

A1合金製中空構造部材の加工技術開発

大澤泰明*

1. 緒言

アルミニウムは今、その強度、軽さ、環境性能が重視され、多彩な産業シーンで活躍の場を広げようとしている。特に自動車、新幹線、地下鉄、ボートなどの輸送分野では、構造体を構成する部材の不可欠な材料として、様々な部品・部分に導入されている。今後もそのような使用が増え続けることに疑問の余地はなく、材料科学、応用両分野からの継続的な研究が続けられるだろう。

一方、アルミニウム合金などの金属板材の超塑性研究は、1934年英国マンチェスター工科大学のピアソン教授の発表した、いくつかの共晶合金において認められた異常延性の報告¹⁾以来、材料科学サイドからの変形機構の解明や応用加工技術の開発が、半世紀以上にわたって行われてきた。1970年代の米国において開発された、戦闘機のチタン合金製機体構造を製造する、超塑性応用の先駆的加工技術SPF/DBは、超塑性加工技術の中では最も成功した方法である。しかしながら、「20-30年後には金属塑性加工のうち超塑性の利用技術が20%に達するであろう。」との5年前の未来予測²⁾は、残念ながら全くの的外れであったと結論せざるを得ない。なぜならば、SPF/DB以外には超塑性の加工上の特性を巧みに利用した加工技術は、実用上開発されていないと思われるからである。超塑性利用の成形加工技術が、20%に達していることはない。

さらに、鉄鋼をより軽量の素材で代替しようとする緩やかではあるが確実な流れがある。新幹線の車両構造または自動車の車体をアルミニウム合金で製造することは、既に行われているしこれからはこの動向がますます加速することは間違いあるまい。しかし、アルミニウム合金にはさらなる利用拡大を阻む問題がいくつかあり、中でもプレス加工時の成形加工性能の悪さをいかに克服するかは、古くて新しい課題として現在も残されている。

超塑性の発現が期待できるアルミニウム合金をいくつか挙げるができる。異常な延性に付随する非常に低い変形抵抗を巧みに使用するブロー成形は、超塑性アルミニウム合金の板材にも応用できる。ヨーロッパでは、室温における成形加工ではなく、高温における超塑性ブロー成形が普及していて、種々の板材成形品がヨーロッパ市場に出回っている。生産量やコストとの兼ね合いで室温のプレス加工か高温での超塑性加工のどちらかが選択される。もちろん、高温での超塑性ブロー成形は、生産設備費や労働環境の面で万全ではないが、製品の生産量、生産速度によっては、利益率の高くなることもあるし、アルミニウムの室温での成形性の劣悪さは超塑性加工では、完全にクリアされる。

これまでに述べてきた事柄を踏まえて、本研究では主

として超塑性アルミニウム合金板材のブロー成形加工を取り上げる。プラスチックを扱うブロー成形と原理的には全く同一であるが、金属板材の超塑性ブロー成形は、工具内に板材をセットし超塑性温度まで昇温、その後不活性気体や空気をブローすることにより、素材を型形状まで充填し張り出し加工する。ここでは超塑性の発現は低いひずみ速度に限定されているので、生産速度の低さ、及び成形中の圧力制御・管制を適切に実行しなければならないことなどが問題視されている。さらに、成形後に達成されるひずみ量は一般にかなり大きいので、成形品の中で板厚の差が著しく大きくなるのがしばしば起こる。そのため、できるだけ成形品中の板厚変動を少なくする目的で様々な工夫が試みられている³⁾。成形中のガス圧制御も板厚の均一化を目的として実施される。

本報告では、これまでにアルミニウム合金の板材を対象にして行ってきたガスブロー成形の研究のうち、ガス発生剤から発生する気体を昇温する過程で生ずる熱膨張仕事によって張り出し加工する方法を紹介し、この薬剤を応用する他の方法として、トラスまたはハニカム構造と称される軽量化高剛性構造部材を製造するプロセスを実験的に考察する。超塑性を発現するアルミニウム合金板材の加工法に対する展望を広げ、この合金の更なる用途拡大を計ることを目的にしている。

2. ガス発生剤によるブロー成形

自動車のエアバッグや、発泡金属・プラスチックの製造に使用されるガス発生剤は、特定の温度にて熱分解し主として不活性なガスを発生させるものである。この化学薬剤を圧力源とするガスブロー成形を思いついた。図1には、この方法と通常の超塑性ガスブロー成形のイラストを比較のため示した。ガス発生剤が熱分解しガスを放出する温度は、一般に超塑性合金素材の超塑性温度と一致しない。超塑性温度に対してガス発生温度は低く、したがって、成形は超塑性状態以前に開始し、昇温過程の気体の膨張と素材の変形抵抗、応力状態等が複雑に関係しあって成形が進行していく。熱分解温度が素材の超塑性温度と一致するならば、超塑性温度に達した段階で急速に成形が進む。この時、低ひずみ速度が保たれないならば超塑性成形とは言いがたく、大きな変形なしに破断が起こるかもしれない。素材の高速超塑性が期待できる場合には、破断せずにかつ短時間のうちに大変形を生ずる。型内に離型剤を施した素材をセットし、この素材には高速超塑性が期待できるものとすれば、超塑性温度に達した時点で、ごく短時間のうちにブロー成形が可能となる。これは高速超塑性の実際的应用例となる。

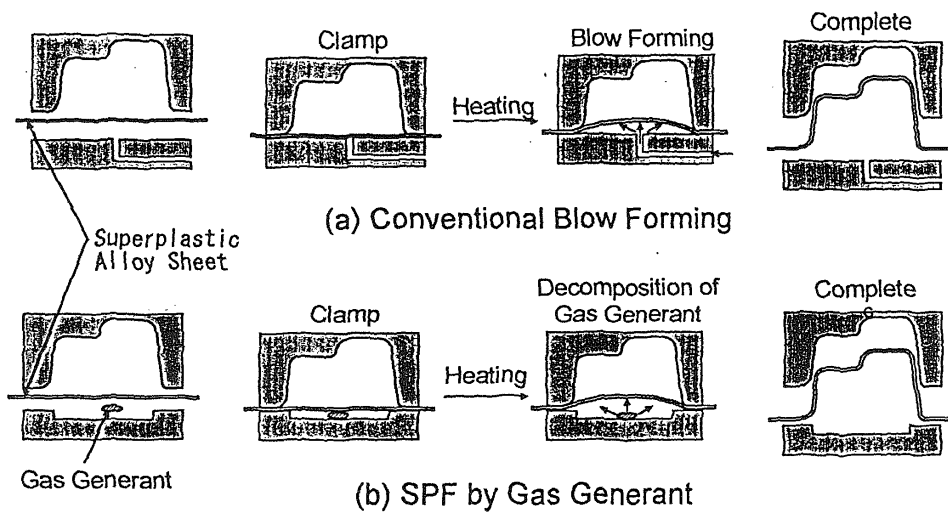


図1. 一般的な超塑性ガスブロー成形とガス発生剤によるブロー成形の対比.

表1. 使用検討中のガス発生剤

| 薬剤名 | 英名 | 化学式又は構造式 | 形態 | 分解温度 (°C) | ガス発生量 (ml/g) |
|------------------------|-----------------------------------|--|----|--------------|-----------------|
| アゾジカーボネアミド (ADCA) | Azodicarbonamide | $C_2H_4O_2N_4$ | 粉末 | 195~202 | 220~245 |
| ヒドラゾジカーボネアミド (HDCA) | Hydrazodi carbonamide | $H_2NCONHNHCONH_2$ | 粉末 | 235~240 | 130~160 |
| 5-フェニルテトラゾール (5-PT) | 5-Phenyl-tetrazol | $C_7H_6N_4$ | 粉末 | 235~240 | 200 |
| 塩基性炭酸亜鉛 | Basiczinccarbonate | $2ZnCO_3$ $-3Zn(OH)_2 \cdot H_2O$ | 粉末 | 230~260 | 125 |
| p-トルエンスルホニルセミカルバジド | p-Toluensulfonyl semicarbazide | $H_3C \cdot C_6H_4$ $-SO_2NHNH_2CONH_2$ | 粉末 | 225~235 | 135~140 |
| 無水クエン酸モノナトリウム | Sodium dihydrogen citrate | $C_6H_7O_7Na$ | 粉末 | 200~250 | 90~100 |
| アゾジカルボキシ酸 ジエチル | Diethyl azodicarboxylate | CH_3CH_2OCON $=NCOOCH_2CH_3$ | 液体 | 265 | 約134 |
| アゾジカルボキシ酸 ジイソプロピル | Diisopropyl azodicarboxylate | $(CH_3)_2CHOCON$ $=NCOOCH_2CH_3$ | 液体 | 250 | 約166 |

現在までにすでに、表1に示すようなガス発生剤を入手している。形態としては、主体は粉末でなかには液体もある。いずれも200°Cから250°C程度のガス発生温度を示し、超塑性アルミニウムに対して使用するには概してやや低そうである。300°C以上のガス発生温度を示すものも開発されているので、使用を検討するつもりである。ガス発生量も千差万別で、1g当たり100cc未満から200cc以上まで様々である。

2. 1 ガス発生剤によるSPF

ガス発生剤としてADCA、供試材として超塑性仕様A5083板材と亜鉛-アルミ共析合金板材SPZを試みに選択し、超塑性ブロー成形用に作製された3種類の型を用いて実際に成形実験を行った。成形例を図2、図3、図4に示す。超塑性温度はA5083では520°C、SPZでは250°Cである。ADCAと図4に適用した金型によるA5083の成形中の圧力、温度変化を図5に示した。

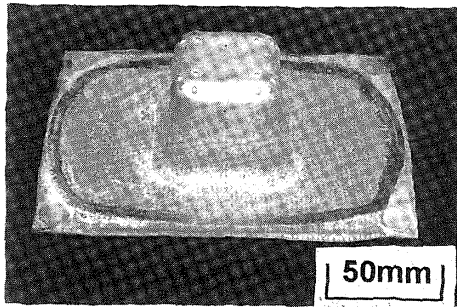


図 2. SPZ(初期板厚 2.5 mm), ADCA;0.25 g.

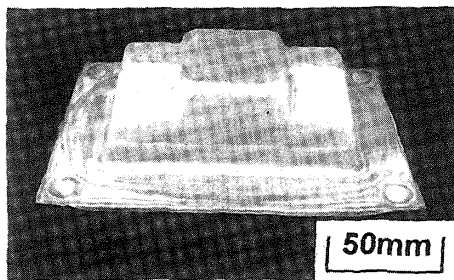


図 3. A5083(初期板厚 1.5 mm), ADCA;0.5g.

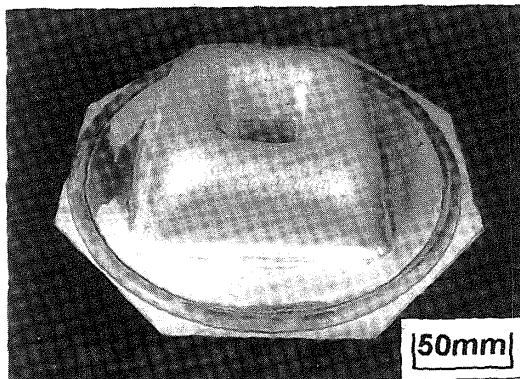


図 4. A5083(初期板厚 1.5mm), ADCA0.4g.

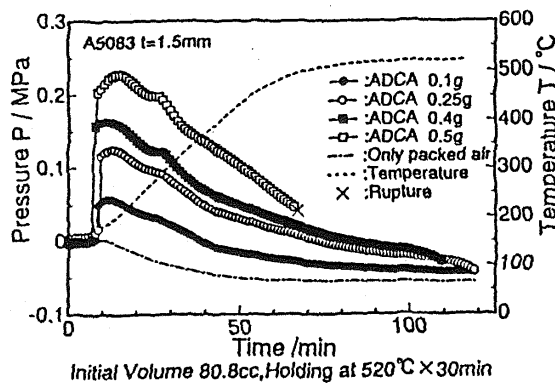


図 5. 成形温度と内部圧力の変化.

圧力は大気圧を 0MPa とするゲージ圧で示した。内部圧力はガス発生剤の熱分解温度において、急激に上昇し、その後は内部圧力と素材の変形抵抗とが平衡状態を保ちながら成形が進む。この間内部体積の増加に伴い圧力は不安定に低下し、超塑性温度域に達するとほぼ一定の割合で減少している。使用するガス発生剤の量が多い場合には、超塑性温度に達する前、または 30 分間の加熱保持が完了する前に、最も変形量の大きいダイス肩部、あるいは側壁面で破断を生じていた。

ガス発生剤による加熱成形では、成形温度、内部体積、成形圧力、ひずみ量、ひずみ速度などの成形上の変数の間に複雑な相互関係が存在し、成形加工条件を最適化するためには、実験、解析面からの詳細な検討が必要となる。ガス発生剤を用いた超塑性成形や加熱成形における変形機構の解明が急務である。

3. RB/SPF による中空構造体の製作

ガス発生剤を利用して超塑性の板材加工を志向するもう一つのアプリケーションとして、図 6 に示すような中空の構造部材の製作が挙げられるだろう。トラス構造は、現在、新幹線車両等の壁材として使用されているが、軽量化された高剛性、高強度の部材として注目されている。素材は 6 0 0 0 系のアルミニウム合金であり、押し出し加工により長手方向に一樣な断面形状が製造されている。図 6 の右に示したハニカム構造は、一般のボール紙やアルミのものとは幾何形状が若干ことなるものの、やはり構造体として床材としての使用が期待されている。3 枚の板から接着により一体化されていて、コア材(真中)の材料はパンチングプレスにより無数の凹凸がつけられている。この形態は、トラス構造とは異なり、長手方向断面形状が一樣でない。

合わせ板を圧着圧延により製作する過程において、将来中空部となる部分は圧延中にも接合しないように、STOP OFF 材と称する接合防止剤を板面内に、圧延後の形状から逆算した形状・寸法で塗布しておけば、合わせ板内には接合部と非接合部が選択的に混在する。図 7 に示すように、非接合部に空気等を高圧力でブローすれば、所定の中空構造体が出来上がる。この方法で実際に家電品の部品が製造されている⁴⁾。STOP OFF 単独ではなく、STOP OFF に適当なガス発生剤を混ぜ、これを塗布しておけば合わせ板完成後、加熱することにより同様なブロー成形が可能であろう。この方法を、Roll Bonding/SuperPlastic Forming(RB/SPF)と呼ぶことにした。この方法によればトラスまたはハニカム以外の中空構造も原理的には自由に製作できる。超塑性アルミニウム合金板材を供試材として、実験的に試行した成果を以下に報告するが、従来の方法に比して製品の精度・強度とコストに特に注目しなければならないだろう。

製造工程の簡単なフローチャートを図8に示した。また、図9には、今回用いた合わせ板のコア材表裏に印刷するトラス、ハニカム用の印刷パターン（スクリーン印刷）を示した。供試材は数種類のアルミニウム合金及びSPZである。3層の合わせ板中のスキン材、コア材にそれぞれこれら材料を使用すると、異種、同種間の組み合わせはかなりの数になる。

加熱成形は、合わせ板構成部材の超塑性温度に至る昇温工程及びその温度に保持している間に行われる。この際、層間のはく離強度が十分でない場合と図10に示すようにはく離が起こることがある。そこで、図11に示すように実際の製作工程を模擬したプロセスによって、層間のはく離強度を180度ピーリング試験によって測定し考察してみた。はく離強度試験は、実際の成形が高温で行われることを考慮して、室温以外にもいくつかの高温において実施した。図12には、はく離試験におけるクロスヘッド変位とはく離荷重の測定例を示した。

A1050 どちらの接合は接合はきわめて難しく、圧延率を大きくとらないと接合されなかった。A5083 と SPZ では 50 %以上の圧延率で外見的には接合が可能であった。A5083 の室温における荷重-変位線図上にランダムな振動が認められるが、この材料の室温におけるセレーション挙動と関係があるかどうか今のところ不明である。図13には、圧着圧延時の圧延率とはく離強度の関係を示した。スキン材の圧延率に伴う引張強度（単位幅当たりのはく離荷重）の変化も併せて示した。A1050 をスキン、A5083 をコアとする場合、超塑性温度 803K における加熱成形では圧延率の大小にかかわらずはく離強度は著しく低く、この組み合わせは適切とは言えない。

超塑性温度におけるコア材、スキン材の変形抵抗が十分低いならば、はく離強度が低くともはく離は起こらないと考えられる。実際に必要となる界面強度の大きさは、構成部材の変形抵抗との相対的な強度比で決まる。従って、A5083 の超塑性温度 803K におけるはく離強度の値が、本成形法において許容できるかどうかの判断はできない。図14は、コア材にSPZを用いる場合に対して、各温度でのはく離荷重とはく離の起こる確率との対応を示している。A5083 に比して、SPZ のはく離強度は超塑性温度 523K においてもそれなりに高く、この温度での安定かつはく離の起こりにくい加熱成形を示唆している。

3. 1 トラス構造部材の加熱成形

ここまでの結果から、スキン材 A1050、コア材 SPZ とし、図9に示すトラス構造用の印刷パターンを使用して 523K における加熱成形を試みた。使用したガス発生剤 ADCA の熱分解温度はほぼ 480K であるので、この場合には熱分解後に発生した不活性気体の膨張仕事は期待できず、短時間でのブロー成形となる。図9に示したコア材の裏表に施す印刷パターンでは、中空部となる a 部と圧着接合部 b 部の寸法比をいくつか変えてみた。膨ら

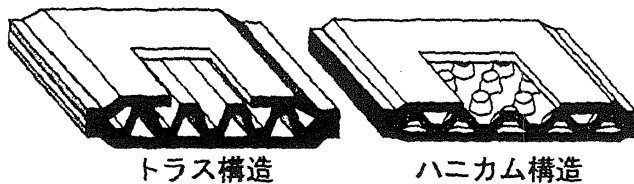


図6. 中空構造体の幾何形状.

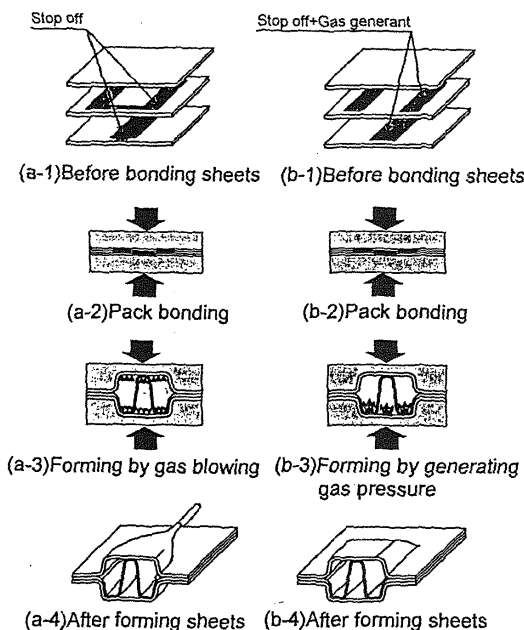


図7. 圧延による中空構造体の2製作法.

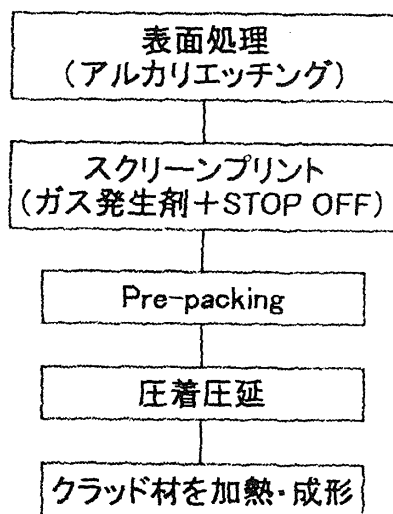


図8. 製造工程のフローチャート.

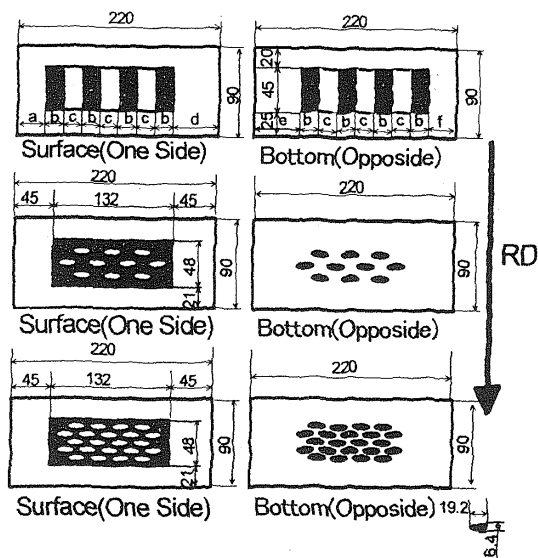


図9. 中空構造部材製作用の印刷パターン(圧延率 67%).

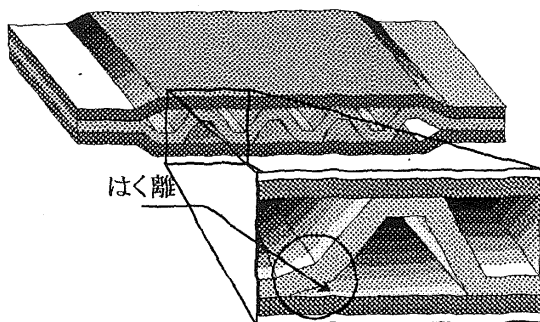


図10. 加熱成形中に生ずるはく離.

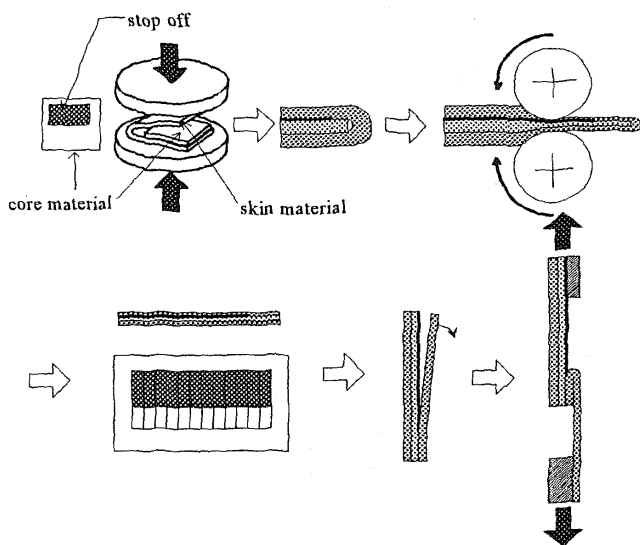


図11. 3層合わせ板の層間はく離強度の測定. 一枚の合わせ板から10枚以上の試験片を採取できる.

まず部分の厚みを限定しない場合(型を使用しない)には, STOP OFF に混入させるガス発生剤の量(30,40,50,60%)に比例して, 成形品の中空部厚さは大きくなった. 型を使用せず, 自由に膨らませる時, 構造体内部のはく離やコア材の破断を考えなければ中空部厚みはかなり大きくできる. 一方で, 製品の表面平坦度を維持したいならば, 型を使用することが必要である. 図15には, 成形品の例をいくつか示した. a部の寸法を大きくとるにつれて, 中空内部で曲線状の曲がった構造が顕著になる. 中空部の厚みにも依存するが, a:bの比は1:1とすることがこれまでの実験では望ましいように思われる. 成形品例の2では, はく離が起きている. この例のように表面処理やブラッシングが十分でない時には, はく離が往々にして起こってしまう. これまでに取り上げた加熱成形中の検討課題のうち, 冷却中のスキン材で生ずる凹みはここでは問題にならなかった. 加熱しても相対的に高い変形抵抗を維持するA1050をスキン材として選択したため, 圧力に抗して凹みを生じさせなかったことが, その理由として考えられる.

4. 結言

長手方向に一樣断面を有するトラスに対して, 断面が一樣でないハニカムは, 製造工程に一層の繊細さと精密さが要求される. ハニカム構造体については, 本報告では触れていないが, 現在継続して製造法を実験的に考察しているところである. このような中空構造体を本手法にて製造することが, 旧来の加工法に比べて優れているかどうかの判断は, 今のところ出来ていない.

謝辞

ガス発生剤を提供していただいた大塚化学, アルミニウム合金の板材を提供していただいたスカイアルミニウム, SPZをいただいた三井金属の各社に御礼申し上げます. さらに, 天田金属加工機械技術振興財団には研究費を補助していただき, 中間報告的な本報告を執筆する機会を与えていただいた. ここに深甚なる謝意を表する.

参考文献

- 1) Ridley, N: Superplasticity: 60 years after Pearson, (1994), 1.
- 2) 宮川松男: 塑性と加工, 16-177 (1975-10), 907.
- 3) Laycock, D. B: Superplastic Forming of Structural Alloys, (1982), 257.
- 4) 昭和アルミニウムのパンフレット.

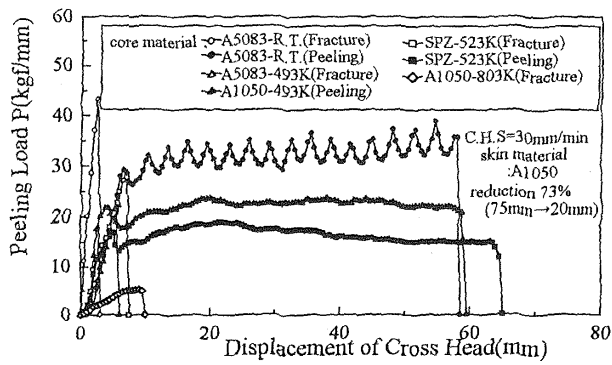


図12. はく離試験におけるクロスヘッド変位と荷重の関係.

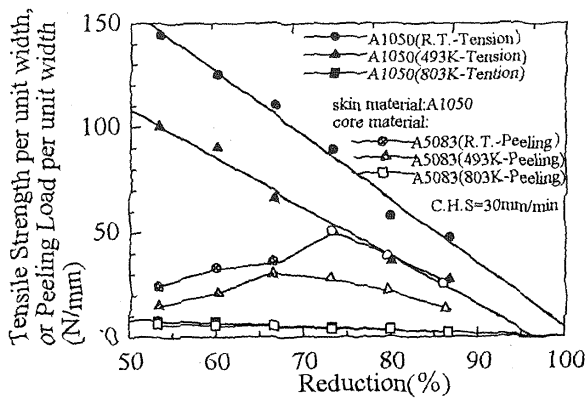


図13. はく離強度の圧延率に対する変化。スキン材(A1050)の引張強度は圧延率に対して単調に低下している。圧延率の大きい場合、はく離強度が十分高いならばスキン材で破断が起こり、この時ははく離強度はスキン材のはく離強度と同一である。

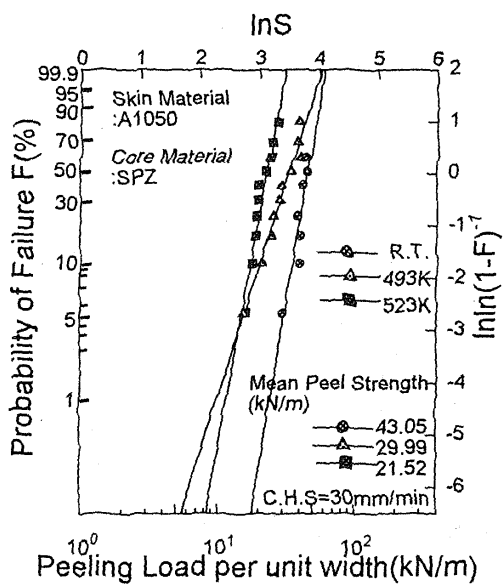
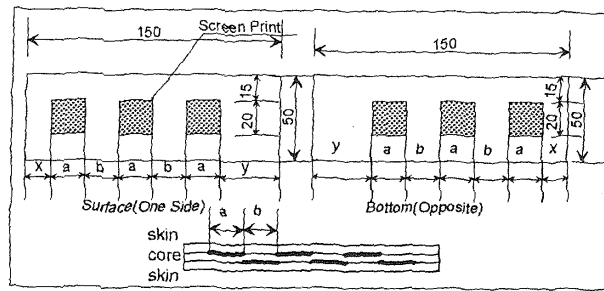


図14. はく離荷重とはく離確率の関係(ワイブル分布).



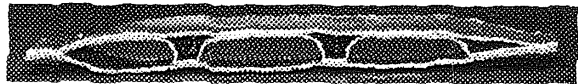
コア材(SPZ)に施すトラス構造用印刷パターン.



成形品例① (a : b = 1 : 1)



成形品例② (a : b = 2 : 1)



成形品例③ (a : b = 3 : 1)

図15. 60% ADCAによる加熱成形品.