動的局所加熱逐次張出しによる難成形板材の成形加工

広島大学大学院 工学研究院 材料・生産加工部門 准教授 日野 隆太郎 (平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011030)

キーワード:逐次張出し成形,動的局所加熱,難成形軽量合金板

1. 研究の目的と背景

軽量化に適したマグネシウム合金板やチタン合金板などは 常温プレス成形が困難な難成形板材であり,これらの成形に は温間成形技術が用いられることが多い.しかし、温間プレス 成形は金型や加熱装置が高コストとなり,多品種少量成形へ の対応が難しい.一方,多品種少量成形に適した板材成形 技術として,単純棒状工具を用いた逐次張出し成形(インクリ メンタルフォーミング)が提案され、様々な研究が行われてい る、しかし、加熱インクリメンタルフォーミングによる難成形板材 の加工に焦点を当てた研究事例は未だ少なく, チタン合金板 などの加熱成形を試みた先行研究 1)~5)がいくつか見られるの みである. そこで筆者らは, 難成形板材の多品種少量成形技 術として,板材変形部の動的局所加熱を行いながら単純棒状 工具を用いた逐次張出し成形を行う「動的局所加熱逐次張出 し成形技術」を開発すること目指して研究を進めてきた 6)~8). その結果,動的局所加熱逐次張出し成形法が板材の成形性 (成形限界)を大幅に向上させること,成形後の残留応力・ス プリングバックを低減させることが明らかとなっている.

本研究では、アルミニウム-マグネシウム合金板、マグネシウ ム合金板やチタン合金板など、常温プレス成形が難しい難成 形板材を対象として、工具加熱型およびレーザ援用局所加熱 型の逐次張出し成形装置を用いた成形実験を行うことにより、 板材局所加熱温度、工具速度といった各種条件と成形限界 および残留応力・成形品形状精度(スプリングバック)などの関 係を系統的に把握し、成形特性を明らかにすることを目的とす る.また実験と数値解析の両面から、成形限界や成形品形状 精度を向上させる成形条件の探索を試みた.

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

先述のとおり本研究では工具加熱型の局所加熱逐次張出 し成形装置とレーザ援用局所加熱逐次張出し成形装置を用 いた.前者の概略図を図1に,後者のそれを図2に示す.

工具加熱型の局所加熱逐次張出し成形装置は固定工具と 成形工具を用いる逐次逆張出し方式であり,工具先端は直径 14mmの半球状である.成形工具内に出力200Wのカートリッ ジヒータが挿入されており,工具表面からの熱伝達によりブラ ンクの工具接触面側を局所加熱することができる.接触熱伝 達に依存する加熱方式のため,加熱温度や加熱速度の向上 に難点があり,成形速度は低い.

レーザ援用局所加熱逐次張出し成形装置は成形工具のみ を用いる逐次張出し方式である. NC フライス盤(株式会社イワ シタ製, IB-1V)を成形装置のベースとして使用し, そのワーク テーブル上にはブランクホルダが, 主軸ヘッドには成形工具と レーザヘッドが固定されている. 工具先端は直径 11mm の半 球状である. 工具は主軸ヘッドの動きにより3次元運動を行い, ブランクは図2の左方向に逐次張り出される. レーザヘッドと 成形工具は互いに向き合い,相対位置を一定に保つ. このよ うな構造にすることでブランクの成形部表面(工具接触面の反 対側)をレーザ照射により局所加熱しつつ,逐次張出成形を 行うことができる. またブランクーレーザヘッド間の距離を変化 させることでレーザのデフォーカス(=焦点外し距離)を調節 することができ,これによりレーザスポット径(=ブランク加熱範 囲)が調節できる. 前述の工具加熱型の成形装置に比べて成 形速度を大幅に向上させることが可能である.

レーザ装置としては Laserline GmbH 製ファイバー付き半導 体レーザシステム(LDF 6000-40, 最大出力 6kW)を使用した. ファイバーコア径は 0.4mm, レーザスポットは円形で, レーザ ヘッド部の集光レンズの焦点距離は 100mm である.

2.2 工具加熱型局所加熱逐次張出し成形実験条件

供試材としてアルミニウム-マグネシウム合金 A5083P-O 板 材(250mm×250mm,板厚 1mm)を使用した.インクリメンタル フォーミングの成形性評価試験においては円錐(台)形を成形 目標形状とすることが多いが,筆者らはすでに工具加熱型の 局所加熱逐次張出し成形装置による円錐成形試験結果を報 告している^{6)~8)}.そこで本研究では成形目標形状を底辺長さ 100mm の四角錐または四角錐台として,過去の円錐成形試 験結果と比較した.成形条件は,工具内ヒータ温度を室温 (RT),573,723,873Kの4条件,工具速度を1,4,8mm·s⁻¹ の3条件とした.工具経路は目標形状の等高線周回経路とし, 1周回あたりの工具押込みピッチ(高さ方向)を1mmとしてい る(図 3(a)参照).また潤滑剤としてモリブデン配合水系潤滑 剤(SUMICO スミモールド 201)を使用した.これらの条件は, 目標形状以外は円錐成形の場合^{6)~8}と同様である.

2.3 レーザ援用局所加熱逐次張出し成形実験条件

供試材としてマグネシウム合金 AZ31B-O 板材(170mm× 170mm,板厚 0.78mm)を使用し,成形目標形状は円錐台形 とした.円錐台の上面,底面半径は10,50mmである.工具経 路は等高線周回経路とし,1 周回あたりの工具押込みピッチ (斜面方向)を1mmとしている(図3(b)参照).工具速度は480, 4000mm·min⁻¹,レーザ出力は 0~950W,デフォーカスは 25, 50mm,レーザ照射角は板面法線に対して5°である.工具ー 板材間の潤滑および板材冷却のため,不水溶性切削油(JX 日鉱日石エネルギー, Reliacut DE-P25)をブランク裏面に噴 射した.またブランク平坦部のたわみを抑止するサポート板 (バッキングプレート)を使用した.

2.4 温度測定実験

上記の成形試験に先立って,工具内ヒータ加熱条件ならび

にレーザ照射条件と局所加熱された板材表面温度の関連を 調査するための実験を行った.板材表面(成形工具接触面の 反対側表面)に熱電対を取り付け,成形工具通過時ならびに レーザ照射スポット通過時の温度履歴を取得した.レーザ援 用局所加熱の場合は成形工具を取り除いてレーザ照射のみ を行うことにより板材裏面の温度履歴も取得した.またサーモ グラフィによる温度分布計測も併せて行った.

3. 研究成果

3.1 供試材の機械的特性

本研究で用いた A5083 板材, AZ31 板材については変形 抵抗と延性に温度依存性・ひずみ速度依存性があることがよ く知られている. これらの特性を確認するために種々の温度に



図1 工具加熱型局所加熱逐次逆張出L成形装置概略図



図2 レーザ援用局所加熱逐次張出し成形装置概略図



おいて供試材の単軸引張試験を行った.その結果を図4に示 す.両供試材とも室温では延性に乏しい難成形材だが,温度 の上昇に伴い変形抵抗が大幅に低下し延性が大きく向上す る.また図4(b)のAZ31の試験結果からわかるように,高温域 (300℃以上)では延性のひずみ速度依存性が顕著になる.

3.2 局所加熱温度

図 5 に工具加熱型の局所加熱逐次逆張出し成形における A5083 板材表面の局所加熱温度測定実験結果を示す.図 5 (a)は工具周回経路上のある一点における板材表面(成形工 具が接触していない面)温度の経時変化の測定例を示したも のである.工具の接近に伴って温度が上昇し,工具通過時に 最高温度となり,工具通過後に温度が低下してほぼ元の温度 に戻る様子がわかる.

工具通過時の最高温度の平均値を板材表面局所加熱温 度とみなし、その測定結果をまとめたものが図 5 (b)である.こ の結果は高さと斜面傾斜角α(=半頂角、図 3 参照)を統一し た円錐および四角錐を室温から 600℃までのヒータ温度、工 具速度 1,4,8mm・s⁻¹で成形した場合の板材表面局所加熱 温度を示している.また比較のため工具表面温度測定結果も 併せて示した.当然ながら板材表面温度はヒータ温度、工具 表面温度よりも大幅に低く、その差は高温になるにつれて大き くなる.また工具速度が上昇するにつれて板材表面温度は若 干低下する.また円錐成形の場合より四角錐成形の場合の方



図4 種々の温度における供試材の応力-ひずみ曲線



(a) 工具周回経路上の板材表面温度履歴測定例



 (b) 工具内ヒータ温度と工具表面温度および板材表面局所 加熱温度の関係
図 5 A5083 板材の工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成形

における局所加熱温度測定実験結果





が局所加熱温度が低くなっている.これは,同一の高さ・斜面 傾斜角 αを持つ円錐と四角錐では後者の方が成形品表面積 が大きく,その結果として放熱量が多くなるためであろう. 一方,図 6 はレーザ援用動的局所加熱実験におけるレー ザ出力とAZ31 板材表面の局所加熱温度(レーザスポット通過 時の板材表面最高温度の平均値)の関係をまとめたものであ る. レーザ出力が高いほど,デフォーカスが小さいほど,また スポット移動速度が遅いほど局所加熱温度は高くなっている. レーザ加熱の場合は急速加熱が可能なため,4000mm・s⁻¹ と いう高いスポット速度(=工具速度)においても十分な加熱が 可能であり,成形速度の向上が期待できる.

以上の局所加熱温度測定結果より,所望の板材表面温度 を得るための工具加熱条件またはレーザ照射条件を決定す ることができる.なお,工具加熱型局所加熱逐次張出しにお いては,板材は自然空冷の状態にあり,強制的な冷却は行っ ていない.一方,レーザ援用局所加熱逐次張出しにおいては, 先述のとおり不水溶性切削油(Reliacut DE-P25)で板材裏面 (レーザ照射面の反対側)を強制冷却している.この強制冷却 なしでレーザ加熱を行うと,局所加熱部の最高温度と板全体 の平均温度の双方が上昇し続けることが確認されており,一 定の温度条件を保てなくなるだけでなく工具接触部以外の熱 塑性変形を誘起するおそれもある.そのためレーザ加熱の場 合は適切な冷却を行う必要があると考えられる.

3.3 工具加熱型局所加熱逐次逆張出しにおける成形性

よく知られているように、インクリメンタルフォーミングにおけ るサイン則から、円錐・四角錐成形品の斜面傾斜角α(図3参 照)が小さいほど最大主ひずみ(斜面方向ひずみ)が大きくな り、成形性が高いといえる.そこで種々の条件下で成形可能 な最小の角度αを求め、それを成形性の指標とする.

図7に工具加熱型局所加熱逐次逆張出し四角錐成形におけるA5083板材の成形限界斜面傾斜角αと工具内ヒータ温度の関係を示す.また比較のために過去の円錐成形の結果^{7,8)} も併せて示している.この結果から両成形ともヒータ温度が高いほど,工具速度が遅いほど成形性が向上していることがわかる.しかし同条件下では四角錐成形の方が円錐成形に比べ成形性が低い.すなわち,材料・板厚・成形条件などが同じでも成形品形状が変わると成形性が変わる.この原因は以下のように考えられる.図5で示したように,同条件の円錐と四角錐を比べると後者の方が板材表面局所加熱温度は低くなる.そのため,材料延性の温度依存性により成形性が低下すると考えられる.

そこで図7の結果を図5から得られる板材表面局所加熱温 度を用いて再度整理すると、図8に示す結果が得られた.図7 に見られた円錐・四角錐両成形間の成形性の差がある程度 解消され、ばらつきはあるものの板材表面温度の増加に伴っ て成形性が向上する傾向(図8にグレーのバンドで示す)が見 て取れる.すなわち、板材表面局所加熱温度が成形性を決定 する支配的要因であり、温度制御は工具接触部の板材表面 温度実測値に基づいて行う必要があるといえる.

また図8から、板材表面温度140℃前後で成形性の向上が 限界に達しており、これより高い温度に加熱してもさらなる成 形性向上は見込めないことがわかる.よって成形限界向上の 面では、板材表面温度約140℃が最適加熱条件となる.

3.4 四角錐逐次逆張出し成形品の形状不良とその対策

図9にA5083板材の工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成 形による四角錐成形品の例を示す.斜面傾斜角αが小さいと き,四角錐成形品の本来平面であるべき斜面部の中央に隆 起が確認でき,成形品形状が製品形状,すなわち工具経路



図 7 A5083 板材の工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成形 における工具内ヒータ温度と限界斜面傾斜角の関係



図 8 A5083 板材の工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成形 における板材局所加熱温度と限界斜面傾斜角の関係



 (a) ヒータ温度:室温, 工具速度:8mm·s⁻¹, 斜面傾斜角:42°



度:室温, (b) ヒータ温度:600℃, :8mm·s⁻¹, 工具速度:8mm·s⁻¹, 角:42° 斜面傾斜角:28°

図 9 A5083 板材の工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成形 による四角錐成形品の例 の包絡面形状とは大きく異なっていることがわかる. 同様の現象は Park 6 9 の報告にも見られ,成形品の形状精度を悪化させる大きな問題である. 種々の四角錐成形品における斜面部隆起高さの測定結果を図10に示す. この結果より成形品の斜面傾斜角 α が小さいほど隆起高さが大きいことがわかる. 隆起高さの支配的因子は斜面傾斜角 α であり,局所加熱温度が隆起高さに与える影響は少ないようである.

この隆起による形状不良発生のメカニズムとその対策検討 のため、様々な条件における成形実験および有限要素解析ソ フトウェア LS-DYNA を用いた成形シミュレーションを行った. 図 11 に成形シミュレーションで得られた成形品形状の例を示 すが,斜面傾斜角αが小さいときの斜面部隆起現象が再現さ れていることがわかる.これらの検討の結果,(1)斜面中央部と 角部付近のひずみ差により斜面中央部には面内圧縮の応力 場が生じており、座屈による隆起が生じやすくなっていること、 (2)成形工具先端半球部の直径を大きくすると隆起高さが若 干小さくなること、(3)工具押込みピッチを小さくすると隆起高さ が若干小さくなること、(4)工具経路に斜面部隆起を抑制する ような"見込み"を与えると隆起高さを小さくできること、などが わかった. 図 12 に見込みを与えた工具経路による四角錐台 成形品の隆起抑制のシミュレーション事例を示す.工具経路 に隆起形状を反転させたような見込みを与えることである程度 隆起が抑制されているが,現状では形状不良を完全に解消 することはできていない. 形状不良発生メカニズムの解明と形 状精度向上のための最適成形条件決定は引き続き検討を要 する課題である.



図 10 A5083 板材の工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成形 における四角錐成形品斜面部の隆起高さ測定結果



(a) 斜面傾斜角:43°
(b) 斜面傾斜角:30°
図 11 有限要素法による成形シミュレーションによって再現された四角錐成形品斜面部の隆起現象





3.5 レーザ援用局所加熱逐次張出しにおける成形性

成形目標形状を円錐台形としたAZ31板材のレーザ援用局 所加熱逐次張出し実験において,斜面傾斜角αを1°刻みで 小さくしながら繰り返し成形を行い,破断せずに成形できる最 小のαを見出した.その結果得られた成形品の例を図13に示 す.これらは工具速度480mm·min⁻¹,デフォーカス25mmで成 形されたものである.室温ではほとんど成形できなかった AZ31板材も,局所加熱を行うことで成形が可能となり,レーザ 出力が高いほど成形性が向上していることがわかる.

図 14 に種々の条件におけるレーザ出力と成形可能な最小 の斜面傾斜角 αの関係を示す.レーザ出力が高いほど,工具 速度が遅いほど限界斜面傾斜角 αが小さくなり,成形性が向 上していることがわかる.またレーザ出力が同じであれば,デ フォーカスが小さいほど成形性は良いといえる.

図15は図14の結果を、図6の温度測定データに基づいて 板材表面局所加熱温度と成形可能な最小の斜面傾斜角αの 関係に整理し直したものである.この図から板材表面局所加 熱温度が高いほど成形性が向上していることがわかる.温度 が同じであれば、工具速度が遅いほど、デフォーカスが大き いほど若干良い成形性を示すが、温度 300℃以下ではそれら の影響はさほど大きくはない.一方、400℃では工具速度の影 響が大きく、工具速度が遅い方がデフォーカスによらず成形 性が大幅に向上した.300℃以下では成形性向上に及ぼす材 料延性の温度依存性の影響が支配的であり、400℃になると 材料延性の速度依存性の影響も顕著になるといえる.400℃ における延性の速度依存性発現は、図4(b)に示した材料特 性から説明できる.

成形に要する時間は、例えば斜面傾斜角 48°の円錐台を 工具速度 4000mm·min⁻¹、工具押込みピッチ 1mm で成形する 場合は 2 分 30 秒程度であり、短時間で成形可能である.

3.6 レーザ援用局所加熱逐次張出し成形品の残留応力

斜面傾斜角 aを 55° に固定し,工具速度 480, 4000mm· min⁻¹, レーザ出力 110~950W, デフォーカス 25, 50mm の合



図 13 AZ31 板材のレーザ援用局所加熱逐次張出し成形品 の例(工具速度 480mm·min⁻¹, デフォーカス 25mm)



図 14 AZ31 板材のレーザ援用局所加熱逐次張出し成形に おけるレーザ出力と限界斜面傾斜角の関係



図 15 AZ31 板材のレーザ援用局所加熱逐次張出し成形に おける板材局所加熱温度と限界斜面傾斜角の関係



図 16 円錐台成形品の斜面部から切り出された帯板小片の 曲率変化測定による間接的残留応力評価



図17 AZ31板材のレーザ援用局所加熱逐次張出し成形によ る円錐台成形品から切り出された帯板小片側面写真

計9条件で円錐台成形品を作製した.これらの成形品斜面部 から図16に示すように幅2mm,長さ25mm程度の帯板をワイ ヤカットで切り出すと,切り出された帯板は残留応力(厳密に は残留曲げモーメント)の解放により反りを生じる.このときの 曲率変化 Δ*k*によって残留応力レベルを間接的に評価した.

図 17 に 9 条件の成形品から切り出された帯板の側面写真 を示す.いずれの帯板もほとんど反りを生じておらず,曲率変 化 Δκは最大でも 0.0033mm⁻¹であった.この結果から局所加 熱の効果により成形品には残留応力がほとんど生じておらず, 成形部の形状凍結性は高いと考えられる.

4. 結び

工具加熱型の局所加熱逐次張出し成形装置およびレーザ 援用局所加熱逐次張出し成形装置を用いて軽量難成形材で あるA5083P-O板材,AZ31B-O板材の成形実験を行い,各種 条件と成形性の関係を把握するとともに,成形性向上効果や 残留応力低減効果,成形品形状精度など種々の成形特性に ついて調査,検討した.主な結論は以下のとおりである.

(1) 所望の温度にて安定した動的局所加熱状態を維持する ためには,板材の冷却(入熱量の大きいレーザ加熱の場合) や成形品からの放熱による温度低下(入熱量の小さい工具加 熱の場合)を考慮した温度管理が必要となる.

(2) 局所加熱逐次張出し成形においては加熱による材料延性向上効果とインクリメンタルフォーミングが本来持つ成形性

の高さが重畳して板材の成形限界は大幅に向上し、常温では 成形が難しい軽量難成形板材のフレキシブルな成形が可能と なる.多くの場合,成形性向上効果は板材表面局所加熱温度 と材料延性の温度依存性の関係から説明できるが,レーザ援 用局所加熱逐次張出しで高速成形を行う場合には材料延性 のひずみ速度依存性も成形性に大きく影響するようになる.

(3) 局所加熱逐次張出し成形においては加熱による変形抵抗低下の効果により成形品の残留応力が大幅に低下する. とくに AZ31 板材のレーザ援用局所加熱逐次張出しでは残留応力がほとんど生じておらず,成形部の形状凍結性は高いと考えられる.

(4) 四角錐(台)成形品の斜面部には局所加熱温度にかかわ りなく隆起による形状不良が生じることがある.この現象の対 策を含め,成形品の形状精度向上に関しては今後も実験と数 値解析により検討を続ける必要がある.

なお、本研究では他にチタン板の成形実験にも着手し、成 形性向上メカニズム検討のため A5083 板、AZ31 板の温間引 張曲げ・曲げ戻し実験も行っているが、未だ十分な成果が出 ていないことと紙面の制約により割愛した.

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の平成23年度一般研究 開発助成(AF-2011030)を受けて行ったものである.なお,研 究の一部は広島県産業科学技術研究所プロジェクト「レーザ 熱源を利用した高機能難加工材の先端加工システムの研究 開発(平成23~25年度)」の支援を受けた.ここに記して謝意 を表す.また,本研究の遂行にあたりご助言をいただいた広 島大学吉田総仁教授,供試材に関してご協力いただいた弓 削商船高専(当時)中哲夫教授,レーザ装置に関してご指導・ ご協力いただいた広島大学篠崎賢二教授,山本元道准教授, 門井浩太助教,実験遂行に多大な協力をいただいた広島大 学大学院生の岩崎大地君,川畑慶太君に謝意を表す.

参考文献

- 1) J.R. Duflou, B. Callebaut, J. Verbert and H. De Baerdemaeker: Annals of the CIRP, **56** (2007), 273-276.
- J.R. Duflou, B. Callebaut, J. Verbert and H. De Baerdemaeker: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48-5 (2008), 543-549.
- 3)田中繁一·中村保·早川邦夫·中村英雄·本村一朗:第59 回塑性加工連合講演会講演論文集,(2008),19-20.
- 4) 鈴木信行・佐野利幸: 塑性と加工, 52-604 (2011), 579-583.
- 5) A. Göttmann, J. Diettrich, G. Bergweiler, M. Bambach, G. Hirt, P. Loosen and R. Poprawe: Production Engineering -Research and Development, 5-3 (2011), 263-271.
- 6) R. Hino, F. Yoshida, N. Nagaishi and T. Naka: International Journal of Modern Physics B, **22**-31/32 (2008), 6082-6087.
- 7) R. Hino, N. Nagaishi, Y. Yamamoto, T. Naka and F. Yoshida: Steel Research International, **81-**9 (2010), 946-949.
- 8)日野隆太郎·吉田総仁: 塑性と加工, **51-5**91 (2010), 297-301.
- 9) J.-J. Park and Y.-H. Kim: Journal of Materials Processing Technology, **140**-1/3 (2003), 447-453.