

アルミニウム-ポリエチレン のサンドイッチ積層板の 実用化力学物性と加工性

[その2]

伊藤 勝彦

前号の目次

I 緒言

II 種類

(1)アルミニウムの材質, (2)板厚および各構成厚, (3)外観

III 特性

III-1 物理的特性

(1)基礎物性, (2)比重, (3)熱膨張率, (4)熱伝導率, (5)熱変形温度, (6)音響透過損失, (7)はくり強度

III-2 機械的性質

(1)引張試験, (2)曲げ試験, (3)せん断試験, (4)打抜きせん断試験, (5)側圧試験, (6)衝撃試験

IV プレス加工性

この章は、塑性加工性を論じる際に代表的な二つの試験法を扱い、それらによってプラスチック-アルミニウム積層品のプレス加工性（塑性加工性）を論ずる。

IV-1 深絞り試験

(円すいダイによる)

表18に円すいダイ工具の寸法を示し、図11に全体図を示す。

この試験ではグレード201, 202を代表として試験した。

試験方法の概要は大体次のごとくである。

試験温度：20~100℃

荷重速度：10~500mm/min

深絞り試験における加工性は、数値的に限界絞り比 LDR すなわち、試験片直径 D_0 をパンチ直径 d_p で割ったもので示される。ここで留意すべき点は、プラスチック-アルミニウム積層品は複合材料であるため、2回破壊が生じるということである。まず最初に、外側の引張表面材のアルミニウムに曲げによる破壊、亀裂(きれつ)が生ずる

筆者は、法政大学工学部教授、工学博士、技術士(化学部門プラスチック)

ものであり、二度目は、積層品全体が完全に破壊するものである。試験片の表面材に亀裂が生じた場合は製品として使用し得ないので、LDR ではアルミニウムに亀裂の生じない最大試験片直径を用いる。

より図解的に破壊を示すために、図12にいろいろ

表18 工具の寸法

(1) パンチ直径 34.925mm のコニカルダイの工具寸法

パンチ直径 D_p	(mm)	34.925
パンチ肩半径 r_p	(mm)	12.5, 17.46
ダイ穴径 D_d	(mm)	41.00
ダイ入口曲率半径 r_d	(mm)	11.0
ブランク板厚 t_0	(mm)	2
ブランク直径 D_0	(mm)	最大 100 最小 50

(2) パンチ直径 26.99mm のコニカルダイの工具寸法

パンチ直径 D_p	(mm)	26.99
パンチ肩半径 r_p	(mm)	13.45
ダイ穴径 D_d	(mm)	32.00
ダイ入口曲率半径 r_d	(mm)	8.0
ブランク板厚 t_0	(mm)	$1.6^{+0.4}_{-0.2}$
ブランク直径 D_0	(mm)	最大 70 最小 48

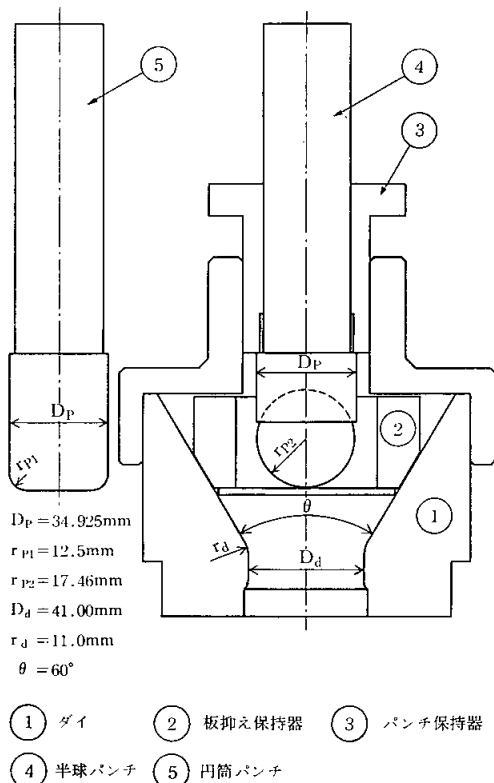


図11 深絞り工具 $D_p=34.925\text{mm}$

るな場合の絞り荷重-パンチ行程曲線を示す。

典型的な常温における深絞り試験の条件および試験結果は次のごとくである。

試験温度：20℃

荷重速度：100mm/min

パンチ直径：34.925mm

パンチ肩半径：17.46mm

試験片直径：①=59.37mm

②=69.85mm

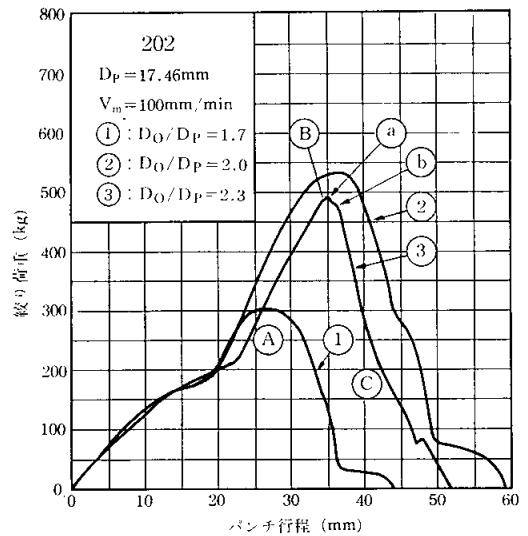


図12 絞り荷重-パンチ行程曲線

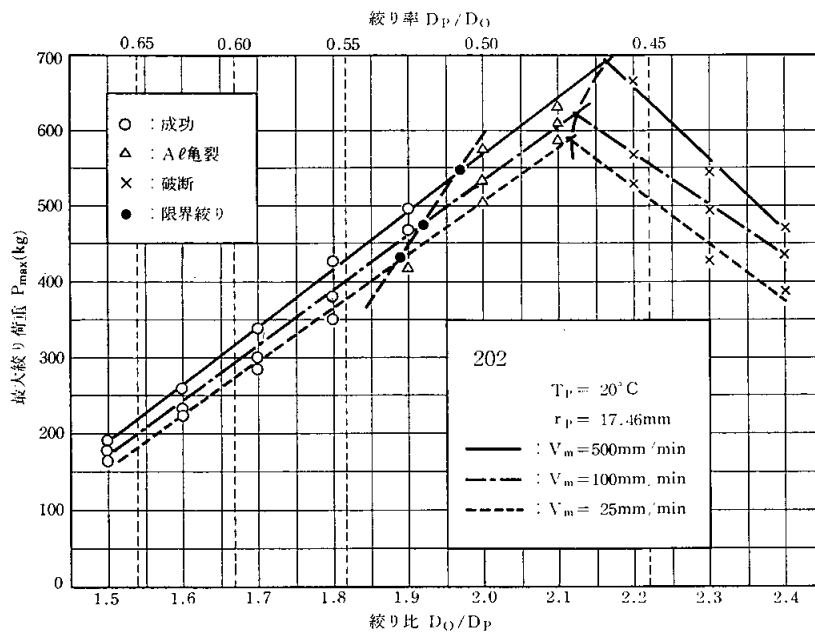


図13 202における絞り比が最大絞り荷重、破断荷重に及ぼす影響

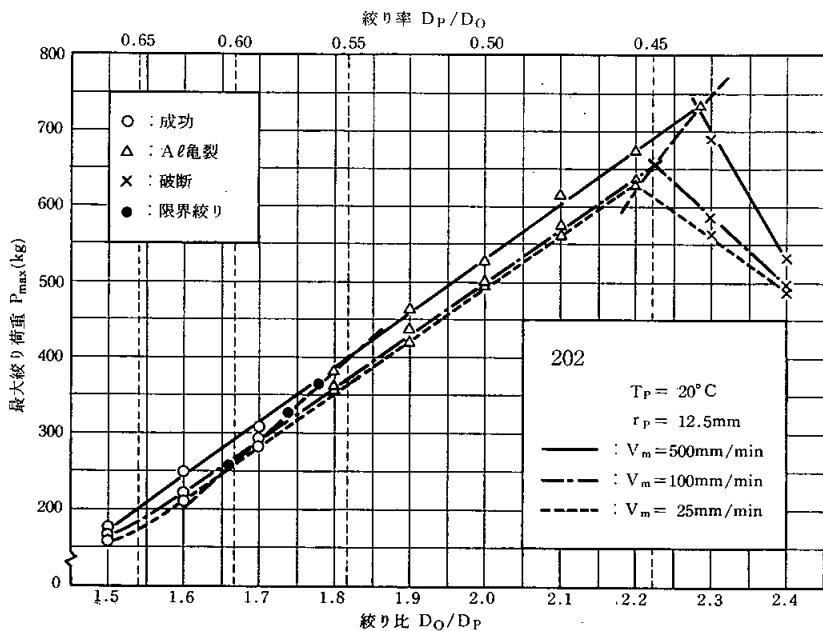


図14 202における絞り比が最大絞り荷重、破断荷重に及ぼす影響

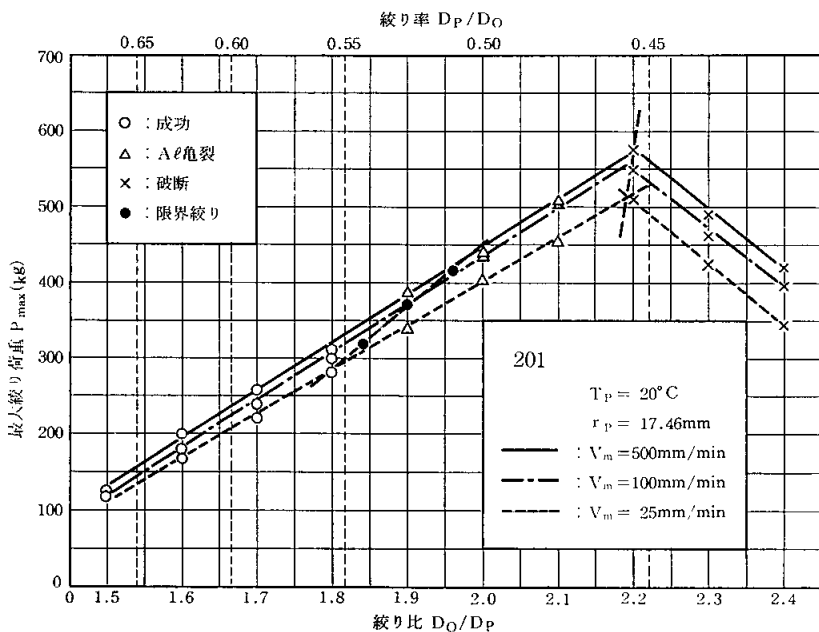


図15 201における絞り比が最大絞り荷重、破断荷重に及ぼす影響

③=80.33mm

以上のように3種類の直径の試験片で試験を行い、①は深絞りに成功し、②はカップ外側のアルミニウムに亀裂が生じたものであり、③は全体が破壊したものである。

図12における曲線①、②からは深絞りに成功し

たか否かはわからない。曲線③では最大絞り荷重⑧点でカップ外側のアルミニウムに亀裂が生じ、⑩点に移行していく過程でその亀裂は増大し、外側のアルミニウムにも亀裂が生じる。次いで、ポリエチレンが大きくくびれて、⑬点で積層品全体が破壊するのである。

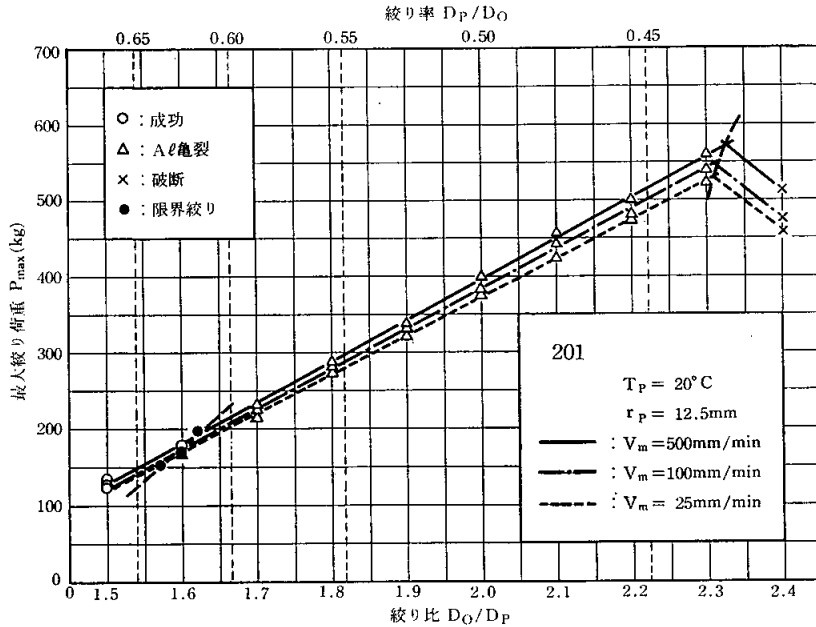


図16 201における絞り比が最大絞り荷重、破断荷重に及ぼす影響

図13～16に、冷間における最大絞り荷重 - 絞り比関係図を示す。また、絞りの成功および不成功カップの代表的な実例は写真3, 4に示されている。

(1) サンドイッチ積層板深絞りカップのひずみ分布

なお、サンドイッチ板の深絞り加工試験片のひずみ分布の測定結果を参考に示す。素板の表裏面の直交する大円に1mm間隔のできるだけ浅くマークをけがく。円板の中心に対称なマークの距離を深絞り加工の前後にそれぞれ正確にコンパレータで測定する。素板の各場所における円周方向のひずみ ϵ_c を次式でまず求める。

$$\epsilon_c = \frac{\bar{d} - \bar{d}_0}{\bar{d}_0} \times 100 (\%)$$

ここで、

\bar{d}_0 : 深絞り加工前の素板アルミニウム表裏板の中心に対称な対応する直径の平均値

\bar{d} : 深絞り加工後の素板アルミニウム表裏板の中心に対称な対応する直径の平均値

次に、厚さ方向のひずみを求めるために、深絞

り加工カップをその大円に沿って正確に切断する。この場合、絞りカップの内面には石こうを流し込み、固化せしめて剛性率を高めた後、一緒に工作機械で大円に沿って切断する。切断されたカップはその大円切断面を研磨パフで仕上げ、断面の各場所における板厚の変動を測定し、次式によって板厚方向のひずみ ϵ_t を求める。

$$\epsilon_t = \frac{t - t_0}{t_0} \times 100 (\%)$$

ただし、

t_0 : 素板の最初の全体の板厚

t : 深絞りカップの各位置における全体の板厚

このようにして得られた ϵ_c と ϵ_t の実験値を用い、半径方向のひずみ ϵ_r は次式の材料の非圧縮性を仮定して求める。

$$\epsilon_r = (1 + \epsilon_c)^{-1} (1 + \epsilon_t)^{-1} - 1$$

しかし、アルミニウムは圧延による異方性を有するゆえ、圧延方向に平行(0度)方向、直角(90度)方向および45°方向の3方向それぞれについて、上記3方向のひずみ ϵ_c , ϵ_r および ϵ_t を測定する。

$$D_0 = 62.85 \text{ mm}, D_0/d_p = 1.8$$

$$V_p = 250 \text{ mm/min}, P_{\max} = 390 \text{ kg}$$

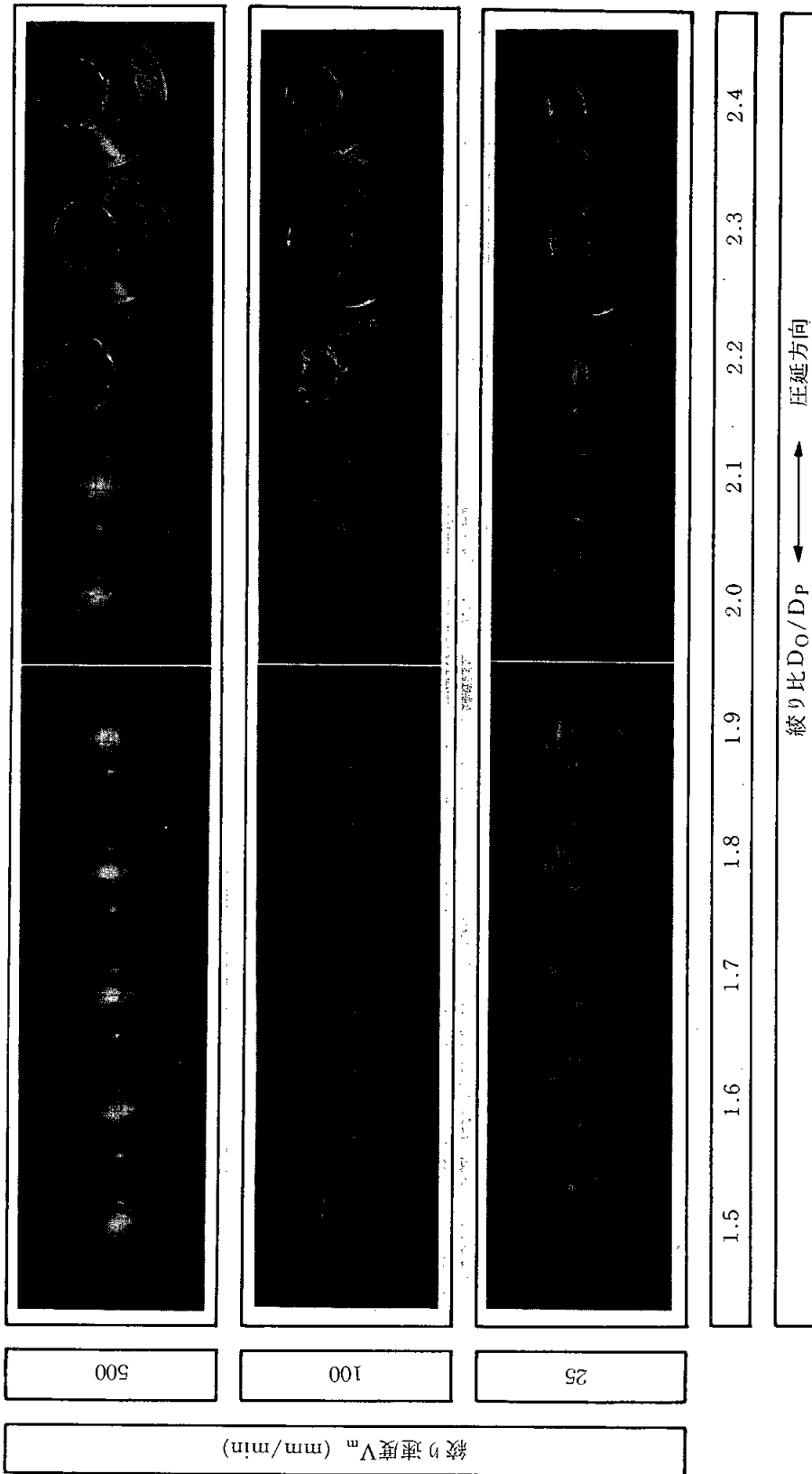


写真3 冷間におけるプラニウム201の絞り比と加工速度による深絞り加工性の变化を示す深絞りカッパン ($r_p=17.46\text{mm}$ の場合)

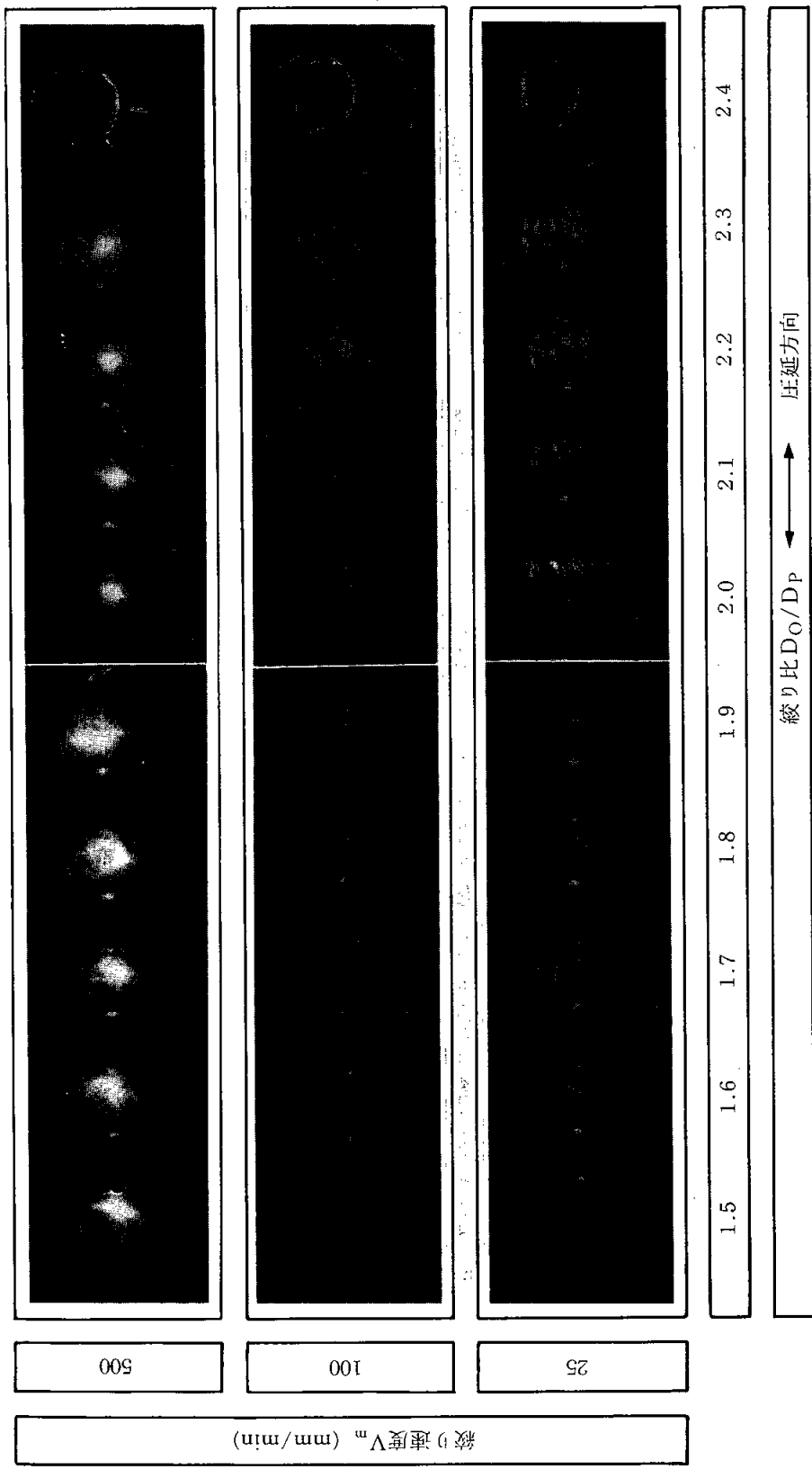


写真4 冷間におけるブラニウム 201 の絞り比と加工速度による深絞り加工性の变化を示す深絞りカップ ($r_p=12.5\text{mm}$ の場合)

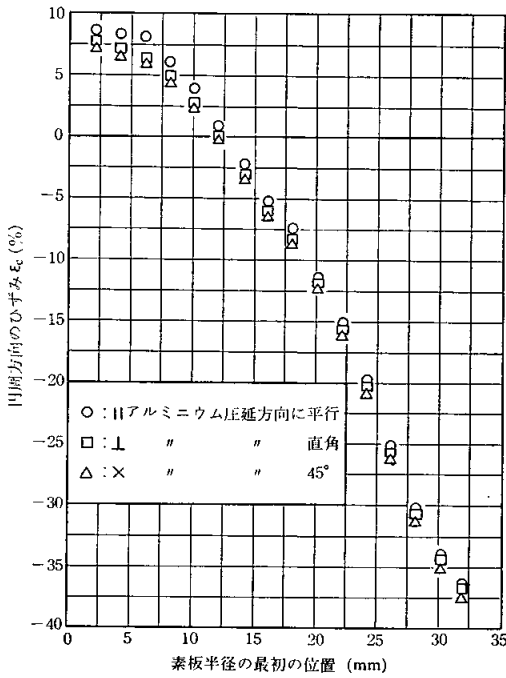


図17

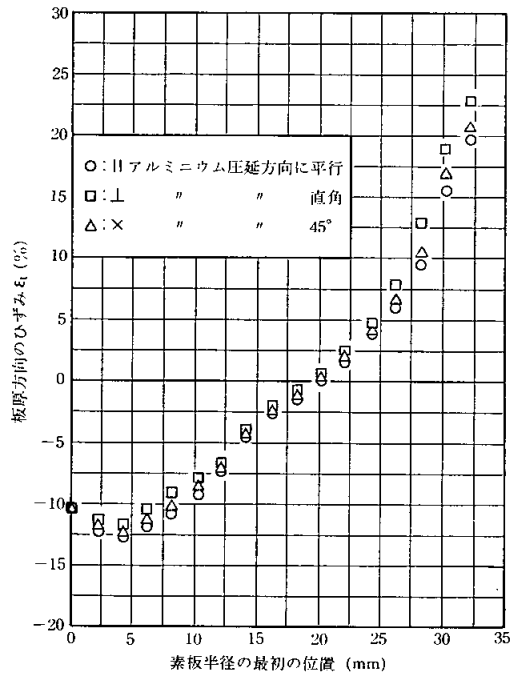


図19

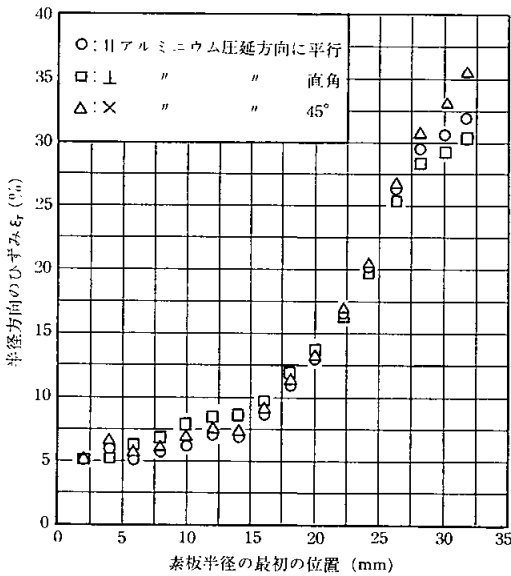


図18

の場合の完成絞りカップの場合を例として ϵ_c , ϵ_r および ϵ_t を示すと、それぞれ図17~19のごとくなる。

ϵ_r も ϵ_t もともにカップ底から周辺に向かって増加する。一方、これに対して ϵ_c は周辺に向かって激減することは予想されたところである。アルミニウム板材の圧延の3方向異方性の深絞りカ

ップのひずみ分布に及ぼす影響はあまり顕著ではない。

板厚方向の全体のひずみ ϵ_t に加えて、サンドイッチ積層板としてポリエチレン、内面アルミニウムおよび外面アルミニウム各層の深絞りカップにおける板厚方向のひずみは、次のごとく定義される。

- 1) ポリエチレン心層の厚さ方向のひずみ

$$PE\epsilon_t = \frac{PEt - PEt_0}{PEt_0} \times 100 (\%)$$

ただし、

PEt : 深絞りカップの各位置におけるポリエチレン心層の厚さ (mm)

PEt_0 : 素板におけるポリエチレン心層の最初の厚さ (mm)

- 2) 内面アルミニウム層の厚さ方向のひずみ

$$IAl\epsilon_t = \frac{IAlt - IAlt_0}{IAlt_0} \times 100 (\%)$$

ただし、

$IAlt$: 深絞りカップの各位置における内面アルミニウム層の厚さ (mm)

$IAlt_0$: 素板における内面アルミニウム層の厚さ (mm)

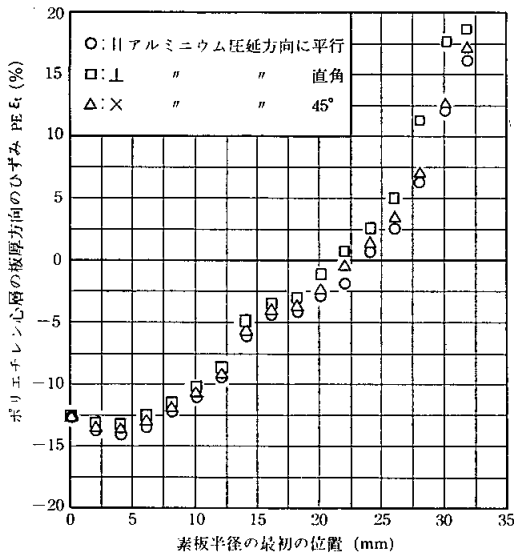


図20

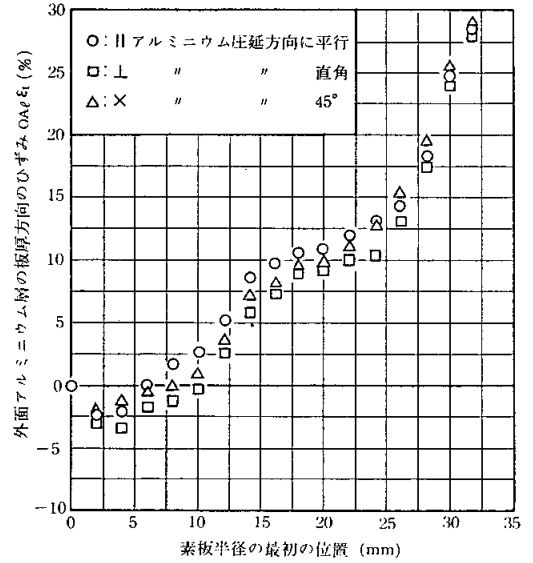


図22

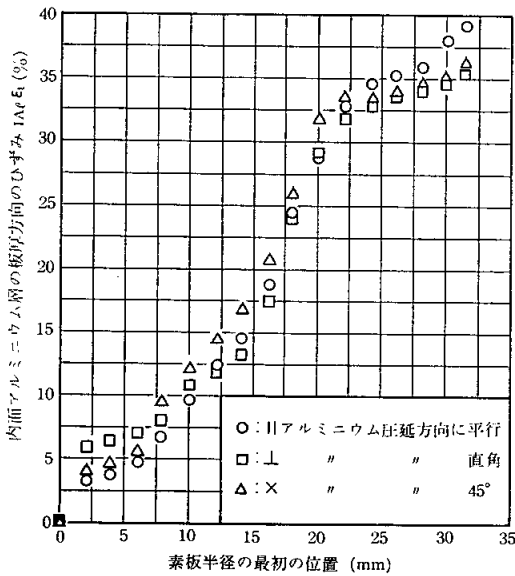


図21

3) 外面アルミニウム層の厚さ方向のひずみ

$$o_{A1}\varepsilon_t = \frac{o_{A1t} - o_{A1t_0}}{o_{A1t_0}} \times 100 (\%)$$

ただし,

o_{A1t} : 深絞りカップの各位置における外面アルミニウム層の厚さ (mm)

o_{A1t_0} : 素板における外面アルミニウム層の厚さ (mm)

かくて, サンドイッチ積層板の同一条件にお

る深絞りカップの板厚方向の各層のひずみ分布は, 図20~22にそれぞれ詳細に図示されている。なお, さらにわかりやすいようにサンドイッチ板の深絞りカップの切断面の写真撮影したものを示す。すなわち, 写真5はアルミニウム圧延に平行方向, 直角方向および45°方向に切断した深絞りカップの断面である。また, 写真6はその中の代表的なもののカップ切断面の拡大写真であり, サンドイッチ構造の板厚変動の有様がよくわかる。

(2) 絞り速度の影響

絞り荷重速度が最大絞り荷重, 限界絞り比に与える影響を図23, 24に示す。

なお, 図23におけるパンチ直径は34.925mm, 試験片直径は59.45mm, 絞り比は1.7であり, 図24におけるパンチ直径は34.925mmである。

これらの線図から, 荷重速度の増大に伴って最大絞り荷重も限界絞り比もともに増大していることがわかる。これは, 荷重速度の増加によって変形抵抗も増大するが, 同時に破壊抵抗も増大し, 特に後者の増大率の方がこの範囲の絞り速度ではより大きいために, 限界絞り比の増加という結果になったものである。

(3) パンチ肩半径の影響

(円筒パンチと球パンチの相違)

また, 試験片の変形挙動はパンチ肩半径部にお

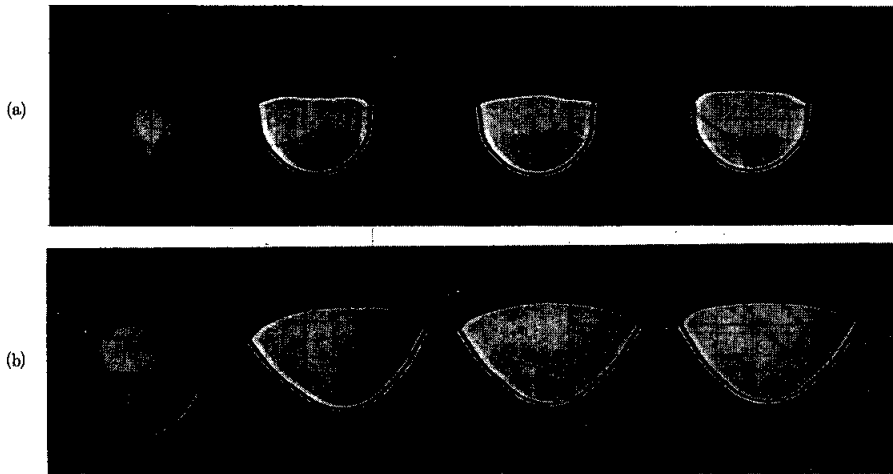


写真5 深絞りカップの切断面

プラニウム202, $r_p=17.46\text{mm}$, $V_m=250\text{mm/min}$, $T_p=20^\circ\text{C}$

左より, 深絞りカップ, 切断カップ: 圧延0度方向, 45度方向, 90度方向

(a) $D_0=62.85\text{mm}$, $D_0/D_p=1.8$, $P_{\max}=390\text{kg}$ (深絞り完成カップ)

(b) $D_0=76.82\text{mm}$, $D_0/D_p=2.2$, $P=500\text{kg}$ (最大荷重に達したあと荷重を除去したカップ)

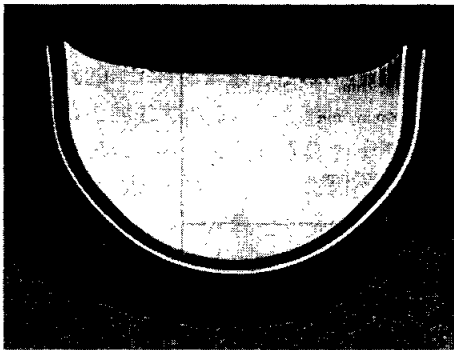


写真6 カップの切断面拡大写真

$D_0=62.85\text{mm}$, $D_0/D_p=1.8$, プラニウム202,
 $r_p=17.46\text{mm}$, $V_m=250\text{mm/min}$, $T_p=20^\circ\text{C}$,
 $P_{\max}=390\text{kg}$, 圧延0度方向

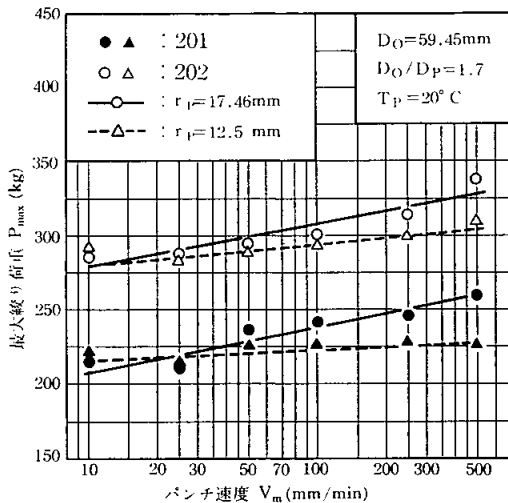


図23 加工速度の最大絞り荷重に及ぼす影響

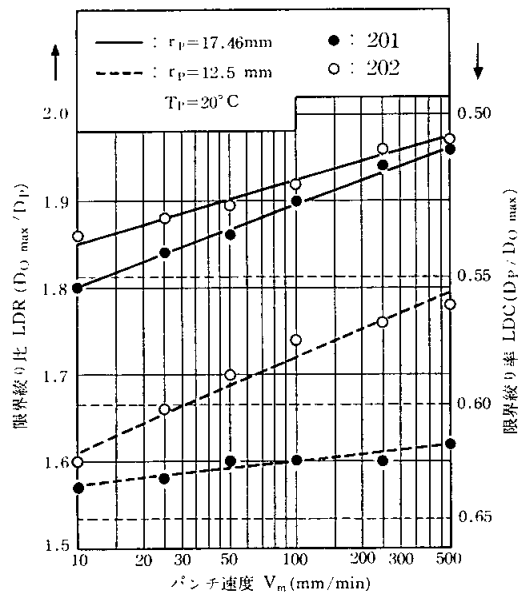


図24 加工速度が限界絞り比, 限界絞り率に及ぼす影響

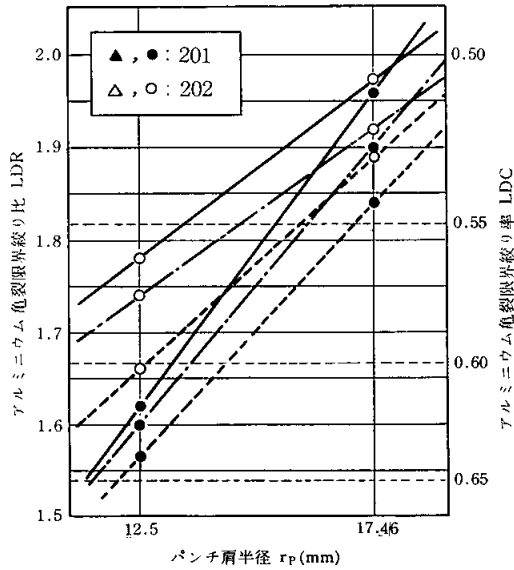


図25 パンチ肩半径が LDR, LDC および (LDR)_b, (LDC)_b に及ぼす影響

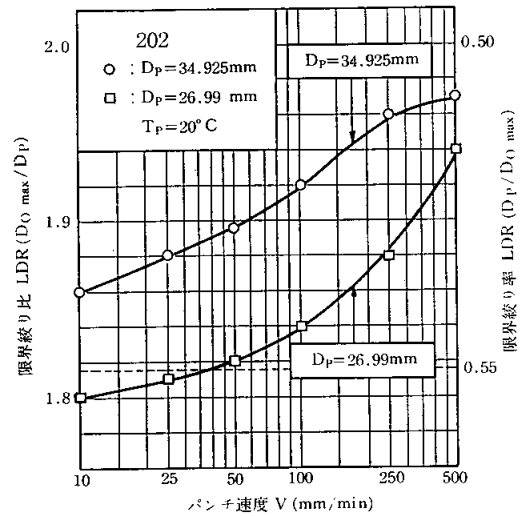


図27 ダイの違いが限界絞り比, 限界絞り率に及ぼす影響

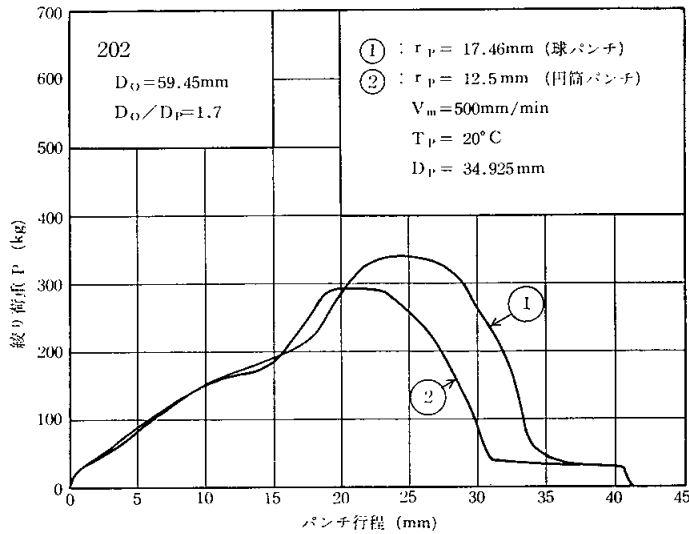


図26 球パンチと円筒パンチの絞り荷重-パンチ行程曲線の比較

ける曲げ応力に依存するので、肩半径 r_p の限界絞り比 LDR (Limiting Drawing Ratio) に与える影響を図25に示す。

ここで、限界絞り率 LDC (Limiting Drawing Coefficient) は、限界絞り比 LDR の逆数である。次いで、パンチ形状の違い、ダイの違いによる影響を図26, 27に示す。

なお、図26における試験方法は次のごとくである。

グレード：202

試験片直径：59.45mm

絞り比：1.7

荷重速度：500mm/min

パンチ肩半径：①=17.46mm

②=12.5mm

また、図27における試験方法は次のごとくである。

パンチ直径：○=34.925mm

□=26.99mm

グレード：202

球パンチ使用

以上の事柄から、荷重速度を増加することによって限界絞り比は増大するが、最大絞り荷重も増大し、パンチ肩半径を増すことによって限界絞り比は増すが、円筒パンチの方が球パンチよりも絞り荷重が少なくなる。

(4) 絞り加工温度の影響

変形抵抗を減少させる手段として、温間で加工することにより、試験片を軟化させて変形抵抗を減少させる方法がある。次に、試験温度が荷重、限界絞り比に与える影響を図28, 29に示す。

なお、図28における試験方法は次のごとくである。

- パンチ直径 : 34.925mm
- パンチ肩半径 : 17.46mm
- 荷重速度 : 250mm/min
- 絞り比 : 1.7

試験片直径 : 59.37mm

また、図29における試験方法は、絞り比以外は図28の場合と同じである。

温度の上昇によって最大絞り荷重は減少するが、同時にLDRも減少する。これは、心材となっているポリエチレンが軟化しすぎ、心材としての役割を失うからで、その温度の限界は201は50℃付近であり、202では60℃付近である。

この節の結論として、温度20℃、荷重速度500mm/min、球パンチ使用が最適絞り条件であり、限界絞り比はそれぞれ201で1.96、202で1.97である。

IV-2 折曲げ加工性試験

この試験の目的は、最小折曲げ半径を求めることであり、180°曲げをJIS Z 2248 (図30参照)に従って行った。

その試験結果を表19に示す。

最小折曲げ半径は、薄板加工に大切な実験データの一つである。学問的には前述の3点荷重でなく、4点荷重にして純粋曲げを板材に加えた場合には、最小折曲げ半径を問題にすればよい。しかしながら、実際の折曲げ加工では板材に多少引張りが加わる上に、曲げローラ面での摩擦に影響されるため、最小折曲げ半径と同時に、折曲げ破壊角度も大切なデータであることはもちろんである。

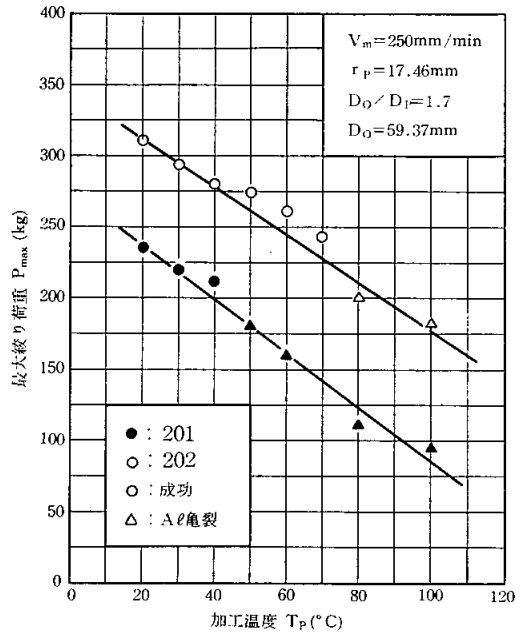


図28 絞り比1.7における加工温度が最大絞り荷重に及ぼす影響

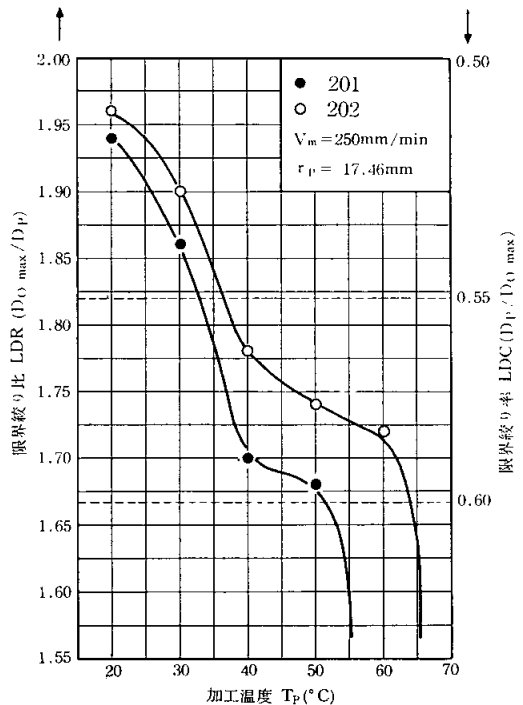


図29 加工温度が限界絞り比に及ぼす影響

る。

前述の3点荷重による曲げでは、アルミニウム-ポリエチレンのサンドイッチ積層板のような

ん性材料に対しては、実際に破壊を伴うような大きな曲げひずみは与えにくい。それゆえ、いろいろな半径のガイドローラを準備した写真7のようなロール折曲げ試験装置を利用する方法が好ましい。図31はその詳細な図面であり、写真8はその実験の有様を示すものである。

ガイドローラに沿って板材をロール曲げし、板材の引張り側に亀裂が生じた時の折曲げ破壊角度と、その時に使用したローラの半径、すなわち、折曲げ半径、すなわち、折曲げ半径の両者がこの場合の有用なデータとなるものである。



写真7 ロール折曲げ試験装置

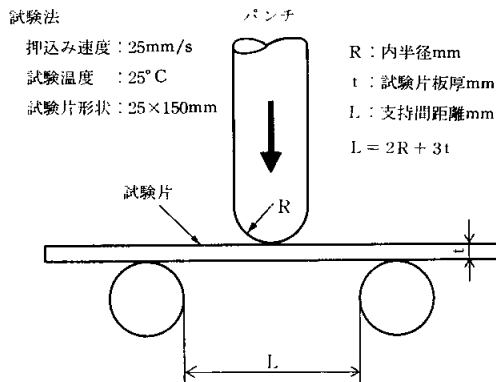


図30 JIS Z 2248の試験法

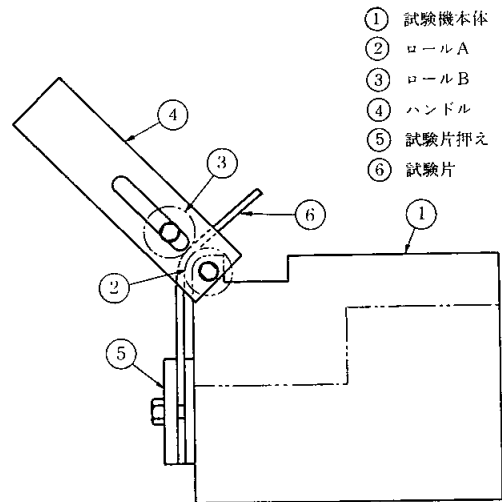


図31 ロール折曲げ試験装置の構造図

表19 曲げ加工性試験結果 (JIS Z 2248, 板幅25mm)

グレード	最少曲げ半径			
	直 角 (注1)		平 行 (注1)	
	Rmm	R/t (注2)	Rmm	R/t (注2)
P 202	5	2.5	7	3.5
P 302	7	2.3	9	3.0
P 402	8	2.0	11	2.8
P 403	10	2.5	12	3.0
P 405	10	2.5	12	3.0
P 603	13	2.2	16	2.7
P 605	15	2.5	17	2.8
P 710	18	2.6	20	2.9
A 202	16	8.0	28	14.0
A 302	21	7.0	39	13.0
A 402	24	6.0	46	11.5
A 403	24	6.0	44	11.0
A 405	23	5.8	42	10.5
A 603	37	6.2	—	—
A 605	35	5.8	—	—
A 710	—	—	—	—

(注1) アルミニウムの圧延方向に対しての曲げ方向

(注2) tは板厚であり、板厚の何倍のRで曲がるかを示す。

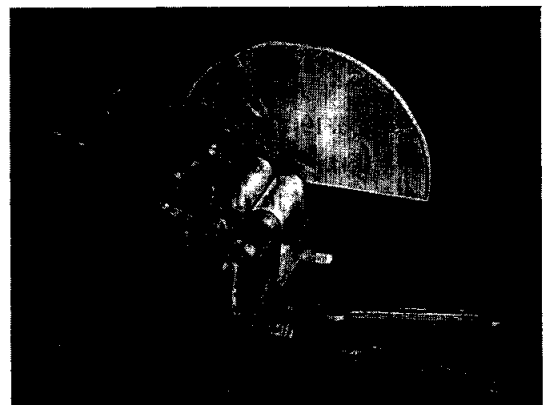


写真8 折曲げ試験中のロール折曲げ試験装置

IV-3 熱間エリクセン試験

エリクセン試験は、1枚の板材からそれぞれデータが得られるゆえ、多数の板材の絞り試験から、内挿（そう）法によって限界絞り比または限界絞り率を実験的に求める深絞り試験に比べると、きわめて簡易な板材のプレス加工試験である。それゆえ、常温より熱間に至る温間温度範囲で実験できるように改良し、板材のプレス加工性の温度依存性を簡易かつ迅速に測定評価できるようにした。写真9はその装置を示すものであり、図32はその全体図を示し、写真10は板材試験片が挿入恒温加熱される加熱槽（そう）の部分を示す

ものである。試験片の破壊は装置上部のガラス窓を通して観察できるようにしてある。

代表的なエリクセン破壊試験片は写真11に示してある。エリクセン値の温度依存性に関する実験結果の代表的なものは図33に示されている。温度60℃以上になると温度上昇とともにエリクセン値が減少するのは、サンドイッチ層の心材ポリエチレンの軟化のため、サンドイッチ構造としての働きを次第に失っていくためと考えられる。熱間エ



写真9 熱間エリクセン試験装置

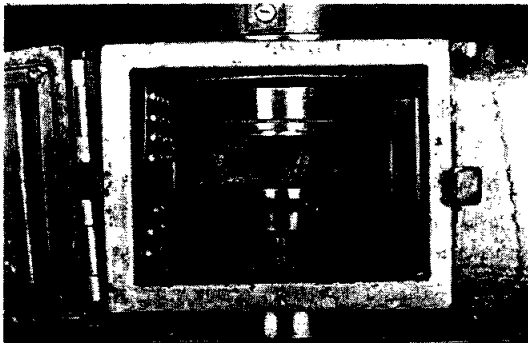
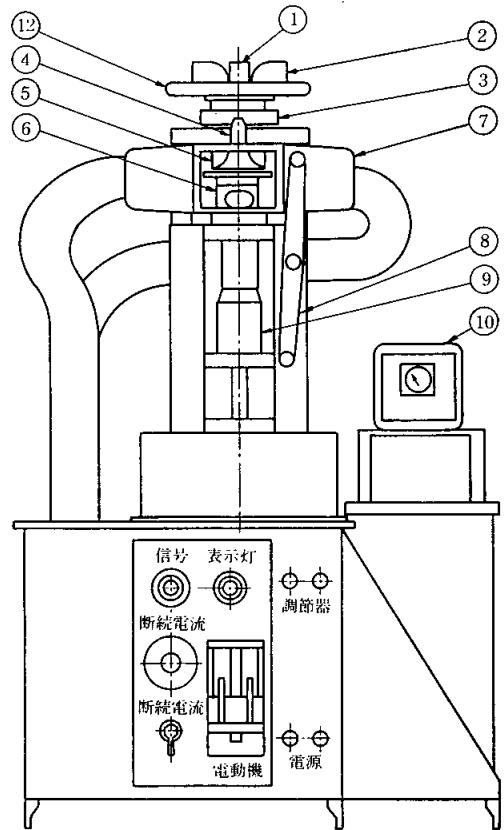


写真10 熱間エリクセン試験装置の恒温槽



品番	部品名	品番	部品名
1	ダイセータおよび照明電球コンセント	7	炉体
2	照明電球	8	パンチリードハンドル
3	ロックナット (5/100もどし装置)	9	マイクロメータ装置
4	もどし指針 (5/100もどし装置)	10	スライダック
5	ダイヤ	11	トランス
6	しお押え	12	上部ハンドル

図32 熱間エリクセン試験装置の構造図

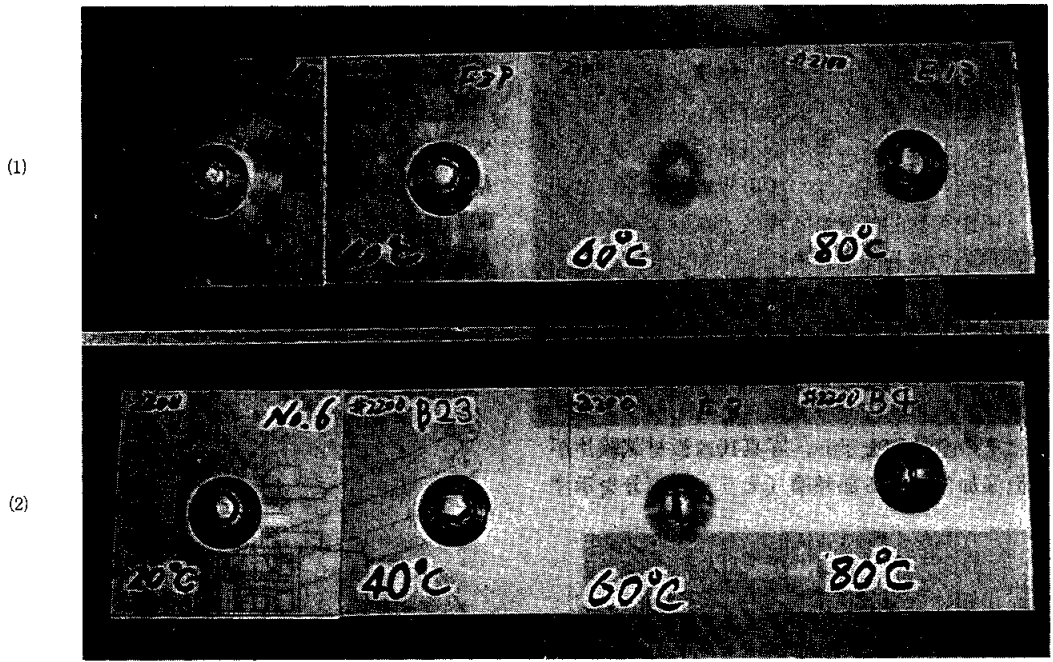


写真11 熱間におけるエリクセン試験で表面材のアルミニウムに亀裂の入った試験片
 左より、試験温度20℃、40℃、60℃、80℃
 (1) プラニウム201 (2) プラニウム202

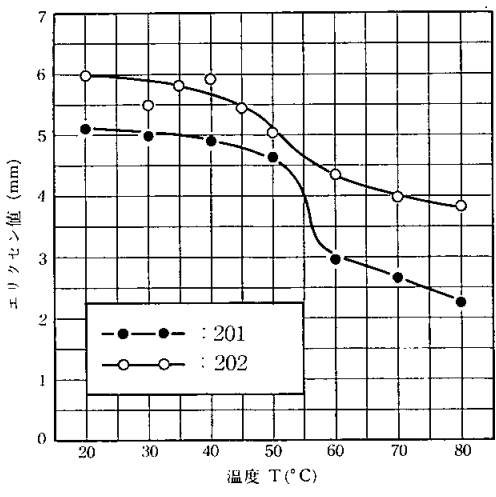


図33 試験温度がエリクセン値に及ぼす影響

リクセン試験は、板材のプレス加工性の温度依存性を簡単に測定する方法として有用なもので、いろいろの用途が開発されている。

V 切削加工性

V-1 切断

(1) 直線切り

1) スケャーシャ-

表20

板厚	クリアランス	レキ角
2 mm	0.04 mm	1°
4 mm	0.04 mm	1°30'
6 mm	0.2 mm	2°30'

試験機 株式会社ツール 油圧式シャ-リングマシン H-3065

切断面はアルミニウムに多少のだれが生じる。適正クリアランスを表20に示す。

2) ランニングボツ-

切断面にだれは無くなるが、ばりが生じる。

3) その他

電動丸のこ、帯のこ、金切のこ、木工のこでも切断は可能である。

(2) 曲線切り

円盤の切出しなど曲線切りは、パイロシャ-によって切断でき、治具を用具とすれば、ひも出し加工、段曲げ加工なども行うことが可能である。

V-2 切削

プラスチック-アルミニウム積層品の端面に切

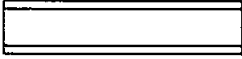
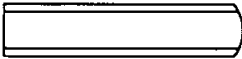
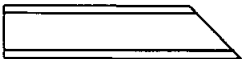
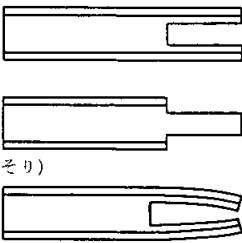
No.	端部形状	備考
1		一般的な仕上断面
2		家具、ディスプレイなど人手が触れるところでは、アルミニウムのエッジで手を切ることが防げる。
3		
4	 注(そり)	アルポリックの接合に応用できる。加工可能な板厚は4 mm 以上であり、切込み深さが大きいと、ポリエチレンの収縮により、そりが発生する。そりが発生しない切込み深さは、みぞ幅により変わるが8 mm 以下程度である。

図34

削加工が必要な場合は、木工用かな盤、ほぞ取り機、金属用フライス盤、シェーブ、プレイナなどによって切削が可能であり、図34に示すような端部加工が可能である。

V-3 穴あけ

1) プレス打抜き

打抜き断面には多少のだれが生じる。パンチとダイのクリアランスは板厚×5%が適当である。プレス力は前号のⅢ-2(4)打抜きせん断試験の項を参照されたい。

2) ドリル穴あけ

ボール盤、ハンドドリルなどで穴あけ可能であり、断面も良好である。

その他実用的切削加工性は、金属そのものの場合に比べてほとんど差異はない。ただ、心材が熱不良導体であるポリエチレンであるだけに、切削工具の寿命は一考を要することは否めない。すなわち、プラスチックの切削加工性の向上は、低温切削などに活路を見いだす以外に方法はなかなかないと思われる。その点、塩化ビニール樹脂の低温ぜい性に比べれば、ポリエチレンのそれは優れている点、このサンドイッチ積層板の低温切削は利点があるかとも思われる。

VI 結 言

かくて、アルミニウム-ポリエチレンのサンドイッチ積層板は、緒言にも述べたように、強じんな金属板表皮と、軽いポリエチレン心材によるサンドイッチ構造からわかるように、軽量構造材料としてきわめて優れた力学的特性を有し、かつまた、塑性加工性や切削加工性のような実用物性も優れている。その点、従来のハニカム構造は軽くて弾性的強度はそんな色はないものの、塑性加工性はもちろん切削加工性も大きな難点があるのと対比して考えれば、よくその相違が理解できるものと思われる。

また、素人はアルミニウム板と不活性なポリエチレン接着性に不安と疑問を持つ向きも少なくはないかと思われるが、その点はメーカーの一方ならぬ研究努力の結果、本論に詳述されているように、層間はく離の問題などなんの不安もなく実用化されている。ますます広い用途が開発されつつあることを報告して本稿の終わりとする。

<おわり>