

板成形における最適な高強度部配置の検討

大阪産業技術研究所 / 坪井瑞記

1. はじめに

近年、自動車の軽量化および安全性向上のため、部品の高強度化が求められるようになり、プレス成形においても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、強度の上昇に伴い成形性が低下することが知られている¹⁾。高張力鋼板の冷間成形では、低い成形性や大きな成形荷重、スプリングバックに起因する成形不良など問題が多い。今後のさらなる高強度化ニーズへの対応を見据え、成形プロセスに熱処理を組み合わせることで部品の高強度化を図る手法が注目されている²⁾。

例えば、熱間でプレス成形を行うと同時に金型内で焼入れを行うホットスタンプ³⁾は、材料が軟化する高温域で成形するため、成形性に優れ、成形荷重は小さいというメリットがある。また、金型で拘束したまま焼入れを行うことで、スプリングバックなどの成形不良はほとんど発生しない。しかし、金型内での冷却に時間がかかるため生産性が低く、大型の連続炉で加熱するため設備費・環境負荷が高いといったデメリットも存在する。本研究で対象とする成形前局所焼入れは、部品の性能上必要な箇所のみ高強度化する手法であり、成形性を確保しつつ成形品強度を向上させることができる。この手法は、加熱方法として高周波やレーザーを用いるため加熱時間が短く、生産性・環境負荷の観点で優位である。

本研究では、局所加熱の可能なレーザー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。

2. 目的

本研究開発助成においては、種々の高強度部配置を有する軟鋼板を作製し、実験・シミュレーションにより高強度部配置が成形性・成形品強度に与える影響を明らかにすることで、軟鋼板の成形性および成形品強度の向上に有効と考えられる高強度部配置を決定することを目的とする。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

本技術が実用化されれば、軟鋼板と同等以上の成形性を維持しながら、高張力鋼板に比肩する強度レベルの部品を成形できるため、ホットスタンプや高張力鋼板の冷間成形で問題となっている生産性の低さや成形不良を回避できる。また、深絞り以外の加工法への適用など幅広い応用も可能である。本研究では軟鋼板を対象としたが、780 MPa・980 MPa 級高張力鋼板といった焼入れ性の高い鋼板に局所焼入れを行うことで、1310 MPa・1470 MPa 級の強度レベルに達することが見込まれる。

4. 研究内容の詳細

4.1 レーザ局所焼入れによる部分高強度化

試料として軟鋼板（SPCC）の円形ブランクを用いた。公称板厚は 1.0 mm 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 の模式図に示すように、銅

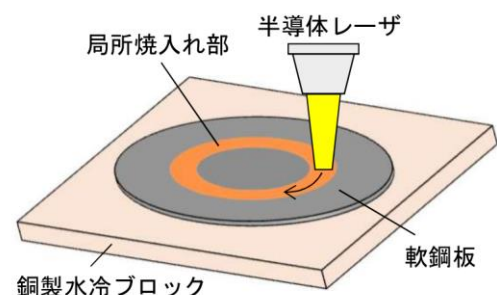
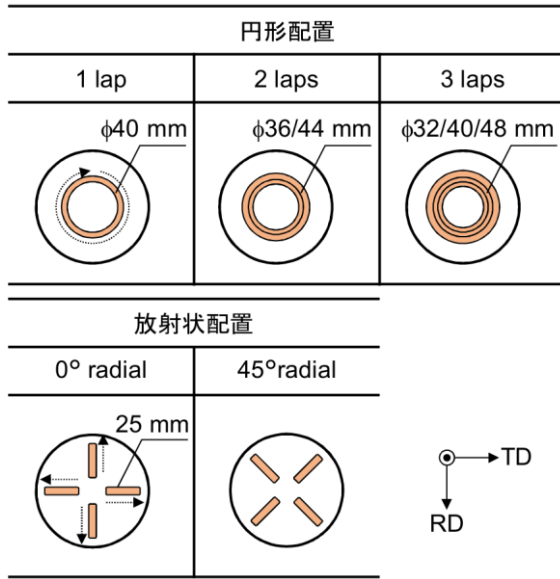


図 1 レーザ局所焼入れの模式図

表 1 レーザ照射経路



製の水冷ブロックの上に固定した試料に対して、出力 960 W、移動速度 12 mm/s の条件でレーザーを照射し、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。レーザー照射経路を表 1 にまとめる。軟鋼板において、深絞り成形用パンチ肩部近傍を円形に高強度化するため、 $\phi 40$ mm の円に沿ってレーザーを 1 周照射し、局所焼入れを行った (1 lap 材)。さらに、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て複数回レーザーを照射した。2 laps 材は $\phi 36/44$ mm の円に沿って計 2 周、3 laps 材は $\phi 32/40/48$ mm の円に沿って計 3 周レーザーを照射した試料である。また、試料中央から半径方向 10 ~ 35 mm の領域にレーザーを照射し、長さ 25 mm の高強度部を放射状に配置した。試料の異方性を考慮し、圧延方向を 0° 方向として 0°-90°-180°-270° の 4 方向に高強度部を配置した 0°radial 材、45°-135°-225°-315° の 4 方向に高強度部を配置した 45°radial 材を作製した。

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、試料断面の光学顕微鏡観察およびビッカース硬度測定を行った。図 2 に 1 lap 材の組織観察結果を示す。図 2(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、軟鋼板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

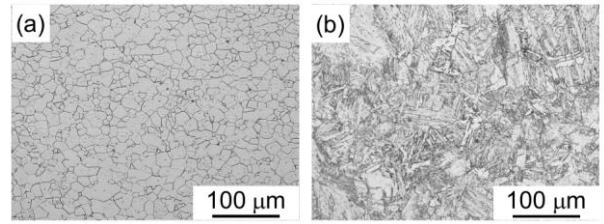


図 2 (a)レーザー照射部外および(b)レーザー照射部中央の光学顕微鏡写真

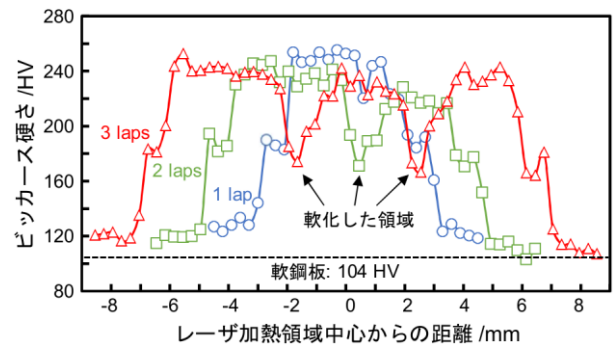


図 3 部分高強度材のビッカース硬度分布

なっており、局所的に組織が変化したことがわかる。図 3 はレーザー照射表面から深さ方向に 0.25 mm の位置におけるビッカース硬度分布である。1 lap 材の硬度分布を見ると、軟鋼板の 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、その高強度部幅はビーム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、それぞれ 9.0 mm、13.5 mm と種々の高強度部幅を有する試料を作製できた。今回の照射経路では、複数回照射する際に照射領域が 1 mm 程度重なるため、再度加熱された結果、軟化した領域が見られた。しかし、軟化した領域でもビッカース硬度は 180 HV 程度と軟鋼板より高強度であり、レーザー照射部と照射部外で強度差は保たれている。以降では、1 lap 材、2 laps 材、3 laps 材、0°radial 材、45°radial 材をまとめて部分高強度材と呼ぶ。

4. 2 部分高強度材の深絞り成形性

部分高強度材の深絞り成形性を限界絞り比により評価した。深絞り試験工具には SKD11 製の平頭パンチ ($\phi 40$ mm, R4) とダイ ($\phi 42.5$ mm, R8) を用い、成形速度を 3 mm/s、しわ抑え力を 10 kN とし、

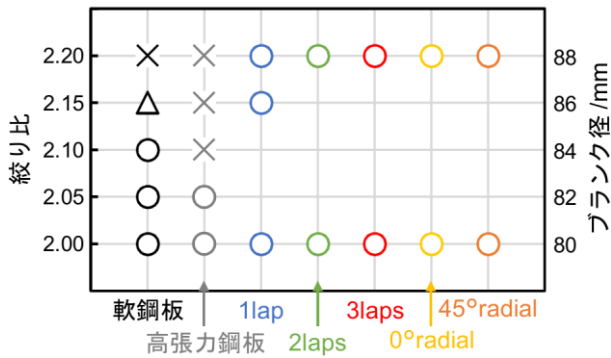


図 4 絞り比と割れの関係

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。ブランク径を変えた試料を各 3 回成形することで、絞り比に対する割れの有無を整理した結果を図 4 に示す。比較のため、軟鋼板と高張力鋼板 (JSC590R) の結果も記載している。×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。軟鋼板は絞り比 2.15 からパンチ肩部での割れが見られたが、部分高強度材は破断することなく成形できた。また、高張力鋼板の限界絞り比は 2.05 と小さく、成形性が最も低かった。

図 5 は光学式プレス成形解析システム ARGUS によって解析したφ80 mm の軟鋼板と 3 laps 材の板厚減少コンター図である。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⁴⁾。軟鋼板では、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のに対して、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ことがわかる。図 6 に板厚減少コンター図から出力した 45°方向の板厚分布を示す。軟鋼板と比較して、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を確認できる。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。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⁵⁾やアルミニウムの部分溶体化処理⁶⁻⁸⁾などフランジ部を軟化させた報告がある。本研究では、ブランク径の増加に伴う変形荷重の増加を、パンチ肩部の部分高強度化に

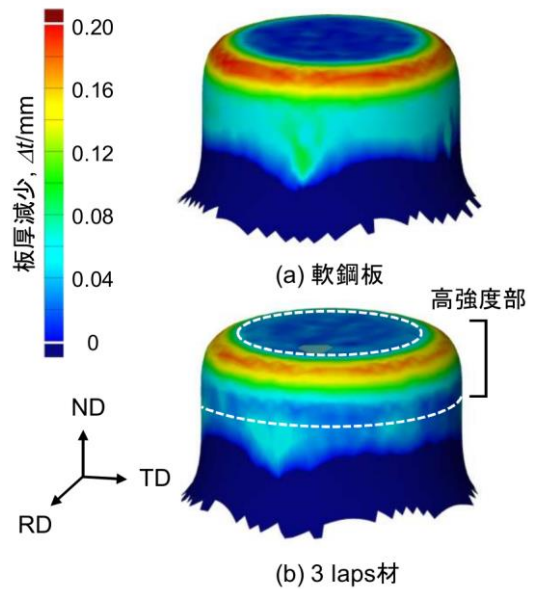


図 5 (a)軟鋼板と(b)3 laps 材の板厚減少

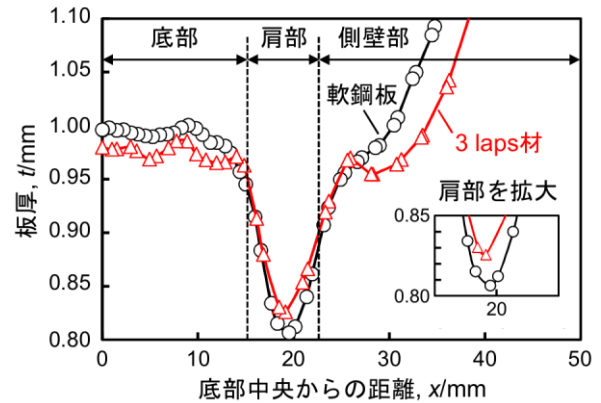


図 6 軟鋼板と 3 laps 材の板厚分布 (45°方向)

よって支えることができたため、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⁹⁾。

パンチ肩部を円形に高強度化した試料だけでなく、放射状に高強度部を配置した試料でも成形性が向上した。ARGUS によって測定したφ80 mm の 0°radial 材、45°radial 材の板厚分布を図 7 に示す。図 7(a), (b), (c) はそれぞれ 0°方向、45°方向、90°方向の板厚分布である。0°-90°-180°-270°の 4 方向に高強度部を配置した 0°radial 材では高強度化していない 45°方向の板厚が増加しており、その一方で、45°-135°-225°-315°の 4 方向に高強度部を配置した 45°radial 材では高強度化していない 0°方向、90°方向の板厚が増加していることがわかる。このように、成形荷重を担うパンチ肩部の一部に高強度部を配置することで、高強度部以外の板厚減少が抑制されるという知見が得られた。

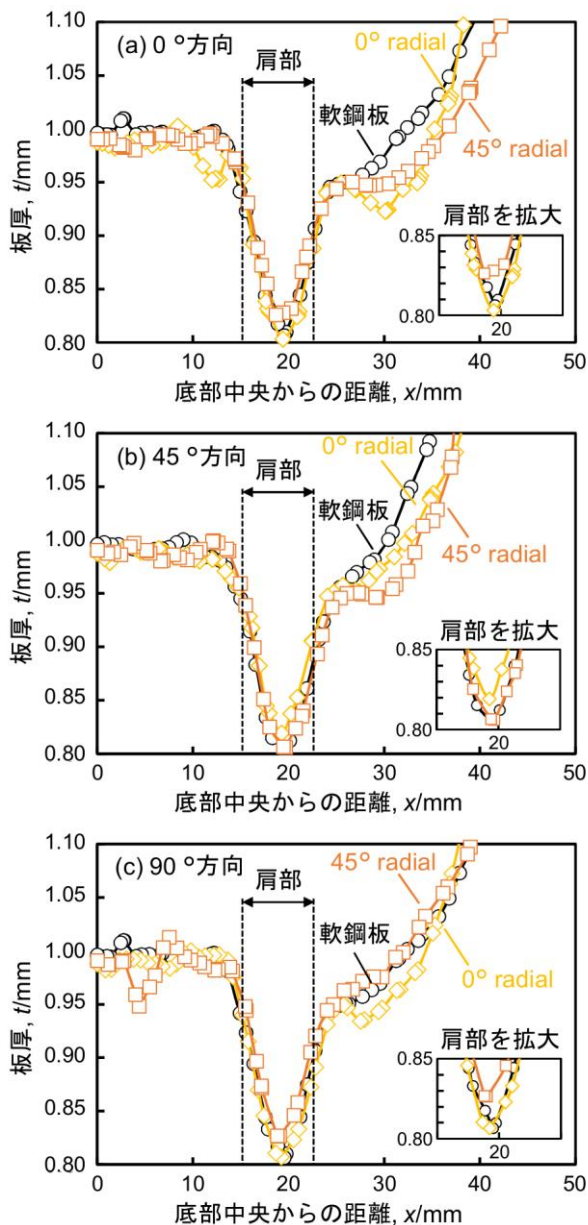


図7 0°radial材, 45°radial材の板厚分布

4.3 部分高強度材の深絞り成形品強度

軟鋼板と高張力鋼板, 部分高強度材の深絞り成形品強度を圧縮荷重により評価した. 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 で圧縮した. 得られた圧縮荷重-ストローク曲線を図 8 に示す. 部分高強度部の有無, 範囲によって荷重-ストローク曲線の形状が大きく異なる. 部分高強度材の中では 3 laps 材の圧縮荷重が最も大きく, 高張力鋼板の圧縮荷重とほぼ同程度であった. このことから, 部分高強度化によって, 軟鋼板の成形性および成形品強度をともに向上できることがわかった. しかし, 部分高強度材の最大圧縮荷重を比較すると, 3 laps 材 > 0°radial 材 > 軟鋼板 = 1 lap 材 > 2 laps 材であり,

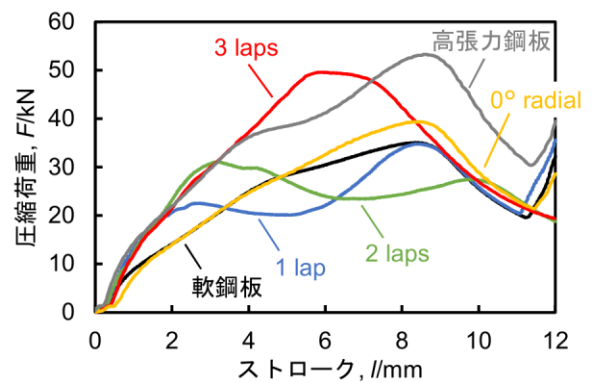


図8 圧縮荷重-ストローク曲線 (実験)

高強度部の導入がそのまま成形品強度の向上に寄与したとは言えない.

4.4 部分高強度材の有限要素解析

部分高強度部配置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, Simufact Forming 2021.1 を用いて部分高強度材の有限要素解析を行った. 有限要素解析は, 部分高強度化する熱処理プロセスと深絞り成形・圧縮の変形プロセスに分け, 円形配置は 2 次元軸対称モデルで, 放射状配置は 1/8 対称モデルで行った.

熱処理プロセスでは, 高温の物体からの熱伝達を仮定することでレーザー局所焼入れを模擬した (図 9). 解析に必要な高温物体の温度や熱伝達率については, 2 色放射温度計により測定したレーザー照射時の表面温度-時間のデータから同定した. さらに, 材料物性値計算ソフトウェア JMatPro を用いて, 材料組成の情報をもとに相変態解析に必要なパラメータである A3 温度, A1 温度, Ms 点, Mf 点および TTT 線図を出力し, 相変態とそれに伴う局所的な材料特性の変化を変形プロセスに反映した. ここでは軟鋼板の急速加熱・冷却プロセスで確認できたフェライト, オーステナイト, マルテンサイトの 3 相のみを考慮した.

変形プロセスでは, 部分高強度材の深絞り成形と圧縮試験の解析を行った. 図 10 は圧縮シミュレーションにより得られた圧縮荷重-ストローク曲線である. 圧縮荷重が単調増加する軟鋼板, 0°radial 材および 3 laps 材, 早期に荷重の低下が起こる 1 lap 材と 2 laps 材といった実験の圧縮荷重-ストローク曲線の特徴を良く再現できている. 2 laps 材と 3 laps 材の圧縮変形前後の 2 次元断面形状を図 11 に示す.

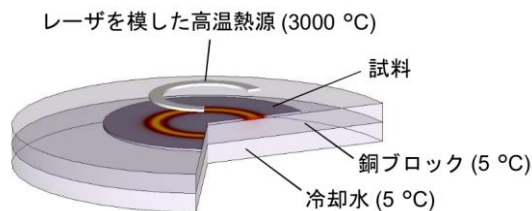


図 9 熱処理プロセスで用いた解析モデル

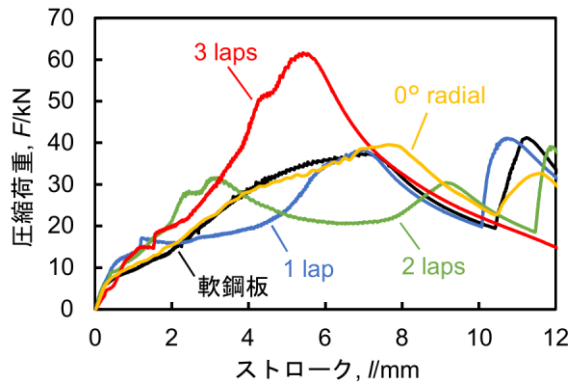


図 10 圧縮荷重-ストローク曲線 (シミュレーション)

図中のカラーはマルテンサイト率を表しており、赤い色がマルテンサイト率の高い領域、すなわち高強度部に対応する。1 lap 材および 2 laps 材は高強度-低強度部の境界で折れ曲がりが生じており、導入した高強度部が変形の抵抗とならず、成形品強度の向上に寄与していないことがわかる。一方で、3 laps 材は高強度部で折れ曲がりが生じており、その結果成形品強度が向上したと考えられる。以上より、円筒絞り成形において成形性・成形品強度を向上させるには、パンチ肩部近傍を円形かつ広範囲に高強度化することが有効であることが明らかとなった。

5. まとめ(結言)

レーザ局所焼入れによる部分高強度化が軟鋼板の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) レーザを用いた局所焼入れにより、部分的な高強度化を達成できた。また、レーザ照射経路を変えることで、円形・放射状に高強度部を配置した試料を作製した。
- 2) 円形・放射状といった高強度部の配置にかかわらず、部分高強度化によって限界絞り比が向上した。部分高強度材の中では 3 laps 材の圧縮荷重が最も大きく、高張力鋼板の圧縮荷重と同程度であった。この結果は、部分高強度化によってプレス成形性と

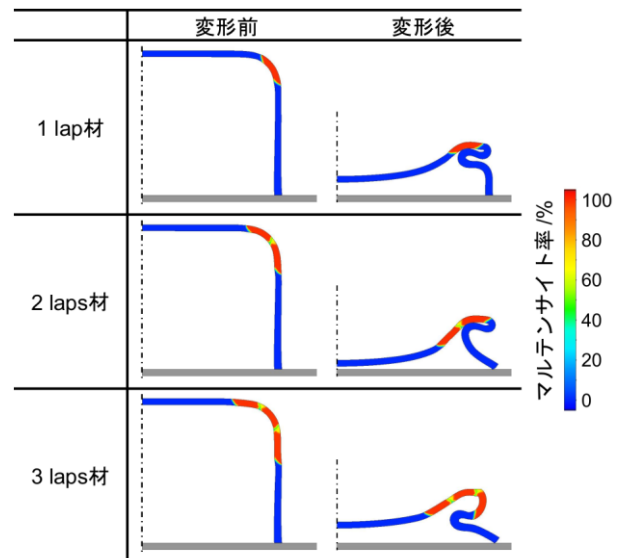


図 11 圧縮変形前後の 2 次元断面形状

成形品強度がともに向上することを示している。

3) 部分高強度材の有限要素法解析により、実験の圧縮荷重-ストローク曲線の傾向を精度良く再現できた。圧縮変形挙動を調べた結果、3 laps 材は導入した高強度部が圧縮変形の抵抗となったため、成形品強度が向上したことがわかった。

謝辞

本研究は、公益財団法人金型技術振興財団令和 4 年度研究開発助成および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。記して謝意を表する。

6. 参考文献等

- 1) 高橋: ふえらむ, 7 (2002) 34.
- 2) 小嶋: 塑性と加工, 46 (2005) 595.
- 3) X. Bano: Proc. of Mechanical working and steel processing conference, 35 (1998) 673.
- 4) 丸紅情報システムズ株式会社: 塑性と加工, 53 (2012), 917.
- 5) 渡部: 塑性と加工, 33 (1992) 396.
- 6) F.Vollertsen, K.Lange: Annals of the CIRP, 47 (1998) 181.
- 7) 西脇, 金武: 軽金属, 55 (2005) 33.
- 8) M.Geiger, M.Merklein: Prod. Eng. Res. Devel., 3 (2009) 401.
- 9) 町田, 中川: 塑性と加工, 16 (1975) 14.