

板 材 の

塑性加工性試験

理 化 学 研 究 所

伊 藤 勝 彦

はじめに

自転車にその主体をなすフレームパイプなどを中心として、金属材料の塑性加工製品が多く用いられていることは衆知のことがらである。塑性加工は材料を破断することなくわれわれの目的な形状へ、その塑性を利用して加工する方法であるが、1回の加工でできるだけ加工量の大きなことが望ましい。すなわち、破断抵抗ができるだけ大きいことが望ましいが、加工する力、したがって加工材料などの点から考えると、変形抵抗も小さいほうがよい。しかしながら、破断抵抗と変形抵抗とは相反する傾向にあるため、この塑性加工性に関する問題もあながちあまり簡単な問題ではない。この点で変形抵抗と破断抵抗のともに低下する熱間加工の可否の問題は、たとえば金属薄板加工などでは熱間における破断抵抗の減少が、変形抵抗の減少よりいちじるしいために必ずしも有利とはいえないといわれている。また、いろいろな形

状に塑性加工されるので、材料の被塑性加工性をなんらかの方法で試験する場合、その際の両者の応力分布の類似性もまた考慮されなければならないことがらの一つである。したがって、材料の被塑性加工性の問題は興味のある重要なことであるが、材料のいろいろな種類と製品の形状、また塑性加工法のいろいろなどのためあまり簡単な問題でもなく、したがってその試験法も決定的な方法が一つ確立されているわけでもない。

つぎに金属薄板材を素板とした塑性加工について、いままでによく利用されている成形性の試験法を、その際の注意事項とともに概説してみよう。

自転車でもドロヨケ、チェーンカバーその他板金の塑性加工法がよく用いられていることから、自転車部品として所要の形状に塑性加工するのに、得られた金属薄板が適するか否か、また不適格ならたとえば熱処理などをいかに変えれば適するものになるか、などを知る上にこの試験法は役立つものと思われる。また、それらの板材の被塑性加工性試験結果は、板材に限らずその材料の一般的な三次元製品の被塑性加工性の結果を予想する上にも役立つものと思われる。

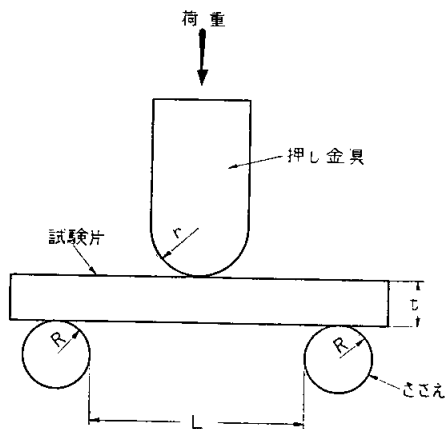
1. 板材の被塑性加工 試験法のいろいろ

1.1 折り曲げ試験

引張試験について比較的簡単な試験法であり、したがってJISでも金属材料の曲げ加工性を調べるために曲げ試験法(Z 2248 1955)が規定されている。第1表はその要約したものである。金属材料の曲げ試験片の規格は

第1表 曲げ試験方法

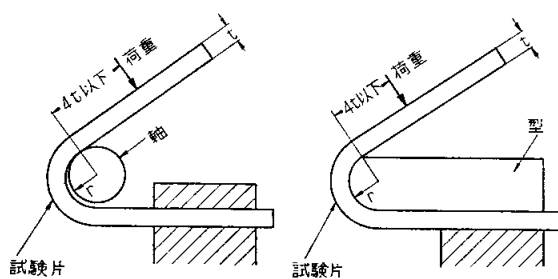
押 し 曲 げ 法	巻 き 付 け 法
試験片を2個のささえにのせ、その中央部に押し金具をあて、所定の形に曲げる(第1図)。この方法で曲げる角度はおよそ170度までとする。試験片と押し金具およびささえの接する面に塗油してよい。ささえの直径Rは10mm以上とし、ささえ間の距離Lは $L=2r+3f$ とする。	試験片を軸または型にあて、試験片の一方の側を押さえ、他の側を規定の曲げ角度まで巻き付ける(第2図)。内側半径が大きいときは、曲げ角度180度まで実施可能。
曲げ角度が180度の場合には、規定の内側半径rをもつて、第1図の方法でおよそ170度に曲げた後、第3図(a)のように規定の内側半径の2倍の厚さをもつはさみ物を用い、試験片の両端を互いに押圧する。注 文者の承認を得て第1図の方法で、ささえ間距離を $L=2r+2f$ とし、試験片がささえを通り抜けるまで押圧したときは、これを180度曲げとしてよい。	曲げ角度が180度で内側半径がとくに小さいか、または密着の場合には、適宜の内側半径をもつて第2図の方法で180度に曲げた後、第3図(a)または(b)の方法で規定の内側半径になるまで試験片の両端を互いに押圧する。
密着の場合には、適宜の内側半径をもつておよそ170度に曲げた後第3図(b)の方法による。	備考: 1)試験片は材料規格の定めるところによる。 2)裂傷(さげきず)その他の異状は、曲げ装置から取りはずした後におん曲部の外側で観察する。



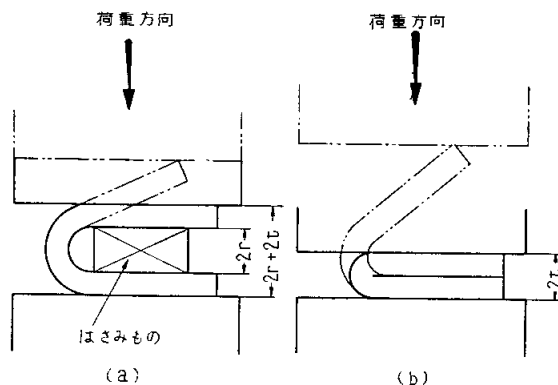
第1図 曲げ試験方法 (第1表参考図)

1956年に制定され (JIS Z 2204), 第2表はその要約である。他方において金属材料の曲げ強さを求める抗折試験片 (JIS Z 2203) は, 主として鋳鉄品を対象としたもので塑性加工とはちょっと関係はない。

曲げ加工性の試験結果は, 金属材料では試験片の幅 b と厚さ t との比 b/t に影響される。 b/t の値により曲げ試験片内での応力状態が異なり, したがって破断抵抗と変形抵抗の相互関係よりなる曲げ加工性が変わるのは当然といえよう。



第2図 曲げ試験方法 (第1表参考図)



第3図 曲げ試験方法 (第1表参考図)

第2表 金属材料曲げ試験片

種類	厚さ t (mm)	幅 b (mm)	長さ L (mm)	適用
1号	原厚	35以上	250以上	鋼板, 平鋼, 形鋼
2号	径, 辺または対辺距離は原寸法		250以上	棒鋼
3号	原厚	25以上	150以上	薄鋼板
4号	原厚	25以上	150以上	非鉄金属板
5号	省	略		鈹鍛鋼品, ステンレス鋼
6号	省	略		可鍛鋳鉄品

- 備考: 1) 1号において原厚が35mmをこえる場合, 片面のみを削って35mm以上の厚さに仕上げてよい。このときは圧延のままの面をわん曲の外側におく。
- 2) 2号において径, 辺または対辺距離が35mmをこえる場合, 径35mm以上の円形断面に仕上げてよい。
- 3) 3号, 4号において規定の幅につくれない場合は製作可能な最大幅でよい。また, 切断によつてできた側面には機械仕上げを行なつてよい。
- 4) 4号において特別な材料には, 幅を10mm以上とすることが認められる。
- 5) 1号, 3~5号のリョウ (角隅) には許された値以下の丸味をつけることができる。

1.2 エリクセン試験

エリクセン試験機の主要部分を第4図に, また主要寸法 (JIS) を第3表に示しておいた。エリクセン試験は圧縮には関係しないが, 広義の引張試験ともみなされるものであるが, その応力状態ははるかに複雑で, 板材の塑性加工性試験に適するようにしたものである。したがって実験操作などはきわめて簡単であるが, 同一材料で

も板厚によってエリクセン値が異なる。

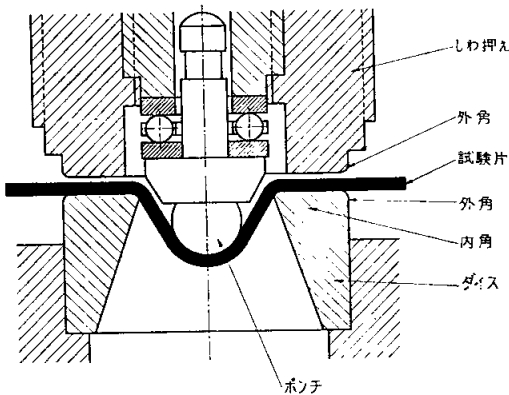
JIS にしたがってエリクセン試験に関する注意事項を箇条書きにしてみよう。

- (1) エリクセン試験片は, 第1号幅 90 ± 2 mm の条 (帯), 第2号辺 90 ± 2 mm の正方形, 第3号直径 90 ± 2 mm の円形の3種類であつて, 板厚は $0.1 \sim 2$ mm を標準とする。ただし, やむを得ない場合に

第3表 エリクセン試験機の主要寸法 (JIS B 7729)

ポンチ前部の球面半径		寸法 (mm)	許容誤差 (mm)	仕 上, そ の 他
		10	±0.05	表面アラサ1S (1.2.12項) 程度のラップ仕上
ダ イ ス	内 径	27	±0.05	試験片に接する面は焼入後, 4S (1.2.12項) 程度の研磨仕上を施した平面とする
	外 径	55 程度		
	内 角 半 径	0.75	±0.05	内角の丸味部分は1S程度のラップ仕上
し わ 押 え	外 角 半 径	0.75程度		試験片に接する面は焼入後, 4S程度の研磨仕上を施した平面とする
	内 径	33 程度		
	外 径	55 程度		
		0.75程度		

注: ポンチおよびダイスの試験片に接する部分のカタサは, ビツカースカタサ Hv600 (ロツクウエルカタサ HRC55) 以上とする。



第4図 エリクセン試験機主要部分

は90mmを70mmとすることができるが, 試験結果にはその旨を明記することが必要である。

- (2) 試験片の両面に油を十分塗布する。油はワセリンを標準とする。
- (3) ダイスとしわ押えの間のすきまには, 試験片の厚さのほかに0.05mmの余裕を与える。
- (4) ポンチはできるだけ静かに一様な速度で押し込み, この速さは0.1mm/secを標準とする。
- (5) 試験片には少なくとも1カ所に裏面に達する割れができるまでポンチを押し込み, その際にポンチの先端がしわ押え面から移動した距離(mm)を表わす数をもってエリクセン値とする。エリクセン値は小数点以下2位を四捨五入し, 小数点以下1位にとどめるようにする。

これに類似した方法としてオルゼン社の薄板成形試験機 (Olsen 社 Bulletin 39) では, 割れが生じたときのふくれの高さをポンチと接しない側で測定するから, オルゼン値はエリクセン値より板厚減少に相当する分だけ小さくなるわけである。

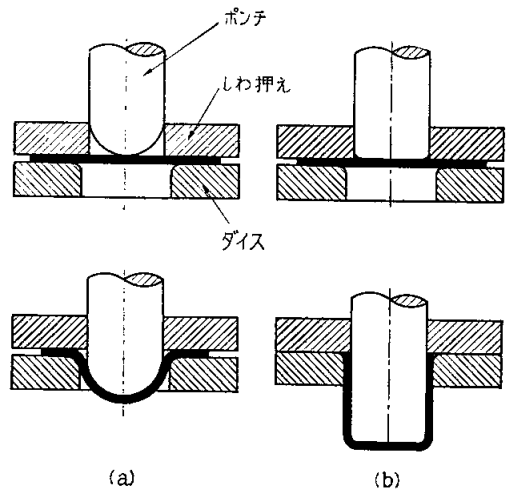
以上のようにいろいろ規定はしているが, 普通エリクセン試験機を用いる場合には, 試験片の割れの判定やポ

ンチの押し込み速度などは, 実験者の判断と熟練で行なわれているのが現状である。この点ではドイツのエリクセン社製試験機 (カタログ 30G) にはポンチ力測定装置が付属していて, 荷重の変化や荷重が最大値へ達した瞬間などを知るのに便利である。

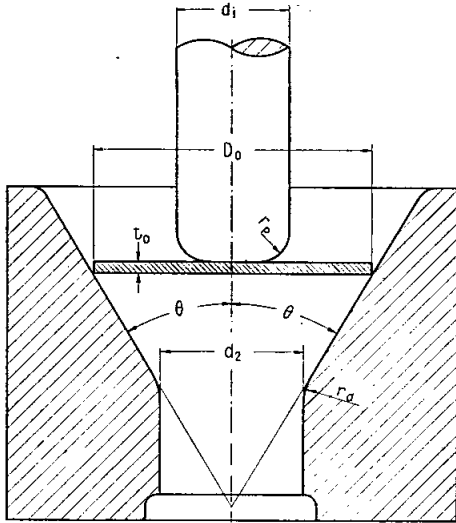
1.3 円筒深絞り試験

円筒深絞り試験には平面ダイス (第5図参照) が用いられる場合と, 円すいダイス (第6図参照) が用いられる場合とがある。平面ダイス法では一般にしわ押えを必要とするが, 円すいダイス法では素板の直径 D_0 が板厚 t_0 の大体50~70以下であれば特別にしわ押えを必要としない。

その点で普通第4表に示したような寸法の円すい深絞り工具を第6図のように装置して使用することが推薦されている。この場合, 円すいダイスでも平面ダイスでも深絞り加工性の点からは, ポンチの先端は最適半径のものが使用されることが望ましい。しかしながら, ポンチ



第5図 円筒深絞り用平面ダイス



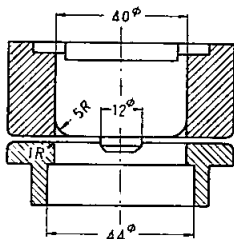
第6図 円筒深絞り用円すいダイス

第4表 円すいダイス式深絞り試験装置の主要寸法

種類	(単位 mm)				
	第1号	第2号	第3号	第4号	第5号
板厚の範囲	0.5 ^{+0.1}	0.6 ^{+0.1} _{-0.1}	0.8 ^{+0.2} _{-0.1}	1.2 ^{+0.2} _{-0.2}	1.6 ^{+0.4} _{-0.2}
ダイス穴径 d ₂	12.70	14.60	19.95	24.40	32.00
ダイス角半径 r _d	2.5	3.0	4.0	6.0	8.0
ポンチ直径 d ₁	11.11(3/8")	12.70(1/2")	17.46(3/4")	20.64(3/4")	26.99(1 1/8")
ポンチ角半径 r _p	最適	3.0	4.0	6.0	8.0
	半球	d ₁ /2	d ₁ /2	d ₁ /2	d ₁ /2
最大素板直径	30	35	45	55	70
最小素板直径	20	23	30	38	48

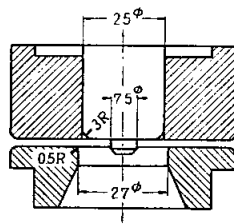
最初に Siebel および Pomp により提唱された方法である。

第7図に穴広げ試験工具の一例を示す。ポンチを押し込むと、最初にあけられていた穴(直径 d₀)の寸法は増大し、ついには穴の周縁にき裂を発生するにいたる。そのときの穴の直径を d とすれば、穴広げ試験結果は (d-d₀)/d₀ で示される。これらの関係は第8図および実験例を第9図に示してある。



t₀ ≤ 1.2 mm, D₀ = 70 mm

第7図 穴広げ試験工具



t₀ ≤ 0.8 mm, D₀ = 45 mm

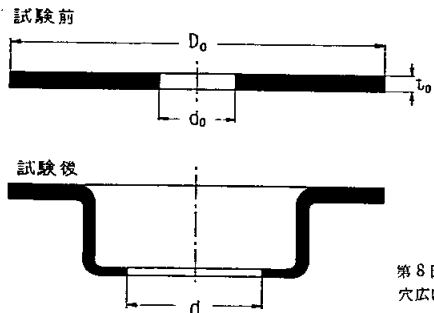
先端が球面の場合は鋼球を利用して、簡単に実験できる上に2軸引張応力条件のもとで塑性加工性を調べるのに有用な観点から、ときどき球面ポンチは利用されることがある。

深絞り加工性は、深絞り可能な素板の最大直径 D_{0max} とポンチ直径 d₁ との比、すなわち限界絞り比 D_{0max}/d₁ あるいはまたその逆数の限界絞り率 d₁/D_{0max} で表わされるが、普通は後者をとり C_d として示している。また、d₁ の代わりにダイス穴径 d₂ をとることもあり、かつまた正確を期するためには、板厚を考慮した式により深絞り加工性を定義することもある。この方法では D_{0max} を実験的に求めるために、外径の異なる数多くの素板を用意する必要があるが、また、D_{0max} に実験値としての変動があるから、これらの欠点を補うためいろいろな試みがなされている。

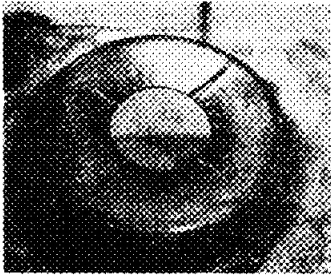
1.4 穴広げ試験

1.5 液圧バルジ試験

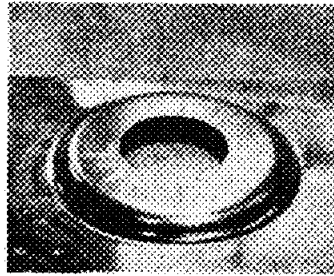
液圧バルジ試験は、試験片の周縁を適当な方法で固定(たとえば第10図に示される方法)して、その片側に液圧を加えることによって行なわれる。受圧部の形は普通は円形であるが、特別な目的にはだ円穴や四角穴なども用いられる。丸穴の場合の液圧バルジ試験値は破断時のふくれの高さ h、あるいは無次元量 h/r、h²/r² などで表わ



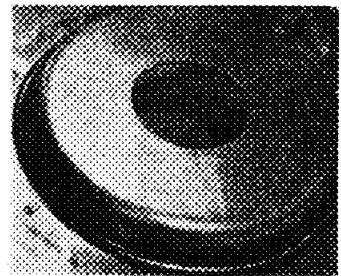
第8図 穴広げ試験結果



(a) 銅



(b) 24 S-T₂



(c) 52 S-1/2H

第9図 穴広げ実験例

される。ただし、 r は受圧部の半径である。 h は一般的に r に比例するので、 r の異なる試験との比較を考慮して h/r または h^2/r^2 で表わしたほうが合理的といえよう。液圧パルジ試験は液体のもれないよう試験片を固定したり、また若干実験操作で厄介な点もあるが、試験結果を無次元表示できるという利点のほかに、同一材料では板厚によって試験結果がほとんど変わらないという特徴がある。

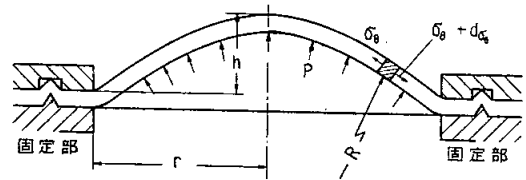
1.6 クサビ形試験片引抜試験

Sachsによって初め提案された方法である。板材試験片の一端をクサビ形に広げておいて、このクサビ形に対応するダイスを通して引き抜く。この際に板材試験片が切断することなく引き抜きうる最大限度をもって比較するのであるが、この方法は実際の板材の塑性加工法とも関連が薄くてあまり実施されていない。

1.7 各種試験値の相互関係

前述の試験法あるいはこれに類似した試験法における測定結果の相互関係については、まだ十分に明らかにされていない。これらの試験方法以外にもっとも簡単な板材の引張試験結果も重要視されるべきであって、材料規格のあるもの（たとえばJIS G 3310）では、板材について抗張力と伸びが指定されている。これらの試験値相互関係が明らかにされていないように、また、現場での塑性加工の失敗による不良率と板材の試験値とが相反する場合もしばしばあるのが現状である。その原因の一つとして両者における応力-ヒズミ状態の相違がある。したがって、実際の加工条件に近い試験法を選ぶことが望ましい。また、金属材料でとくに塑性加工の対象となる延性金属材料におけるかなり顕著な加工硬化特性の問題がある。さらにまた、潤滑状態の相違がこれらの問題に関連している。

したがって、引張試験や折り曲げ試験では応力状態が



第10図 液圧パルジ試験法

比較的簡単で、この試験結果だけでは実際の複雑な形状への塑性加工という点から十分とはいえないことはもちろんである。その他の方法は実際の板材の塑性加工条件と類似するものもあるが、今回はその中で深絞り試験法を中心とした加工法を概説してみよう。深絞り法では板材の異方性も同時に測定することができ、かつまたこの加工法は現場で実施されて数多くの塑性加工製品を産み出しているものである。つぎに自転車生産技術に興味のあるかたがたのために、深絞り加工の常識的なことから始めて、深絞り試験で板材の被加工性の良否がいかにか判断されるか、したがって、深絞り加工性のよい素板はかにかあれば（たとえば熱処理や圧延加工など）よいか、さらに、深絞り試験結果はもっとも簡単な引張試験結果といかなる関係にあるかというようなことを述べてみたいと思う。

2. 深絞り加工について

2.1 深絞り加工の常識

まず本命である円すいダイスによる円筒深絞り加工は、第6図に示されるようにして行なわれる。この場合ダイスやポンチその他の工具の幾何学的形状が影響するのであって、その影響因子を列挙すれば大体つぎのごとくである。

- d_1 : ポンチの外径
- d_2 : ダイスの内径
- t_0 : 素板の板厚
- D_0 : 素板の直径

- r_p : ポンチ頭部の曲率半径
- r_d : ダイス角の曲率半径
- θ : 円すいダイスの半角

円すいダイスを利用して深絞り加工を行なう場合にはしわ押えは不必要であるが、とくに被塑性加工性試験として行なう場合には、上記の影響因子が適切でなければならない。

そのための重要事項を要約して箇条書きにしてみよう。

- (1) r_p が大き過ぎてもまた小さ過ぎても、ポンチ頭部に接したところの引張応力 σ_e (第11図参照)が大きくなり、素板の破壊の原因となるので適切でない。したがって深絞り加工限度を向上するには、 r_p はつぎのような寸法範囲を選ぶことが望ましい。

$$(4 \sim 6)t_0 < r_p < d_1/3$$

- (2) d_1 と d_2 との関係は素板の周辺における圧縮による板厚の増加を考慮して、しごき加工を受けないよう大体つぎの寸法範囲を選ぶことが望ましい。

$$(d_2 - d_1) > 3t_0$$

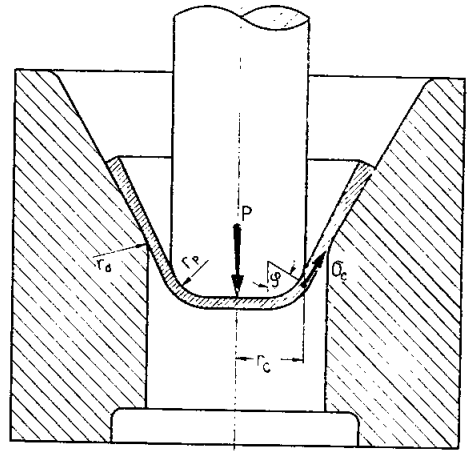
しかしながら、 $(d_2 - d_1)$ があまり大きくなると深絞りコップは円すい状を呈するにいたる。

- (3) 加工においては工具と素板との間に潤滑剤を用いるが、概して植物油が良好である。
- (4) r_d は大きいほうが最大深絞り力 P_m が小さくなってよい。しかしながらあまり r_d が大き過ぎると、深絞り加工の終わりに素板の周辺がここでしわを発生する危険があるので注意を要する。
- (5) 円すいダイスの半角 θ は小さいほど最大深絞り力 P_m は小さくなるが、加工に要するポンチ行程が長くなるので、普通 $\theta = 30^\circ$ の円すいダイスが用いられる。
- (6) 深絞り加工速度は衝撃的か、あるいは極端に遅くしない限り大した影響はない。

このようにして円すいダイスを使用した深絞り加工、とくに被塑性加工性試験における失敗は、延性金属板材ではポンチ頭部における素板の引張破壊であり、これが加工限度を決定するわけである。なお、深絞り加工におけるコップの耳の発生より素板の異方度 D_a を次式を利用して計算できる。

$$D_a = h_m / (D_0 - d_2)$$

ただし、 h_m は深絞りコップの耳の高さの平均値である。素板の圧延方向に直角および平行方向の4カ所に山が出るか、あるいはまた 45° 方向の4カ所に山が出るかである。普通前者の場合を D_a では正にとる。他の塑性加工性試験では普通測定できにくい素板の異方性が、深絞



第11図 深絞り加工行程

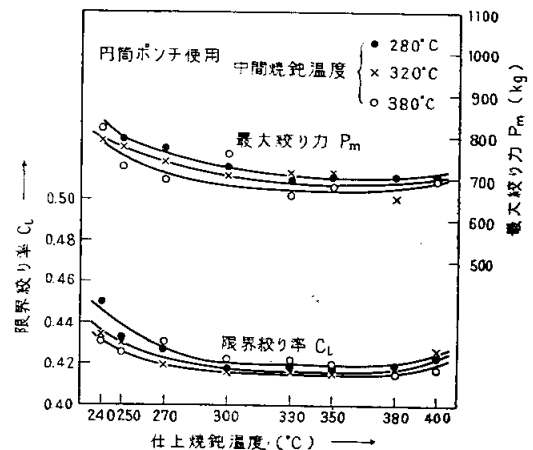
りコップの耳から割合に簡単に実測できるのは、深絞り法の板材の被塑性加工性試験法としての長所でもある。

2.2 ND板に関する実験例

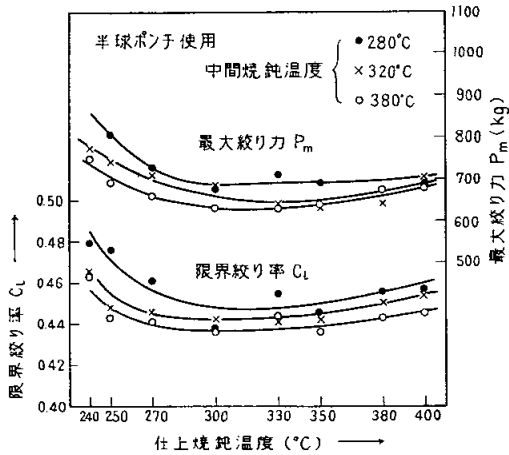
一例として、ニッポンジュラルミンND板 (Cu: 32~35%, Mn: 0.7%, Si: 0.8%, Fe: 0.65%, Zn: 0.25%, Al: 残余) について考えてみる。

2.2.1 熱処理条件と限界絞り率

中間焼鈍を経て、板厚1.8mmより1.0mmに冷間圧延(圧下率44%)され、さらに仕上焼鈍されたND板について中間焼鈍温度と仕上焼鈍温度が適当でない、最後のND板素板の深絞り性がよくなるのは当然である。中間焼鈍を 280°C 、 320°C 、 380°C の3種類の素板について、仕上焼鈍温度を $240 \sim 400^\circ\text{C}$ に変えた場合についてそれぞれの限界絞り率 C_L との関係を実験してみた。



第12図 熱処理条件と限界絞り率の関係(その1)



第13図 熱処理条件と限界絞り率の関係(その2)

実験に使用した深絞り工具は第4号のものである。この場合焼鈍時間はいずれの場合も1時間である。得られた結果は、中間焼鈍温度を媒介変数として2種類のポンチについて第12図および第13図に示されている。これらの図に同時に示されている最大絞り力 P_m は素板直径 $D_0 = 42.5\text{mm}$ に対する値である。第12図および第13図で明らかのように、半球ポンチに対して最適円筒ポンチを使用したほうがはるかに深絞り性がよくなっている。仕上焼鈍温度は $300 \sim 350^\circ\text{C}$ が適当で、これより高温でも低温でも加工性は悪くなっていることがわかる。仕上焼鈍温度 250°C 程度の低温では再結晶軟化が十分行なわれないと考えられるにもかかわらず、かなりの深絞り性を有するのは素板が十分な耐力を有するためと考えられる。同図に示されるこのことは、最大絞り力 P_m の変化の有様からもわかることである。中間焼鈍温度の影響はさほど明りょうではないが、 280°C のものより 320°C または 380°C の高温のほうが大体良好といえる。

以上はND板の熱処理条件をいかにすれば深絞り加工性のよい素板が得られるか、ということに関する実験結果を一例として示したものである。このようにして C_l の測定により被塑性加工性のよい素板を準備することができる。

2.2.2 深絞りコップのヒズミ分布

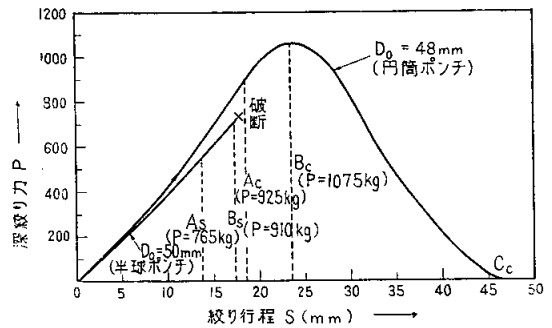
深絞り加工についてなお少し詳細な知識をうるために、加工行程における二三の段階で深絞りコップのヒズミおよびその分布を測定した。すなわち、素板は圧延による異方性にもとづく耳の発生の小さい熱処理条件(中間焼鈍温度 320°C 、仕上焼鈍温度 350°C) のものをとく

に選んだ。

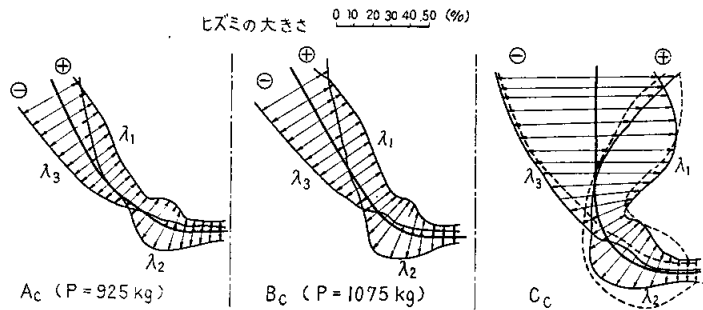
深絞りコップのヒズミは板厚方向のヒズミ λ_2 と円周方向のヒズミ λ_3 を実測し、容積一定の関係で半径方向のヒズミ λ_1 を算出する。

使用深絞り工具は限界絞り率 C_l の測定に使用した第4号のものである。最適円筒ポンチにおいては絞り加工の成功する素板 $D_0 = 48\text{mm}$ (したがって $C_l = 0.431$) について、半球ポンチのは絞り加工の失敗する素板 $D_0 = 50\text{mm}$ (したがって $C_l = 0.413$) のものについて、絞り行程の途中の二三段階においてヒズミを測定してみたのである。

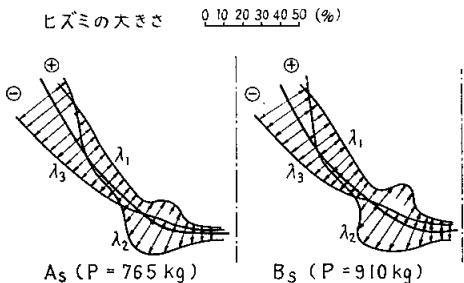
この際の絞り力 P -絞り行程 S の関係は第14図に示されているごとくで、A段階およびB段階で荷重を除き弾性ヒズミは無視して測定したものである。B段階はできるだけ大きな深絞り荷重における値を得んと努力したも



第14図 絞り力 P と絞り行程 S の関係



第15図 絞り行程におけるヒズミの大きさ



第16図 絞り行程におけるヒズミの大きさ

のである。C段階は深絞り完成コップに対するものである。これらの結果は第15図および第16図において示すとおりである。いずれも伸びを \oplus 、縮みを \ominus とし、太線は深絞りコップの形状である。

つぎに3方向のヒズミとその分布について簡単に考察してみる。

(1) 半径方向のヒズミ ϵ_1

二つの極値を有している。深絞り行程の初期では中心に近いほうが最大値であるが、完成コップでは外縁のほうのヒズミが増大して最大値となっている。中心に近い極大値はポンチ半径 r_p に接して曲げヒズミを受ける部分であり、この極大値が絞り行程とともに外側に次第に移るのは、ポンチ半径 r_p との接触面積が大きくなるためである。半球ポンチのほうが円筒ポンチの場合より、この極大値が中心に近く存在するのも同様な理由である。

(2) 厚さ方向のヒズミ ϵ_2

しわ押えを使用しないため、板厚は容積一定の関係を満足しつつ自由に变化し、ことに絞り完成コップでは外縁で厚さが約50%も増加している。中心部分はもちろん厚さは減少するから、この間に厚さの変化しない点が存在するが、この位置が絞り行程でほとんど変化しないのも興味がある。また厚さ最小の点も、円筒ポンチでは絞り行程中ほとんど変化しないが、半球ポンチでは若干外縁に移る。また半球ポンチでは、厚さが最小値より外縁に向かい増加する途中で一度極大値および極小値を生じていることは、円筒ポンチには認められないことで注目し値する。

(3) 円周方向のヒズミ ϵ_3

外縁部分は直径の大なるものが絞り込まれていくため、絞り行程の進むにつれて円周方向に圧縮ヒズミを受けることは明りょうである。ポンチ半径に接した部分より内側は引張りを受けるため、ポンチとの接触による摩擦はあるが伸びる。しかして円周方向のヒズミのない点は、この場合の実験では加工前のブランクの直径19mm付近で、加工の途中でこの点がほとんど変化しないのは厚さ方向のヒズミの場合と同様である。

つぎに3方向のヒズミについて、完成コップCと絞り行程の途中AおよびBとを比較すると、ポンチに接した中心部分は変形が大体完了しているのでヒズミも

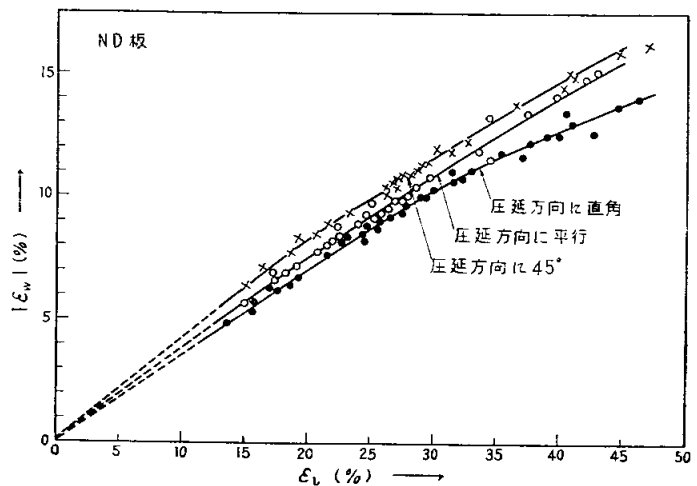
大して増加しない。しかしながら、絞り行程途中のAおよびBでダイスに接していた外縁部分は、ダイス穴に絞り込まれるので、円周方向に圧縮応力を受けて3方向のヒズミはいずれも急激に増加している。しかし、完成コップCのヒズミ分布の傾向は格別変化はない。

なお、第15図完成コップCに点線で示したものは、ND板と同一条件で黄銅を絞ってヒズミ分布を比較のために図示したものである。ヒズミの大きさおよびヒズミ分布の傾向も大差ないが、ポンチに接する中央部のヒズミはND板よりやや大きく、また ϵ_1 の中央部の極大値、 ϵ_2 の最小値および ϵ_3 の極大値を生ずる部分は、いずれもND板より中央にかたよっている特色がある。

2.3 引張試験との比較、とくに異方性について

同じくND板を試験片として、いままでの深絞り加工の結果を引張試験と比較して、とくに素板の異方性ととの関係を考察してみる。

素板は圧延による方向性を有し、これが深絞りコップの耳の発生の原因である。深絞りコップのヒズミ分布の測定を行なったND板は、耳の発生のもっとも少ない熱処理条件（中間焼鈍温度 320°C、仕上げ焼鈍温度 350°C）のものを選んだのであるが、それでも深絞り異方度 $D_d \approx -0.02$ で圧延方向に45°方向の4カ所が山で、平行および直角方向がともに谷で、とくに直角方向がもっとも深い谷になっている。いま、同一ND板より圧延方向に平行、直角および45°方向より引張試験片（板厚1mm、幅8mm、標点距離35mm）をとり、間隔2mmに縦横にケガキしておく。引張破断後、板厚方向のヒズミ ϵ_1 と幅方向のヒズミ ϵ_w を実測し、容積一定の関係で長さ方



第17図 引張試験結果による3方向のヒズミ

向のヒズミ ϵ_L を計算する。引張試験結果による3方向のヒズミをそれぞれ有効ヒズミ ϵ_L , ϵ_W および ϵ_X に計算しかえて、 ϵ_L に対する $|\epsilon_W/\epsilon_L|$ をそれぞれ3方向について図示すると第17図のごとくなる。これより $|\epsilon_W/\epsilon_L|$ は圧延方向に対して最大0.365, 直角方向が最小0.325で, 平行方向はその中間の値0.348である。したがって, 引張異方度 D_L は次式で計算でき, その値は $D_L \approx -0.03$ で深絞り異方度 D_a と同様かなり小さい。

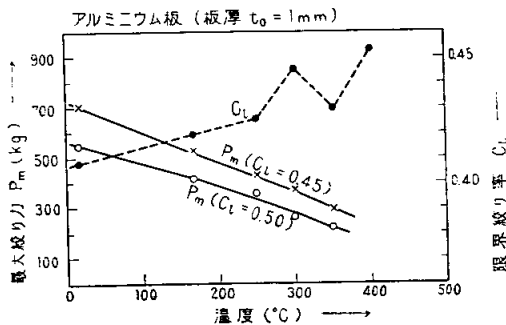
$$D_L = \frac{1}{2} \left\{ \left| \frac{\epsilon_W \parallel}{\epsilon_L \parallel} \right| + \left| \frac{\epsilon_W \perp}{\epsilon_L \perp} \right| - 2 \left| \frac{\epsilon_W \times}{\epsilon_L \times} \right| \right\}$$

ただし, \parallel , \perp , \times の記号は圧延方向に平行, 直角および 45° 方向の値を示す。

いま, これらのND板の引張りに関する異方性は, 圧縮における異方性と少なくとも大小の傾向は類似するとみなしてさしつかえないから, 深絞りにおける素板の外縁における円周方向の圧縮ヒズミを, 引張試験におけるヒズミ ϵ_L に対応させることができる。そうすると, 深絞りの耳の発生に相当する引張試験における値は $|\epsilon_W/\epsilon_L|$ であって, その値は圧延方向と 45° 方向が最大でしたがって深絞りコップでは山を生じ, 直角方向が最小でしたがって深絞りコップではもっとも深い谷を生じ, 平行方向はその中間の値でしたがって深絞りコップには浅い谷を生ずることが予想できる。これらは深絞り実験結果とまったく一致するのであって, 引張試験を綿密に遂行すれば, 深絞りの耳の発生の有様を確実に知ることができ。なお, 引張試験で $|\epsilon_W/\epsilon_L|$ の値が3方向で同じなら深絞りコップに耳は発生しないと考えられるが, 引張試験の結果が $|\epsilon_W/\epsilon_L| = 0.5$ すなわち $\epsilon_W = \epsilon_L$ でなければ, 完全に等方性の板材といえないことはもちろんである。

2.4 熱間加工の可否とその対策

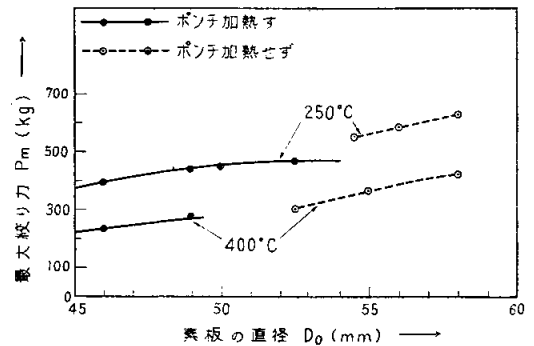
加工限度が破断抵抗と変形抵抗のかねあい決定されるから, その両者が減少する熱間加工における加工限度は両者の減少の仕方が問題となる。この一例としてアル



第18図 深絞り熱間加工の実験結果

ミニウム板について, 深絞り加工を熱間加工で温度を変えて行なった実験を記してみよう。第4号の深絞り工具を使用して, 板厚 $t_0 = 1\text{mm}$ の素板について行なった実験結果は第18図に示すごとくである。最大深絞り力 P_m は温度上昇とともに減少するのは当然であるが, 限界絞り率 C_L は温度もともに増大し, したがって深絞り加工性は悪くなっている。すなわち, 深絞り加工を対象としてアルミニウム板材の熱間加工は, 変形抵抗に対して破断抵抗のより大きな減少のために, かえって加工限度の点では悪い結果になっている。

このようにアルミニウム板の熱間深絞り加工は好ましくない。前述の実験は素板も加工工具もともに熱間の一定温度に保たれたのであるが, この場合の対象としてポンチのみ加熱せず深絞り加工を遂行するのである。これは深絞り加工限を決定するポンチ頭の部分の素板を, 冷ポンチの接触により局部的に冷却してこの部分の素板の破断抵抗を増大して, 深絞り加工限を向上せしめんとするものである。この結果は第19図に示されるとおりで,



第19図 2種類の加工温度における実験結果

冷ポンチを使用すると2種類の加工温度ともに最大絞り力 P_m はもちろん増大するが, 深絞り加工限度は向上し, $C_L = 0.388$ のごとき値が得られている。

これは熱間加工で深絞りの場合の加工限度向上のための一対策である。一般に熱間加工は加熱装置その他面倒な問題が起こり, 経費もかさむし, かつ金属材料の加工製品の表面状態も冷間加工のほうが一般に良好であるから, 特別な場合以外あまり得策とはいえない。

むすび

これらの金属材料を中心とした板材の塑性加工性試験の基礎的知識は, 自転車生産技術にたずさわるひとびとになんらかの役に立つものであることを信ずる。