

光造形型による金属薄板のプレス成形技術の研究開発

東京工業大学 工学部 機械科学科
助手 井関日出男
(平成7年度研究開発助成AF-95028)

キーワード：光硬化性樹脂、光造形法、材料試験、深絞り加工

1. 研究の目的と背景

光造形法は製品強度を必要としない試作モデルや鋳造用木型の製作法として発展してきており、強度を必要とする転写成型への応用はほとんど顧みられなかったのが現状である。1994年に帝人製機が樹脂強度を向上させ、湘南デザインが射出成形用型に適用したのが最初である¹⁾。樹脂強度を向上させる材料開発は続行されており、また光造形法の守備範囲を広げるためにも、プレス成型への適用は重要であり、多品種適量生産時代におけるプレス成型技術の課題でもある。従来、プレス成型工具は変形しない剛体と見なされてきたが、光硬化性樹脂の工具の場合には変形や強度を考慮して成形の可否を判定する必要がある。光造形型によるプレス成型技術の検討はほとんど行われていない。

本研究では、光造形型による金属薄板のプレス成型技術に関する基礎研究として、(1)光硬化性樹脂の機械的性質を調べ、(2)円筒深絞り用の成形工具を光造形法で作成し、(3)光硬化性樹脂のダイスの形状、破壊応力と金属薄板の板厚、降伏応力をパラメータとする簡易判定式を導き、(4)アルミニウム焼鈍板の円筒深絞り実験を行い、簡易判定式の有効性を検討した。

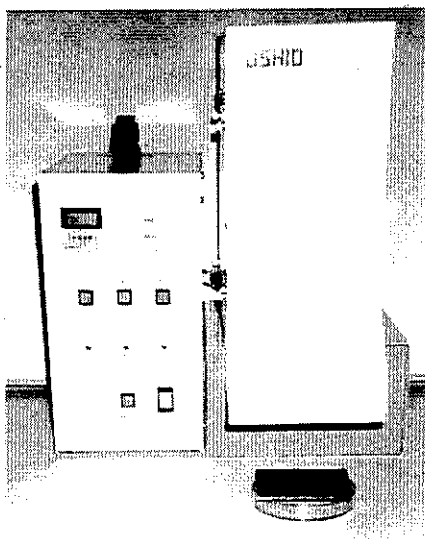


図1 一様照射強度の露光装置による試験片作成法

2. 光硬化性樹脂の凝固時の機械的性質および構成式

2.1 ウレタンアクリレート系光硬化性樹脂²⁾

ウレタンアクリレート系光硬化性樹脂は、製品強度を必要としない試作モデルに多用されている。照射エネルギーと機械的性質の関係はレーザー光の出力と走査速度の設定や光硬化性樹脂の凝固過程の特性を把握するためにも重要であり、両者の関係を出来るだけ詳細に検討した。図1は一様照射強度の露光装置による試験片作成法であり、照射時間(0.5~360s)を変えて片面照射による試験片を作成した。図2に作成マスクと引張りひずみや線膨張ひずみを測定するのに用いたゲージ貼付の試験片を示す。

2.1.1 ヤング率、ポアソン比、線膨張係数および

体積収縮ひずみの測定 ひずみゲージ法により、引張方向ひずみ ϵ_x と ϵ_y を測定し、インストロン試験機の引張荷重 P および平均板厚から求めた断面積 A を用いて、ヤング率 E とポアソン比 ν を算出した。

$$E = P / (A \epsilon_x), \quad \nu = -\epsilon_y / \epsilon_x \quad (1)$$

線膨張係数 α は、照射時間を変えた正方形板(2.5×2.5cm²)を温度 $T=0^\circ\text{C}$ と 40°C の水中へ交互に入れ、ひずみゲージの伸びひずみ ϵ を測定し、次式から算出した。

$$\alpha = \epsilon / (T_{40} - T_0) \quad (2)$$

体積収縮ひずみ 3β は、浮力測定法によって比体積 ρ_v とその比体積変化 $\Delta\rho_v$ から求めた。

$$3\beta = \Delta\rho_v / \rho_0 \quad (3)$$



(a) マスク

(b) 試験片

図2 マスク形状と試験片

各材料定数と照射エネルギー I の関係を図3に示す。 E 、 ν および α の値は、ゲージ貼付の補強効果によって、10~30%程度の誤差を含むと推察されるが、照射エネルギー I がおよそ 2 J/cm^2 以上では一定になる傾向がある。

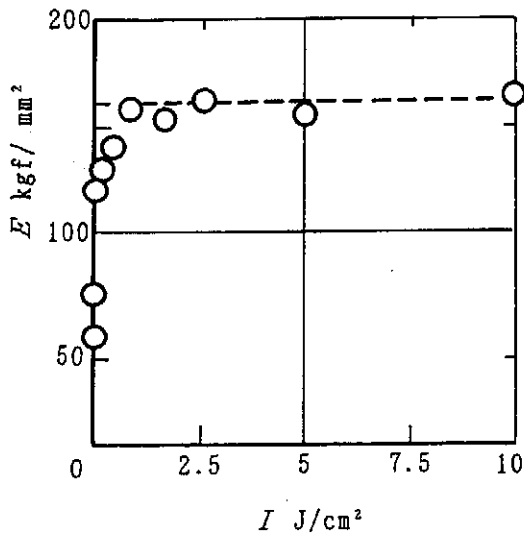
2.1.2 完全光硬化弾性体モデル³⁾ 臨界露光量 I_c を明確に測定することはできなかったが、材料定数は急勾配で上昇し、一定の材料定数に漸近する傾向がある。そこで照射強度の大きな光源で光造形する場合を想定し、

材料定数-照射エネルギーの関係を次のようにモデル化した。すなわち、光照射によって瞬時に体積収縮し、一定のヤング率、ポアソン比および線膨張係数を有しながら固体に変化するものとする。

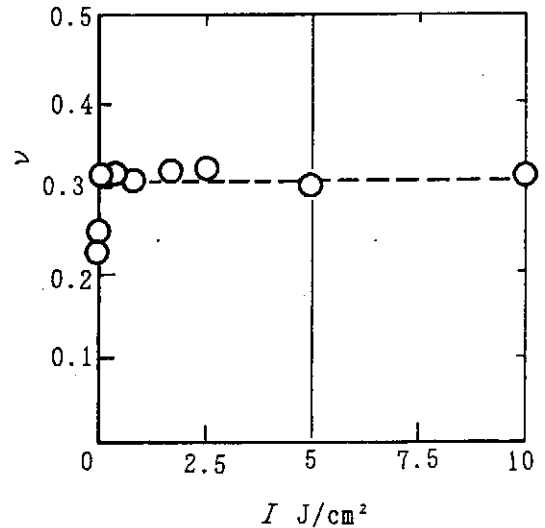
$$\Delta \varepsilon = \Delta \sigma / E + \alpha \Delta T + \beta \quad (4)$$

$$E = 160 \text{ kgf/mm}^2, \quad \nu = 0.31$$

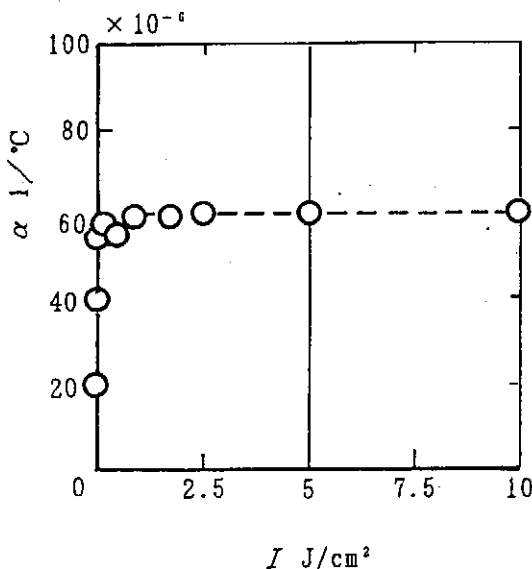
$$\alpha = 60 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}, \quad \beta = -0.021$$



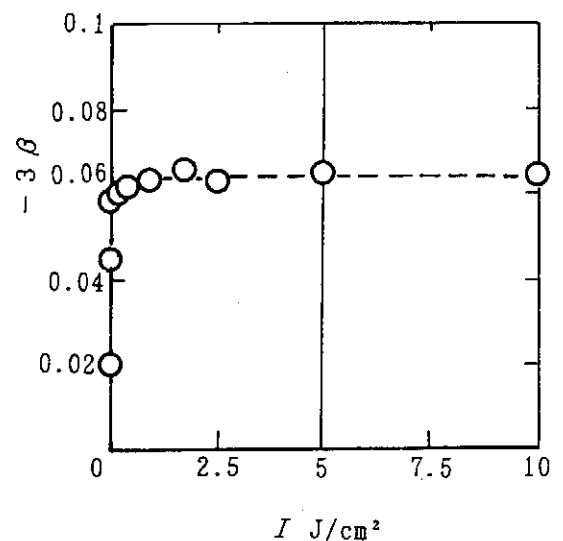
(a) $E - I$



(b) $\nu - I$



(c) $\alpha - I$



(d) $-3\beta - I$

図3 材料定数と照射エネルギー I の関係

2.2 高強度光硬化性樹脂

2.2.1 引張試験 ウレタンアクリレートをバインダー樹脂として数種類の無機物固形分を含有した高強度光硬化性樹脂の機械的性質を検討した。図4は光造形による薄板から切り出した引張試験片とその破壊状態である。試験片寸法は板厚2mm, 平行部長さ50mm, 幅10mmであり, テーパ部およびチャック部の長さ(幅20mm)は15および25mmである。ひずみゲージを用いてひずみを測定しており, ゲージ貼付の補強効果によって10%程度の測定誤差がある。図5は引張試験による応力-ひずみ曲線であり, 図6は幅方向ひずみ ϵ_b の変化である。テーパ形の薄板試験片を使用した光硬化性樹脂の降伏点(≒比例限) $\sigma_Y=1.2 \text{ kgf/mm}^2$, 破壊点(最大公称応力) σ_f

$=3.0 \text{ kgf/mm}^2$, 縦弾性係数 $E=590 \text{ kgf/mm}^2$, ポアソン比 $\nu=0.23$ となっていた。

2.2.2 圧縮試験 図7は高強度光硬化性樹脂から光造形によって製作した厚板(20mm)から切り出した試験片とその破壊状態である。試験片は直径14mm, 高さ20mmの円柱であり, 圧縮試験をワセリン潤滑で行った。図8は圧縮試験による応力-ひずみ曲線であり(公称応力, 公称ひずみを採用), 図9は円周方向ひずみ ϵ_θ の変化である。圧縮試験による光硬化樹脂の降伏点(≒比例限) $\sigma_Y=7.5 \text{ kgf/mm}^2$, 破壊点(最大公称応力) $\sigma_f=12.6 \text{ kgf/mm}^2$, $E=590 \text{ kgf/mm}^2$, $\nu=0.42$ となっていた。

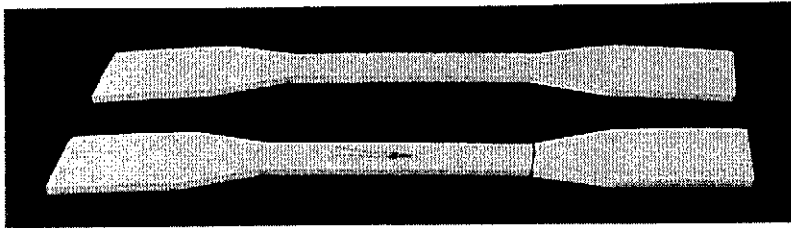


図4 引張試験片とその破壊状態

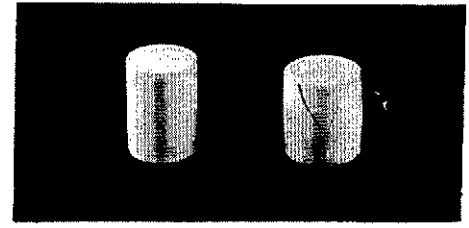


図7 圧縮試験片とその破壊状態

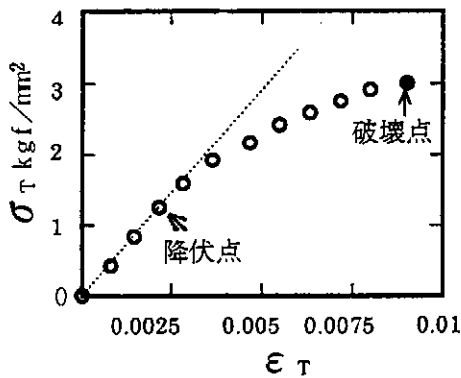


図5 引張試験による応力-ひずみ曲線

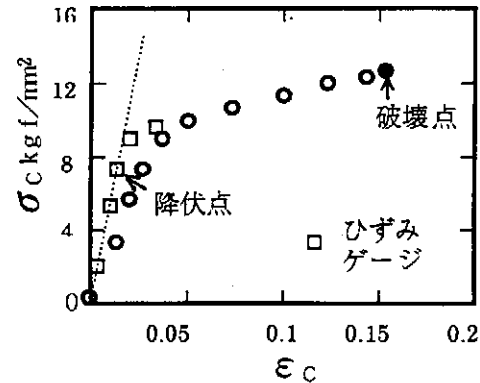


図8 圧縮試験による応力-ひずみ曲線

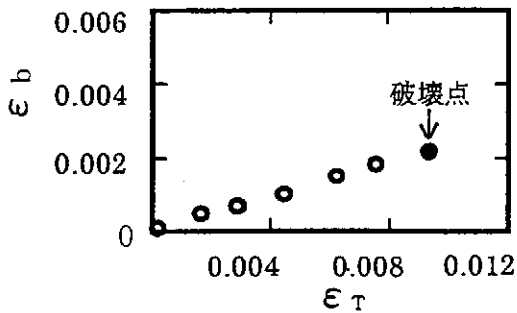


図6 引張試験における板幅方向ひずみの変化

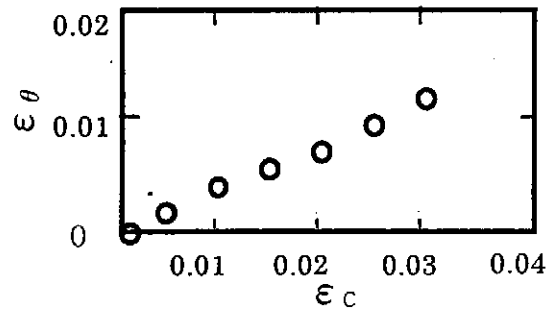


図9 圧縮試験における円周方向ひずみの変化

3. 光硬化性樹脂の成形型工具による円筒深絞り⁴⁾

3.1 光造形法による円筒深絞り工具 図10は光造形法で製作したダイス(内径 $2a=31.5$ mm, 外径 $2b=108.0$ mm, 厚さ $t_d=15.9$ mm, 肩半径2mm), パンチ(直径30.0mm, 高さ50.1mm, 肩半径2mm)およびブランクホルダー(内径30.3mm, 外径107.8mm, 厚さ15.9mm)である. ピン, ピン孔, センタ決めおよび空気孔も光造形法で加工してある.

3.2 樹脂ダイスが破壊しないための簡易判定式

ダイス肩半径部に滑車モデル⁵⁾を採用し, フランジの絞り込み力の反力がダイスの側壁面に一様分布するとし, その内圧による相当応力がダイスの破壊応力以下であれば, 光硬化性樹脂のダイスは破壊せずに薄板の成形が可能と考える.

薄板はミーゼスの降伏条件に従う完全塑性体とし, 平面応力状態で検討する. ダイスおよび薄板の厚さをそれぞれ, t_d , t_m とし, 薄板の降伏応力を σ_{Me} として, ダイスの内半径 a における内圧 p_a を次式で近似する.

$$p_a = (2/\sqrt{3}) (t_M/t_D) \sigma_{Me} \quad (5)$$

ダイスを内, 外半径 a , b の円板と見なすと内圧 p_a が作用するときの半径および円周方向応力 σ_r および σ_θ は, 次のように表せる.

$$\sigma_r = a^2 (r^2 - b^2) p_a / [(b^2 - a^2) r^2] \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = a^2 (r^2 + b^2) p_a / [(b^2 - a^2) r^2] \quad (7)$$

ダイスの最大相当応力 σ_{eqm} は, $r=a$ において次のように表せる.

$$\sigma_{eqm} = [\sqrt{(a^4 + 3b^4)} / (b^2 - a^2)] p_a \quad (8)$$

光硬化性樹脂の破壊応力 σ_{De} にせん断ひずみエネルギー説を採用する⁶⁾と樹脂ダイスが破壊しないためには

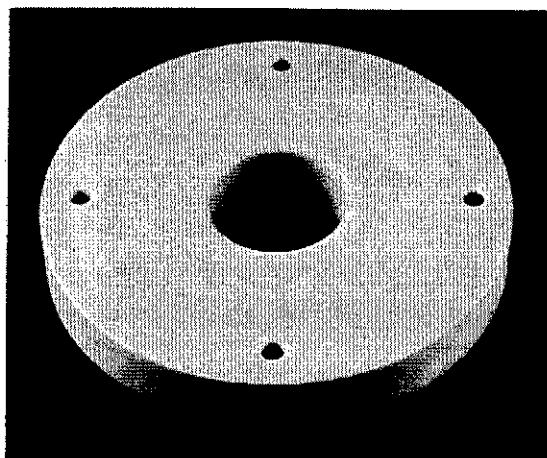
$$\sigma_{De} \geq \sigma_{eqm} \quad (9)$$

の関係が必要である. したがって, 深絞り工具が剛体と見なせない場合の判定条件は, 式(5), (8), (9)より, 次のようになる.

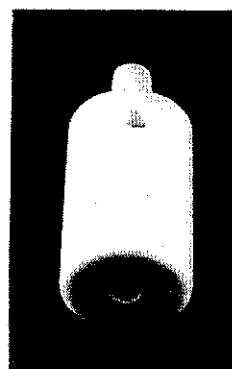
$$1 \geq (2/\sqrt{3}) [\sqrt{(a^4 + 3b^4)} / (b^2 - a^2)] (t_M/t_D) (\sigma_{Me}/\sigma_{De}) \quad (10)$$

3.3 アルミニウム焼鈍板の円筒深絞り

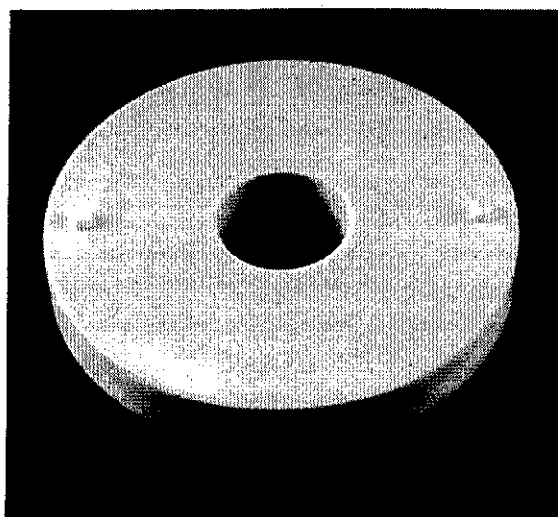
板厚 $t_M=0.30$ mm, 降伏応力 $\sigma_{Me}=10$ kgf/mm²のアルミニウム焼鈍板を, 内径 $2a=31.5$ mm, 外径 $2b=108.0$ mm, 厚さ $t_d=15.9$ mm, 引張り破壊応力 $\sigma_{De}=1.2$ kgf/mm²の光硬化性樹脂のダイスで深絞りを行うときの式(10)の右辺の値は0.35である. したがって, 簡易判定式を満足しているアルミニウム焼鈍板と光硬化性樹脂ダイスを用いて行った円筒深絞りの実験結果を図11に示す. ダイスは壊れずにアルミニウム焼鈍板が破断しており, 式(10)の簡易判定式は有効であり, 適切なしわ押さえ力によって深絞り成形ができています.



(a) ダイス



(b) パンチ



(c) ブランクホルダー

図10 光造形法で製作したダイス, パンチおよびブランクホルダー

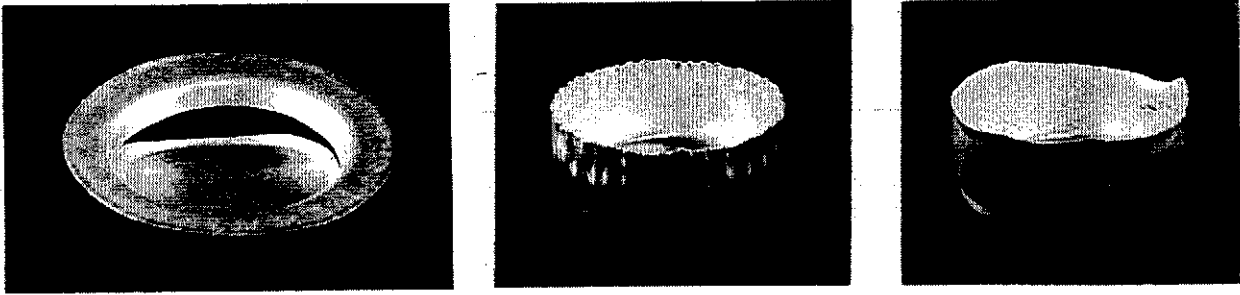


図11 アルミニウム焼鈍板の円筒深絞り例 ($t=0.3\text{mm}$, 絞り比 $\beta=1.6$)

4. 結論

- 1) プレス金型材料として期待されだした光硬化性樹脂の弾性定数, 降伏応力, 破壊応力を測定し,
- 2) 光造形法によって円筒深絞りの成形工具を製作し,
- 3) 樹脂ダイスが破壊しないための簡易判定式を提案し,
- 4) 簡易判定式を満足しているアルミニウム焼鈍板と樹脂ダイスを用いて円筒深絞りをを行い, 工具が破損せずに成形できることを示した.

謝辞 光硬化性樹脂の円筒深絞り工具を製作していただいた湘南デザイン(株)の松岡康彦社長に感謝し, また,

本研究は財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究助成金によることを付記し, 感謝の意を表す.

参考文献

- 1) 松岡ほか: 日経メカニカル(1995.3.6)
- 2) 井関: ラビッド・プロトタイプング・シンポジウム, (1994), 43-49.
- 3) 井関: 塑加春演論集, (1994), 117-120.
- 4) 井関: 塑加連演論集, (1995), 177-178
- 5) 井関ほか: 1st ICTP (1984), 678-683.
- 6) 井関ほか: 日機論C, 52-480 (1986), 2257-2264.