

## 技術資料

UDC 669.14.018.8-416 : 539.52 : 621.979

## ステンレス薄鋼板のプレス成形性\*

大橋 延夫\*\*・小野 寛\*\*\*・野原 清彦\*\*

## Press Formability of Stainless Steel Sheets

Nobuo ÔHASHI, Yutaka ONO, and Kiyohiko NOHARA

## 1. 緒 言

ステンレス鋼板は本来その良好な耐食性が主たる特性であるが、同時にプレス成形性も一般にかなりすぐれており、本鋼が非常に広範な用途に利用されているのはそのことに負うところが大きい。ステンレス鋼板は種々の型にプレス加工することができるが、鋼種間には著しい特性の相違があるので、目的に応じて鋼種やプレス法を適切に選択する必要がある。

ステンレス鋼は高張力鋼の1種であり、軟鋼、アルミニウム、プラスチックなどと比べるとプレス加工の際の成形力やしわ押え力はかなり大きくなる。とくに SUS 304 で代表されるオーステナイト・ステンレス鋼は、変形の進行に伴って母相の加工硬化だけではなく加工誘起変態によつて  $\alpha'$  マルテンサイト相が出現するため加工硬化性が大きい。その影響によつて軟鋼やフェライト・ステンレス鋼とは非常に異なる塑性挙動を示す。このような相変態を伴う塑性現象は TRIP\* 現象と呼ばれ、本鋼種の深絞り性や張出し性が良好なものこの特性によつて、逆に成形後のスプリングバックが大きくなって形状性を損う原因にもなっている。また成形後時間が経過すると割れが起こる“置き割れ現象”もこの加工誘起  $\alpha'$  マルテンサイト相の生成に起因しており、これが本鋼種の実際の成形限を左右することもある。このように本鋼種の成形性にとつて TRIP 現象は本質的に重要な役割りを果たしているが、この現象には鋼の化学組成や粒度そして変形を与えるときの温度や速度などが深く関係している。

一方、SUS430 で代表されるフェライト・ステンレス鋼はその特性が軟鋼に類似しており、プレス成形性もそれほど劣らないが、軟鋼に比べて強度が大きいため成形技術上ではやはり特別の配慮が必要である。すなわち破断伸びの値が軟鋼よりも小さいので張出し成形性には

劣るが、他方いわゆる  $r$  値で表わされる塑性異方性は必ずしも低くないのでとくに深絞りを主とする成形に向いている。

このようにステンレス鋼のプレス成形を行なうに際しては各鋼種の基本特性をよく知ることがまず大切であるが、同時にプレス技術上の諸要因、たとえば潤滑剤やその使用方法、板厚や工具の寸法効果、表面状況、プランクの寸法と形状などはステンレス鋼に独特な影響をもたらすことがあるので十分注意を払わねばならない。

本報ではこのような観点から、まず代表的な規格鋼について成形性に関与する基本的な塑性挙動を解説するとともに、最近各メーカーから発表され実用化されつつある極深絞り用ステンレス鋼板の特性についても触れることにする。さらに上述のような材質以外の成形性影響因子について筆者らの実験結果を中心に報告し、さらに張出し成形と深絞り成形の代表的実例としてそれぞれ自動車ホイールカバーおよび厨房用深型シンクの成形に係わる諸要因の効果を紹介する。

## 2. 成形用ステンレス鋼板の特性

## 2.1 オーステナイト・ステンレス鋼板

規格鋼では SUS304, SUS 301 および SUS 302 などが多用されているが、用途によつては SUS316, SUS 310, SUS305, SUS347 などでも使用される。

## 2.1.1 加工硬化性

オーステナイト鋼はフェライト鋼に比較して加工硬化性が大きく、かつ一般に降伏比が大きくて塑性変形領域が広いのでいわゆる延性に富んでおり、すぐれた成形性を示す。図1は SUS301 と SUS304 の真応力 ( $\sigma$ )-真ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線を  $\log \sigma - \log \epsilon$  の関係に書きなおしたものであるが、フェライト鋼の SUS430 と比較して塑性挙動の特徴がよくわかる。すなわちフェライト鋼は軟鋼と同様に1本の直線関係で表わされ、加工硬化指数、 $n$ 、は一義的に決定されるが、オーステナイト鋼の場合全ひ

\* Transformation Induced Plasticity

\* 昭和 51 年 9 月 17 日 受付 (Received Sep. 17, 1976) (依頼技術資料)

\*\* 川崎製鉄(株)技術研究所 工博 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 280)

\*\*\* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

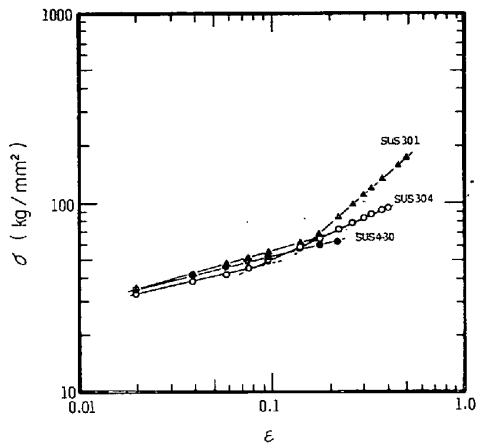


図1 ステンレス鋼の引張試験における  $\log \sigma - \log \epsilon$  の関係

ずみ領域を1本の直線で表わすことができない。これはこの鋼の加工硬化がオーステナイト母相内でのひずみの増大によるものに加えて組織の一部がマルテンサイトに変態することによるためである。そこで筆者らは低ひずみ領域と高ひずみ領域の  $n$  値を別個に考慮して材料設計の指針の一つにしている。

オーステナイト・ステンレス鋼のこのような加工硬化性、ひいては延性やプレス加工性に対しては、化学成分、とりわけCおよびNそしてNiやCrの影響が大きく、それらの含有量が増加すると母相が安定化し加工硬化性が減少する。また結晶粒度の影響も大きく、たとえばエリクセン試験値は図2に示すようにある粒度で最大となるが、そのときの粒度はSUS304とSUS301のように化学組成に由来するオーステナイト安定度の相違によつて異なることがわかる。粒度の影響の中には、オーステナイト母相の加工硬化に対する影響とオーステナイト安定度、すなわち  $\alpha'$  マルテンサイトへの変態のしやすさに対する影響との2面があるが、後者については結晶粒が微細化するほど材料が安定化して加工誘起  $\alpha'$  マルテンサイトの発生量が減少することが報告されている。

2.1.2 温度および変形速度による塑性挙動の変化

オーステナイト・ステンレス鋼の塑性は変形温度の影響を強く受けることが知られている。図3はSUS301の引張試験片破断部における  $\alpha'$  マルテンサイト生成量、引張強さ、そして破断伸びの試験温度による変化を示したものである。  $\alpha'$  マルテンサイト量は試験温度の上昇につれて減少し変曲点を有する変化をしている。引張強さの変化は  $\alpha'$  マルテンサイト量の変化と同様で、試験温度の低下につれて増加している。また破断伸びは試験温度によつて大きく変化し、ある温度で極大を示すこと、したがって大きな伸びを得るためには  $\alpha'$  マルテンサイトがあまり多すぎても少なすぎても適当でないことがわかる。

このようにオーステナイト鋼の塑性挙動は試験温度に

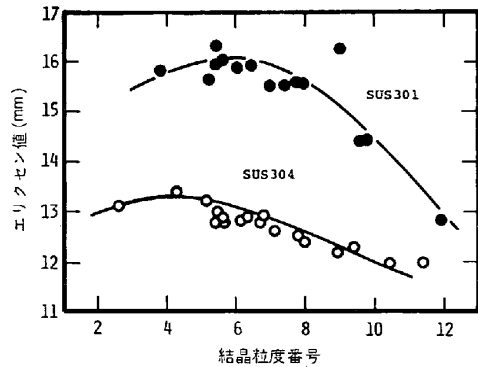


図2 オーステナイト・ステンレス鋼の結晶粒度とエリクセン値の関係

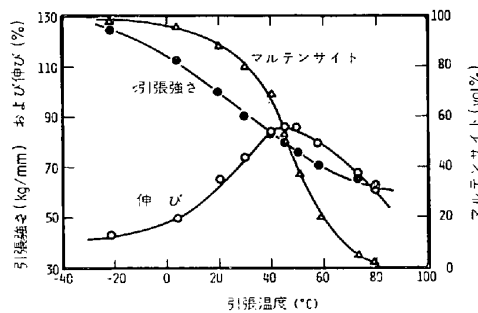


図3 SUS301の引張変形における引張強さ、破断伸びマルテンサイト生成量の試験温度依存性

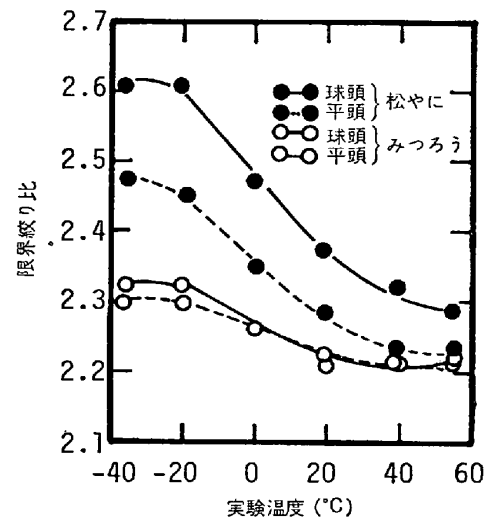


図4 SUS304の限界絞り比の温度依存性

大きく依存するので、これを実際のプレス加工に応用しようとする試みがなされている。河合ら<sup>2)</sup>はダイス下方のノズルから熱媒体を噴射し、ポンチ頭部に接する材料の温度を調整することにより、40 mm  $\phi$ の円筒絞りにおけるSUS304の限界絞り比が変形温度によつてどのように変わるかを調べている。結果を図4に示す。球頭、平頭いずれのポンチ形状においても限界絞り比は温度の低下に伴い増加し、とくに松やに潤滑時の場合に顕著であ

る。

単に工具の温度を一律に変えるだけでなく、加工中の素材または工具に温度こう配を与える方法、たとえばフランジ部のみを加熱して変形抵抗を下げるとともに、絞り込まれた部分は反対に冷却して破断抵抗をあげる方法が以前から試みられており、“熱塑性加工”とも呼ばれている<sup>3)</sup>が、これを準安定オーステナイト・ステンレス鋼に利用した例も報告<sup>4)</sup>されている。とくにフランジ部を数  $10^{\circ}\text{C}$  以上に加熱すると置割れ防止に有効である。なお図4に示した局部冷却絞りでもポンチ頭部領域とフランジ部との間には温度こう配がついており実際は1種の熱塑性加工法となっている。

さらに最近、準安定オーステナイト鋼の引張変形を何段階かに分け、しかも各段階での温度を適当に変えることによりきわめて大きな伸びが得られることが報告されている<sup>5)~7)</sup>。図5は2段引張変形において、1次の引張を  $80^{\circ}\text{C}$  ( $T_1$ ) とし種々のひずみ量 ( $\lambda_1$ ) を与えたあと2次引張を行なうに際し、その温度 ( $T_2$ ) を変えることにより破断伸び ( $\lambda_f$ ) あるいは破断部の  $\alpha'$  マルテンサイト生成量 ( $M$ ) にどのような変化が現われるかを示したものである<sup>6)</sup>。図5(a)に破線で示した1次引張ひず

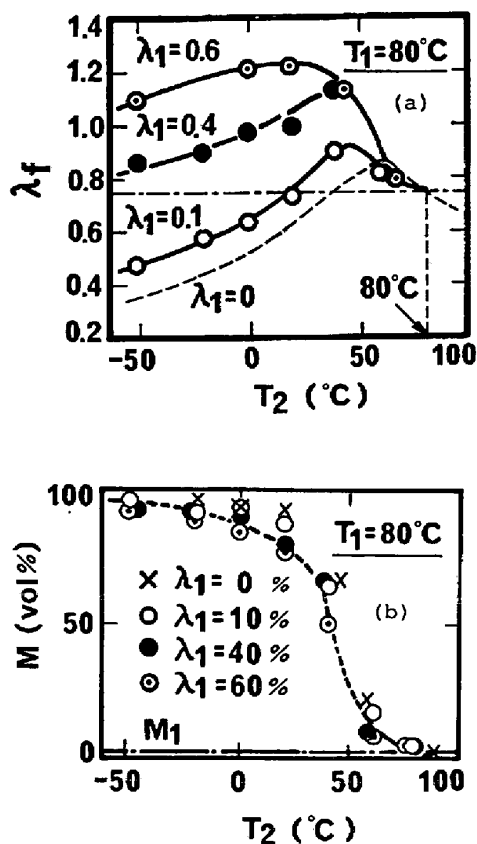


図5 SUS301の2段引張試験において、1次引張温度( $T_1$ )を  $80^{\circ}\text{C}$  としたときの2次引張温度( $T_2$ )による破断伸び( $\lambda_f$ )とマルテンサイト量( $M$ )の変化 ( $\lambda_1$ : 1次引張伸び量,  $M_1$ : 1次引張でのマルテンサイト量)

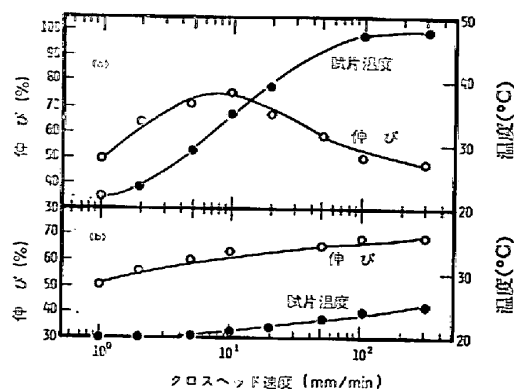


図6 SUS301の引張破断伸びおよび試片の最高到達温度におよぼす引張速度の影響

み量零の曲線は通常の1段変形における伸びの温度依存性を示しているが、これに比べて2段変形時の伸びは非常に大きく、1次ひずみ60%の場合は最高122%の値が得られた。しかし図5(b)のように破断部の  $\alpha'$  マルテンサイト量は1段変形でも2段変形でも各試験温度でほとんど同じ値を示している。このことはいずれの試片も変形温度で決まる一定の  $\alpha'$  マルテンサイトが生成したときに破断が生ずることを示している。このような多段変形による成形性の向上は純粋引張出し試験でも認められており<sup>8)</sup>、今後この種の鋼の成形に広く応用されることが期待される。

さてオーステナイト・ステンレス鋼の機械的性質や成形性は温度だけではなく変形速度の影響を受けることが知られている。事実図6(a)に示すように空气中室温引張における破断伸びはクロスヘッド速度  $1\sim 300$  mm/min の範囲内で極大を有する変化を呈している。しかしながら、水中で引張ると図6(b)のとおり伸びは変形速度の上昇とともに単調増加するのみである。これは図6(a)に示したように空气中変形では試験片の破断部の最高温度が変形速度の上昇によつて著しく上昇することからもわかるが、変形によつて発生する熱が外部雰囲気中に十分速やかに伝達されず、したがってそれだけ高温状態で変形が進行すること、そしてこれと反対に水中では冷却が有効に行なわれて変形温度の上昇が少ないことに基づくものであり、結局は純粋の変形速度依存性よりもむしろ温度依存性とその主因であるとみなしてよい。

### 2.1.3 置割れ現象

SUS301 や SUS304 などの準安定オーステナイト・ステンレス鋼を縮みフランジ成形要素の強い深絞り加工をしたのち自然放置するとカップ周縁部から胴部にかけて縦割れを伴う遅れ破壊を生ずることがある。この現象は置割れ、時期割れあるいは時効割れなどと呼ばれており、 $\gamma$  相の不安定な材料、すなわち加工によつて  $\alpha'$  マルテンサイトが誘発されやすい材料ほど低加工度で発生しやすい<sup>9)</sup>。置割れは材料のオーステナイト安定度が同じでも図7に示すように放置温度が異なると割れ発生ま

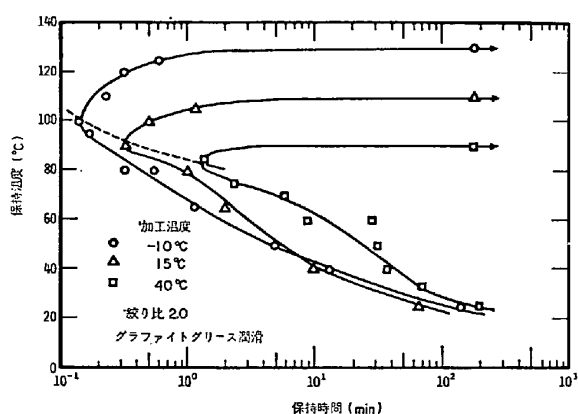


図7 SUS301 絞りカップの置割れ発生潜伏時間と保持温度の関係

での潜伏時間が異なりほぼC曲線を形成する<sup>9)</sup>。またこのC曲線は高温で加工したものほど低温長時間保持側に移行している。置割れ現象にはほかにも種々の要因が関与し、成分の影響としてはC, N, Ni, Mnなどが大きく、とくにCの低減が耐置割れ性向上のために有効である<sup>10)</sup>。置割れ現象の発生機構は未解明の点が多いが、残留応力、 $\alpha'$  マルテンサイトの生成量と分布、水素含有量などが重要な因子となつていることは間違いないようである。材料の加工性は成形限界と置割れ性のいずれかによつて支配されることが多いから、この割れに対する抵抗力も非常に重要な性質といえる。

### 2.2 フェライト・ステンレス鋼板

SUS430 や SUS 434 が多用されているが、快削性をも目的とする場合には SUS430 F や SUS430 F (Se), そして特殊な用途ではあるが SUS405, AISI 409, SUS 442, SUS446 など用いられている。

#### 2.2.1 加工硬化性

フェライト鋼はオーステナイト鋼に比較すると図1に示したように加工硬化の程度が小さく、高強度冷延鋼板に類似している。一般に耐力が高くそのわりに抗張力が低いので、先に図1に示したように $n$ 値が小さい。そのため塑性変形領域が狭く伸びも小さいので深絞りおよび張出し成形性ともにオーステナイト鋼に比べて劣ることは否めない。また SUS442 や SUS446 のようなCr量の多い鋼種では常温における材料の靱性が低く、加工時に注意する必要がある。可能ならば100~200°Cに加熱すると靱性が高まるので加工が容易となる。

フェライト・ステンレス鋼の成形性をさらに改良するには成分組成を制御するのが有効であり、C や N の低減、Ti の微量添加、そして Mn や Al 量の制御などが行なわれている。この点については2.3節でも触れる。

#### 2.2.2 リジング現象

フェライト・ステンレス鋼には苛酷な成形加工、とくに引張変形を受けたときにリジングまたはローピングと称するひずみ模様は板の圧延方向に沿つて生ずる欠陥が

あり、著しく外観を損うばかりでなく、はなはだしいときにはこれが破断の原因となつてプレス加工が困難となる場合もある。また、いつたん生じたリジングを研磨によつて除去することは容易でなく、多くの時間と労力を要するので本鋼種をプレス加工用途に使用する場合きわめて厄介な障害となつている。本現象の発生原因については、従来金相学的組織の不均一性、すなわち熱延時に組織の一部である $\gamma$ 相から急冷されたベイナイト状の変態組織がやはり組織の一部である $\alpha$ 相と重なつて層状組織を形成し、それが場所による塑性挙動の差を生ぜしめるからと考えられていたが、最近では集合組織の優先方位が異なる縞状領域が圧延方向に平行に重なつて配列していることに起因するという説が有力となつている<sup>11)12)</sup>。

すなわち  $\{001\}\langle 110\rangle$  およびそれに近い方位を有する伸長 $\alpha$ 粒は冷延焼鈍工程を経たのちも非常に安定にその方位を維持し、冷延焼鈍により組織の大半が $\{111\}\langle 1\bar{1}0\rangle$ もしくは $\{111\}\langle 11\bar{2}\rangle$ 方位を主とする再結晶集合組織となつても依然として縞状組織として存在するので結局集合組織の場所的不均一を生じ、それに由来する塑性挙動の差がリジングの原因となつていると考えられている<sup>11)12)</sup>。

リジングを軽減または防止する方法は種々考えられているが、いずれも熱延母板の中心層に形成される粗い $\alpha$ 相の縞状組織を微細化させ組織を均一化しようとするもので、特殊元素の添加、鋼帯の熱処理および冷延法の改善そして鋼塊あるいはスラブの柱状晶の微細化などがある。しかし技術的に容易でしかもコスト上昇を招くことなくリジングを完全に防止することについては多くの問題が残されている。

### 2.3 極深絞り用ステンレス鋼板

近年ステンレス鋼の深絞り成形性に対する要求はますます苛酷になりつつあり、従来プレス工程途中に熱処理を入れる必要があるような部品の場合でも、作業能率の向上や原価低減の観点からこれを省略する希望が一段と強まつている。かかる現状に対処するためオーステナイト鋼、フェライト鋼を問わず極深絞り用の種々の新鋼種が開発公表されている。それらの例を表1に示す。

オーステナイト系規格鋼の代表として板厚0.7mmのSUS 304 鋼板を例にとるとそのエリクセン値ならびにCCVの平均はそれぞれ12.5mm および27.5mm程度である。機械的性質は結晶粒度の影響も受けるが、通常の製品はASTM粒度8.0前後であり、表示の引張性質や硬度などの値は一般的なものである。YUS 27 およびNAS8MKはSUS304に比べて全般的に成形性が優れている。NSS304M2は固溶CおよびN含有量が少ないために耐置割れ性がとくに優れた鋼である。またR304UDは硬度が低くてエリクセン値とCCVが優れ、 $n$ 値も大きい。塑性ひずみ比( $r$ )はオーステナイト鋼の場合鋼種によつてあまり変化しないが、それにも拘らずCCVはかなり変化しており、実際に本表のSUS304以

表1 絞り用あるいは極深絞り用ステンレス鋼板の組成 (wt%) と特性 (板厚: 0.7 mm)

	C	N	Ni	Cr	Cu	Ti	その他	降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	抗張力 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	n	r	ピッカース 硬さ	エリクセン 値(mm)	C.C.V. (mm)
SUS 304	0.07	0.02	8.8	18.3				27	67	58	0.48	1.0	152	12.7	27.5
SUS 301	0.12	0.02	7.2	17.4				29	77	59	0.75	0.9	185	14.5	26.7
YUS 27	0.08	0.05	6.1	17.1	2.0			28	67	56	0.63	0.9	153	14.2	26.7
NSS304M2	0.02	0.02	7.5	16.4	2.0			24	59	61	0.57	0.9	134	15.0	27.0
NAS8MK	0.04		7	17	2		Mn 4	23	56	56					
R 304UD	0.12	0.02	7.2	14.0	2.0		Mo 0.4	24	70	65	0.60	0.9	146	15.5	26.0
SUS 430	0.08	0.01		16.3				32	52	29	0.20	0.8	162	9.5	28.4
YUS 430D	0.01	0.01		17.0		0.30	Mn 1.5	25	43	35	0.23	1.5	142	10.9	28.1
NSS430M2	0.03	0.01		17.1		0.37		31	46	33	0.23	1.5	138	11.0	27.1
R 430LT	0.01	0.01		16.5		0.55		29	46	33	0.24	1.5	148	10.2	27.3
オーステナイト系															
フェライト系															

外の鋼種は高度の絞り成形部品に用いられて威力を発揮している。したがって星野<sup>10)</sup>も指摘しているように、軟鋼やフェライト・ステンレス鋼と違ってオーステナイト・ステンレス鋼の絞り性をr値で判断することには問題がある。

フェライト系の代表鋼種 SUS430 の実際製品の平均的材質は表に示すとおりで、板厚 0.7 mm の場合エリクセン値ならびに CCV はそれぞれ 9.5 mm および 28.4 mm 程度である。その他の性質を SUS304 のそれらと比べると、耐力/引張強さの比 (降伏比) がかなり大きいことがわかる。なおフェライト鋼では置割れ性は問題にならない。近年開発された絞り性の優れた鋼種は表のようにいずれもC量を下げて Ti や Nb などの特殊元素を添加し、材質を軟かくするとともに集合組織を調整してr値を高めている。しかし伸び、抗張力はオーステナイト鋼に比べるとかなり低いので、張り出しを主とする加工に対しては劣る傾向がある。また前述のようにフェライト鋼は一般に深絞りすればするほどリジニング現象の悪影響が目立つわけであるが、その性質をかなり改善したのもも製品化されている。

### 3. プレス成形性に関係する材質以外の諸要因の影響

金属材料の深絞り加工性はその力学的性質のみならず、板厚の変動、絞り速度、絞り温度、材料の表面状況、工具の材質、形状および寸法、潤滑剤、しわ押え力、変形様式、板どりおよび板の置き方などによつて複雑な影響を受け、しかもこれらの諸因子間には交互作用もあるので、非常に複雑な様相を呈するのが一般である。これはステンレス鋼のプレス成形性についても例外ではないが、上記諸因子の影響を系統的に調べた例は比較的少ない。そこで筆者らの実験結果を中心に、重要と考えられる2, 3の因子の影響について以下に述べる。

#### 3.1 潤滑およびしわ押え力

図8に 100 mm φ 平底円筒絞りにおける潤滑剤の種類の影響を、オーステナイト・ステンレス鋼 (SUS304 および SUS301)、フェライト・ステンレス鋼 (SUS430 および表1に示した R430LT)、さらに軟鋼 (低降伏点鋼板およびアルミキルド鋼板) を用いて調べた結果を示す。

用いた潤滑剤は液体潤滑剤5種、固体潤滑剤2種で、それに液体と固体の複合潤滑の条件を加えた。プランクは 220 mm φ、しわ押え力は 40 t でダイスにはステンレス用の燐青銅合金を用いている。

図8からマシン油はオーステナイト鋼、フェライト鋼、軟鋼のいずれに対しても潤滑効果はほとんど期待できないことがわかる。またマシン油を除く液体もしくは固体潤滑剤を単独使用した場合、オーステナイト鋼に対してはいずれの潤滑剤もほぼ同程度の効果があるが、フェライト鋼に対しては #660 が他より若干優れ、軟鋼に対し

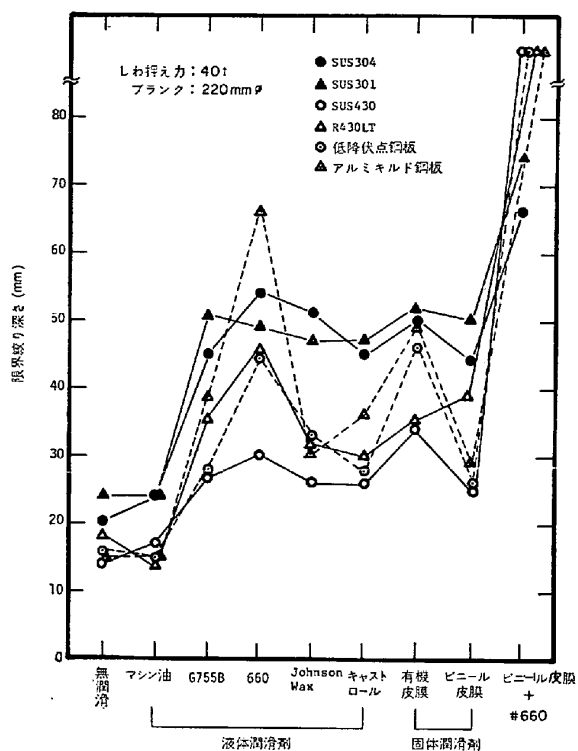


図8 100 mm φ 平底円筒限界絞り深さに対する潤滑条件の影響

では #660 と有機皮膜が他よりかなり優れている。さらにビニール皮膜と #660 の併用はオーステナイト鋼に対してもかなりの効果があるが、フェライト鋼と軟鋼に対してはきわめて大きな効果がある。このように鋼種によつて潤滑効果に大きい差異が認められることは興味深い。液体潤滑剤のうちマシン油、G755B、#660に限ると、材料のいかに問わず粘度が高いほど絞り深さが増大しているが、その程度は材料によつて異なっている。

図9に同じく100 mm φ 平底円筒絞りにおけるしわ押え力の影響を図8の場合と同じ試料を用いて調べた結果を示す。潤滑剤は水溶性のジョンソン・ワックスとし、ブランクは220 mm φである。図によれば、当然のことながらしわ押え力の増加につれて絞り深さは減少する。ただ、フェライト鋼においてしわ押え力の増加によつてかえつて絞り深さが僅かに増加する場合がみられた。ジョンソン・ワックス以外の潤滑の際には軟鋼でもこのような逆転現象がみられ、オーステナイト鋼にはみられなかつたことから判断すると、介在物の存在による局部伸びの劣化が原因していると考えられる。また図からオーステナイト鋼がフェライト鋼や軟鋼に比べてしわ押え力の増加による絞り深さの低下が少ない傾向が認められる。図9のしわ押えは固定方式であるが、もしこれを定圧方式にすると潤滑効果はさらに大きくなるであろう。なお図において測定値を結ぶ折線は互に交叉する場合がみられ、このことはしわ押え力のレベルによつて材料の絞り深さの優劣が逆転することを意味しており、実際の

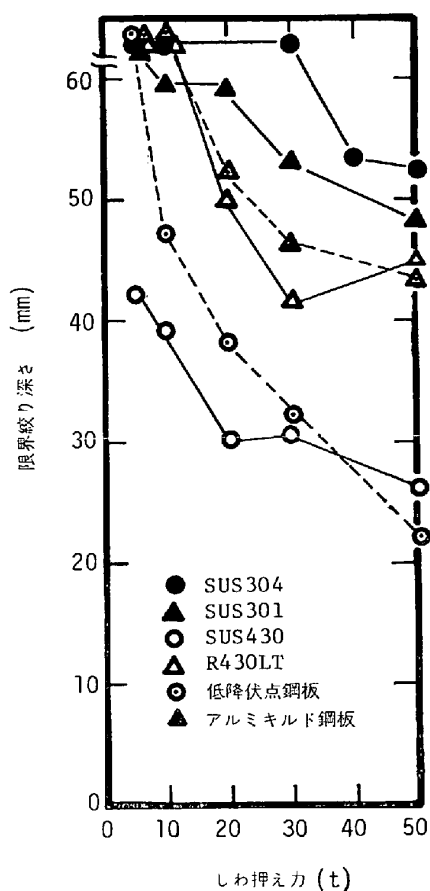


図9 各種鋼板の100 mm φ 平底円筒限界絞り深さにおよぼすしわ押え力の影響

プレス作業にあつて注意を要する点である。

### 3.2 板厚および工具寸法

図10には安定度の異なるオーステナイト系のSUS304とSUS301およびフェライト系のSUS430のエリクセン値と板厚の関係を示す<sup>13)</sup>。ここに板厚の異なる各試料は表2に示すように仕上圧延率・焼鈍条件一定のもとに調整され、しかも中間圧延の影響はごく小さいので、組織および粒度は互いにほぼ等しく、したがつて図10ではほとんど板厚の効果そのものが現われていると考えられる。この結果は特徴的であり、板厚の増加につれてSUS430のエリクセン値は増加するのに対し、SUS304のそれはほとんど変化せず、またSUS304より不安定なSUS301ではかえつて減少している。引張強さについてはSUS430は板厚の増加に対して変化しないが、SUS304とSUS301は減少する。また引張破断伸びをBARBA<sup>14)</sup>の式で整理すると、オーステナイト鋼とフェライト鋼の変化の傾向は逆になる。これはオーステナイト鋼の場合、試料の加工中の温度上昇が板厚が厚いほど大きく、それによる変態誘起塑性によるものとして説明できる。すなわち、図11に板厚の異なるSUS301について引張変形中の試片の表面温度変化とマルテンサイト発生量の変化を示す。試片温度は低ひずみ領域では熱容量の大きい

表2 板厚寸法効果測定用試料の製造工程

母板 (mm)	中間 圧延		仕上 圧延		仕上 焼鈍
	圧延率 (%)	板厚 (mm)	圧延率 (%)	板厚 (mm)	
3.0	33	2.00	40	1.2	SUS 430: 900°C × 5 min → 空冷
	44	1.67	40	1.0	
	56	1.33	40	0.8	SUS 304, SUS 301: 1100°C × 3 min → 空冷
	61	1.17	40	0.7	
	72	0.83	40	0.5	

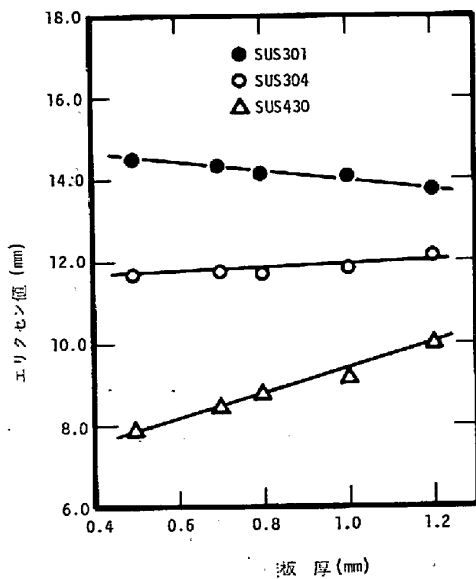


図10 SUS301, 304 および 430 鋼のエリクセン値に対する板厚寸法効果

1.2 mm 厚材のほうが 0.5 mm 厚材より低いが、高ひずみ領域になると単位体積当りの放熱量の少ない 1.2 mm 厚材の値が大きくなり、60%のひずみを与えると 20°C 近い差を生じている。一方、マルテンサイト量は低ひずみ領域では 1.2 mm 厚材のほうが 0.5 mm 厚材より多く、高ひずみ領域では逆に少なくなっている。この変化は試料の温度変化とよく対応している。したがって SUS 301 の伸びやエリクセン値が板厚の増加につれて減少するのは、主として試料温度の変化に対応したマルテンサイト発生量の変化、すなわち TRIP 現象の変化によるものと考えられる。板厚が厚いと  $\alpha'$  マルテンサイトの発生は変形の比較的後期に少ないのでネッキング防止効果が十分でなく、そのため伸びが低下した加工硬化の程度が少ないので抗張力も低くなるのであろう。

工具寸法効果については、1例として SUS304, SUS 301 および SUS430 を 100 mm  $\phi$  円筒および 100 mm 角筒型に深絞りすることによって調べた結果、ポンチ肩半径 ( $r_p$ ) もしくはダイス肩半径 ( $r_d$ ) の増加につれていずれの材料も成形深さが増加した。増加の程度は SUS 301 がもつとも大きく、ついで SUS304 であり、SUS

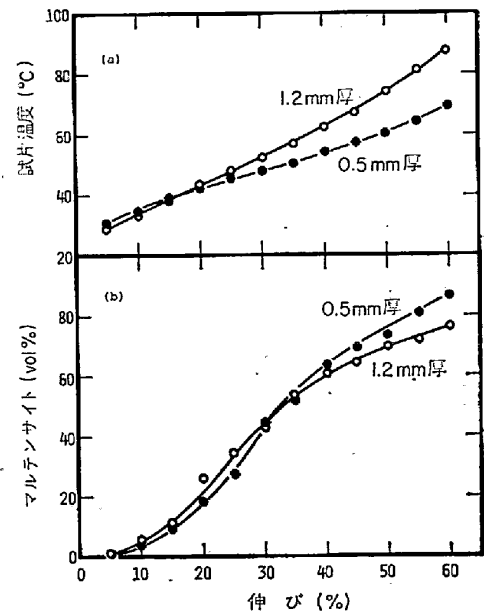
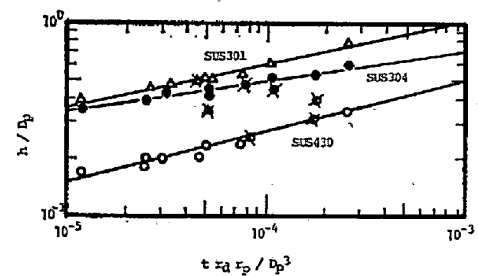


図11 SUS301 の引張変形過程における試片温度とマルテンサイト発生量の変化に対する板厚の影響

図12 各種ステンレス鋼の絞り性におよぼす工具および板厚寸法効果 ( $h$ : 絞り限界深さ,  $D_p$ : ポンチ径,  $r_p$ : ポンチ肩半径,  $r_d$ : ダイス肩半径,  $t$ : 板厚,  $\times$ 印を付したプロットは  $t$  が変化した場合)

430 は  $r_p > 20$  mm または  $r_d > 10$  mm ではほとんど増加しない<sup>13)</sup>。そして 100 mm  $\phi$  円筒絞りの場合には図12に示すように、 $\log(h/D_p) = A \log(tr_p r_d / D_p^3) + B$  なる関係が軟鋼やアルミニウムの場合と同様に成立する。ここに  $h$  は成形深さ、 $D_p$  はポンチ径、 $t$  は板厚、 $A$  および  $B$  は工具寸法に無関係の定数である。ただし板厚を

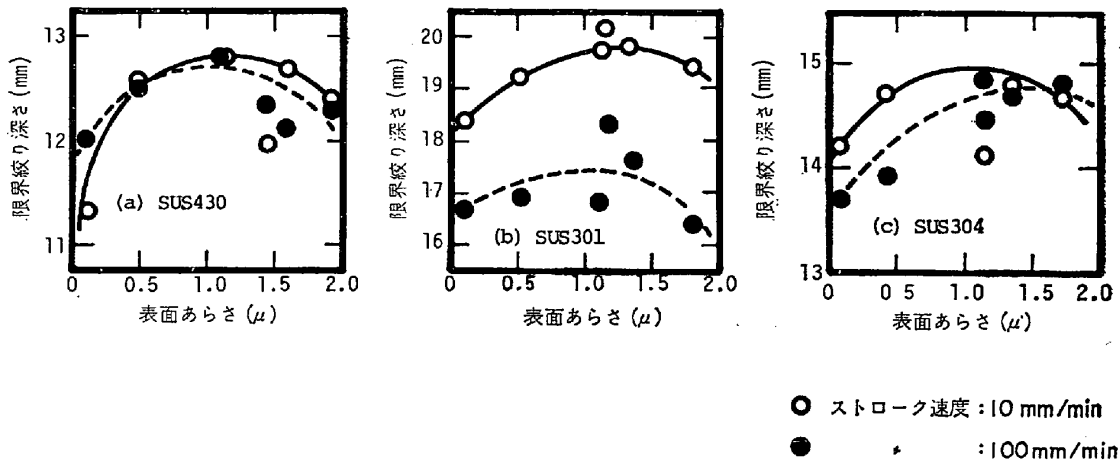


図13 各種ステンレス鋼の深絞り性におよぼす表面あらさの影響

変化させた試片のプロットは図に×印で示したように SUS430 では直線上に乗っているが、SUS304 と SUS301 については直線からはずれている。これは前述のようにオーステナイト鋼における板厚寸法効果の特異性に起因しているものと思われる。

3.3 表面性状

一般に材料の深絞りや張出し成形の限界はポンチ力と破断力の大小関係によつて決まるが、これらはそれぞれフランジ部に作用する外部摩擦および破断部における素材とポンチの間の摩擦の影響を強く受ける。そしてこのような摩擦抵抗は、主として潤滑油の種類、成形速度、潤滑面の表面あらさ、工具と材料の材質的な組合せ、などの因子によつて支配される。これらのうち潤滑面の表面あらさの影響について研究された例は少なく、ステンレス鋼薄板については岡本<sup>15)</sup>の報告がある程度である。図 13 は筆者らによる実験結果で、SUS304、SUS301および SUS430 鋼板のダイス側の面を種々の粒度の研磨ベルトにより研磨して表面あらさを変えたとき、30 mm φ 平底円筒絞りにおける限界絞り深さに与える影響を示したものである。研磨方向は板の圧延方向に平行としたが、図示の表面あらさは粗度計の触針を圧延方向に直角に走査して測定した凹凸の中心線平均あらさ ( $R_a$ ) である。また絞り成形は無潤滑で、絞り速度は 10 mm/min と 100 mm/min の 2 通りに変化させた。しわ押え力はすべて 1 t とし、絞り深さは荷重-ストローク曲線から決定した。図 13 によればいずれの絞り速度においても各鋼種の絞り深さは表面あらさによつて変化し、 $R_a \approx 1 \mu$  において極大値をとることがわかる。絞り深さそのものは SUS301 がもつとも大きく、ついで SUS304、SUS430 の順である。絞り速度 100 mm/min の結果は 10 mm/min の結果に比べて値が小さく、とくに SUS301 においてそれが顕著である。これは図 6 にも示したように、SUS301 の塑性挙動の変形速度依存性がとくに大きいことによつている。また図示していないが、塗油した

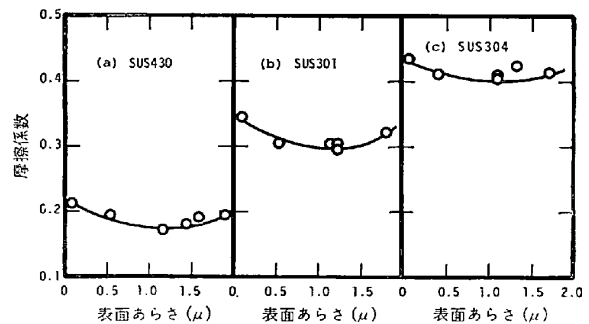


図14 各種ステンレス鋼板の表面あらさと深絞り時の対ポンチ間摩擦係数の関係

場合も無潤滑の場合と同様に絞り深さはある表面あらさで極大となる。したがって絞り深さが極大となる表面あらさが存在するという事は、摺動面への潤滑油の供給のしやすさを介しての結果というよりは、むしろダイス間摩擦とポンチ間摩擦の兼ね合いが表面あらさによつて変化し、それが深さに大きく影響することによるものと推察される。なお図 13 で SUS430 においても極大が生じたことは岡本の結果<sup>15)</sup>と異なつている。

図 14 には表面あらさによる摩擦係数の変化を示す。ここで対象とする摩擦係数 ( $\mu_p$ ) は、ポンチ角部と素材との間のいわゆるポンチ間摩擦係数で、吉井<sup>16)</sup>の式を修正した山田<sup>17)</sup>の式をさらに変形した、 $\mu_p = (2/\pi) \ln \{ p / t \sigma_1 \pi (d_0 + t) \}$  から算出した値である。ここに  $p$  はポンチ力、 $t$  は変形後の板厚、 $\sigma_1$  は板厚ひずみに等しい引張ひずみに対応する真応力、 $d_0$  はポンチ直径である。図 14 によればいずれの鋼種においても  $\mu_p$  は  $R_a \approx 1 \mu$  において極小値を示している。この原因は、表面あらさが非常に小さいと工具との金属接触状態にある面積の割合が多くなるし、また反対にあまりあらいと材料の表面の突起部がつぶれて金属接触状態の占める割合が多くなり、いずれも大きな抵抗を受けることから、摩擦係数が大きくなり、必然的にある中庸の表面あらさのときに摩



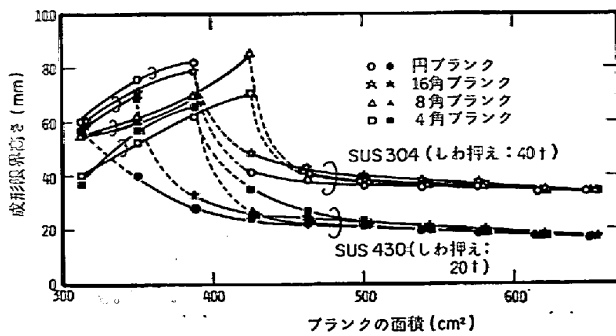


図15 SUS304 と SUS430 ステレス鋼の深絞り性 (100□正四角筒) におよぼすブランク形状と寸法の影響

擦係数が最小になることにある。極値を示す  $R_d$  の値は図13と図14でほぼ同じ  $1\mu$  程度となつている。

### 3.4 ブランクの形状と寸法

一般に薄鋼板の成形においてブランクの形状と寸法の影響は非常に大きい。ステンレス鋼でもそれは同じである。SUS304 と SUS430 についてブランク形状を円、正16角、正8角、正4角の4種類とし、しかもそれぞれの面積を変化させ、そして平底円筒絞りを行なったときの成形深さとブランク面積の関係を図15に示す。ブランク面積の変化に対する成形限界高さの変化は、ブランク形状および鋼種にかかわらず定性的に三つの領域に区分される。すなわち、ブランク面積が大きくてその寸法変化に対し成形限界高さが鋼種ごとにほとんど変化しない“張出し成形領域”，それと反対にブランク面積が小さいために絞り抜けてしまい、したがってブランク寸法が小さいほど必然的に成形高さが減ずる“深絞り成形領域”，そしてこれらの中でブランクの寸法変化に対して成形限界高さの変化のもつとも激しい“深絞り—張出し成形領域”である。深絞り成形領域では同一面積においてブランク形状ごとに成形高さが変化し、また深絞り—張出し成形領域では正  $n$  角形ブランクの  $n$  が大きいほど成形限界高さが減少する。このことは最大成形高さの得られるブランク面積が  $n$  の増加につれて減少することを意味している。

### 3.5 変形様式

縮みフランジ、張出し成形、伸びフランジ成形などの変形様式の違いによる成形限界の変化を知るにはいわゆる変形状態図上に破断限界曲線を描いてみるのが都合がよい。ステンレス鋼の変形状態図に関する詳細な報告は見あたらないようであるが、図16に川戸ら<sup>18)</sup>が円形液圧バルジ試験、R付試験片による単軸引張試験、JIS13B号試験片による単軸引張試験から求めたSUS304とSUS430の破断限界曲線を示す。両曲線とも原点から破断点までの距離が平面ひずみ状態のときもつとも小さく、張出し成形領域において等2軸変形状態に近づくほど、また縮みフランジ成形領域において単軸引張変形状態に近

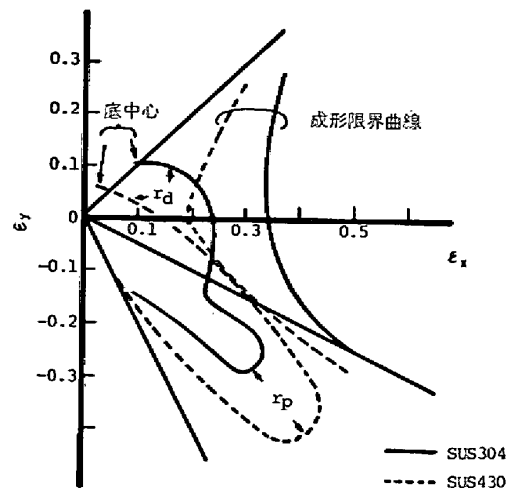


図16 SUS304 と SUS430 の角筒絞りにおける破断限界の変形様式依存性と変形状態

づくほど大きくなつている。このような傾向は軟鋼の場合と同様である。SUS304はSUS430に比べて張出し成形と縮みフランジ成形のいずれの変形様式においても破断までの成形可能領域が広い。SUS304は  $n$  値が高く張出し成形性が良好であるのに対し、SUS430は  $n$  値が小さく  $r$  値が高いのでむしろ深絞り性が比較的的良好であるといえるが、そのことは図16の変形状態図にも現われている。後述するように円筒成形の際  $\alpha$  破断を生じやすいポンチ角部のひずみは平面ひずみ状態に近いから、その状態での延性の大きい材料ほど苛酷な成形に耐えうることになる。図16によればこの観点からもSUS304のSUS430に対する優位性が明らかである。

## 4. 酷苛な張出し加工および深型角筒容器の深絞り加工

本節ではステンレス薄鋼板の実際のプレス加工応用例を2、3とりあげ、既述の基礎的な知見がどのように反映されているか、またそれだけでは対処しきれない問題点について触れることにする。

### 4.1 自動車ホイールカバーの張出し成形

ステンレス鋼の実際のプレス成形品できわめて苛酷な変形がなされているものに自動車ホイールカバーがある。最近とくにこれが1種のアクセサリとして扱われるようになって形状が複雑化し、著しい局所的凹凸を伴う断面形状を有するようになってきた。したがってそのプレス成形においては従来にも増して局部張出し加工を必要とすると同時に、単に亀裂を生ぜずに絞れるだけでは不満足で、しわ、肌あれ、張り剛性、形状性、事後の研磨性、表面のつやなどの諸性状がきわめて良好であることが望まれ、全体的な成形難度はますます高くなりつつある。

図17は国産車のホイールカバーの断面形状の1例とSUS301を用いて成形したときの板厚減少率および硬度

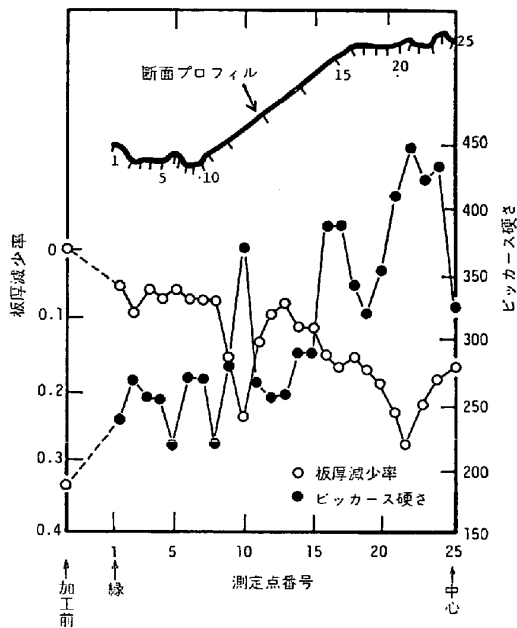


図17 SUS301 による自動車ホイールカバー成形時の板厚減少率と硬さの分布

を示す。板厚ひずみは最大約 0.3、ビッカース硬度は最大約 450 に達する。SUS301 の通常工程材の液圧バルジ試験による等 2 軸変形の板厚限界ひずみはたかだか 0.4 であるから、ホイールカバーの成形は SUS301 の限界に近いものと考えてよいであろう。したがって成分バランスを主体とする材料設計のいかんによつて加工性の良否が微妙に左右されやすい。筆者らの経験によればこのホイールカバーの加工性は  $n$  値、エリクセン値、硬度、伸び、バルジ張出し高さ、結晶粒度、CCV などそれぞれ単独の材料特性によつては容易に推定しえず、かわりに PAULSON<sup>(9)</sup> の示唆したパラメーター、すなわち一様伸び ( $\epsilon_u$ )、抗張力 ( $\sigma_m$ ) そして塑性変形エネルギー  $A (= \int_0^{\epsilon_u} \sigma d\epsilon, \sigma: \text{引張試験での真応力}, \epsilon: \text{同じく真ひずみ})$  から求められるパラメーター、 $f (= \ln\{\sigma_m(1-\epsilon_u)\}/A^{\epsilon_u})$ 、そしてそれとともに表面あらさとその方向差によつて決まる粗度パラメーター、 $\tilde{H} (= k\bar{H} + \Delta H/\bar{H}, \text{ここに } \bar{H} = (H_{a(L)} + H_{a(C)})/2, \Delta H = H_{a(C)} - H_{a(L)} \text{ で } H_{a(L)} \text{ および } H_{a(C)} \text{ はそれぞれ圧延方向およびそれに直角方向の表面あらさであり、} k \text{ は定数})$  が有用な特性値であり、これらの比、 $f/\tilde{H} \equiv g$  を塑性パラメーターと称することとし、成形性評価指標とすると実際のプレス結果と比較的よく対応することを見いだした。図 17 に示したホイールカバーの加工例では、図 18 のように  $f$  が小さく、 $\tilde{H}$  が大きいほど  $g$  が小さくなり加工性によいのであるが、 $\tilde{H} > 2.0$  (ただし  $k = 10$  とした) では研磨能率を阻害することとなり、結局  $g \leq 0.7, \tilde{H} \leq 2.0$  の領域であれば不良率がきわめて小さい状態で加工しうる。この領域内で材料の  $f$  が小さいほどより安定した加工が可能である。 $f$  はオーステナイト安定度の影響を受け、SUS301 系の材料で

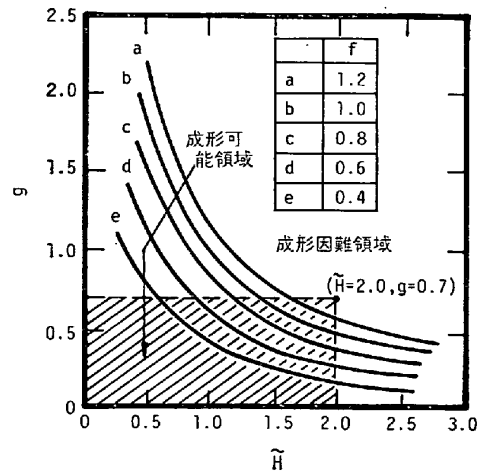


図18 SUS301 製自動車ホイールカバー成形における塑性パラメーター  $g$  と粗度パラメーター  $\tilde{H}$  の関係

は  $Md_{30}^{(20)} \approx 15^\circ\text{C}$  (0.3 のひずみを与えたとき組織の 50%が  $\alpha'$  マルテンサイトに変態するような変形温度) のとき極小を示すので、成分バランスと結晶粒度の調整によつて  $Md_{30}$  をこの値に合わせることを肝要である。また  $f$  は変形温度によつて変化し、ある温度で極小値を示す。この温度を  $T_{f,\min}$  とするとこれは  $Md_{30}$  の低下につれて低下し、 $Md_{30} \approx 15^\circ\text{C}$  では  $T_{f,\min} \approx 40^\circ\text{C}$  となる。したがって通常 SUS301 工程材の  $Md_{30} = 20 \sim 25^\circ\text{C}$  よりも若干  $Md_{30}$  を低めにしたほうがプレス変形時の材料の温度上昇 (実測により約  $40 \sim 50^\circ\text{C}$ ) という観点から都合がよい。なお SUS301 鋼ではパラメーター  $f$  はほとんど塑性変形エネルギー  $A$  によつて決まる。したがって  $A$  は SUS301 の張出し成形において加工性を左右する一つの基本パラメーターということができ、この  $A$  は絞り加工においても同様に重要な役割を示す<sup>21)</sup> ことに注意すべきである。

#### 4.2 深型シンの成形

現在ステンレス薄鋼板の最大の用途は厨房器具で、とりわけシンク用がその大部分を占める。もちろんシンクはプレス加工によつて製作されており、ステンレス薄鋼板のプレス技術はシンのそれとともに向上してきたといつてもよい。なかでもいわゆるダブル・シンの槽は 200 mm 以上の深型で成形難度のかなり高いものである。一般にプレス加工を行なう場合、材料が破断せずに絞れるかどうかという「成形性」と、絞つた製品を型からとりはずした際にどの程度型と同じ形状を保っているかという「形状性」の双方が重要である。深型シンのプレス加工においては安定に絞れる材質と成形技術を保つこと自体容易ではないが、製品の形状についてもシビアな精度が要求されるので、SUS304 鋼を用いる場合中間熱処理を行わずに製品を仕上げることはかなり困難である。

このようなシンの絞り加工における材料の変形挙動

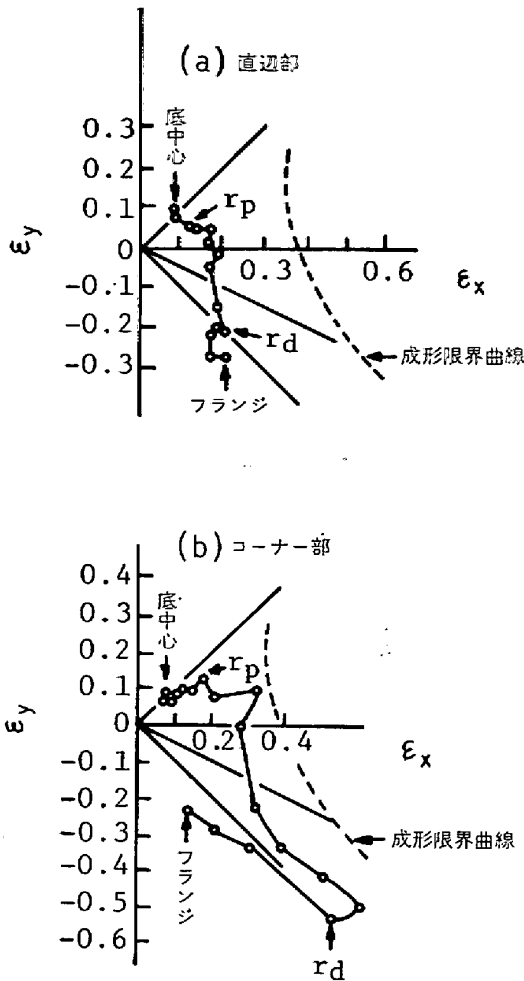


図19 SUS304 深型シンク成形における各部分の変形状態図

をみるために、深さ 10 インチ (254 mm) のシンクを SUS304 を用いて第 1 次絞りのみ行なつたときの直辺部とコーナー部のひずみ分布を測定した。この結果を素材の成形限界曲線とともに変形状態図上に描いたのが図 19 である<sup>22)</sup>。直辺部の変形状態図によれば、側壁部およびフランジ部のひずみ分布は  $\epsilon_x$  方向上ではほぼ一定で伸びひずみの変動はなく、 $\epsilon_y$  方向に主として縮み変形を受けている。そしてこの部分の変形量は破断変形量の 1/2 以下であるから破断はまず生じないと考えてよい。一方、コーナー部の変形状態図は直辺部のそれに比べて  $\epsilon_x$  および  $\epsilon_y$  ともに非常に大きく変動している。ポンチ肩部よりややダイス肩部に寄つた部分が破断限界に非常に接近した平面ひずみ状態になっており、破断危険領域にある。この部分はあとわずかな変形で破断限界ひずみに達し、いわゆる  $\alpha$  破断を生ずることが予想され、このような状態ではほとんどリストライクを行なうことは不可能と思われる。したがって深型シンクの場合 SUS 304 や SUS 430 ではかりに絞りはできたとしても、リストライクで形状矯正を行なう余裕はごく少ない。この結果からも深型シンクの苛酷な成形には平面ひずみ状態

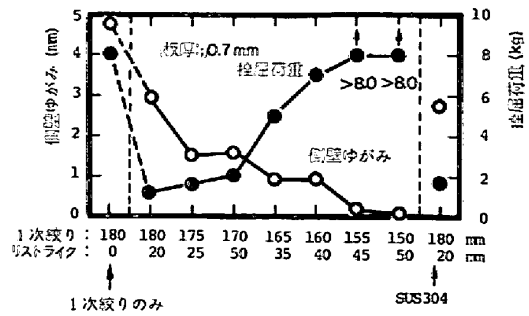


図20 極深絞り用オーステナイト鋼(R304UD)製深型シンクの成形時における1次絞りとリストライク量のバランス変化と製品の側壁ゆがみおよび側壁挫屈荷重の関係

での延性の大きい材料が向いていることになる。このような材料は形状矯正のためのリストライクに対しても好ましい。なぜならば、リストライク工程によって直辺部の側壁のひずみ量は平面ひずみ状態のまま 2 倍以上にもなり破断限界曲線に接近するからである<sup>22)</sup>。いうまでもなく、絞りおよびリストライク加工における材料の成形性および形状性は、ブランクの形状寸法、潤滑条件、しわ押え圧力、アタリの調整 (とくにシンクのような角筒成形では長辺 > 短辺 > コーナーの順にアタリに強弱をもたせ、外周部を逃がすようにすることが肝要)、金型材質、キャンバーのとり方やビードの配置など種々のプレス条件を最適状態に保持することによつてはじめて有効に発揮されるものではあるが、やはり材料自身の基本的な加工性能がプレスの成否あるいは難易を決める上でもつとも重要な因子となることには間違いがない。

図 20 はそのような観点から、極深絞り用材料の 1 例として含銅オーステナイト・ステンレス鋼板、R304UD (表 1 参照)、のリストライク後の側壁ゆがみと側壁部の張り剛性を SUS304 と比較して示したものである。この絞りにおいては製品の長辺 550 mm、短辺 430 mm、深さ 200 mm のシンクを成形するのに、1 次絞りとリストライクの成形量のバランスを種々変えて試験を行なつた。側壁のゆがみはフラット面からの凹凸をダイヤルゲージで測定し、また張り剛性は側壁に荷重を加えたとき荷重-たわみ曲線に現われる転位点を挫屈荷重とし、これの大小で比較した。この製品を SUS304 を用いて成形する場合は 1 次絞り 180 mm、リストライク 20 mm のバランスで製作するが、破断を回避して成形するにはロットが変わるごとに型のアタリやしわ押え圧力の調整などに多くの時間を費さねばならず、たとえそのようにしても図からわかるようにならぬほどの側壁ひずみが生じ、張り剛性も十分とはいえない。これに対し極深絞り用の材料では 200 mm の製品深さを得るのに 1 次絞りの深さを減らしてリストライク量を増やすことが可能で、図からわかるように 1 次絞りを 150 mm、リストライクを 50 mm にしても破断することなく成形でき、しかも側壁ひずみ

はほとんど皆無に近く、挫屈荷重も SUS304 工程製品の値が約 2 kg であるのに対して 8 kg 以上を要し、ベコツキに対して抵抗力が大きいことがわかる。なお深型シンクは成形後置割れ（たて割れ）を生ずることがあるがリストライク量を多くとつて成形する場合は 1 次絞り量が比較的少なく、しかもしわ押え圧力を高くすることができるから、加工後の周長方向の引張残留応力をかなり低減することが可能で、置割れの発生に対しても有利である。

また最近ステンレス浴槽の需要の伸びがめざましく、浴槽全体に占める割合も急増している。ステンレス浴槽は現在そのほとんどが三体分割溶接組立法によつて製作されているが、生産性に劣る欠点があるので一体成形法の開発が各所で行われ、一部市販もされようとしている。浴槽はシンクに比べて大物製品で相当の深絞り加工が行なわれ、かつ使用環境もシンクより厳しいので、これを一体成形法で加工する際には  $\alpha$  破断、形状性、耐置割れ性、フランジの曲げ性のみならず耐食性、耐応力腐食割れ性など留意すべき問題点が多々あり、さらにブランキングの際の材料歩留りや広幅材料の供給体制にも問題がある。しかし近い将来これらの種々の問題を克服することによりステンレス浴槽の生産態様は一体成形法に移行していくものと考えられる。

## 5. 結 言

代表的な規格鋼種を中心として、プレス成形性に関与する材料の冶金学的塑性特性ならびにプレス技術上の諸因子の影響を概説した。また最近各メーカーで開発されつつある極深絞り用新鋼種の特性に触れ、さらに張出し成形と深絞り成形の代表的実例について筆者らの経験を紹介した。

ステンレス鋼に限らず薄板のプレス成形にあたっては、目的とする製品の形状と用途によつて適切な材料を選択しなければならないことはもちろんであるが、成形の良否は実際のプレス作業の場において機械や型の微妙な調整に負うところが大きく、とくにステンレス鋼ではその効果が大きい。また機械や型自身もなるべく剛性の強いものであることが必要である。これらのことについては実例に則した優れた解説<sup>22)</sup>があるので十分参照されたい。

また実際の製品ではプレス作業のみで終る例はむしろまれで、プレス部品同志あるいはさらに他の小部品を溶接したり、ろう付けしたりすることが多い。また最終的には表面を酸洗したり研磨したりすることもよく行なわ

れる。これらの作業は新しいひずみや欠陥を生む原因にもなるので、プレス部品の設計にあたってはあらかじめこれらのことを十分考慮に入れておく必要がある。緒言にも述べたように、ステンレス鋼を用いる最大の目的はその耐食性にあるわけだから、これに支障をもたらすような加工法は絶対に避けるべきである。とくに溶接部やその近傍では応力腐食割れ、粒界腐食、孔食、すき間腐食など種々の形の事故が起きやすく、たとえば単なる温水のような弱腐食環境でも油断はできない。したがって材質の選択、プレス部品の設計、とくに接合法を考慮した設計そしてプレスや製品の表面浄化法などについて、この観点からも十分な配慮をする必要がある。このことについてもいくつかの実験的な解説<sup>23)24)</sup>があるので参考に供されたい。

## 文 献

- 1) 野原, 小野, 大橋: 鉄と鋼, 62(1976), S 365
- 2) 河合, 後藤, 松田: 塑性と加工, 15(1974), p. 11
- 3) 宮川: 図解プレス加工辞典, (1970), p. 157 [日刊工業]
- 4) 新日鉄: 公開特許公報, 特開昭 50-137861, (出願 1974)
- 5) 河合, 濱木, 平手: 塑性加工春期講演概要集, (1975), p. 73
- 6) 野原, 小野, 大橋: 鉄と鋼, 61(1975), S 604
- 7) 野原, 小野, 大橋: 鉄と鋼, 61(1975), S 606
- 8) F. W. SCHALLER, T. E. SCHMID and E. SNAPE: Sheet Metal Ind., October (1972), p. 621
- 9) 野原, 渡辺, 小野, 大橋: 鉄と鋼, 61(1976), S 303
- 10) 星野: 塑性と加工, 16(1975), p. 993
- 11) 大橋: 日本金属学会誌, 31(1967), p. 519
- 12) H. CHAO: Met. Trans., 3(1972), p. 83
- 13) 野原, 渡辺, 小野, 大橋: 鉄と鋼, 61(1976), S 595
- 14) 日本溶接協会: 日本溶接協会 W E S 規格案, (1964)
- 15) 岡本: 日新製鋼技報, No. 12(1965), p. 19
- 16) 吉井, 今岡, 吉田: 塑性と加工, 3(1962), p. 723
- 17) 山田: 機械学会誌, 67(1964), p. 453
- 18) 川戸, 佐藤, 白井: 日新製鋼技報, No. 31(1974), p. 39
- 19) D. PAULSON: Analysis of Bending, Boeing Co., (1967)
- 20) 野原, 渡辺, 小野, 大橋: 鉄と鋼, 60(1974), S 317
- 21) 野原, 渡辺, 大橋: 鉄と鋼, 59(1973), S 660
- 22) 福岡, 竹添, 横田: プレス技術, 10(1972), p. 111~11(1973), p. 119
- 23) ローゼンフェルド: 金属の腐食と防食, (1972), [日・ソ通信社]
- 24) G. A. MURRAY: Corrosion, 20(1964), p. 329