
ステンレス薄鋼板の成形性に及ぼす板厚および工具寸法効果

Effects of Blank Thickness and Die Dimensions on Press Formability of Stainless Steel Sheets

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

要旨：

ステンレス薄鋼板の引張性質およびプレス成形性に対する板厚および工具寸法効果を SUS403, SUS304 および SUS301 を用いて検討した。SUS304 や SUS301 のオーステナイト・ステンレス鋼の引張破断伸びやエリクセン値は板厚の増加とともに減少し、フェライト・ステンレス鋼の SUS430 とはまったく逆の傾向を示した。この原因は、オーステナイト・ステンレス鋼の板厚が厚いほど加工硬化に伴う材料の温度上昇が大きくて α' マルテンサイトが発生しにくく TRIP 現象が有効に作用しないことにある。各鋼種とも円筒絞り深さはポンチ肩半径あるいはダイス肩半径の増加につれて増加した。そして絞り深さと工具寸法因子との間に特定の関係が存在することが示された。

Synopsis：

Effects of specimen thickness and tool size have been investigated on tensile properties and press formability of ferritic and austenitic stainless steel sheets. Contrary to the case of ferritic stainless steels such as SUS 430, elongation at fracture and Erichsen values in austenitic stainless steels such as SUS 304 and SUS 301 decreased with an increase in thickness. This is because the thicker the austenitic stainless steel, the higher the rise in temperature of the material due to deformation, thereby inhibiting the generation of martensite and retarding an effective TRIP phenomenon. Drawing depth in cupping test increases with an increase of either punch shoulder radius or die shoulder radius. A quantitative relationship between drawing depth and tool size factors has been empirically recognized.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

ステンレス薄鋼板の成形性に及ぼす 板厚および工具寸法効果

Effects of Blank Thickness and Die Dimensions on Press Formability of Stainless Steel Sheets

野原 清彦*

Kiyohiko Nohara

渡辺 健次**

Kenji Watanabe

小野 寛***

Yutaka Ono

大橋 延夫****

Nobuo Ohashi

Synopsis:

Effects of specimen thickness and tool size have been investigated on tensile properties and press formability of ferritic and austenitic stainless steel sheets. Contrary to the case of ferritic stainless steels such as SUS 430, elongation at fracture and Erichsen values in austenitic stainless steels such as SUS 304 and SUS 301 decreased with an increase in thickness. This is because the thicker the austenitic stainless steel sheet, the higher the rise in temperature of the material due to deformation, thereby inhibiting the generation of martensite and retarding an effective TRIP phenomenon. Drawing depth in cupping test increases with an increase of either punch shoulder radius or die shoulder radius. A quantitative relationship between drawing depth and tool size factors has been empirically recognized.

1. 緒 言

金属材料のプレス成形性は、材料の力学的性質や表面状態、潤滑剤、しわ押え圧力、変形速度、変形温度、工具の形状および寸法、板どりおよび板の置きかたなどによって複雑な影響を受け、しかもこれら諸因子間には交互作用が存在する。ステンレス鋼もその例にもれないが、これら要因のうちまず板厚効果については、同一組成で材質特性が同一視できしかも板厚が異なる材料について、引張性質や成形性を調べることが望ましい。そこ

で本研究では、フェライト系とオーステナイト系のステンレス鋼板（以下それぞれオーステナイト鋼およびフェライト鋼と記す）を対象とし、仕上圧延率および仕上焼鈍条件を一定にして作製した板厚の異なる試験材の引張性質および軸対称成形性を調べることにした。

一方、工具寸法効果については、SUS 304 ステンレス鋼を用いて 40mmφ 円筒型絞りにおけるポンチ角隅半径の影響を調べた山田らの報告¹⁾がある。本実験では、フェライト鋼および組成安定度の異なるオーステナイト鋼を 100mmφ 円筒型によって成形したときの寸法効果を調べ、山田らの

* 技術研究所特殊鋼研究室主任研究員・工博

*** 技術研究所特殊鋼研究室主任研究員

〔昭和52年1月31日原稿受付〕

** 技術研究所特殊鋼研究室

**** 技術研究所特殊鋼研究室室長・工博

実験結果も加味して検討を行った。

筆者らは先にオーステナイト・ステンレス薄鋼板の引張性質に及ぼす試験片形状の影響について報告した²⁾。その際、オーステナイト鋼はフェライト鋼や軟鋼とは本質的に異なる形状効果を示し、かつ成分バランスの相違に基づく組成安定度の相違によってもその効果が異なることがわかった。今回の実験で板厚および工具寸法効果に関してもこれらと同様の結果が得られたので、とくに材料の加工硬化性の相違の観点から検討を行った。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

本研究にはフェライト鋼の代表鋼種 SUS 430 およびオーステナイト鋼の代表鋼種で加工に対する安定度の異なる SUS 304 と SUS 301 の計 3 鋼種の 50t 電気炉出鋼材を供試材とした。それらの化学組成を Table 1 に示す。

板厚効果の実験には、板厚が異なっても材質差のない試験材を用いるために、仕上圧延率と仕上焼鈍条件を一定にして供試材を作製した。すなわ

ち、上記出鋼材から 30mm 厚の熱延母板を作製し、これを用いて Table 2 に示すような工程により 0.5 ~ 1.2mm 厚の 5 種類の試験材を実験室的に作成した。仕上圧延率はいずれも 40%，仕上焼鈍としてはフェライト鋼とオーステナイト鋼で異なる条件を選んだ。熱容量が十分大きいので、板厚が異なっても材料の熱履歴はほとんど差がなかった。その結果、試験材の結晶粒度はいずれも ASTM No. 8.0 前後となった。

他方、工具寸法効果の実験には、Table 1 に示した電気炉出鋼材を現場工程にて 0.5mm 厚まで圧延後仕上焼鈍したものを用いた。その機械的性質および軸対称成形性試験値を Table 3 に示す。結

Table 1 Chemical compositions of specimens (wt%)

Specimen	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
SUS 430	0.06	0.57	0.49	0.022	0.004	0.19	16.26	0.0222
SUS 304	0.06	0.66	1.57	0.033	0.009	9.05	18.16	0.0204
SUS 301	0.11	0.51	1.06	0.027	0.006	7.17	17.17	0.0206

Table 2 Production condition of specimens for the experiment on the effect of sheet thickness

Mother sheet thickness (mm)	Prior cold rolling		Final cold rolling		Final annealing
	Reduction (%)	Thickness (mm)	Reduction (%)	Thickness (mm)	
3.0	33	2.00	40	1.2	SUS 430 : 950°C×5min→A.C.
	44	1.67	40	1.0	
	56	1.33	40	0.8	SUS 301 } : 1 100°C×3min→A.C. SUS 304 }
	61	1.17	40	0.7	
	72	0.83	40	0.5	

Table 3 Mechanical properties of the specimens for the experiment on the effect of die dimensions

Specimen	Thickness (mm)	H_V	PS (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	El (%)	n	$\bar{r}$	E_r (mm)	C.C.V. (mm)	B.H.* (mm)	L.D.R.	G.S.N.
SUS 430	0.5	159	34	51	27	0.34	0.90	8.6	29.0	28	2.06	7.8
SUS 304	"	165	27	64	57	0.55	1.09	12.2	27.1	40	2.00	8.2
SUS 301	"	193	29	77	59	0.67	1.05	15.0	26.6	39	2.00	7.9

* B.H. : Bulge Height

晶粒度は板厚効果用の試験材と同様 ASTM No. 約 8.0 である。

2.2 実験方法

板厚効果に関する実験を次のような方法で行った。単軸の引張試験を島津製作所製 10t オートグラフによって空気中(室温 21°C), クロスヘッド速度 30mm/min で行った。試験片は JIS 13B 号で, 圧延方向に平行, 直角および 45° の 3 方向について試験し, それらの平均値を測定値とした。試料の平面硬度を島津製作所製ピッカース硬度計により荷重 1kg にて測定し, くり返し 5 回の平均値を測定値とした。また軸対称成形試験としてエリクセン試験および液圧バルジ試験を行った。前者は 90mm 角ブランクを用いてグラファイトグリース潤滑により, 後者は 100mm ϕ 円形ダイスを用い, 締付圧力 100t で行った。これらのほかに板厚効果の原因を検討するため, 断面相似試験片による引張試験, 単軸および等 2 軸変形過程における試料の温度変化ならびにマルテンサイト発生量の測定なども行った。マルテンサイト量の測定は, 西独 Hermut 社製フェライト量測定装置によった。

工具寸法効果に関する実験を次のような方法で行った。100mm ϕ の円筒工具を用い, ポンチ肩半径を 6~49mm, ダイス肩半径を 5~15mm の範囲で変えた。クリアランスは 0.6mm, 潤滑剤は水溶性のジョンソン・ワックスとし, 100t 油圧プレスを用い室温 20°C の大気中で 220mm ϕ のブランクを約 240mm/min のプレス速度で絞ったときの絞り深さを測定した。しわ押え力としてフランジにしわの生じない限界しわ押え力を選択し, オーステナイト鋼の場合 40t, フェライト鋼の場合 20t とした。

3. 実験結果

3.1 板厚効果

引張試験による破断伸びおよび塑性ひずみ比 $\bar{\epsilon}$ と板厚との関係を Fig. 1 に示す。破断伸びの板厚による変化は鋼種によってそれぞれ異なっており, 板厚の増加につれて SUS 430 の場合は単調に増加するが, SUS 304 の場合はほとんど変化がみ

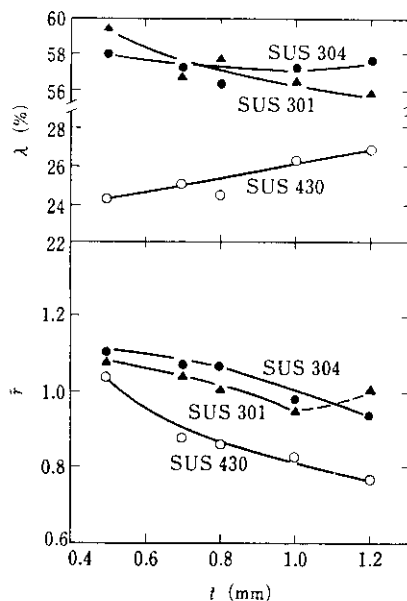


Fig. 1 Changes in elongation λ and Lankford value $\bar{r}$ with thickness t of specimens

られず, また SUS 301 では単調に減少している。他方 $\bar{r}$ 値は, SUS 301 の 1.2mm のプロットを除くと板厚の増加につれて減少傾向を示している。仕上圧延率・焼鈍条件を一定にしたために, 板厚が異なっても材質の差はないとしても, $\bar{r}$ 値に対しては板厚と引張試験片の平行部の幅の比が異なることによる効果が考えられる。この点については後に検討する。次に軸対称成形試験としてエリクセン試験値と液圧バルジ張出し高さ測定結果を Fig. 2 に示す。エリクセン値の板厚による変化は伸びの場合と類似しており, 鋼種によって異なる傾向を示している。すなわち, 板厚の増加に対して SUS 430 の場合は増加し, SUS 304 ではほとんど変化せず, そして SUS 301 では減少している。これに対して, バルジ張出し高さはすべての鋼種について板厚の増加とともに一様に増加している。以上のように鋼種により, また材料試験値により異なる板厚依存性が得られ, とくに SUS 301 の場合は板厚が厚くなるほど伸びやエリクセン値が減少するという特異な結果が得られた。これらの原因についても後に検討する。

Fig. 3 に各鋼種の板厚の異なる引張試験片について変形後の硬度分布を示す。変形量は 50% または 20% である。いずれもつかみ部から平行部中心に近づく

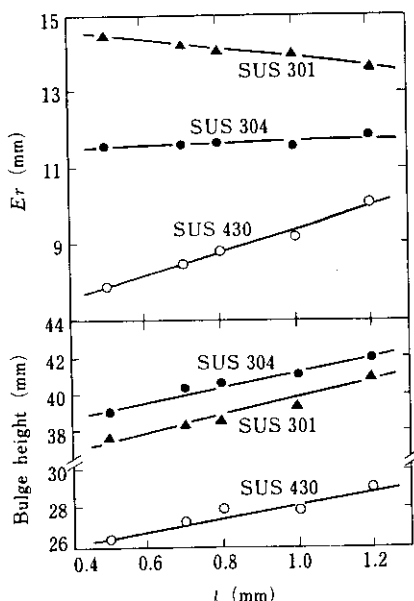


Fig. 2 Changes in Erichsen value E_r and bulge height with thickness t of specimens

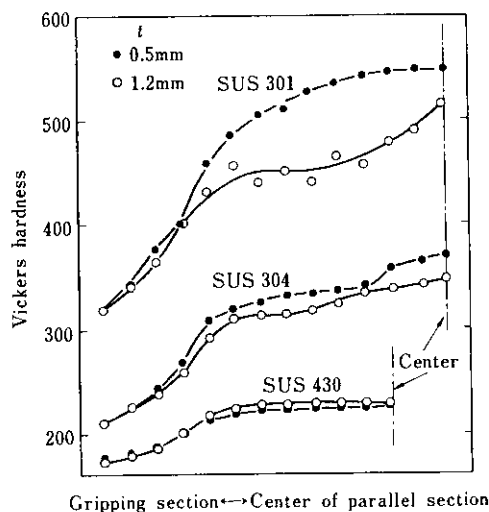


Fig. 3 Vickers hardness distribution in tensile specimens deformed by 50% for SUS 301 and SUS 304 and 20% for SUS 430

につれて硬度は漸増するが、SUS 430 の場合はどの部位でも板厚による硬度の差がほとんどみられない。これに対して、SUS 304 の場合は平行部において 0.5mm 厚の試料の硬度のほうが 1.2mm 厚の試料のそれよりも大きい値を示している。SUS 301 の場合それがさらに顕著で、平行部に

において 0.5mm 厚と 1.2mm 厚のビッカース硬度の差は最大 70 程度に達している。他方、硬度測定を行った試験片内のどの部位においても各鋼種ごとのひずみ分布の差は、板厚が異なってもとくに認められなかった。したがって、Fig. 3 に示したオーステナイト鋼に関する実験結果は、板厚変化に伴う特異な現象といってよい。この点についても後で検討する。

3.2 工具寸法効果

100mm ϕ 円筒絞り試験における成形深さに対するポンチ肩半径 r_p の影響を $r_p=6\sim 49$ mm の範囲で調べた結果を Fig. 4 に示す。ダイス肩半径 r_d は 10mm である。Fig. 4 によれば r_p が増加するにつれて成形深さはいずれも増加する。そして、その増加傾向はオーステナイト鋼の場合は直線的であり、フェライト鋼の場合は $r_p=20$ mm までは直線的であるが、それ以上では増加の程度が少なくなって $r_p=49$ mm (すなわち 100mm ϕ 球底円筒絞りに相当) のときの値では飽和しているようにみえる。すなわち、フェライト鋼は r_p が大きくなるとその影響をあまり受けなくなるが、オーステナイト鋼は r_p の値にかかわらずその影響を大きく受け、中でも相が不安定な SUS 301 がもっと

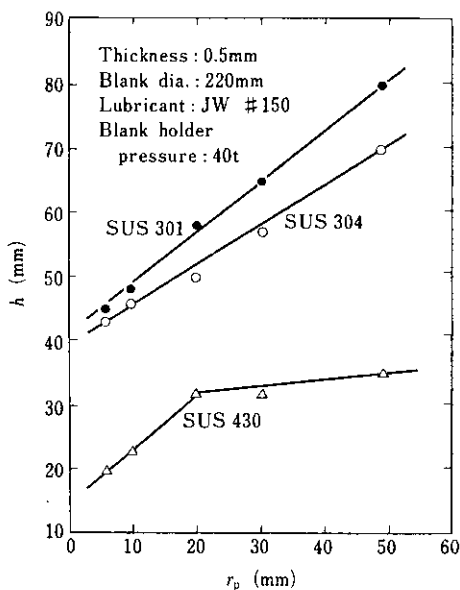


Fig. 4 Change in drawing depth h with punch shoulder radius r_p

も敏感である。

次に同じく 100mm ϕ 円筒絞り試験において $r_p=10$ mm の場合の成形深さに対するダイス肩半径 r_d の影響を $r_d=5\sim 15$ mm の範囲で調べた。結果を Fig. 5 に示す。 r_d が増加するにつれて成形深さはいずれも増加するが $r_d>15$ mm ではほぼ一定値をとるようであり、また成形深さの増加のしかたは r_p の場合とは異なってフェライト鋼もオーステナイト鋼も同様である。

Fig. 6 に SUS 301 を $r_p=6, 20, 49$ mm で成形した場合の各部位の板厚測定結果を示す。これによれば r_p が大きいほうが成形深さは大きいのに、板厚の減少は少なく均一変形する傾向のあることがわかる。すなわち r_p が異なることによる板厚の相違は、ダイス肩部からフランジ部へかけ

ては小さいが、底部から r_p 部にかけてはかなり大きい。この板厚分布の結果については、変形による誘起マルテンサイト分布との関連において後に検討する。

4. 考 察

4.1 板厚効果

4.1.1 断面相似試験片による検討

まず塑性ひずみ比($\bar{\epsilon}$ 値)に関しては、たとえ材料自身に塑性異方性がなく($\bar{\epsilon}=1$)でも、試験片の平行部幅が同じならば幅拘束のために板厚の薄い試料ほど変形による板厚減少が相対的に少なくなり、 $\bar{\epsilon}$ 値が増加するものと考えられる。Fig. 1 に示した実験結果がそれを示唆している。

このことを調べるために JIS 13B 号試験片を基準とし、その(平行部幅)/(板厚)=10.4 と一定となるように板厚 0.5, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2mm の各試料の板幅をそれぞれ 5.2, 7.3, 8.4, 10.4, 12.5mm とした試験片(断面相似試験片)を作製し、Fig. 1 の場合と同一条件で $\bar{\epsilon}$ 値を測定した。結果を Fig. 7 に示す。これからオーステナイト鋼については Fig. 1 と異なって $\bar{\epsilon}$ 値は板厚に依存しないことがわかる。したがって、Fig. 1 における $\bar{\epsilon}$ 値の板厚効果は、試験片平行部幅と板厚の比が試料によって異なるためとして説明できる。これに対して SUS 430 については、断面相似試験片を用いても Fig. 1 とほぼ同じ結果になった。これは $\bar{\epsilon}$ 値を測定する際に鋼種、板厚、試験片形状によらず一律に 15% の予ひずみを与えたので、オーステナイト鋼に対しては一樣伸びを付与することになったが、SUS 430

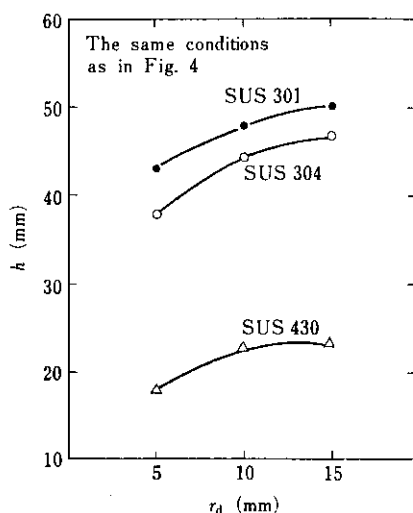


Fig. 5 Change in drawing depth h with die shoulder radius r_d

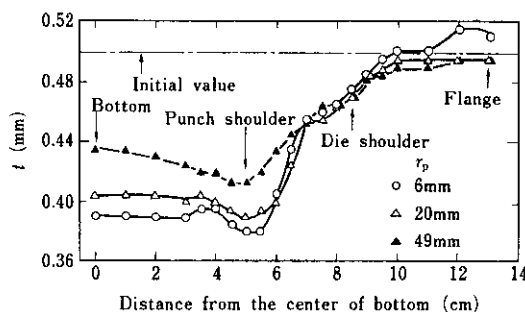


Fig. 6 Distribution of thickness t in SUS 301 cylindrical cups drawn with various punch shoulder radius r_p

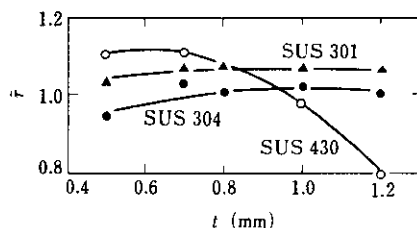


Fig. 7 Change in $\bar{\epsilon}$ value with the thickness t of specimens having the same aspect ratio of parallel section width over thickness

に対しては一樣伸び限界近くかあるいはそれを越えた予びずみを与えたことになったため、寸法効果の影響が明りように現れなかったことに起因するものと推察される。

また、断面相似試験片を用いた引張試験における破断伸びの板厚による変化は、Fig. 1のJIS 13B号試験片による場合と同様に、板厚の増加に対しSUS 430では増加し、SUS 304では変化せず、SUS 301では減少した。すなわち、伸びに対しては板厚の影響が明白に存在するといえる。なお引張強さについてもJIS 13B号と断面相似試験片とでまったく同様な定性的傾向が示され、板厚の増加につれてSUS 430ではとくに変化がみられず、オーステナイト鋼のSUS 304とSUS 301では減少傾向が認められた。

4・1・2 伸びの板厚依存性

本実験で求めた板厚効果は、引張性質に対する形状寸法効果の一側面をもっている。これについて定量的な検討を行うことは困難で従来その例をみないが、引張破断伸び λ に対しては従来経験的にBarba-Unwinの伸びの式、

$$\lambda = a + b \frac{\sqrt{A}}{G} \quad \dots\dots\dots (1)$$

もしくはOliverの式

$$\lambda = K \left(\frac{\sqrt{A}}{G} \right)^N \quad \dots\dots\dots (2)$$

が成り立つことが知られている³⁻⁵⁾。ここに A は試験片断面積、 G は標点距離、 a 、 b 、 K および N は定数、そして a は $G=\infty$ のときの λ の値で一樣伸びに対応する。多くの厚板材料^{3,5)}および既報のSUS 304およびSUS 301の形状効果に関する実験⁶⁾では、 $b>0$ 、 $N>0$ であることが知られている。

さて、本実験結果を λ 対 $\sqrt{A}/G$ および $\log \lambda$ 対 $\log (\sqrt{A}/G)$ でそれぞれ整理した結果をFig. 8に示す。これをみるとSUS 430の場合 $b>0$ 、 $N>0$ であるが、オーステナイト鋼のSUS 304とSUS 301ではいずれの図においてもプロットは $b<0$ 、 $N<0$ なる直線で表されることがわかる。オーステナイト鋼におけるこのような結果は、従来の軟鋼や本実験のフェライト鋼の結果とは異なる特異な現象ということができ、これはオーステナイト鋼の加

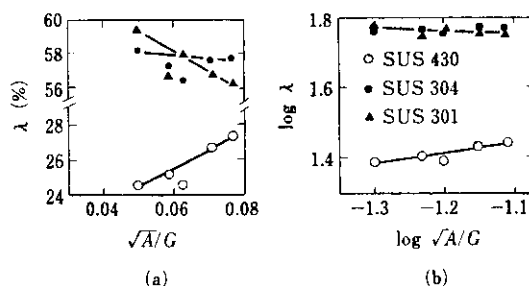


Fig. 8 Relationship between $\sqrt{A}/G$ and λ
(A : Cross-sectional area at parallel section, G : Gage length, λ : Elongation)

工硬化機構が独特のものであることに起因していると考えられる。この点を次に検討する。

4・1・3 オーステナイト鋼の成形性の板厚依存性

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 および Fig. 8 などに示したようにオーステナイト鋼の破断伸び、硬度、エリクセン値などの板厚依存性は、従来の軟鋼の結果やフェライト鋼の結果と比べると特異なものである。これはオーステナイト鋼の塑性変形に伴う加工誘起変態の板厚依存性に関連するものと考えられる。

一般に、加工誘起変態の程度は変形中の試料温度の変化によって大きく左右される。ところで変形中の試料温度は、オーステナイト母相の加工硬化に伴う変形熱と母相の α' マルテンサイトへの相変態に伴う変態熱の発生、およびそれらの放熱の程度によって決まる。そこで試験片の形状が同じでも板厚が異なれば熱容量や比表面積が異なるから、たとえ変形過程の発熱量が等しくても試料温度が異なってくる。そのため α' マルテンサイトの生成量ならびに生成速度が異なり、それが材料の板厚依存性を決定する因子となる。

このような観点から、引張変形過程の試料の表面温度と α' マルテンサイト量の変化を非破壊の状態連続測定した。試料温度はサーミスター温度計に生ずる起電力を自動記録することにより、また α' マルテンサイト量はフェライト量測定装置による読みを連続記録することにより行った。後者の場合、集合組織の異方性ならびに板厚の変化から生ずる誤差の補正を行った。このようにして得

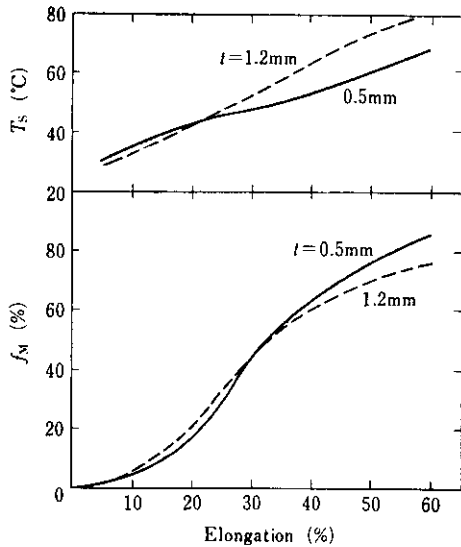


Fig. 9 Changes in surface temperature T_s of specimens and volume fraction of α' martensite f_M induced in SUS 301 specimens with the progress of deformation

られた板厚 0.5mm および 1.5mm の SUS 301 に関する結果を Fig. 9 に示す。試料温度に関して、低ひずみ領域においては熱容量の大きい 1.2mm 材の値のほうが 0.5mm 材よりも若干低いが、高ひずみ領域では 1.2mm 材のほうが単位体積あたりの放熱量が少ないので 0.5mm 材よりも逆に高くなり、50% 変形時においては両者の間に 15°C あまりの差が生じている。一方、 α' マルテンサイト量は、低ひずみ領域においては 1.2mm 材のほうが 0.5mm 材よりも若干多いが、高ひずみ領域では 1.2mm 材のほうが 0.5mm 材よりも逆に少なくなり、50% 変形時においては両者の間に 10% 近い差が生じている。 α' マルテンサイト変態量のこのような板厚および変形量依存性は、試料温度のそれとほぼ対応しており、変形量が同じならば試料温度が低い試料のほうが α' マルテンサイトが多発しているといえる。このような事実から、SUS 301 の破断伸びやエリクセン値が板厚の増加につれて減少したのは、試料表面温度の変化に対応した α' マルテンサイト発生量の変化によるものと思われる。つまり、試料が厚いと、薄い場合との相対的な意味において、 α' マルテンサイトが変形初期に比較的多く、後期に少ないためにネッキング防

止効果が十分でないと考えられる。その結果、薄い試料よりも破断伸びやエリクセン値が低いのであろう。このように α' マルテンサイト生成量のひずみ依存性が異なると破断伸びが著しく異なる事実は、多段引張変形に関する筆者の最近の研究報告⁶⁾によっても確かめられている。

さらに、加工誘起変態の板厚依存性は、引張変形後の試験片内の α' マルテンサイトの分布状態にも現れることがわかった。例として、Fig. 3 で硬度分布を求めた板厚 0.5 および 1.2mm の SUS 301 試験片のうち、変形量 50% のものの α' マルテンサイト量測定結果を Fig. 10 に示す。試験片肩部から平行部にかけて、0.5mm 材の α' マルテンサイト量のほうが 1.2mm 材よりも明らかに多い。この事実から、Fig. 3 において試験片内のひずみ分布が異ならないにもかかわらず、SUS 301 の 0.5mm 材のほうが 1.2mm 材よりも平行部において高い硬度が示されたことを理解できる。

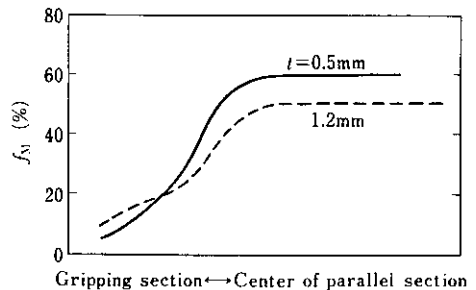


Fig. 10 Distribution of volume fraction of α' martensite f_M in SUS 301 tensile specimens deformed by 50% in the air at 21°C

4・1・4 エリクセン値とバルジ張出し高さ

Fig. 2 に示したように板厚の増加につれて SUS 301 のエリクセン値は減少し、他方バルジ張出し高さは増加した。同じ成形性に関する試験値であるにもかかわらず、このように一見矛盾した結果が得られた原因について検討する。

エリクセン値については、上述したように破断伸びの変化と同様板厚が厚いほど α' マルテンサイト変態が抑制されたことが原因していると考えられる。他方、バルジ張出し高さについても同様に加工誘起変態現象が関与しているものと推察さ

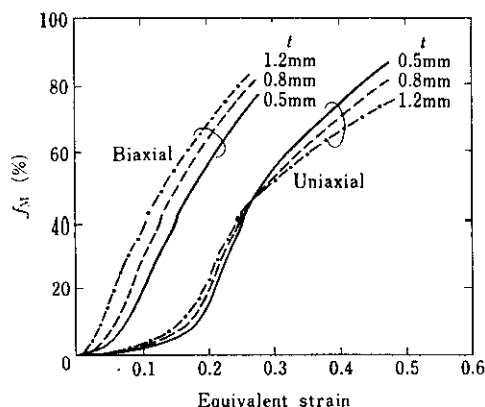


Fig. 11 Change in the volume fraction of α' martensite f_M with the equivalent strain in the uniaxial and biaxial tensile tests for SUS 301 specimens with different thickness t

れるので、バルジ試験の変形過程における α' マルテンサイト発生量とバルジ頂点の板厚ひずみを板厚の異なる SUS 301 で測定した。バルジ試験には円ダイスを用いたので、等 2 軸変形状態における α' マルテンサイト量を測定したことになる。そこで既出の単軸引張状態における実験結果と同じ尺度で比較しうよう、相当ひずみに対する α' マルテンサイト量の変化を Fig. 11 に示す。これによると、相当ひずみが等しければ等 2 軸変形では単軸変形におけるよりも常に α' マルテンサイトが多発していることがわかる。そして単軸変形の場合は、前述のようにとくに変形後期において板厚が薄いほど α' マルテンサイト量が多いのに、等 2 軸変形の場合はこれと対照的に板厚が厚いほど α' マルテンサイトが多発している。したがって、バルジ試験では板厚が厚いほどいわゆる TRIP 効果が有効に作用したと考えられる。すなわち、バルジ張出し高さの板厚依存性が引張破断伸びやエリクセン値の板厚依存とまったく逆傾向を示した原因はこのことにあると推測される。

それならば等 2 軸変形の際の加工誘起変態の板厚による変化が単軸変形の場合と異なる傾向を示したのはなぜであろうか。単軸変形は室温空気中で行われたので放熱が十分でなく、前述のように変形過程の材料の温度変化が大きく、しかもそれが板厚によって異なることがわかったが、液圧バルジ試験は室温油中で行われたので温度の影響は

小さいはずである。もし若干の影響があるとしても、板厚が厚いほうが発熱量の多いわりには放熱しにくいであろうから、温度が上昇し α' マルテンサイト発生量は減少すべきであるのに測定結果はそれと逆の傾向を示した。この原因は次の点にあると推察される。すなわち、試料の板厚が厚いほど油の吐出圧力を高くする必要があり、同時に試験機の機構上試料の変形速度が小さくなる。一般に準安定オーステナイトステンレス鋼の恒温変形においては、ひずみ速度が小さいほど加工誘起変態が生じやすい傾向がある⁷⁾から、ストローク速度が小さくなれば α' マルテンサイト発生量は増加する可能性がある。このような観点から等 2 軸変形における成形高さの板厚依存性は、結局加工誘起変態のひずみ速度依存性、換言すれば温度依存性に起因しているものと考えられる。

4-2 工具寸法効果

ステンレス鋼の成形性に及ぼす工具寸法の影響に関してはわずかに山田らの報告¹⁾が見出されるにすぎない。彼らは SUS 304 を用い、40mm ϕ 円筒型によって試料の限界絞り比に対するポンチ角隅半径の影響を調べている。それによると、ポンチ角隅半径の増大につれて限界絞り比は漸増するが、 r_p が球底ポンチの値に近くなると若干低下する。本実験では成形高さを評価指標とし、山田らよりは大きい 100mm ϕ 工具を使用したので結果を直接比較するわけにはいかないが、Fig. 4 の SUS 304 の測定結果の定性的傾向は、 r_p の大きい部分を除くと両者でだいたい一致しているといえる。そして本実験結果ではフェライト鋼の SUS 430 の場合、角隅半径の大きい領域で成形高さの増加傾向が鈍化するというオーステナイト鋼とはやや異なる挙動をとることが示された。

Fig. 6 に SUS 301 を $r_p=6, 20, 49$ mm で成形した場合の各部位の板厚測定結果を示し、板厚分布が r_p の影響を受けることを述べた。これらの成形試料の α' マルテンサイト分布の測定結果を Fig. 12 に示し、板厚分布との関連性を検討してみた。Fig. 12 によれば、板厚分布に対応して成形品底部からポンチ肩部へかけては r_p の小さいものほど α' マルテンサイトが多発している。こ

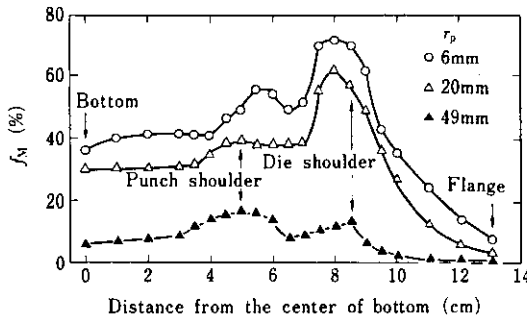


Fig. 12 Distribution of α' martensite in SUS 301 cylindrical cups drawn with various punch shoulder radius r_p

ここで注目されることは、第1に Fig. 6 からわかるように、ダイス肩部の板厚減少率は $r_p=6, 20, 49\text{mm}$ のいずれの成形品においてもポンチ肩部よりも小さいにもかかわらず、 α' マルテンサイトがポンチ肩部とほぼ同等か ($r_p=49\text{mm}$ の場合) ポンチ肩部よりもむしろ多発している ($r_p=6\text{mm}$ および 20mm の場合) こと、そして第2にダイス肩部における板厚減少率はやはり Fig. 6 からわかるように工具の r_p の大小でほとんど差がないにもかかわらず、 r_p が小さくなるにつれて α' マルテンサイト発生量が増大し、 $r_p=6\text{mm}$ の場合 Fig. 12 における最高値 72% もの値を示していることである。これらの事実は、前者については加工誘起マルテンサイト変態の変形様式依存性を、そして後者については同じく変形履歴依存性を示すものである。

一般にプレス成形において寸法効果を生ずる因子としては、前述の板厚効果のほかに工具寸法 (ポンチ直径 D_p 、ダイス直径 D_d や r_p , r_d など) の効果が存在する。材料の成形性はこれら諸因子の総合的な効果によって決まるものであるから、成形性評価指標と寸法効果の間に特定の関係が見いだされれば実用的にも都合がよい。ステンレス鋼の寸法効果に関する研究はきわめて少ないが、西川はアルミニウム板と軟鋼板を用いて実験的に h/D_p の対数 (h : 成形深さ) と $t \cdot r_p \cdot r_d / D_p^3$ の対数 (t : 板厚) との間に直線関係が存在することを報告⁸⁾している。そこで本実験結果をこれらの指標で整理して Fig. 13 に示す。SUS 301 と SUS 304 の板厚効果に関するデータを除くと、実験値は各鋼種につき直線で近似することができ、最小2乗法により次の実験式が得られた。

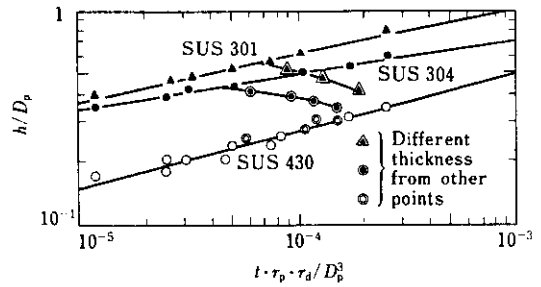


Fig. 13 Relationship between h/D_p and $t \cdot r_p \cdot r_d / D_p^3$ for cupping of SUS 301, SUS 304 and SUS 430 stainless steels (D_p : Punch diameter)

$$\text{SUS 301: } \log \frac{h}{D_p} = 0.22 \log \frac{t \cdot r_p \cdot r_d}{D_p^3} + 0.66 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{SUS 304: } \log \frac{h}{D_p} = 0.15 \log \frac{t \cdot r_p \cdot r_d}{D_p^3} + 0.45 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{SUS 430: } \log \frac{h}{D_p} = 0.27 \log \frac{t \cdot r_p \cdot r_d}{D_p^3} + 0.51 \quad \dots\dots\dots (5)$$

Fig. 13 において、SUS 430 の場合は板厚効果に関するプロットが他のプロットと同じ直線上にのるが、オーステナイト鋼の SUS 301 と SUS 304 の場合にまったくのらないのは、すでに述べたような加工誘起変態の特異な板厚依存性に起因しているものと推察される。(3)~(5)式は軸対称工具によるプレス成形性を推定するのに都合がよい。

5. 結 論

ステンレス薄鋼板の引張特性および軸対称成形性に対する板厚および工具寸法効果について、フェライト鋼の SUS 430 およびオーステナイト鋼の SUS 301, SUS 304 試料を用い、板厚 0.5 ~ 1.2mm (仕上圧延率・焼鈍条件は一定) の範囲で実験した。

(1) 板厚の増加につれて SUS 430 の伸びとエリクセン値は増加し、SUS 301 のそれらの値は逆に減少する。SUS 304 の伸びとエリクセン値は板厚によってほとんど変化しない。バルジ張出し高さはいずれの鋼種についても板厚の増加とともに

に増加する。

(2) 引張変形後の試験片内のひずみ分布はいずれの鋼種も板厚によって差がないが、硬度分布は板厚により SUS 430 の場合は変わらず、SUS 304 と SUS 301 の場合は差を生じた。これは試験片内のマルテンサイト発生量の分布状態から説明される。

(3) 板厚の増加につれ、塑性ひずみ比は減少する。しかし板厚が変化しても断面形状が常に相似を保つような試験片を用いると、塑性ひずみ比の板厚依存性は生じない。

(4) オーステナイト鋼の伸びやエリクセン値が板厚の増加につれて減少し、Barba らもしくは Oliver の式で伸びを整理した場合、軟鋼やフェライト鋼とまったく逆の傾向を示した原因は、板が厚いほど試験片の温度上昇が大きくて α' マルテンサイトが発生しにくく TRIP 現象が有効に作用しないことにある。

(5) SUS 301 の場合、板厚の増加に対して伸び、エリクセン値は減少し、バルジ張出し高さは増加し、一見矛盾した結果が得られた。空气中変形の引張りとはエリクセン試験の場合は、板が厚いほど試料温度が上昇して α' マルテンサイトの発生が減

少する。他方、液圧バルジ試験の場合は液中変形ゆえ試料の温度変化は少ないが、吐出圧力が大きくなるためにストローク速度が低下して α' マルテンサイトが多発する。このことが上述の結果をもたらした原因と考えられる。

(6) 円筒絞りにおける絞り深さは、ポンチ肩半径 r_p あるいはダイス肩半径 r_d の増加につれて増加する。 r_p の影響はフェライト鋼よりもオーステナイト鋼に対して顕著であり、 r_d の影響には鋼種による差がとくに認められない。

(7) ダイス肩部の板厚減少率はポンチ肩部よりほかに小さいのに、 α' マルテンサイトはポンチ肩部より多発した。また、ダイス肩部の板厚減少率は工具の r_p の大小でほとんど差がないのに、 α' マルテンサイトは工具の r_p が小さい場合のほうが多発した。これらの事実は、加工誘起変態の変形様式および変形履歴依存性をそれぞれ示すものである。

(8) 工具寸法の影響について、 $\log(h/D_p) = A \log(t \cdot r_p \cdot r_d / D_p^3) + B$ の関係が存在する。ここで h は成形深さ、 D_p はポンチ直径、 t は板厚、 A および B は定数である。

参 考 文 献

- 1) 山田, 輪竹, 中原: 塑性と加工, 3 (1962), 533
- 2) 野原, 渡辺, 小野, 大橋: 川崎製鉄技報, 5 (1973), 281
- 3) 日本溶接協会: 日本溶接協会 WES 規格(案), (1964)
- 4) 木原, 藤田: 高圧力, 2 (1964), 17
- 5) 日本鉄鋼協会: データシート部会報告, 8 (1970), 1136
- 6) K. Nohara, Y. Ono and N. Ohashi: First JIM Intern. Symp., (1976)
- 7) 野原, 渡辺, 大橋: 鉄と鋼, 60 (1974), S317
- 8) 西川: 塑性と加工, 13 (1972), 655