きい転移点荷重を示し、45mm 以上では約 11kg と一定値を示すようである。これは側壁のそりの減少と対応しており、R 304UD はリストライク量 50mm まで成形可能であるから、十分な剛性を確保するうえからも都合がよい。なお 1 次絞り 180mm のままの状態における転移点荷重は約 11kg と大きい、これは図示したように側壁全体に大きなそりが生じているためコーナー部分からの強い拘束を受けるからであり、20mm リストライクすることによってそりの最大値が低下するとともに、その分布も側壁中央に限定されるため、転移点荷重は急減する。これを回復させるにはリストライク量を増す必要がある。

7. 結 論

極深絞り用オーステナイト系ステンレス鋼 R 304UD の開発経過、材質特性、基礎的プレス成形実験結果および実際の生産現場における深型シクのプレス実験結果などについて論述した。

(1) 化学組成から求められるオーステナイト安定度と Er もしくは CCV との関係を調べた結果、成形性に最適なオーステナイト安定度が存在することがわかった。そして Cu 添加鋼は添加しないものに比べてこの最適安定度はあまり変わらないが、そのときの成形性は格段に優れていることが認められた。

(2) (1)の事実と熱間加工性および結晶粒度の影響などを考慮した結果、Cu 添加鋼でもっとも優れた極深絞り性を示す成分バランスをもつ R 304UD が開発された。

(3) R 304UD は SUS 304 に比べて軟質で硬度は低いが抗張力は高く、したがって加工硬化指数が大きい。 Er および CCV とともに優れた値を示

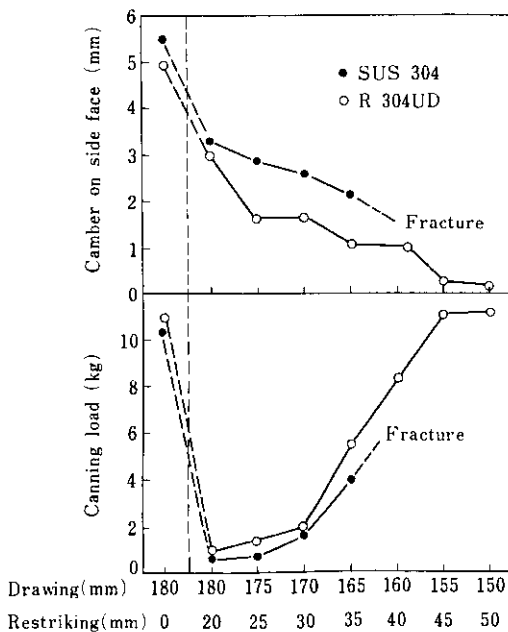


Fig. 13 Influences of the drawing ratio and restriking on camber and oil canning of side face of press formed sink with the depth of 200mm

す。そして耐置割れ性は SUS 304 より若干劣るが、耐食・耐しゅう性は SUS 304 と変わらない。

(4) R 304UD の引張性質は変形温度に強く依存し、30°~60°C 変形での破断伸びが著しく大きい。この温度範囲は空气中室温でプレス加工を行う際の素板の成形温度に相当している。

(5) 円筒型を用い、荷重深絞り試験法によって求めた R 304UD の限界絞り比は SUS 304 よりかなり大きい。この原因は SUS 304 に比べて R 304UD の絞り力が小さく、かつ破断力が大きいことにある。

(6) しわも割れも発生しない成形可能領域を実験

的に測定した結果、R 304UD のほうが SUS 304 よりも明らかに広いことが確かめられた。また成形限界曲線測定結果によれば、角筒成形でもっとも破断の生じやすいポンチ肩近傍の平面ひずみ状態における成形限界が R 304UD の場合とくに大きい。

(7) 実機による深型シンのプレス実験を行った。その結果、R 304UD を使用すると、1 次絞り量を減らし、かわりにリストライク量を増やしても破断が生じにくく、SUS 304 に比べて側壁の形状性を著しく改善し得ることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 大橋、小野、野原：鉄と鋼，63 (1977)，812
- 2) 野原、渡辺、大橋：鉄と鋼，59 (1973)，S243
- 3) A. L. Schaeffler, W. T. Delong and G. A. Ostram: Weld. Research, (1956), Nov., 521
- 4) T. Angel: JISI, 177 (1954), 165
- 5) 野原、小野、大橋：鉄と鋼，61 (1975)，S274
- 6) 野原、小野、大橋：鉄と鋼，62 (1976)，S365
- 7) 深瀬、江波戸、津田：鉄と鋼，57 (1971)，S161
- 8) 深瀬、江波戸、大久保、村尾：日本金属学会誌，32 (1968)，38
- 9) 吉田：私信
- 10) アームコ・スチール：日本国特許，特公昭43-8343
- 11) 川崎製鉄(株)：薄鋼板成形技術研究会資料49-44，(1974)
- 12) 薄鋼板成形技術研究会：塑性と加工，13 (1972)，53