



R. Hino

動的局所加熱逐次張出しによる 軽量・難成形板材の成形加工

日野 隆太郎*

1. はじめに

マグネシウム合金板に代表される軽量板材は常温プレス成形が困難な難成形板材であることが多く、これらの成形にはしばしば温間成形が用いられる。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。このインクリメンタルフォーミングに温間成形の機能を付与できれば難成形板材の多品種少量成形に適した技術になると考えられ、近年は加熱インクリメンタルフォーミングによるチタン合金板などの成形加工を試みた研究事例^{1)~5)}が国内外で見られるようになった。

筆者らは、軽量・難成形板材の多品種少量成形技術として、板材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」を開発することを目指して研究を進めてきた^{6)~8)}。本報告では、アルミニウム-マグネシウム合金板やマグネシウム合金板など、常温プレス成形が難しい軽量・難成形板材を対象とした工具加熱型およびレーザー援用局所加熱型の逐次張出し成形実験結果を紹介する。またこれらの実験結果に基づいて板材局所加熱温度、工具速度といった各種条件が成形限界および残留応力、成形品形状凍結性に及ぼす影響を明らかにし、動的局所加熱逐次張出しにおける成形特性に関して現在までに得られた知見を述べる。

2. 実験方法

2.1 実験装置の概要

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ー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にそれぞれ示す。

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 blanks 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。

レーザー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）のワークテーブル上に blank ホルダが、主軸ヘッドに成形工具とレーザー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、blank は図2の左方向に逐次張り出される。レーザー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 blank の成形部表面（工具接触面の反対側）をレーザー照射により局所加熱しつつ、逐次張出し成形を行うことができる。また blank とレーザーヘッド間の距離を変化させることでレーザーのデフォーカス（焦点外し距離）を調節することができ、これによりレーザースポット径（blank 加熱範囲）が調節できる。前述の工具加熱型

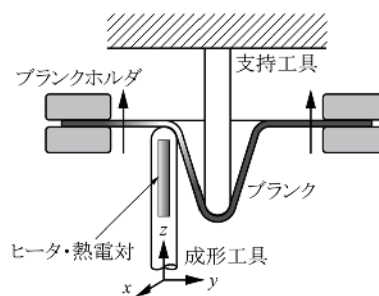


図1 工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成形装置概略図

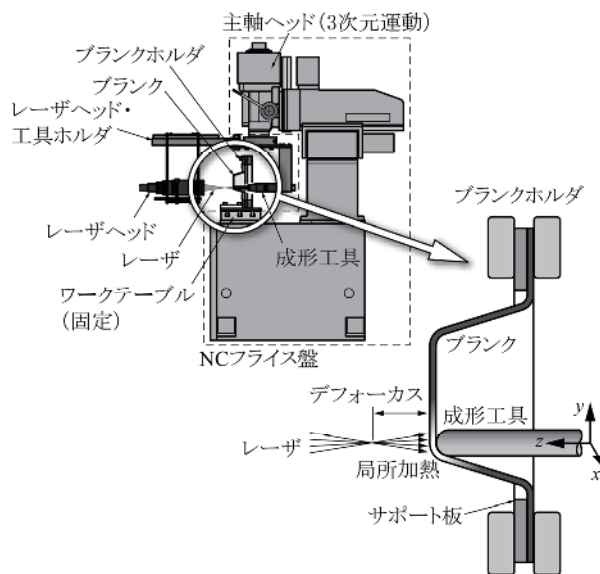


図2 レーザー援用局所加熱逐次張出し成形装置概略図

* 広島大学大学院工学研究院 准教授

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 Laserline GmbH 製ファイバー付き半導体レーザシステム (LDF6000-40, 最大出力 6 kW) を使用した。ファイバーコア径は 0.4 mm, レーザヘッド部の集光レンズの焦点距離は 100 mm, レーザスポットは円形である。

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 (250 mm×250 mm, 板厚 1 mm) 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。本実験では成形目標形状を底面半径 50 mm の円錐および底辺長さ 100 mm の四角錐 (台) とした。成形条件は, 工具内ヒータ温度を室温 (RT), 300, 450, 600°C の 4 条件, 工具速度を 1, 4, 8 mm·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 1 mm 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。

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 (170 mm×170 mm, 板厚 0.78 mm) を使用し, 成形目標形状は上面半径 10 mm, 底面半径 50 mm の円錐台形とした。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 1 mm としている (図 3(b)参照)。工具速度は 480, 4000 mm·min⁻¹, レーザ出力は 0~950 W, デフォーカスは 25, 50 mm, レーザ照射角は板面法線に対して 5° である。工具-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 (バックングプレート) を使用した。

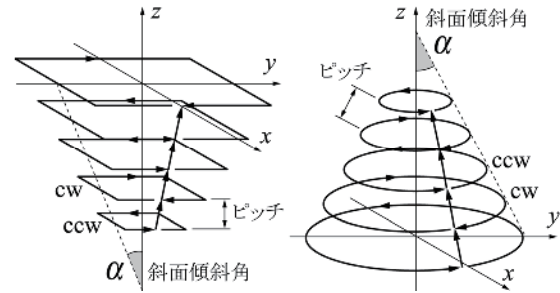
2.4 温度測定実験

成形実験に先立ち, 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した。板材表面 (成形工具が接触していない面) 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に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. 実験結果および考察

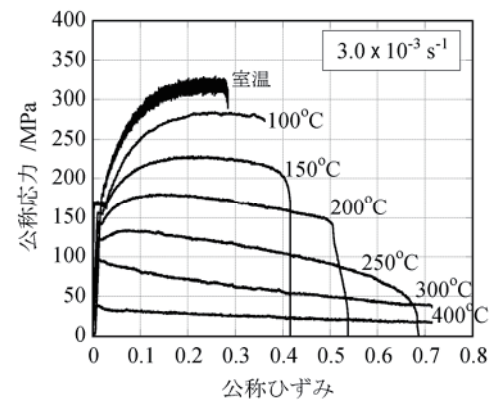
3.1 供試材の機械的特性

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おいて供試材の単軸引張試験を行った。その結果を

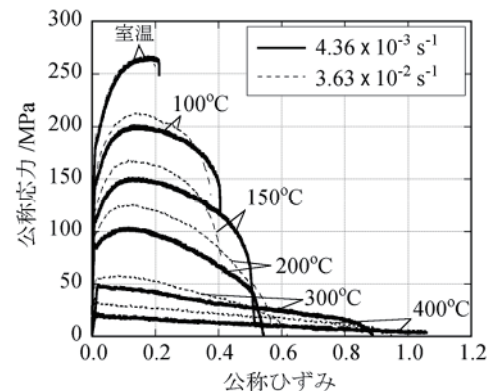


(a) 四角錐 (台) 逐次逆張出し (b) 円錐台逐次張出し

図 3 成形工具経路概略図



(a) A5083 板材



(b) AZ31 板材

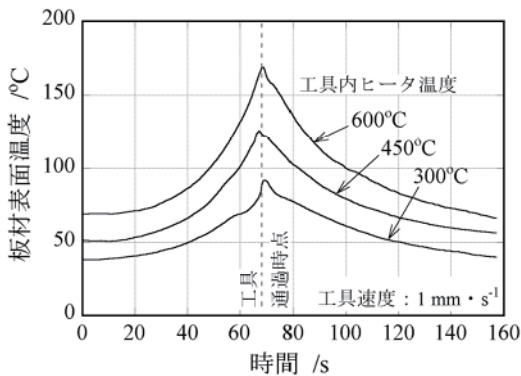
図 4 種々の温度における供試材の応力-ひずみ曲線

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 (おおむね 300°C 以上) では延性のひずみ速度依存性が顕著になる。

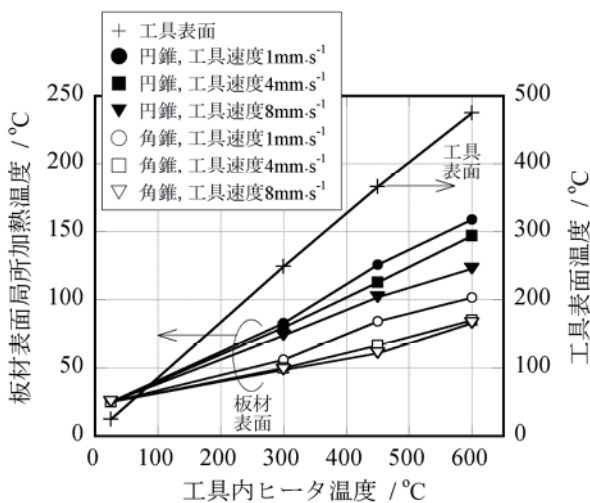
3.2 局所加熱温度

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温度の経時変化の実測例である。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を板材表面局所加熱温度とみな



(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

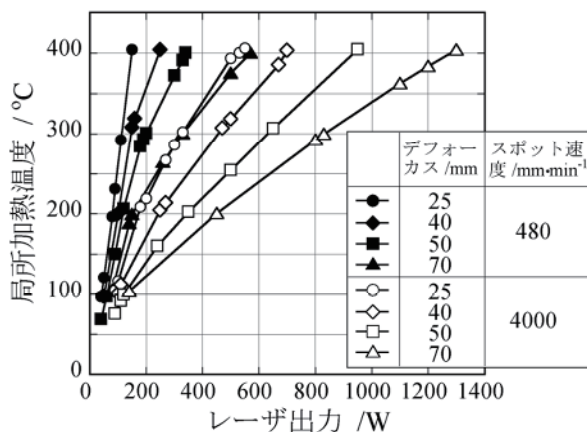


図6 AZ31板のレーザ援用動的局所加熱におけるレーザ出力と板材表面局所加熱温度の関係

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 h 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°Cまでのヒータ温度、工具速度1, 4, 8 mm/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が局所加熱温度は低くなっている。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成形品表面積の方が大きく、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る。レーザ加熱の場合は急速加熱が可能のため、4000 mm/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 成形性に及ぼす成形条件の影響

インクリメンタルフォーミングにおいては成形品斜面部が平面ひずみ状態(工具周回方向のひずみ=0)となり、初期板厚 t_0 、成形品斜面部板厚 t と斜面傾斜角 α (図3参照)の間にサイン則と呼ばれる関係($t = t_0 \sin \alpha$)が成立する。このサイン則は局所加熱逐次(逆)張出しでも成立することが本研究で確かめられている。サイン則より、円錐・四角錐成形品の斜面傾斜角 α 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斜面傾斜角 α を徐々に小さくしながら繰り返し成形を行い、破断せずに成形可能な最小の角度 α を見出した。こ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円錐成形および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。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

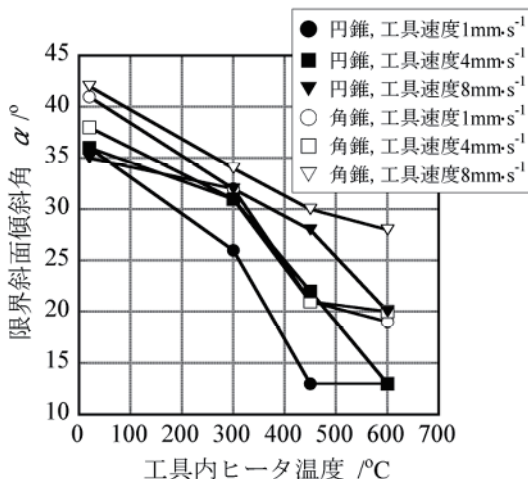


図 7 A5083 板の工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成形における工具ヒータ温度と限界斜面傾斜角の関係

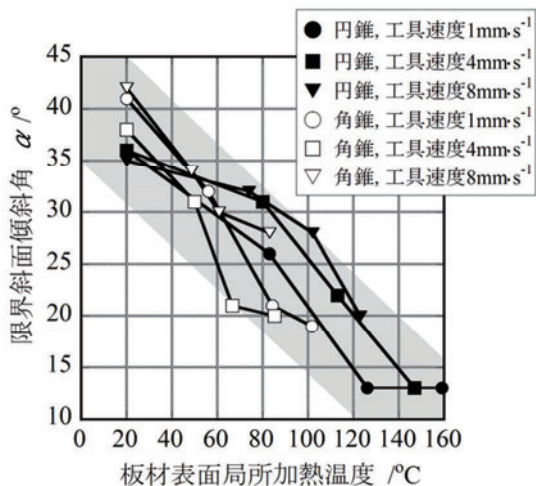


図 8 A5083 板の工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成形における板材局所加熱温度と限界斜面傾斜角の関係

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 に見られた凹錐・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°C 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 A5083 板材の成形限界向上の面では，板材表面温度約 140°C が最適加熱条件となる．

一方，AZ31 板材のレーザー援用局所加熱逐次張出し実験

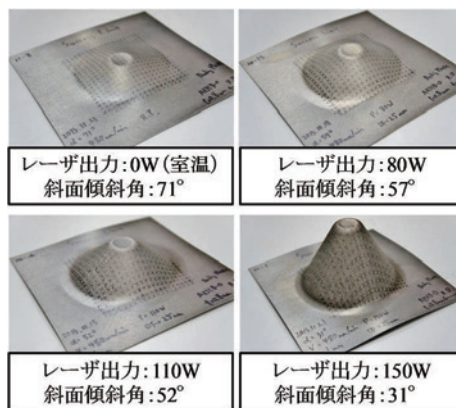


図 9 AZ31 板のレーザー援用局所加熱逐次張出し成形品の例（工具速度 480 mm・min⁻¹，デフォーカス 25 mm）

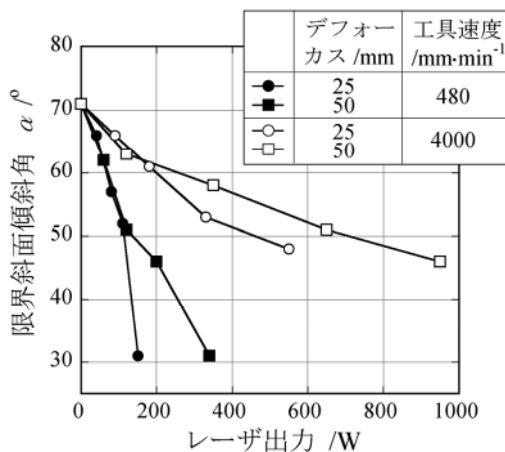


図 10 AZ31 板のレーザー援用局所加熱逐次張出し成形におけるレーザー出力と限界斜面傾斜角の関係

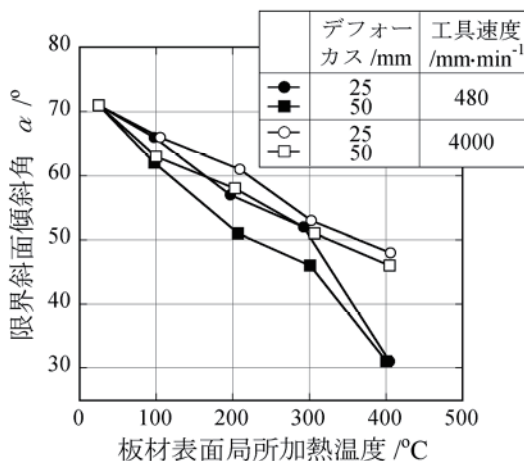


図 11 AZ31 板のレーザー援用局所加熱逐次張出し成形における板材局所加熱温度と限界斜面傾斜角の関係

における凹錐台成形品の例を図 9 に示す．これらは工具速度 480 mm・min⁻¹，デフォーカス 25 mm で成形されたもの

である。室温ではほとんど成形できない 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 10 には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 11 は図 10 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°C 以下ではそれらの影響はさほど大きくはない。一方、400°C 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°C 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°C 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°C 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。

なお、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 4000 mm・min⁻¹、工具押込みピッチ 1 mm で成形する場合は 2 分 30 秒程度であった。

3.4 成形品の残留応力と形状凍結性

成形品のスプリングバック低減、形状凍結性向上のためには残留応力を減少させることが重要である。本研究では図 12 に示す方法で残留応力レベルを間接的に評価した。すなわち、円錐（台）成形品斜面部から幅 2~3 mm 程度の帯板やリングをワイヤカットで切り出し、リングについてはその 1 カ所を切断する。すると残留応力の解放により帯板には反りが生じ、リングには開きが生じる。このときの曲率変化 $\Delta\kappa_1$ 、 $\Delta\kappa_2$ が残留応力（厳密には残留曲げモーメント）レベルを表すと考えられる。

図 13 に工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成形における曲率変化 $\Delta\kappa_1$ 、 $\Delta\kappa_2$ の測定例を示す。これは種々の工具ヒータ温度において成形された A5083 円錐成形品（工具速度 1 mm・s⁻¹、斜面傾斜角 40°）についての曲率変化測定結果である。この結果から、局所加熱が成形品の残留応力低減、形状凍結性の向上に大きな効果を持つことがわかる。局所加熱によって成形工具接触部（=変形部）の板材温度が上昇し、変形抵抗の温度依存性（図 4 参照）が残留応力の低下をもたらす、その結果として形状凍結性が向上するものと考えられる。また、加熱温度がある程度以上高い場合には応力緩和、回復、再結晶といった他の要因が影響を及ぼしている可能性も考えられる。工具速度 4, 8 mm・s⁻¹ の場合もほぼ同様の結果になるが、加熱温度によっては工具速度が大きくなると形状凍結性が若干悪化する傾向が見られた。

一方、図 14 には AZ31 板材のレーザ援用局所加熱逐次

張出しによる円錐台成形品から切り出された帯板小片の変形の様子を示す。斜面傾斜角 α を 55° に固定し、工具速度 480, 4000 mm・min⁻¹、レーザ出力 110~950 W、デフォーカス 25, 50 mm の合計 9 条件で円錐台成形を行い、それらの成形品から切り出された帯板の側面写真を撮影した。

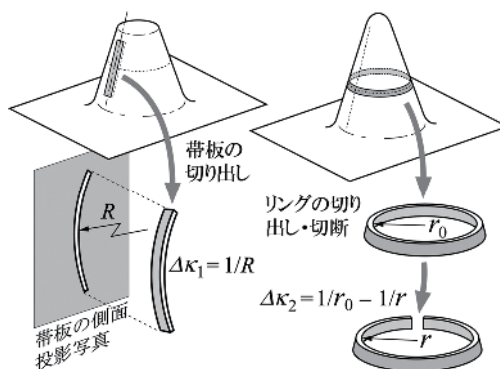


図 12 円錐（台）成形品の斜面部から切り出された帯板・リングの曲率変化測定による間接的残留応力評価

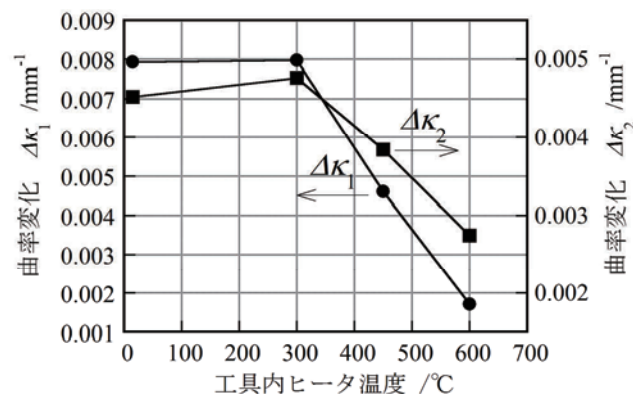


図 13 A5083 円錐成形品から切り出された帯板・リングの曲率変化 $\Delta\kappa_1$ 、 $\Delta\kappa_2$ に及ぼす局所加熱の効果

工具速度	デフォーカス				
	25mm		50mm		
480 mm・min ⁻¹	①	②	③	④	⑤
	110W	150W	120W	200W	340W
	[Photographs of strips]				
	[Photographs of strips]				
	[Photographs of strips]				
4000 mm・min ⁻¹	⑥	⑦	⑧	⑨	
	330W	550W	650W	950W	
	[Photographs of strips]				
	[Photographs of strips]				

図 14 AZ31 板のレーザ援用局所加熱逐次張出し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

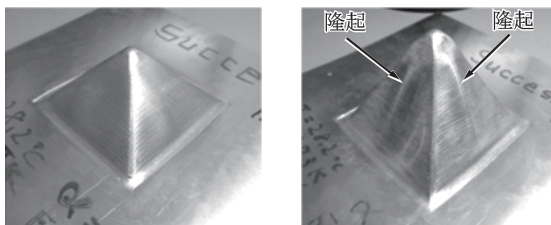
いずれの帯板もほとんど反りを生じておらず、曲率変化 $\Delta\kappa_1$ は最大でも 0.0033 mm^{-1} であった。この結果から局所加熱の効果によりAZ31成形品には残留応力がほとんど生じておらず、成形部の形状凍結性は高いと考えられる。

3.5 成形品の形状精度不良

前節にて局所加熱逐次（逆）張出し成形品における形状凍結性は高いと述べたが、その一方でフランジ部のたわみや四角錐成形品の斜面部隆起といった、逐次（逆）張出し成形特有の現象に起因する形状精度不良も観察された。

形状精度不良の具体例として、図15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、成形品形状が目標形状、すなわち工具経路の包絡面形状とは大きく異なることがわかる。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16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くなることがわかる。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。

有限要素解析ソフトウェアLS-DYNAによる成形シミュレーションの結果、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と考えられること、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低減できることなどが示され



(a) ヒータ温度：室温，
工具速度： $8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，
斜面傾斜角： 42°

(b) ヒータ温度： 600°C ，
工具速度： $8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，
斜面傾斜角： 28°

図15 A5083板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形状不良の例

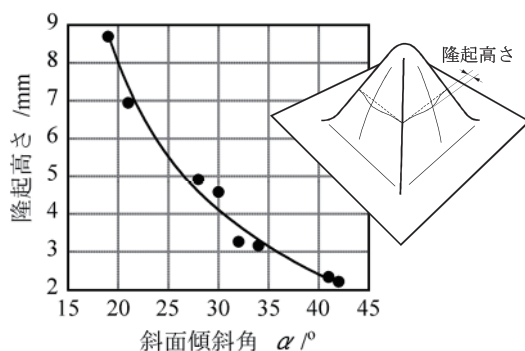


図16 A5083板の工具加熱型局所加熱逐次逆張出し成形における四角錐成形品斜面部の隆起高さ測定結果

たが、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。

4. おわりに

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ー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ー加熱の場合）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。レーザー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影響を与える。

(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などにより成形品の残留応力が大幅に低下する。とくにAZ31板材のレーザー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) フランジ部のたわみや四角錐成形品の斜面部隆起といった、逐次（逆）張出し成形特有の現象に起因する形状精度不良が生じる。これら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の検討を要する。

本研究では引き続いてチタン板の成形実験にも着手している。また今後は成形性向上・残留応力低減・形状精度不良のメカニズムの更なる調査、これと関連した成形後の材料組織・材料特性の調査、動的局所加熱逐次（逆）張出し成形の数値シミュレーションの確立とそれを利用した最適成形条件の検討、より複雑な形状の成形トライなども行いたいと考えている。

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）の補助を受けた。また研究の一部は広島県産業科学技術研究所プロジェクト「レーザー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。

参考文献

- 1) J.R. Duflou, B. Callebaut, J. Verbert and H. De Baerdemaeker: *Annals of the CIRP*, **56** (2007), 273-276.
- 2) 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*, **51-591** (2010), 297-301.