

高周波およびレーザーを用いた部分的な組織制御による 強度とプレス成形性の両立

大阪産業技術研究所 加工成形研究部

研究員 坪井 瑞記

(2020 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2020037-C2)

キーワード：プレス成形，レーザー熱処理，組織制御

1. 研究の目的と背景

近年、自動車の軽量化および安全性向上のため、プレス成形において高張力鋼板の適用が拡大している。しかし、一般的に強度と成形性の両立は困難であり、強度の上昇に伴って成形性が低下するといった問題がある¹⁾。今後のさらなる高強度化の流れに対応するために、強度と成形性に優れた材料の開発が強く望まれている。強度と成形性のような、トレードオフの性質が共存し得る材料として傾斜機能材料が注目されている。傾斜機能材料とは、「空間的に1つの機能から他の機能へと連続的または段階的に変化する一体の材料」と定義され、基本的に組成分布を制御することで性質を変化させたものが多い²⁾。一方で、鉄鋼材料には材料特性の異なる様々な変態組織が存在するため、組織制御によって性質を変化させることが可能である³⁾。

本研究では、高周波やレーザーといった局所加熱の可能な熱源を用いて、組織を制御することで、部分的に材料特性を変化させ、成形品強度やプレス成形性を向上させる技術の開発に取り組んだ。具体的には、成形前の軟鋼板に対して局所焼入れを行うことで、部分的に高強度化した試料(部分高強度材)を作製した。次に、部分高強度材の深絞り成形を行い、限界絞り比や板厚分布の測定により成形性におよぼす部分高強度化の影響を調べた。また、深絞り成形品の圧縮荷重を評価することで、成形品強度におよぼす部分高強度化の影響を明らかにした。本稿では、レーザー局所焼入れを施した試料を用いて実験を行った結果について述べる。

2. 実験方法

2・1 レーザーを用いた組織制御による部分高強度化

供試材は公称板厚 1.0 mm の冷間圧延鋼板 (SPCC) であり、化学成分は C: 0.03, Si: 0.01, Mn: 0.18, P: 0.01, S: 0.005, Fe: Bal. (wt%) である。図 1 に示すように、銅製の水冷ブロックの上に固定した試料に対して、レーザーを照射し、局所焼入れを行った。本研究で用いたレーザーは、最大出力 2 kW の半導体レーザーであり、加工点におけるビームスポットは 5 mm×5 mm の矩形形状である。レーザー照射条件を表 1 にまとめる。φ80 mm の軟鋼板において、深絞り成形用パンチ肩部近傍を高強度化するため、出力 960 W、速度 12 mm/s で φ40 mm の円を描くようにレーザーを 1 周照射し、局所焼入れを行った (1 lap 材)。また、種々の高強度部幅

を有する試料の作製を目的として、位置を少しずつずらし複数回レーザーを照射した。2 laps 材は φ36/44 mm の円弧に沿って計 2 周、3 laps 材は φ32/40/48 mm の円弧に沿って計 3 周レーザーを照射した試料である。レーザー局所焼入れによる高強度化の有無を確認するため、断面の光学顕微鏡観察およびピッカース硬さ測定を行った。

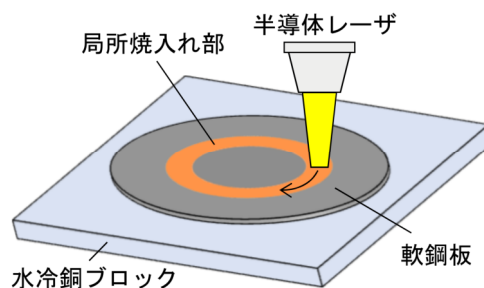


図 1 レーザー局所焼入れの模式図

表 1 レーザー照射条件

出力: 960 W, 速度: 12 mm/s		
1 lap	2 laps	3 laps
φ40 mm	φ36/44 mm	φ32/40/48 mm

2・2 成形性におよぼす部分高強度化の影響

受け入れまま材と種々の条件で局所焼入れを施した試料 (1 lap 材, 2 laps 材, 3 laps 材) の深絞り成形実験を行い、限界絞り比を評価した。深絞り成形実験の模式図を図 2 に示す。工具には平頭パンチ (φ40 mm, R4) とダイ (φ42.5, R8) を使い、成形速度を 3 mm/s、しわ押さえ力を 10 kN として、ストローク 30 mm まで成形した。潤滑剤には動粘度 25 mm²/s (40 C) のベースオイルを使用した。さらに、光学式プレス成形解析システム ARGUS (GOM 社製) により、受け入れまま材と 3 laps 材の成形後の板厚分布を算出した。光学式プレス成形解析とは、成形前の試料表面

にマークしたドット間の距離が、成形後どの程度変化したかを取得し、成形時に導入された局所的な面内ひずみを測定する手法である⁴⁵⁾。この手法を用いて、成形中に導入された面内ひずみを測定し、体積一定条件式に基づいて板厚方向のひずみに換算することで、板厚分布を算出した。

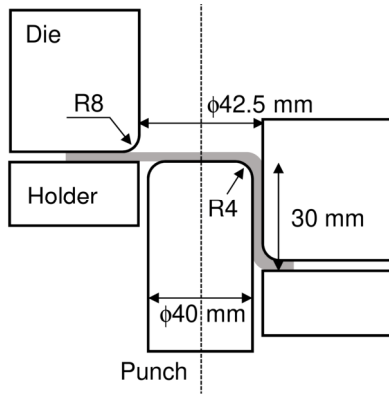


図2 深絞り成形実験の模式図

2・3 成形品強度におよぼす部分高強度化の影響

圧縮試験により、深絞り成形品強度におよぼす部分高強度化の影響を評価した。底部から22 mmの高さで成形品をカットし、耳を取り除いた後、クロスヘッド速度5 mm/minで圧縮試験を行った。さらに、圧縮試験中の変形挙動を3D変形解析システムARAMIS (GOM社製)により解析した。この解析システムは3次元デジタル画像相関法(3D Digital Image Correlation: 以下、3D-DIC)の原理に基づいたもので、試験片表面にスプレーで塗布したランダム

パターンが変形に伴ってどのように変化したかを、試験中に撮影した連続画像をもとに解析し、局所的な変形挙動を調べることができる⁴⁵⁾。この手法を用いて、圧縮に伴うひずみ分布の変化を可視化した。

3. 実験結果

3・1 レーザを用いた組織制御による部分高強度化

図3に1 lap材の組織観察結果を示す。図3(a)はレーザー照射部外、(b)はレーザー照射部中央の光学顕微鏡写真である。レーザー照射部外は、受け入れまま材と同様のフェライト組織であったのに対して、照射部中央はマルテンサイト組織となっており、局所的に組織が変化したことがわかる。図4は(a)1 lap材、(b)2 laps材、(c)3 laps材の光学顕微鏡写真と(d)対応するビッカース硬さ分布である。1 lap材の硬さ分布を見ると、受け入れまま材の104 HVと比較して、レーザー照射部中央では240 HV程度、照射部縁では180 HV程度と、部分的に高強度化しており、その高強度部幅はレーザースポットサイズと同等の5.4 mmであった。2 laps材、3 laps材についても、1 lap材と同様に部分的に高強度化しており、その高強度部幅はそれぞれ9.0 mm、13.5 mmに

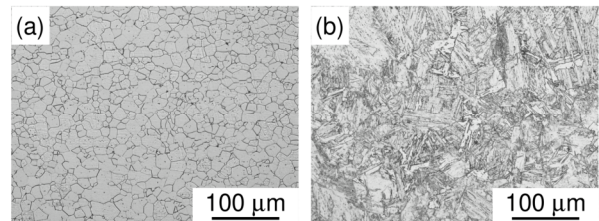


図3 (a)レーザー照射部外および(b)レーザー照射部中央の光学顕微鏡写真

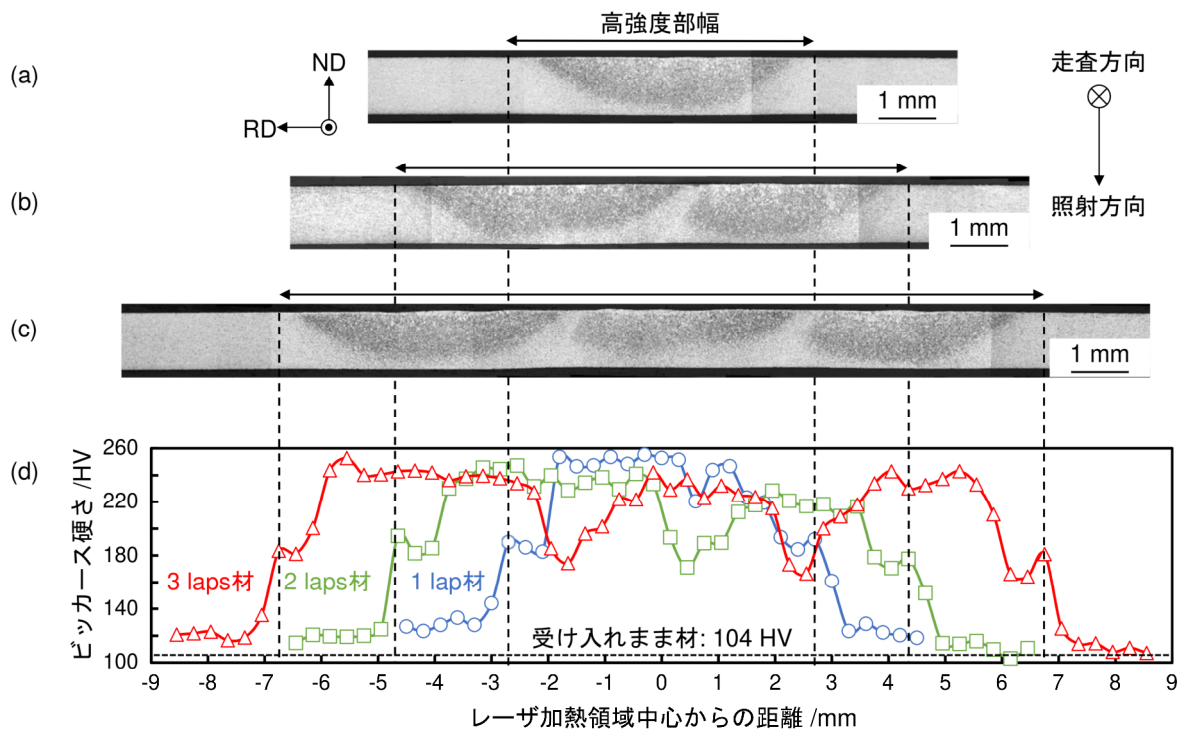


図4 局所焼入れ材 ((a)1 lap材、(b)2 laps材、(c)3 laps材)の光学顕微鏡写真と(d)対応するビッカース硬さ分布

拡大した。今回の照射条件では、複数回照射する際に照射領域が 1 mm 程度重なり、再度加熱された結果、フェライトが生じた領域が見られた。しかし、フェライトが生じた領域でもビッカース硬さは 180 HV 程度と受け入れまま材より高強度であり、レーザ照射部と照射部外で強度差は保たれている。レーザ局所焼入れによって、パンチ R 部近傍に種々の高強度部幅を有する試料を作製できた。以下では、1 lap 材、2 laps 材、3 laps 材をまとめて部分高強度材と呼ぶ。

3・2 成形性におよぼす部分高強度化の影響

φ80 ~ 90 mm まで 2 mm ずつブランク径を変えた試料を用意し、各 3 回深絞り成形を行うことで、受け入れまま材と部分高強度材の限界絞り比を調べた。絞り比に対して割れの有無を整理した結果を図 5 に示す。×は 2/3 個以上の割れ、△は 1/3 個の割れ、○は 3 個とも割れが生じなかったことを意味する。受け入れまま材は絞り比 2.15 からパンチ肩部での割れが見られたが、部分高強度材は絞り比 2.25 でも破断することなく成形できた。以上より、パンチ肩部の高強度化によって限界絞り比が向上したと言える。

図 6 は、光学式プレス成形解析によって解析したφ80 mm の受け入れまま材と 3 laps 材の板厚減少カウンター図である。受け入れまま材では、パンチ肩部において成形後の板厚が顕著に減少していることがわかる。その一方で、パンチ肩部を高強度化した 3 laps 材では、板厚の減少が抑制された。図 7 に、板厚減少カウンター図から出力した圧延方向から 45°方向の板厚分布を示す。図中に肩部の板厚分布を拡大したものを示しているが、受け入れまま材と比較して、3 laps 材ではパンチ肩部における板厚減少が抑制されたことが確認できる。深絞り成形において、フランジ部の縮み変形を進行させるだけの荷重をパンチ肩部で支えることができれば、成形は可能となる。深絞り成形性を向上させる 1 つの指針として、パンチ肩部とフランジ部で強度差を与えることが提案されており、ステンレスの周辺加熱絞り⁶⁾やアルミニウムの部分溶体化処理^{7,9)}などフランジ部を軟化させた報告がある。本研究においては、フランジ部に対してパンチ肩部をより高強度とすることにより、ブランク径の増加に伴う変形荷重の増加を支えることができたため、板厚減少が抑制され、成形性の指標である限界絞り比が向上したと考えられる。

φ80 mm の受け入れまま材および部分高強度材の成形荷重-ストローク曲線を図 8 に示す。部分高強度材の深絞り成形初期では、高強度化されたパンチ肩部がパンチ形状に沿った曲げを受けるため、成形荷重は受け入れまま材と比較して高くなった。また、深絞り成形後期では、部分高強度部の変形が完了しており、受け入れままの強度であるフランジ部が変形するだけなので、成形荷重は受け入れまま材と部分高強度材でほぼ等しい。高強度部幅が大きくなるほど成形時の最大荷重は増加しているが、3 laps 材と受け入れまま材で 4 kN 程度の差異しか見られなかった。

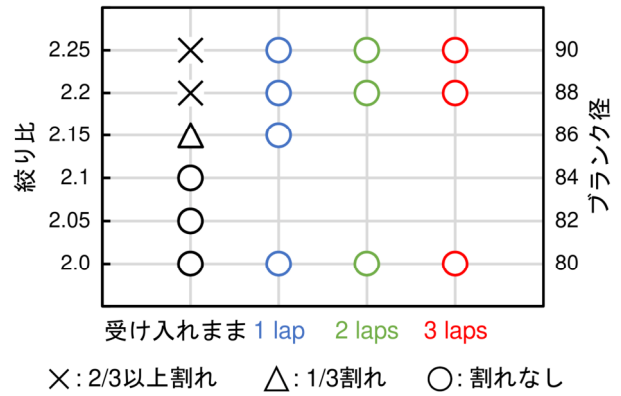


図 5 絞り比と割れの関係

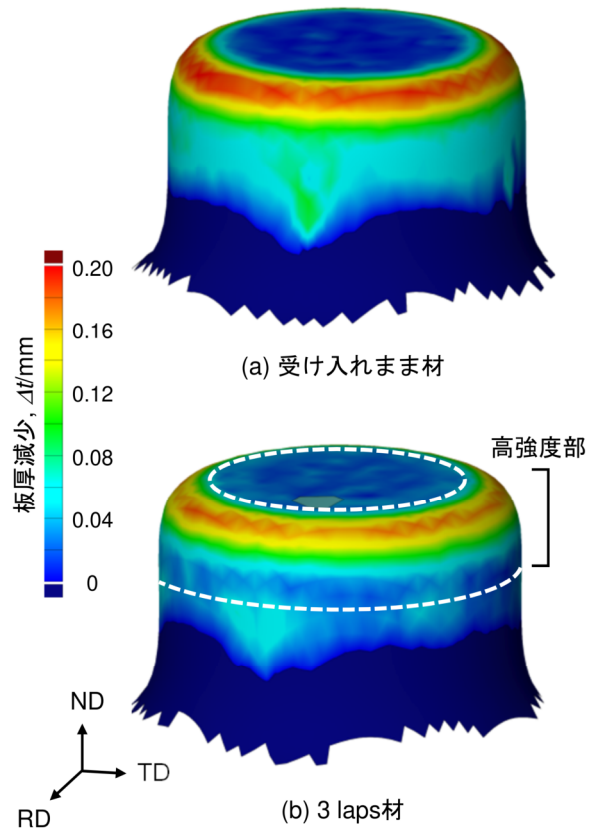


図 6 (a)受け入れまま材と(b)3 laps 材の板厚減少

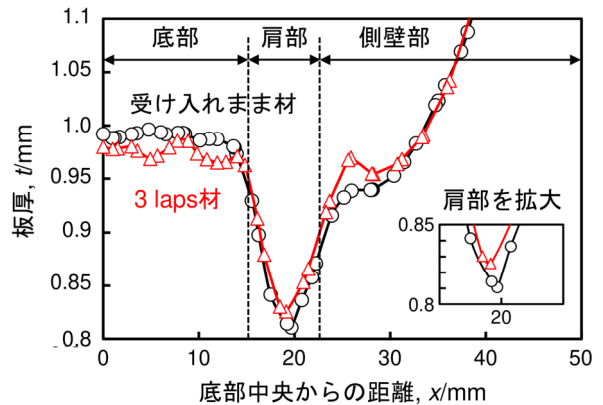


図 7 受け入れまま材と 3 laps 材の板厚分布 (45°方向)

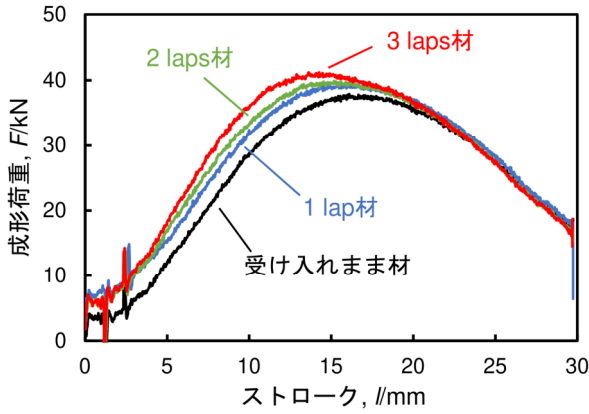


図8 成形荷重-ストローク曲線

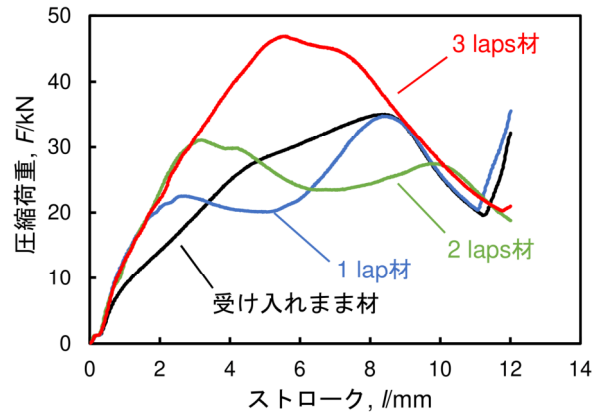


図9 圧縮試験結果

3・3 成形品強度におよぼす部分高強度化の影響

受け入れまま材と部分高強度材の成形品強度を、圧縮試験により評価した。得られた圧縮荷重-変位曲線を図9に示す。部分高強度材では、受け入れまま材と比較して、圧縮荷重の立ち上がりの傾きが増加した。最大圧縮荷重は、3 laps材>受け入れまま材=1 lap材>2 laps材であり、パンチ肩部の高強度幅の拡大が成形品強度の向上に寄与したとは言い難い。また、圧縮荷重-変位曲線の形状としては、圧縮荷重が単調増加する受け入れまま材と3 laps材、早期に荷重の低下が起きる1 lap材と2 laps材に分けられる。

部分高強度部と成形品強度の関係を圧縮変形挙動の観点から考察するため、3D-DICにより圧縮変形に伴う相当ひずみ分布の変化を可視化した。図10は、ストローク量

2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mmでの受け入れまま材と部分高強度材の相当ひずみ分布を示している。圧縮変形初期には、成形品のパンチ肩部が曲げ変形を受け、外側に張出していることがわかる。導入した高強度部がこの曲げ変形の抵抗となったため、部分高強度材では圧縮荷重の立ち上がりが増加したと考えられる。また、図中の○は、ストローク量6 mmにおける相当ひずみが最大の点(以下、評価点)を表しており、各ストローク量において評価点がどのように移動したかを追跡して表示している。受け入れまま材および3 laps材では、評価点の位置が圧縮変形の進行に伴って変化していることがわかる。その一方で、1 lap材は4 mm~6 mm間で、2 laps材は6 mm~8 mm間で評価点がほとんど動いておらず、相当ひずみが局所的に増大し

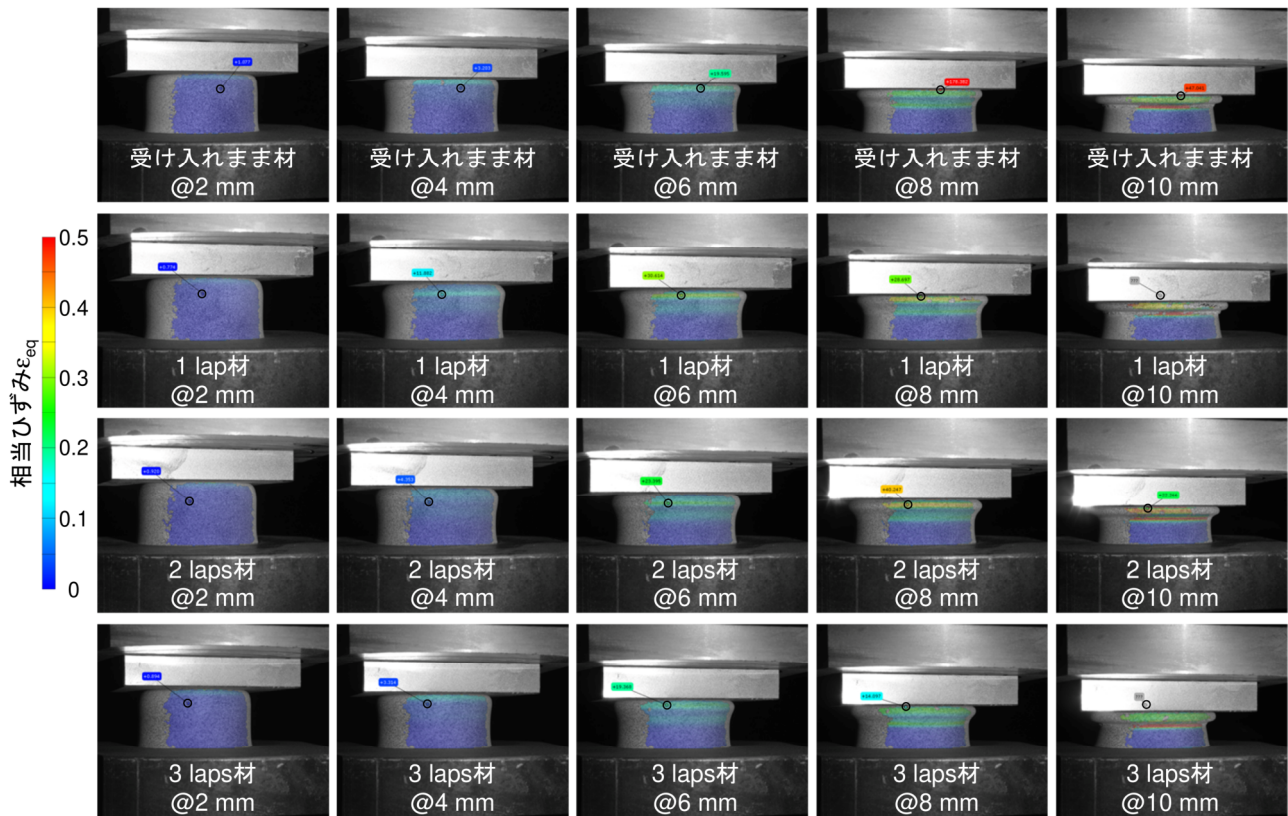


図10 圧縮変形に伴う相当ひずみ分布の変化

ている。このことは、圧縮変形において、曲げの支点が変わらないまま変形することを意味しており、その曲げの支点は高強度部-低強度部の境界に対応している。その結果、1 lap 材および2 laps 材では、導入した高強度部が圧縮変形の抵抗にならず、むしろ高強度部-低強度部の境界が曲げの支点となることで、圧縮荷重が早期に低下したと推測される。それに対して、3 laps 材では高強度部幅が広く、高強度部-低強度部の境界が曲げを受けるパンチ肩部から離れていたため、高強度部が曲げ変形の抵抗としてのみ働くことで、成形品強度が向上したと考えられる。

4. 結論

SPCC を供試材として、レーザを用いた部分的な高強度化が成形性および成形品強度におよぼす影響を調べた。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) レーザを用いて局所焼入れを行うことで、SPCC の部分的な高強度化を達成できた。さらに、レーザ照射位置をずらして複数回照射することで、種々の高強度部幅を有する試料を作製できた。
- 2) 部分高強度化によって、受け入れまま材で顕著な板厚の減少が見られたパンチ肩部の減肉が抑制され、限界絞り比を向上することができた。
- 3) 部分高強度材では、導入した高強度部が圧縮変形の抵抗となるため、圧縮荷重の立ち上がりの傾きが増加した。最大圧縮荷重は、3 laps 材>受け入れまま材=1 lap 材>2 laps 材であり、3 laps 材の成形品強度は受け入れまま材より向上していたが、1 lap 材および2 laps 材では、高強度部を導入したにもかかわらず、成形品強度は受け入れまま材以下

であった。このように、導入する高強度部幅により成形品の変形挙動が異なることが明らかとなった。この結果は、部分高強度部の配置を工夫することで、3 laps 材のように成形品強度を向上させる、1 lap 材と2 laps 材のように荷重の増加を伴わず変形が進行する (=衝撃エネルギー吸収能に優れる) など成形品に様々な機能を持たせられることを示唆している。

以上より、軟鋼板の部分高強度化によって、成形品強度を向上させつつ、プレス成形性も向上させることができた。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2020 年度奨励研究助成 (AF-2020037-C2) にて行った。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 高橋：ふえらむ, 7 (2002), 34.
- 2) 篠原：精密工学会誌, 83 (2017), 391.
- 3) 牧：ふえらむ, 13 (2008), 544.
- 4) 四宮・坪井：大阪産業技術研究所テクニカルシート, <https://www.orist.jp/content/files/technicalsheet/22-08.pdf>
- 5) 丸紅情報システムズ株式会社: 塑性と加工, 53 (2012), 917.
- 6) 渡部：塑性と加工, 33 (1992) 396.
- 7) F.Vollertsen・K.Lange : Annals of the CIRP, 47 (1998) 181.
- 8) 西脇・金武：軽金属, 55 (2005) 33.
- 9) M.Geiger・M.Merklein : Prod. Eng. Res. Devel., 3 (2009) 401.